



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH**

**Escola Superior d'Enginyeries Industrial,  
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa**

GRAU D'ENGINYERIA EN TECNOLOGIES INDUSTRIALS

TREBALL DE FI DE GRAU

**ESTUDI MEDIAMBIENTAL D'UNA BATERIA  
D'IÓ-LITI DE VE I COMPARATIVA AMB UNA DE  
LITI-SOFRE EN DESENVOLUPAMENT**

MEMÒRIA

ALUMNE: ANNA SÁNCHEZ BALLESTA  
DIRECTORA: BEATRIZ AMANTE  
CO-DIRECTORS: GABRIELA BENVENISTE I HECTOR RALLO  
CONVOCATÒRIA: PRIMAVERA 2021

## Resum

El nombre de vehicles elèctrics (VE) disponibles en el mercat ha anat augmentant al llarg dels anys, així com la capacitat de la seva bateria, i és probable que segueixin augmentant en un futur amb l'objectiu d'utilitzar transports més sostenibles.

Els VE es consideren una solució potencial per la reducció d'emissions en el sector del transport, tant a escala global com local. El fet que els VE no tinguin emissions directes de tubs d'escapament, pot ajudar a millorar la qualitat de l'aire dels entorns urbans, que actualment mostren concentracions de contaminants molt elevades a diferents països del món. El component més crític d'un VE és el sistema d'emmagatzematge d'energia, és a dir, la bateria. La fabricació de bateries sovint representa la major part del consum d'energia i dels impactes ambiental relacionats amb la producció i el funcionament dels VE.

Actualment, els VE funcionen amb bateries d'ió de liti (Li-ion) a causa de la seva alta densitat d'energia i major densitat de potència en comparació amb altres tecnologies de bateries. A mesura que la tecnologia de les bateries Li-ion evoluciona, és important entendre quins són els impactes ambiental de produir en massa les bateries per VE. No obstant això, amb 80-150 Wh/kg de densitat d'energia, les bateries de Li-ion no són capaces d'alimentar els VE per a un rang de conducció comparable amb els vehicles convencionals.

Durant els darrers anys, han hagut ràpids avenços en la investigació i desenvolupament de tecnologies de bateries amb una densitat energètica més alta i un millor rendiment mediambiental. Entre les diverses tecnologies de bateries en desenvolupament, la bateria de liti-sofre (Li-S) és la tecnologia de bateria més prometedora per als futurs vehicles elèctrics. En comparació amb la bateria de Li-ion, la bateria de Li-S ofereix una densitat d'energia molt més gran ja que el sofre té una capacitat específica de 1672 mAh/g, que correspon a una alta densitat d'energia teòrica de 2600 Wh/kg. A més, el sofre es pot trobar en abundància a la natura i sovint es considera un material més benigne per al medi ambient que els metalls pesants utilitzats en les bateries de Li-ion.

## Estudi mediambiental d'una bateria d'ió-liti de VE i comparativa amb una de liti-sofre en desenvolupament

Per aquest motiu, el treball de fi de grau es centra en l'anàlisi ambiental de totes les etapes de la vida d'una bateria de Li-ion de 35,8 kWh. La metodologia que s'ha utilitzat per calcular els impactes ambientals de la bateria és l'Anàlisi del Cicle de Vida (ACV) segons les normatives ISO 14040:2006 i ISO 14044:2006, que permeten avaluar el perfil ambiental de la bateria per totes les etapes del seu cicle de vida. A més, el treball també tracta l'impacte ambiental de les bateries de Li-S fent una comparativa amb les bateries de Li-ion, per determinar si les bateries de Li-S serien una bona alternativa a les de Li-ion per a VE en termes de reducció d'impacte ambiental. Per altra banda, també s'analitza la segona vida d'una bateria de Li-ion ja que un cop ha finalitzat la seva vida útil en el VE, encara segueix tenint energia suficient com per ser utilitzada en altres aplicacions que no requereixin una demanda d'energia tant elevada. En el treball, s'estudien diferents aplicacions de segona vida per analitzar si amb la utilització de bateries de Li-ion retirades dels VE un cop a finalitzat la seva vida útil, presenten una reducció d'impacte ambiental en contraposició d'utilitzar bateries noves.

Els resultats obtinguts amb aquests anàlisis serveixen com a base per tenir un precedent sobre l'impacte ambiental que tenen les tecnologies d'aquestes bateries tant en la primera vida com la seva segona vida en aplicacions estacionaries i d'aquesta manera poder seguir avançant cap a solucions més respectables amb el medi ambient.

## Abstract

The number of electric vehicle (EV) models available in the market has been increasing over the years, as well as their battery capacity, and it is likely to continue in the future as sustainable transportation goals rise in importance.

Electric vehicles (EVs) are seen worldwide as a potential solution to transport emissions, at both global and local scales. The fact that EVs have no direct tailpipe emissions can help in improving the air quality of urban environments, which are currently showing very high pollutants concentrations in different countries worldwide. The most critical component of an EV is the electricity storage system, i.e., the battery. Battery manufacturing often accounts for the largest share of both energy consumption and environmental impacts related to the production and operation of EVs.

Nowadays, EVs are all powered by lithium ion (Li-ion) batteries due to their high energy density and higher power density relative to other battery technologies. As Li-ion technology evolves, it is important to understand what the environmental impacts are of mass-producing the battery packs for the EV. However, with 80-150 Wh/kg energy density, current Li-ion batteries are not able to power the EVs for a comparable driving range with conventional vehicles.

Recent years have witnessed rapid progress in the research and development of battery technologies with higher energy density and better environmental performance. Among various battery technologies under development, lithium-sulfur (Li-S) battery is the most promising battery technology for the future EVs. Compared to Li-ion battery, Li-S battery offers a much higher energy density, i.e., sulfur with a specific capacity of 1672 mAh/g, corresponding to a high theoretical energy density of 2600 Wh/kg. Besides, sulfur is abundantly available in nature and often considered a more environmentally benign material than those heavy metals used in Li-ion batteries.

For this reason, the final degree project focuses on the environmental analysis of all stages of the life of a 35,8 kWh Li-ion battery. The methodology that has been used to calculate the environmental impacts of the battery is the Life Cycle Assessment (LCA) according

to ISO 14040:2006 and ISO 14044:2006. This methodology allows the assessment of the environmental profile of the battery for all the stages of its life cycle. In addition, the project also addresses the environmental impact of Li-S batteries by making a comparison with Li-ion batteries, to determine whether Li-S batteries would be a good alternative to Li-ion batteries for VE in terms of reducing environmental impact. Furthermore, the second life of a Li-ion battery is also analyzed because once its useful life in the VE has ended, it still has enough energy to be used in other applications that do not require of such high energy demand. In the project, different second-life applications are studied to analyze whether the use of Li-ion batteries removed from VEs once their useful life is over, shows a reduction in environmental impact as opposed to the use of new batteries.

The results obtained with these analyzes serve as a basis for having a precedent on the environmental impact of the technologies of these batteries in both the first life and their second life in stationary applications and thus be able to move towards more environmentally friendly solutions.

## Índex

Resum.....	2
Abstract .....	4
Índex.....	6
Índex de figures.....	8
Índex de taules.....	9
1. Introducció .....	10
1.1 Objecte .....	10
1.2. Abast.....	10
1.3. Requeriments.....	10
1.4 Justificació.....	11
2. Estudi de l'art .....	13
2.1. Impacte ambiental VE.....	13
2.1.1. Bateries de Li-ion.....	14
2.1.2. Bateries de Li-S.....	17
3. Metodologia .....	19
3.1. Anàlisi del cicle de vida d'una bateria de Li-ion .....	19
3.1.1. Definició de l'Anàlisi del Cicle de Vida .....	20
3.1.2. Fases de l'Anàlisi del Cicle de Vida .....	20
3.1.2.1. Definició de l'objectiu i l'abast.....	21
3.1.2.1.1. Funció i unitat funcional .....	22
3.1.2.1.2. Límits del sistema.....	22
3.1.2.1.3. Categories d'impacte.....	23
3.1.2.1.4. Fonts de les dades i requisits de qualitat .....	25
3.1.2.1.5. Hipòtesis i limitacions .....	25
3.1.2.2. Anàlisi de l'inventari del cicle de vida (ICV) .....	25
3.1.2.2.1. Recopilació de dades.....	26

3.1.2.2.2. Validació de les dades recopilades.....	30
3.1.2.2.3. Assignació de fluxos, d'emissions i abocaments .....	30
3.1.2.3. Avaluació de l'impacte ambiental del cicle de vida (AICV) .....	30
3.1.2.3.1. Selecció de categories, indicadors i models .....	31
3.1.2.3.2. Assignació dels resultats de l'AICV (classificació) .....	33
3.1.2.3.3. Limitacions de l'AICV .....	34
3.1.2.3.4. Resultats de l'AICV .....	34
3.1.2.4. Interpretació dels resultats.....	35
4.2. Comparativa bateria de Li-ion amb una de Li-S en desenvolupament .....	40
4.3. Anàlisi de la segona vida d'una bateria de Li-ion.....	44
4.3.1. Segona vida d'una bateria .....	44
4.3.2. Aplicacions segona vida.....	46
4.3.2.1. Sistema d'emmagatzematge d'energia per millorar la integració d'energies renovables a la xarxa .....	49
4.3.2.2. Sistema d'emmagatzematge en habitatges.....	51
5. Conclusions .....	56
5.1. Conclusions en relació a l'anàlisi del cicle de vida d'una bateria de Li-ion .....	56
5.2. Conclusions en relació a la comparativa entre una bateria de Li-ion i una bateria de Li-S en desenvolupament .....	58
5.3. Conclusions en relació a l'anàlisi de la segona vida d'una bateria de Li-ion .....	59
5.4. Treball futur.....	60
5.4.1. Realització d'un ACV amb informació més detallada de la bateria de Li-ion .....	60
5.4.2. Realització d'un ACV d'una bateria de Li-S real .....	61
5.4.3. Estudi econòmic i viabilitat de la segona vida de les bateries .....	61
6. Referència bibliogràfica .....	62
6.1. Normativa utilitzada .....	66

## Índex de figures

Figura 1: Densitat energètica de diferents tipus de bateries [7] .....	12
Figura 2: Funcionament d'una cel·la de Li-ion [14] .....	14
Figura 3: Processos de reciclatge de les bateries de Li-ion [13] .....	16
Figura 4: Funcionament d'una cel·la de Li-S [18] .....	17
Figura 5: Fases d'un ACV .....	21
Figura 6: Límits del sistema .....	23
Figura 7: Fluxos d'entrada i sortida d'un procés .....	26
Figura 8: Passos durant la fase d'AICV .....	31
Figura 9: Contribució de cada etapa de vida per cada categoria d'impacte .....	36
Figura 10: Contribució total del cicle de vida de la bateria Li-ion .....	37
Figura 11: Contribució de cada component de la bateria en la fase de producció .....	38
Figura 12: Comparativa categories d'impacte entre bateria Li-ion i Li-S .....	41
Figura 13: Contribució càtode bateria Li-ion vs càtode bateria Li-S en la fase de producció .....	43
Figura 14: Cicle de vida bateria VE: escenari de primera vida (esquerra) i escenari de segona vida (dreta) [28] .....	45
Figura 15: Aplicacions de segona vida per a les bateries [30] .....	47
Figura 16: Impacte bateria segona vida vs bateria nova .....	50
Figura 17: Variació estacional del diagrama de càrrega per a la llar [36] .....	52
Figura 18: Comparativa bateria segona vida amb bateria nova com a sistema d'emmagatzematge en habitatges .....	55



## Índex de taules

Taula 1: Característiques principals de les diferents bateries de Li-ion.....	15
Taula 2: Tipus de processos de reciclatge de bateries de Li-ion.....	16
Taula 3: Comparació de les característiques de les cel·les de Li-ion i Li-S .....	18
Taula 4: Categories d'impacte utilitzades en l'estudi .....	24
Taula 5: Composició materials de la bateria .....	26
Taula 6: Inventari bateria .....	28
Taula 7: Inventari fase d'utilització de la bateria.....	29
Taula 8: Assignació dels resultats de l'AICV .....	34
Taula 9: Resultats de l'AICV .....	35
Taula 10: Resultats bateria Li-ion i bateria Li-S per 1 kWh .....	40
Taula 11: Resultats bateria com a sistema d'emmagatzematge d'energia per la integració d'energies renovables a la xarxa .....	50
Taula 12: Consum diari d'energia, potència màxima i requisit d'emmagatzematge d'energia per l'aplicació d'afaitat de pic per a la llar.....	52
Taula 13: Energia d'emmagatzematge necessària durant 1 any per l'afaitat de pic i el desplaçament de la càrrega.....	53
Taula 14: Impactes fonts d'energia d'un mix elèctric europeu.....	53
Taula 15: Resultats cicle de vida d'una bateria en segona vida com a sistema d'emmagatzematge en habitatges.....	53
Taula 16: Resultats cicle de vida d'una bateria nova com a sistema d'emmagatzematge en habitatges.....	54

## 1. Introducció

### 1.1 Objecte

L'objecte principal d'aquest treball de fi de grau, és realitzar l'Anàlisi del Cicle de Vida (ACV) d'una bateria d'ió-liti (Li-ion) de vehicle elèctric (VE) a partir de dades proporcionades per un constructor i, posteriorment, fer una comparativa amb una de liti-sofre (Li-S) en desenvolupament.

### 1.2. Abast

L'abast d'aquest projecte és l'estudi mediambiental d'una bateria d'ió-liti de vehicle elèctric mitjançant l'ACV i seguidament realitzar una comparativa amb una bateria de liti-sofre en desenvolupament. Aquesta primera comparativa, es durà a terme tenint en compte que l'anàlisi únicament contempla la primera vida de la bateria.

També es proposen diferents escenaris de segona vida per les bateries i es tornarà a realitzar una comparativa. D'aquesta manera, es podrà observar si hi ha una reducció d'impacte utilitzant la segona vida d'una bateria d'ió-liti de VE en contraposició d'utilitzar una bateria nova en els diferents escenaris proposats.

### 1.3. Requeriments

Degut a que la temàtica d'aquest treball de fi de grau és de caràcter mediambiental i que conseqüentment s'elaborarà un ACV, s'han de complir els següents requisits per la correcta realització de l'ACV:

- Es seguiran les directrius establertes per les normatives *UNE-EN ISO 14040:2006* i *14044:2006*
- Tota la informació de l'ACV ve descrita dins la normativa ISO citada anteriorment, i serà presentada en format d'informe d'ACV
- S'utilitzarà el software GaBi per realitzar l'avaluació d'impacte ambiental

## 1.4 Justificació

Una de les principals fonts de contaminació en les àrees urbanes és l'emissió de gasos d'efecte hivernacle (GEH) produïda pels transports motoritzats, factor que contribueix directament en l'escalfament global. Durant els últims anys ha hagut un augment en la fabricació de VE per intentar reduir les emissions produïdes pels vehicles de combustió i d'aquesta manera evitar agreujar el problema del canvi climàtic.

Tot i que els VE produeixen de mitjana una emissió de GEH 3 vegades inferior a la dels vehicles de combustió convencional [1], el problema radica en l'impacte ambiental que té la fabricació i el procés de reciclatge de les bateries de Li-ion que s'utilitzen en els VE.

Encara que les bateries de Li-ion no contenen mercuri, cadmi ni plom, inclouen altres metalls pesants que poden resultar problemàtics pel medi ambient com són el cobalt, el coure i el níquel [2]. Els processos que es duen a terme per l'extracció de liti i els altres metalls per la fabricació de les bateries són els responsables de la destrucció d'hàbitats locals i la contaminació de rius propers; la consumició fins al 65% de l'aigua de la regió on hi ha la mina, causant estralls als agricultors locals; la contaminació d'aigües subterrànies, a més de contribuir en l'efecte hivernacle [3].

Quan les bateries perden entre el 20-30% de la seva capacitat, els fabricants recomanen canviar-les ja que no es pot garantir que puguin oferir el mateix rendiment. Arribats a aquest punt, hi ha dues opcions:

- Reciclar la bateria
- Donar-li una segona vida, ja que segueixen tenint capacitat suficient per alimentar altres dispositius que no requereixen tanta energia com un VE.

Amb el reciclatge de les bateries es pot arribar a recuperar fins un 95% dels components, el problema és que actualment només es recicla al voltant d'un 5% [4]. La resta, acaben en abocadors o són cremades, fet que produeix un important impacte sobre el medi, així com una important despesa econòmica i malbaratament de recursos. A més a més, al no reciclar-les, seguim depenen d'altres països per l'aprovisionament d'aquestes.

Durant els darrers anys, s'ha estat investigant la possibilitat d'utilitzar bateries de Li-S en VE [5] [6]. Malgrat que encara estan en desenvolupament, en comparació amb les bateries de Li-ion, ofereixen més capacitat energètica, la qual cosa es traduiria en més autonomia pels VE [6]. En la Figura 1, podem observar com les bateries de Li-S tenen una densitat energètica superior a altres tipus de bateries.

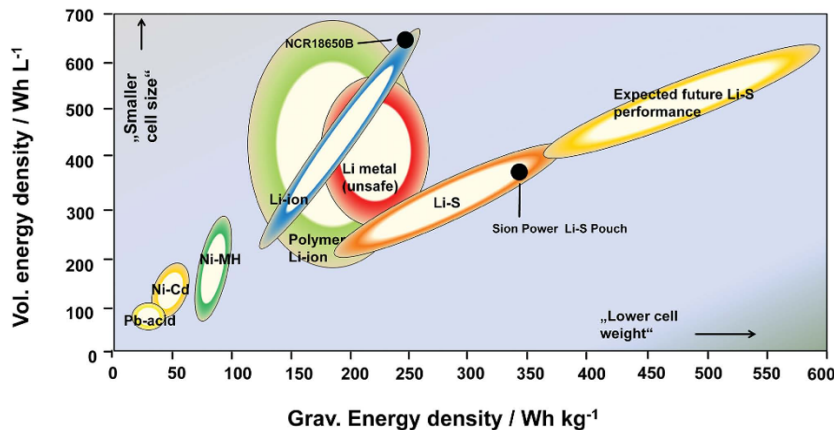


Figura 1: Densitat energètica de diferents tipus de bateries [7]

Un aspecte important d'aquestes bateries, és que el sofre està disponible en abundància a la natura i es considera un material més benigne per al medi ambient que els metalls pesants que s'utilitzen en les bateries de Li-ion [6].

El sofre per fabricar les bateries s'obté a partir del Procés de Claus. Aquest procés consisteix en la recuperació de sofre del sulfur d'hidrogen gasós que es troba al gas natural brut i dels gasos que contenen sulfur d'hidrogen derivats de la refinació de petroli i altres processos industrials [8].

La realització d'aquest projecte permetrà evidenciar si la utilització de les bateries de Li-S en desenvolupament poden ser una alternativa viable a les bateries de Li-ion en aspectes de reducció d'impacte mediambiental i a més a més, poder determinar si al donar-li una segona vida a les bateries de Li-ion, aquest impacte també disminueix.

## 2. Estudi de l'art

Des del segle XIX el transport motoritzat i la mobilitat per carretera ha anat evolucionant i creixen gràcies als avenços tecnològics, donant lloc als vehicles de motor de combustió interna (ICE). L'augment de la mobilització pels nuclis urbans amb aquest tipus de vehicle, ha contribuït en l'increment d'emissions de gasos d'efecte hivernacle (GEH) i consegüentment, en el canvi climàtic. Concretament, les emissions de CO<sub>2</sub> produïdes pels vehicles de motor de combustió interna han augmentat un 17% entre el 1990 i el 2012 [9].

Per assolir els objectius establerts pel Protocol de Kyoto, l'any 2007 es va adoptar una estratègia per tal de reduir les emissions de CO<sub>2</sub> de tots els vehicles nous que es comprassin en la Unió Europea (UE). Com a part de l'estratègia, el Reglament (CE) num. 443/2009 estableix un objectiu a curt termini per reduir les emissions a 130 g de CO<sub>2</sub>/km de cara a 2015 i un objectiu a llarg termini per reduir les emissions a 95 g de CO<sub>2</sub>/km de cara a 2021 [9]. En vista a aquesta situació, el sector de l'automòbil s'ha vist obligat a centrar-se en el desenvolupament de vehicles més sostenibles com són els VE.

### 2.1. Impacte ambiental VE

Els VE no produeixen emissions de GEH i no depenen del petroli com a font de combustible. Tot i així, necessiten energia per funcionar i, per tant, són responsables de les emissions de CO<sub>2</sub> que resulten de qualsevol procés de generació d'energia que s'utilitzi per alimentar-los. Si l'energia s'obté d'una font que no emet CO<sub>2</sub> com la solar, l'eòlica, la nuclear o l'energia hidroelèctrica, aleshores els VE no produeixen emissions de CO<sub>2</sub> [10].

Cada país utilitza un mix energètic diferent per alimentar els VE en funció dels recursos disponibles, i cada font de generació d'energia produeix una determinada quantitat de CO<sub>2</sub> per generar una unitat d'energia elèctrica [10]. La intensitat de CO<sub>2</sub> de cada font combinada amb la quantitat d'energia obtinguda de cada font dona lloc a la intensitat mitjana de CO<sub>2</sub> del mix energètic. Aquesta intensitat mitjana de CO<sub>2</sub> es pot expressar com el nombre de grams de CO<sub>2</sub> emesos per mega joule d'electricitat generada (també s'expressa habitualment com g CO<sub>2</sub> eq./kWh).

Per exemple, la generació d'electricitat de Noruega té una intensitat de CO<sub>2</sub> baixa de 2 g CO<sub>2</sub> eq./MJ (7,2 g CO<sub>2</sub> eq./kWh) ja que gairebé el 98% de la seva energia l'obté a partir de l'energia hidràulica. En canvi, Sud-àfrica, té una alta intensitat de CO<sub>2</sub> de 255 g CO<sub>2</sub> eq./MJ (918 g CO<sub>2</sub> eq./kWh) perquè obté el 93% de la seva potència a partir de la combustió de combustibles fòssils [10].

### 2.1.1. Bateries de Li-ion

Un altre aspecte important que cal tenir en compte en l'impacte ambiental que té el VE són les bateries que utilitzen. Actualment, les bateries que es fan servir són les de Li-ion ja que ofereixen una alta energia específica de 230 Wh/kg, una densitat de potència de 12 kW/kg, una bona densitat energètica (110-160 Wh/kg) i un excel·lent cicle de vida [11].

Els components principals que formen una cel·la de Li-ion són el càtode, l'ànode, l'electròlit i el separador. En el procés de càrrega de la bateria, els ions de liti es desplacen des del càtode a l'ànode i de l'ànode al càtode en el procés de descàrrega.

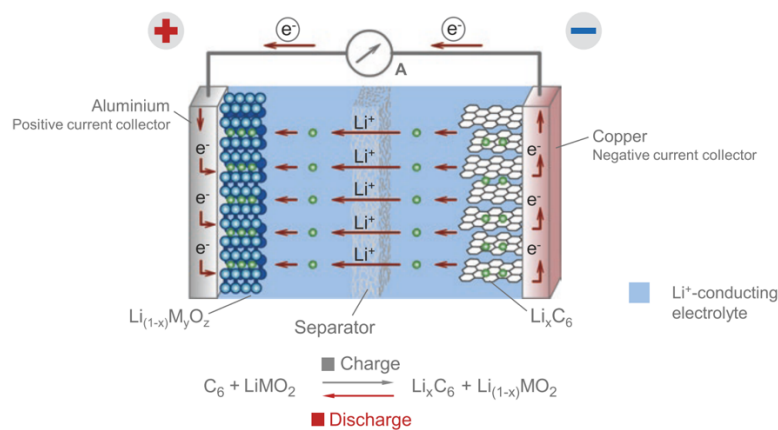


Figura 2: Funcionament d'una cel·la de Li-ion [14]

En funció dels materials que formen el càtode, les bateries de Li-ion es poden classificar en 5 tipus: Òxid de Cobalt Liti (LCO), Òxid de Manganès Liti (LMO), Fosfat de Ferro Liti (LFP), Òxid d'Alumini Cobalt Níquel Liti (NCA) i Òxid de Cobalt Manganès Níquel Liti (NMC). Com es pot observar en la taula 1, la densitat energètica de les bateries de Li-ion varia en funció del tipus de càtode que s'utilitza.

Taula 1: Característiques principals de les diferents bateries de Li-ion

Bateria	Densitat Energètica (Wh/kg)	Cicles	Avantatges	Desavantatges
LCO	150-190	500-1000	Maduresa tecnològica Auto descàrrega baixa Alt voltatge de descàrrega	Cost elevat Baixa seguretat inherent
LMO	100-140	1000-1500	Alta seguretat inherent Sense cobalt	Baixa densitat energètica Dissolució de Mn
LFP	90-140	2000	Alta seguretat inherent	Baixa densitat energètica
NCA	200-250	1000-1500	Baix contingut en cobalt	La capacitat s'esvaeix a temperatures elevades
NMC	140-200	1000-2000	Baix contingut en cobalt	Problemes de seguretat en bateries riques en Ni

La fabricació de bateries és responsable d'una gran part de consum d'energia i d'emissions de GEH ja que s'utilitza liti, cobalt i níquel, que són materials relativament escassos en la natura. A part d'impactes relacionats amb l'esclafament global, la fabricació de bateries de Li-ion implica altres impactes ambientals com l'esgotament de recursos fòssils i minerals, esgotament de la capa d'ozó, eutrofització i edificació d'aigües dolces i marines [12].

S'estima que després de 8-10 anys de funcionament, les bateries ja no compleixen els requisits de potència per alimentar un VE degut a una pèrdua de capacitat al voltant del 20% [13]. A partir d'aquest moment, hi ha diferents opcions: re manufactura, reutilització o reciclatge.

El procés de re manufactura consisteix en reparar la bateria i substituir les cel·les que han patit una pèrdua de capacitat i tornar a integrar la bateria en un VE. A més, s'estima que amb una taxa de re manufactura del 55% es podria reduir en un 10% les necessitats de producció de noves bateries [13].

El procés de reutilització consisteix en donar-li una segona vida a la bateria en aplicacions com integració en sistemes estacionaris d'emmagatzematge d'energia renovable, emmagatzematge d'energia residencial i industrial entre d'altres.

En el procés de reciclatge, es desmunten tots els components de la bateria per recuperar els materials i poder-los reutilitzar en la fabricació de noves bateries. L'extracció de

materials és responsable d'aproximadament la meitat dels GEH derivats de la fabricació de les bateries, i els materials reciclats solen tenir una petjada de carboni menor a la dels mateixos materials extrets de fonts naturals. Per exemple, la producció d'alumini reciclat crea aproximadament un 95% menys d'emissions de GEH en comparació amb la producció d'alumini a partir de fonts naturals [15]. D'altra banda, degut a la gran varietat de bateries de Li-ion i la quantitat de materials diferents implicats, és molt difícil trobar una sistema de reciclatge universal [13]. Actualment, com es pot observar en la Figura 3 i la Taula 2, hi ha 3 processos de reciclatge diferents, tot i que el que més s'utilitza és el de pirometal·lúrgia.

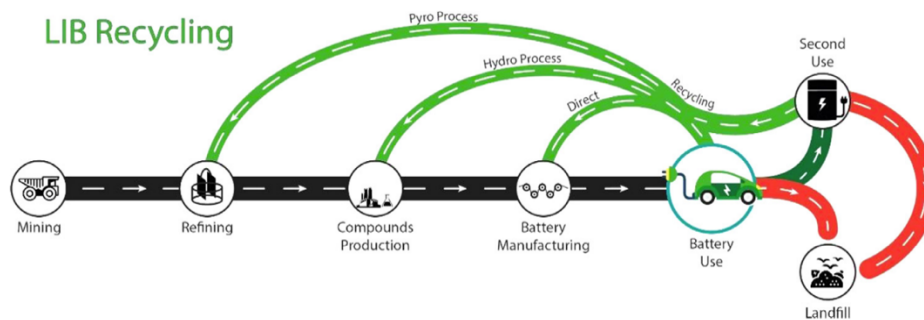


Figura 3: Processos de reciclatge de les bateries de Li-ion [13]

Taula 2: Tipus de processos de reciclatge de bateries de Li-ion

	<b>Reciclatge directe</b>	<b>Pirometal·lúrgia</b>	<b>Hidrometal·lúrgia</b>
<b>Tipus de procés</b>	Físic	Químic	Químic
<b>Requeriments</b>	Estímul físic	Altes temperatures	Àcids o altres agents de precipitació
<b>Materials recuperats</b>	Materials actius	Matèries primeres	Matèries primeres
<b>Avantatges</b>	Respectuós amb el medi ambient Alta especificitat No destructiu	Altes taxes de reciclatge Lliure de dissolvents	Altes taxes de reciclatge Permet recuperar una gran varietat de metalls
<b>Desavantatges</b>	No permet el processament simultani de diferents materials del càtode	Calen altes temperatures Pot necessitar altres processos per recuperar de forma efectiva els materials	Procés complex Ús de reactius tòxics Procés d'elevat cost

S'estima que amb el reciclatge es pot estalviar fins al 51% dels recursos naturals, incloent la reducció de l'ús de combustibles fòssils i energia nuclear necessaris en els processos d'extracció i producció [13].



Les bateries de Li-ion han evolucionat molt des de la seva aparició en 1991 [16]. Tot i així, alguns autors assenyalen que les bateries de Li-ion han arribat al seu màxim d'energia específica (200-250 Wh/kg) [17] i no és suficient per competir amb els vehicles de ICE ja que actualment els VE tenen una distància mitjana de conducció de 250 Km [17]. En canvi, els vehicles de ICE tenen una distància mitjana de conducció molt més elevada (700-800 Km).

### 2.1.2. Bateries de Li-S

Per poder millorar l'autonomia dels VE es necessiten bateries amb energies específiques més elevades. És per això, que s'està estudiant alternatives a les bateries de Li-ion i actualment una de les alternatives més prometedores són les bateries de Li-S.

Les bateries de Li-S en comparació amb les de Li-ion ofereixen una densitat energètica teòrica de 2600 Wh/Kg [6]. A més a més, tenen la avantatge que els materials que s'utilitzen en la seva fabricació són menys benignes pel medi ambient que els metalls pesants que es fan servir en les bateries de Li-ion [6].

Les cel·les de Li-S estan formades principalment per un càtode de sofre, un ànode de liti, un separador i un electròlit. En el procés de descàrrega, el sofre del càtode al reaccionar amb els ions de liti es redueix de l'estat elemental  $S_8$  a sulfur de liti  $Li_2S$ . En el procés de càrrega es produeix la reacció inversa.

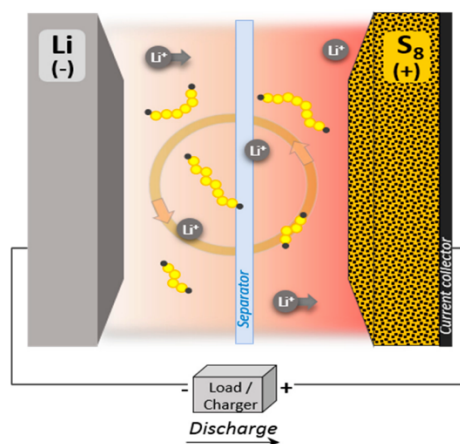


Figura 4: Funcionament d'una cel·la de Li-S [18]

Durant els darrers anys, s'han desenvolupat diferents projectes de recerca com EUROLIS (“Advanced European Lithium Sulphur cells for automotive application”) i ECLIPSE (“European Consortium for Lithium-Sulphur Power for Space Environments”) [19] finançats per la Unió Europea, amb l'objectiu fabricar bateries de Li-S suficientment competitives com per substituir les de Li-ion. En 2019 va finalitzar l'últim projecte que estava en marxa, anomenat HELIS (“High Energy Lithium Sulphur Cells and Batteries”), el qual va aconseguir fabricar un prototip de bateries de Li-S capaces d'assolir 500 Wh/kg de capacitat energètica, 1000 W/kg de potència i una vida útil superior a 1000 cicles [19].

Tot i que les bateries de Li-S presenten unes bones característiques (Taula 3) com per agafar el relleu de les bateries de Li-ion en aplicacions de VE, encara s'han de resoldre alguns problemes com l'auto descàrrega i un cicle de vida curt que afecten negativament el rendiment de la bateria [19].

Taula 3: Comparació de les característiques de les cel·les de Li-ion i Li-S

	Li-ion				Li-S
	NMC	NCA	LCO	LFP	
<b>Voltatge de la cel·la (V)</b>	3,70	3,60	3,65	3,20	2,15
<b>Energia específica teòrica (Wh/kg)</b>	400-600	400-600	400-600	300-400	2600
<b>Energia específica pràctica (Wh/kg)</b>	220	260	240	120	200-550
<b>Cicles de vida</b>	1000-2000	500	≈700	1000-2000	≈50
<b>Taxa d'auto descàrrega</b>	1%	1%	1%	1%	8-15%

Teòricament, l'impacte ambiental que tenen les bateries de Li-S es considera que és menor en comparació amb el de les bateries de Li-ion ja que el sofre és un element abundant en la natura a més a més de ser un residu en molts processos industrials [19]. Al tractar-se de bateries en cara en fase de desenvolupament, és difícil trobar articles on s'estudiï les bateries de Li-S des d'un punt de vista ambiental.

Un dels pocs articles on s'estudia l'impacte ambiental de les bateries de Li-S en comparació amb les de Li-ion és el de la referència [6]. En l'estudi d'aquest article, es realitza un ACV per a una avaluació completa de l'impacte ambiental d'una bateria de

Li-S i posteriorment, es realitza una comparativa amb una bateria de Li-ion NCM. Els resultats mostren que la bateria de Li-S és més respectuosa amb el medi ambient que la bateria convencional de Li-ion amb un impacte entre 9%-90% menor en la majoria de categories d'impacte.

Cal destacar, que en aquest estudi s'utilitza un mix elèctric xinès el qual és molt més desfavorable en comparació amb el mix elèctric europeu ja que aquest consta d'una presència d'energies renovables molt més elevat.

### 3. Metodologia

La metodologia seguida per la realització d'aquest treball ha sigut la següent:

- Realització de l'ACV d'una bateria de Li-ion a partir de les dades proporcionades per una empresa del sector de l'automoció, seguint les pautes marcades per les normatives ISO 14040:2006 i ISO 14044:2006.
- Comparativa entre els resultats obtinguts de l'ACV de la bateria de Li-ion amb els resultats de l'ACV d'una bateria de Li-S proporcionats per la universitat.
- Anàlisi de l'impacte ambiental d'una bateria de Li-ion en diferents ampliacions de segona vida a partir de dades recopilades de diferents publicacions científiques i comparativa d'aquests resultats amb l'impacte que tindria utilitzar una bateria nova en aquestes aplicacions de segona vida.

#### 3.1. Anàlisi del cicle de vida d'una bateria de Li-ion

En aquest apartat es realitzarà l'ACV d'una bateria de Li-ion, concretament la bateria del model de VE Volkswagen e-Golf amb una capacitat de 35,8 kWh.

El programa escollit per la realització de l'ACV en aquest projecte és el GaBi. Actualment, es tracta d'un dels programes estàndard establerts per la realització d'ACV en l'àmbit de l'enginyeria, combinant programari de modelatge, informes i base de dades que permet als usuaris avaluar les possibles càrregues ambientals d'un producte en la seva producció, utilització i final de vida.

GaBi modela tots els elements d'un producte o sistema des del punt de vista del cicle de vida, ajudant a l'usuari en la presa de decisions sobre la fabricació i el cicle de vida de qualsevol producte. El programa compta amb una base de dades de fàcil accés que s'actualitza constantment, detallant els costos, l'impacte energètic i ambiental de l'obtenció i processat de les matèries primeres o components d'un producte fabricat. A més, analitza l'impacte sobre el medi ambient proporcionant alternatives de fabricació, distribució, reciclatge, contaminació i sostenibilitat [20].

### 3.1.1. Definició de l'Anàlisi del Cicle de Vida

L'ACV és una eina que s'utilitza per avaluar l'impacte ambiental d'un producte o servei al llarg del seu cicle de vida (del bressol a la tomba), és a dir, des de l'obtenció de les matèries primeres, passant per la producció, la utilització, el tractament final, el reciclatge i fins a la seva posterior gestió.

La realització de l'ACV està regulat per dues normes creades per l'Organització Internacional de Normalització (ISO):

- ISO 14040:2006 Gestió ambiental. Anàlisi del cicle de vida. Principis i marc de referència.
- ISO 14044:2006 Gestió ambiental. Anàlisi del cicle de vida. Requisits i directrius.

### 3.1.2. Fases de l'Anàlisi del Cicle de Vida

Segons la normativa ISO 14040:2006, la realització d'un ACV està dividit en 4 fases (Figura 5): Definició de l'objectiu i l'abast, anàlisi de l'inventari del cicle de vida (ICV), avaluació de l'impacte ambiental del cicle de vida (AICV) i interpretació dels resultats.

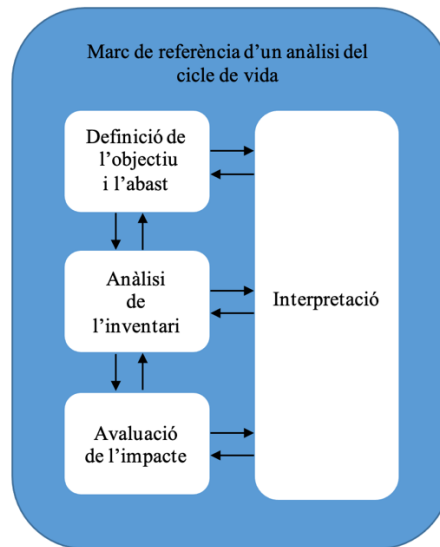


Figura 5: Fases d'un ACV

### 3.1.2.1. Definició de l'objectiu i l'abast

En aquesta fase de l'ACV s'exposen els motius pels quals es realitza l'estudi. Per altre banda, en la definició de l'abast, ha de quedar clar l'amplitud i el nivell de detall de l'estudi així com:

- El sistema del producte a estudiar
- La funció del sistema
- La unitat funcional
- Els límits del sistema
- Els requisits de les fonts de dades i de la qualitat de dades
- Les hipòtesis i limitacions
- El procediment d'assignació de càrregues ambientals, les categories d'impacte seleccionades, la metodologia d'avaluació de l'impacte i la interpretació.

L'objectiu d'aquest ACV és determinar els aspectes de les bateries de Li-ion que tenen un impacte més significatiu en el medi ambient.

La raó per la qual es realitza aquest anàlisi és per poder fer posteriorment una comparativa amb les bateries de Li-S que estan actualment en desenvolupament, i poder valorar si

serien una bona alternativa a les bateries de Li-ion en termes de reducció d'impacte ambiental.

L'abast d'aquest ACV és el definit com “des del bressol fins a la tomba”, és a dir, s'avaluarà l'impacte ambiental des de l'extracció de matèries primeres, passant per la fase de fabricació, la fase d'utilització en un VE, fins a la seva gestió final.

### 3.1.2.1.1. Funció i unitat funcional

S'ha de definir la funció que compleix el nostre sistema, és a dir, descriure el tipus de procés que es realitzarà. La funció que ha de complir el sistema és la d'aportar suficient energia pel correcte funcionament del vehicle elèctric.

La unitat funcional és un element clau de l'ACV i s'ha de definir clarament ja que dona una relació entre entrades i sortides i permet la comparació entre diferents sistemes.

Com s'ha descrit anteriorment, el sistema avaluat en aquest projecte és una bateria de Li-ion que s'utilitza en els VE. El servei que proporcionen aquests vehicles és la distància recorreguda i, per tant, la unitat funcional es basa en quilòmetres recorreguts.

La unitat funcional escollida per aquest estudi és 150.000 km, que és l'autonomia que pot proporcionar la bateria en la seva vida útil al VE.

La unitat funcional escollida per fer la comparativa entre la bateria de Li-ion i la bateria de Li-S és 1 kWh.

### 3.1.2.1.2. Límits del sistema

Els límits del sistema defineixen els processos unitaris que seran inclosos en el sistema. Els criteris utilitzats per establir els límits del sistema són important pel grau de confiança en els resultats i la possibilitat d'assolir els objectius.

A l'hora d'establir els límits del sistema, s'ha de tenir en compte varies etapes del cicle de vida com:

- Adquisició de matèries primeres
- Entrades i sortides del processament

- Distribució/transport
- Utilització i manteniment
- Gestió i tractament de residus
- Altres

Els límits del sistema serviran per delimitar l'abast de l'ACV. L'estudi es centra en l'anàlisi de la bateria de Li-ion i els elements que s'analitzen en l'ACV són els corresponents a l'avaluació "del bressol a la tomba", és a dir, l'extracció de la matèria primera, la fabricació de components i acoblament de la bateria, la fase d'utilització en el VE on s'avalua l'energia durant el seu funcionament i la fase final de vida que inclou les possibles operacions de reciclatge i la recuperació de matèries primeres.

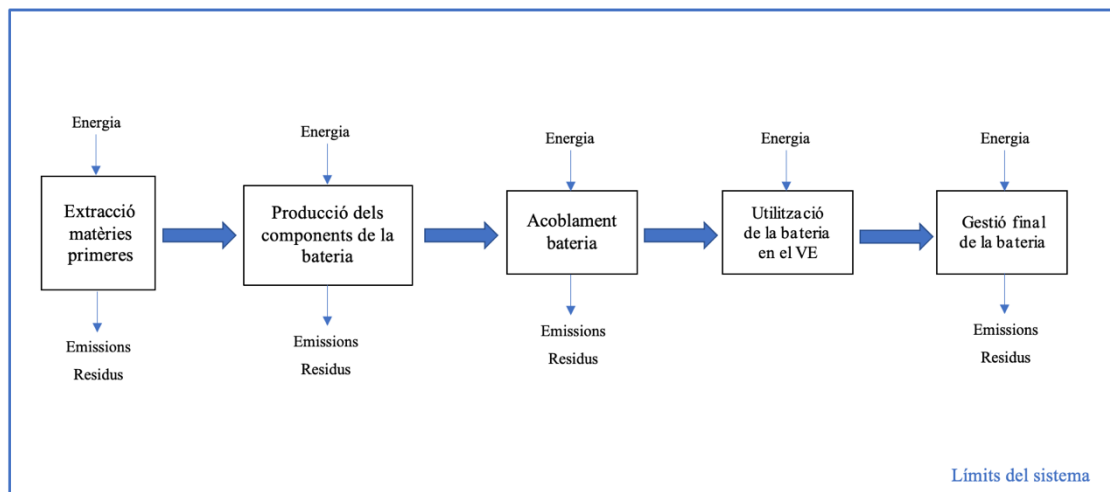


Figura 6: Límits del sistema

Queden fora dels límits del sistema tant les operacions de transport com la producció d'altres components del vehicle elèctric. La opció de donar una segona vida a la bateria també queda fora dels límits del sistema d'aquest anàlisi ja que s'estudiarà posteriorment.

### 3.1.2.1.3. Categories d'impacte

Per l'avaluació de les categories d'impacte en l'ACV, es pot seguir un model d'avaluació "endpoint" o bé "midpoint". Les categories d'impacte ambiental "midpoint" o intermèdia, es troben més properes a la intervenció ambiental, donant informació més

detallada sobre quina manera i en quin punt s'afecta al medi ambient. En canvi, les categories d'impacte ambiental "endpoint" o finals, són variables que afecten directament la societat i per tant, són útils quan es fan estudis a escales globals [21].

En aquest treball, el que es vol estudiar és l'impacte que tenen les bateries en el medi ambient, per tant s'utilitzaran les categories d'impacte ambiental "midpoint".

Els mètodes utilitzats per avaluar les categories d'impacte en el programa GaBi són el mètode CML 2001, desenvolupat per l'Institut de Ciències Ambientals de la Universitat de Leiden (Països Baixos), i el mètode ReCiPe 2008 desenvolupat per RIVM & Radboud University, CML i PRé.

En la següent taula (Taula 4) es presenten les categories d'impacte que es vol estudiar.

Taula 4: Categories d'impacte utilitzades en l'estudi

<b>Categoria d'impacte</b>	<b>Factor de caracterització</b>	<b>Unitats</b>
Esgotament de recursos abiòtics	Abiotic Depletion (ADP)	kg Sb eq.
Acidificació	Acidification Potential (AP)	kg SO <sub>2</sub> <sup>-</sup> eq.
Eutrofització	Eutrophication Potential (EP)	kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq.
Potencial escalfament global	Global Warming Potential (GWP)	kg CO <sub>2</sub> <sup>-</sup> eq.
Formació fotoquímica d'ozó	Photochemical Ozone Creation Potential (POCP)	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> <sup>-</sup> eq.
Escassetat de recursos minerals	Mineral Resource Scarcity (MD)	kg Cu-eq.
Demanda energètica	Primary Energy Demand (renewable and non-renewable, PED)	MJ



#### 3.1.2.1.4. Fonts de les dades i requisits de qualitat

Els requisits de qualitat de les dades especifiquen, en termes generals, les característiques de les dades necessàries per l'estudi. Són necessàries per la fiabilitat i la correcta interpretació dels resultats de l'estudi.

Les dades referents als materials utilitzats per a la fabricació de les bateries de Li-ion i les seves propietats, han estat proporcionades per una empresa del sector de l'automoció, concretament SEAT, S.A i per la base de dades GaBi Professional i EcoInvent 3.5 incloses en la base de dades del programa informàtic GaBi.

Totes les dades proporcionades per la realització de l'ACV provenen de fonts fiables, per tant, no hi ha cap motiu pel qual es pugui dubtar de la credibilitat i qualitat de les dades amb les quals es realitza l'anàlisi.

#### 3.1.2.1.5. Hipòtesis i limitacions

Per tal d'analitzar el consum d'energia durant la fase de fabricació i funcionament de la bateria, es farà servir un mix elèctric mig d'origen europeu que es pot trobar en la base de dades del GaBi.

#### 3.1.2.2. Anàlisi de l'inventari del cicle de vida (ICV)

En aquesta fase de l'ACV es recopilen totes les dades d'entrades i sortides del sistema per poder fer posteriorment els càlculs pertinents seguint els següents passos:

- Validació de les dades recopilades
- Relació de les dades amb els processos
- Relació de les dades amb el flux de referència de la unitat funcional

Un cop s'han realitzat els càlculs, es fa l'assignació de càrregues ambientals, que consisteix en distribuir les diferents emissions i abocaments segons la contribució de cada element d'entrada i sortida i dels processos.

La quantificació de l'inventari del cicle de vida és la segona fase d'un ACV. El sistema d'un producte es compon per múltiples processos necessaris per produir, utilitzar, reciclar o reutilitzar el producte. Tal com es representa en la figura 8, cada procés consisteix en un inventari de fluxos d'entrada i sortida.



Figura 7: Fluxos d'entrada i sortida d'un procés

Es tracta d'un conjunt d'inventaris dels processos de tot el cicle de vida del producte, des de l'extracció de materials, fins al processament de materials, fabricació de productes, ús del producte i final de vida útil.

### 3.1.2.2.1. Recopilació de dades

En aquest apartat, es presenten totes les dades proporcionades per l'empresa SEAT, SA. per a cada etapa del cicle de vida de la bateria.

#### Materials i producció

Per la fase d'extracció de matèries primeres i producció, les dades utilitzades són les dels materials necessaris per la fabricació de la bateria, tal i com es presenta en la taula 5.

Taula 5: Composició materials de la bateria

Composition housing of battery pack [%]					Cell composition [%]			Weight of all the cells [kg]	Total weight [kg]
Steel	Al	Cu	Plastic	Others	Ni Mn Co	Al	Cu		
68	2	10	19	1	15	19	13	189	312

A partir de les dades de la taula 5 es calcula la massa de cada component de la bateria per poder modelitzar-la amb el programa GaBi.

La bateria està composta per 288 cel·les, i cada cel·la pesa  $189/288 = 0,656$  kg

Les cel·les es componen per un ànode, un càtode, un i electròlit. Al tractar-se d'una bateria NCM, l'ànode està compost per Li i Cu i el càtode està compost per Ni, Mn, Co i Al. La composició d'una cel·la és la següent:

$$\frac{Massa Ni}{0,656 kg} \cdot 100 = 15\% Ni \rightarrow Massa Ni = 0,0984 kg$$

$$\frac{Massa Mn}{0,656 kg} \cdot 100 = 15\% Mn \rightarrow Massa Mn = 0,0984 kg$$

$$\frac{Massa Co}{0,656 kg} \cdot 100 = 15\% Co \rightarrow Massa Co = 0,0984 kg$$

$$\frac{Massa Al}{0,656 kg} \cdot 100 = 19\% Al \rightarrow Massa Al = 0,125 kg$$

$$\frac{Massa Cu}{0,656 kg} \cdot 100 = 13\% Cu \rightarrow Massa Cu = 0,085 kg$$

$$Massa Li = 0,656 - (0,0984 \cdot 3 + 0,125 + 0,085) = 0,151 kg$$

Se sap que el pes total de la bateria és 312 kg, i el pes de totes les cel·les és 189 kg, per tant, el pes de la carcassa de la bateria es pot calcular com:

$$Massa carcassa = 312 - 189 = 123 kg$$

Amb aquest valor i les dades de la taula 5, es pot calcular la massa de cada material que s'utilitza per fabricar la carcassa.

$$\frac{Massa Acer}{123 kg} \cdot 100 = 68\% Acer \rightarrow Massa Acer = 83,64 kg$$

$$\frac{Massa Al}{123 kg} \cdot 100 = 2\% Al \rightarrow Massa Al = 2,46 kg$$

$$\frac{Massa Cu}{123 kg} \cdot 100 = 10\% Cu \rightarrow Massa Cu = 12,3 kg$$

$$\frac{Massa Plastic}{123 kg} \cdot 100 = 19\% Plastic \rightarrow Massa Plastic = 23,37 kg$$

$$\frac{Massa Altres}{123 kg} \cdot 100 = 1\% Altres \rightarrow Massa Altres = 1,23 kg$$

Taula 6: Inventari bateria

Composició de la bateria de Li-ion	Massa	Unitats		
Ànode	68,04	kg		
Li Cu				
Càtode	120,96	kg		
Ni Mn Co Al				
Carcassa			123	kg
Acer Al Cu Plàstic Altres				

## Utilització en el vehicle

En la fase d'utilització en el vehicle elèctric, s'avalua l'energia consumida per la bateria durant la seva vida útil en el vehicle. Per la quantificació dels consums elèctrics durant la fase d'utilització de la bateria, s'han utilitzat les dades proporcionades pel fabricant de vehicles tal i com es presenta en la taula 7.

*Taula 7: Inventari fase d'utilització de la bateria*

Paràmetre	Quantitat	Unitats
Capacitat d'emmagatzematge	35,8	kWh
Consum d'energia per km	0,154	kWh/km
Cicles	1000	Cicles
Distància total	150.000	km

## Final de vida útil

En la fase de final de vida de la bateria de 35,8 kWh s'ha considerat que es retira del vehicle al final de la seva vida útil i es recicla amb l'objectiu de recuperar la major quantitat de materials possibles, així com evitar la producció de residus perillosos.

La informació que s'utilitza per calcular l'impacte ambiental del reciclatge de la bateria és el proporcionat pels articles [13] [22], on s'explica que el reciclatge de la bateria pot comportar una reducció de fins a un 50% dels impactes en el procés de fabricació de la bateria. D'aquesta manera, es considera que l'impacte ambiental que genera el reciclatge de les bateries en aquest treball és d'un menys 50% de l'impacte que té la producció de la bateria ja que els materials recuperats s'hipnotitzen que estalvien el seu equivalent en material verge.

### 3.1.2.2.2. Validació de les dades recopilades

Com ja s'ha comentat anteriorment, totes les dades de la bateria per la realització de l'ACV han estat proporcionades per l'empresa d'automoció. Les dades podrien variar en funció de l'empresa d'automoció, però tot i així els resultats que s'obtidrien serien molt semblants.

Per altre banda, s'ha de tenir en compte l'exactitud del programa GaBi amb el qual es realitza l'anàlisi. Les bases de dades del programa ja han estat avaluades i aprovades per la comunitat científica, per tant es poden considerar com una font fiable.

### 3.1.2.2.3. Assignació de fluxos, d'emissions i abocaments

Normalment, es requereixen procediments d'assignació quan es produeixen diversos productes o co-productes mitjançant el mateix procés. En aquest cas, no hi ha necessitat d'aplicar assignació de fluxos perquè no hi ha productes múltiples per a un procés.

### 3.1.2.3. Avaluació de l'impacte ambiental del cicle de vida (AICV)

L'avaluació de l'impacte ambiental del cicle de vida (AICV) té com a propòsit avaluar els impactes ambientals a partir dels resultats de l'anàlisi de l'inventari del cicle de vida (ICV). Aquest procés implica l'associació de les dades d'inventari amb les categories d'impactes ambientals específics i amb els indicadors d'aquestes categories.

Els passos que es segueixen durant la realització de l'AICV són els que es mostren en la Figura 6.

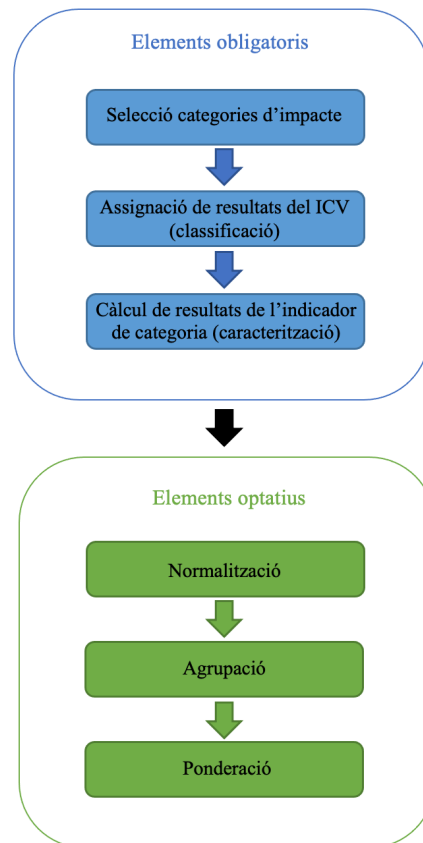


Figura 8: Passos durant la fase d'AICV

### 3.1.2.3.1. Selecció de categories, indicadors i models

Com ja s'ha comentat anteriorment, el mètode que s'utilitzarà per l'avaluació de les categories d'impacte és el "midpoint".

A continuació s'expliquen breument les categories d'impacte que seran avaluades.

#### *Esgotament de recursos abiòtics*

Els recursos abiòtics són tots aquells recursos naturals renovables i no renovables considerats no vius, com combustibles fòssils, vent i minerals. L'esgotament de recursos abiòtics fa referència a l'esgotament de tots aquests recursos degut al seu sobre us.

Es tracta d'una categoria d'impacte que no té una única manera exacte de determinar ja que hi ha diferents maneres de definir el problema de l'esgotament i es poden justificar totes des de diferents perspectives [23].

### *Acidificació*

L'acidificació s'origina com a conseqüència de les emissions d'òxids de sofre (SOx) i òxids de nitrogen (NOx). Els impactes ambientals de l'acidificació són un dels principals problemes ambientals a nivell mundial. Quan s'emeten àcids, el factor de pH disminueix i l'acidesa augmenta, cosa que pot comportar una pèrdua de biodiversitat aquàtica, canvis en la biologia del sòl, danys als boscos i malalties respiratòries entre d'altres [24].

### *Eutrofització*

L'eutrofització consisteix en un augment de la concentració de fòsfor, nitrogen i altres nutrients ja sigui per causes naturals o per l'abocament de fertilitzants en ecosistemes aquàtics. Això fa que creixin algues i altres plantes aquàtiques que impedeixen que entri llum i l'absorció d'oxigen necessaris per a la vida submarina [25].

### *Potencial d'escalfament global*

El potencial d'escalfament global permet la comparació dels impactes d'escalfament global de diferents gasos. Mesura la quantitat d'energia que absorbiran les emissions d'1 tona de gas durant un període de temps determinat, en relació amb les emissions d'1 tona de diòxid de carboni (CO<sub>2</sub>). Com més gran és el potencial d'una gas, més escalfa l'atmosfera de la terra en comparació amb l'escalfament produït pel CO<sub>2</sub> [26].

A continuació s'expliquen els diferents gasos d'efecte hivernacle que contribueixen en el potencial d'escalfament global:

- CO<sub>2</sub>: Té un PEG de 1 ja que és el gas que s'utilitza com a referència. El CO<sub>2</sub> perdura en l'atmosfera durant molt de temps.
- Metà (CH<sub>4</sub>): El seu PEG està entre 28 i 36 al llarg de 100 anys. El CH<sub>4</sub> emès actualment perdura una dècada de mitjana, que és molt menys temps que el CO<sub>2</sub>. D'altre banda, el CH<sub>4</sub> absorbeix molta més energia que el CO<sub>2</sub>, fet que es veu reflectit en el seu valor de PEG. A més a més, és responsable d'altres efectes com la creació d'Ozó, un dels gasos d'efecte hivernacle.



- Òxid nitrós (N<sub>2</sub>O): Té un PEG entre 265-298 vegades superior al de CO<sub>2</sub> durant un període de 100 anys. Aquest gas roman a l'atmosfera durant més de 100 anys.
- Clorofluorocarburs (CFC), hidrofluorocarburs (HFC), hidrocolorofluorocarburs (HCFC), perfluorocarburs (PFC) i hexafluorur de sofre (SF<sub>6</sub>): S'anomenen gasos d'alt PEG ja que per una quantitat determinada de massa, escalfen més que el CO<sub>2</sub>.

#### *Formació fotoquímica d'ozó*

Formació d'ozó a la troposfera causada per l'oxidació fotoquímica de compostos orgànics volàtils (COV) i monòxid de carboni (CO) en presència d'òxids de nitrogen (NO<sub>x</sub>) i llum solar. Altes concentracions d'ozó troposfèric són nocives per la vegetació, la salut humana i els materials orgànics [27].

#### *Escassetat de recursos minerals*

L'explotació a gran escala de recursos no renovables com són els minerals provoca l'esgotament d'aquest degut a que el ritme de consum és més elevat que el del reemplaçament dels recursos.

#### *Demanda d'energia primària*

L'energia primària és aquella que es troba a la natura i no ha estat modificada ni ha estat sotmesa a cap procés de conversió. Pot ser renovable o no renovable. La demanda energètica és el consum d'aquest tipus d'energia.

#### 3.1.2.3.2. Assignació dels resultats de l'AICV (classificació)

La classificació de les categories d'impacte estudiades amb els principals agents que la provoquen és la següent.

Taula 8: Assignació dels resultats de l'AICV

Categories d'impacte	Resultats (Classificació)
Esgotament de recursos abiòtics	Extracció de minerals i combustibles fòssils.
Acidificació	Emissió de NO <sub>x</sub> , NH <sub>3</sub> i SO <sub>2</sub> .
Eutrofització	Emissió de nutrients a l'aire, a l'aigua i al sòl (nitrats, nitrogen, DQO, N <sub>2</sub> O)
Potencial d'escalfament global	Emissions a l'aire de gasos d'efecte hivernacle.
Formació fotoquímica d'ozó	Emissió de substàncies COV, CO a l'aire.
Escassetat de recursos minerals	Extracció de minerals.
Demanda energètica	Combustibles fòssils

### 3.1.2.3.3. Limitacions de l'AICV

Les limitacions de l'AICV venen definides dins la normativa utilitzada en la realització dels ACV, les UNE-EN ISO 14040/14044.

Les limitacions són les següents:

- Només es tracten els temes ambientals especificats en l'objectiu i l'abast.
- No sempre es poden demostrar diferències significatives entre les categories d'impacte i els resultats dels seus corresponents indicadors per les diferents alternatives dels sistemes dels productes.
- Hi ha incertesa en els resultats de l'AICV degut a l'absència de dimensions espacials i temporals en els resultats de l'ICV.
- No hi ha metodologies per associar de forma coherent i exacte les dades de l'inventari amb els impactes ambientals.

### 3.1.2.3.4. Resultats de l'AICV

A continuació, es mostren els resultats corresponents a l'avaluació de l'impacte ambiental del cicle de vida de la bateria de Li-ion de 35,8 kWh.

Un cop s'han analitzat totes les fases del cicle de vida de la bateria s'obtenen els següents resultats que tenen com a objectiu donar una imatge completa del perfil ambiental de les bateries de Li-ion.

Taula 9: Resultats de l'AICV

Categories d'impacte	Unitats	Producció	Utilització	Reciclatge
ADP	kg Sb eq.	0,15	3,05E-03	-7,26E-02
AP	kg SO <sub>2</sub> eq.	83,72	19,1	-41,86
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq.	10,52	2,12	-5,26
GWP	kg CO <sub>2</sub> eq.	4,96E+03	9,16E+03	-2,48E+03
POCP	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq.	3,85	1,36	-1,93
MD	kg Cu eq.	2,95E+03	12,1	-1475
PED	MJ	1,01E+05	2,36E+05	-5,04E+04

#### 3.1.2.4. Interpretació dels resultats

En l'última fase, s'avaluen els resultats obtinguts per assegurar que són coherents amb l'objectiu i l'abast definits. La interpretació dels resultats proporcionarà conclusions i recomanacions que permetin en un futur poder reduir les càrregues ambientals associades amb els consums d'energia, matèries primeres i l'impacte ambiental generats durant el cicle de vida d'un producte, procés o activitat.

Els resultats de l'estudi d'ACV del bressol a la tomba de la bateria de Li-ion de 35,8 kWh per identificar en detall la influència de cada etapa de la bateria en el perfil ambiental es presenten a la figura 9. Els resultats de l'estudi indiquen que els impactes ambientals de la bateria varien significament en funció de les fases del seu cicle de vida.

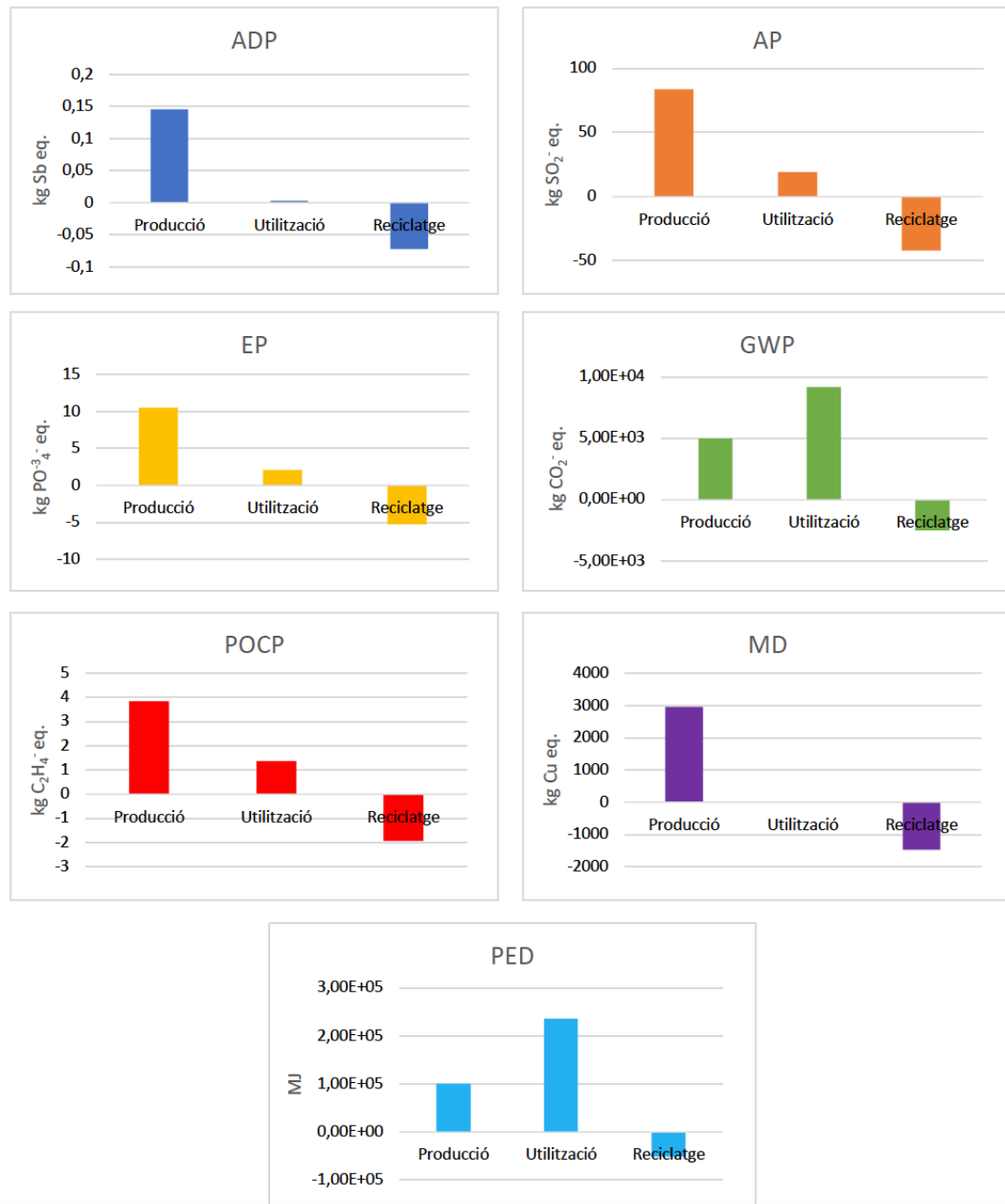


Figura 9: Contribució de cada etapa de vida per cada categoria d'impacte

A la figura 9 el cicle de vida de la bateria es divideix en tres fases: la producció, la utilització en el vehicle elèctric i el reciclatge al final de la vida útil.

Com es pot observar, tots els resultats de les categories d'impacte associats a la fase de fabricació són considerablement superiors a les altres fases, excepte l'impacte de potencial d'escalfament global (GWP) i demanda d'energia primària (PED). La fase de producció que inclou l'extracció de materials i la fabricació dels components, representa

el principal contribuent de les categories d'impacte relacionades amb el consum de matèries primeres com l'esgotament de recursos abiòtics (ADP) i l'escassetat de recursos naturals (MD).

La fase d'utilització de la bateria en el vehicle contribueix majoritàriament en les categories de potencial d'escalfament global (GWP) i demanda d'energia primària (PED). Respecte a la categoria de demanda d'energia primària (PED), el valor que s'obté és tant elevat degut al consum d'energia elèctrica durant els 150.000km de conducció del vehicle (0,154 kWh/km) ja que s'ha utilitzat un mix elèctric europeu que està format en gran part per fonts de combustibles fòssils.

De la fase del final de vida de la bateria, com s'ha comentat en l'apartat de la metodologia, s'ha considerat que el material que es recupera amb el reciclatge que posteriorment pot ser reutilitzat per fabricar noves bateries, suposa una reducció del 50% de l'impacte de la fase de producció, per això té signe negatiu.

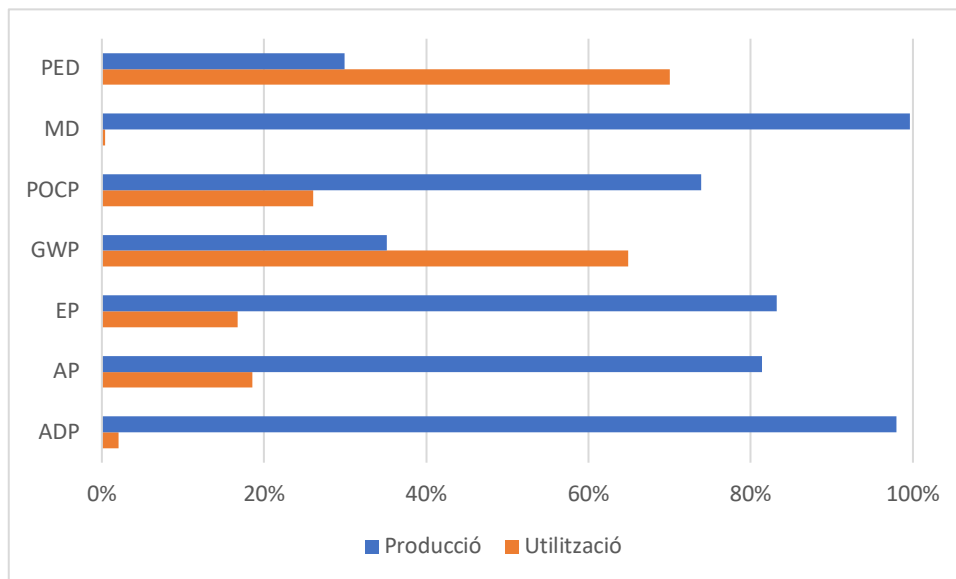


Figura 10: Contribució total del cicle de vida de la bateria Li-ion

Per als impactes totals del cicle de vida de la bateria Li-ion de 35,8 kWh (Figura 10), es constata que la fase de producció contribueix del 73,9% al 99,6% en categories com l'esgotament de recursos abiòtics (ADP), l'acidificació (AP), l'eutrofització (EP), la formació fotoquímica d'ozó (POCP) i l'escassetat de recursos naturals (MD), mentre que

del 29,9% al 35,1% en categories com el potencial d'escalfament global (GWP) i demanda energètica (PED). Tant mateix, la fase d'utilització de la bateria contribueix en un 64,9% i 70% en les categories de potencial d'escalfament global (GWP) i demanda d'energia primària (PED) respectivament i, també contribueix del 0,41% al 26,1% en les categories d'esgotament de recursos abiòtics (ADP), acidificació (AP), eutrofització (EP), formació fotoquímica d'ozó (POCP) i escassetat de recursos naturals (MD).

En vista dels resultats, s'ha realitzat un anàlisi addicional per aprofundir en la fase de producció de la bateria i identificar quins són els components que contribueixen majoritàriament en l'impacte general de la producció.

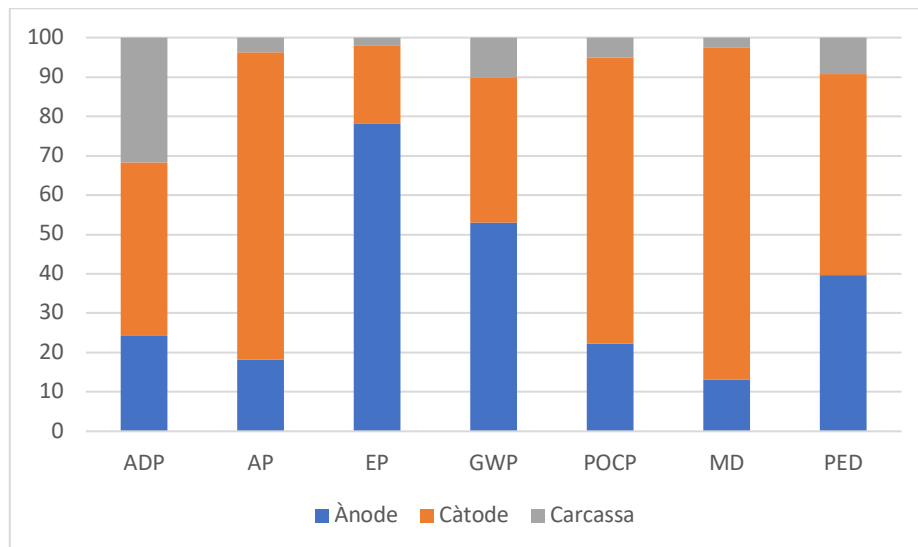


Figura 11: Contribució de cada component de la bateria en la fase de producció

La contribució del càtode en totes les categories d'impacte és notablement superior al de l'ànode i la carcassa excepte en les categories d'eutrofització (EP) i potencial d'escalfament global (GWP). El càtode presenta un 51% de l'impacte total de la producció de la bateria.

La figura 11 mostra, en referència al potencial d'esgotament abiòtic (ADP), que els principals impactes estan relacionats amb la producció del càtode, degut a l'extracció de níquel, i la producció de la carcassa de la bateria a causa de l'extracció de coure.

En referència als impactes d'acidificació (AP), el càtode sol ser un dels contribuents més significatius en aquest tipus de bateries. En aquest estudi, representa el 77,98% de l'impacte total, principalment a causa de la producció de níquel que genera emissions de diòxid de sofre.

La categoria d'eutrofització (EP) es veu caracteritzada principalment per la producció de l'ànode a causa de l'impacte de l'extracció de liti. La producció del càtode representa aproximadament un 20% degut a l'extracció de níquel i cobalt.

El principal contribuent del potencial d'escalfament global (GWP) és la producció de l'ànode degut a l'extracció de liti. El percentatge d'impacte GWP atribuïble al càtode és important a causa de l'extracció de níquel, cobalt i alumini.

L'impacte de la categoria de formació fotoquímica d'ozó (POCP) s'atribueix principalment a la producció de materials del càtode. L'extracció de ferro té el paper principal en la producció de la carcassa, mentre que en la producció de l'ànode és l'extracció de liti el principal contribuent.

El principal contribuent en l'escassetat de recursos naturals (MD) és la producció del càtode amb un 84,2% a causa de l'extracció de níquel, cobalt, manganés i alumini.

Pel que fa a la demanda d'energia primària (PED), la producció del càtode influeix en un 51% a degut a l'extracció de les matèries primeres, especialment cobalt i níquel. El principal contribuent de l'ànode és l'extracció de liti.

Un cop analitzat els resultats del cicle de vida de la bateria de Li-ion de 35,8 kWh, es pot afirmar que el principal contribuent és la fase de producció amb un impacte del 98% ADP, 81% AP, 83% EP, 74% POCP i 100% MD. I dins de la fase de producció, el principal contribuent és el càtode amb un 51% del impacte total de la producció.

### 3.2. Comparativa bateria de Li-ion amb una de Li-S en desenvolupament

Per entendre la importància relativa dels impactes ambientals de la bateria de Li-ion, en aquest apartat es comparen els efectes ambientals del cicle de vida de la bateria de Li-ion de 35,8 kWh amb els d'una bateria de Li-S de 50 kWh en desenvolupament.

Per la realització de la comparativa s'utilitzaran els resultats d'un ACV d'una bateria de Li-S de 50 kWh proporcionat per la universitat. Per poder fer la comparació cal que les dues bateries tinguin les mateixes funcions. Com aquest no és el cas ja que la bateria de Li-ion és de 35,8 kWh i la de Li-S és de 50 kWh, és necessari escalar una de les dos bateries perquè les dues tinguin les mateixes capacitats. Degut a que no és tenen les dades necessàries per poder fer aquest escalat, s'ha optat per una opció no tant precisa des del punt de vista de l'ACV que és donar els resultats per 1 kWh per les dues bateries.

A continuació, es mostren els resultats de les dues bateries per 1 kWh.

Taula 10: Resultats bateria Li-ion i bateria Li-S per 1 kWh

Categories d'impacte	Unitats	Bateria Li-ion			Bateria Li-S		
		Producció	Utilització	Reciclatge	Producció	Utilització	Reciclatge
ADP	kg Sb eq./kWh	4,05E-03	8,52E-05	-2E-03	5E-04	6,1E-05	6,04E-09
AP	kg SO <sub>2</sub> <sup>-</sup> eq./kWh	2,34	0,53	-1,17	0,50	0,38	2,76E-04
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq./kWh	0,29	0,06	-0,15	0,22	0,04	4,47E-05
GWP	kg CO <sub>2</sub> <sup>-</sup> eq./kWh	1,39E+02	2,56E+02	-6,93E+01	8,98E+01	1,83E+02	0,26
POCP	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> <sup>-</sup> eq./kWh	0,11	0,04	-0,05	0,03	0,03	-1,08E-05
MD	kg Cu eq./kWh	82,43	0,34	-41,21	7,27	0,24	6,72E-05
PED	MJ/kWh	2,82E+03	6,59E+03	-1,41E+03	1,59E+03	4,72E+03	0,25



## Estudi mediambiental d'una bateria d'ió-liti de VE i comparativa amb una de liti-sofre en desenvolupament

Com era d'esperar, la bateria de Li-S és més respectuosa amb el medi ambient que la tecnologia convencional de la bateria de Li-ion tal i com es mostra en la figura 12. Cal tenir en compte que els impactes ambientals de la bateria de Li-S s'han avaluat a partir d'un escalat de cel·les botó ja que aquestes bateries encara estan en fase de desenvolupament, mentre que la bateria de Li-ion s'ha avaluat amb una capacitat de producció completa a escala industrial.

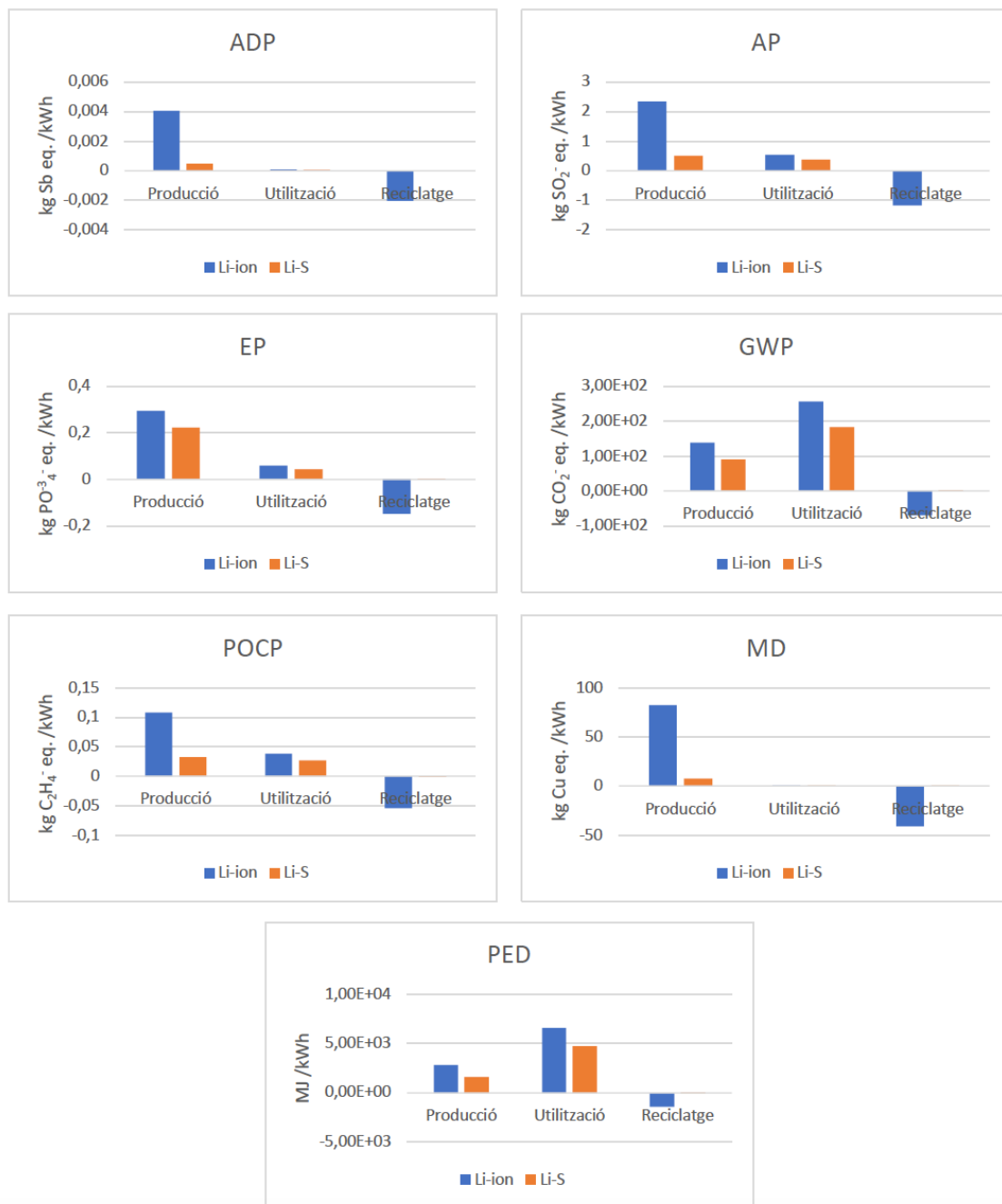


Figura 12: Comparativa categories d'impacte entre bateria Li-ion i Li-S

Per a l'emissió de gasos d'efecte hivernacle (GEH), la producció de la bateria de Li-S genera 89,8 kg CO<sub>2</sub> eq./kWh, un 35% inferior a l'emissió de 139 kg CO<sub>2</sub> eq./kWh de la producció de la bateria de Li-ion NCM. Aquesta reducció d'impacte de potencial d'escalfament global (GWP) es pot atribuir principalment als materials de baix impacte com el tiosulfat de sodi que s'utilitza en la fabricació de bateries de Li-S. L'emissió de GEH en la fase d'utilització de la bateria, es pot reduir de 256 kg CO<sub>2</sub> eq./kWh a 183 kg CO<sub>2</sub> eq./kWh. En general, es pot aconseguir una reducció del 31% del cicle de vida en emissions de GEH utilitzant una bateria de Li-S en comptes d'una de Li-ion NCM.

A més, la utilització d'una bateria Li-S en contraposició d'una bateria convencional de Li-ion NCM pot reduir entre un 70-90% els impactes de categories com l'esgotament abiòtic (ADP), l'acidificació (AP) i l'escassetat de recursos naturals (MD) perquè la bateria de Li-S no utilitza metalls com el níquel, el cobalt, i el manganès, i utilitza molt menys coure que una bateria de Li-ion NCM.

En termes de final de vida de la bateria de Li-S, es pot observar com el procés de reciclatge té un impacte insignificant en comparació amb les altres fases del cicle de vida, a més a més, el material que es recupera a partir del procés de reciclatge es pot re-utilitzar en la fase de fabricació reduint d'aquesta manera l'impacte de la fase de producció.

En l'apartat de l'ACV de la bateria de Li-ion, s'ha pogut comprovar que la fase del cicle de vida de la bateria que té una major contribució en totes les categories d'impacte és la de producció i, concretament la fabricació del càtode. Si fem una comparació entre el càtode de la bateria de Li-S i el de la bateria de Li-ion obtenim els resultats que es mostren en la figura 13.



Figura 13: Contribució càtode bateria Li-ion vs càtode bateria Li-S en la fase de producció

En totes les categories excepte l'eutrofització (EP), l'impacte del càtode de la bateria de Li-S es veu reduït en comparació amb l'impacte que té el càtode de la bateria de Li-ion. El fet que l'impacte d'eutrofització sigui més elevat en la bateria de Li-S és degut a que el càtode està format per sofre i és la producció d'aquest element el que causa emissions de SO<sub>x</sub>.

Les categories d'impacte on hi ha una reducció més significativa són l'esgotament abiòtic (ADP) amb una reducció del 94%, l'acidificació (AP) amb una reducció del 89%, formació fotoquímica d'ozó (POCP) amb una reducció del 80% i l'escassetat de recursos naturals (MD) amb una reducció del 99%. Aquesta diferència d'impacte tant elevada entre el càtode de les dos bateries és degut a l'absència de níquel, cobalt i manganès en la bateria de Li-S.

Pel que fa a les categories d'impacte de potencial d'escalfament global (GWP) i la demanda d'energia primària (PED), que estan relacionades amb l'emissió de contaminants a l'aire durant la generació d'electricitat, amb la utilització d'un càtode de sofre es poden veure reduïdes entre un 22% i 43%.

Segons els resultats de l'ACV, les reduccions dels metalls tòxics en la bateria de Li-S la converteixen en una alternativa d'emmagatzematge d'energia per a VE més sostenible pel medi ambient respecte a les bateries convencionals de Li-ion.

### 3.3. Anàlisi de la segona vida d'una bateria de Li-ion

L'objectiu d'aquest anàlisi és estimar els beneficis ambientals de reutilitzar una bateria de Li-ion en diverses aplicacions de segona vida un cop ha finalitzat la seva vida útil en el VE i, posteriorment fer una comparativa amb l'impacte que tindria utilitzar una bateria nova per aquestes aplicacions.

#### 3.3.1. Segona vida d'una bateria

Un dels motius més importants per considerar la reutilització de les bateries de VE és el benefici mediambiental que s'obté d'aquesta reutilització. Més enllà de proporcionar un enfocament d'economia circular per les bateries de Li-ion, en molts casos la reutilització de bateries de VE en aplicacions de segona vida podria evitar la fabricació de bateries noves o fins i tot evitar l'ús de subministraments energètics més contaminants [28]. En la figura 14 es representa el cicle de vida de les bateries en segona vida.

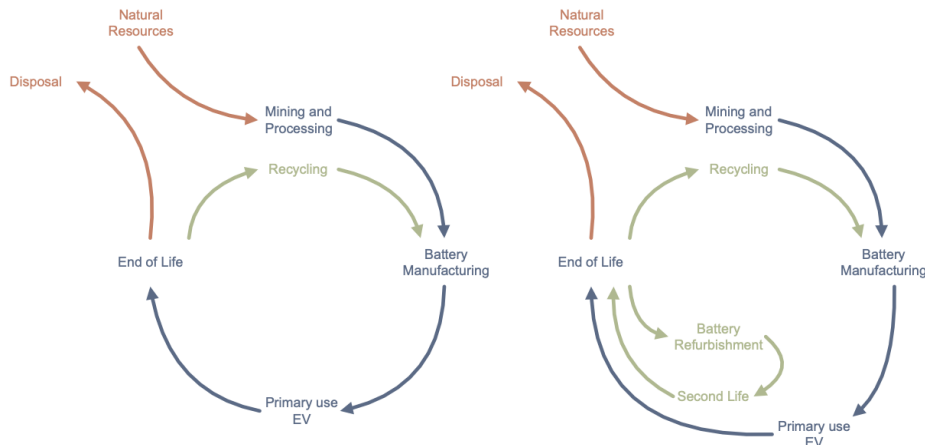


Figura 14: Cicle de vida bateria VE: escenari de primera vida (esquerra) i escenari de segona vida (dreta) [28]

Basant-se en els descripcions dels fabricants i la bibliografia existent, quan les bateries de VE arriben al 70-80% de la seva capacitat nominal, els fabricants recomanen que siguin reemplaçades. Aquest percentatge de capacitat residual de la bateria s'anomena "State Of Health" (SOH). S'estima que aquesta degradació es produeix després de 8 anys d'ús o equivalentment a 160.000 km recorreguts [29]. No obstant això, les bateries que són retirades dels VE, fins i tot amb SOH més baix, encara poden seguir funcionant com a sistemes d'emmagatzematge d'energia en diverses aplicacions de segona vida.

La utilització de les bateries dels VE com a sistema d'emmagatzematge d'energia ofereix una solució més neta ja que s'aplica el concepte de gestió de residus per ampliar el cicle de vida d'un producte. La reutilització de les bateries com a sistema d'emmagatzematge d'energia durant 5-7 anys més, podria reduir la demanda d'energia i el potencial d'escalfament global en un 15-70% [29]. A més a més, s'evitaria la necessitat de produir noves bateries, que és un procés que té un important impacte ambiental com s'ha pogut comprovar amb la realització de l'ACV en l'apartat 3.1.

Per tal d'utilitzar la bateria en una segona aplicació, ha de passar per una sèrie de processos. Inicialment, s'ha d'extreure del vehicle elèctric, i en funció de l'aplicació de segona vida que se li vulgui donar es desmuntarà a nivells més petits. Com més profund sigui el nivell de desmantellament, més elevats seran els costos. Per tant, el desmuntatge només es realitzarà si és estrictament necessari per a la aplicació de segona vida. També cal comprovar la funcionalitat de les unitats de la bateria i determinar el seu estat d'envelliment actual (SOH). Finalment, les unitats que tinguin condicions similars es

tornaran a muntar al sistema de bateries en les dimensions necessàries per satisfer els requisits de l'aplicació de segona vida [30].

Es poden distingir 3 processos diferents de re-manufactura per el qual passen les bateries abans de començar la seva segona vida:

- **Re-utilització directa:** És el més ràpid i barat. Consisteix en agafar la bateria tal com ve del VE, comprovar el SOH i les seves característiques funcionals, i fer les mínimes modificacions per a la seva segona vida [31].
- **Desmuntatge de mòduls:** Consisteix en desmuntar la bateria en mòduls per empaquetar-los de nou amb una altre configuració. Suposa una demanda d'energia i treball més alta que amb la re-utilització directa però ofereix bateries millor adaptades per a una segona vida [31].
- **Desmuntatge de cel·les:** Consisteix en desmuntar completament la bateria fins a un nivell de cel·la. Igual que amb el procés de mòduls, les cel·les s'agrupen en funció de la seva capacitat restant o SOH. És el procés que menys s'utilitza ja que porta molta feina i és car. A més a més, desmuntar les cel·les pot ser un procés complicat i delicat ja que es poden enganxar d'alguna manera duran la fabricació del mòdul i el procés de desmuntatge les pot fer malbé [31].

### 3.3.2. Aplicacions segona vida

Pel que fa a la comercialització secundària de bateries de VE, es poden diferenciar diferents participants en el mercat, com ara productors d'electricitat, operadors de xarxa, consumidors i proveïdors de serveis [30]. La figura 14 il·lustra diferents aplicacions que poden ser actualment d'interès tant des del punt de vista del proveïdor com de l'usuari. En funció del grau de mobilitat, les aplicacions es poden classificar en: estacionàries, quasi estacionàries i mòbils. Dins de les aplicacions estacionàries hi trobem les aplicacions connectades a la xarxa de distribució i les aplicacions fora de la xarxa de distribució.

Second-Life Applications						
Stationary application scenarios	<i>On-grid solutions</i> (network-connected)					
	<i>Perspective of the operator</i>	(Industrial) plant operators	Storage operators	Charging infrastructure operators	Residential and commercial real estate owners	
	<i>Applications</i>	Short-term storage systems for renewable energy production plants (wind power and photovoltaics)	Stationary storage systems for participating in electricity balancing markets	Short-term storage systems for grid stabilization and regulation	Storage buffers for DC-quick charging stations	Storage systems for load shifting energy-intensive consumers (load management)
	<i>Off-grid solutions</i> (without network connection)					
Stationary application scenarios	<i>Perspective of the operator</i>	(Small) plant operators/private households		Operators of critical infrastructure	Storage/charging infrastructure operators	
	<i>Applications</i>	Storage systems for optimizing the own consumption of electrical energy from photovoltaics	Storage systems for uninterruptible power supply of private households	Emergency power systems for ensuring security of supply	Autarkic storage systems for micro mobility (e.g. charging e-bikes in non-grid-connected areas)	
Quasi-stationary application scenarios	<i>Off-grid solutions</i> (without network connection)					
	<i>Applications</i>	Decentralized energy supply of major events		Decentralized energy supply of construction sites		
Mobile application scenarios	<i>Industrial solutions</i>					
	<i>Applications</i>	Re-use in industrial trucks (e.g. forklifts, lift trucks, tractors, transport trolleys), sweepers etc.		Re-use in driverless transport vehicles for the internal transport		
	<i>Private and commercial solutions</i>					
<i>Applications</i>	Re-use in e-bikes, e-scooters, golf carts etc.		Battery swapping systems for e-bikes, e-scooters	Re-use in driverless transport vehicles		

Figura 15: Aplicacions de segona vida per a les bateries [30]

### *Aplicacions estacionaries connectades a la xarxa de distribució*

Els sistemes d'emmagatzematge estacionari connectats a la xarxa serveixen, entre altres coses, per estabilitzar la xarxa elèctrica. L'increment de fonts d'energia renovable en la xarxa elèctrica, com la fotovoltaica i la eòlica, suposa un "problema" per la xarxa ja que són fonts d'energia fluctuants i per tant, és necessita cobrir la demanda d'energia en els moments del dia en els quals aquestes fonts no produeixen suficient [30]. Aquí és on entra en joc la implementació de bateries per reutilitzar-les com a emmagatzematge i font d'energia per equilibrar la producció i la demanda d'energia de la xarxa.

A més a més, en situacions crítiques per la xarxa, es poden amortitzar els excedents de producció, redreçar els pics de demanda i evitar la redistribució d'altres plantes generadores [30].

Amb l'objectiu d'augmentar la incorporació de vehicles elèctrics, la Plataforma Nacional de Mobilitat Elèctrica (NPE) reclama una expansió massiva d'infraestructures de càrrega [30]. En aquest sentit, es preveu la construcció d'un gran nombre d'estacions de càrrega ràpida de corrent continua, fet que suposarà una càrrega addicional per la xarxa. Mitjançant acumuladors per aquestes estacions, es podria aprofitar al màxim els

potencials de transferència i reducció de la carrega, es poden redreçar els pics de potència i, en conseqüència es poden reduir els cost de compra per kWh [30].

#### *Aplicacions estacionaries fora de la xarxa de distribució*

Les bateries també poden ser útils per aplicacions d'emmagatzematge fora de la xarxa de distribució, especialment en temes com el d'optimitzar el consum propi d'energia elèctrica procedent de la fotovoltaica. Mitjançant l'acoblament dels sistemes fotovoltaics amb l'emmagatzematge de les bateries, es pot amortitzar l'excés d'energia i utilitzar-lo durant els períodes de menys radiació solar [30].

Un altre opció, és utilitzar les bateries com a sistema d'emmagatzematge autàrquic (per exemple, per subministrar energia en zones no connectades a la xarxa elèctrica), en magatzem per al subministrament d'energia ininterrompuda de les cases particulars, així com en sistemes d'energia d'emergència per garantir electricitat a infraestructures com hospitals, empreses de transport públic, etc [30].

#### *Aplicacions quasi estacionaries i mòbils*

A part de les aplicacions estacionàries, també és possible incorporar les bateries en solucions quasi estacionaries com per exemple el subministrament d'energia descentralitzat de gran esdeveniments o llocs de construcció, o en solucions exclusivament mòbils.

Les solucions mòbils poden ser de caire tant industrial com privat o comercial. Es poden reutilitzar les bateries en vehicles amb requisits de potència i rendiment inferiors als VE com ara bicicletes elèctriques, patinets elèctrics, carros de golf, etc., contribuint així a un subministrament energètic sostenible [30].

Les aplicacions de segona vida escollides a analitzar són:

- Sistema d'emmagatzematge d'energia per millorar la integració d'energies renovables a la xarxa
- Sistema d'emmagatzematge d'energia en habitatges



En totes les aplicacions a analitzar s'utilitzen les dades de la bateria de Li-ion de 35,8 kWh utilitzades per realitzar l'ACV així com els resultats d'aquest. Es considera que la bateria és retirada del vehicle elèctric quan el seu SOH és del 70%, per tant, la capacitat d'emmagatzematge actual de la bateria és de 25 kWh. A més, no s'ha tingut en compte l'impacte ambiental del procés de re-manufactura de la bateria per adaptar-la a l'aplicació de segona vida, ja que tal i com indiquen els articles [32] [33], aquest impacte és molt petit en comparació amb l'impacte que tenen els processos de fabricació i utilització de la bateria i es pot negligir.

#### 3.3.2.1. Sistema d'emmagatzematge d'energia per millorar la integració d'energies renovables a la xarxa

La gran expansió d'energies renovables com l'eòlica i la fotovoltaica durant la darrera dècada ha suposat una reducció significativa de l'impacte ambiental global de l'energia elèctrica en el context europeu [34]. Tot i així, la utilització de fonts d'energies renovables per el subministrament d'energia a la xarxa, planteja desafiaments tècnics per a l'estabilitat i integritat de la xarxa a causa de la seva producció variable i intermitent.

Una solució per mitigar els efectes de l'alta variabilitat de les energies renovables i millorar l'estabilitat de les xarxes és utilitzar bateries com a sistemes d'emmagatzematge d'energies. D'aquesta manera s'ofereix un temps de resposta al voltant de mil·lisegons i la capacitat de compensar en temps real l'alta variabilitat de les energies renovables [35].

Per fer l'anàlisi d'aquesta aplicació es consideraran dos escenaris: la utilització d'una bateria en segona vida i la utilització d'una bateria nova. En el primer escenari, una bateria en segona vida, els impactes ambientals deguts a la producció no es tenen en compte ja que aquest afecten a la primera vida de la bateria, per tant, només es consideren els impactes que tenen la fase d'utilització en l'aplicació i el final de vida.

En el segon escenari, una bateria nova, s'utilitzen els resultats obtinguts en l'apartat de l'ACV de la bateria de Li-ion però adaptats a la seva capacitat actual de 25 kWh. Respecte a la fase d'utilització, en ambdós casos l'impacte serà zero ja que s'utilitza energia que prové de fonts renovables.

Els resultats de l'anàlisi són els que es mostren a la taula 11 i a la figura 16:

Taula 11: Resultats bateria com a sistema d'emmagatzematge d'energia per la integració d'energies renovables a la xarxa

Escenari	Categoria d'impacte	Producció	Utilització	Reciclatge	Unitats
Bateria segona vida	ADP	-	0	-5,07E-02	kg Sb eq.
	AP	-	0	-29,23	kg SO <sub>2</sub> <sup>-</sup> eq.
	EP	-	0	-3,67	kg PO <sup>-3</sup> <sub>4</sub> <sup>-</sup> eq.
	GWP	-	0	-1,73E+03	kg CO <sub>2</sub> <sup>-</sup> eq.
	POCP	-	0	-1,35	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> <sup>-</sup> eq.
	MD	-	0	-1,03E+03	kg Cu eq.
	PED	-	0	-3,521E+04	MJ
Bateria nova	ADP	1,01E-01	0	-5,07E-02	kg Sb eq.
	AP	58,46	0	-29,23	kg SO <sub>2</sub> <sup>-</sup> eq.
	EP	7,35	0	-3,67	kg PO <sup>-3</sup> <sub>4</sub> <sup>-</sup> eq.
	GWP	3,46E+03	0	-1,73E+03	kg CO <sub>2</sub> <sup>-</sup> eq.
	POCP	2,69	0	-1,35	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> <sup>-</sup> eq.
	MD	2,06E+03	0	-1,03E+03	kg Cu eq.
	PED	7,05E+04	0	-3,521E+04	MJ

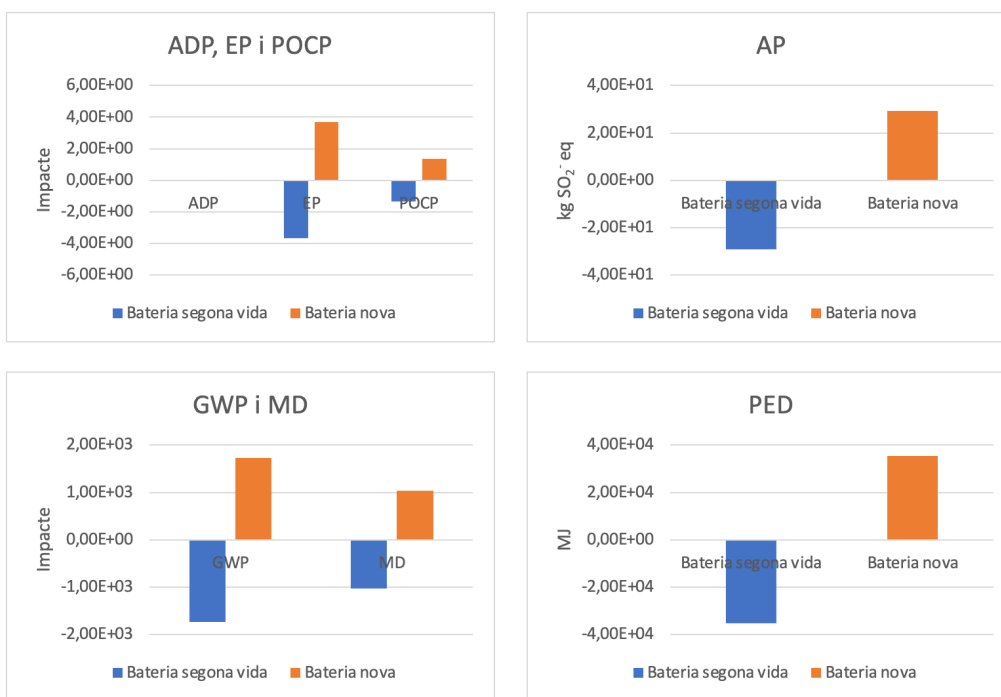


Figura 16: Impacte bateria segona vida vs bateria nova

Com era d'esperar, els resultats de la bateria de segona vida són molt més favorables que els de la bateria nova, ja que ens estalviem la fase de producció que és la que té un impacte més elevat en el cicle de vida de la bateria. A més, al tractar-se d'una aplicació on en la fase d'utilització l'energia prové de fonts renovables, l'únic impacte produït per la bateria de segona vida és la de la fase de reciclatge, la qual té un valor negatiu, ja que s'ha suposat, al igual que en la realització de l'ACV de l'apartat 3.1, que l'impacte que suposa és d'un menys 50% de l'impacte que té la producció de la bateria.

### 3.3.2.2. Sistema d'emmagatzematge en habitatges

L'ús d'una bateria per emmagatzemar energia en habitatges pot ajudar a que el diagrama de càrrega de la xarxa elèctrica sigui més constant i pot mitigar els impactes ambientals associats al consum d'energia emmagatzemant energia de períodes de generació amb impactes menors i utilitzant-la en períodes on la producció d'energia tindria un major impacte. Per exemple, carregar la bateria a la nit, quan l'aportació de fonts d'energia renovable sol ser més alta i subministrar-la durant el dia quan l'aportació de les centrals d'energia fòssil és més gran [36].

Per fer l'anàlisi d'aquesta aplicació, s'analitzaran dos escenaris d'ús de la bateria per a l'emmagatzematge d'energia en habitatges: l'afaitat de pic ("peak shaving") i el desplaçament de la càrrega. La fase de descàrrega de la bateria per a l'escenari d'afaitat de pic ("peak shaving") es produeix només durant els períodes de màxima demanda en els habitatges a diferència de l'escenari de desplaçament de la càrrega on la descàrrega es distribueix al llarg del dia.

Des del punt de vista ambiental, la incorporació de bateries en els dos escenaris contribueix en la regulació del diagrama de càrrega fent-lo més constant i previsible i a una reducció de la demanda d'energia en hores puntes. El fet de tenir un diagrama de càrrega més constant i previsible dóna la oportunitat de gestionar les centrals elèctriques perquè funcionin a prop de la seva capacitat nominal, reduint d'aquesta manera el seu impacte [36].

El consum d'energia en una llar varia significativament durant el dia i l'estació de l'any. Per tenir en compte aquestes variacions, s'utilitzen diagrames de càrrega mitjana durant un període de 24h durant les quatre estacions de l'any que es presenten en la figura 17. Els diagrames de càrrega s'han obtingut de [36] i caracteritzen el consum d'energia típic en una llar europea de 3 a 4 habitacions.

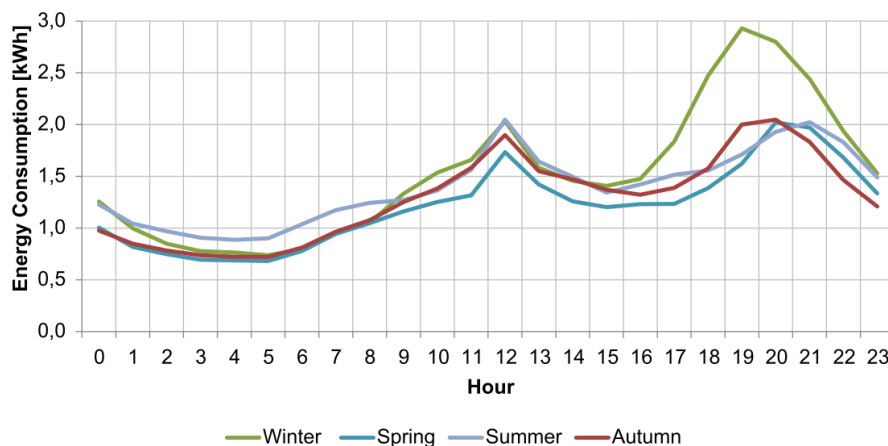


Figura 17: Variació estacional del diagrama de càrrega per a la llar [36]

Els requisits de capacitat d'emmagatzematge per l'aplicació d'afaitat de pic ("peak shaving") corresponen a l'energia superior al consum diari mitjà. Aquesta quantitat d'energia la subministra la bateria, que es carrega durant la nit quan el consum d'energia de la llar és inferior. Els requisits d'emmagatzematge d'energia de cada estació de l'any s'han obtingut a partir de la figura 17, que al mateix temps s'ha obtingut de [36], i es mostren en la taula 12.

Taula 12: Consum diari d'energia, potència màxima i requisit d'emmagatzematge d'energia per l'aplicació d'afaitat de pic per a la llar

	Consum diari (kWh)	Potència màxima (kW)	Requisit d'emmagatzematge (afaitat de pic) (kWh)
Hivern	36,58	5,98	5,98
Primavera	29,22	3,63	3,63
Estiu	33,57	3,43	3,43
Tardor	30,97	4,10	4,10

Si es considera que cada estació de l'any dura aproximadament uns 91 dies, a partir de les dades de la taula 12 es pot calcular l'energia d'emmagatzematge necessària per als dos escenaris durant 1 any.

Taula 13: Energia d'emmagatzematge necessària durant 1 any per l'afaitat de pic i el desplaçament de la càrrega

	Afaitat de pic	Desplaçament de la càrrega
Energia necessària (kWh)	1.560	11.861

Els impactes ambientals associats a la utilització de la bateria estan directament relacionats amb la generació d'electricitat. Els impactes associats a la generació d'electricitat s'han calculat tenint en compte les emissions de la taula 14, que representen els impactes de les diferents fonts d'energia d'un mix elèctric europeu.

Taula 14: Impactes fonts d'energia d'un mix elèctric europeu

Font d'energia	Esgotament abiòtic (ADP) (kg Sb eq kWh <sup>-1</sup> )	Acidificació (AP) (kg SO <sub>2</sub> eq kWh <sup>-1</sup> )	Eutrofització (EP) (kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq kWh <sup>-1</sup> )	Potencial d'escalfament global (GWP) (kg CO <sub>2</sub> eq kWh <sup>-1</sup> )
Carbó	7,8E-03	2,8E-03	2,3E-03	1,02
Eòlica	8E-05	5E-05	2,7E-05	1,13E-02
Hidroelèctrica	3E-05	1,6E-04	5E-05	6,5E-03
Solar	3,6E-04	2,46E-04	1,57E-04	5,09E-02
Nuclear	4E-05	4,7E-05	1,5E-05	6,05E-03
Gas natural	3,7E-03	4,13E-04	7E-05	0,434
Diesel	5,9E-03	1,9E-02	5,7E-04	0,911

Els resultats obtinguts per la bateria en segona vida en els escenari d'afaitat de pic ("peak shaving") i desplaçament de la càrrega són els següents:

Taula 15: Resultats cicle de vida d'una bateria en segona vida com a sistema d'emmagatzematge en habitatges

Escenari	Categoria d'impacte	Producció	Utilització	Reciclatge	Unitats
Afaitat de pic ("peak shaving")	ADP	-	27,9	-5,07E-02	kg Sb eq.
	AP	-	35,4	-29,23	kg SO <sub>2</sub> eq.
	EP	-	4,97	-3,67	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq.
	GWP	-	3,81E+03	-1,73E+03	kg CO <sub>2</sub> eq.
Desplaçament de la càrrega	ADP	-	212,43	-5,07E-02	kg Sb eq.
	AP	-	269,43	-29,23	kg SO <sub>2</sub> eq.
	EP	-	37,82	-3,67	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq.
	GWP	-	2,89E+04	-1,73E+03	kg CO <sub>2</sub> eq.

Al tractar-se de la segona vida de la bateria, l'impacte que té la fase de producció no es té en compte ja que aquesta forma part de la primera vida de la bateria. En la fase d'utilització de la bateria, hi ha una clara diferència entre els dos escenaris, això és degut a que l'energia d'emmagatzematge necessària per l'aplicació de desplaçament de la càrrega és molt més elevat que en l'afaitat de pic ("peak shaving") ja que el desplaçament de la càrrega es duu a terme durant tot el dia i l'afaitat de pic ("peak shaving") té lloc només en el moment de demanda més alta del dia.

Si ara analitzem l'impacte que tindria utilitzar una bateria nova en els dos escenaris, s'obtenen els següents resultats:

Taula 16: Resultats cicle de vida d'una bateria nova com a sistema d'emmagatzematge en habitatges

Escenari	Categoria d'impacte	Producció	Utilització	Reciclatge	Unitats
Afaitat de pic ("peak shaving")	ADP	0,10	27,9	-5,07E-02	kg Sb eq.
	AP	58,46	35,4	-29,23	kg SO <sub>2</sub> <sup>-</sup> eq.
	EP	7,34	4,97	-3,67	kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq.
	GWP	3,46E+03	3,81E+03	-1,73E+03	kg CO <sub>2</sub> <sup>-</sup> eq.
Desplaçament de la càrrega	ADP	0,10	212,43	-5,07E-02	kg Sb eq.
	AP	58,46	269,43	-29,23	kg SO <sub>2</sub> <sup>-</sup> eq.
	EP	7,34	37,82	-3,67	kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq.
	GWP	3,46E+03	2,89E+04	-1,73E+03	kg CO <sub>2</sub> <sup>-</sup> eq.

Per calcular els impactes de la fase de producció s'han utilitzat les dades i resultats de l'ACV de l'apartat 3.1, fent les modificacions pertinents, ja que per poder fer la comparació amb la bateria de segona vida s'ha de tenir en compte que aquesta té una capacitat de 25 kWh en comptes de 35,8 kWh ja que ha perdut capacitat d'emmagatzematge després de finalitzar la seva vida útil en el vehicle elèctric. Els impactes de la fase d'utilització i reciclatge s'han calculat utilitzat el mateix procediment que per la bateria en segona vida, en la fase d'utilització s'ha utilitzat els valors de les taules 13 i 14, i per la fase de reciclatge s'ha suposat, al igual que en la realització de l'ACV de l'apartat 3.1, que l'impacte que suposa és d'un menys 50% de l'impacte que té la producció de la bateria.

Si ara comparem el resultat d'una bateria en segona vida i d'una bateria nova en els dos escenaris, els impactes produïts per la bateria nova són superiors als de la bateria en segona vida com es pot observar en la figura 18.

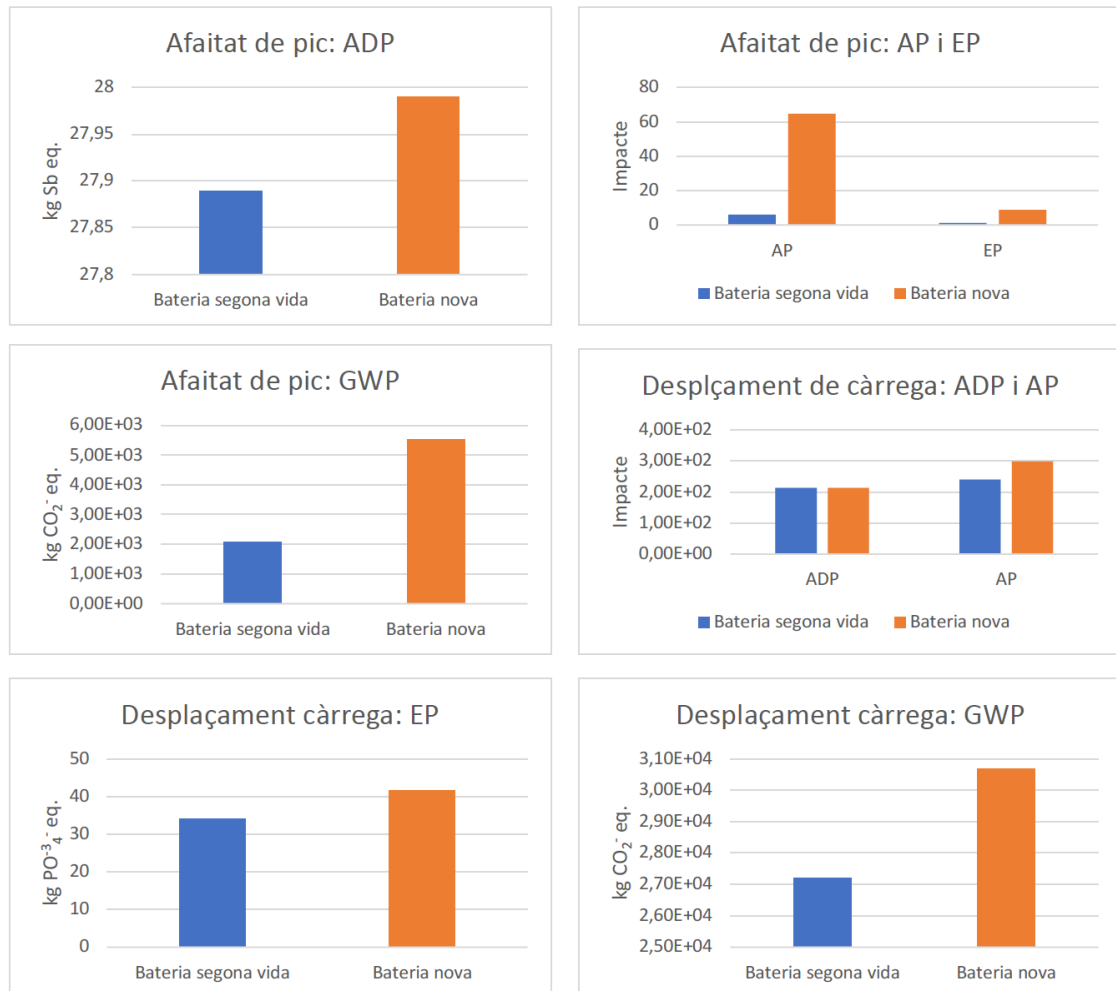


Figura 18: Comparativa bateria segona vida amb bateria nova com a sistema d'emmagatzematge en habitatges

Com era d'esperar, la utilització d'una bateria en segona vida en contraposició d'utilitzar una bateria nova en els dos escenaris implica una reducció d'impacte ambiental.

En l'escenari d'afaitat de pic és on s'observa una reducció d'impacte ambiental més elevat, això és degut a que la utilització de la bateria en aquesta aplicació és puntual en determinats moments del dia on la demanda d'electricitat en l'habitatge és més elevada. La utilització d'una bateria en segona vida suposa una reducció del 90% en la categoria d'impacte d'acidificació (AP), un 85% en la categoria d'impacte d'eutrofització (EP) i un

63% en la categoria d'impacte de potencial d'escalfament global (GWP), mentre que en la categoria d'esgotament abiòtic (ADP) l'impacte seria el mateix. En termes general, la opció de reutilitzar una bateria de vehicle elèctric per l'aplicació d'afaitat de pic en habitatges podria arribar suposar una reducció de fins el 60% dels impactes ambientals.

En l'escenari de desplaçament de la càrrega, la reducció d'impacte ambiental no és tant elevat ja que en aquest cas la bateria funciona durant tot el dia i per tant, l'energia d'emmagatzematge necessària és més elevada que en el cas d'afaitat de pic. La utilització d'una bateria en segona vida suposa una reducció del 20% en la categoria d'impacte d'acidificació (AP), un 18% en la categoria d'impacte d'eutrofització (EP) i un 11% en la categoria d'impacte de potencial d'escalfament global (GWP), mentre que en la categoria d'esgotament abiòtic (ADP) l'impacte seria el mateix. En termes general, la opció de reutilitzar una bateria de vehicle elèctric per l'aplicació d'afaitat de pic en habitatges podria arribar suposar una reducció de fins el 13% dels impactes ambiental.

## 5. Conclusions

El principal objectiu d'aquest treball de fi de grau és determinar i avaluar el comportament ambiental d'una bateria de Li-ion per VE, mitjançant la metodologia de l'Anàlisi del Cicle de Vida (ACV). A més, també s'ha fet una comparació amb una bateria de Li-S en desenvolupament per evidenciar si seria una bona alternativa a les bateries de Li-ion en termes de reducció d'impactes ambientals. I finalment, s'ha fet un anàlisi de la segona vida de bateries Li-ion en diverses aplicacions, per comprovar si la reutilització de bateries de VE suposaria una reducció d'impactes ambientals en contraposició d'utilitzar una bateria nova en aquestes aplicacions.

### 5.1. Conclusions en relació a l'anàlisi del cicle de vida d'una bateria de Li-ion

S'ha realitzat un ACV d'una bateria de Li-ion de 35,8 kWh des del bressol a la tomba, és a dir, des de la fase de producció de la bateria, passant per la utilització d'aquesta en el VE i fins el reciclatge d'aquesta al final de la seva vida útil, a partir de les dades proporcionades per una empresa del sector de l'automoció, com és SEA. S.A.



Els resultats d'aquest anàlisi, mostren que la fase de producció és la fase del cicle de vida de la bateria que té un major impacte ambiental, sobretot en les categories d'impacte relacionades amb l'esgotament de recursos naturals com és l'esgotament de recursos abiòtics (ADP) i l'escassetat de recursos naturals (MD). Al veure que la fase de producció tenia un impacte més elevat que les altres fases es va decidir fer un anàlisi addicional per veure quins eren els components de la bateria que contribuïen majoritàriament en l'impacte de la fabricació. Amb aquest anàlisi addicional, s'ha pogut observar que el càtode de la bateria és el component que influeix més amb un 51% de l'impacte ambiental total de la fabricació, ja que aquest està format per metalls com níquel, cobalt i manganés.

En la fase d'utilització de la bateria en el VE, el que genera l'impacte ambiental és l'energia que s'utilitza per carregar la bateria del VE, per tant, ens trobem que les categories relacionades amb l'emissió de contaminants a l'aire durant la generació d'electricitat com són el potencial d'escalfament global (GWP) i la demanda d'energia primària (PED), són els majors contribuents en la fase d'utilització ja que s'ha utilitzat un mix elèctric europeu que està format en gran part per combustibles fòssils.

En la fase de final de vida de la bateria, degut a que l'empresa d'automoció no ens ha pogut facilitar dades sobre aquesta fase, s'ha buscat informació sobre el reciclatge de les bateries de Li-ion en diferents articles científics i en la gran majoria s'arriba a la conclusió que el reciclatge de bateries pot comportar una reducció de fins a un 50% dels impactes en el procés de fabricació. Partint d'aquesta dada, s'ha considerat que l'impacte ambiental que genera el reciclatge de les bateries en aquest treball és d'un menys 50% de l'impacte que té la producció de la bateria.

Cal tenir en compte, que els resultats obtinguts podrien ser més precisos si s'hagués pogut obtenir més informació sobre els materials de tots els components que formen part de la bateria ja que només s'han tingut en compte l'ànode, el càtode i la carcassa del pack de la bateria. Per obtenir uns resultats més complets s'hauria d'analitzar també l'impacte que tenen l'electròlit, el separador, la carcassa del mòdul de cada cel·la i el sistema de refrigeració.

## 5.2. Conclusions en relació a la comparativa entre una bateria de Li-ion i una bateria de Li-S en desenvolupament

Per tal d'analitzar els resultats de l'ACV de la bateria de Li-ion de 35,8 kWh d'una forma qualitativa, s'ha realitzat una comparativa amb els resultats d'un ACV d'una bateria de Li-S de 50 kWh proporcionats per la universitat.

Perquè la comparativa entre els resultats de l'ACV de les dues bateries sigui vàlida, cal que les dues bateries tinguin les mateixes funcions, és a dir, que tinguin la mateixa capacitat d'emmagatzematge, que recorrin els mateixos km en el VE, que tinguin la mateixa quantitat de cicles, etc. Com que aquest no era el cas, era necessari realitzar un escalat d'una de les bateries per poder fer la comparativa. Degut a que no es tenien suficients dades com per fer l'escalat, es va optar per una opció no tant precisa des del punt de vista de l'ACV, que és donar els resultats per 1 kWh.

Els resultats obtinguts indiquen que les bateries de Li-S són més respectuoses amb el medi ambient que les tecnologies convencionals de les bateries de Li-ion. En termes generals, la utilització d'una bateria de Li-S en lloc d'una bateria de Li-ion pot suposar una reducció de fins el 31% en emissions de gasos d'efecte hivernacle (GEH).

Després de veure els resultats de l'ACV de la bateria de Li-ion, on s'indicava que el component amb major contribució en la fase de producció era el càtode, es va decidir fer un anàlisi addicional per aprofundir en l'impacte del càtode de les dues bateries. Els resultats mostren que en una bateria de Li-S els impactes de producció del càtode en les categories d'esgotament abiòtic (ADP), acidificació (AP), formació fotoquímica d'ozó (POCP) i escassetat de recursos naturals (MD) es poden arribar a reduir-se entre un 80 i un 99% en comparació amb la bateria de Li-ion.

Es pot afirmar que les bateries de Li-S són una bona alternativa d'emmagatzematge d'energia per a VE en termes de sostenibilitat en comparació amb les bateries actuals de Li-ion, gràcies en gran part a l'absència de metalls tòxics com el níquel, cobalt i manganés. Tot i així, és important destacar que les bateries de Li-S encara estan en fase de desenvolupament, i que els resultats de l'ACV s'han obtingut d'avaluar un escalat de

cel·les botó, mentre que la bateria de Li-ion s'ha avaluat amb una capacitat de producció completa a escala indústria.

### 5.3. Conclusions en relació a l'anàlisi de la segona vida d'una bateria de Li-ion

Per tal d'utilitzar la bateria en una aplicació de segona vida, ha de passar per una sèrie de processos comentats en l'apartat 3.3. Un cop està preparada per ser reutilitzada, s'ha d'avaluar quin és la millor utilitat que se li pot donar en funció de les seves capacitats restants després del final de la seva vida útil en el VE. En aquest treball, es va decidir estudiar dues aplicacions estacionaries com són la integració d'energies renovables a la xarxa i l'abastiment d'energia en habitatges, per determinar si la utilització de bateries de Li-ion retirades de VE en lloc d'utilitzar bateries noves en aquestes aplicacions suposaria una reducció d'impacte ambiental.

Els resultats de l'anàlisi de les dos aplicacions confirmen que, efectivament, hi hauria una reducció d'impactes utilitzant una bateria en segona vida. En l'aplicació d'integració d'energies renovables a la xarxa, la reducció d'impactes és més notable ja que a part d'eliminar els impactes de la fase de producció de la bateria, l'impacte de la fase d'utilització és zero perquè la bateria es carrega a partir de fonts d'energia renovables i per tant, no suposa cap impacte ambiental.

En l'aplicació d'abastiment d'energia en habitatges es van analitzar dos escenaris: l'afaitat de pic ("peak shaving") i el desplaçament de carregar. En ambdós escenaris també s'obté una reducció d'impacte quan s'utilitza una bateria en segona vida. En l'escenari d'afaitat de pic ("peak shaving") és on s'observa una reducció d'impacte més elevat ja que la bateria només funciona en determinats moments del dia quan la demanda d'electricitat és més elevada en l'habitatge. Segons els resultats, utilitzant una bateria en segona vida en aquest escenari es pot arribar a reduir entre un 63% i un 90% els impactes de les categories d'acidificació (AP), d'eutrofització (EP) i de potencial d'escalfament global (GWP). En canvi, en l'escenari de desplaçament de la càrrega, la bateria està en constant funcionament durant tot el dia, i la reducció que s'observa és menor. En aquest escenari, la utilització d'una bateria en segona vida pot arribar a reduir entre un 11% i un

20% els impactes de les categories d'acidificació (AP), d'eutrofització (EP) i de potencial d'escalfament global (GWP).

Es pot concloure que la reutilització de bateries en aplicacions estacionaries de segona vida és una opció més respectable amb el medi ambient ja que s'eviten els impactes ambientals produïts per la fabricació de la bateria, i a més, si en la aplicació de segona vida la bateria està alimentada per fonts d'energia renovables, l'impacte ambiental que té aquesta bateria és pràcticament zero.

#### 5.4. Treball futur

Un cop obtinguts i analitzats els resultats de l'ACV de la bateria de Li-ion de 35,8 kWh, la comparativa amb la bateria de Li-S en desenvolupament i l'anàlisi d'aplicacions de segona vida, encara hi ha molt de marge per estudiar i investigar en profunditat els impactes de les tecnologies d'aquestes dues bateries i obtenir resultats més precisos. Per tant, es proposen els següents estudis futurs:

- Realització d'un ACV amb informació més detallada de la bateria de Li-ion
- Realització d'un ACV d'una bateria de Li-S real
- Estudi de viabilitat, ambiental i econòmic de la segona vida de les bateries

##### 5.4.1. Realització d'un ACV amb informació més detallada de la bateria de Li-ion

Seria convenient realitzar un altre ACV d'una bateria de Li-ion, però aquesta vegada recopilant informació més detallada de la bateria per poder analitzar tots els components que formen part de la bateria i no només l'ànode, el càtode i la carcassa del pack de la bateria. D'aquesta manera, s'obtindrien uns resultats més precisos sobre el perfil ambiental en general de la bateria i en detall de cada component.

A més, al tenir accés a informació més detallada sobre els materials que s'utilitzen en la fabricació de la bateria, com per exemple el material actiu del càtode, l'ànode i l'electròlit, serviria per poder escalar la bateria i posteriorment fer la comparativa amb la bateria de

Li-S. D'aquesta manera els resultats de la comparativa entre les dues bateries també serien més precisos.

#### 5.4.2. Realització d'un ACV d'una bateria de Li-S real

Com ja s'ha comentat amb anterioritat, els resultats de l'ACV de la bateria de Li-S proporcionats per la universitat i utilitzats en el treball, s'han obtingut d'analitzar una bateria virtual a partir de l'escalat d'unes cel·les botó realitzades en un laboratori. Seria interessant poder realitzar un ACV a partir de dades reals d'una bateria de Li-S ja existent. Amb aquests resultats i juntament amb els resultats de la realització d'un ACV amb informació més detallada de la bateria de Li-ion, a l'hora de fer la comparativa entre les dues bateries s'obtindrien uns dades més reals.

#### 5.4.3. Estudi econòmic i viabilitat de la segona vida de les bateries

En aquest treball només s'ha estudiat el caràcter ambiental d'utilitzar bateries en segona vida en lloc de bateries noves en certes aplicacions, i seria convenient analitzar també la viabilitat i el caràcter econòmic.

Per tal de garantir la rendibilitat econòmica i mediambiental de les bateries de segona vida, és fonamental garantir un rendiment adequat i de llarga durada de les bateries després de retirar-les dels VE. Amb la realització d'un estudi de viabilitat s'obtindria informació detallada sobre les característiques i els requisits que han de complir les bateries per poder ser utilitzades en segona vida amb un rendiment elevat. A més, també seria convenient fer un estudi econòmic per valorar si la solució de donar una segona vida a les bateries és més rentable que la fabricació de bateries noves.

## 6. Referència bibliogràfica

[1] Pierre Dornier (2020). How clean are electric cars? | Transport & Environment. Accés online: <https://www.transportenvironment.org/what-we-do/electric-cars/how-clean-are-electric-cars> (visitat 19/2/2021)

[2] Intertek (2019). The Future of Battery Technologies-Part V Environmental Considerations for Lithium Batteries. Accés online: [https://www.intertek.com/uploadedFiles/Intertek/Divisions/Commercial\\_and\\_Electrical/Media/PDF/Battery/Environmental-Considerations-for-Lithium-Batteries.pdf](https://www.intertek.com/uploadedFiles/Intertek/Divisions/Commercial_and_Electrical/Media/PDF/Battery/Environmental-Considerations-for-Lithium-Batteries.pdf) (visitat 20/2/2021)

[3] Murray, J. (2019). Is the lithium-ion battery having a positive impact on the environment? NS Energy. Accés online: <https://www.nsenergybusiness.com/features/lithium-ion-battery-environmental-impact/#> (visitat 21/2/2021)

[4] Viñuela, S. (2019). Qué pasa con las baterías de los coches eléctricos cuando se agotan. Accés online: <https://www.autobild.es/reportajes/pasa-baterias-coches-electricos-cuando-agotan-527121#:~:text=Un%20dato%3A%20seg%C3%BAn%20informan%20desde,dos%2C%20genera%20dependencia%20del%20abastecimiento.> (visitat 22/2/2021)

[5] Manthiram, A., Chung, S. H., & Chang, C. H. (2015). Strategies for the viability of rechargeable lithium-sulfur batteries. Archives of Materials Science and Engineering, 75(2), 70-81

[6] Deng, Y., Li, J., Li, T., Gao, X., Yuan, C., 2017. Life cycle assessment of lithium sulfur battery for electric vehicles. J. Power Sources 343, 284–295. doi:10.1016/j.jpowsour.2017.01.036

[7] Hagen, M., Hanselmann, D., Ahlbrecht, K., Maça, R., Gerber, D., & Tübke, J. (2015). Lithium-Sulfur Cells: The Gap between the State-of-the-Art and the Requirements for

High Energy Battery Cells. *Advanced Energy Materials*, 5(16).  
<https://doi.org/10.1002/aenm.201401986>

[8] ProSim SA. (2015). Claus Process. Accés online: [https://www.prosim.net/wp-content/uploads/2019/12/PSPS\\_EX\\_EN-Claus-Process.pdf](https://www.prosim.net/wp-content/uploads/2019/12/PSPS_EX_EN-Claus-Process.pdf) (visitat 7/2/2021)

[9] EEA. (2012). Monitoring CO<sub>2</sub> emissions from new passenger cars in the EU: April. Accés online: <https://www.eea.europa.eu/publications/monitoring-co2-emissions-from-new-1> (visitat 18/3/2021)

[10] Doucette, R. T., & McCulloch, M. D. (2011). Modeling the CO<sub>2</sub> emissions from battery electric vehicles given the power generation mixes of different countries. *Energy Policy*, 39(2), 803-811. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.10.054>

[11] Hannan, M. A., Hoque, M. M., Hussain, A., Yusof, Y., & Ker, P. J. (2018). State-of-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations. In *IEEE Access* (Vol. 6, pp. 19362-19378). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2817655>

[12] Stampatori, D., Raimondi, P. P., & Noussan, M. (n.d.). Li-Ion Batteries: A Review of a Key Technology for Transport Decarbonization. <http://doi.org/10.3390/en13102638>

[13] Costa, C. M., Barbosa, J. C., Gonçalves, R., Castro, H., Campo, F. J. Del, & Lanceros-méndes, S. (2021). Recycling and environmental issues of lithium-ion batteries: Advances, challenges and opportunities. *Energy Storage Materials*, 37(January), 433-465. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2021.02.032>

[14] Korthauer, R. (2018). Lithium-ion batteries: Basics and applications. In *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53071-9>

[15] Hall, D., & Lutsey, N. (2018). Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions. ICCT Briefing, February, 12. Accés online: [https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/EV-life-cycle-GHG\\_ICCT-](https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/EV-life-cycle-GHG_ICCT-)

[Briefing\\_09022018\\_vF.pdf](#) (visitat 22/3/2021)

[16] Zakeri, B., & Syri, S. (2015). Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 42, pp. 569–596). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.011>

[17] Fotouhi, A., Auger, D. J., Propp, K., Longo, S., Purkayastha, R., O'Neill, L., & Walus, S. (2017). Lithium-Sulfur Cell Equivalent Circuit Network Model Parameterization and Sensitivity Analysis. *IEE transactions on Vehicular Technology*, 66(9), 7711-7721. <https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2678278>

[18] Fotouhi, A., Auger, D. J., O'Neill, L., Cleaver, T., & Walus, S. (2017). Lithium-sulfur battery technology readiness and applications – A review. *Energies*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/en10121937>

[19] Benveniste, G., Rallo, H., Canals Casals, L., Merino, A., & Amante, B. (2018). Comparison of the state of Lithium-Sulphur and lithium-ion batteries applied to electromobility. *Journal of Environmental Management*, 226, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.008>

[20] Flewitt, P. (1985). What does it do? In *Word Processing* (pp. 37-54). Accés online: <http://www.gabi-software.com/spain/overview/what-does-it-do/> (visitat 31/3/2021)

[21] ecoRaee. (2013). Informe de Resultados del ACV del proceso. Accés online: <http://www.life-ecoraee.eu/es/files/B1InformeResultadosACVProcesoCompleto.pdf> (visitat 4/4/2021)

[22] Dewulf, J., Van der Vorst, G., Dentruck, K., Van Langenhove, H., Ghyoot, W., Tytgat, J., & Vandeputte, K. (2010). Recycling rechargeable lithium ion batteries: Critical analysis of natural resources savings. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(4), 229-234. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.08.004>

[23] Van Oers, L., & Guinée, J. (2016). The abiotic depletion potential: Background, updates and future. In *Resources* (Vol. 5, Issue 1).



<https://doi.org/10.3390/resources5010016>

[24] Acidification. (n.d.). Accés online: [http://qpc.adm.slu.se/7\\_LCA/page\\_10.htm](http://qpc.adm.slu.se/7_LCA/page_10.htm)  
(*visitat 26/4/2021*)

[25] Editors of Encyclopedia Britannica. (2019). Eutrophication | Definition, Types, Causes & Effects | Britannica. Encyclopedia Britannica. Accés online: <https://www.britannica.com/science/eutrophication> (*visitat 26/4/2021*)

[26] US EPA. (2020). Understanding Global Warming Potentials | Greenhouse Gas (GHG) Emissions | US EPA. Accés online: <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials> (*visitat 26/4/2021*)

[27] European Commission. (n.d.). Photochemical ozone formation | Knowledge for policy. Accés online: [https://knowledge4policy.ec.europa.eu/glossary-item/photochemical-ozone-formation\\_en](https://knowledge4policy.ec.europa.eu/glossary-item/photochemical-ozone-formation_en) (*visitat 26/4/2021*)

[28] Martinez-Laserna, E., Gandiaga, I., Sarasketa-Zabala, E., Badeda, J., Stroe, D. I., Swierczynski, M., & Goikoetxea, A. (2018). Battery second life: Hype, hope or reality? A critical review of the state of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93(April), 701-718. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.035>

[29] Haram, M. H. S. M., Lee, J. W., Ramasamy, G., Ngu, E. E., Thiagarajah, S. P., & Lee, Y. H. (2021). Feasibility of utilising second life EV batteries: Applications, lifespan, economics, environmental impact, assessment, and challenges. *Alexandria Engineering Journal*, 60(5), 4517-4536. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.03.021>

[30] Richter, S., Rehme, M., & Temmler, A. (2016). Second-Life Battery Applications- Market potentials and contribution on the cost effectiveness of electric vehicles. May, 2017-2018. <https://www.researchgate.net/publication/314369040>

[31] Canals Casals, L., Amante García, B. & Cremades, L. V. (2017). Electric vehicle battery reuse: Preparing for a second life. *Jornal of Industrial Engineering and*

*Management*, 10 (2Special Issue), 266-285. <https://doi.org/10.3926/jiem.2009>

[32] Yang, J., Gu, F., & Guo, J. (2020). Environmental feasibility of secondary use of electric vehicle lithium-ion batteries in communication base stations. *Resources, Conservation and Recycling*, 156. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104713>

[33] Ahmadi, L., Young, S. B., Fowler, M., Fraser, R. A., & Achachlouei, M. A. (2017). A cascaded life cycle: reuse of electric vehicle lithium-ion battery packs in energy storage systems. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(1), 111-124. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0959-7>

[34] Berzi, L., Cultrera, V., Delogu, M., Dolfi, M., Locorotondo, E., Del Pero, F., Morosi, S., Pugi, L., & Tanturli, A. (2020). A model for system integration of second life battery, renewable energy generation and mobile network station. *Proceedings - 2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC / I and CPS Europe 2020*, 769506, 6–11. <https://doi.org/10.1109/IEEEIC/ICPSEurope49358.2020.9160747>

[35] Saez-De-Ibarra, A., Martinez-Laserna, E., Stroe, D. I., Swierczynski, M., & Rodriguez, P. (2016). Sizing Study of Second Life Li-ion Batteries for Enhancing Renewable Energy Grid Integration. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(6), 4999–5007. <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2593425>

[36] de Simone, D., & Piegari, L. (2019). Integration of stationary batteries for fast charge EV charging stations. *Energies*, 12(24). <https://doi.org/10.3390/en12244638>

## 6.1. Normativa utilitzada

UNE-EN ISO 14040:2006 – Gestión Ambiental, Análisis del Ciclo de Vida, Principios y Marco de referencia.

UNE-EN ISO 14044:2006 – Gestión Ambiental, Análisis del Ciclo de Vida, Requisitos y Directrices.