



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TRABAJO DE FINAL DE GRADO

**Grado en Ingeniería Eléctrica**

**ESTUDIO DEL REAPROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE  
LAS BATERÍAS PROCEDENTES DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS  
FUERA DE USO.**



**Autor/a:** Albert Clements Cid

**Director/a:** Jorge El Mariachet Carreño

**Convocatoria:** junio 2021

# Contenido

Resumen.....	4
Abstract .....	5
Glosario .....	6
Índice de Ilustraciones .....	7
Índice de tablas .....	8
1. Introducción .....	9
2. Objetivos .....	10
3. Transición energética .....	11
4. Situación actual del mercado de vehículos eléctricos .....	16
3.1 El vehículo eléctrico como parte de la transición energética .....	16
3.2 Situación actual del vehículo eléctrico .....	17
3.3 Las baterías en el mercado del vehículo eléctrico .....	19
5. La batería.....	20
4.1. Características básicas.....	20
4.2 Conceptos y parámetros importantes de la batería .....	21
4.3 Tipologías .....	24
4.3.1 Batería de Plomo-Ácido.....	25
4.3.2 Baterías de níquel-hidruro metálico .....	27
4.3.3 Baterías de Ion-Litio .....	29
4.3.4. Tipos de baterías de litio .....	31
4.3.5. Comparativas Baterías electroquímicas.....	36
5. La batería de un VE.....	36
5.1 Estructura de la batería de un VE.....	37
5.1.1 Celda de ion de litio.....	37
5.1.2 Módulo de baterías .....	39
5.1.3 Pack de baterías .....	41
5.2 Reciclaje y reutilización de la batería de iones de litio en la actualidad .....	41
6. Contexto Legislativo .....	43
7. Gestión de las baterías .....	45
8. Reciclaje y tratamiento de fin de vida de baterías.....	48
9. Reutilización de las baterías .....	52
9.1 Test previos a la reutilización .....	53
10. Propuesta del proyecto .....	55
10.1 Métodos de estimación del estado de la batería.....	56
10.2 Procedimiento propuesto .....	59



10.3	Aplicabilidad de las baterías.....	61
10.3.1	Control de Frecuencia .....	61
10.3.2	Traslado de la demanda o <i>Supply Shift</i> .....	62
10.3.3	Estabilidad del sistema.....	62
11.	Cadena de valor entorno a la batería en su segunda vida .....	63
12.	Análisis del impacto ambiental .....	66
13.	Conclusiones.....	70
	Bibliografía .....	71



## Resumen

Este Trabajo Final de Grado pretende analizar la viabilidad de un reaprovechamiento energético de las baterías de litio procedentes de vehículos fuera de uso. En el contexto actual de transición hacia escenario con mayor presencia de recursos renovables en los sistemas energético, es cada vez más necesario la aplicación de sistemas de almacenamiento para mantener la calidad y la accesibilidad de la energía, siendo la tecnología de iones de litio idónea para este tipo de aplicaciones debido a sus numerosas ventajas.

Para entender la cadena de valor de las baterías de vehículos fuera de uso, se presentará el marco normativo actual, la gestión de estas a nivel nacional, el reciclaje llevado a cabo fuera del país y la reutilización; la cual aún se encuentra en un estado naciente.

Para la propuesta de reaprovechamiento también será necesario conocer el estado de salud de las baterías una vez llegan a los centros de residuos. Se describirán algunos de los métodos ya sean experimentales o basados en modelos de predicciones, además de enumerar algunas de las aplicaciones a nivel de red en las que podrían utilizarse las baterías en su segunda vida.

Se pretende proporcionar un estudio previo para futuras propuestas más concretas de la aplicabilidad de baterías de segundo uso en sistemas de almacenamiento cada vez más necesarios ante el paradigma actual, además de incorporar una propuesta energética en la cadena de valor actual entorno a la segunda vida de las baterías con el fin de disminuir las emisiones de gases efecto invernadero y crear una economía circular.



## Abstract

This Final Degree Project aims to analyze the viability of the reuse of energy deriving out of lithium batteries that have been taken from end-of-life vehicles. In the current context of the transition towards a scenario with a greater presence of renewable resources in energy systems, it is increasingly necessary to apply storage systems to maintain the quality and accessibility of energy. The lithium ion technology is ideal for this type of application due to its many advantages.

To understand the value chain of life batteries, their management at the national level, and the current regulatory framework, a study of their recycle and reuse, outside the country will be presented. This recycling and reuse are still in a nascent stage.

For the reuse proposal it will also be necessary to know the health status of the batteries once they arrive at the waste centers.

Some of the methods of determining this are described. There are experimental methods based on prediction models, in addition to listing some of the applications at the red level in which they could use the batteries in their second life.

This is intended to provide a preliminary study for future more concrete proposals of the applicability of second-use batteries in storage systems as they are increasingly necessary in the current paradigm, in addition to incorporating an energy proposal in the current value chain of the second life batteries in order to reduce greenhouse gas emissions and create a circular economy.



## Glosario

**BESS:** Battery Energy Storage System

**BMS:** Battery Management System

**DOD:** Depth of Discharge

**CAT:** Centros de Tratamiento de VFU

**DGT:** Dirección General de Tráfico

**EIS:** Electromechanical Impedance Spectroscopy

**ESS:** Energy Storage System

**EV:** Electric Vehicle

**GEI:** Gases Efecto Invernadero

**IEA:** International Energy Agency

**PHEV:** Plug-in Hibrid Electric Vehicle

**PNIEC:** Plan Nacional Integrado de Energía y Clima

**RUL:** Remaining Useful live

**RLC:** Circuito que cuenta con resistor, bobina y capacitor

**SGD7:** Sustainable Development Goals Report

**SOC:** State of Charge

**SOH:** State of Health

**USABC:** United States Advances Battery Consortium

**VFU:** Vehículo Fuera de Uso

**V2G:** Vehicle to Grid

**ZEV:** Zero Emissions Vehicle



## Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Consumo energético por sectores en España en el año 2018.....	9
Ilustración 2: Transición a un nuevo modelo energético.....	12
Ilustración 3: Producción renovable y no renovable (2011-2020).....	12
Ilustración 4: Medidas contenidas en el bloque de la dimensión de la descarbonización.....	13
Ilustración 5: Medidas destinadas a la dimensión de la eficiencia energética.....	14
Ilustración 6: Medidas destinadas a la seguridad energética.....	15
Ilustración 7: Medidas destinadas al mercado interior de la energía y a la investigación, innovación y competitividad.....	15
Ilustración 8: Matriculación de coches eléctricos en el mundo (2010-2020).....	18
Ilustración 9: Matriculación de coches eléctricos en el Europa (2010-2020).....	18
Ilustración 10: Modelos de VE más vendidos en Europa.....	19
Ilustración 11: Previsión del mercado de la batería de iones de litio.....	20
Ilustración 12: Proceso de carga en una batería.....	21
Ilustración 13: Curva de descarga de una batería.....	22
Ilustración 14: Estado del desarrollo tecnológico de las baterías de tracción de vehículos eléctricos... 25	25
Ilustración 15: Ciclo de carga y descarga de una batería plomo-ácido.....	25
Ilustración 16: Baterías de níquel-metal hidruro.....	28
Ilustración 17: Proceso de carga y descarga de una batería Ion-Litio.....	30
Ilustración 18: Características de la batería de óxido de cobalto de litio.....	32
Ilustración 19: Características de la batería manganeso-litio.....	33
Ilustración 20: Características de la batería de óxido de cobalto-manganeso-níquel.....	34
Ilustración 21: Características de la batería de fosfato de hierro-litio.....	35
Ilustración 22: Comparativa de las baterías de litio es un estadio más cercano del mercado.....	35
Ilustración 23: Célula, Módulo y paquete de baterías.....	37
Ilustración 24: Celda cilíndrica usada por el fabricante “Tesla”.....	38
Ilustración 25: Celda prismática LiPo en venta.....	38
Ilustración 26 e Ilustración 27: Celda laminada y ficha técnica de celda laminada que utiliza el Nissan Leaf.....	39
Ilustración 28: Módulo del modelo de VE Nissan Leaf.....	40
Ilustración 29: Paquete de baterías de alto voltaje del <i>Nissan Leaf</i> .....	41
Ilustración 30: Diagrama general de las operaciones de tratamiento de los VFU.....	46
Ilustración 31: Diagrama de flujo del proceso pirometalúrgico.....	49
Ilustración 32: Diagrama de flujo del proceso hidrometalúrgico.....	50
Ilustración 33: Pasos a seguir en el test de capacidad propuesto por USABC.....	54
Ilustración 34: <i>Proceso de triaje propuesto en los centros CAT</i> .....	56
Ilustración 35: Capacidad en función de la resistencia interna en una batería.....	57
Ilustración 36: Capacidad estimada de una batería de litio probada durante 800 ciclos.....	58
Ilustración 37: Diagrama de Flujo del algoritmo de estimación del SOC del batería basado en un modelo electroquímico.....	59
Ilustración 38: Esquema de bloques del modelo electromecánico para analizar el estado de salud de las baterías en diferentes aplicaciones.....	60
Ilustración 39:.....	62
Ilustración 40: <i>Cadena de valor actual</i> .....	63
Ilustración 41: Cadena de valor propuesta.....	64
Ilustración 42: Costes por kWh rehabilitado PHEV (izquierda) y EV (derecha).....	65
Ilustración 43: Potencia instalada nacional (MW).....	66
Ilustración 44: Vehículos eléctricos matriculados 2013-2020.....	67
Ilustración 45: Características del uso de una batería de segundo para 4 aplicaciones diferentes.....	67
Ilustración 46: Nº de ciclos y capacidad acumulada descargada para cada aplicación de segundo uso.....	68



## Índice de tablas

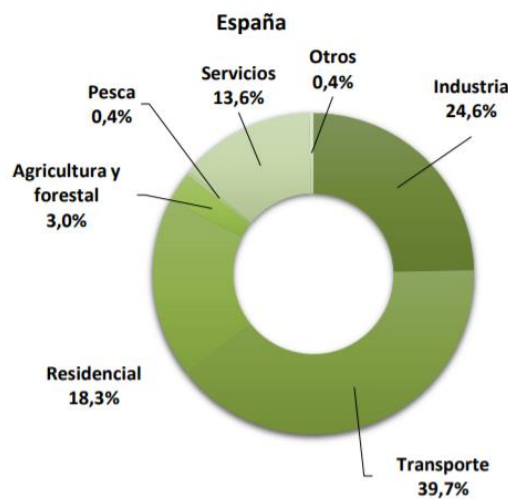
<b>Tabla 1: Políticas del VE en distintos territorios en 2019.</b> .....	<b>17</b>
<b>Tabla 2: Características de la batería de óxido de cobalto de litio.</b> .....	<b>32</b>
<b>Tabla 3: Características de la batería manganeso-litio.</b> .....	<b>33</b>
<b>Tabla 4: Características de la batería de óxido de cobalto-manganeso-níquel.</b> .....	<b>34</b>
<b>Tabla 5: Características de la batería de fosfato de hierro-litio.</b> .....	<b>35</b>
<b>Tabla 6: Comparativa de baterías.</b> .....	<b>36</b>
<b>Tabla 7: Especificaciones técnicas de un módulo procedente de un Nissan Leaf del 2014.</b> .....	<b>40</b>
<b>Tabla 8: Procedimientos de manipulación y desmontaje de la batería de un VE.</b> .....	<b>47</b>
<b>Tabla 9: Procedimientos de acondicionamiento de la batería de un VE.</b> .....	<b>48</b>
<b>Tabla 10: Ventajas e inconvenientes del proceso pirometalúrgico e hidrometalúrgico.</b> .....	<b>51</b>
<b>Tabla 11: Proyectos puestos en marcha orientados a la reutilización de baterías.</b> .....	<b>53</b>





# 1. Introducción

Ante el paradigma actual en el que se reconocen ampliamente la necesidad de acciones urgentes y más intensivas con el cambio climático. El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) persigue reducir un 23% la emisión de gases efecto invernadero respecto a 1990. A raíz de esto las políticas en los últimos años han ido orientadas hacia un nuevo modelo energético donde los elementos clave son la electrificación de la economía, la máxima integración de renovables, la eficiencia energética y la seguridad de suministro. Por otro lado, el transporte es el sector que más consume respecto al resto de sectores y transformar el sector de movilidad y transporte es uno de los objetivos principales de cara a 2050, es por eso que las políticas de implementación del vehículo eléctrico se encuentran en auge y se espera que, en 2030, el stock de VE alcance los 145 millones, representando el 7% de la flota de vehículos en ese año (IEA 2021).



**Ilustración 1:** Consumo energético por sectores en España en el año 2018.  
*Fuente: Eurostat.*

El incremento previsto de VE en los siguientes años implica un aumento en el uso de baterías electroquímicas de ion de litio, las cuales son la tecnología con más presencia en el mercado del vehículo eléctrico actual. Las baterías de litio actualmente presentan numerosas ventajas respecto otras baterías como una mayor densidad energética o ciclos de vida más largos; resultando idóneas para un rango muy amplio de aplicaciones. A pesar de sus numerosas ventajas presenta algunos inconvenientes a los que hacerle frente como puede ser su gran impacto ambiental en su fabricación, fin de vida y durante el reciclaje, además de resultar la tecnología más costosa respecto otras baterías electroquímicas.

Teniendo en cuenta que, según la USABC u otros fabricantes como Nissan, la batería termina su primera vida a los 8 años de uso en el sector de la automoción, la actual transición a un modelo con mayor presencia de renovables y la gran aplicabilidad con la que cuentan las baterías de litio. Estas resultan ser un habilitador importante para poder llevar al sector del

transporte y de la potencia a la neutralidad de gases efecto invernadero. Además, abre las puertas a un nuevo futuro mercado basado en la economía circular, donde ya se están desarrollando cada vez más proyectos como es el caso de *Electric Power*, el cual propone la reutilización de baterías procedentes de VE para apoyar a las energías renovables cada vez más presente en el sistema eléctrico.

## 2. Objetivos

Los objetivos a lo largo de este trabajo serán:

- Estudio del despliegue del vehículo eléctrico en los últimos años y su previsión de cara al futuro.
- Análisis de las baterías más utilizadas en el sector de la automoción.
- Sistema de gestión de las baterías procedentes de VFU, procesos de reciclaje y estado del arte sobre la reutilización.
- Descripción de algunos de los métodos utilizados para conocer el estado de salud de la batería y posibles aplicaciones de segundo uso.
- Realizar propuesta de reaprovechamiento energético.



### 3. Transición energética

Debido a la intensa quema de combustibles fósiles y la consiguiente liberación a la atmósfera de grandes cantidades de gases efecto invernadero desde la Revolución Industrial hasta la actualidad, nos encontramos en una situación a nivel mundial de emergencia climática. Ante esta situación aparece el concepto de transición energética, este concepto es llevado a cabo cuando se produce el cambio desde un sistema económico basado en una tecnología y unas fuentes específicas de energía a otro sistema basado en diferentes tecnologías más eficientes y fuentes de energía limpia. De cara a esta transición energética 55 países, entre ellos la UE, establecen un compromiso con las políticas energéticas y de cambio climático en 2015 en el acuerdo de París, con el fin de cumplir una serie de objetivos energéticos europeos de cara al año 2030 [1]:

- 40% reducción de emisiones de GEI frente a los niveles de 1990.
- 32% de energía renovable en la UE.
- 32,5% de mejora de la eficiencia energética
- 15% para interconexiones eléctricas

Diversos países han presentado planes nacionales integrales de acción por el clima, entre los objetivos de estos se encuentran objetivos como la reducción de emisiones respecto 1990, aumento de renovables y mejora de la eficiencia energética, además para el cumplimiento de estos objetivos se impulsa el fomento de la movilidad sostenible a través del vehículo eléctrico y el aprovechamiento de las sinergias con energías renovables y autoconsumo eléctrico. En el caso de España; se publicó el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC 2021-2030) con el fin de conseguir una economía prácticamente descarbonizada en 2050. Los objetivos a grandes rasgos son:

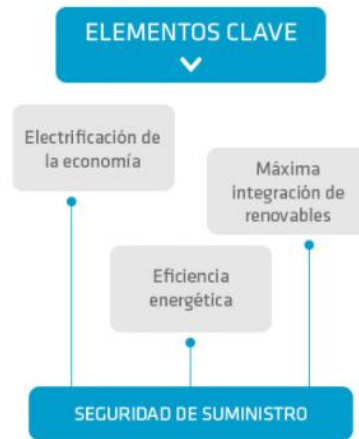
- Una reducción de emisiones del 23% respecto de los niveles de 1990.
- Una cuota de renovables del 42% sobre la energía final.
- Una mejora de la eficiencia energética del 39,5%.
- Previsión de las renovables en el mix eléctrico alcance el 74% en el 2030.

Las medidas planteadas del PNIEC, 2021-2030, estiman reducir las emisiones totales brutas de GEI pasen de 319,3 MtCo<sub>2</sub>-eq previstos para el año 2020 a 221,8 MtCo<sub>2</sub>-eq en 2030. Siendo el sector de la generación eléctrica y movilidad y transporte, los sectores que reducen más emisiones en este periodo. Se pretende una transformación drástica del modelo de movilidad



y transporte, y una reconducción del sistema energético español hacia un sistema energético más eficiente y basado en energías renovables.

## Transición a un nuevo modelo energético

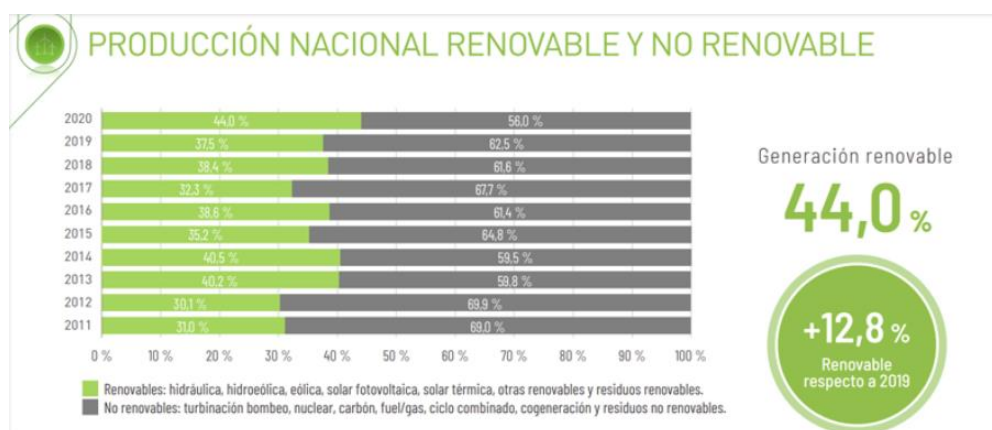


**Ilustración 2:** Transición a un nuevo modelo energético.

Fuente: <https://www.ree.es/es/red21/un-papel-protagonista-en-la-transicion-energetica>.

Las medidas y políticas tomadas dentro del Plan de Acción se aplican a la descarbonización, eficiencia energética, seguridad energética, mercado interior de la energía y al sector de la investigación, innovación y competitividad.

Para lograr los objetivos de la descarbonización es necesario un importante desarrollo de las renovables en general. Así con las medidas aplicadas para la descarbonización se espera que las renovables alcancen un 74% de la producción en el sistema eléctrico. En el último año se ha alcanzado un máximo histórico; alcanzando un 44% de producción renovable, un 6,5% más que en el año 2019.



**Ilustración 3:** Producción renovable y no renovable (2011-2020).

Fuente: <https://www.smartgridsinfo.es/2021/03/18/2020-ano-mas-verde-espana-desde-existen-registros-44-generacion-renovable>.

Los mecanismos de actuación destinados al desarrollo de nuevas instalaciones de generación eléctrica con renovables abordadas por el PNIEC (p86), con el objetivo de alcanzar una capacidad adicional de generación eléctrica con renovables de 59 GW son los siguientes:

- Convocatorias de subasta para la asignación de un régimen retributivo específico.
- Participación local en proyectos renovables.
- Programas específicos para tecnologías en desarrollo
- Programa específico para territorios extrapeninsulares.

Además, con el fin de impulsar la transición hacia un sistema eléctrico descarbonizado se promueve el desarrollo del almacenamiento como la gestión de la demanda para favorecer la integración de renovables en el sector eléctrico.

Existe otro grupo de medidas destinadas a la descarbonización, en el cual se tiene como objetivo alcanzar el 28% de renovables en el transporte (el doble de lo exigido por la Unión Europea) de cara a 2030, siendo los principales ejes de descarbonización en el sector del transporte el despliegue de la movilidad eléctrica y el impulso a la fabricación y uso de biocarburantes avanzados

Las medidas del primer bloque se muestran en la siguiente figura:

3.1 DIMENSIÓN DE LA DESCARBONIZACIÓN	
Medida 1.1.	Desarrollo de nuevas instalaciones de generación eléctrica con renovables
Medida 1.2.	Gestión de la demanda, almacenamiento y flexibilidad
Medida 1.3.	Adaptación de redes eléctricas para la integración de renovables
Medida 1.4.	Desarrollo del autoconsumo con renovables y la generación distribuida
Medida 1.5.	Incorporación de renovables en el sector industrial
Medida 1.6.	Marco para el desarrollo de las energías renovables térmicas
Medida 1.7.	Biocombustibles avanzados en el transporte
Medida 1.8.	Promoción de gases renovables
Medida 1.9.	Plan de renovación tecnológica en proyectos ya existentes de generación eléctrica con energías renovables
Medida 1.10.	Promoción de la contratación bilateral de energía eléctrica renovable
Medida 1.11.	Programas específicos para el aprovechamiento de la biomasa
Medida 1.12.	Proyectos singulares y estrategia para la energía sostenible en las islas
Medida 1.13.	Comunidades energéticas locales
Medida 1.14.	Promoción del papel proactivo de la ciudadanía en la descarbonización
Medida 1.15.	Estrategia de Transición Justa
Medida 1.16.	Contratación pública de energía renovable
Medida 1.17.	Formación de profesionales en el sector de las energías renovables
Medida 1.18.	Revisión y simplificación de procedimientos administrativos
Medida 1.19.	Generación de conocimiento, divulgación y sensibilización
Medida 1.20.	Régimen europeo de comercio de derechos de emisión
Medida 1.21.	Reducción de emisiones de GEI en los sectores agrícola y ganadero
Medida 1.22.	Reducción de emisiones de GEI en la gestión de residuos
Medida 1.23.	Reducción de emisiones de GEI relacionadas con gases fluorados
Medida 1.24.	Sumideros forestales
Medida 1.25.	Sumideros agrícolas
Medida 1.26.	Fiscalidad

**Ilustración 4:** Medidas contenidas en el bloque de la dimensión de la descarbonización.

*Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.*

En el segundo bloque del Plan de Acción 2021-2030 se contempla el objetivo nacional de eficiencia energética. La Unión Europea espera una eficiencia energética alrededor del 32,5%

en 2030, mientras que lo esperado a nivel nacional por el PNIEC 2021-2030 es alcanzar una mejora de la eficiencia del 39,5%.

Para cumplir el objetivo de la eficiencia energética se establecen una serie de medidas aportadas en la figura 4, las cuales pretenden apoyar los siguientes objetivos:

- **Objetivo acumulado de ahorro de energía:** Este objetivo supone la consecución de ahorros nuevos y adicionales cada año por importe de 669 ktep/año.
- **Estrategia a largo plazo de renovación de edificios:** Se tiene como objetivo mejorar o dotar de envolvente térmica a un total de 1.200.000 viviendas a lo largo de la década y la renovación de instalaciones térmicas y ACS de 300.000 viviendas/año.
- **Objetivo de eficiencia energética en los edificios públicos:** Se pretende renovar energéticamente una superficie de 300.000 m<sup>2</sup>/año de edificios público y la renovación energética del 3% de la superficie edificada y climatizada de las Administraciones Autonómicas y Locales.

3.2 DIMENSIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA	
Medida 2.1.	Zonas de bajas emisiones y medidas de cambio modal
Medida 2.2.	Uso más eficiente de los medios de transporte
Medida 2.3.	Renovación del parque automovilístico
Medida 2.4.	Impulso del vehículo eléctrico
Medida 2.5.	Mejoras en la tecnología y sistemas de gestión de procesos industriales
Medida 2.6.	Eficiencia energética en edificios existentes del sector residencial
Medida 2.7.	Renovación del equipamiento residencial
Medida 2.8.	Eficiencia energética en la edificación del sector terciario
Medida 2.9.	Eficiencia energética en equipos generadores de frío y grandes instalaciones de climatización del sector terciario e infraestructuras públicas
Medida 2.10.	Eficiencia energética en explotaciones agrarias, comunidades de regantes y maquinaria agrícola
Medida 2.11.	Promoción de los servicios energéticos
Medida 2.12.	Sector público: responsabilidad proactiva y contratación pública eficiente energéticamente
Medida 2.13.	Auditorías energéticas y sistemas de gestión
Medida 2.14.	Formación de profesionales en el sector de la eficiencia energética
Medida 2.15.	Comunicación e información en materia de eficiencia energética
Medida 2.16.	Otras medidas para promover la eficiencia energética: la transición en la cogeneración de alta eficiencia
Medida 2.17.	Medidas financieras: Fondo Nacional de Eficiencia Energética

**Ilustración 5:** Medidas destinadas a la dimensión de la eficiencia energética.

*Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.*

El tercer bloque destinado a la dimensión de la seguridad energética tiene como objetivo principal asegurar la diversificación del mix energético nacional, además de garantizar la seguridad del abastecimiento.

Se quiere llegar a estos objetivos incrementando la flexibilidad del sistema aprovechando las diferentes posibilidades del sector de consumidores, profundizando en la preparación frente a posibles interrupciones o limitaciones de suministro y maximizando la diversificación, tanto de fuentes de energía como de países origen de suministro. Las medidas correspondientes a la seguridad energética se muestran a continuación:

3.3 DIMENSIÓN DE LA SEGURIDAD ENERGÉTICA	
Medida 3.1.	Mantenimiento de existencias mínimas de seguridad de productos petrolíferos y gas
Medida 3.2.	Reducción de la dependencia del petróleo y el carbón en las islas
Medida 3.3.	Puntos de recarga de combustibles alternativos
Medida 3.4.	Impulso a la cooperación regional
Medida 3.5.	Profundización en los planes de contingencia
Medida 3.6	Planificación para la operación en condiciones de seguridad de un sistema energético descarbonizado

**Ilustración 6:** Medidas destinadas a la seguridad energética.  
*Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.*

El cuarto bloque del PNIEC 2021-2030 aporta medidas con el fin de disponer de un mercado más competitivo, transparente, flexible con un alto grado de interconexión. Mientras que el último bloque se refiere a la dimensión de investigación, innovación y competitividad, donde los gobiernos como promotores y agentes financieros tienen un papel clave promoviendo la investigación y el desarrollo orientado y facilitando la introducción y adopción de nuevas tecnologías respetuosas con el medio ambiente.

3.4 DIMENSIÓN DEL MERCADO INTERIOR DE LA ENERGÍA	
Medida 4.1.	Aumento de la interconexión eléctrica con Francia
Medida 4.2.	Aumento de la interconexión eléctrica con Portugal
Medida 4.3.	Infraestructuras de transporte de electricidad distintas de los "Projects of Common Interest" (PCIs)
Medida 4.4.	Integración del mercado eléctrico
Medida 4.5.	Protección de los consumidores de electricidad e incremento de la competencia
Medida 4.6.	Acceso a datos
Medida 4.7.	Integración del mercado gasista
Medida 4.8.	Protección de los consumidores de gas
Medida 4.9.	Mejora de la competitividad del sector gasista minorista
Medida 4.10.	Plan de desarrollo de gestión de la demanda de gas
Medida 4.11.	Lucha contra la pobreza energética
3.5 DIMENSIÓN DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y COMPETITIVIDAD	
Medida 5.1.	Acción Estratégica en Energía y Clima
Medida 5.2.	Implementación del SET-Plan
Medida 5.3.	Red de Excelencia en Energía y Clima
Medida 5.4.	Incremento, coordinación, mejora y uso eficiente de infraestructuras y equipamientos científicos y tecnológicos en energía y clima
Medida 5.5.	Compra pública de innovación verde
Medida 5.6.	Fortalecimiento del capital riesgo público para la transferencia de tecnología en energía y clima
Medida 5.7.	Nuevos instrumentos de apoyo a la investigación y la innovación en energía y clima
Medida 5.8.	Innovación social por el clima
Medida 5.9.	Reducción de trámites burocráticos y cargas administrativas
Medida 5.10.	Relanzar la Fundación Ciudad de la Energía, CIUDEN
Medida 5.11.	Sistema de Información sobre Ciencia, Tecnología e Innovación para el seguimiento de la financiación
Medida 5.12.	I+i+c para la adaptación del sistema energético español al cambio climático
Medida 5.13.	Programas singulares a largo plazo en temas científicos y tecnológicos que sean estratégicos en el área de energía y clima
Medida 5.14.	Aumentar la participación española en los programas de financiación de la investigación y la innovación europeos
Medida 5.15.	Apoyar la participación de grupos de investigación españoles en foros internacionales de energía y clima
Medida 5.16.	Promocionar la iniciativa Misión Innovación
Medida 5.17.	Mecanismos de financiación de innovación europeos
Medida 5.18.	Cooperación internacional

**Ilustración 7:** Medidas destinadas al mercado interior de la energía y a la investigación, innovación y competitividad.  
*Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.*

A la hora de hablar de la reutilización de las baterías, de los 5 bloques del PNIEC mencionados, resultan de especial interés, la dimensión de la descarbonización y la eficiencia energética.

Tal y como se ha comentado antes la dimensión de la descarbonización tiene como uno de los objetivos principales transformar el modelo de movilidad y transporte, es apreciable que elaborar un plan para esa gran cantidad de baterías para no ser desechadas en un futuro con el incremento de vehículo eléctrico previsto, es una gran forma de extraer valor añadido de estas y colaborar con la descarbonización del planeta. Además, puede influir positivamente en la decisión del consumidor haciendo que la opción de comprar un vehículo eléctrico antes que de combustión resulte una opción más atractiva para el cliente habitual, y por lo tanto se colabore con la electrificación de la movilidad de una forma indirecta.

Reutilizar las baterías para aplicarlas a aplicaciones de almacenamiento estacionario; también puede garantizar un sistema energético más eficiente y flexible, puesto que los sistemas de almacenamiento tienen la capacidad de mejorar servicio como la generación y distribución ya sea limitando el consumo máximo procedente de la red o en el caso de generación; como es el caso del seguimiento de la carga, donde reaccionando a las fluctuaciones se mantiene el sistema equilibrado. Las baterías procedentes de vehículos pueden llegar a ser un factor clave para evolucionar hacia un sistema eléctrico basado en renovables y garantizar una mejor eficiencia energética.

## 4. Situación actual del mercado de vehículos eléctricos

### 3.1 El vehículo eléctrico como parte de la transición energética

Hoy en día se considera que uno de los desafíos más importantes es resolver el problema del calentamiento global. Ante esta problemática aparece el concepto de transición energética. Los procesos de transición energética se dan cuando se produce el cambio desde un sistema económico basado en una tecnología y unas fuentes específicas de energía a otro sistema basado en diferentes tecnologías y fuentes de energía.

De cara a esta transición energética 55 países, entre ellos la UE, establecen un compromiso con las políticas energéticas y de cambio climático en 2015 en el acuerdo de París, con el fin de reducir en el 2030 un 40% de sus emisiones de gases efecto invernadero respecto a 1990 [2]. Los países han presentado planes nacionales integrales de acción por el clima, entre los objetivos de estos se encuentran objetivos como la reducción de emisiones respecto 1990, aumento de renovables y mejora de la eficiencia energética, además para el cumplimiento de estos objetivos se impulsa el fomento de la movilidad sostenible a través del vehículo eléctrico y el aprovechamiento de las sinergias con energías renovables y autoconsumo eléctrico. En el caso de España; se publicó el PNIEC 2021-2030 [2].

Los vehículos eléctricos son una tecnología clave para reducir la contaminación del aire y una opción prometedora para contribuir a la transición energética. Los beneficios de los vehículos





eléctricos incluyen mejor eficiencia que los vehículos con motor de combustión interna y un gran potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero cuando se combinan con un sector de electricidad con bajas emisiones de carbono. Hasta la fecha, 17 países han anunciado objetivos de vehículos de emisión cero del 100% o la eliminación gradual de los vehículos con motor de combustión interna hasta 2050. A continuación, se muestra una tabla de las políticas más efectivas en el mundo relacionadas con el vehículo eléctrico:

		Canadá	China	Europa	India	Japón	Estados Unidos
<b>Regulación (vehículos)</b>	Mandato ZEV	SI	SI	NO	NO	NO	SI
	Estándares de economía de combustible	SI	SI	SI	SI	SI	SI
<b>Incentivos (vehículos)</b>	Incentivos fiscales	SI	SI	SI	SI	NO	SI
<b>Objetivos (vehículos)</b>	Mandato ZEV	SI	SI	SI	SI	SI	SI
<b>Políticas industriales</b>	Subsidios	SI	SI	NO	NO	SI	NO
<b>Regulación (cargadores)</b>	Estándares de hardware	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	Regulaciones de construcción	SI	SI	SI	SI	NO	SI
<b>Incentivos (cargadores)</b>	Incentivos fiscales	SI	SI	SI	SI	NO	SI
<b>Objetivo (cargadores)</b>		SI	SI	SI	SI	SI	SI

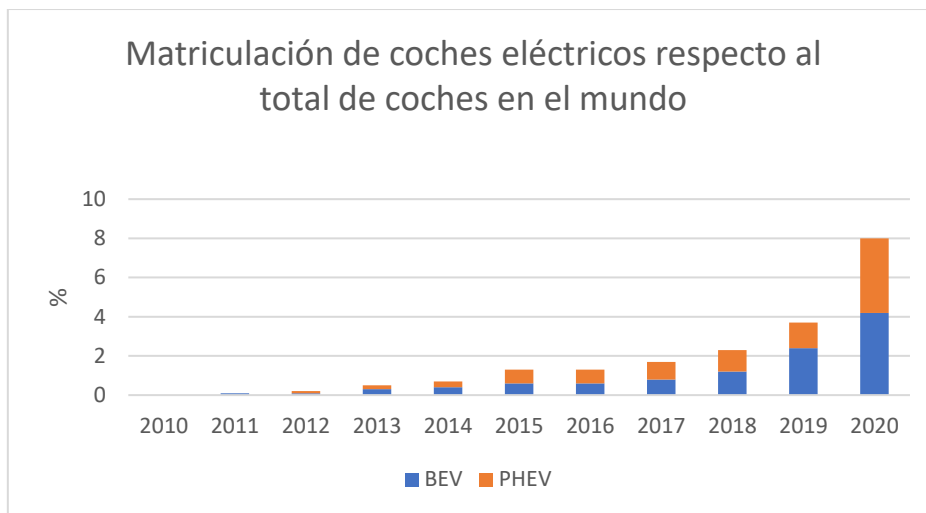
**Tabla 1:** Políticas del VE en distintos territorios en 2019.

Fuente: [3].

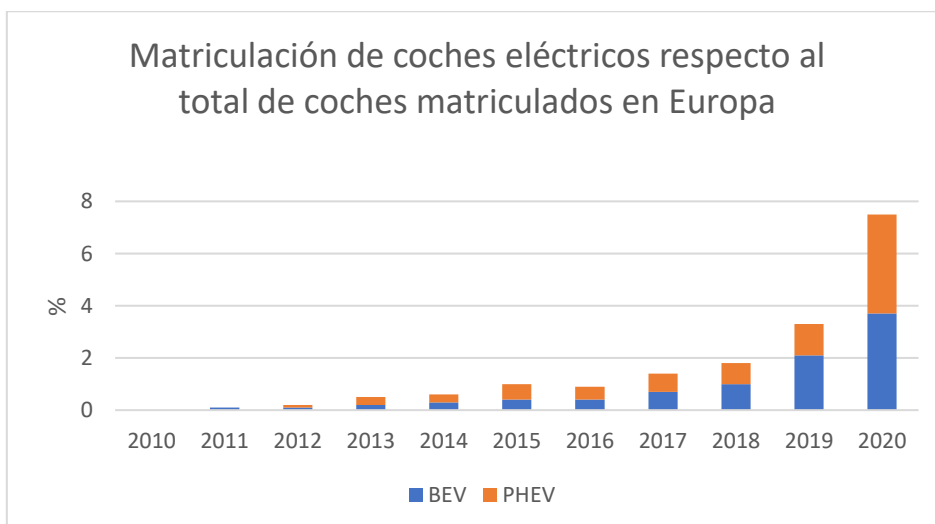
### 3.2 Situación actual del vehículo eléctrico

A medida que avanza el progreso tecnológico en la electrificación de vehículos de dos o tres ruedas, autobuses y camiones y crece el mercado para ellos, el uso de los vehículos eléctricos cada vez es mayor. La venta de automóviles eléctricos a nivel mundial en 2019 resultó ser de 7,2 millones, 2,1 millones por encima del año 2018 y representa un 8% del total de coches registrados actualmente en el mercado automovilístico a nivel mundial (Ilustración 8). A nivel europeo el coche eléctrico representa un 7,5% del total de coches registrados (Ilustración 9).

La estimulación del despliegue de vehículos eléctricos en los últimos años viene dada entre diversos motivos; por los anuncios de políticas ambiciosas, las cuales están provocando un cambio continuo de los subsidios directos a enfoques de política que se basan en medidas regulatorias y estructurales. Así pues, los mandatos de vehículos de cero emisiones y los estándares de ahorro de combustible han establecido señales claras y a largo plazo para el mercado de vehículos eléctricos, y para los consumidores apoyar esta transición de una manera económicamente sostenible.

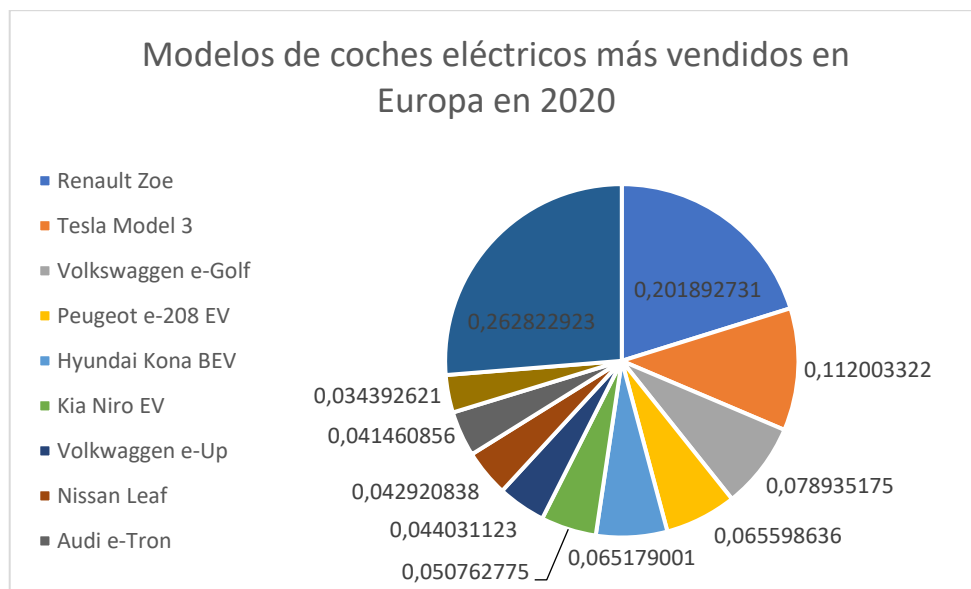


**Ilustración 8:** Matriculación de coches eléctricos en el mundo (2010-2020)  
Fuente: EAFO (European Alternative Fuels Observatory).



**Ilustración 9:** Matriculación de coches eléctricos en el Europa (2010-2020)  
Fuente EAFO (European Alternative Fuels Observatory).

Los modelos de coche eléctrico más vendidos a nivel europeo son Tesla Model 3 y Renault Zoe, alcanzando entre ambos modelos el 31,4% del mercado (Gráfico 3).



**Gráfico 3.**

**Ilustración 10:** Modelos de VE más vendidos en Europa.  
*Fuente EAFO (European Alternative Fuels Observatory).*

### 3.3 Las baterías en el mercado del vehículo eléctrico

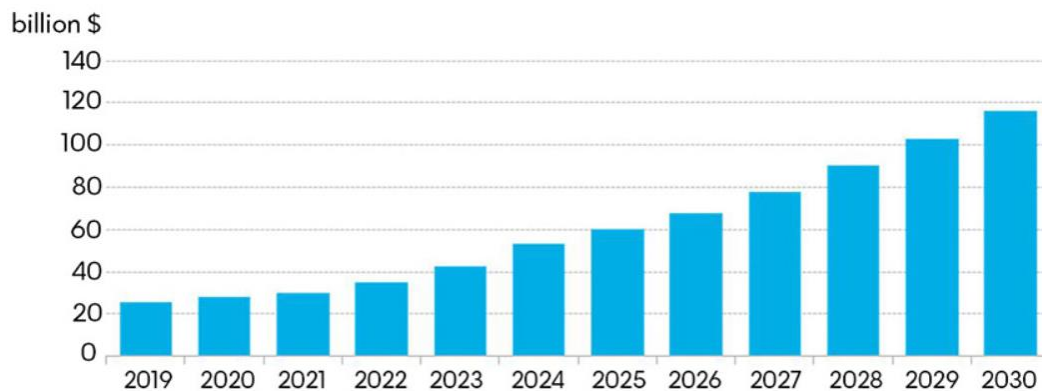
Con el tamaño proyectado del mercado mundial de VE (en particular los automóviles), la expansión de la capacidad de fabricación de baterías se verá impulsada en gran medida por la electrificación en el mercado de automóviles. Esto respalda el creciente consenso de que la electrificación de los automóviles será un factor crucial para reducir los costos unitarios de los paquetes de baterías de automóviles. Para 2030 se supone que los vehículos eléctricos de baterías alcanzarán un rango de conducción promedio de 350-400 km, equivalente a tamaños de 70-80 kWh [4].

El costo de las baterías para vehículos eléctricos está disminuyendo notablemente. Mientras que los paquetes de baterías ponderados por las ventas en 2019 fueron de un promedio de 156 USD/kWh, en 2010 resultaron ser de 1100 USD/kWh [4], por lo que se ve un notable descenso y se prevé que este decrecimiento continúe en la próxima década. Dentro de este paradigma la UE ha identificado el sector de almacenamiento de energía como un sector estratégico y uno de los motores que facilitará el cumplimiento de los objetivos energéticos y

medioambientales a medio y largo plazo y el desarrollo de una posición competitiva en una industria emergente con un potencial de crecimiento muy significativo.

Los materiales más utilizados en baterías para vehículos eléctricos son el óxido de níquel y cobalto, óxido de níquel, manganeso y cobalto, fosfato de hierro y litio para baterías de iones de litio; siendo la tecnología más utilizada en la actualidad. Se espera que la batería de iones de litio domine el mercado de vehículos eléctricos para 2030 ya que sigue siendo el tipo de tecnología con más beneficios respecto al resto; encontrándose en una posición bien establecida, que se beneficia de una experiencia considerable en su fabricación y producción a gran escala. A continuación, se muestra las previsiones para 2030 del mercado de baterías de iones de litio según el analista de almacenamiento energético de BNEF James Frith.

Figure 1: Annual lithium-ion battery market size



Source: BloombergNEF

**Ilustración 11:** Previsión del mercado de la batería de iones de litio.

Fuente: Bloomberg.

## 5. La batería

Este apartado pretende abordar las características generales de las baterías, su funcionamiento y las principales tipologías de la batería en el ámbito de la automoción.

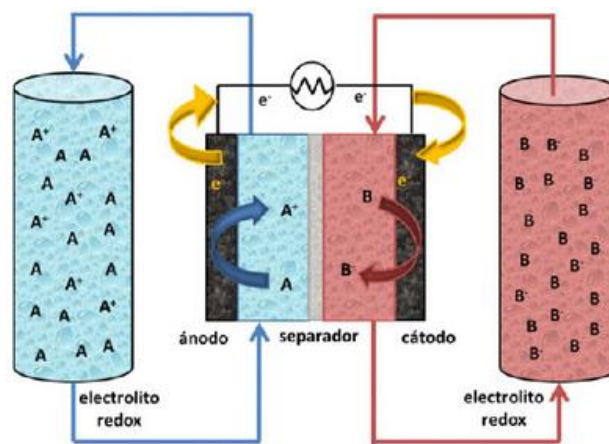
### 4.1. Características básicas

La batería es un sistema de almacenamiento de energía; que cuenta con la capacidad de devolver dicha energía posteriormente casi en su totalidad, utilizando procedimientos electroquímicos.

En cuanto a sus componentes, la celda electroquímica es la unidad básica de una batería que usa reacciones químicas para crear un flujo de electrones y producir corriente eléctrica. La

unión de dos o más celdas es lo que se conoce como batería de almacenamiento y, la disposición de estas puede configurarse en serie, paralelo o una combinación de las dos. Las celdas electroquímicas están compuestas por un ánodo y cátodo sumergidos en un material electrolítico, una membrana separadora que evita el contacto entre los electrodos, pero permite el flujo iónico y un contenedor que alberga los componentes.

El principio de funcionamiento general de las baterías electroquímicas se basa en un proceso químico reversible llamado reducción-oxidación, en el que uno de los componentes se oxida y pierde electrones, mientras que el otro se reduce y gana electrones, es decir, se trata de un proceso cuyos componentes no resulten consumidos ni se pierden, sino que simplemente cambian su estado de oxidación y, que a su vez pueden retornar a su estado original en las circunstancias adecuadas, de esta forma, durante este proceso la batería genera una diferencia de potencial entre bornes. A continuación, se muestra el proceso de las baterías:



**Ilustración 12:** Proceso de carga en una batería.

Fuente: [www.labolsadeideas.es](http://www.labolsadeideas.es).

Dentro del campo de baterías electroquímicas existen baterías primarias (aquellas que una vez producida la reacción no pueden volver a su estado original) y las secundarias (aquellas que pueden regresar a su composición química original al inyectar energía).

En el ámbito de la automoción existen dos tipos de baterías, las de arranque, utilizadas en vehículos convencionales y las de tracción, utilizadas en PHEV y EV teniendo que soportar ciclos de carga y descarga constantes.

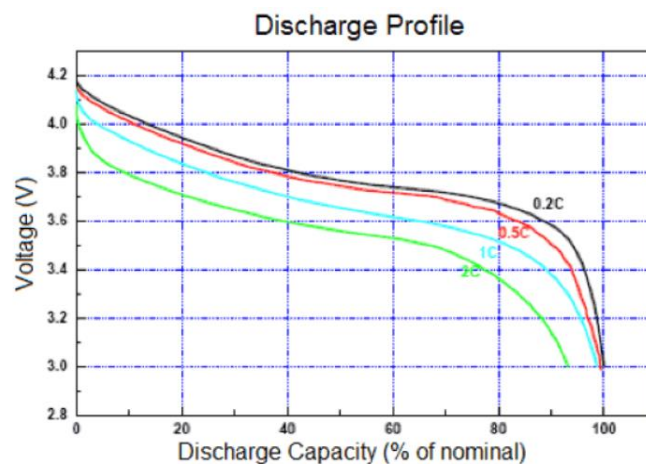
El presente estudio abordará las baterías secundarias de tracción para vehículos eléctricos/híbridos, ya que es la tecnología que cuenta con previsiones de un aumento constante de su uso en los próximos años. Además, a día de hoy es considerado el componente más crítico del vehículo eléctrico.

## 4.2 Conceptos y parámetros importantes de la batería

Con el fin de poder caracterizar una batería; y facilitar el seguimiento del proyecto se introducirán algunos conceptos y parámetros de interés relacionados con la batería. Para empezar, se introducirán conceptos generales relacionados con la batería como:

- **Densidad de energía:** Se corresponde a la energía acumulada de la batería por unidad de volumen (Wh/l).
- **Densidad de potencia:** Potencia que puede entregar por unidad de volumen (W/l).
- **Energía específica:** Energía que puede almacenar una batería por unidad de peso (Wh/kg).
- **Potencia específica:** Energía que puede almacenar la batería por unidad de peso (Wh/kg).
- **Vida útil:** Se define como el tiempo que transcurre hasta que la capacidad de la batería se degrada un cierto nivel, por lo general 80%.
- **Rendimiento:** Es la relación porcentual entre la energía eléctrica recibida en el proceso de descarga y la que la batería entrega durante la descarga.

La curva de descarga de una batería es como se muestra en la siguiente Ilustración:



Discharge: 3.0V cutoff at room temperature.

**Ilustración 13:** Curva de descarga de una batería.

Fuente: <http://elb105.com/tag/battery/>.

A partir de la Ilustración 13 se pueden empezar a introducir conceptos como:

- **Tensión máxima:** Se trata del máximo valor de tensión que la batería es capaz de soportar durante un proceso de carga.
- **Tensión nominal:** Es el valor de tensión alrededor del cual la batería está operando durante la mayoría de la descarga.
- **Tensión mínima:** También conocida como Tensión de “*cut off*”, es el valor de tensión en el cual se considera que la batería está totalmente descargada.
- **Tensión de vacío:** Representa la tensión que se mide en bornes de la batería cuando no se encuentra circulando ninguna corriente por ella.

Se observa que en la curva de descarga se empieza con la batería totalmente cargada y la tensión de vacío resulta ser la misma que la tensión máxima. Una vez empieza la descarga la tensión cae debido a la caída de tensión interna provocada por la corriente circulante. Se alcanza el tramo horizontal, el cual ocupa prácticamente la mayor parte del ciclo, la tensión durante este tramo es la tensión nominal. Finalmente, la curva cae hasta su valor mínimo, la cual se corresponde a la tensión mínima y significa que la batería se encuentra descargada.

En el eje x de la Ilustración anterior se encuentra el concepto de capacidad, la cual se observa que, a lo largo de la curva de descarga, la capacidad aumenta a comparación de la tensión la cual tiende a permanecer en un valor constante. En el ámbito del almacenaje se distingues varios conceptos de capacidad.

- **Capacidad nominal:** Es la capacidad que se extrae de la batería cuando se descarga a una tasa de descarga y una temperatura determinada, suele utilizarse una temperatura ambiente fijada y una razón de descarga específica. La capacidad viene dada en Ah.
- **Capacidad real:** Capacidad que es capaz de entregar la batería desde su estado de plena carga, utilizando unas condiciones de funcionamiento diferentes a la ya utilizadas para la capacidad nominal.
- **Capacidad retenida:** Capacidad que es conservada en la batería después de un periodo de reposo o inactividad.

Otros conceptos que intervienen durante la descarga son:

- **Coulomb:** El coulomb es la unidad derivada del sistema internacional para la medida de cantidad de electricidad. Para definir la cantidad de corriente de carga/descarga de una batería suelen utilizarse múltiplos y submúltiplos de esta magnitud (C).



- **Máxima corriente de descarga:** La máxima corriente a la que se puede descargar de forma continua la batería sin degradarse o quemarse.
- **Autodescarga:** Es un fenómeno de reducción de la carga almacenada en baterías por medio de reacciones químicas internas sin existir ninguna conexión entre electrodos. Se sabe que la autodescarga disminuye la vida útil de la batería y tiende a ocurrir más rápidamente a temperaturas más altas.
- **Sobrecarga:** Es el proceso que tiene lugar cuando se continúa cargando la batería, estando ya cargada al completo.

Finalmente, se definen los siguientes conceptos relativos al estado de la batería no mencionados hasta ahora.

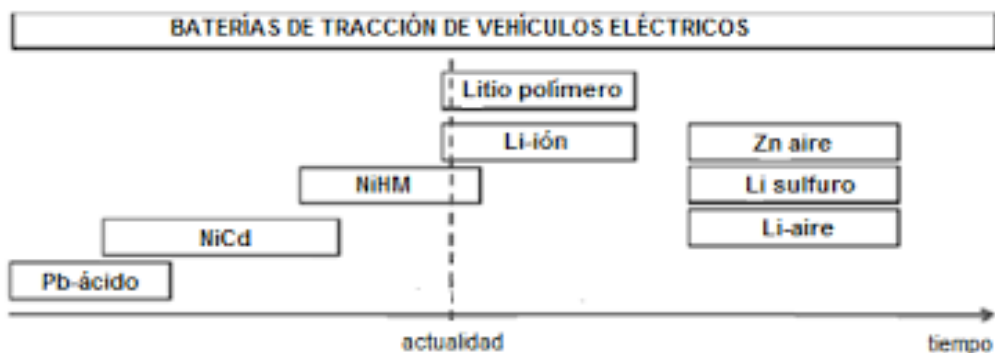
- **Estado de carga (SOC):** Es la cantidad de energía restante en la batería con respecto al máximo almacenable
- **Profundidad de descarga:** Representa el porcentaje de energía que ya se ha consumido de la batería frente al máximo almacenable.
- **Estado de salud (SOH):** Representa el inverso del envejecimiento de la batería. Se mide como la capacidad máxima que la batería es capaz de suministrar en un momento frente a la capacidad máxima que era capaz de suministrar al inicio de su vida útil.
- **Voltaje en terminal:** Se trata de la tensión en los terminales cuando se aplica una carga.
- **Voltaje en circuito abierto:** Es la tensión en los terminales sin una carga conectada. Varía con el SOC y la corriente de carga y descarga.
- **Resistencia interna:** A medida que la batería envejece, aumenta la resistencia interna y en consecuencia la eficiencia de la batería, además de su estabilidad térmica.

### 4.3 Tipologías

El presente proyecto tiene como objetivo el estudio de la reutilización de las baterías procedentes de vehículos eléctricos. Se enumerarán los tipos de baterías utilizados actualmente en el vehículo eléctrico, se explicará cada tecnología destacando sus peculiaridades, ventajas, inconvenientes y las aplicaciones que tiene [5]. Para completar, sabiendo que las baterías de ion litios son la principal tecnología de estudio, será explicada entrando más en detalle, además de una comparativa de todos ellos [6].







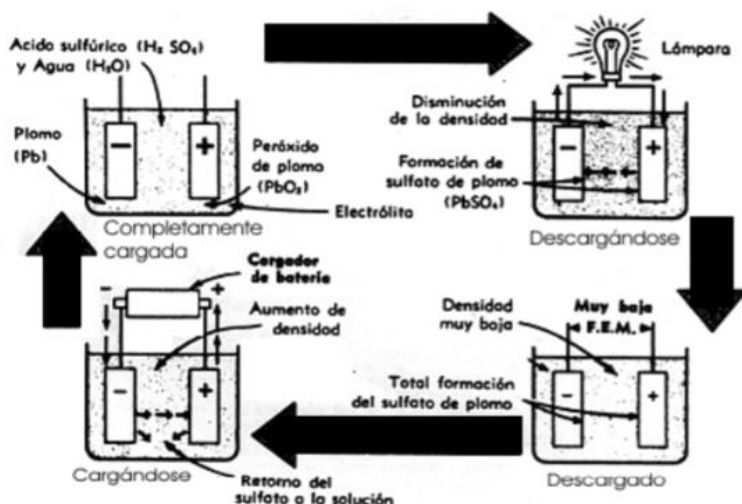
**Ilustración 14:** Estado del desarrollo tecnológico de las baterías de tracción de vehículos eléctricos.

Fuente: [7].

#### 4.3.1 Batería de Plomo-Ácido

Las baterías de plomo-ácido son las más maduras comercialmente a nivel mundial, en consecuencia, presentan un mayor desarrollo tecnológico y un menor coste de inversión. Sin embargo, se trata de una tecnología que sigue desarrollándose día a día y a pesar de sus numerosas ventajas aun presentan inconvenientes.

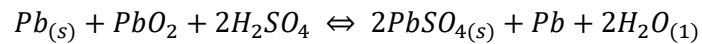
Este tipo de baterías están compuestas por dos tipos de electrodos de plomo que se encuentran en forma de sulfato de plomo II ( $PbSO_4$ ) si el sistema está descargado, los electrodos permanecen incrustados en una matriz de plomo metálico. El electrolito es una disolución de ácido sulfúrico en agua.



**Ilustración 15:** Ciclo de carga y descarga de una batería plomo-ácido.

Fuente: [http://www.sapiensman.com/electrotecnia/pilas\\_y\\_baterias1.htm](http://www.sapiensman.com/electrotecnia/pilas_y_baterias1.htm)

La reacción global que tiene lugar en estas baterías se muestra a continuación. Donde el proceso de carga se muestra i de izquierda a derecha y viceversa para la descarga [8].



Durante la descarga de la batería, la corriente generada por esta hace que el bióxido de plomo presente en la placa positiva al combinarse con el ácido sulfúrico forme sulfato de plomo ( $PbSO_4$ ) y el oxígeno liberado al combinarse con el hidrógeno liberado del ácido sulfúrico forme agua ( $H_2O$ ). El material activo de la placa negativa, el plomo ( $Pb$ ) se combina con el ácido sulfúrico formando así sulfato de plomo ( $PbSO_4$ ). La densidad del electrolito disminuye, al igual que la tensión hasta agotar la reserva energética.

De izquierda a derecha se muestran las reacciones que tienen lugar en el acumulador durante la carga. Durante el proceso de carga, la materia activa en la placa positiva de la batería es el dióxido de plomo ( $PbO_2$ ), mientras que en la placa negativa es el plomo metálico en estado esponjoso ( $Pb$ ). La corriente recibida provoca la reacción inversa a la descarga causando que ambos materiales activos de las placas regresen a su condición inicial, además del ácido sulfúrico en el electrolito aumentando su densidad.

A nivel general, las baterías de plomo-ácido presentan numerosas ventajas como [5] [9]:

- Tecnología madura y bien conocida.
- Alta tensión por celda
- Tiempo de respuesta rápido
- Coste inicial bajo y fabricación simple
- Vida útil de la batería larga y fácil de reciclar
- Alta eficiencia (alrededor del 80%)

Y, por otro lado, los inconvenientes que se deben señalar son [5] [9]:

- Relativamente Intolerante a temperaturas extremas
- Baja energía específica (30-50 Wh/kg)
- Baja resistencia ante sobrecargas y descargas profundas
- Uso de materiales tóxicos y contaminantes
- Peso elevado
- Ciclo de vida relativamente corto (1200-1800 ciclos) [10]
- Requiere mantenimiento periódico



Esta batería cuenta con varias celdas, cada celda proporciona una tensión de 2V. Las baterías suelen ser de 6V y 12V. Su uso más común es en los automóviles, y se utilizan principalmente para funciones de arranque del vehículo, iluminación o soporte eléctrico. Hoy en día se están dejando de emplear para suministrar energía al motor eléctrico. Por lo que no es el tipo de batería más adecuada para los coches eléctricos. Corresponden a los modelos más antiguos de coches eléctricos y su grado de autonomía es muy inferior a las baterías actuales.

#### 4.3.2 Baterías de níquel-hidruro metálico

Las baterías de níquel nacieron en 1899. Waldmar Jungner inventó la batería de níquel cadmio, una batería recargable que tenía electrodos de níquel y cadmio en una disolución de hidróxido de potasio. A día de hoy se encuentran 5 tipologías de baterías que usan el electrodo níquel en su diseño, fabricación y operación las cuales son las siguientes: níquel-hierro (NiFe), níquel hidrógeno (NiH<sub>2</sub>), níquel metal hidruro (NiMH) y níquel-zinc (NiZn). Siendo las más popular actualmente el NiMH.

Cabe mencionar que el Parlamento Europeo modificó la directiva 2006/66/CE en el año 2016 con el fin de prohibir las baterías NiCd debido a su peligrosa toxicidad tanto para la salud como para el ambiente. Desde entonces las pilas de cadmio recargables y no recargables sólo son permitidas en alarmas, equipos médicos y otros sistemas de emergencia. Se tomó esta medida con el fin de impulsar mejores sustitutos disponibles en el mercado como es el caso de las pilas níquel- hidruro metálico y de iones de litio.

La batería de níquel más habitual cuando se refiere al vehículo eléctrico es la batería de níquel-hidruro metálico, la cual resulta ser una variación de la batería níquel-cadmio, se trata de una batería recargable que utiliza un ánodo de oxihidróxido de níquel, y su cátodo a diferencia de la batería níquel-cadmio es una aleación de hidruro metálico. Esta batería permite eliminar el cadmio, el cual es un material peligroso para el medio ambiente además de costoso. Al utilizar una aleación de hidruro metálico en vez del cadmio, la batería se beneficia de una mayor capacidad de carga y un menor efecto memoria. Aunque también presenta inconvenientes como una mayor tasa de autodescarga.



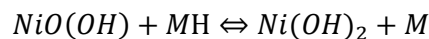


**Ilustración 16:** Baterías de níquel-metal hidruro.

Fuente: <https://www.amazon.es/HGRP-4-unidades-n%C3%ADquel-metal-hidruro-recargables/dp/B00O42X228>

Cada batería puede proporcionar un voltaje de 1,2 V y una capacidad de entre 0,8 y 2,9 Ah. Su densidad energética llega hasta los 100 Wh/kg [11].

Las reacciones que tienen lugar en este tipo de baterías se muestran a continuación [12]:



La reacción de carga se lee de izquierda a derecha y la reacción de descarga se lee de derecha a izquierda.

El metal M en el electrodo negativo de una celda de NIMH, resulta ser un compuesto intermetálico. Los compuestos para esta aplicación se dividen en dos clases:

- $AB_5$ : A es una mezcla de tierras raras de lantano, cerio, neodimio, praseodimio y B es níquel, cobalto, magnesio o aluminio.
- $AB_2$ : A es titanio o vanadio mientras que B es circonio o níquel, modificado con cromo, cobalto, hierro o magnesio.

Las celdas correspondientes a este acumulador tienen un electrolito alcalino, generalmente hidróxido de potasio. El electrodo positivo es hidróxido de níquel y el electrodo negativo son iones de hidrógeno o protones. Los iones de hidrógeno se almacenan en una estructura de hidruro metálico que es el electrodo.

Cabe mencionar que este tipo de baterías sufre un efecto de autodescarga, pierden energía cuando no son utilizadas. Tiene una tasa de auto descarga mayor del 10% en 24 horas, debido a los átomos de hidrógeno en fuga.

Las baterías Ni-MH presentan ventajas como [5]:

- Amplio rango de temperaturas
- El contenido de níquel y la ausencia del cadmio causa que sea rentable el reciclaje además de ser menos perjudiciales para el medio ambiente
- Mayor energía específica y densidad energética que las baterías Ni-Cd (hasta un 40%)
- Almacenamiento y transporte simple.

Por otro lado, las baterías Ni-MH presentan desventajas como [5]:

- Eficiencia del 65%
- Efecto de auto descarga (15-20% cada mes)
- Vida útil limitada (300-500 ciclos), la descarga total reduce su vida útil
- Presenten un mayor deterioro que las baterías Níquel-Cadmio
- Estado de carga más difícil de detectar
- Requieren mantenimiento

Esta batería se puede encontrar en muchos PHEV debido a que disponen de una buena densidad energética, aunque en menor medida que las baterías de litio, si bien tienen también un precio inferior y un número de ciclos de carga y descarga del batería adecuado.

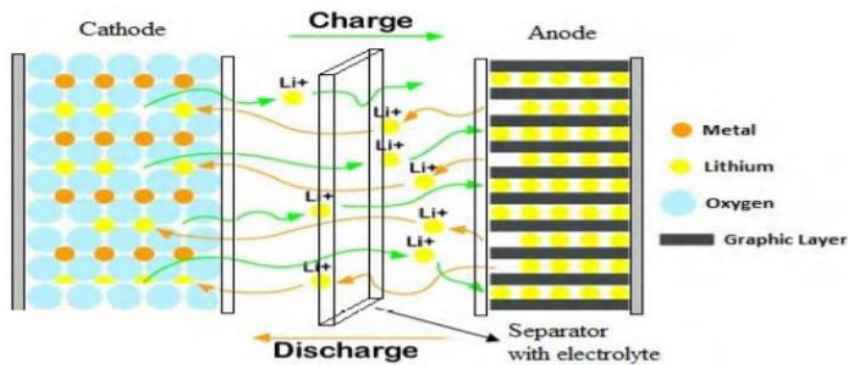
#### 4.3.3 Baterías de Ion-Litio

El uso de nuevos materiales como el litio ha permitido conseguir altas energías específicas, alta eficiencia, eliminación del efecto memoria, ausencia de mantenimiento y facilidad a la hora de reciclar los desechos de Ion-Litio. Desde su comercialización este tipo de batería ha mejorado mucho, pero sigue sin ser una tecnología totalmente madura. Al encontrarse en continuo desarrollo los avances la hacen tener un gran margen de mejora. Hoy en día representan la mejor elección para el vehículo eléctrico [13].

Las baterías de ion-litio están compuestas por un cátodo construido por óxido metálico de litio, por un ánodo construido por material de carbono, por el electrolito y el separador. Durante el proceso de carga, los iones de litios existentes en el cátodo se mueven hasta el ánodo de



carbono a través del electrolito. Durante la descarga, el proceso es el inverso [14]. El proceso electroquímico producido durante la carga y la descarga es un proceso de “intercalación”, en el que los iones Li se convierten temporalmente en “invitados” a los electrodos huéspedes sin ningún cambio importante en los electrodos. Lo que sucede durante este proceso es reversible; sin embargo, existe la posibilidad de algún cambio irreversible, como el daño inducido por el estrés, que ocurre con cada ciclo de descarga y carga.



**Ilustración 17:** Proceso de carga y descarga de una batería Ion-Litio.  
*Fuente:* [14]

A rasgos generales las ventajas que presentan este tipo de baterías son [15]:

- Alta densidad de energía (4 veces mejor que las baterías plomo-ácido)
- Alta energía específica (aproximadamente 3.6 V por celda)
- Alta capacidad y velocidad de carga y descarga
- Baja tasa de autodescarga
- Elevado número de ciclos de vida (hasta 5000 ciclos)
- Versátil, altamente escalable y requiere de poco mantenimiento

Por otro lado, presentan desventajas como [15]:

- Alto coste
- Degradación rápida de los electrodos durante la descarga completa en algunos tipos de celda de iones de litio
- Requieren de un circuito de seguridad para evitar sobrecargas y sobredescargas.

Este tipo de baterías resulta ser de las más empleadas en artículos de electrónica de consumo. Además, en la industria del coche eléctrico, este tipo de tecnología ya cubre gran parte del sector de la electromovilidad formado por vehículos eléctricos e híbridos.

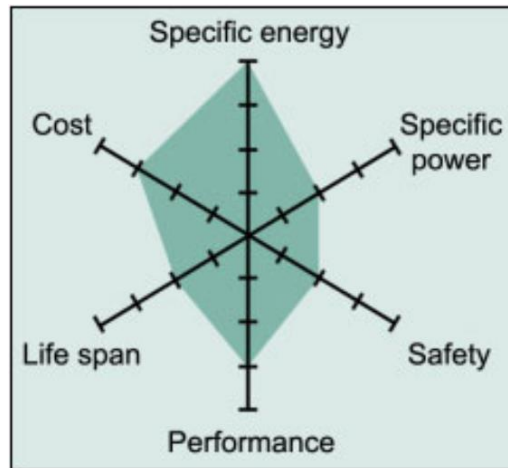
#### 4.3.4. Tipos de baterías de litio

A lo largo del tiempo se han utilizado distintas variaciones de química del litio en el cátodo con el objetivo de conseguir nuevas y mejores características como podría ser el rendimiento, coste o seguridad. En función del óxido metálico y el electrolito de la tecnología tendrá unas características u otras. Actualmente, en los coches eléctricos, lo más común son las pilas de Litio con Manganeseo y con una mezcla de níquel, manganeso y cobalto, aunque hay empresas que apuestan y están desarrollando acumuladores de Litio con cátodos de Fosfato de hierro u otros [16].

A continuación, se revisarán aquellas tipologías que se encuentran en un estadio más cercano del mercado, en función de los materiales de Ion-Litio existentes en la actualidad:

- **Óxido de Cobalto de Litio (LCO):** Este tipo de batería está formada por un electrolito de sal de litio con cátodo formado de litio, cobalto y óxido ( $LiCoO_2$ ). Ofrece la mayor densidad energética y energía específica, sin embargo, debido a las propiedades del cobalto posee una de las capacidades de descarga más bajas, baja estabilidad térmica y una capacidad de carga limitada, es por esto por lo que es común encontrar este tipo de baterías en aparatos electrónicos que no necesitan descargas de corriente. El diseño del polímero hace que las celdas sean intrínsecamente más seguras que las celdas de construcción "enlatadas" que pueden perder líquido electrolítico ácido en condiciones abusivas. El voltaje de la celda es típicamente de 3,7 voltios. Las células que utilizan esta química están disponibles en una amplia gama de fabricantes.

Además, cuenta con una seguridad limitada, pues es vulnerable a sobrecargas o cargas indebidas. Por lo general el fabricante recomienda que la carga y descarga sea inferior a 1C, a pesar de esto suelen contar con un circuito de protección para evitar daños irreversibles.



**Ilustración 18:** Características de la batería de óxido de cobalto de litio.  
Fuente: [17]

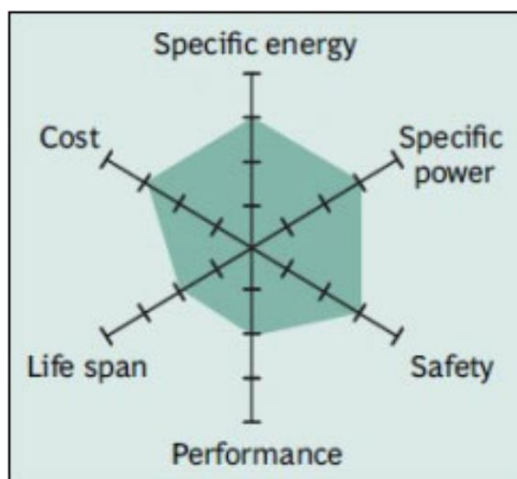
Batería LiCoO <sub>2</sub>	
Tensión nominal	3.6V
Carga (ratio C)	0.8C, 1C máximo, 4,2 V pico
Descarga (ratio C)	1 C, tensión mínima a 2,5V
Nº de Ciclos	500-1000
Temperatura máxima	150°C
Comentarios	Energía específica muy alta, potencia específica limitada. Cobalto muy costoso.

**Tabla 2:** Características de la batería de óxido de cobalto de litio.  
Fuente: [17]

- **Óxido de Manganeso-Litio (LMO):** Se trata de una celda de Li-Ion con óxido de litio y manganeso como material catódico. Cuenta con ventaja respecto a las químicas basadas en el cobalto pudiendo proporcionar una tensión nominal más alta, mayor estabilidad térmica y menor coste ambiental, puesto que el manganeso resulta menos perjudicial para el medioambiente que el cobalto.

Esta tecnología resultaba una de las opciones más prometedoras, pero en la última década con el gran desarrollo de otras tecnologías, ha terminado resultando menos relevante debido a su potencial limitado. Las aplicaciones más comunes para esta tecnología son herramientas eléctricas, instrumentos médicos y vehículos eléctricos/híbridos.





**Ilustración 19:** Características de la batería manganeso-litio.

Fuente: [17].

Batería LiMn2O4	
Tensión nominal	3.7V
Carga (ratio C)	0.7C-1C, 3C máximo, 4,2 V pico
Descarga (ratio C)	1 C hasta 10C, tensión mínima a 2,5V
Nº de Ciclos	300-700
Temperatura máxima	250°C
Comentarios	Potencia alta y más segura que la tecnología de litio y cobalto. Capacidad reducida y menor relevancia a día de hoy.

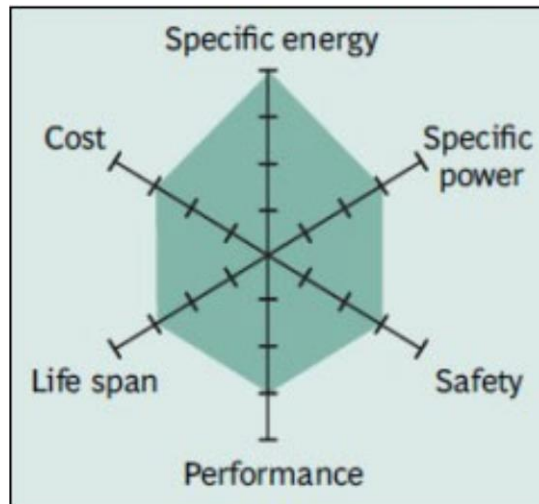
**Tabla 3:** Características de la batería manganeso-litio.

Fuente: [17]

- **Óxido de Cobalto-Manganeso-Níquel (NMC):** Esta tecnología nace a partir de investigaciones con la finalidad de reducir costes, para ello se combina el cobalto con metales menos costosos.

La tecnología de óxido de cobalto-manganeso-níquel-litio dispone de un ánodo formado por grafito y el cátodo lo forman níquel, manganeso y cobalto (las proporciones de los materiales utilizados en el cátodo influirán directamente en las características de la batería). Materiales como el níquel favorece el aspecto energético específico, mientras que el manganeso aumenta la potencia específica. La mezcla de estos metales logra que la tecnología NMC posea una buena combinación de energía, potencia y vida útil, pero con un voltaje ligeramente más bajo [17].

Esta tecnología cuenta con una densidad de energía de 140 a 200 Wh/kg, mientras presenta un ciclo de vida que oscila entre los 1000 y 2000 ciclos. Su uso es muy amplio, domina en las aplicaciones EV y PHEV, además se utiliza en dispositivos electrónicos, portátiles, herramientas eléctricas y dispositivos médicos [18].



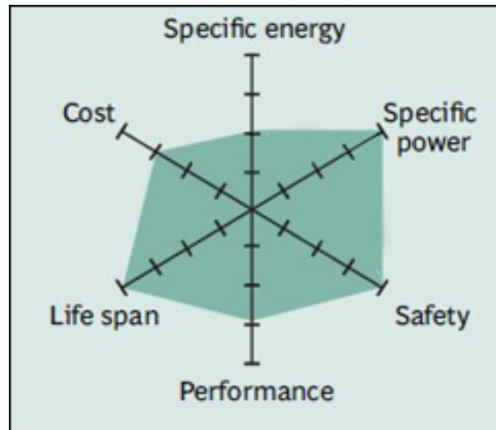
**Ilustración 20:** Características de la batería de óxido de cobalto-manganeso-níquel.  
Fuente: [17].

Batería LiMnCOO <sub>2</sub>	
Tensión nominal	3.6V-3.7V. Rango de operación: 3-4,2V/célula.
Carga (ratio C)	0.7C-1C, 3C máximo, 4,2-4.3 V pico
Descarga (ratio C)	1C-2C, tensión mínima a 2,5V
Nº de Ciclos	1000-2000
Temperatura máxima	210°C
Comentarios	Cuenta con gran capacidad y potencia. Una de las tecnologías más exitosas actualmente.

**Tabla 4:** Características de la batería de óxido de cobalto-manganeso-níquel.  
Fuente: [17]

- Fosfato de Hierro-Litio (LFP):** Este tipo de batería ion-litio también abreviada como LFP; a diferencia de la explicada anteriormente no utiliza cobalto, lo cual le garantiza una mayor estabilidad y seguridad de uso. El cátodo está formado por fosfato de hierro litio ( $LiFePO_4$ ), el cual posee un bajo coste, muy buena estabilidad térmica y buenas características de seguridad con rendimiento electroquímico bueno. Además, cuenta con una vida útil prolongada de hasta 2000 cargas y no requiere de mantenimiento. En compensación, su voltaje nominal es más bajo (3.2V / celda) y en consecuencia su energía específica resulta menor a la de la batería  $LiCoO_2$ , también cuenta con una autodescarga mayor que otras baterías de litio.

Esta variación de batería de iones de litio reduce significativamente los inconvenientes de la química de cobalto, particularmente las características de coste, seguridad y medioambientales. A pesar de ofrecer una densidad energética menor al caso anterior, todas las características comentadas hacen que sea un tipo de tecnología atractiva para aplicaciones estacionarias.



**Ilustración 21:** Características de la batería de fosfato de hierro-litio.  
Fuente: [17].

Batería LiFePo4	
Tensión nominal	3.2V
Carga (ratio C)	1C, 3C máximo, 3,65V pico
Descarga (ratio C)	1 C, tensión mínima a 2,5V
Nº de Ciclos	2000
Temperatura máxima	270°C
Comentarios	Tensión entre bornes baja. Tipología más segura de las baterías de litio. Alta autodescarga.

**Tabla 5:** Características de la batería de fosfato de hierro-litio.  
Fuente: [17]

En la siguiente figura se muestra una tabla comparativa de las tecnologías mencionadas, comparando aspectos de energía, potencia, seguridad, vida útil y coste:

	Energy	Power	Safety*	Life	Cost
<b>LCO</b> lithium cobaltite $\text{LiCoO}_2$	+++	+++	-	++	+
<b>LMO</b> lithium manganese oxide $\text{LiMnO}_2$	-	+++	++	-	++
<b>NMC</b> nickel manganese cobalt $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y})\text{O}_2$	++	++	++	+++	+++
<b>LFP</b> lithium iron phosphate $\text{LiFePO}_4$	+	+++	+++	++	++

**Ilustración 22:** Comparativa de las baterías de litio es un estadio más cercano del mercado.  
Fuente: [16]

#### 4.3.5. Comparativas Baterías electroquímicas

Una vez analizadas las diferentes baterías electroquímicas utilizadas en mercado del vehículo eléctrico actual se procede a realizar una tabla comparativa de las diferentes tecnologías, donde se comparan principalmente: la energía específica, la tensión nominal, el rango de ciclos, la autodescarga y sus aplicaciones.

Batería	Tensión nominal (V)	Energía específica (W/Kg)	Vida útil (ciclos)	Autodescarga mensual (%)	Aplicaciones
Plomo-Ácido	2	30-50	1200-1800	4-8	Arranque de vehículos, iluminación y soporte eléctrico.
Ni-Mh	1.2	100	300-500	20	Electrónica de consumo y vehículos eléctricos.
$LiCoO_2$	3.6	150-200	500-1000	1-5	Aparatos electrónicos, usos militares y vehículos espaciales.
$LiFePO_4$	3.2	90-120	1000-2000	1-5	Sistemas de almacenamiento para carga rápida de vehículos o herramientas eléctricas.
$LiMnO_2$	3.7	100-150	300-500	1-5	Aplicaciones que requieren corrientes superiores a 1 A y poco peso como drones, helicópteros, linternas o cámaras.
NMC	3.6-3.7	150-220	1000-2000	1-5	Bicicletas eléctricas, dispositivos médicos, vehículos eléctricos o instalaciones industriales.

**Tabla 6:** Comparativa de baterías.

*Fuente: Elaboración propia.*

## 5. La batería de un VE

El uso general de la tecnología de baterías de litio duplicó su comercialización de 2014 a 2019. Además, su uso se está viendo extendido a aplicaciones de alta capacidad como por ejemplo como sistemas de almacenamiento de energía para aplicaciones off-grid o su integración en los vehículos eléctricos. A día de hoy gracias a su gran desarrollo en los últimos años la tecnología de iones de litio se considera la más extendida en el sector del vehículo eléctrico debido a su gran densidad de energía, alta tensión, baja tasa de autodescarga y larga vida cíclica [19].

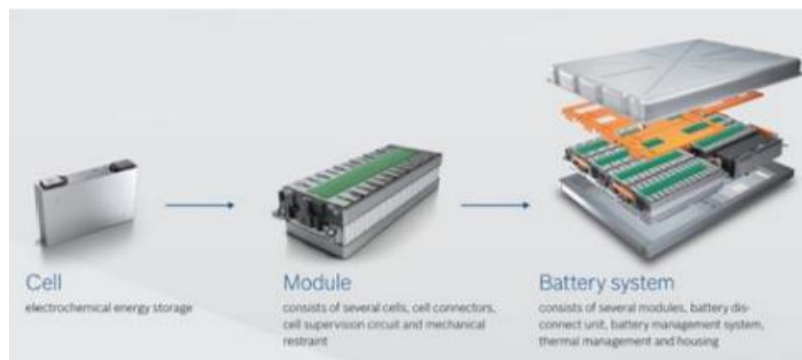
Los requisitos de las baterías de un vehículo eléctrico son diversos, entre estos se destacan principalmente: la seguridad, el coste, la eficiencia, el correcto funcionamiento y el mantenimiento. También uno de los requerimientos más habituales es la autonomía, la cual está relacionada proporcional con el peso y la capacidad de las baterías [20]. Por lo que parámetros como el peso, tamaño del pack de baterías y autonomía dependerá de la aplicación del tipo de vehículo para el que va destinado.

Adicionalmente las baterías de ion de litio presentan algunos inconvenientes, pues son altamente sensibles a la temperatura ambiente, la presión y a las cargas mecánicas y dinámicas a las que se pueden ver sometidas en un vehículo eléctrico [21]. Por eso cuentan con lo siguiente:

- Aislamiento a las vibraciones
- Embalado térmico
- Resistencia al impacto

## 5.1 Estructura de la batería de un VE

Las baterías del vehículo eléctrico están formadas por células, módulos y el paquete de baterías. La célula es la unidad electromecánica con el menor voltaje asociado a la química, mientras que el módulo consiste en la unión de varias células capaces de producir una tensión no superior a 50 V y el paquete contiene todos los módulos correspondientes con un control electrónico y térmico que crea el sistema total que interactúa con el resto de componentes del vehículo [22].



**Ilustración 23:** Célula, Módulo y paquete de baterías.

Fuente: <https://insideevs.com/news/334935/bosch-disbands-internal-battery-cell-research-will-sell-solid-state-startup-seeo/>

### 5.1.1 Celda de ion de litio

El tipo de celda dependerá de la tecnología química utilizada, puesto que cada tipo de tecnología química permite obtener celdas con diferentes prestaciones. Además, también se pueden dividir según su tipología constructiva, las tres principales se muestran a continuación:

- **Celdas cilíndricas:** Este tipo de celda es capaz de ofrecer una buena estabilidad mecánica dado a la resistencia frente a altas presiones y en comparación a las siguientes son la tecnología de menor coste.



**Ilustración 24:** Celda cilíndrica usada por el fabricante “Tesla”.

Fuente: <https://somolectricos.com/panasonic-tesla-aumentar-densidad-baterias-20-por-ciento>

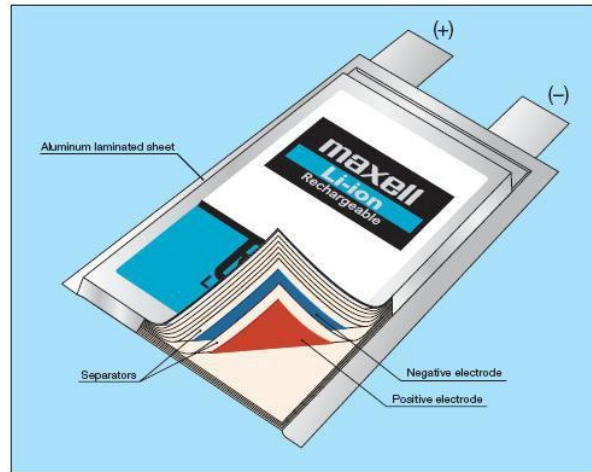
- **Celdas prismáticas:** El desarrollo de este tipo de celda responde a la necesidad de disponer de una celda adaptada a los sistemas de gran energía [23], su forma permite un sistema más equilibrado y eficientes con mayores prestaciones debido a que son capaces de aportar 50 veces más energía que una celda cilíndrica, y para un sistema de gran energía resulta más conveniente un menor número de celdas.



**Ilustración 25:** Celda prismática LiPo en venta.

Fuente: <https://es.dhgate.com/product/new-3-2v-75ah-lifepo4-battery-prismatic-cell/558904042.html>

- **Celdas laminadas:** Son las más utilizadas en nuevas tecnologías como móviles, tablets, portátiles. Es un tipo de celda que se ha creado con el fin de adaptarse a cualquier tipo de forma y grosor. Su eficiencia es alrededor del 90-95 % y presenta una gran desventaja en cuanto el envejecimiento ya que dispone de una vida limitada.



**Ilustración 26 e Ilustración 27:** Celda laminada y ficha técnica de celda laminada que utiliza el Nissan Leaf.

Fuente: <https://pushevs.com/2018/01/29/2018-nissan-leaf-battery-real-specs/>.

### 5.1.2 Módulo de baterías

El módulo hace referencia, al conjunto de celdas unidas en serie y/o en paralelo empaquetadas juntas. Sus características dependerán principalmente de los parámetros deseados para el paquete total de baterías. A continuación, se muestra como ejemplo el módulo de baterías del *Nissan Leaf*, la cual cuenta con una tensión entre bornes de 7.6V.



**Ilustración 28:** Módulo del modelo de VE Nissan Leaf.

ESPECIFICACIONES DEL MÓDULO		
Nº de celdas	4	
Construcción	2 serie y 2 paralelo	
Largo	303 mm	
Ancho	223 mm	
Gueso	35 mm	
Peso	3.8 Kg	
Tensión	Tensión de celda	
	$V_{max}$	4.15 V
	$V_n$	3.8 V
	$V_{min}$	2.5 V
	Tensión de módulo	
	$V_{max}$	8.3 V
	$V_n$	7.6 V
	$V_{min}$	5 V

**Tabla 7:** Especificaciones técnicas de un módulo procedente de un Nissan Leaf del 2014.

Fuente: <https://pushevs.com/2018/01/29/2018-nissan-leaf-battery-real-specs/>.

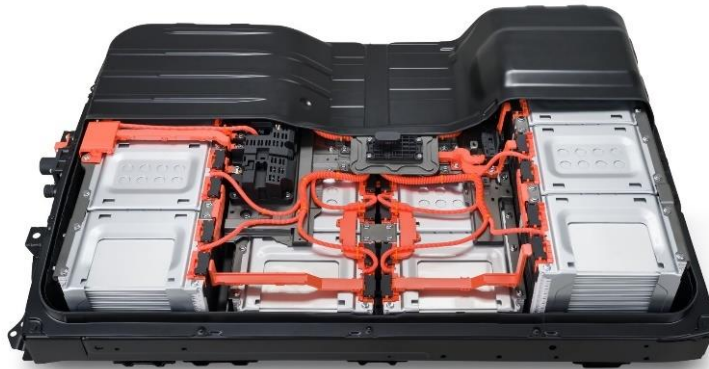


### 5.1.3 Pack de baterías

Se entiende como un pack de baterías un conjunto de acumuladores entre sí, formando una unidad integral y cerrada dentro de una carcasa exterior no destinada a ser manipulada por el usuario final. Su forma, peso y estructura dependerá de las especificaciones técnicas del vehículo y su peso.

Para el caso de la tensión nominal del pack, dependerá de cómo se hayan interconectado sus celdas, es decir, cuando se conectan en serie las tensiones suman y las intensidades se mantienen mientras que, si se conectan en paralelo, las intensidades se suman y las tensiones permanecen constantes. En cambio, para el caso de la potencia es indiferente el interconectado de las celdas, esta dependerá principalmente del número de celdas, la tensión de la celda y su intensidad máxima permitida. De igual modo la capacidad nominal del pack dependerá en gran medida de del número de celdas que contenga y la capacidad de estas.

El diseño acaba siendo un factor clave y debe cumplir una serie de requisitos como: la forma y posición, el peso, el desmontaje fácil y la seguridad. En la Ilustración 29; se muestra la vista general del pack de baterías perteneciente al *Nissan Leaf*.



**Ilustración 29:** Paquete de baterías de alto voltaje del *Nissan Leaf*.

## 5.2 Reciclaje y reutilización de la batería de iones de litio en la actualidad

Con el paso de los años el uso de baterías se verá aumentado, y tanto el reciclado como la reutilización son dos factores clave en el contexto actual de transición energética.

El reciclado de baterías persigue dos objetivos [24]:

- Disminuir el impacto negativo de los residuos sobre el medioambiente.



- Reutilizar los materiales que componen las baterías para promover tanto la producción como la economía circular.

Actualmente existen diversas empresas que se dedican al reciclaje a nivel industrial de baterías, siendo los procesos hidrometalúrgicos y pirometalúrgicos los procesos más empleados. Con el aumento constante de baterías en los próximos años el desarrollo de la industria de reciclaje, será clave para la sostenibilidad de las baterías de litio. Un sistema de reciclaje sólido reducirá la demanda de materias primas, emisiones de gases efecto invernadero e impactos locales negativos de la minería y refinación.

De acuerdo al informe anual SDG7; publicado por la Agencia Internacional de Energía Renovable, se estima que las instalaciones de reciclaje actuales pueden agregar una huella limitada de gases efecto invernadero a una batería de vehículo eléctrico (alrededor de un 10%), en comparación con una batería fabricada a partir de materias primarias, es por esto que la ampliación de las instalaciones de reciclaje de baterías de iones de litio, impulsada por el despliegue de vehículos eléctricos, así como otras medidas de eficiencia energética serán necesaria para reducir significativamente las emisiones de GEI del reciclaje de baterías. También cabe mencionar que se están investigando procesos de reciclaje nuevos e innovadores que utilizan menos energía y una clasificación adecuada de las piezas de la batería que necesiten reciclarse o reutilizarse.

Hasta ahora las políticas de recolección y reciclaje de baterías se han centrado generalmente en otras industrias y tecnologías de baterías distintas de las baterías de iones de litio (principalmente usadas en vehículos eléctricos), como la electrónica de consumo o baterías de plomo-ácido. Sin embargo, los desarrollos políticos recientes destacan un mayor enfoque en el despliegue proyectado a gran escala de baterías para aplicaciones automotrices y su impacto en el ciclo de vida. En 2019, China exigió la responsabilidad del productor, haciéndolo responsable del reciclaje. La Unión Europea está revisando actualmente su directiva sobre baterías para adaptarse a la electrificación del transporte, ha establecido una *Battery Alliance* para discutir nuevas medidas con las partes interesadas clave. En Estados Unidos, el proyecto de ley requiere la formación de un grupo asesor de reciclaje de baterías de iones de litio para asesorar a la legislatura sobre la política de reciclaje de baterías de iones de litio en vehículos eléctricos. Estos desarrollos junto a la innovación del sector privado pretenden poner soluciones para cuando finalice la vida útil de las baterías procedentes de VE.

Para el caso de la reutilización, la batería procedente de un VE que, a lo largo de los años, ya no es adecuada para aplicaciones automotrices puede reutilizarse en aplicaciones de almacenamiento estacionario. La prolongación de la vida útil de las baterías automotrices puede contribuir a desplazar los impactos ambientales, emisiones y costos de fabricación de baterías nuevas. No obstante; se trata de un mercado naciente; el cual hasta la fecha carece de experiencia. Por eso, para implementar aplicaciones de segunda vida para baterías automotrices es necesario costo decreciente de fabricación de baterías nuevas y un proceso de reacondicionamiento técnico potencialmente largo que requiere una transferencia eficiente de información técnica entre las partes interesadas a lo largo de la cadena de valor.



## 6. Contexto Legislativo

La Directiva 2000/53/CE del Parlamento Europeo y del Consejo estableció el 18 de diciembre del 2000; medidas, con carácter prioritario, a la prevención de los residuos procedentes de vehículos y, adicionalmente, a la reutilización y reciclado, además de otras formas de valorización del vehículo al final de su vida útil. Con el objetivo de reducir la eliminación de residuos y mejorar la eficacia en la protección medioambiental de todos los agentes económicos que intervengan en el ciclo de vida de los vehículos. Además, la Directiva 2000/53/CE recoge que los estados miembros adoptarán las medidas necesarias para:

- Garantizar que los operadores económicos establezcan sistemas de recogida de todos los vehículos al final de su vida útil, y en la medida de aquello técnicamente viable, de las piezas usadas que constituyan residuos.
- Garantizar la debida disponibilidad de instalaciones de recogida dentro de su territorio.

De Acuerdo a la Directiva 2000/53/CE y contando con lo establecido en la Ley 10/1998, de 21 de abril, entra en vigor el Real Decreto 1383/2002, de 20 de diciembre, cuyos objetivos principales son establecer medidas para prevenir la generación de residuos procedentes de los vehículos, regular su recogida y descontaminación al final de su vida útil, así como las demás operaciones de tratamiento con la finalidad de mejorar la eficacia de la protección ambiental a lo largo del ciclo de vida de los vehículos.

Posteriormente el 6 de septiembre de 2006, se publica la Directiva 2006/66/CE, la cual procura mejorar el rendimiento medioambiental de las pilas y acumuladores y de las actividades de todos los operadores económicos que participan en el ciclo de vida de las pilas y acumuladores, como los productores, los distribuidores y los usuarios finales, en particular, de aquellos operadores que participan directamente con el reciclado y tratamiento de residuos de pilas y acumuladores. La presente Directiva establece:

- Las normas de puesta en el mercado de pilas y acumuladores, y en particular la prohibición de poner en el mercado pilas y acumuladores que contengan sustancias peligrosas.
- Las normas específicas de recogida, tratamiento, reciclado y eliminación de los residuos de pilas y acumuladores que completen la correspondiente legislación comunitaria en materia de residuos y fomentan un alto nivel de recogida y reciclado de residuos de pilas y acumuladores.

A partir de los objetivos mencionados para la UE, en España se han establecido nuevos objetivos de recogida para las baterías industriales que no tienen equivalencia en otros países del entorno. A continuación, se detallará la legislación vigente, relacionada tanto a baterías como al vehículo eléctrico a nivel estatal.

[Real Decreto 106/2008, de 1 de febrero, sobre pilas y acumuladores y la gestión ambiental de sus residuos.](#)

El Real Decreto 106/2008, de 1 de febrero, es el resultado de la derogación de determinadas Directivas para integrarlas todas en una única norma, “Directiva marco de residuos”. Esta nueva Directiva establece el marco jurídico de la Unión Europea para la gestión de residuos, además proporciona los instrumentos que permiten disociar la relación existente entre crecimiento económico y producción de residuos, haciendo especial hincapié en la prevención.

#### [Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados](#)

la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados promueve la implantación de medidas de prevención, la reutilización y el reciclado de residuos. Aspira a aumentar la transparencia y eficacia ambiental y económica de las actividades de gestión de residuos, para así poder facilitar el desarrollo de las soluciones con mayor valor para la sociedad, lo que sin duda incide en la reducción de gases efecto invernadero.

#### [Real Decreto 20/2017, de 20 de enero, sobre los vehículos al final de su vida útil.](#)

El presente Real Decreto establece un contenido acorde con la Directiva 2006/66/CE del Parlamento Europeo y del Consejo y sustituye al Real Decreto 1383/2002 de 20 de diciembre. Tiene la finalidad de reducir la eliminación de residuos, mejorar la eficacia en la protección de la salud humana y del medio ambiente a lo largo del ciclo de vida de los vehículos.

Atendiendo al Real Decreto 20/2017, Artículo 4 se dictan una serie de obligaciones a los productores de vehículos, en relación con la prevención de residuos y la puesta en el mercado de los vehículos, entre la cuales cabe destacar:

- a) Diseñar en colaboración con los fabricantes de materiales y equipamientos, los distintos elementos de los vehículos de forma que en su fabricación se limite el uso de sustancias peligrosas.
- b) Diseñar y fabricar los vehículos y los elementos que lo integran de forma que se facilite la reutilización, el desmontaje, la descontaminación, la preparación para la reutilización y la valoración de los vehículos al final de su vida útil.
- c) Proporcionar a los gestores de vehículos al final de su vida útil la oportuna información para el desmontaje, la identificación de componentes, la localización de sustancias peligrosas y su adecuado tratamiento.

Atendiendo al Artículo 5, será obligatoria la entrega del vehículo al final de su vida útil a aquellos centros autorizados para gestionar los vehículos (CAT) dados de baja del registro de la Dirección General de Tránsito.

Las operaciones de tratamiento del vehículo al final de su vida útil se gestionarán con lo dispuesto en la Ley 22/2011, de 28 de Julio, y en las restantes normas que resulten de aplicación. Además, el CAT entregará a un gestor autorizado todos los materiales procedentes

de la descontaminación, priorizando cuando sea posible, la preparación para la reutilización y el reciclado.

Adicionalmente según lo establecido en el Artículo 8 del presente decreto, los CAT deberán cumplir los siguientes objetivos:

- a) A partir del 1 de febrero de 2017 recuperarán para su preparación para la reutilización, y comercializarán piezas y componentes de los vehículos que supongan, al menos, un 5 % del peso total de los vehículos que traten anualmente.
- b) A partir del 1 de enero de 2021 recuperarán para su preparación para la reutilización, y comercializarán piezas y componentes de los vehículos que supongan, al menos, un 10 % del peso total de los vehículos que traten anualmente.
- c) A partir del 1 de enero de 2026 recuperarán para su preparación para la reutilización, y comercializarán piezas y componentes de los vehículos que supongan, al menos, un 15 % del peso total de los vehículos que traten anualmente.

Cabe mencionar que según el artículo los vehículos al final de su vida útil, antes de ser sometidos a cualquier tratamiento están obligado a pasar un tratamiento de descontaminación como se establece en el anexo IV. Además, el CAT se verá obligado a entregar a un gestor autorizado todo aquello procedente de la descontaminación. Entre las operaciones de descontaminación del vehículo al final de su vida útil se retiran las sustancias tóxicas o peligrosas, entre las cuales se encuentran baterías, depósitos de gas, componentes explosivos, filtros de combustible, caja de cambios...

## 7. Gestión de las baterías

El proceso de gestión de baterías al fin de vida es responsabilidad del productor que los pone en el mercado. Éstos deben estar registrados como tal y financiar los costes de recogida, tratamiento y reciclado de todas las pilas y acumuladores recogidos (Directiva 2006/66(CE).

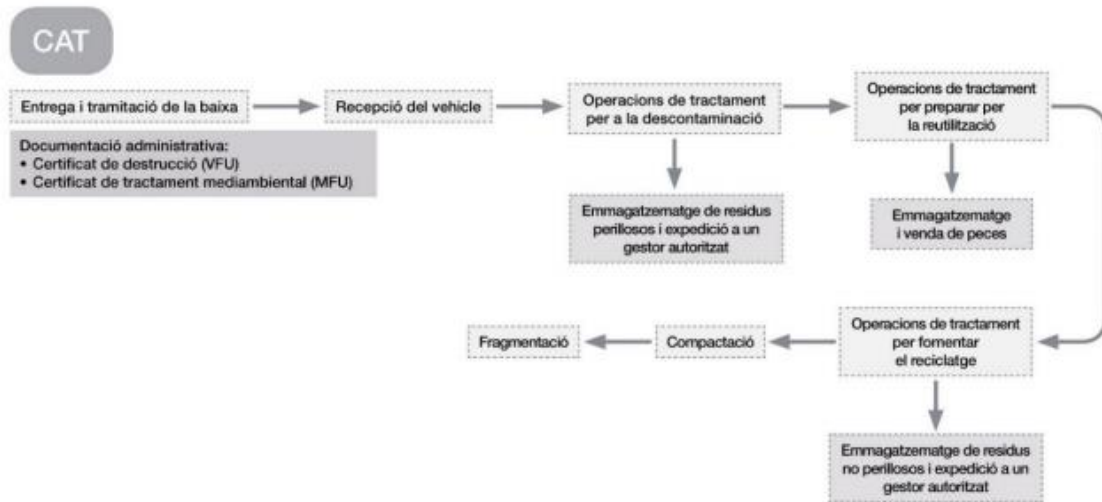
A día de hoy las pilas y baterías que son recicladas, son aquellas recogidas mediante:

- Puntos limpios
- Puntos de recogida capilares de pilas y baterías distribuidos a lo largo de la geografía española
- Pilas y baterías que provienen de los centros de tratamiento de Residuos
- Servicios técnicos y talleres de reparación, Gestores de residuos de pilas y baterías que realizan su propia recogida de baterías.

Para el caso de los vehículos, se desmantelan del equipo en el cual están contenidas en los Centros Autorizados de tratamiento (CAT). En la siguiente figura se muestran los procesos



llevados a cabo en los VFU para el reciclaje, reutilización y recuperación de residuos procedentes de VFU en Cataluña.



**Ilustración 30:** Diagrama general de las operaciones de tratamiento de los VFU.  
Fuente: [25].

El VFU es entregado a un CAT, donde se llevan a cabo las operaciones de tratamiento y descontaminación pertinentes, como retirar los depósitos de agua, la batería, combustibles, aceites...

Para el caso de las baterías de litio, de acuerdo a la legislación vigente “el productor”, es decir, el actor (fabricante, importador o distribuidor) que pone un producto en el mercado nacional, se hace responsable de su fin de vida. Este debe organizar y financiar la recogida y el tratamiento de los residuos que le son atribuidos. En el propio CAT, se realiza una serie de procedimientos de manipulación y desmontaje de la batería del vehículo. La información recibida precedente de talleres y marcas indica que el procedimiento de manipulación de las baterías antes de ser enviadas al gestor final es el siguiente:

<b>1. Manipulación obligatoria del vehículo por personal cualificado y específicamente formado.</b>
<b>2. Empleo de EPI's:</b> Guantes y zapatos aislantes, gafas de seguridad. Es necesario asegurarse de que el material de seguridad esté en perfecto estado. No utilizar material húmedo.
<b>3. Identificación del vehículo</b>
<b>4. Corte de la alta tensión.</b> Anular cualquier posible transferencia de energía por el sistema eléctrico mediante la retirada de la llave de contacto y esperar 10 minutos antes de tocar cualquier conector o terminal de alta tensión.
<b>5. Retirada del conector de servicio.</b> Como medida extra de seguridad, todos estos vehículos cuentan con un conector de servicio, situado donde se aloja el pack, que anula el intercambio de energía de la batería de alta tensión hacia el resto del

vehículo. La manipulación se realizará con guantes aislantes de goma y zapatos aislantes.
<b>6. Señalización del vehículo.</b> Para impedir manipulaciones indebidas del vehículo o riesgos eléctricos por personal no cualificado del taller, el vehículo se ubicará en una zona delimitada y señalizada con los correspondientes avisos y advertencias de seguridad para personas ajenas al vehículo.
<b>7. Inspección del pack de baterías.</b> Inspección visual del pack de baterías en búsqueda de signos de daño físico o peligro de derrame. El daño físico incluye abolladuras, deformación interna de los módulos, ausencia o pérdida de protecciones, daños en los cables/conexiones de alto voltaje incluyendo: cables expuestos, o cables con signos de provocar posible arco eléctrico o incendio. En caso de duda sobre el estado del pack la batería, siempre suponer la peor opción, tratándola como si estuviese defectuosa. Durante la inspección y desmontaje del pack de baterías del coche, éste no debe ser manipulado de ninguna forma excepcional a la citada y a la estrictamente necesaria para su desconexión del vehículo. No debe ser desmontado ni expuesto a ninguna acción que pueda provocar un arco eléctrico, explosión o derrame del electrolito.
<b>8. Identificación del pack de baterías:</b> Una vez comprobado el estado de la batería, el taller ha de solicitar su transporte a la empresa responsable contratada por la marca.
<b>9. Preparación de la batería para su expedición:</b> a batería correctamente identificada se prepara para su envío siguiendo el siguiente procedimiento: a) utilizar el embalaje original de la batería si está disponible b) en caso de que no lo esté, paletizar el pack: colocarlo sobre palet, embalar con plástico (no es obligatorio) y flejar con fleje resistente (p.ej.: acero) para asegurar su fijación. c) en el caso de que la batería esté dañada, ésta tendrá que ser transportada en un envase especial según normativa.

**Tabla 8:** Procedimientos de manipulación y desmontaje de la batería de un VE.

Fuente: [16]

Una vez separadas del equipo, se envían a gestor autorizado para su correcto tratamiento según su tecnología. Estos transportes deben cumplir la normativa europea sobre transporte de mercancías peligrosas (P908 y P909 del ADR) por la cual cada batería se debe embalar individualmente como mínimo dentro de dos contenedores, uno de ellos resistente al fuego. Además, para su transporte será necesario el documento de aceptación, el cual resulta ser el acuerdo normalizado que han de rellenar el poseedor del residuo y la empresa gestora escogida.

Cabe mencionar que en España no existen instalaciones de reciclaje de residuos de baterías de Li-ion, litio primario y níquel metal hidruro por lo que son exportados a plantas específicas fuera de España.



## 8. Reciclaje y tratamiento de fin de vida de baterías

Se entiende como reciclaje todas las operaciones y tratamientos que se ejecutan desde que la batería llega a la planta de reciclado hasta que se obtienen los materiales deseados.

Lo que motiva el procesamiento de las baterías es el valor del cobalto en el caso de las baterías de Litio-Ión, y cuando el valor de estos productos no es suficiente, el reciclaje implica un coste. Puesto que actualmente el cobalto cuenta con un alto costo, la concentración del cobalto utilizado en las baterías cada vez es menor, ya que se opta por otras composiciones químicas y muchas veces no es rentable desde un punto de vista económico la extracción de metales a partir del reciclado.

Previamente a cualquier tratamiento, el pack o módulo se debe realizar un proceso de acondicionamiento.

Las etapas del proceso de acondicionamiento vienen numeradas en la siguiente tabla:

Etapa	Descripción
1	Revisión de ficha técnica del pack de baterías
2	Identificación de características generales
3	Inspección visual
4	Comprobación de sus parámetros eléctricos
5	Descarga
6	Desensamblaje y eliminación de impropios

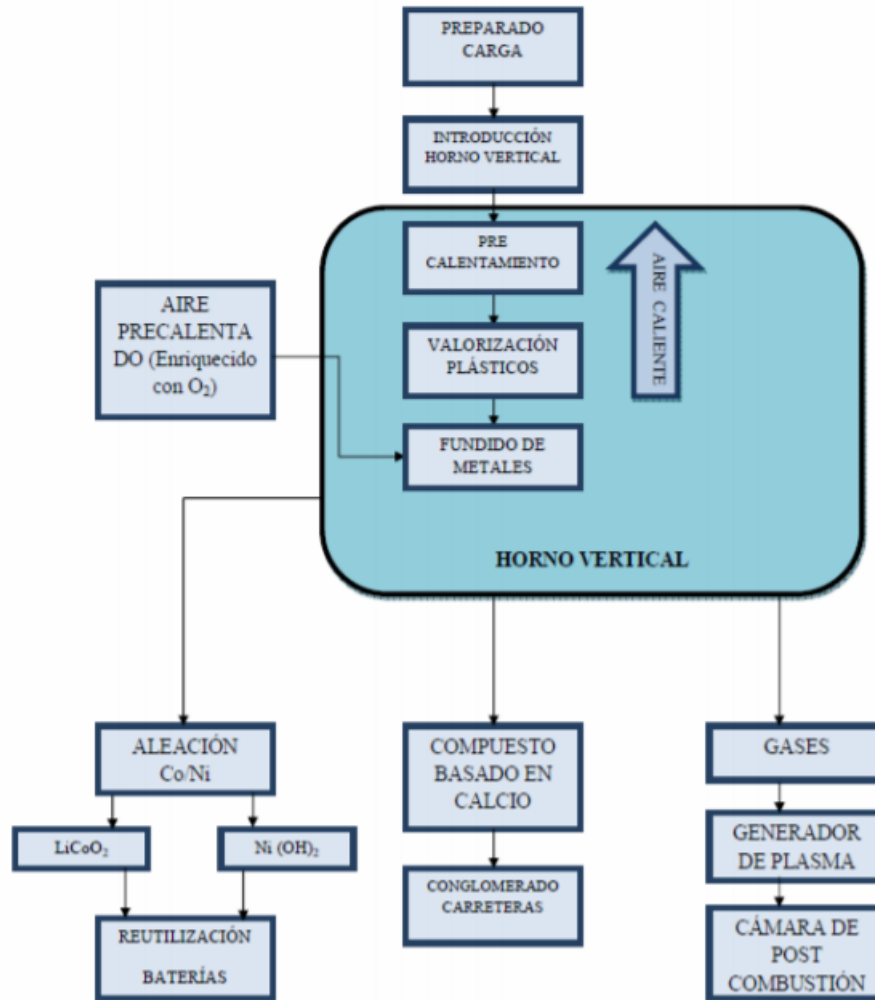
**Tabla 9:** Procedimientos de acondicionamiento de la batería de un VE.

Fuente: [16]

Una vez el pack o módulo ha pasado por el proceso de acondicionamiento, se procede a su reciclaje. Actualmente se utilizan dos procesos de reciclado: el proceso pirometalúrgico donde los metales se recuperan mediante hornos a alta temperatura y hidrometalúrgico donde los metales se recuperan por método químico acuoso:

- **Reciclaje Pirometalúrgico:** A lo largo de este proceso se utilizan altas temperaturas para transformar, separar y purificar los metales. No existe un método genérico de este tipo de reciclaje, y los existentes son propios de las empresas que lo aplican [26]. A continuación, se muestra un diagrama de flujo de un proceso metalúrgico:





**Ilustración 31:** Diagrama de flujo del proceso pirometalúrgico.  
Fuente: [16].

Las 4 etapas seguidas durante este proceso pirometalúrgico son [16]:

1. Fundido y valorización energética
2. Refinado y purificado de los metales
3. Oxidación del cloruro de cobalto a óxido de cobalto
4. Producción de óxido de litio metálico para nuevas baterías

- **Reciclaje Hidrometalúrgico:** Hace referencia al procesamiento de metales en soluciones acuosas. El procesamiento hidrometalúrgico de las baterías implica un paso mecánico y uno químico. En la fase mecánica, las baterías se trituran para separar metales, papel plástico y masa negra. La masa negra pasa por otros procesos químicos para producir una solución que se somete a electrólisis o algún otro tratamiento para separar los metales disueltos [26]. A continuación, se muestra un diagrama de flujo del proceso hidrometalúrgico llevado a cabo en baterías:

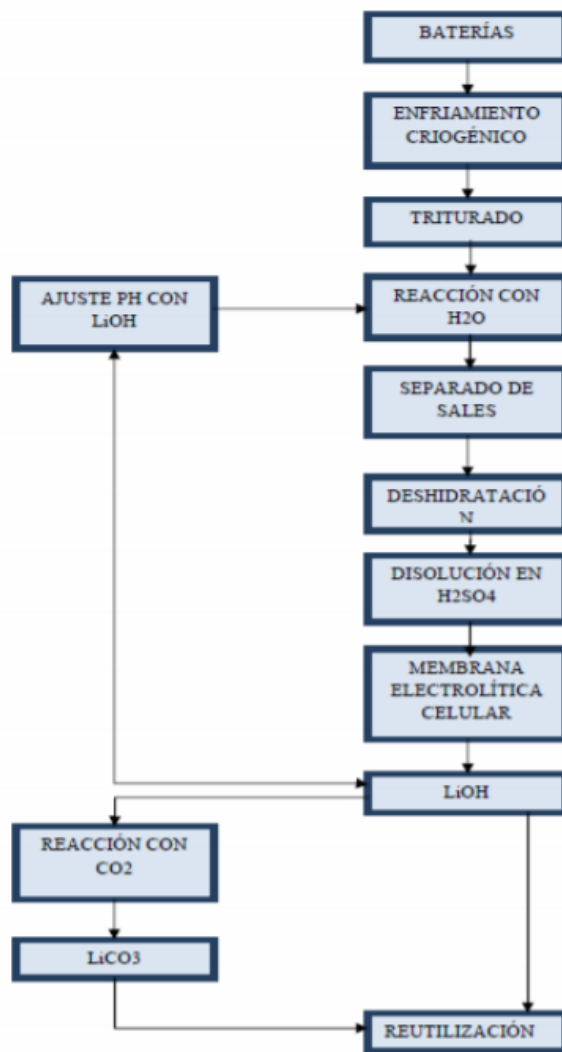


Ilustración 32: Diagrama de flujo del proceso hidrometalúrgico.  
Fuente: [16].

En la siguiente tabla se detallan las principales ventaja e inconvenientes de los procesos de reciclaje recién mencionados:

	Ventajas	Inconvenientes
<b>Pirometalúrgico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Economía de escala.</li> <li>• Apta para varias tipologías de baterías.</li> <li>• Valorización energética plásticos.</li> <li>• Altas velocidades de reacción.</li> <li>• Poca superficie por unidad tratada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recuperación de cobalto y níquel principalmente.</li> <li>• Alta inversión inicial.</li> <li>• Emisiones de gases efecto invernadero.</li> <li>• Solo apto para materiales en cantidades considerables.</li> <li>• Poca selectividad y eficacia de separación.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alimentaciones heterogéneas.</li> </ul>	
<b>Hidrometalúrgico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inversión inicial moderada.</li> <li>• Recuperación del litio y otros materiales.</li> <li>• Alto grado de separación.</li> <li>• Apto para metales en bajas cantidades.</li> <li>• Alta pureza de productos.</li> <li>• Ausencia de emisiones de gases efecto invernadero.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altos costes de operación y mano de obra.</li> <li>• Velocidades de reacción lentas.</li> <li>• Alta superficie por unidad tratada.</li> <li>• Solo apto para baterías de litio.</li> <li>• Generación de residuos sólidos y aguas residuales.</li> <li>• Sensible a variaciones en la composición.</li> </ul>

**Tabla 10:** Ventajas e inconvenientes del proceso pirometalúrgico e hidrometalúrgico.

*Fuente:* [7]

El proceso pirometalúrgico se centra en la extracción de metales como el cobalto o el níquel, que con el continuo desarrollo en las diferentes tecnologías de las baterías son menos utilizados puesto que se tiende a sustituirlos por otro tipo de metales. Adicionalmente este proceso es apto para diversos tipos de baterías. Sus principales desventajas son las elevadas emisiones de gases de efecto invernadero y la poca selectividad y eficacia de separación, pues su rentabilidad depende principalmente de las cantidades de cobalto y níquel que contenga la batería.

Por otro lado, el proceso hidrometalúrgico es utilizado exclusivo en baterías de litio con el fin de recuperar el litio y otros materiales. Presenta ventajas como la extracción de productos de alta pureza y la ausencia de emisiones de gases efecto invernadero. Este proceso también presenta desventajas como requerir de una alta superficie por unidad tratada y contar con unos costes considerables de operación y mano de obra durante el proceso. Al igual que en el caso pirometalúrgico, la rentabilidad de este proceso depende principalmente del precio de los materiales extraídos, en especial el litio.

## 9. Reutilización de las baterías

Con el gran incremento del uso de baterías en la última década, la incertidumbre sobre su uso después de su primera vida hace que el tiempo de vida de la batería sea un tema predominante y objetivo de estudio.

Las baterías de tecnología de iones de litio, se muestra la tecnología más prometedora por su constante incremento en el mercado; además ocupa gran parte del mercado de vehículos eléctricos, el cual abre las puertas a aplicaciones de gran capacidad en su segunda vida. El uso de baterías de iones litio en su primera vida tiene un coste aproximado de 300-500€/kWh, resulta un precio demasiado costoso para aplicaciones de almacenamiento estacionario, es por eso que a día de hoy se opta por otro tipo de baterías para este tipo de aplicaciones. Pero un precio interesante capaz de obtener rentabilidad en aplicaciones estacionarias estaría por debajo de 200 €/kWh.

El fin de la vida de una batería procedente de un vehículo eléctrico está definida por el consorcio de baterías avanzado estadounidense (USABC) [27], es cuando hay una pérdida del 20% de la capacidad con respecto a la capacidad original, ya que el conductor notaría cambios notables en las prestaciones. En este punto la batería no sería útil para usos de tracción; en cambio serviría perfectamente para otros tipos de sistema de almacenamiento de energía, y si a esto le sumamos el aumento de demanda previsto en los próximos años la reutilización de productos, así como la preparación para la reutilización o el segundo uso en una aplicación diferente a la inicial para la que fue diseñada, resultan ser operaciones que contribuyen a la economía circular, extendiendo la vida útil de estos productos [28].

Además, hasta el momento, las opciones de reutilización no están del todo previstas en la normativa europea o nacional, a pesar de esto ya existen países europeos que ya se dedicaban al reciclaje, que cuentan con soluciones para la reutilización de baterías, como es el caso de Holanda o Noruega. También existen algunos organismos en los que participan fabricantes de VE, en los cuales la reutilización es algo crucial a la hora de tratar la vida una vez finalizada su primera vida, dos ejemplos son la *USABC* y *VDA Initiative*.

Otros proyectos que se dedican al desarrollo de aplicaciones destinadas a la segunda vida de las baterías provenientes de la automoción se muestran en la siguiente tabla:

Entidad	Servicio
Sunbatt + SEAT [29]	-Diseño y puesta en marcha de equipos de gestión y carga de segunda vida y de la micro-red de Seat.
4R Energy Corporation + Nissan [30]	-Sistema de recarga solar con baterías usadas del Leaf. -Baterías para vehículos guiados automatizados.



	-Aplicación de baterías como sistema de almacenamiento para renovables.
Electric Power + Honda [31]	-Integración de baterías en su segunda vida en el sistema eléctrico para almacenar energía renovable.

**Tabla 11:** Proyectos puestos en marcha orientados a la reutilización de baterías.

*Fuente:* [29], [30] y [31]

## 9.1 Test previos a la reutilización

Las pruebas previas a las baterías son necesarias a la hora de determinar el estado de salud y todos sus parámetros para poder determinar qué hacer con ella al final de su primera vida. Por ejemplo, de acuerdo a la USABC, a las baterías procedentes de vehículo eléctrico deberán realizar una serie de procedimientos experimentales específicos previos a la reutilización.

Tal y como se describe en manual de procedimientos de prueba de la batería del vehículo eléctrico del USABC los pasos a seguir para todos los desarrolladores, laboratorios y otras instalaciones de prueba relevantes en los Estados Unidos son [27]:

- **Condiciones generales de prueba y escala**
- **Test de capacidad estática**
- **Carga con alta tasa de corriente**
- **Carga de tasa alta**
- **Test de potencia máxima**
- **Test de autodescarga**
- **Test de rendimiento térmico**
- **Test de vida útil**
- **Test de ciclo de vida con estrés dinámico**
- **Test de rendimiento de referencia**

Al igual que la USABC, existen otros organismos que dictaminan una serie de pautas y test previos de cara a la reutilización. Un ejemplo ya mencionado en el apartado anterior, la VDA-



*Initiative 2007/03/05* [32]. Los test realizados de forma experimental no resultan ser ni fáciles ni simples. De hecho, la imagen X, muestra los pasos a seguir por un test de capacidad, donde la prueba de descarga debe realizarse múltiples veces con corrientes y temperaturas diferentes. Además, entre cada paso debe realizarse una pausa de 30 minutos, resultando en un tiempo total aproximado de 126 horas.

Nº Paso	Paso	Temp.	Nº Paso	Paso	Temp.
1	Carga estándar C/3	T.Ambiente	22	Descarga a 20C	T.Ambiente
2	Aclimatación	-25°C	23	Carga estándar C/3	T.Ambiente
3	Descarga a 1C	-25°C	24	Descarga a 20C	T.Ambiente
4	Carga estándar C/3	-25°C	25	Carga estándar C/3	T.Ambiente
5	Descarga a 1C	-25°C	26	Descarga a 20C	T.Ambiente
6	Carga estándar C/3	-25°C	27	Carga estándar C/3	T.Ambiente
7	Descarga a 1C	-25°C	28	Aclimatación	40°C
8	Carga estándar C/3	-25°C	29	Descarga a 1C	40°C
9	Descarga a 20C	-25°C	30	Carga estándar C/3	40°C
10	Carga estándar C/3	-25°C	31	Descarga a 1C	40°C
11	Descarga a 20C	-25°C	32	Carga estándar C/3	40°C
12	Carga estándar C/3	-25°C	33	Descarga a 1C	40°C
13	Descarga a 20C	-25°C	34	Carga estándar C/3	40°C
14	Aclimatación	T.Ambiente	35	Descarga a 20C	40°C
15	Carga estándar C/3	T.Ambiente	36	Carga estándar C/3	40°C
16	Descarga a 1C	T.Ambiente	37	Descarga a 20C	40°C
17	Carga estándar C/3	T.Ambiente	38	Carga estándar C/3	40°C
18	Descarga a 1C	T.Ambiente	39	Descarga a 20C	40°C
19	Carga estándar C/3	T.Ambiente	40	Aclimatación	T.Ambiente
20	Descarga a 1C	T.Ambiente	41	Carga estándar C/3	T.Ambiente
21	Carga estándar C/3	T.Ambiente			

**Ilustración 33:** Pasos a seguir en el test de capacidad propuesto por USABC.

Fuente: [33]

Existen diversos estudios como es el caso de [34], que con el fin de reducir tiempo y costes optan por un proceso en el cual se utiliza la información almacenada en el BMS, donde el SOH sería calculado durante el uso del EV.

## 10. Propuesta del proyecto

Como ya se ha comentado anteriormente el aumento de las unidades de baterías procedentes de EV y su capacidad, supondrá un reto medioambiental que habrá que afrontar abordando estrategias de reutilización y reciclaje. Para ello el primer paso es identificar si la batería está en un estado reutilizable.

Actualmente, el proceso de gestión de baterías al final de su vida es responsabilidad del productor en el mercado. Además, en el apartado Gestión de las baterías ya se ha comentado que, éstas son desmanteladas y enviadas por los Centros Autorizados de Tratamiento (CAT).

Este proyecto pretende impulsar la reutilización de tal forma que, haya un proceso de selección de aquellas baterías que aún son aprovechables y aquellas que no, de esta forma se puede reducir costes de gestión y medioambientales relacionados con el transporte (enviando solo aquellas baterías que resulten no aprovechables para su uso en una segunda aplicación) e impulsar la segunda vida de aquellas baterías que si son aprovechables; pudiendo ser enviadas a procesar.

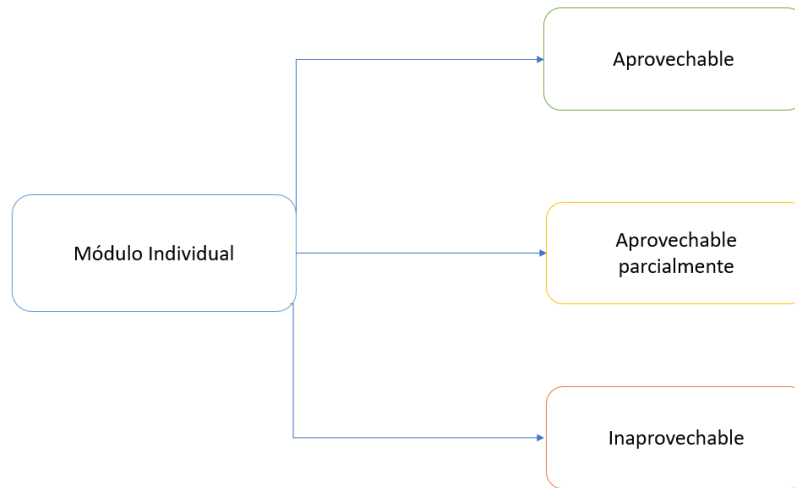
Se plantea que, una vez haya llegado el vehículo al CAT, se sigan dos pasos lógicos (o tal vez una combinación de ambos):

- Identificar la fuente de la batería, si esta procede de un vehículo usado o dañado.
- Pruebas de batería a grandes rasgos, de forma visual, eléctrica o mediante el uso de modelos.

A priori se establecen estos dos pasos iniciales, por el simple hecho que si el vehículo recibido tuvo un accidente grave y la batería tiene una fuga, carece de sentido realizarle cualquier prueba cuando dicha batería no es confiable, por lo que debería ser reciclada. Por otro lado, si la batería es de un vehículo usado, entonces se podrían realizar pruebas como las que se mencionan en la siguiente tabla con el fin de asegurar que la batería aún le queda vida, y funciona de forma correcta y segura.

La batería a analizar en el CAT, podrá ser clasificada como aprovechable, parcialmente aprovechable y no aprovechable. Aquel módulo que se presente en buenas condiciones será clasificado como aprovechable y será apto para enviar a tratar antes de su reutilización. En caso de que el módulo sea inservible, pero cuente con celdas en buen estado, será clasificado como parcialmente aprovechable y se procederá a su desmantelamiento, pudiendo recuperar aquellas celdas en buen estado ya sea para el reciclado o para su reutilización. Por último, aquellos módulos que presenten grandes daños y no sean confiables serán inaprovechables y serán desmantelados para su debido tratamiento.





**Ilustración 34:** *Proceso de triaje propuesto en los centros CAT.*  
*Fuente: Elaboración propia.*

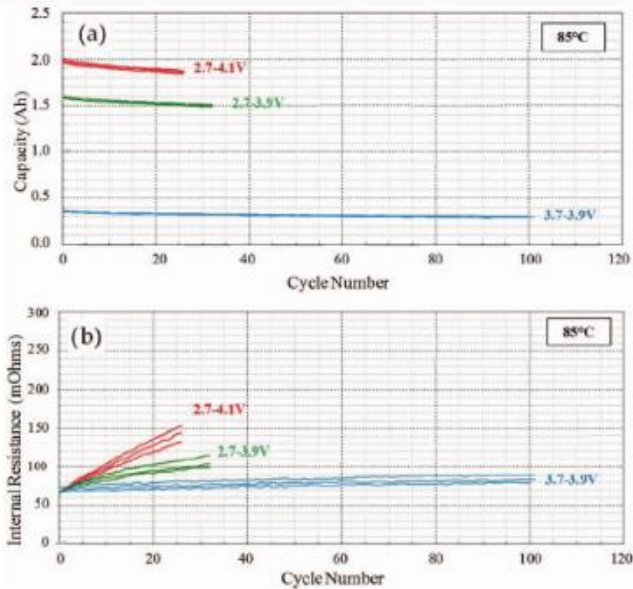
## 10.1 Métodos de estimación del estado de la batería

Para una correcta clasificación de las baterías recibidas en los centros CAT será necesario conocer de alguna forma el SOH. Actualmente existen diversos enfoques para determinar el estado de la batería. En el siguiente apartado se pretende explicar algunos de los métodos utilizados actualmente, donde se pueden diferenciar dos grandes grupos: métodos experimentales y métodos basados en modelos.

Los métodos experimentales se basan en la recopilación de datos y mediciones que se pueden utilizar para comprender y evaluar el comportamiento del envejecimiento de la batería [35]. Presentan inconvenientes como requerir de una cantidad considerable de tiempo o un alto coste, es por eso que la mayoría de veces son llevados a cabo en laboratorios. Los principales métodos experimentales son:

- **Medición de la resistencia interna:** La resistencia interna de la batería es un gran indicador del estado de salud relacionado con la batería. Este parámetro es afectado por el envejecimiento y degradación de la batería. El valor de la resistencia interna incrementa cuando la batería envejece y pierde capacidad tal y como se enseña en la Ilustración 35.





**Ilustración 35:** Capacidad en función de la resistencia interna en una batería.

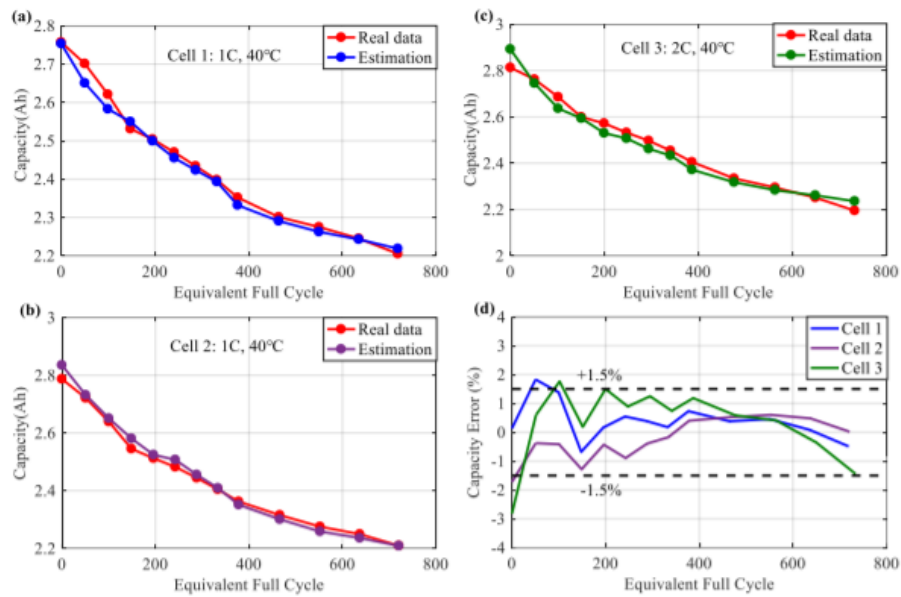
Fuente: [36]

Para la obtención de la resistencia interna existen diferentes métodos. Uno utilizado frecuentemente es mediante un test de pulsos, el cual involucra una serie de cargas y descargas a corriente constante. Durante la descarga, la corriente es interrumpida a diferentes estados de carga de la batería realizar las mediciones pertinentes. La resistencia interna es calculada con la fórmula siguiente [37]:

$$R_b(SOC, T) = \frac{OCV(SOC, T) - V_{bat}(SOC, T)}{I_{pulse}}$$

Los parámetros de interés durante las mediciones a lo largo del test de pulsos, son la tensión en circuito abierto (OCV), el voltaje de la batería ( $V_{bat}$ ) y la corriente aplicada ( $I_{pulse}$ ).  $R_b$  resulta ser la resistencia interna a un estado de carga y temperatura determinada.

- **Nivel de energía de la batería:** Como ya se ha comentado anteriormente, la capacidad es una característica que indica la cantidad de energía, la cual es capaz de almacenar la batería. Se conoce que la capacidad disminuye a lo largo de la vida de la batería, por lo que la medición de la capacidad será algo crucial para determinar el SOH, además será un parámetro de interés de cara al uso de las baterías a aplicaciones de segundo uso. En los centros de reutilización suelen utilizarse test de descarga a diferentes magnitudes de corriente y temperatura. En [38], los autores estimaron la capacidad de la batería mediante testeos de descarga experimentales a diferentes temperaturas y corrientes de descarga.

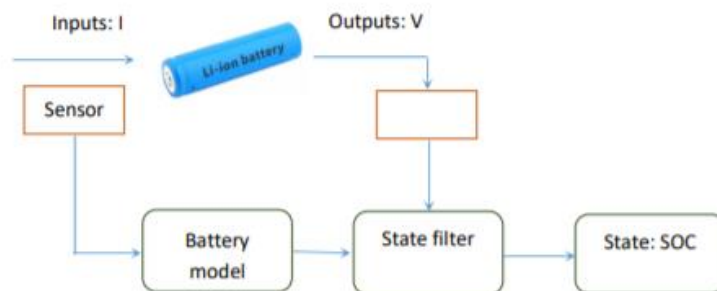


**Il·lustració 36:** Capacitat estimada de una batería de litio probada durante 800 ciclos.  
*Recuperado [38].*

Métodos basados en modelos: Estos métodos se caracterizan por ser flexibles y contar con una gran viabilidad a tiempo real. Consisten en estimar el SOH, utilizando indicadores como la capacidad, la resistencia o impedancia de la batería. Actualmente existen diversos métodos en función de los parámetros utilizados para estimar el resto de vida útil de las baterías. A continuación, se detallan aquellos con más presencia:

- Modelos electroquímicos:** Este modelo es el más utilizado en un BMS y su uso más común es para estimar el SOC. El modelo en cuestión está formado por un conjunto de elementos eléctricos tales como resistencias y condensadores para modelar el comportamiento eléctrico de una batería y se basa principalmente en las reacciones internas de la batería y el estudio del efecto de degradación en los componentes de la batería [39]

Este tipo de modelo utiliza algoritmos para inferir en el estado interno de la batería a partir de medidas de entrada, encontrando el estado de carga de la batería a partir de la comparación de las mediciones reales y la salida del modelo. Se puede ver un ejemplo de la obtención del SOC en el siguiente diagrama de flujo.



**Ilustración 37:** Diagrama de Flujo del algoritmo de estimación del SOC del batería basado en un modelo electroquímico.

*Fuente:* [39].

- **Utilizando herramientas matemáticas:** Estos modelos son muy útiles para los diseñadores al dar información del comportamiento del sistema, eficiencia o capacidad [40]. Además, es común encontrar estos modelos integrados en otro tipo de modelos. Los principales inconvenientes de estos modelos es la necesidad de muchos datos y una cantidad significativa de potencia computacional.
- **Modelos eléctricos equivalentes:** Se basan en la creación de un circuito equivalente de la batería a través de una serie de resistencias, condensadores y fuentes de voltaje. Se caracterizan por poder crear simulaciones de dicho circuito para predecir el comportamiento de la batería ante un perfil de intensidades de corriente a lo largo del tiempo. Mecanismo de degradación pueden ser introducidos utilizando expresiones matemáticas para modificar los parámetros de los componentes internos a partir de parámetros de entrada como pueden ser la corriente o temperatura [34]. Una ventaja que presenta este tipo de modelos es que requieren una cantidad menor de potencia computacional.

## 10.2 Procedimiento propuesto

A continuación, se detallará el procedimiento a seguir propuesto con el fin de conocer el estado a niveles generales de la batería a analizar teniendo en cuenta que el proceso propuesto se realizará en los propios centros CAT; donde no se dispone de los instrumentos necesarios para realizar la cantidad de test que podrían realizarse en un laboratorio o centro destinado al tratamiento de baterías.

Una vez abierto el pack, se inspeccionará de forma visual, a lo largo de la inspección, se deberá comprobar:

- **Hinchamientos en módulos o celdas:** Cualquier celda o módulo que presente cualquier tipo de hinchamiento será descartado como inaprovechable, los hinchamientos suelen estar debidos a gases de fuga, lo que significa que se encuentra en mal estado pudiendo llegar a prenderse fuego o explotar si se continúa usando.
- **Corrosión en los conectores:** La corrosión puede causar grandes fallos en la batería ya que disminuye la sección efectiva de material conductor y aumenta la resistencia eléctrica pudiendo llegar a crear grandes desbalances en la batería. En caso de presentar corrosión los conectores, se recuperarán solo aquellas celdas que no presenten corrosión para una futura reconfiguración.
- **Intrusión de agua y polvo:** Elementos como pueden ser el polvo, los escombros, la humedad puede dañar las celdas de la batería y la electrónica auxiliar. Por lo que, en caso de encontrar esta clase de materiales dañinos la batería no será aprovechable.
- **Cables y conexiones sueltos:** Se comprobará que todos los circuitos que integran los módulos se encuentren en buenas condiciones y que todo esté bien conectado.



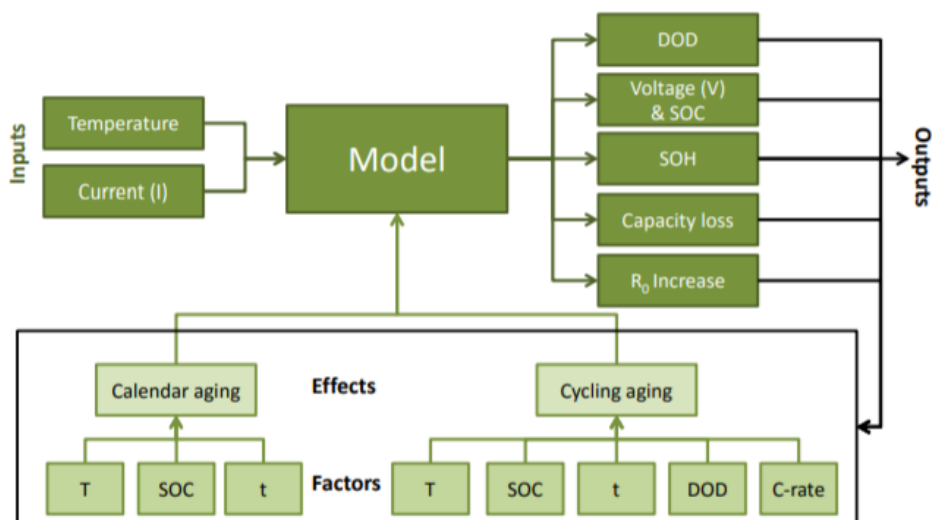
- **Fecha de producción:** Será de interés anotar la fecha de producción del pack si es posible, puede ser un dato de valor añadido a la hora de preparar la batería para una segunda vida en los centros de tratamientos de baterías.

De cara a su segunda vida, es de vital importancia la seguridad y funcionalidad que estas proporcionan. Para estimar un primer estado de salud y así decidir si el módulo es aprovechable o no, puede optarse o por el método experimental o por un método utilizando un modelo.

En el caso de optarse por los métodos experimentales, será necesario contar con los instrumentos necesario para realizar mediciones de la resistencia interna e impedancia. Además, también será necesario la realización de un test de capacidad para conocer la energía que aun alberga. Los resultados obtenidos de forma experimental no serán suficientes, es por eso que una vez llegue al centro donde la batería vaya a ser tratada será necesario que las baterías sean nuevamente revisadas utilizando equipos electrónicos de precisión y en función de los resultados de rendimiento sean clasificadas y preparadas dependiendo del tipo de aplicación a la que irán destinadas.

En el caso de optarse por un método mediante modelos. Las baterías deberán ser caracterizadas utilizando la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), esta técnica suele ser utilizada para caracterizar sistemas electroquímicos utilizando una corriente alterna en un rango amplio de frecuencias. A partir de esta técnica será posible obtener los parámetros de los elementos del modelo. También será necesario especificaciones técnicas del modelo de batería que se pueden obtener en las mismas fichas técnicas de estas para que el modelo sea capaz de identificar el estado actual de la batería que se esté analizando.

Un modelo propuesto es el utilizado en [34], se trata de un modelo eléctrico equivalente que mediante el testeo EIS, la temperatura y las cargas de corriente como entradas es posible obtener los efectos del envejecimiento, y en consecuencia el resto de vida útil en función de la forma de operar en su segunda vida.



**Ilustración 38:** Esquema de bloques del modelo electromecánico para analizar el estado de salud de las baterías en diferentes aplicaciones.

Fuente: [34].

## 10.3 Aplicabilidad de las baterías

Los BESS son sistemas de baterías de almacenamiento de energía que han ganado mucho interés los últimos años debido a la reducción de costes de las baterías y por lo que son capaces de ofrecer a la red, tanto en términos de flexibilidad como descarbonización. El uso de las baterías tiene un rango de aplicabilidad muy amplio, desde servicios de grandes cantidades de energía a servicios de gestión energética al cliente.

En el contexto actual, donde existe una plena transición de energías fósiles a fuentes renovables, las energías que cada vez resultan más influyentes son la solar y eólica que a pesar de ser una fuente inagotable respecto otras fuentes de generación, no ofrecen una fuente de alimentación constante y fiable debido a que están sujetas a las diferentes condiciones atmosféricas (IBERDROLA).

Los sistemas de almacenamiento son clave para abordar el reto de la transición energética porque permiten mejorar la calidad del suministro eléctrico, asegurar la estabilidad y fiabilidad de la red e integrar y aprovechar la energía generada por fuentes renovables (cada vez más presentes). La tecnología de litio resulta una de las opciones más prometedoras puesto que cuenta con el amplio mercado del VE previsto, y sus características son capaces de contribuir de forma considerable, en el aprovechamiento de la energía limpia y asegurar un sistema de red equilibrado respecto otros tipos de baterías electroquímicas.

A continuación, se explicarán más en detalle algunas posibles aplicaciones para la segunda vida de las baterías procedentes de VE aplicables a la red:

### 10.3.1 Control de Frecuencia

Un sistema en su conjunto trabaja a una frecuencia determinada, es por eso que el control de frecuencia en la red es de vital importancia, pues los cambios ocurren en una escala de tiempo muy corta y un desvío considerable podría provocar grandes daños tanto en generadores como en cargas.

En el sistema actual, los generadores síncronos que están acoplados a masas rotantes de elevada inercia, sobre todo en centrales térmicas, son los que evitan, con dicha inercia, que haya variaciones bruscas de la frecuencia y que pueda ser corregido a tiempo con la entrada o salida de la potencia activa de la generación. Ante el paradigma actual con cada vez más penetración de la generación renovable, se prevé menos presencia térmica y la incorporación de grandes BESS capaces de regular la frecuencia utilizando la electrónica de potencia.

Una forma de regular la frecuencia sería mediante la instalación de BESS en la red de distribución de manera que sea posible inyectar o absorber potencia activa cuando el operador lo requiera.

### 10.3.2 Traslado de la demanda o *Supply Shift*

Esta aplicación consiste en almacenar los excesos de energía renovable durante un periodo, para ser posteriormente utilizados en un periodo de mayor demanda. Las baterías pueden aplicarse en el mismo sitio donde se genera la energía mediante renovables o a nivel de red, y suavizar la producción variable de energía a medida que se alimenta a la red.

Con el cambio que está sucediendo en el sistema eléctrico, son cada vez más necesarios las centrales aisladas integradas en la red capaces de inyectar energía en periodos de alta demanda como pueden ser las horas pico. Empresas como Iberdrola ya cuentan con grandes contenedores llenos de baterías para este tipo de aplicación (Ilustración 39).



**Ilustración 39:.**

*Fuente: [41].*

### 10.3.3 Estabilidad del sistema

Baterías electroquímicas pueden ser utilizadas durante el transporte de energía, los BESS son capaces de compensar anomalías y perturbaciones como pueden ser los huecos de tensión, inestabilidades de tensión o resonancia subsíncrona. Dos casos de apoyo por parte del sistema de almacenamiento con baterías electroquímicas podrían ser [42]:

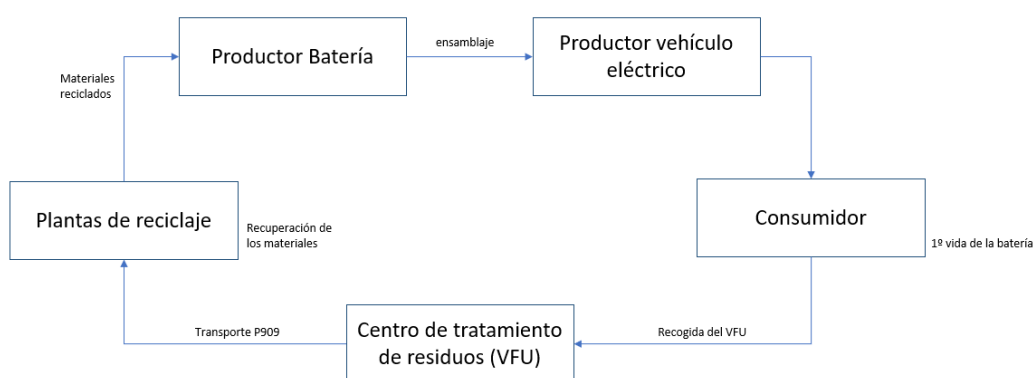
- **Amortiguación de la inestabilidad en la transmisión:** Las baterías podrían ser utilizadas para aumentar la capacidad de las líneas, aumentando la respuesta dinámica del sistema.
- **Amortiguación de la resonancia subsíncrona:** Ante la bajada de la frecuencia de resonancia del sistema, se producen altas corrientes subsíncronas debido a resonancias RLC a frecuencias subsíncrona por interacción con los generadores de la red. El uso de baterías electroquímicas permite modular la potencia activa o reactiva en frecuencias subsíncronas modales de resonancia, resolviendo la problemática asociada a las altas corrientes y permitiendo mayores niveles de compensación, en consecuencia, mayor capacidad.

## 11. Cadena de valor entorno a la batería en su segunda vida

El despliegue global del vehículo eléctrico ha aumentado de 17.000 en 2010 a 8,5 millones en 2020, se espera que esta tendencia siga en aumento los próximos años. De acuerdo a [43] la cantidad de baterías procedentes de vehículos eléctricos disponibles para su reutilización será de 1,5 millones en la Unión Europea y se dispondrá de un total aproximado de 30 GWh de capacidad. Además, esta tendencia creciente viene directamente relacionada con la demanda de las baterías de ion-litio, las cuales actualmente son la tecnología de almacenamiento dominante en aplicaciones de alta densidad energética.

Las baterías de litio en los últimos 10 años han avanzado en todas las direcciones, contando con una vida útil mucho más larga, mejor adaptación a las temperaturas extremas, la ausencia de mantenimiento y gran densidad energética respecto otros tipos de baterías. No obstante, las emisiones de gases efecto invernadero a lo largo de la producción de un VE con 64 kWh de capacidad sigue siendo un 25% mayor respecto los vehículos Diesel [44] . Además de ser costoso los materiales utilizados durante la fabricación se consideran materiales críticos.

Como ya se ha comentado anteriormente en el caso de los VE, las baterías de litio pierden capacidad con el tiempo, y tanto los productores de VE como la USABC recomiendan su reemplazo cuando esta alcanza una pérdida del 20% de su capacidad. A raíz de esto y la creciente demanda prevista de baterías destinadas al VE, surgen cuestiones sobre qué hacer con el pequeño stock de baterías de que existe actualmente, el cual se estima que crezca notablemente en los próximos años. A continuación, se muestra el ciclo de vida actual por la que pasa una batería de VE:



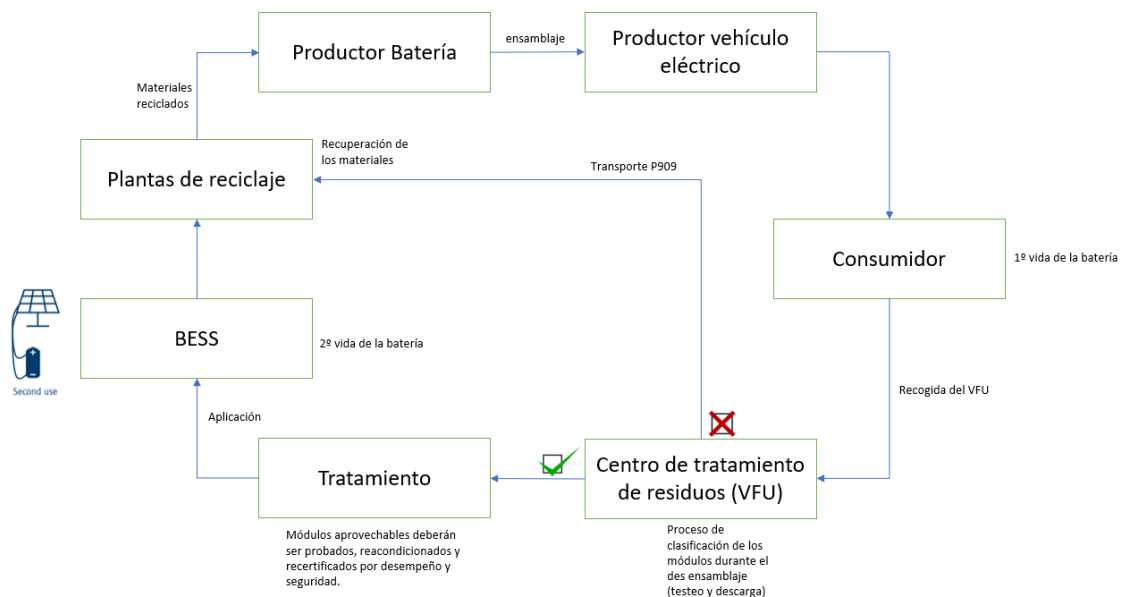
**Ilustración 40:** Cadena de valor actual.

Fuente: Elaboración propia

Con el fin de extender el uso de las baterías procedentes de VE se plantea que las baterías que en la cadena actual serían transportadas fuera de España y recicladas para la recuperación de metales, sean adecuadas y preparadas para reutilizarse. De esta forma los flujos de una

industria como es la de automoción podrían ser utilizadas por otra que ofrece un producto útil y demandado, además de sacar rentabilidad, pudiendo apoyar a la economía circular.

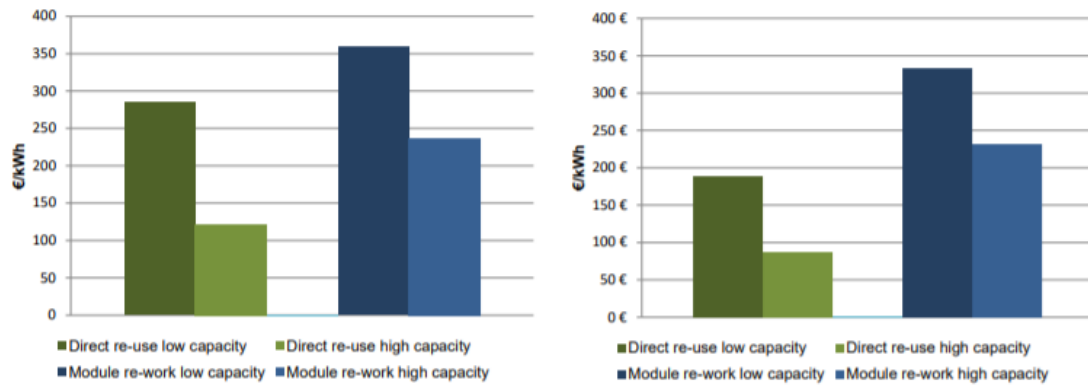
Cabe mencionar que la reutilización o preparación para la reutilización no están previstas en la normativa europea o nacional [28]. Sin embargo, la reutilización de la batería representa una oportunidad para aumentar su vida útil hasta completar su vida completa. El segundo uso de estas baterías podría evitar la fabricación de baterías nuevas y en consecuencia disminuir los gases efectos invernaderos derivados de la fabricación de estas. Adicionalmente, teniendo en cuenta que de acuerdo a la Directiva 2006/66/CE el fabricante organiza y financia la recogida y tratamiento de los residuos que los atribuidos, y que el tratamiento de dichos residuos se realiza fuera de España, el favorecer la incorporación de una segunda vida de los sistemas de almacenamiento energético lograría evitar movimientos innecesarios de residuos (lo que provoca un incremento del CO2 emitido por el transporte) si la reutilización y el reciclado se favorece que se acometan a nivel local en el lugar en el que el residuo es generado [28].



**Ilustración 41:** Cadena de valor propuesta.  
*Fuente: Elaboración propia.*

Según [45], uno de los objetivos de cara a una economía circular entorno a la reutilización son la utilización de redes de desmantelamiento efectivas, donde exista un manejo seguro de las cantidades rápidamente crecientes de productos al final de su vida útil. Puesto que en la cadena de valor actual; las baterías son recogidas, desmanteladas y enviadas desde los centros CAT. En la nueva cadena de valor se incorpora un procedimiento a realizar para identificar aquellas baterías reutilizables de aquellas que no. Aquellas baterías que si son aprovechable son enviadas a centros donde las baterías puedan ser testeadas más a fondo y reacondicionadas en caso de ser necesario. Dependiendo de los resultados en cuanto a rendimiento, se le realizarán arreglos especial y se prepararán para su segunda vida en aplicaciones menos exigentes. De acuerdo a [34], será de especial interés la reutilización directa antes que la reconfiguración de módulos la cual requiere de 3,5 a 6 veces más tiempo de manipulación y la rentabilidad es menor.





**Ilustración 42:** Costes por kWh rehabilitado PHEV (izquierda) y EV (derecha).  
Fuente: [34].

Existen países como Alemania, donde ya se están empezando proyectos pilotos como es el caso de [43], con el fin de realizar una transición desde el ciclo de gestión de residuos actual (presente en un gran número de países) hacia una cadena de valor circular entorno a las baterías. El informe redactado por “The Global Battery Alliance” (grupo colaborativo público privado formado por 70 organizaciones), afirma que para llegar a un escenario en el que exista una cadena de valor circular entorno a las baterías eficiente es a partir de tres factores [46]:

- **Esfuerzos sustanciales de I+D:** Esfuerzos enfocados en la optimización de la química y diseño de la batería permite alargar la segunda vida para aplicaciones de almacenamiento estacionario.
- **Sistemas de diagnóstico de baterías y de datos compartidos:** Será necesario realizar valoraciones del rendimiento de la batería después de su primera vida, de forma rápida y económica. El apoyo de los sistemas de gestión de las baterías y herramientas que proporcionen estado de los datos de salud y la química de esta para una correcta selección y evaluación de las baterías al final de su primera vida.
- **Escalado de la reutilización a partir de modelos de negocio enfocados en la segunda vida de la batería:** Este factor mejoraría la economía de las aplicaciones de segunda vida proporcionando mercados locales y bajos costos de transacción, lo que conduciría a la aplicación a gran escala de baterías de segunda vida.

## 12. Análisis del impacto ambiental

El almacenamiento eficiente supone un pilar fundamental de la transición energética permitiendo flexibilizar la producción de energía renovable y garantizar su integración en el sistema puesto que la energía debe generarse en todo momento de acuerdo a la demanda, y en consecuencia las energías renovables (de naturaleza no gestionable) requieren el apoyo de los sistemas de almacenamiento para integrarse, evitar vertidos de energía limpia y dotar de mayor eficiencia y seguridad al sistema eléctrico (IBERDROLA).

Actualmente, en plena transición energética las fuentes renovables como la solar y eólica están cada vez más presentes en el sistema eléctrico actual (Ilustración 42). Además, teniendo en cuenta que se espera que el total de vehículos eléctricos matriculados en 2040 sea superior al 50% se abre una oportunidad para fomentar y facilitar la incorporación de las renovables, solventando problemáticas que estas supondrían mediante el uso de BESS.

		Potencia instalada nacional (MW)				
	2016	2017	2018	2019	2020	
Hidráulica convencional y mixta	17.030	17.028	17.046	17.085	17.085	
Bombeo puro	3.329	3.329	3.329	3.329	3.329	
Nuclear	7.573	7.117	7.117	7.117	7.117	
Carbón	10.004	10.004	10.030	9.683	8.400	
Fuel + Gas	2.490	2.490	2.490	2.447	2.460	
Ciclo combinado	26.670	26.670	26.284	26.284	26.284	
Hidroeólica	11	11	11	11	11	
Resto hidráulica <sup>(1)</sup>	-	-	-	-	-	
Eólica	23.002	23.083	23.546	25.848	26.503	
Solar fotovoltaica	4.683	4.685	4.712	8.913	10.013	
Solar térmica	2.304	2.304	2.304	2.304	2.304	
Térmica renovable/Otras renovables <sup>(2)</sup>	870	872	877	1.078	1.077	
Térmica no renovable/Cogeneración y resto/Cogeneración <sup>(3)</sup>	5.966	5.802	5.728	5.678	5.671	
Residuos no renovables <sup>(4)</sup>	496	496	490	490	490	
Residuos renovables <sup>(4)</sup>	160	160	160	160	160	
<b>Total</b>	<b>104.589</b>	<b>104.052</b>	<b>104.125</b>	<b>110.428</b>	<b>110.905</b>	

**Ilustración 43:** Potencia instalada nacional (MW).

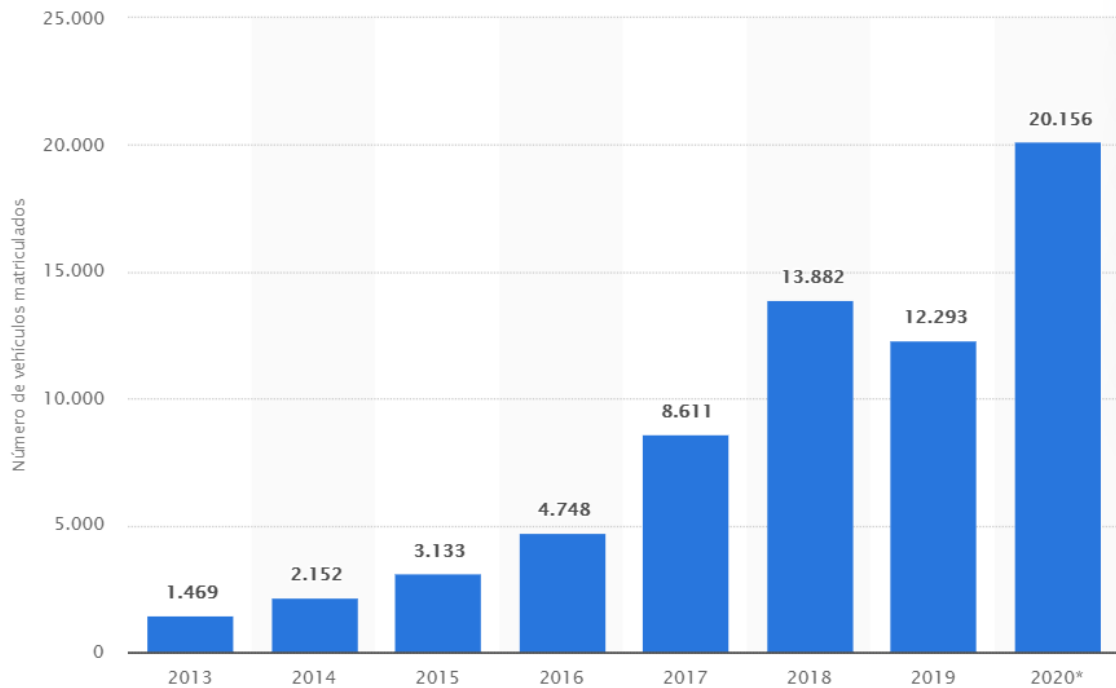
Fuente: Red Eléctrica de España.

Cabe mencionar que la reutilización supone una buena forma de sacarle la máxima rentabilidad posible y evitar la creación de nuevas baterías. Además, hay que tener en cuenta los grandes efectos invernadero debidos a la fabricación de las baterías de litio y los bajos ratios de reciclaje en comparación con otras tecnologías como es el caso de la batería de plomo-ácido. Según [46], la creación de una cadena de valor entorno a la segunda vida de las baterías evitaría directamente 0,4 GtCO<sub>2</sub> emisiones en el transporte y contribuiría a una mejor integración de las energías renovables evitando así 2,2 GtCO<sub>2</sub> de cara a 2030.

Teniendo en cuenta lo ya mencionado, y otros aspectos sobre las baterías de litio como su alto coste y elevado potencial electroquímico, estas baterías resultan idóneas para la integración de renovables gracias a su elevado número de ciclos y gran profundidad de descarga.

A pesar del gran crecimiento en la demanda del vehículo eléctrico, la flota actual de VE es mínima teniendo en cuenta el resto de automóviles utilizados actualmente. A continuación, se

estimaré la potencia aprovechable de la flota actual. Para ello se tiene en cuenta la vida media del pack de baterías de un VE, la cual es de 8 años (alrededor de 3000 ciclos de carga completos) y el nº de VE matriculados desde 2013, los cuales se muestran en la siguiente Ilustración. Dado que el nº de bajas de VE no se encuentra disponible en las estadísticas proporcionadas por la DGT, se estimará que las baterías de aquellos coches matriculados en 2013 habrán acabado su primera vida este año 2021.



**Ilustración 44:** Vehículos eléctricos matriculados 2013-2020.

Fuente: <https://es.statista.com/estadisticas/729638/numero-anual-de-vehiculos-electricos-matriculados-espana/>.

Durante la segunda vida de las baterías de EV, estas se ciclarán en diferentes condiciones de acuerdo con la aplicación seleccionada. En [34], se calcula el envejecimiento de la batería después de su primera vida en diferentes condiciones según si la batería en su segunda vida es utilizada en una aplicación de autoconsumo, cargador de vehículos eléctricos, UPS o instalación en Isla. Las características utilizadas en las simulaciones para cada tipo de aplicación se muestran en la siguiente tabla:

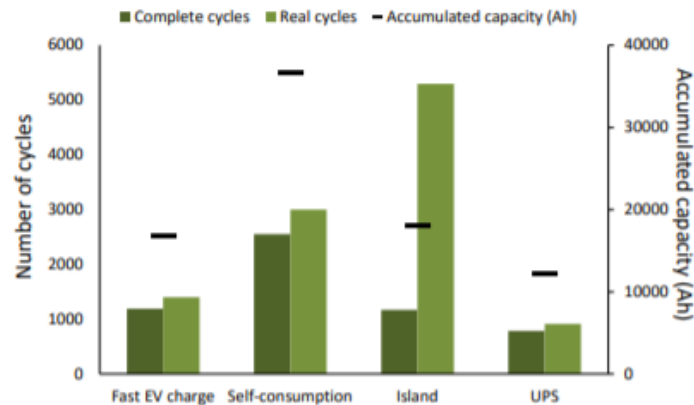
Table 8.1: Simulation battery 2<sup>nd</sup> life load cycle characteristics.

Application	Initial SOH	Final SOH	Initial DOD	C-rate	Avge. SOC
Self consumption	80%	40%	85%	C/20	50%
Island installation	80%	60%	30%	C/75	85%
Fast EV charge	80%	60%	85%	1.5C	82%
UPS	80%	60%	85%	2C	90%

**Ilustración 45:** Características del uso de una batería de segundo para 4 aplicaciones diferentes.

Fuente: [34].

Dependiendo de las condiciones cíclicas, la vida útil de las baterías se ve afectada de una forma u otra. La Ilustración 46 muestra el nº de ciclos que la batería realizaría en su segunda vida para cada aplicación. De acuerdo a [34], la gran diferencia en los resultados se debe a principalmente condiciones de los ciclos y más particularmente al DOD de los ciclos de carga y descarga. También cabe mencionar que los ciclos completos se refieren a la traducción del nº de ciclos a una profundidad de descarga determinada a una profundidad de descarga del 100%.



**Ilustración 46:** Nº de ciclos y capacidad acumulada descargada para cada aplicación de segundo uso.

Fuente: [34].

Para realizar esta estimación se partirá de la base de que las baterías serán utilizadas en aplicaciones de autoconsumo, utilizando los resultados comentados anteriormente la profundidad de descarga en su segunda vida será del 85% y 2551 ciclos. La batería utilizada para esta estimación será la del Nissan Leaf, el coche con más presencia en el mercado español. El Pack de baterías del Nissan Leaf cuenta con 24 módulos de 7,5V de tensión nominal y 65Ah de capacidad. Puesto que durante la estimación se están empleando baterías de segundo uso, la capacidad del módulo será inferior al 80%, en este caso del 70%.

La energía estimada aprovechable por un módulo perteneciente al pack de baterías de un Nissan Leaf, después de su primera vida, (teniendo en cuenta que su esperanza de vida será de 7,4 años), es:

$$E_m = C_m * V_m * DOD * n^{\circ}_{ciclos} = (64Ah * 70\%) * 7,5V * 85\% * 2551 = 739,949 kWh$$

La energía estimada aprovechable del pack de baterías entero durante su segunda vida, teniendo en cuenta que está formado por 24 módulos y todos son aprovechables:

$$E_{pack} = E_m * n^{\circ}_{módulos} = 739,949 kWh * 24 = 17,75 GWh$$

En cuanto al porcentaje de aprovechable se toma como referencia dos de los escenarios propuesto en [43], en el que se estima la reutilización del 20% y 50%, de las baterías

procedentes de vehículos eléctricos. En el caso de que el 20% de las baterías procedentes de VE fueran aprovechables y puestas en uso para una aplicación menos exigente como puede ser la del autoconsumo:

$$E_{(20\%)} = E_{pack} * n_{packs\ reutilizados}^{o} = 17,75\ GWh * (20\% * 1469) = 5214,95\ GWh$$

En el caso de que el 50% de las baterías procedentes de VE hubiesen sido aprovechadas, la energía estimada aprovechada a lo largo de los 7,4 años de su segundo uso sería:

$$E_{(50\%)} = E_{pack} * n_{packs\ reutilizados}^{o} = 17,75\ GWh * (50\% * 1469) = 13037,375\ GWh$$

Es notorio que la energía que llegarían a aprovechar a lo largo de la segunda vida es bastante considerable para la poca presencia de VE que hay actualmente. Hay que considerar que los resultados obtenidos dependen de la aplicación en la que trabajen las baterías, ya que el envejecimiento de estas depende directamente de las diferentes condiciones de trabajo.

## 13. Conclusiones

El marco normativo de las políticas de transición energética prevé una tendencia de mayor implementación de ESS, siendo las baterías de litio la tecnología con mas expectativas de futuro gracias a ofrecer mejores prestaciones. Además, cuentan con un rango muy amplio de aplicabilidad, ya sea en aplicaciones de mejora de la red, de gestión de picos de demanda o sistemas aislados.

Con las actuales políticas se estima que el despliegue del vehículo eléctrico sea cada vez mayor, llegando a sustituir al vehículo de combustión en 2050. Actualmente las baterías una vez acaba su primera vida en el VE, son consideradas como residuo y son exportadas fuera de nuestras fronteras para ser recicladas. Sin embargo, con las condiciones adecuadas, las baterías son un habilitador sistemático imprescindible para llevar al transporte y al sector de la energía a la neutralidad de gases de efecto invernadero. De acuerdo a [46], creando una economía circular entorno a las baterías en su segunda vida, se podrían reducir un 30% de las reducciones requeridas, además de proporcionar 10 millones de empleo seguros y sostenibles en todo el mundo.

La propuesta de reaprovechamiento energético viene de la mano de la incorporación de un proceso de clasificación de las baterías según su estado de salud, donde se concluye que un primer estado de salud debería realizarse en los mismos centros CAT donde son recogidas y transportadas. Para evaluar un primer estado de salud, podrá optarse por realizar pruebas de forma experimental, las cuales requieren de una cantidad de tiempo considerable o utilizando un modelo de predicción, donde el tiempo necesario para estimar el estado de salud es menor y puede ofrecer información sobre la viabilidad con la que cuenta en diferentes aplicaciones BESS.

La reutilización de baterías es un mercado que está evolucionando. Para la reutilización de las baterías provenientes del sector de automoción, será necesario la intervención de otros agentes económicos capaces de tratar, preparar y sacar rentabilidad económica de estas baterías.

Aunque se espera que la flota de VE llegue a superar a los de combustión, actualmente sigue siendo una minoría, a pesar de eso resulta interesante perseguir la reutilización de la batería por las problemáticas ambiental que conlleva. Además, dado las dimensiones de la industria de la automoción, empezar una gestión eficaz lo antes posible extendiendo la cadena de valor que gira entorno estas baterías es algo totalmente necesario, teniendo en cuenta que si no es de esta forma el daño que se está provocando tanto medioambientalmente como desde el punto de vista del mercado del reciclado es enorme.

## Bibliografía

- [1] «Un papel protagonista en la transición energética,» Red Eléctrica de España, [En línea]. Available: <https://www.ree.es/es/red21/un-papel-protagonista-en-la-transicion-energetica>. [Último acceso: 06 04 2021].
- [2] J. Sevilla, «Hacer posible la transición energética,» Madrid, 2019.
- [3] IEA, «Global EV Outlook 2019,» 2019.
- [4] C. E. Ministerial, «Global EV Outlook 2020,» 2020.
- [5] «Cómo son las baterías de los coches eléctricos,» Race, 27 03 2019. [En línea]. Available: <https://www.race.es/como-son-baterias-coches-electricos>. [Último acceso: 23 02 2021].
- [6] Renault, «Tipos de baterías para coches eléctricos,» 26 02 2021. [En línea]. Available: <https://renaultfinanciacion.es/blog/tipos-de-bater%C3%ADas-para-coches-el%C3%A9ctricos>. [Último acceso: 2021 02 30].
- [7] I. H. Lahuerta, «ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DEL PROCESO DE RECICLADO DE UNA BATERÍA DE LI-IÓN EN EL SECTOR DE LA AUTOMOCIÓN,» Barcelona, 2016.
- [8] D. P. O. Esteban, «Estudio de la influencia de aditivos de base sílice en baterías de plomo-ácido. Mejora del funcionamiento en estado parcial de carga,» EXIDE technologies, Madrid, 2008.
- [9] «Baterías plomo-ácido,» Generatuluz, 2021. [En línea]. Available: <https://www.generatuluz.com/tu-propia-instalacion-aislada/tipos-de-baterias-y-sus-caracteristicas/baterias-plomo-acido/#ventajas-y-desventajas-de-las-baterias-plomo-acido>. [Último acceso: 23 02 2021].
- [10] I. Hadjipaschalis, A. Poullikkas y V. Efthimiou, «Overview of current and future energy storage technologies for electric,» *ELSEVIER*, p. 1516, 2009.
- [11] M. Fetcenko, S. Ovshinsky, B. Reichman, K. Young, C. Fierro, J. Koch, A. Zallen, W. Mays y T. Ouchi, «Recent advances in NIMH battery technology,» *ELSEVIER*, pp. 544-551, 2007.
- [12] J. C. V. Pérez, «Carga rápida de baterías de Ni-Cd y Ni-MH de media y gran capacidad. Análisis, síntesis y comparación de nuevos métodos,» Departamento de ingeniería eléctrica, electrónica, de computadores y sistemas., Gijón, 2003.
- [13] «Electromovilidad,» [En línea]. Available: <http://electromovilidad.net/tipos-de-bateria-para-coche-electrico/>.
- [14] M. A. Hannan, M. Murshadul Hoque, A. Hussain, Y. Yusof y P. Jern Ker, «State-of-the-Art and Energy Management System,» IEEE, Malaysia, 2018.
- [15] A. B. Núñez, «Análisis de ventajas e inconvenientes de las baterías de flujo redox frente a las baterías de litio,» Oviedo, 2018.



- [16] Ametic y I. R. , «ANEXO 2. Determinación de parámetros clave en el sistema de gestión de baterías de vehículos eléctricos/híbridos al final de su vida útil, requerimientos de los actores implicados.,» 2012.
- [17] «Battery University,» 2020. [En línea]. Available: [https://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_lithium\\_ion](https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion). [Último acceso: 14 11 2020].
- [18] Z. Ghassan, R. Dufo-López, M. Carvalho y G. Pasaoglu, «The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives.,» ELSEVIER, 2018.
- [19] E. Mossali, N. Picone, L. Gentilini, O. Rodriguez, J. M. Pérez y M. Colledani, «Lithium-ion batteries towards circular economy: A literature review of opportunities and issues of recycling treatments,» ELSEVIER, p. 12, 2020.
- [20] T. M. Torre, «Diseño multiobjetivo de un paquete de baterías modular para vehículo eléctrico,» GIJON, 2020.
- [21] A. Shashank, S. Weixiang y K. Ajay, «Review of mechanical design and strategic placement technique of a robust battery pack for electric vehicles,» ELSEVIER, pp. 1320-1330, 2016.
- [22] A. Pesaran, G. -H. Kim y M. Keyser, «Integration Issues of Cells into Battery Packs for Plug-In and Hybrid Electric Vehicles,» NREL, Stavanger, Norway, 20019.
- [23] «CEGASA,» Cegasa Energía, S.L.U., [En línea]. Available: <https://www.cegasa.com/innovacion>. [Último acceso: 21 04 2021].
- [24] R. Zaiets/Shutterstock, «Por qué cuesta tanto reciclar baterías de vehículos eléctricos,» The Conversation, 6 8 2020. [En línea]. Available: <https://theconversation.com/por-que-cuesta-tanto-reciclar-las-baterias-de-vehiculos-electricos-141217>. [Último acceso: 3 12 2020].
- [25] E. E. SL y A. , «Guia de bones pràctiques per a la gestió de vehicles al final de la seva vida útil a Catalunya,» ARC, Barcelona, 2018.
- [26] K. Fisher, E. Wallén, P. Paul, L. Collins y M. Collins, «Battery Waste Management Cycle,» 2006.
- [27] U. D. o. Energy, «United States Advanced Battery Consortium Battery Test Manual for Electric Vehicles,» Idaho, 2020.
- [28] AEPIBAL, «La responsabilidad ampliada del productor en la economía circular se las baterías y los nuevos modelo de reutilización y segunda vida,» Barcelona, 2020.
- [29] «Smart Grids Info,» [En línea]. Available: <https://www.smartgridsinfo.es/2018/05/17/proyecto-sunbatt-apuesta-segunda-vida-baterias-vehiculos-electricos>. [Último acceso: 15 09 2020].
- [30] «Nissan Motor Corporation,» Nissan, [En línea]. Available: <https://global.nissanstories.com/en/releases/4r>. [Último acceso: 10 11 2020].





- [31] «motor.es,» motor.es, [En línea]. Available: <https://www.motor.es/noticias/baterias-honda-fit-ev-201957517.html>. [Último acceso: 10 11 2020].
- [32] V. Initiative, «Test Specification For Li-Ion Battery Systems,» Frankfurt, Alemania, 2007.
- [33] A. M. Martín, «Estudio para la reutilización de baterías de coches eléctricos en segunda vida para nuevas funciones,» 2015.
- [34] L. Canals Casals, «Modeling a Li-Ion battery aging for second life buisness model,» Barcelona, 2016.
- [35] N. N. L. Boulon y S. Jemeï, «A Review of Battery State of Health Estimation,» World Electric Vehicle Journal, Québec, 2020.
- [36] L. Bodenes, R. Dedryvère, H. Martinez, F. Fischer, C. Tessier y J.-P. Pérès, «Lithium-Ion Batteries Working at 85°C: Aging Phenomena and Electrode/Electrolyte Interfaces Studied by XPS,» France, 2012.
- [37] H. Chaoui y H. Gualous, «Online parameter and state estimation of lithium-ion batteries under temperatures effects,» 2017.
- [38] R. Xiong, Y. Zhang, J. Wang y H. Hongwen, «Lithium-Ion Battery Health Prognosis based on a Real Battery Management System Used in Electric Vehicles,» 2018.
- [39] W. He, M. Pecht, D. Flynn y F. Dimohammadi, «A Physics-Based Electrochemical model for Lithium-Ion Battery State of Charge Estimation Solved by an Optimised Projection-Based Method and Moving-Window Filtering,» energies, Maryland, 2018.
- [40] Á. L. P. H. «Modelización matemática de una batería espacial,» Madrid, 2018.
- [41] «Historias en verde,» Iberdrola, 07 2019. [En línea]. Available: <https://www.blog.iberdrola.com/2019/02/07/baterias-gigantes-que-almacenan-la-electricidad-y-facilitan-la-vida-a-todos/>. [Último acceso: 05 2021].
- [42] J. Castro Martínez, M. Domínguez Gómez y R. Villaseñor Madero, «Sistemas de almacenamiento mediante baterías electroquímicas. Contribución a la integración de energías renovables,» UC3M, Madrid, 2019.
- [43] C. E. I. Deutschland, «Resource Efficient Battery Life Cycles,» SYSTEMIQ, 2020.
- [44] Y. Kotak, C. Marchante Fernández, L. Canals Casals, B. Satishbhai Kotak, D. Koch, C. Geisbauer, L. Trilla, A. Gómez-Núñez y H.-G. Schweiger, «End of Electric Vehicle Batteries: Reuse vs. Recycle,» 2021.
- [45] C. E. Initiative, «Resource-Efficient Battery Life Cycles,» sistemiq, acatech, 2020.
- [46] G. B. Alliance, «A Vision for a Sustainable Battery Value Chain in 2030,» World Economic Forum , Switzerland, 2019.
- [47] M. Anwar, M. Dzaky Ashidqi, S. Kaleg, F. Adriyanto, S. I. Cahyono, A. Hapid y K. Giharjo, «State of Charge Monitoring System of Electric Vehicle Using Fuzzy Logic,» Bandung, Indonesia, 2018.



- [48] A. A. A. Elgammal y M. Sharaf, «Self-regulating particle swarm optimised controller for (photovoltaic fuel cell) battery charging of hybrid electric vehicles,» IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Dearborn, Mich, USA, 2012.
- [49] Y. Zheng, M. Ouyang, X. Han, L. Lu y J. Li, «Investigating the error sources of the online state of charge estimation methods for lithium-ion batteries in electric vehicles,» *Journal of Power Sources*, pp. 161-188, 2017.
- [50] G. H. Illera, «Gestor de carga de baterías (BMS),» Burgos, 2014.
- [51] A. Dynamics, *SPECIFICATIONS AND ORDERING GUIDE*, 2012.
- [52] S. C. Department, *Medium power lithium-ion cells*, Bagnolet: Saft, 2005.
- [53] C. Marchante Fernandez, Y. Kotak, L. Canals Casals, D. Koch, C. Geisbauer, L. Trilla y A. Gómez Nuñez, «End of Electric Vehicle Batteries: Reuse vs Recycle,» MDPI energies, 2021.

