

Estudi dels models d'integració de bateries amb instal·lacions fotovoltaïques d'autoconsum individual o col·lectiu

Data de lliurament abril 2025



**Diputació
Barcelona**

**Àrea d'Acció Climàtica
i Transició Energètica**



**Oficina d'Impuls
a les Comunitats
Energètiques**

En el marc d'un Subprojecte finançat amb fons NextGenerationEU:





Empresa o equip redactor

Noms i cognoms

Rafel Orestes Pérez Barceló

Gabriela Benveniste Pérez et al (Energy Systems Analytics-IREC)

Mattia Barbero

Cristina Corchero García

Coordinació per part de la Diputació de Barcelona

Carme Melcion Fontbernat

Josep Verdaguer Espauella

I la col·laboració: Anna Bayona Corbalan

ÍNDEX

LLISTAT D'ACRÒNIMS.....	6
INTRODUCCIÓ.....	8
OBJECTIU.....	11
1. <u>NORMATIVA ACTUAL I PERSPECTIVES.....</u>	13
1.1 REVISIÓ DE LA NORMATIVA GENERAL.....	13
1.1.1 NORMATIVES QUE INFLUEIXEN I AFECTEN ELS SISTEMES D'EMMAGATZEMATGE PERÒ NO SÓN ESPECÍFIQUES.....	12
1.1.2 NORMATIVA ESPECÍFICA SOBRE ELS SISTEMES D'EMMAGATZEMATGE	13
1.2 REVISIÓ NORMATIVA ELÈCTRICA D'INTEGRACIÓ DE BATERIES	15
1.3 REVISIÓ DE NORMATIVA DE SEGURETAT PER A LA INTEGRACIÓ DE BATERIES	16
1.3.1 PROBLEMÀTIQUES MÉS FREQUENTS EN LES BATERIES	16
1.3.2 NORMATIVA DE REFERÈNCIA.....	17
1.4 REVISIÓ DE LA IMPLICACIÓ DE CASOS D'ÚS PARTICULARS: ESCOLES, CASALS, ETC.....	17
2. <u>CARACTERÍSTIQUES TÈCNIQUES</u>	20
2.1 TECNOLOGIES PRESENTS EN EL MERCAT	23
2.2 GARANTIES DE LES TECNOLOGIES PRESENTS EN EL MERCAT	26
2.3 ANÀLISI DE COSTOS, PARÀMETRES DE FUNCIONAMENT I ESPERANÇA DE VIDA DE LES TECNOLOGIES PRESENTS EN EL MERCAT	28
2.4 PARÀMETRES DE FUNCIONAMENT DE LES TECNOLOGIES DE BATERIES	30
2.5 ESPERANÇA DE VIDA DE LES TECNOLOGIES DE BATERIES	31
2.6 COMPARATIVA DE TECNOLOGIES DE BATERIES PER A APLICACIONS D'EMMAGATZEMATGE ESTACIONARI: COSTOS, RENDIMENT I VIDA ÚTIL	32
2.7 TECNOLOGIES FUTURES	32
3. <u>INTEGRACIÓ DE LES BATERIES EN INSTAL·LACIONS EXISTENTS.....</u>	34
3.1 ANÀLISI DE LA INTEGRACIÓ TÈCNICA DE BATERIES EN INSTAL·LACIONS D'AUTOCONSUM.....	34
3.2 OPCIONS DE CONFIGURACIÓ DEL SISTEMA.....	37
3.2.1 INTEGRACIÓ SISTEMA FOTOVOLTAIC AMB BATERIES.....	35
3.3 CONFIGURACIÓ DE CONNEXIÓ DE BATERIES A XARXA CONTEMPLADES PER LA LEGISLACIÓ	37
4. <u>DIMENSIONAT DE LA BATERIA.....</u>	40

4.1	ESTABLIMENT DELS CRITERIS NECESSARIS PER DIMENSIONAR UNA BATERIA.....	40
5.	<u>GESTIÓ DE LA INSTAL·LACIÓ AMB BATERIES.....</u>	42
5.1	CASOS D'ÚS EXISTENTS PER LA GESTIÓ DE LA DEMANDA EN ESCENARIS AMB AUTOCONSUM I SISTEMES D'EMMAGATZEMATGE	42
5.2	CASOS D'ÚS PREVISTOS EN EL FULL DE RUTA DE LA REGULACIÓ ESPANYOLA.....	43
5.3	ANÀLISI DE LES IMPLICACIONS DELS DIVERSOS CASOS D'ÚS EN LA GESTIÓ ÒPTIMA I ELS POTENCIALS BENEFICIS	44
5.4	ROL DE LES BATERIES A LES COMUNITATS ENERGÈTIQUES LOCALS	45
5.5	ROL DE LES BATERIES DINS DELS SISTEMES D'AGREGACIÓ DE DEMANDA	46
5.6	HARDWARE I SOFTWARE NECESSARI PER A LA GESTIÓ EN TEMPS REAL DELS SISTEMES D'AUTOCONSUM AMB BATERIES: INCORPORACIÓ DE LA GESTIÓ DE LA DEMANDA	46
6.	<u>CASOS D'ESTUDI</u>	47
6.1	SUNBATT.....	47
6.2	REFER	49
6.3	GROWSMATER	52
6.4	MESURA 4.2.....	53
6.5	MESURA 11.2	54
6.6	RESCHOOL - COMUNITAT ENERGÈTICA LOCAL CORNELLÀ DEL TERRI	54
7.	<u>CICLE DE VIDA DE LES BATERIES</u>	56
8.	<u>INFOGRAFIA.....</u>	59
9.	<u>ANNEX CAPÍTOL 1</u>	65
10.	<u>ANNEX CAPÍTOL 3</u>	65
11.	<u>ANNEX CAPÍTOL 4</u>	71
12.	<u>ANNEX CAPÍTOL 5</u>	71
13.	<u>ANNEX CAPÍTOL 7</u>	73

ÍNDEX DE TAULES

Taula 1 Referències comercials i característiques	26
Taula 2 Comparativa de Paràmetres de Rendiment	32
Taula 3 Dades i paràmetres per escollir una bateria	41
Taula 4 Configuracions i casos d'ús.....	42
Taula 5 Casos d'ús i sectors.....	44
Taula 6 Bateries i comunitats energètiques	45

ÍNDEX DE FIGURES

Fig. 1 Comparativa de la generació d'electricitat amb fonts renovables (imatge superior) i fonts convencionals (imatge inferior) en el sistema peninsular el dia 05/01/2025	10
Fig. 2 Esquema on es resumeix la normativa vigent per als sistemes fotovoltaics (elaboració pròpia a partir de Censolar [15]	15
Fig 3. Esquema del funcionament d'una bateria	21
Fig. 4 Esquema d'una bateria de flux	25
Fig. 5 Garanties SoH al final de la vida útil.....	27
Fig. 6 Garanties d'SoH amb punts intermedis.....	28
Fig. 7. Evolució dels preus de les bateries.....	30
Fig. 8 tecnologia i densitat d'energia	34
Fig. 9 esquema d'instal·lació de bateries [27].....	35
Fig. 10 esquema control BMS [28]	35
Fig. 11: Arquitectura EMS.....	36
Fig. 15 Sistemes de software / hardware per gestió de la demanda	47
Fig. 15 Imatge de la instal·lació.....	51
Fig. 16 Balanç energètic indicant generació, demanda i emmagatzematge amb preus horaris	51
Fig. 12 arquitectures BMS.....	66
Fig. 17 Reciclatge vs Segona vida de las bateries (Font: ESA- Energy Technology ACV and Sustainability).....	81

DOCUMENT 1: MEMÒRIA DESCRIPTIVA

Llistat d'acrònims

BMS	Sistema de gestió de bateries (Battery Management System)
CFV	Centrals fotovoltaïques
DoD	Profunditat de descàrrega (Depth of Discharge)
SFA	Sistemes fotovoltaïcs autònoms
SFCA	Sistemes fotovoltaïcs d'autoconsum
SoC	Estat de càrrega (State of Charge)
SoH	Estat de salut (State of Health)
FEC	Cicles equivalents complets (Full Equivalent Cycles)

Resum executiu

Al llarg d'aquest document sobre la viabilitat tècnica i econòmica de la instal·lació de bateries per autoconsum fotovoltaic s'exposen els diferents factors, des de legals fins a gestió de les bateries, necessaris alhora de plantejar-se una instal·lació d'aquests sistemes.

En primer lloc, cal revisar la normativa vigent presentada al primer capítol i les actualitzacions d'aquestes en cada moment. Així, els sistemes d'emmagatzematge elèctric i en concret les bateries de ió de liti que s'utilitzen com emmagatzematge d'instal·lacions fotovoltaïques estan regulades per les següents normatives de instal·lació, seguretat i marcatge:

- Normatives vigent: D 986/2024: Actualització del PNIEC
- Reial Decret 244/2019
- Reial Decret 1699/2011,
- Directiva 2019/944 (EU)
- Reglament (UE) 2023/1542.
- ITC-BT-28
- ITC-BT-30
- A més a més, cal remarcar que les normatives municipals també poden acabar condicionant la forma de fer la instal·lació.

Un cop es té clara quina és la legislació que afecta a la instal·lació i com afecta a cada cas d'estudi en concret, es pot fer una valoració del tipus de bateria que escau millor al projecte. En aquest sentit, és remarcable que la majoria de bateries per a instal·lació d'autoconsum FV que es troben en el mercat són de ió de liti. Tot i això, no vol dir que per alguns casos no es pugui trobar una altra tecnologia que hi escaigui millor.

Aquesta decisió definirà tant quines són les possibles característiques tècniques (cicles de vida, profunditat de descàrrega permesa, eficiència de la bateria...) que disposarem de la bateria com el seu cost d'instal·lació (CAPEX), cost operacional (OPEX) i cost de fi de vida.

Amb això, s'ha d'avaluar quines són les **opcions de configuració** del sistema d'emmagatzematge. En aquest sentit, s'ha de diferenciar:

- Connexió de les bateries:
 - **Si ja existeix una instal·lació solar fotovoltaica amb inversor DC-AC (grid-tie)**
: Si l'inversor de la fotovoltaica ja no és híbrid d'entrada caldrà afegir un

- inversor-carregador híbrid per gestionar l'emmagatzematge i la conversió d'energia de la nova bateria. Una possible solució es substituir l'existent DC-AC per un inversor carregador híbrid.
- **Si instal·lem fotovoltaica i bateries de nou** : El més eficient és optar per un sol inversor carregador híbrid, que permeti connexions tant en DC com en AC (gestionarà les bateries i la fotovoltaica).
 - Si **l'objectiu és la màxima eficiència** és ideal connectar els panells solars a un controlador MPPT i després a les bateries en DC , seguit d'un inversor DC-AC per alimentar les càrregues elèctriques. Val a dir que molts inversors híbrids actualment ja incorporen el controlador MPPT.
- Connexió del sistema de bateries a la xarxa elèctrica: quan es tracta de bateries per autoconsum fotovoltaic, ara mateix la normativa només contempla les següents opcions:
 - **Sistemes d'emmagatzematge connectats rere del comptador del consumidor**: Aquest model d'emmagatzematge consisteix en el fet que el consumidor amb autoconsum individual o, cada consumidor dins d'un autoconsum col·lectiu, instal·li la seva pròpia bateria rere del comptador de consum juntament amb un inversor híbrid.
 - **Hibridació fotovoltaica + emmagatzematge amb mateix equip de mesura (rere del comptador)**: A causa de la normativa vigent (DT 5a RD 244/2019), en instal·lacions on no aplica la ITC-BT-52 o ITC-BT-40, les bateries poden vincular-se directament a la instal·lació de generació en un autoconsum a través de la xarxa de distribució. Això implica que la bateria i la fotovoltaica comparteixen equip de mesura y proteccions. Aquí també caldrà afegir-hi un inversor carregador híbrid i opcionalment un MPPT (DC-DC)

Les bateries instal·lades davant del comptador s'utilitzen com a Serveis de regulació de la xarxa i no han d'anar lligades a instal·lacions renovables . Aquest serveis de regulació de la xarxa consisteixen en aprofitar la flexibilitat de la bateria per evitar problemes relacionats en congestions, voltatge, freqüència o desviaments. Aquestes bateries la legislació encara no els permet la seva compartició a un col·lectiu / comunitat.

Una vegada decidit quin és el tipus de bateria i com s'integrarà al sistema de generació fotovoltaica, és necessari fer un dimensionament òptim de la bateria que millor escaigui al cas segons quin sigui l'objectiu de la instal·lació. Així, sempre serà necessari tenir en compte la corba de consum i generació (existent o prevista) amb els seus respectius preus. Amb això es pot fer un procés iteratiu on s'extreguin els indicadors operacionals que ens permetran determinar quines característiques ha de tenir la bateria òptima pel cas estudiat.

Per altra banda, cal tenir en compte que cada bateria sol disposar d'un **BMS** per tal de portar a terme la gestió interna de la conversió energètica, en canvi, la majoria de bateries no disposen de sistema de gestió d'energia (**EMS**) capaç de treure el potencial de la bateria. Així, per poder aprofitar la bateria més enllà de la maximització d'autoconsum serà necessària la figura de l'EMS. A més a més, amb els nous canvis legislatius a nivell de mercats energètics s'obrirà la porta a que l'agregació de la demanda pugui participar de forma massiva en els

serveis de balanceig de la xarxa ajudant al bon funcionament d'aquesta a canvi d'una compensació econòmica.

També és important tenir en compte el cost ecològic que té el cicle de vida de la bateria (des del bressol a la tomba). Sobretot si es té en compte la nova normativa europea que inclourà el passaport digital de la bateria. En aquest sentit, no només es tracta de l'elevat cost ecològic que té la fabricació de bateries, si no que també s'ha de tenir en compte el cost operatiu de l'ús d'aquesta (molt lligat mix energètic i a l'energia primària que s'usa per carregar la bateria) o el cost del reciclatge dels materials que la componen. Pel que fa a aquest últim punt, cada vegada agafa més força la reutilització de la bateria abans d'acabar la seva vida útil.

Finalment, cal destacar que les bateries poden aportar diferents beneficis o usos en funció de la seva arquitectura:

Autoconsum	Arbitratge de preus	Reducció pics de consum	Serveis de regulació de la xarxa
<ul style="list-style-type: none"> ● Permet aprofitar l'energia excedentària de la instal·lació FV. ● S'obtenen estalvis gràcies a tenir un menor consum de xarxa. ● Millora el rati d'autoconsum i d'autosuficiència. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Permet evitar consumir en moments que el preu és elevat. ● Pot existir tant si la bateria consumeix de xarxa o com si només ho fa d'excedents. ● Permet fer un ús més intel·ligent de l'energia emmagatzemada a la bateria. ● Va molt vinculat al tipus de contracte de consum elèctric. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Permet reduir pics de consum i els seus costos associats (excessos de potència). ● Pot evitar obres de millora i ampliació del punt de connexió a xarxa. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Permet donar serveis a la xarxa elèctrica a canvi d'una remuneració econòmica. ● Es requereix complir les condicions i tenir els permisos adients de l'operador del sistema elèctric (<i>Red Eléctrica Española</i>)

Introducció

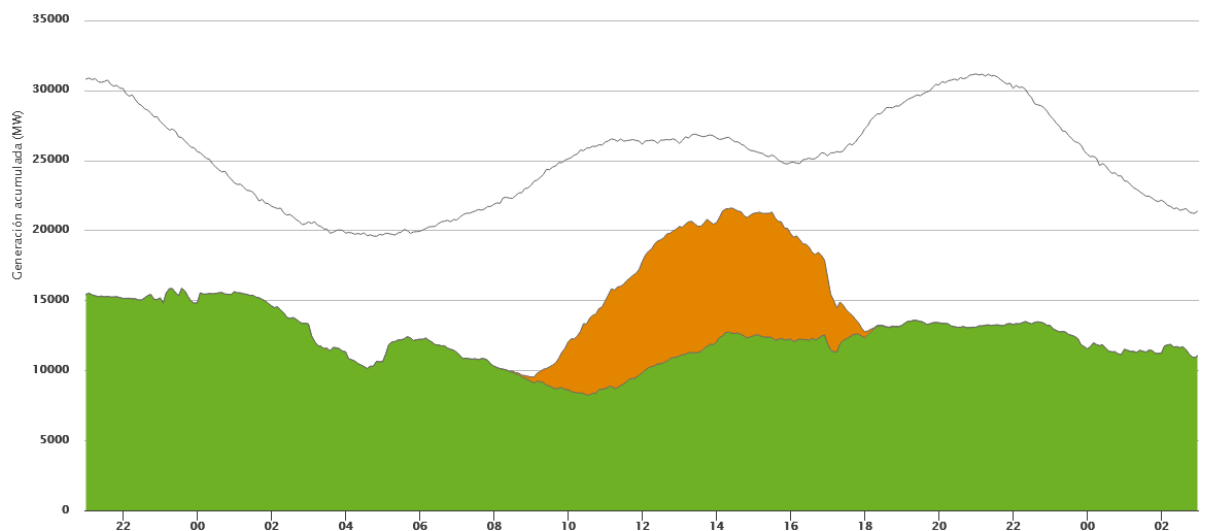
Des de fa dècades els organismes governamentals han pres diverses estratègies i acords per minimitzar la petjada ecològica i el canvi climàtic com a conseqüència de l'activitat humana. En aquest sentit, el 2024 a la COP 29 de Bakú es va ratificar l'objectiu de limitar l'escalfament global a menys de 1,5 °C en comparació amb els nivells preindustrials. Per aconseguir aquest objectiu, els països han de reduir les seves emissions de gasos d'efecte hivernacle per assolir una neutralitat climàtica [1].

L'any 2021 la Comissió Europea va aprovar diverses lleis i directrius conegudes com a *Green Deal* [2] per reduir les emissions de gasos d'efecte hivernacle que es varen concretar en l'Objectiu 55 [3]. Per tant, la legislació europea defineix una reducció de les emissions de gasos d'efecte hivernacle d'almenys un 55% per sota dels nivells de 1990 per al 2030. A més, seguint l'Acord de París sobre el clima, l'objectiu de la UE per al 2050 és aconseguir la neutralitat climàtica [4].

A més, si tenim en compte que a Europa les emissions de CO₂ procedents de l'ús d'energia són una de les principals causes de l'escalfament global [3] i que el consum energètic europeu està canviant cap a l'electrificació de tots els consums [5], és evident que la creixent participació i aprofitament de les energies renovables en els mercats elèctrics és fonamental.

Tanmateix, un dels principals inconvenients de les energies renovables és la condició estocàstica. Així doncs, **les energies renovables no produeixen quan és necessari, sinó que generen en cada moment el que la seva font d'energia primària els permet.**

A la imatge de sota es compara la generació de les energies renovables i la generació de les fonts convencionals d'energia en el sistema de la Península Ibèrica, i s'observa la major constància de les fonts convencionals. Els màxims exponents d'aquesta generació controlada són l'energia nuclear (en lila) que pràcticament genera sempre la mateixa energia en totes les hores del dia i el cicle combinat de gas (en groc) que adapta la seva generació a la renovable i a la demanda de cada instant. En Taronja la generació fotovoltaica i en verda l'eòlica.



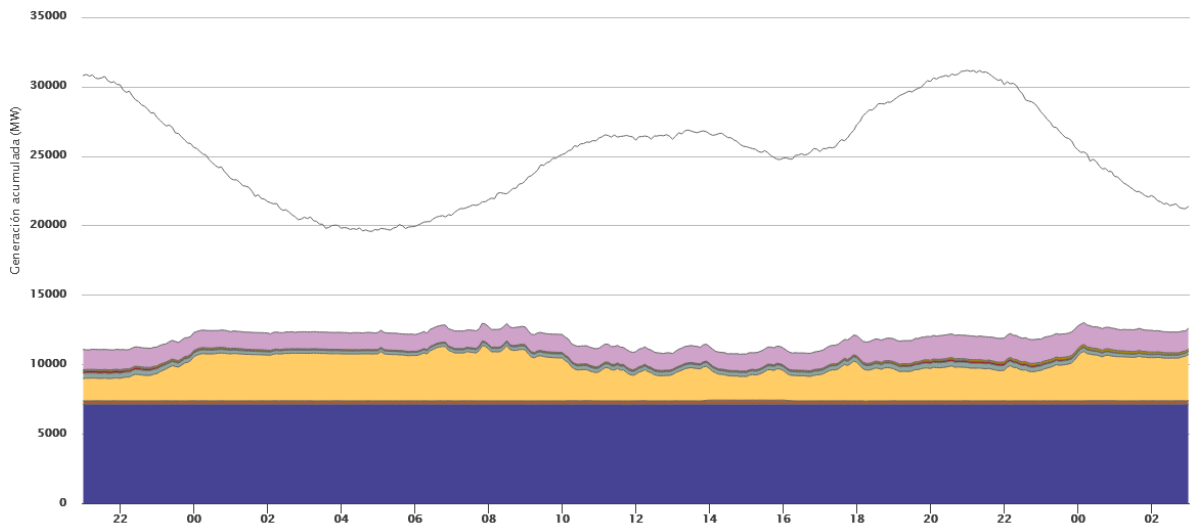


Fig. 1 Comparativa de la generació d'electricitat amb fonts renovables (imatge superior) i fonts convencionals (imatge inferior) en el sistema peninsular el dia 05/01/2025

En el sistema elèctric on el consum i la generació sempre han de ser iguals, tradicionalment la generació d'energia ve condicionada per la demanda, de manera que s'adapta la producció al consum, i això ha determinat una estructura centralitzada i vertical, que dificulta l'encaix de la penetració de les renovables, més distribuïdes i on la producció no està condicionada pel consum.

És fàcil observar que tecnologies on la seva generació depèn de factors externs aleatoris, com la meteorologia, no s'adapten al sistema elèctric tradicional inflexible. La incorporació de les energies renovables al mix elèctric és una prioritat important per aconseguir els objectius establerts per la Comissió Europea i per els últims acords sobre el clima, i **això comporta augmentar la flexibilitat del sistema elèctric així com incrementar l'emmagatzematge.**

A Europa l'entrada massiva de fonts d'energia renovable al mix energètic ja ha deixat veure algunes de les primeres conseqüències. Durant els últims anys s'ha vist com la demanda del sistema ha disminuït dràsticament durant les hores de sol, el que ha conduït a què en alguns moments s'hagin registrat preus negatius i mínims històrics en el mercat majorista [6].

Ahora, els pics de consum s'han mogut cap a les primeres i les últimes hores del dia (abans que la fotovoltaica comenci a generar i quan ja s'ha post el sol). Això ha derivat a uns preus molt elevats durant aquestes hores i ha fet augmentar la volatilitat del preu de l'electricitat [7]. A més, els costos de serveis del gestor del sistema per tenir la xarxa equilibrada augmenten any rere any [8], [9].

Així doncs, en el moment actual de la transició energètica cal la intervenció de **nous actius per tal de flexibilitzar el sistema** i fer un major i millor ús de les energies renovables ja presents en el sistema. D'aquesta manera, pel seu propi caràcter flexible, **el sistema d'emmagatzematge d'energia s'han erigit com una de les peces claus** que podrien ser determinants per aconseguir la fita de tenir sistema elèctric basat en les energies renovables.

Aquest escenari també s'esdevé en menor mesura en els ens locals. Ja fa anys que els ajuntaments i d'altres administracions locals impulsen la introducció d'energies renovables en

els seus equipaments. Els costos elevats de l'energia i les ajudes que hi ha hagut per part d'altres administracions (Next gen, Diputació de Barcelona amb el programa renovables 2030) han disparat el nombre d'instal·lacions. Els canvis normatius, a més, han permès que els ens locals passin de fer instal·lacions petites, ajustades a garantir i maximitzar l'autoconsum instantani a instal·lacions més grans, tot sovint en règim d'autoconsum col·lectiu).

Unes instal·lacions més grans han comportat una major producció, que no sempre s'acompanya amb la demanda i per tant **la introducció de sistemes de emmagatzematge és clau per optimitzar-ne l'ús** i, perquè no, **la rendibilitat**, tot emmagatzemant l'energia produïda quan la de xarxa sigui econòmica, i cedint-ne quan sigui cara.

Aquest estudi ha de permetre orientar als ens locals en la presa de decisions en relació a la instal·lació de bateries.

Objectiu

Tot i el que s'ha mencionat en el punt anterior, la maduresa de la tecnologia dels sistemes d'emmagatzematge no està prou assentada com per poder tenir una resposta contundent sobre la idoneïtat de la instal·lació de bateries en sistemes de producció fotovoltaic. Així, aquest document pretén servir com a guia inicial per poder **determinar la viabilitat de la introducció de bateries elèctriques en instal·lacions d'autoconsum individual o col·lectiu**.

En primer lloc es fa una revisió de la **normativa actual i a les perspectives de normatives** tant dels sistemes d'emmagatzematge com de les instal·lacions elèctriques de baixa tensió.

En segon lloc, es fa un repàs a les **diferents tecnologies existents** actualment al mercat. Aquí es presenten característiques tècniques i de vida útil de cada un dels diferents tipus de bateries que es poden trobar al mercat. Finalment, també s'avaluen tecnologies que podrien entrar en un futur com a noves solucions d'emmagatzematge elèctric.

Seguidament, es fa una anàlisi de les diferents **opcions d'hibridació** de les tecnologies de generació fotovoltaica amb els sistemes de bateries. En aquest sentit s'avaluaran els diferents disposicions d'inversors que es poden fer servir per fer les hibridacions. Finalment, es fa un repàs a les opcions de connexió dels sistemes d'emmagatzematge associats a sistemes de generació fotovoltaica a la xarxa elèctrica contemplades per la legislació actual.

En el capítol 4, es fa un repàs de les característiques més importants a tenir en compte a l'hora de dimensionar el sistema de la bateria per a una instal·lació d'autoconsum, ja sigui una instal·lació existent com una nova instal·lació d'autoconsum.

En el següent capítol es presenten **diferents modes de gestió** per aprofitar el potencial flexible que tenen les bateries. Així, s'analitzaran casos que permet a la bateria oferir el seu potencial més enllà de la maximització d'autoconsum, com el paper que poden tenir dins de les comunitats energètiques locals o dins el que poden aportar com a peça per a l'agregació de la demanda oferint serveis a la xarxa.

A continuació, es presenten **diferents casos d'ús de bateries usades** de forma intel·ligent per oferir valor més enllà de l'autoconsum. Es tracta de casos reals de gestió de la bateria per aconseguir optimitzar l'ús de la bateria seguint diferents objectius.

Finalment, s'analitza la **vida útil de la bateria i el seu cicle de vida** tenint en compte l'impacte mediambiental de la fabricació i ús de bateries, perspectives de segona vida i reciclatge.

Per tancar, es pot trobar una infografia on es poden veure les **conclusions extretes per aquest estudi per ajudar a determinar la viabilitat tècnica, econòmica, i mediambiental** en l'ús de bateries en instal·lacions d'autoconsum fotovoltaic individual o col·lectiu.

1. Normativa actual i perspectives

Aquest primer capítol serveix per presentar les principals normatives i regulacions que gestionen la incorporació de sistemes d'emmagatzematge elèctrics, i en concret de bateries de ió de liti, com a suport de instal·lacions de generació renovable com és la fotovoltaica.

Cal destacar que la legislació en matèria d'emmagatzematge és incompleta i està dispersa en diferents normes dictades per diferents òrgans.

1.1 Revisió de la normativa general

1.1.1 Normatives que influeixen i afecten els sistemes d'emmagatzematge però no són específiques

- **RD 986/2024: Actualització del PNIEC** on s'aprova l'actualització del Pla Nacional Integrat d'Energia i Clima, ara denominat 2023-2030 (en endavant, el "Reial Decret" i "PNIEC 2023-2030") [10]. Es planteja una reducció del 32% de les emissions de gasos d'efecte hivernacle per al 2030 i, s'incrementa el pes de les renovables fins al 48% del consum d'energia final. En el sector elèctric, el mix de renovables ascendeix al 81% el 2030. S'impulsen les energies renovables, l'emmagatzematge i la gestió de la demanda per millorar-ne la integració.

Segons el **Pla Nacional Integrat d'Energia i Clima (PNIEC) 2023-2030** :

- S'estableix un objectiu de **22 GW de capacitat d'emmagatzematge energètic per a l'any 2030**, que inclou tant bateries com emmagatzematge hidràulic reversible (bombeig).
- En comparació amb els nivells actuals (any 2023), això representa un augment significatiu, ja que Espanya comptava amb aproximadament **8 GW de capacitat d'emmagatzematge** (majoritàriament en forma de bombeig hidràulic).

- **Reial Decret 244/2019** [11]: estableix les condicions per a l'autoconsum fotovoltaic (actualment en revisió). Els tipus d'autoconsum que preveu el RD són els següents:

1. Autoconsum sense excedents: es tracta d'aquelles instal·lacions amb connexió a xarxa i que compten amb un dispositiu antiabocament que impedeix la injecció d'excedents energètics a la xarxa de distribució.

2. Autoconsum amb excedents: instal·lacions que a més de produir energia elèctrica per a autoconsum, poden injectar els seus excedents energètics a les xarxes de transport i distribució.

Tal i com indica aquest RD la potència màxima per acollir-se a la modalitat d'autoconsum amb excedents aïllats a compensació és de 100 kW. Aquesta potència es calcula com la suma de la potència nominal de tots els inversors connectats a la instal·lació, incloent-hi inversors fotovoltaics i inversors-carregadors.

Per tant, si la suma de les potències dels inversors supera els 100 kW, la instal·lació no pot acollir-se a la compensació simplificada d'excedents i haurà d'optar per altres modalitats, com la venda d'energia al mercat elèctric. En el cas de les instal·lacions existents que superin aquest límit, no poden beneficiar-se de la compensació simplificada i han de seguir les condicions establertes per a les instal·lacions amb excedents sense compensació. És important destacar que, per a instal·lacions amb potència superior a 100 kW, es requereixen tràmits addicionals, com l'obtenció de permisos d'accés i connexió, i poden estar subjectes a altres requisits administratius i tècnics.

La potència dels inversors de les bateries se suma a la dels inversors fotovoltaics a efectes del RD. **En cas que es vulguin posar bateries i la suma de les potències superi els 100kW, l'opció és posar inversors-carregadors**, de manera que la potència a considerar serà només la de l'inversor-carregador que engloba la bateria i la instal·lació fotovoltaica.

Si es vol més detall sobre les modalitats d'autoconsum es presenten a l'Annex 1.

- **Reial Decret Llei 23/2020** A través d'aquest RDL s'incorporen en la Llei del Sector Elèctric algunes pinzellades relatives a l'emmagatzematge energètic, com la definició de "titular d'instal·lació d'emmagatzematge". Així mateix, introdueix una sèrie de mesures orientades a impulsar nous models de negoci i a introduir nous elements com poden ser l'emmagatzematge o la hibridació. Reial Decret 1183/2020 Desenvolupa reglamentàriament l'article 33 de la Llei 24/2013, del Sector Elèctric, i regula per primera vegada l'accés a les xarxes per a les instal·lacions d'emmagatzematge que injectin energia a la xarxa, permetent la hibridació de plantes de producció noves o existents amb sistemes de emmagatzematge. A més, com a mesura per impulsar la l'emmagatzematge, en el marc dels concursos de capacitat, es podria incloure, com a criteri valoratiu, la incorporació d'aquest tipus de sistemes. [12].

1.1.2 Normativa específica sobre els sistemes d'emmagatzematge

- **Directiva 2019/944 (EU)** Regula la participació de l'emmagatzematge d'energia en el mercat elèctric, inclosa la prestació de serveis de flexibilitat en igualtat de condicions amb altres recursos energètics [13].
- **Reglament (UE) 2023/1542.** Aquest reglament modifica la Directiva 2008/98/CE i el Reglament (UE) 2019/1020 i deroga la Directiva 2006/66/CE. Defineix les responsabilitats de les parts interessades al llarg de la cadena de valor de les bateries, inclou informació detallada i normes per garantir que les bateries compleixen els requisits especificats. Aquest reglament diferencia grups de bateries: bateries de vehicles elèctrics, bateries de mitjans de transport lleugers (TML), bateries industrials (transport ferroviari, fluvial i aeri o maquinària tot terreny) i emmagatzematge d'energia (en entorns privats o domèstics). A més, especifica com els proveïdors de cel·les i mòduls de bateries han de facilitar la informació i documentació necessàries per complir els requisits que s'hi descriuen.

En aquest cas, el reglament estableix els paràmetres relacionats amb el rendiment electroquímic i la durabilitat i els paràmetres per determinar l'estat de salut i la vida útil prevista de les bateries, incloses les especificacions tècniques, normes i condicions utilitzades per mesurar, calcular o estimar-ne els valors. En relació amb l'empremta de carboni, el reglament defineix que s'elabori una declaració de la petjada de carboni, i se n'estableixin les classes de rendiment de la mateixa [14].

1.2 Revisió normativa elèctrica d'integració de bateries

La normativa relativa a la integració elèctrica de bateries està molt lligada a les normatives vigents sobre instal·lacions fotovoltaïques. A continuació (Fig. 2) es presenta un esquema de les normatives que fan referència a sistemes fotovoltaïcs i que hauran de considerar-se al moment de instal·lar també sistemes d'emmagatzematge.

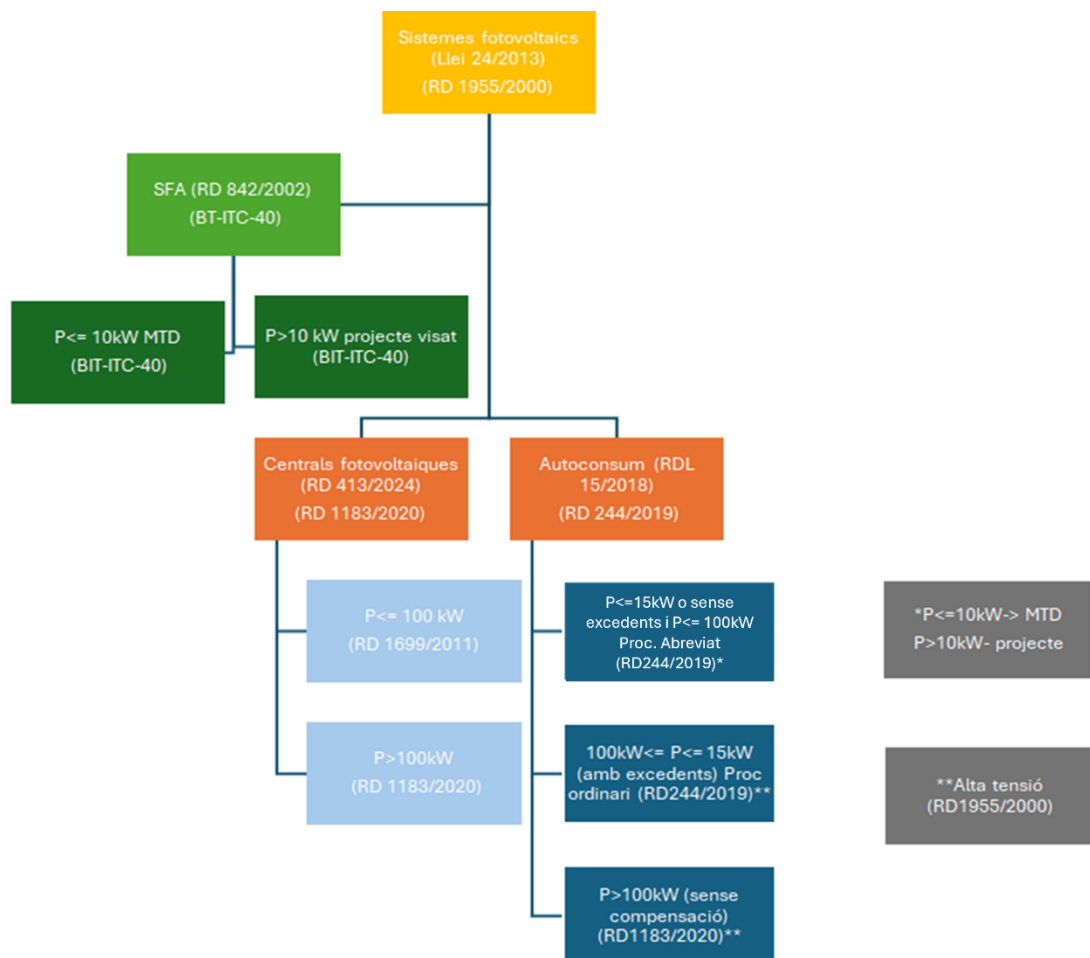


Fig. 2 Esquema on es resumeix la normativa vigent per als sistemes fotovoltaïcs (elaboració pròpia a partir de Censolar [15]).

La normativa a tenir en compte varia en funció del sistema fotovoltaïc: Sistemes fotovoltaïcs autònoms (SFA), centrals fotovoltaïques (CFV) i sistemes fotovoltaïcs d'autoconsum (SFCA). Per als tres tipus de sistemes hi ha fonamentalment dues normes de referència:

1. La llei de sector elèctric (Llei 24/2013) i el seu desenvolupament normatiu, sobretot el RD 1955/2000 que marca la regulació de totes les activitats del sector elèctric que es detalla més endavant.
2. RD 842/2002 [16] és on s'aprova el Reglament electrotècnic per a baixa tensió (REBT), d'obligat compliment per a la pràctica totalitat de sistemes fotovoltaics i per sistemes d'emmagatzematge.

Un altre normativa a considerar és la que regula la connexió a xarxa de les instal·lacions de producció energètica (RD 1699/2011[17] que s'explica a continuació.

- **Reial Decret 1699/2011**, de 18 de novembre, pel qual es regula la connexió a xarxa d'instal·lacions de producció d'energia elèctrica de petita potència. És d'aplicació a les instal·lacions de règim ordinari i règim especial de potència no superior a 100 kW de les tecnologies contemplades en les categories b) i c) de l'article 2 del Reial decret 661/2007, de 25 de maig, en qualsevol dels dos casos següents: a) quan es connectin a les línies de tensió no superior a 1 kV de l'empresa distribuïdora, bé directament o a través d'una xarxa interior d'un consumidor, b) quan es connectin al costat de baixa d'un transformador d'una xarxa interior, a una tensió inferior a 1 kV, d'un consumidor connectat a la xarxa de distribució i sempre que la potència instal·lada de generació connectada a la xarxa interior no superi els 100 kW. 2. També serà d'aplicació a les instal·lacions de règim ordinari i règim especial de potència no superior a 1000 kW de les tecnologies contemplades en la categoria a) i dels subgrups b.6, b.7 i b.8 de l'article 2 del Reial decret 661/2007, de 25 de maig, que es connectin a les línies de tensió no superior a 36 kV de l'empresa distribuïdora, bé directament o a través d'una xarxa interior d'un consumidor.
- **Reial decret 1955/2000**. D'acord amb l'article 115.4 d'1 de desembre, pel qual es regulen les activitats de transport, distribució, comercialització, subministrament i procediments d'autorització d'instal·lacions d'energia elèctrica, **les instal·lacions d'emmagatzematge que directament o indirectament estiguin connectades a les xarxes de transport i distribució, soles o híbrides, tindran el mateix tractament que instal·lacions de generació d'electricitat**. El procediment d'autorització administrativa aplicable a les instal·lacions d'emmagatzematge d'energia elèctrica stand-alone, independentment del tipus de terreny en el qual se situïn, es regeix pel Reial decret 1955/2000, d'1 de desembre [18].

1.3 Revisió de normativa de seguretat per a la integració de bateries

1.3.1 Problemàtiques més freqüents de les bateries

En concret, les bateries de ions de liti ofereixen un rendiment excel·lent en termes d'energia i densitat de potència però tenen inconvenients pel que fa a la seguretat. Hi ha diferents modes d'error per a sistemes de bateries de ions de liti i els mecanismes són generalment complexos. Hi ha tres categories de modes d'error: fallades de la bateria, fallades del sensor i fallades de l'actuador. Les fallades de la bateria, com ara **sobrecàrrega, sobreescalfament, fugites d'electròlits, curtcircuits interns**, són els més crítics en una bateria de ions de liti i poden

conduir a l'embalament tèrmic o "thermal runaway" (augment autònom i incontrolat de la temperatura que pot passar quan una bateria experimenta una fallada en cascada, alliberant quantitats significatives de calor i gasos, i que potencialment pot donar lloc a un incendi o explosió).

Quan les bateries funcionen a altes temperatures, poden patir descontrol tèrmic, una condició en la qual un augment de temperatura provoca majors augments de temperatura, cosa que podria provocar un incendi o una explosió. **La sobrecàrrega i la instal·lació incorrecta** poden agreujar aquest problema. L'embalament tèrmic pot ser induït per un abús mecànic, elèctric o tèrmic. Sovint s'atribueix a la fallada del separador/interfase materials, donant lloc a un curtcircuit intern. La descomposició dels materials de la bateria genera gasos, seguit d'un augment de la pressió que pot provocar a la ruptura cel·lular i l'alliberament de gasos tòxics i inflamables. Aquest alliberament i l'acumulació de gasos inflamables podria provocar una explosió.

Perills de fuga d'electròlits

La fuga de la bateria és una altra preocupació que pot plantejar riscos per a la salut i el medi ambient. Quan les bateries es malmeten o degraden poden filtrar substàncies químiques perilloses, com àcid sulfúric o liti, que poden ser perjudicials si entren en contacte amb la pell o s'ingereixen.

Curtcircuits i riscos d'incendi

Hi ha diferents causes per als curtcircuits: mala instal·lació, cables fets malbé, components o connexions elèctriques defectuosos o si hi ha un curtcircuit entre els terminals de la bateria. Això pot provocar sobreescalfament, espurnes o fins i tot incendis.

1.3.2 Normativa de referència

Les normatives i estàndards on es determinen aspectes relatius a la seguretat són:

- Directiva de Baixa Tensió (LVD) (2014/35/UE)
- Norma CEI 62133
- Norma CEI 62619
- Estàndards IEEE

Directiva de Baixa Tensió (LVD) (2014/35/UE) [19]. Aquesta directiva a l'apartat de *Condicions generals* determina que:

1. És necessari assegurar que el material elèctric s'utilitza de manera segura i d'acord amb el seu ús final.
2. El material elèctric i els seus components es fabricaran de manera que permetin un muntatge i una connexió segurs i adequats.
3. El material elèctric haurà de dissenyar-se i fabricar-se de manera que quedi garantida la protecció contra perills elèctrics, la protecció contra els perills mecànics i la resistència al foc i a la humitat.

La mateixa directiva preveu que aquests sistemes compleixin amb les condicions per a assegurar una protecció contra els perills derivats del propi material o contra els perills causats per efecte influències externes sobre el material elèctric per tal que:

- Les persones i els animals domèstics quedin adequadament protegits contra el perill de lesions físiques o altres danys que pugui provocar el contacte directe o indirecte.
- No es produeixin temperatures, arcs o radiacions perilloses.
- Es protegeixi convenientment les persones, els animals domèstics i els béns contra els perills de naturalesa no elèctrica deguts al material elèctric que es desprendi.
- El sistema d' aïllament sigui l' adequat per a les condicions d' utilització previsibles.

Adicionalment, **la norma CEI 62133** estableix els requisits de seguretat per a cel·les i bateries secundàries segellades portàtils utilitzades en equips. Cobreix aspectes com l'abús tèrmic, els curtcircuits i la sobrecàrrega per garantir la seguretat de les tecnologies de bateries de ions de liti i altres [20].

Per a aplicacions industrials, **la norma CEI 62619** inclou requisits d'estabilitat tèrmica, rendiment elèctric i seguretat mecànica per prevenir incidents com incendis o explosions.

Finalment, en els **Estàndards IEEE** de l'Institut d'Enginyers Elèctrics i Electrònics (IEEE) també es proporcionen uns estàndards per a sistemes de bateries utilitzats en aplicacions d'energia renovable. Aquests estàndards cobreixen diversos aspectes de seguretat, inclosos els sistemes de gestió de bateries i els protocols de seguretat de l'emmagatzematge d'energia [21].

Emmagatzematge de bateries de liti

Actualment no hi ha regulacions públiques per a l'emmagatzematge de bateries de liti, però això no significa que no hi hagi cap mena d'obligació. Les bateries de liti són productes sota el **reglament REACH** i, per tant, no són substàncies perilloses. No obstant això, les bateries de liti s'han de tractar i emmagatzemar internament com una substància perillosa.

L'emmagatzematge de les bateries de liti està influït significativament per la seva classificació de rendiment: baix, mitjà i alt rendiment (vegeu les normes de seguretat generals i específiques). Per a l'emmagatzematge de les bateries de liti es poden establir analogies amb els reglaments de transport de mercaderies perilloses i l'ordenança de materials perillosos o el reglament tècnic per a materials perillosos. Aquestes documents preveuen que es dissenyi la instal·lació d'emmagatzematge com una instal·lació d'emmagatzematge de materials perillosos d'acord amb el *Technical Rules for Hazardous Substances (TRGS) 510* [22] incloent el disseny com F90, restricció d'accés, ventilació, prohibició d'emmagatzematge combinat.

1.4 Revisió de la implicació de casos d'ús particulars: escoles, casals, etc.

Actualment no existeix cap reglament que reguli la instal·lació de sistemes d'emmagatzematge en locals de lliure concurrència com poden ser escoles, edificis d'oficines, pavellons etc. Tanmateix, la instal·lació d'aquests sistemes està subjecta al reglament de baixa tensió recollit a l'**ITC-BT-30** i a l'**ITC-BT-28** [23], [24].

Reglament Electrotècnic per a Baixa Tensió (REBT): Aquest reglament estatal regula les instal·lacions elèctriques de baixa tensió. En particular, la Instrucció Tècnica Complementària ITC-BT-28 tracta sobre les instal·lacions en locals de pública concurrència. S'hi estableixen

requisits específics per a la distribució de l'enllumenat i la connexió de sistemes d'emergència, amb l'objectiu de garantir la seguretat de les persones en cas d'incidències elèctriques.

Consideracions addicionals

- **Normativa local:** Els ajuntaments poden tenir ordenances específiques que regulin la instal·lació de bateries en locals de pública concurrència. És recomanable consultar amb l'Ajuntament corresponent per assegurar-se del compliment de totes les normatives aplicables. Per exemple, el Departament d'Educació de la Generalitat de Catalunya actualment no permet la instal·lació de bateries en el seus recintes.
- **Prevenió i seguretat:** És fonamental que les instal·lacions de bateries compleixin amb les normatives de seguretat vigents per prevenir riscos d'incendi o altres perills associats.

En particular, en el document ITC-BT-30, a l'apartat dedicat a instal·lacions elèctriques especials, es presenten els riscos i mesures per minimitzar-los deguts a la presència de bateries i acumuladors i que es presenten a continuació:

- Els riscos que presenten els locals amb bateries i/o acumuladors es manifesten en dos aspectes diferents:
 - Els derivats de l'emissió de gasos i, per tant, associats als locals amb risc de corrosió.
 - Els riscos provinents de l'explosió dels gasos.
- Els locals on es troben els acumuladors han de ser habitacions que han de poder rebre la visita del personal que s'encarregui del seu manteniment i la reparació dels elements avariats.
- La sala ha d'estar proveïda de ventilació natural o forçada que garanteixi una renovació perfecta i ràpida de l'aire. Els vapors evacuats no han de penetrar als locals contigus.
- Si hi ha il·luminació artificial, ha d'utilitzar únicament làmpades d'incandescència o de descàrrega, les quals han de ser d'un material apropiat per suportar l'ambient corrosiu i evitar la penetració dels gasos al seu interior.
- Les bateries que no assegurin per sí mateixos un aïllament suficient entre les parts en tensió i el terra de la instal·lació han de presentar un aïllament suplementari, el qual, al seu torn, no es vegi afectat per la humitat. La ubicació d'aquest aïllament complementari ha de permetre que es duguin a terme amb comoditat les tasques de manteniment i de substitució.
- Els passadissos de servei han de tenir una amplada mínima de 0,75
- Si la tensió de servei dels acumuladors és superior als 75 V amb relació al terra de la instal·lació i hi ha parts metàl·liques que són susceptibles de tocar-se de manera accidental, el terra dels passadissos de servei ha de ser aïllat elèctricament

Els sistemes d'emmagatzematge elèctric i en concret les bateries de ió de liti que s'utilitzen com emmagatzematge d'instal·lacions fotovoltaïques estan regulades per les següents normatives de instal·lació, seguretat i marcatge:

- Normatives vigent: D 986/2024: Actualització del PNIEC
- Reial Decret 244/2019
- Reial Decret 1699/2011,
- Directiva 2019/944 (EU)
- Reglament (UE) 2023/1542.
- ITC-BT-28
- ITC-BT-30

2. Característiques tècniques

Aquest capítol es fa un estudi sobre les tecnologies existents tant ja presents en el mercat com tecnologies futures des del punt de vista de les seves característiques tècniques. Abans d'això, però, és necessari fer una petita introducció sobre les quins són els paràmetres tècnics que defineixen una bateria.

Una bateria és un dispositiu electroquímic capaç d'emmagatzemar i subministrar energia elèctrica mitjançant reaccions químiques reversibles. Els seus components principals són:

- **Elèctrodes:** són els components conductors de la bateria on tenen lloc les reaccions electroquímiques que permeten l'intercanvi d'electrons. Els elèctrodes es classifiquen en elèctrode negatiu (ànode) i elèctrode positiu (càtode), segons el seu potencial elèctric i el seu rol durant els processos de càrrega i descàrrega. Els elèctrodes estan en contacte amb el circuit extern a través dels col·lectors de corrent.
- **Electròlit:** és el medi conductor que facilita el moviment dels ions entre els elèctrodes, tancant el circuit intern de la bateria.
- **Separador:** és una membrana permeable que evita el contacte entre elèctrodes per prevenir curtcircuits mentre permet el pas dels ions a través seu.

El procés de càrrega i descàrrega de les bateries ve donat pel desplaçament d'electrons entre el càtode i l'ànode (càrrega) i viceversa (descàrrega) a través de l'electròlit i com a conseqüència dels processos d'oxidació-reducció resultat de l'aplicació d'un voltatge per part d'una font externa d'energia.

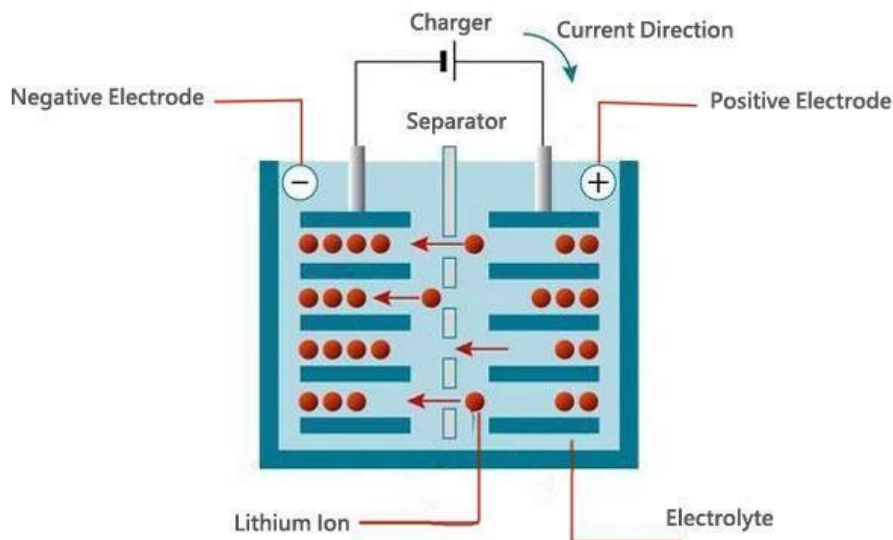


Fig 3. Esquema del funcionament d'una bateria

Com es pot observar (Fig 3), les reaccions d'oxidació i reducció es donen en els elèctrodes segons si la bateria està en càrrega o descàrrega. Per aquesta raó és millor utilitzar els termes 'negatiu' i 'positiu' en lloc de 'ànode' i 'càtode', ja que els rols d'aquests elèctrodes es poden invertir durant els diferents processos i en química, l'ànode és sempre on es produeix l'oxidació i el càtode on es produeix la reducció.

Els cicles de càrrega i descàrrega es poden repetir moltes vegades a les bateries recarregables, tot i que amb el temps es produeix una degradació dels materials que n'afecten la capacitat i el rendiment.

Fins ara s'ha utilitzat el terme bateria per fer referència a una cel·la individual, però també es pot utilitzar per descriure un conjunt de cel·les connectades. No obstant això, hi ha termes més específics per a cada cas. Una **cel·la** és la unitat més petita d'emmagatzematge, mentre que un **mòdul** és un conjunt de cel·les organitzades per formar una unitat més gran. També és habitual utilitzar el terme "Paquet", en anglès 'pack', per referir-se a un conjunt de mòduls interconnectats. Aquest paquet inclou components addicionals com el sistema de gestió de bateries (BMS - Battery Management System) per controlar el funcionament global del sistema.

A continuació es defineixen conceptes claus relacionats amb les característiques de les bateries, que normalment es poden trobar a les fitxes tècniques:

- **Capacitat:** és la quantitat d'energia que pot emmagatzemar i subministrar, normalment mesurada en ampers-hora (Ah) o watt-hora (Wh). La **capacitat nominal** és la quantitat d'energia especificada pel fabricant en condicions estàndard, mentre que la **capacitat útil** fa referència a l'energia realment disponible per a l'usuari que té en compte factors com la degradació i els paràmetres de funcionament.
- **Densitat energètica:** quantitat d'energia que una bateria pot emmagatzemar per unitat de massa (Wh/kg) o volum (Wh/L). Per tant, una major densitat energètica

permet obtenir una major capacitat d'emmagatzematge d'energia amb una bateria més lleugera o compacta.

- **Eficiència de cicle:** és la relació, expressada en percentatge, entre l'energia que es descarrega d'una bateria i l'energia que es necessita per carregar-la completament. Un valor d'eficiència de cicle més elevat indica una menor pèrdua d'energia.
- **Esperança de vida:** és el període durant el qual una bateria pot funcionar de manera satisfactòria abans que la seva capacitat caigui per sota d'un llindar especificat. L'esperança de vida es pot expressar en anys o en nombre de cicles de càrrega i descàrrega. Un cicle es pot definir com el procés en què una bateria es descarrega des d'un nivell de càrrega inicial fins a un altre nivell i després es carrega fins al nivell inicial.

Els paràmetres de funcionament més importants durant un cicle, a més de la temperatura, són:

- **DoD (Depth of Discharge - Profunditat de Descàrrega):** la profunditat de descàrrega representa la proporció de la capacitat total d'una bateria que s'ha fet servir durant un cicle. Així, si es descarreguen 40 Ah d'una bateria de 100 Ah, el DoD és del 40%. Actualment en les bateries de ions de liti es pot aprofitar la totalitat de la càrrega de la bateria.
- **C-rate:** intensitat de càrrega o descàrrega d'una bateria en relació amb la seva capacitat nominal. Un C-rate de 1C significa que la bateria es carrega o descarrega completament en 1 hora, mentre que amb 0,5C ho faria en 2 hores. Exemple, una bateria amb un C-Rate de 0,5 de 100 kWh, ens donaria 50 kWh durant dues hores, o el que és el mateix, una potència de 50 kW durant dues hores.

Finalment, es defineixen els estats de les bateries com les variables que descriuen la condició actual d'una bateria i que canvien amb el temps. Els principals estats són:

- **SoC (State of Charge - Estat de Càrrega):** percentatge d'energia disponible a la bateria en relació amb la seva capacitat.
- **Resistència interna:** és l'oposició al pas del corrent elèctric dins la seva estructura i es compon de diferents tipus de resistències. La resistència òhmica és la resistència elèctrica pura causada pels materials físics de la bateria, com els elèctrodes i l'electròlit. La resistència a la transferència de càrrega està associada a les reaccions electroquímiques que tenen lloc a les interfícies entre els elèctrodes i l'electròlit. Finalment, la resistència de difusió es deu al moviment dels ions dins dels materials dels elèctrodes i l'electròlit. Una resistència interna elevada pot provocar pèrdues d'energia, escalfament i una reducció de l'eficiència. A mesura que la bateria es degrada, la resistència interna augmenta.
- **SoH (State of Health - Estat de Salut):** indicador de la degradació d'una bateria respecte a la seva condició original. Es mesura en percentatge i es basa habitualment en la capacitat residual. A vegades el SoH es pot definir en funció de l'increment de la resistència interna. Tot i que el SoH es defineix com un indicador que varia del 100% al 0%, a la pràctica, les bateries mai arriben al 0% de SoH abans de considerar-se inservibles per a la majoria d'aplicacions. De fet, les garanties dels fabricants solen

establir un llindar mínim de SoH (per exemple, entre el 70% i el 80%) al final del període de garantia, com es descriurà a la secció 2.2.

- **FEC (Full Equivalent Cycles - Cicles Equivalents Complets):** representa el nombre de cicles complets de càrrega i descàrrega al 100% del DoD equivalents a l'ús real d'una bateria. Aquesta normalització permet acumular l'estrès de descàrregues parcials; per exemple, dos cicles amb una descàrrega del 50% equivalen a 1 FEC.

2.1 Tecnologies presents en el mercat

Les primeres tecnologies recarregables d'emmagatzematge d'energia elèctrica que es van utilitzar en aplicacions estacionàries van ser les bateries de plom-àcid. Després es van desenvolupar les bateries de níquel-cadmi, que van suposar una millora en termes de durabilitat i rendiment. No obstant això, el seu ús es va veure limitat per la toxicitat del cadmi i les restriccions ambientals associades. Aquestes bateries van ser substituïdes progressivament per les de níquel-metall hidrur, que eliminaven el problema ambiental del cadmi i milloraven la capacitat energètica.

Tot i així, amb l'arribada de les bateries de ions de liti, tant les níquel-cadmi com les níquel-metall hidrur van perdre rellevància en moltes aplicacions, on el liti ha esdevingut la tecnologia dominant (el 2022 van arribar a una quota de mercat del 86%) [25]

No obstant això, actualment existeixen tecnologies alternatives en el mercat. Les bateries de Pb-A encara es troben en aplicacions estacionàries. Les bateries de flux (bateries amb separació d'electròlits) ofereixen una alternativa especialment atractiva per a aplicacions estacionàries de gran escala, gràcies a la seva capacitat de separar l'energia emmagatzemada de la potència disponible.

Degut a la seva presència en el mercat actual, a continuació es descriuen les característiques principals de les bateries de plom-àcid, ions de liti i de flux. En la secció 2.3, es presenta una taula resum (Taula 2) amb una comparativa de cada tecnologia present en el mercat.

Bateries de Plom-àcid (Pb-A)

Les bateries de plom-àcid són una tecnologia de bateria recarregable que ha estat àmpliament utilitzada, especialment en emmagatzematge d'energia i vehicles. Aquest tipus de bateries es basa en una reacció química entre el plom i l'àcid sulfúric on el plom serveix com a material per a l'elèctrode positiu i diòxid de plom (PbO_2) per a l'elèctrode negatiu. Les bateries de plom-àcid tenen diverses tipologies que varien en funció de la seva construcció i aplicació. Les més comuns són:

- **Bateries de plom-àcid líquides:** aquest és el tipus més antic i més conegut de bateria de plom. Estan compostes per plaques de plom submergides en una solució d'àcid sulfúric. Són àmpliament utilitzades per a arrencada de motors, vehicles de benzina i en sistemes d'emmagatzematge d'energia de petita escala. Les seves limitacions inclouen una baixa densitat energètica i una vida útil limitada.
- **Bateries de plom-àcid segellades:** poden ser AGM (Absorbent Glass Mat) o de gel. Les AGM utilitzen un material de fibra de vidre per absorbir l'àcid sulfúric, que permet que

la bateria sigui més compacta i resistent a les vibracions. Les de gel són similars a les AGM, però utilitzen un àcid sulfúric gelificat en lloc de líquid. Aporten una millor seguretat i estan dissenyades per ser utilitzades en aplicacions d'energia solar o altres sistemes que requereixen una bateria que pugui operar de manera eficient en condicions més exigents. Ofereixen una vida útil més llarga que les bateries convencionals i un manteniment mínim.

Tot i que les bateries de plom-àcid tenen una menor eficiència comparades amb altres tecnologies, com les de ions de liti, segueixen sent una opció popular en aplicacions on el cost inicial baix i la robustesa són factors determinants.

Bateries de ions de liti (Li-ion)

Són el tipus de bateria recarregable més utilitzat actualment gràcies a la seva alta densitat energètica, eficiència i cicle de vida prolongat. El seu funcionament es basa en el moviment dels ions de liti entre els elèctrodes durant la càrrega i descàrrega. Existeixen diferents químiques dins de la família de les bateries de ions de liti, cadascuna amb característiques específiques que les fan més adequades per a determinades aplicacions. Segons el tipus d'elèctrode positiu, existeixen:

- LFP (LiFePO_4 - Fosfat de ferro de liti): Es caracteritza per la seva seguretat i estabilitat tèrmica. Tot i que té una densitat energètica més baixa comparada amb altres, el seu cost, la seva vida útil i capacitat de resistir condicions extremes la fan l'opció més comuna en sistemes d'emmagatzematge d'energia.
- NMC ($\text{Li}(\text{NiCoMn})\text{O}_2$ - Níquel-Cobalt-Manganès): Ha guanyat una gran popularitat en la indústria, gràcies al seu bon compromís entre densitat energètica, cost i estabilitat.
- NCA (LiNiCoAlO_2 - Níquel-Cobalt-Alumini): El seu disseny incorpora l'alumini per millorar l'estabilitat tèrmica i la seguretat, a la vegada que optimitza la densitat energètica. Ha mostrat un gran rendiment en aplicacions d'alta demanda.
- LMO (LiMn_2O_4 - Òxid de manganès de liti): Aquesta química és bastant desenvolupada i és coneguda per la seva seguretat i cost relativament baix. Ofereix una bona estabilitat a temperatures elevades, i tot i que la seva vida útil i densitat energètica no són tan altes com altres químiques, és una opció fiable en aplicacions on la seguretat i la resistència són prioritaris.
- LCO (LiCoO_2 - Òxid de cobalt de liti): Aquesta química és una de les més utilitzades en dispositius electrònics portàtils, gràcies a la seva alta densitat energètica.

En totes aquestes químiques, l'elèctrode negatiu sol estar compost per grafit, excepte en el cas de la següent química:

- LTO ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ - Òxid de titanat de liti): El LTO és conegut per la seva gran capacitat per permetre càrregues ultra ràpides i per la seva seguretat millorada, ja que és més estable i menys reactiu. Per al càtode, es poden utilitzar materials com el LFP o el LCO, depenent de la configuració.

Les bateries de ions de liti poden tenir diferents formats:

- **Cilíndriques:** són cel·les tubulars caracteritzades per la seva robustesa i cost relativament baix. No obstant això, presenten una menor densitat d'empaquetament en comparació amb altres formats i una capacitat per cel·la més limitada. Dins de les cel·les cilíndriques, el format més comuns són el 18650 (18 mm diàmetre, 65 mm longitud) i el 21700 (21 mm diàmetre, 70 mm longitud).
- **Prismàtiques:** tenen una estructura rectangular rígida que permet optimitzar l'aprofitament de l'espai dins dels paquets (packs), i això millora la densitat energètica. A més, la seva forma facilita la integració de sistemes de refrigeració. No obstant això, tenen un cost de fabricació més elevat i una menor resistència mecànica en comparació amb les cel·les cilíndriques i en cas de fuga tèrmica (thermal runaway), la seva estructura compacta pot dificultar la dissipació ràpida de la calor acumulada dins de la cel·la.
- **Pouch (sobre):** es caracteritzen per la seva flexibilitat i estructura semblant a un sobre, amb una coberta de làmina d'alumini-plàstic en lloc d'una carcassa rígida. Aquesta configuració permet una millor adaptació a diferents dissenys de bateries i una relació pes-capacitat més favorable. Tot i que tenen un menor cost i pes, són més sensibles als danys mecànics i requereixen una protecció estructural addicional dins del paquet de bateries.

Bateries de flux

Les bateries de flux són un tipus de bateria en què l'energia s'emmagatzema en dos electròlits líquids continguts en dipòsits separats. Aquests líquids circulen a través d'una cel·la electroquímica on té lloc la reacció redox. Un dels principals avantatges de les bateries de flux és que la seva capacitat d'emmagatzematge depèn exclusivament del volum dels dipòsits d'electròlit, mentre que la potència és determinada per la mida de la cel·la electroquímica. Això permet una alta escalabilitat, ja que la capacitat i la potència es poden ajustar independentment, fent-les especialment adequades per a aplicacions d'emmagatzematge estacionari d'energia renovable (Fig. 4).

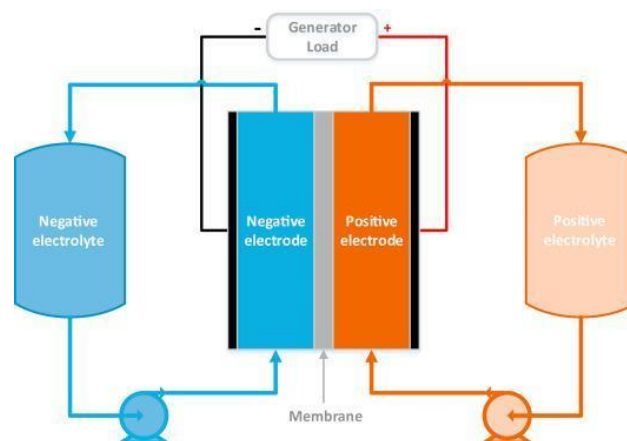


Fig. 4 Esquema d'una bateria de flux

Les bateries de flux poden utilitzar diferents tipus d'electròlits i d'elèctrodes en funció de la seva química específica. Alguns tipus comuns són:

- Bateria de flux de ferro-crom: Utilitzen ions de ferro i crom dissolts en àcid sulfúric. Tot i que són menys comunes actualment, van ser unes de les primeres investigades per al seu ús en emmagatzematge d'energia.
- Bateria de flux de vanadi: són les més utilitzades actualment per a aplicacions d'emmagatzematge d'energia a gran escala. Utilitzen solucions de ions de vanadi en àcid sulfúric com a electròlits.
- Bateria de flux de zinc-brom: funcionen amb una solució de brom i zinc.

Pel que fa als elèctrodes, solen ser de materials porosos com el feltre de grafit o carbó activat.

2.2 Garanties de les tecnologies presents en el mercat

Les garanties poden ser **fixes**, que són les més comunes, o **flexibles**, que poden adaptar-se a les condicions de funcionament. En molts casos, les garanties predeterminades pel fabricant són de tipus fix i una garantia més avançada necessita d'un procés de negociació amb el fabricant comportant un cost extra. Les garanties són necessàries per diversos motius:

- Una inversió més segura. S'utilitzarà la garantia per assegurar el retorn de la inversió. Certesa en Licitacions o mercats.
- Participar en licitacions o en mercats sol requerir tenir seguretat sobre capacitat mínima o disponibilitat que pot venir inclosa en la garantia.
- Comparació de proveïdors per preu i rendiment. Cal comparar el cost d'adquisició tenint en compte la vida esperada de la bateria juntament amb altres paràmetres com l'eficiència.

Existeixen diversos tipus de garanties per a les bateries que depenen del tipus d'ús, fabricant o negociació.

Garanties SoH¹ de la bateria al final de la vida útil: Aquestes garanties són les més comunes i aplicades a petites instal·lacions <= 100kWh. Solen venir fixades per temps i per ús, mesurat com a nombre de cicles complets o kWh descarregats de la bateria. Per exemple, la Tesla PowerWall és una bateria amb una capacitat nominal de 13,7kWh i ofereix una garantia mínima del 70% d'Estat de Salut durant 10 anys o 2800 cicles, el que arribi primer. A la Taula 1, es fa un resum d'algunes referències comercials.

Taula 1 Referències comercials i característiques

Model	Capacitat nominal	Estat de Salut (SoH) Garantit	Condicions
Tesla PowerWall	13,7 kWh	70%	2.800 cicles o 10 anys
Huawei Luna	5 kWh	60%	3.290 cicles o 10 anys
BYD	22,08 kWh	60%	3.100 cicles o 10 anys

¹ SOH: State of Health: Estat de salut

Aquestes garanties estableixen un Estat de Salut (SoH) mínim durant el període cobert, però l'evolució real de l'SoH presenta una incertesa inherent, tal com il·lustra el gràfic Fig. 5. La zona verda mostra el rang considerablement ampli dins del qual es pot situar l'SoH durant la garantia. Aquesta variabilitat significa que dues bateries amb la mateixa garantia poden oferir rendiments diferents al llarg del temps; el seu comportament dependrà de si la degradació és més progressiva i lineal o si segueix una corba més exponencial.

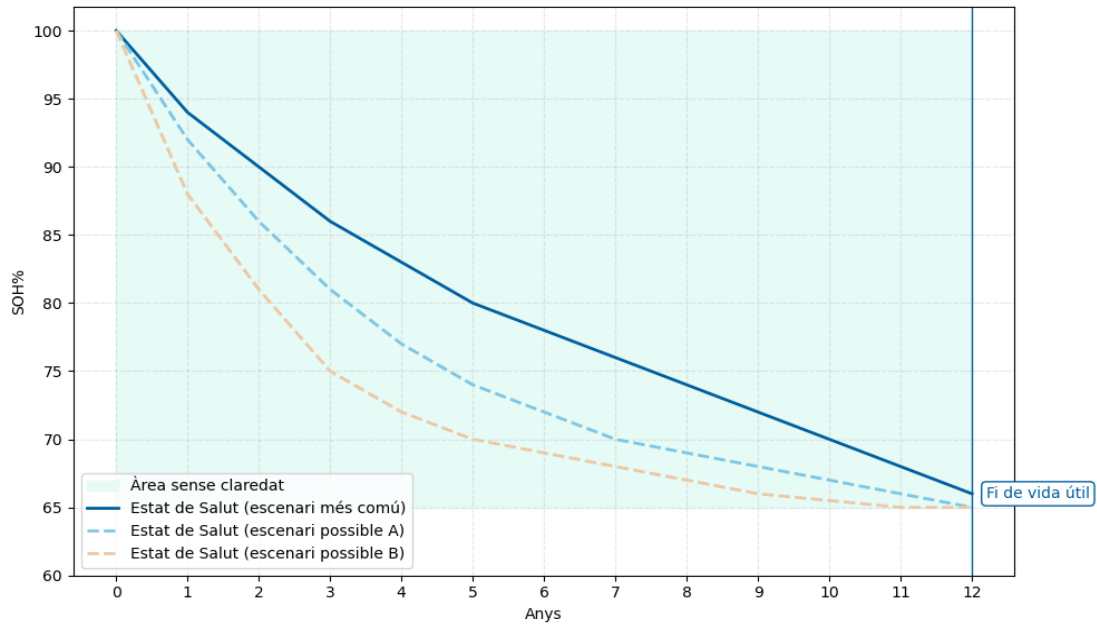


Fig. 5 Garanties SoH al final de la vida útil

Garanties amb punts intermedis de referència: Aquest tipus de garanties no és tan comú en bateries petites però és comú per a sistemes majors, com BESS de més de 100 kWh. Aquestes garanties, indiquen el mínim de SoH cada cert temps o nombre de cicles. Aquestes garanties solen venir associades a unes condicions de funcionament, per exemple, temperatura de treball. Això pot crear certes vulnerabilitats, en el cas que, per exemple, en algun moment es malmetés el sistema de refrigeració de la bateria i la temperatura pugés per sobre del límit d'operació.

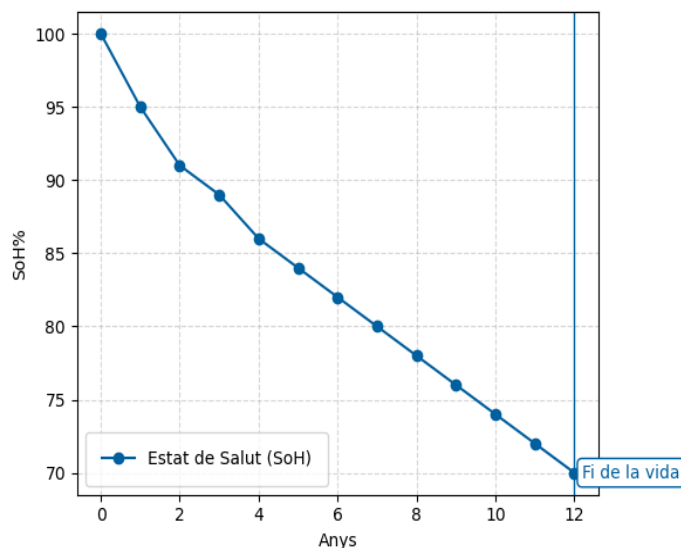


Fig. 6 Garanties d'SoH amb punts intermedis

Garanties Flexibles o Dinàmiques: Són les garanties més avançades. No solen ser ofertes pels fabricants a causa de la seva major complexitat però en alguns casos de grans instal·lacions es poden negociar. Aquestes garanties intenten reflectir les diferents velocitats de degradació que tenen les bateries en funció del seu ús

En alguns casos, els fabricants o integradors vinculen la validesa de la garantia a la contractació d'un servei de manteniment a llarg termini. Aquesta pràctica pot aportar beneficis, com ara incrementar la fiabilitat i assegurar el rendiment previst de la instal·lació. **En definitiva, la garantia és un factor determinant a l'hora de comparar el cost d'una bateria amb el rendiment que assegura.** Per tant, és imprescindible que les condicions sota les quals s'avaluarà la garantia, així com la independència del mètode de mesurament, quedin detallades de manera inequívoca en els termes i condicions contractuals.

2.3 Anàlisi de costos, paràmetres de funcionament i esperança de vida de les tecnologies presents en el mercat

2.3.1 Anàlisi de costos

L'anàlisi de costos de les tecnologies de bateries per a sistemes d'emmagatzematge d'energia estacionari és un aspecte crucial per a la presa de decisions en la selecció de la tecnologia més adequada per a una aplicació específica. Els costos dels sistemes d'emmagatzematge d'energia es divideixen principalment en la inversió inicial i les despeses operatives i de final de vida.

- El **Cost Instal·lat ESS** representa la despesa de capital (CAPEX) i agrupa:
 - Bloc d'Emmagatzematge CC: les cel·les o mòduls de bateria
 - BOS (*Balance Of the System*) d'Emmagatzematge CC: elements auxiliars del sistema com bastidors, cablejat CC, seguretat
 - Equipament de Potència i el convertidors/inversors
 - Integració de Sistemes

- Costos d'EPC (*Engineering, Procurement and Construction*) Enginyeria, adquisició i construcció
- **Desenvolupament del Projecte:** planificació, permisos
- **Integració a la Xarxa** elèctrica.

La suma total es reflecteix en el **Cost Total Instal·lat**, sovint expressat per capacitat energètica (€/kWh) i potència (€/kW).

- Un cop en funcionament, sorgeixen els **Costos Operatius (OPEX)**, que inclouen:
 - O&M Fix: operació i manteniment periòdic; i,
 - La Garantia segons la tecnologia.
- Finalment, s'han de preveure els **costos** associats al **final de la vida útil**, com el Reciclatge/Eliminació, que apareixen dins dels costos operatius o com a Costos de Desmantellament específics. [16]

Costos instal·lat ESS

El cost de les diferents tecnologies de bateries varia significativament. Segons [26] el cost per kWh de capacitat per a les bateries de flux redox se situa entre 400 i 700 dòlars, mentre que la mitjana per a les bateries de ions de liti era de 160 dòlars i per a les bateries de plom-àcid oscil·lava entre 100 i 300 dòlars.

Les dades consultades a abril de 2025 a la província de Barcelona indiquen que les bateries de ió de liti bones i instal·lades, amb Iva inclòs, poden rondar **els 690 i 1.700 Euros** per 10 kWh de capacitat segons si garanteixen entre 3.000 a 10.000 cicles i entre **450 i 600 Euros** per instal·lacions ja molt més grans de 400 kWh de capacitat i també segons si són de 3.000 i 10.000 cicles. Aquests preus són orientatius i variaran també segons l'instal·lador, any, etc Aquests preus inclouen instal·lació i IVA.

Abril 2025		Preus orientatius amb IVA de instal·lació de la bateria per kWh de capacitat								
		Capacitat de la bateria (kWh)								
		5	10	20	30	40	60	100	200	400
Preu bateries en €/kWh de	5000 cicles	935 €	665 €	629 €	609 €	514 €	565 €	504 €	454 €	454 €
Preu bateries en €/kWh de	10000 cicles	1,868 €	1,790 €	1,290 €	1,167 €	1,067 €	925 €	726 €	605 €	605 €

Tot i això, aquests costos estan subjectes a canvis i han tendit a disminuir amb el temps, especialment per a les bateries de ions de liti, com es mostra a la figura realitzada amb les dades de bateries per a EV de BloombergNEF. Es preveu que els costos de les bateries de ions de liti continuïn baixant en el futur. Un estudi de 2024 indica que el cost global de projectes d'emmagatzematge amb bateries va caure un terç, fins a 104 dòlars per kWh, degut a un excés d'oferta i a la disminució de les vendes de vehicles elèctrics, que va abaratir els paquets de bateries.

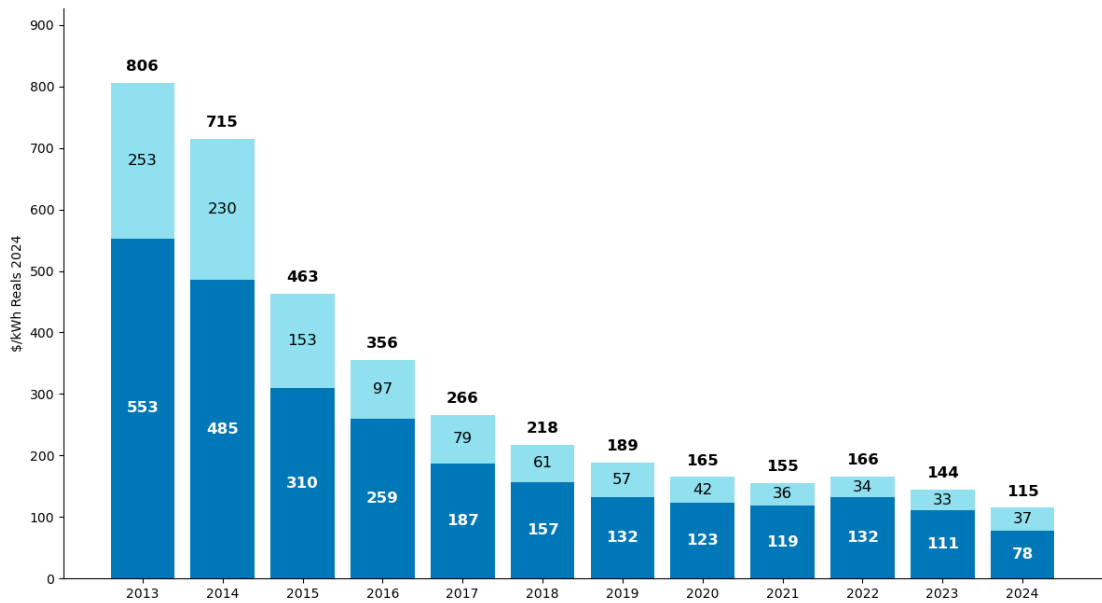


Fig. 7. Evolució dels preus de les bateries (Blau fosc: preu cel·les, blau clar: preu paquet de bateries)

Costos de Manteniment i Operació

Els costos de manteniment i operació varien segons la tecnologia de la bateria. Per exemple, les bateries de plom-àcid líquides poden requerir revisions periòdiques del nivell d'electròlit. Les bateries de ions de liti solen tenir requisits de manteniment més baixos, però poden necessitar sistemes de gestió tèrmica per garantir un funcionament segur i eficient (bàsicament bombes de calor per mantenir-les a una temperatura constant). Els costos operatius inclouen les pèrdues d'energia que es produeixen durant els cicles de càrrega i descàrrega, que estan relacionades amb l'eficiència d'anada i tornada de la bateria.

Costos de Reemplaçament i Reciclatge

Les bateries tenen una vida útil limitada i eventualment necessiten ser reemplaçades. El cost de reemplaçament depèn de la tecnologia i de la taxa de degradació de la bateria. Per exemple, les bateries de plom-àcid solen tenir una vida útil més curta en comparació amb les bateries de ions de liti en certes aplicacions. El reciclatge de bateries està guanyant importància tant per raons mediambientals com econòmiques. El procés de reciclatge pot comportar costos, però també pot generar ingressos per la recuperació de materials valuosos com el liti, el cobalt i el níquel.

2.4 Paràmetres de Funcionament de les Tecnologies de Bateries

Els paràmetres de funcionament són crucials per avaluar la idoneïtat de cada tecnologia de bateria per a aplicacions d'emmagatzematge estacionari. Aquests paràmetres inclouen la intensitat de càrrega i descàrrega, l'eficiència energètica, la sensibilitat a la temperatura i el rang de temperatura operacional, així com la densitat d'energia i potència.

- **Intensitat de Càrrega i Descàrrega:** Les bateries de ions de liti es poden carregar més ràpidament que les bateries de plom-àcid i les bateries de flux
- **Eficiència Energètica (d'anada i tornada):** Les bateries de ions de liti poden assolir una eficiència d'anada i tornada entre el 85% i el 95%. Les bateries de plom-àcid tenen una eficiència d'entre el 70% i el 90%. Les bateries de flux tenen una eficiència d'anada i tornada en aplicacions pràctiques al voltant del 70-80%.
- **Sensibilitat i Rang de Temperatura Operacional:** La temperatura té un impacte significatiu en el rendiment, la vida útil i la seguretat de les bateries. Les bateries de ions de liti tenen un rang acceptable de -20 °C a 60 °C, però el seu rendiment òptim se situa entre 15 °C i 35 °C. Les bateries de plom-àcid operen en un rang similar, de -20 °C a 60 °C. Les temperatures extremes poden provocar una reducció de la capacitat i accelerar la degradació de les bateries de ions de liti.
- **Densitat d'Energia i Potència:** La densitat d'energia es refereix a la quantitat d'energia que una bateria pot emmagatzemar per unitat de massa o volum. Les bateries de ions de liti tenen una alta densitat d'energia, típicament entre 150 i 250 Wh/kg. Les bateries de plom-àcid per exemple tenen una densitat d'energia molt inferior, de 30 a 40 Wh/kg.

2.5 Esperança de Vida de les Tecnologies de Bateries

L'esperança de vida de les bateries per a sistemes d'emmagatzematge estacionari és un factor crític per a l'anàlisi de costos a llarg termini. Aquesta esperança de vida es pot expressar en termes de vida útil en cicles i vida útil en anys (*calendar lifetime*), i està influenciada per diversos factors.

- **Vida Útil en Cicles:** La vida útil en cicles es refereix al nombre de cicles de càrrega i descàrrega que una bateria pot suportar abans que la seva capacitat disminueixi per sota d'un cert lílindar (normalment el 80% de la capacitat original). Les bateries de ions de liti poden suportar aproximadament 2.000 cicles de càrrega-descàrrega. Algunes químiques de liti-ió, com el LiFePO₄, poden arribar a 10.000 cicles. Les bateries de plom-àcid solen tenir una vida útil en cicles més curta, que pot variar entre 500 i 800 cicles. Les bateries de flux destaquen per la seva llarga vida útil en cicles, que pot oscil·lar entre 15.000 i 20.000 cicles. La profunditat de descàrrega (DoD) té un impacte significatiu en la vida útil en cicles; descàrregues més profundes solen reduir el nombre de cicles que una bateria pot completar.
- **Vida útil en anys (*calendar lifetime*):** La vida útil en anys es refereix al temps que una bateria pot funcionar abans de fallar o degradar-se fins a un nivell inacceptable, independentment del nombre de cicles que hagi experimentat. La vida útil calendari de les bateries de ions de liti pot ser de 10 a 20 anys. Les bateries de plom-àcid estacionàries poden arribar a tenir una vida útil de fins a 20 anys.

Existeixen diversos factors influeixen en la durada i la degradació de les bateries. **La temperatura és un factor clau; les temperatures extremes, tant altes com baixes, poden accelerar la degradació i reduir la vida útil.** La profunditat de descàrrega també té un impacte important, especialment en les bateries de plom-àcid, on descàrregues profundes repetides poden escurçar la vida útil. Les taxes de càrrega i descàrrega elevades, la sobrecàrrega i la sobre descàrrega també poden contribuir a la degradació de la bateria. Un manteniment adequat, com ara el control dels nivells d'electròlit en les bateries de plom-àcid inundades i la prevenció de la sulfatació, és fonamental per maximitzar la vida útil. Els sistemes de gestió de bateries (BMS) juguen un paper crucial en la monitorització i la protecció de les bateries, optimitzant el seu rendiment i allargant la seva vida útil. En el cas de les bateries de flux, factors com la tensió límit superior i l'equilibri de l'electròlit poden afectar la degradació.

2.6 Comparativa de Tecnologies de Bateries per a Aplicacions d'Emmagatzematge Estacionari: Costos, Rendiment i Vida Útil

La *Taula 2* proporciona una comparativa dels paràmetres de funcionament i de l'esperança de vida de les principals tecnologies de bateries per a aplicacions d'emmagatzematge estacionari.

Aquesta taula ofereix una visió general de les característiques principals de cada tecnologia. La selecció de la tecnologia més adequada dependrà de les necessitats específiques de l'aplicació, incloent-hi el pressupost, els requisits de rendiment i la vida útil esperada.

Per exemple, les bateries de ions de liti són una opció popular per a una àmplia gamma d'aplicacions, gràcies al seu bon equilibri entre cost, rendiment i durabilitat. Les bateries de plom-àcid poden ser adequades per a aplicacions on el cost inicial és una prioritat i la densitat energètica no és crítica.

Taula 2 Comparativa de Paràmetres de Rendiment

Paràmetre	Ions de Liti	Pom-Àcid
Densitat Energia (Wh/kg)	100-250	30-40
Densitat Potència (W/kg)	1000-4000	150-200
Eficiència (d'anada i tornada)	85-95%	80-90%
Vida Útil en Cicles (80% DoD)	1000-8000	500-1500
Vida Útil Calendari (anys)	8-20	5-10
Rang Temperatura (°C)	-20 a 60	-20 a 60

2.7 Tecnologies futures

En els pròxims anys s'espera que les bateries de ions de liti continuïn dominant el mercat a curt i mitjà termini. Una de les millores més prometedores per a les bateries de es basa en l'ús d'elèctrodes negatius de silici. El silici pot augmentar significativament la densitat energètica de les bateries en comparació amb la utilització del grafit actual.

No obstant això, les limitacions de les bateries de en termes de disponibilitat de liti, cost i impacte ambiental han impulsat la recerca de noves químiques que podrien complementar o fins i tot substituir aquestes bateries en determinades aplicacions. Entre aquestes alternatives hi ha les bateries de ions de sodi, les bateries d'estat sòlid, les bateries metall-aire i les bateries de liti sofre.

Ions de sodi

Les bateries de sodi funcionen de manera similar a les bateries de liti. Els materials dels elèctrodes varien segons la química específica de la bateria. Els elèctrodes positius solen estar compostos per òxids metàl·lics amb sodi, mentre que els negatius poden ser de carbó dur o altres materials a base de carboni. L'electròlit sol ser una solució de sals de sodi dissoltes en un dissolvent orgànic.

Tot i que actualment tenen una densitat energètica menor, les bateries de sodi destaquen per la seva disponibilitat de materials, menor cost i sostenibilitat, ja que el sodi és molt més abundant que el liti. **Per això, s'estan desenvolupant activament com a opció competitiva per a l'emmagatzematge estacionari d'energia i, en el futur, podrien ser una alternativa viable per a la mobilitat elèctrica.**

Bateries d'estat sòlid

Les bateries d'estat sòlid representen una evolució respecte a les bateries de convencionals, ja que substitueixen l'electròlit líquid per un electròlit sòlid. Aquesta modificació elimina el risc de fuites i redueix la inflamabilitat, fent-les més segures. A més, poden permetre l'ús d'elèctrodes de metall de liti, que augmenten la densitat energètica i milloren la vida útil de la bateria.

No obstant això, la seva implementació encara presenta desafiaments, com ara la compatibilitat entre l'electròlit sòlid i els materials dels elèctrodes o la dificultat de fabricar-les a escala industrial amb costos competitius. Malgrat aquests obstacles, diverses empreses i institucions de recerca estan treballant activament en el desenvolupament de tecnologies d'estat sòlid, i s'espera que en la pròxima dècada comencin a tenir un paper rellevant en el mercat de les bateries.

Bateries de metall-aire

Les bateries metall-aire es basen en una reacció electroquímica entre un metall (com el liti, zinc, alumini, etc.) i l'oxigen de l'aire. Aquestes bateries tenen un potencial teòric de densitat energètica molt superior a les de , cosa que les fa especialment atractives per a aplicacions de llarga durada i alta capacitat.

Un exemple destacat és la bateria de liti-aire, que podria arribar a densitats energètiques comparables a les dels combustibles fòssils. No obstant això, les bateries metall-aire encara es troben en una fase inicial de desenvolupament, amb desafiaments com la degradació dels materials i l'eficiència dels processos de recàrrega. Una alternativa que de fet és més madura que la de Li-aire, és la de zinc-aire. Els avantatges d'aquestes bateries són l'abundància, seguretat i cost reduït del zinc, i la seva densitat energètica. Però, les bateries de -aire tenen

desafiaments com incrementar la vida útil i eficiència de recàrrega. També existeixen altres alternatives de bateries de metall-aire en desenvolupament com les d'alumini-aire, ferro-aire o sodi-aire.

Bateries de Liti sofre

Són bateries que utilitzen sofre com a material per a l'elèctrode positiu i liti per al negatiu. Aquest sistema ofereix una capacitat teòrica molt alta, cosa que podria permetre bateries amb una densitat energètica superior a les de actuals. A més, el sofre és un material abundant i econòmic, la qual cosa redueix l'impacte ambiental i cost global de la bateria.

Tanmateix, aquestes bateries tenen algunes limitacions crítiques, com la seva curta vida útil. Actualment, la investigació en aquest camp se centra en la millora de la durabilitat i l'estabilitat de la bateria mitjançant nous dissenys d'elèctrodes i electròlits [27].

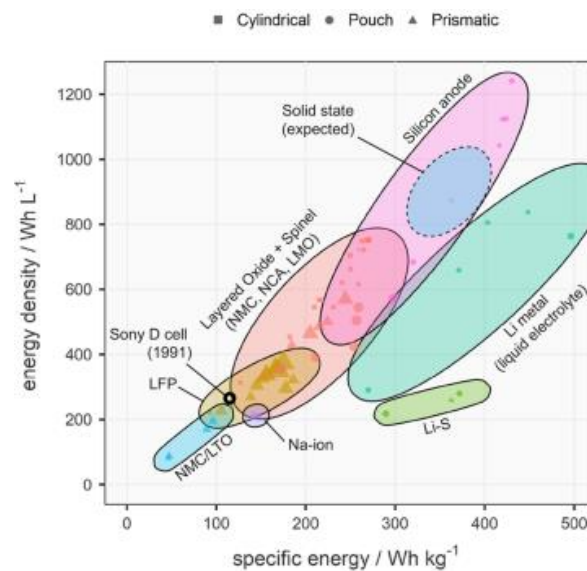


Fig. 8 tecnologia i densitat d'energia

3. Integració de les bateries en instal·lacions existents

Aquest capítol presenta quins són els diferents nivells de gestió de la bateria per tal de determinar les diferents opcions d'integració en les instal·lacions d'autoconsum.

3.1 Anàlisi de la integració tècnica de bateries en instal·lacions d'autoconsum

Per a la integració de les bateries en una instal·lació calen diversos components com es pot veure a la Fig. 9:

- El sistema de gestió de les bateries (Sigles en anglès -BMS)
- El Convertidor de potència o inversor
- El Sistema de gestió d'energia. (Sigles en anglès -EMS)

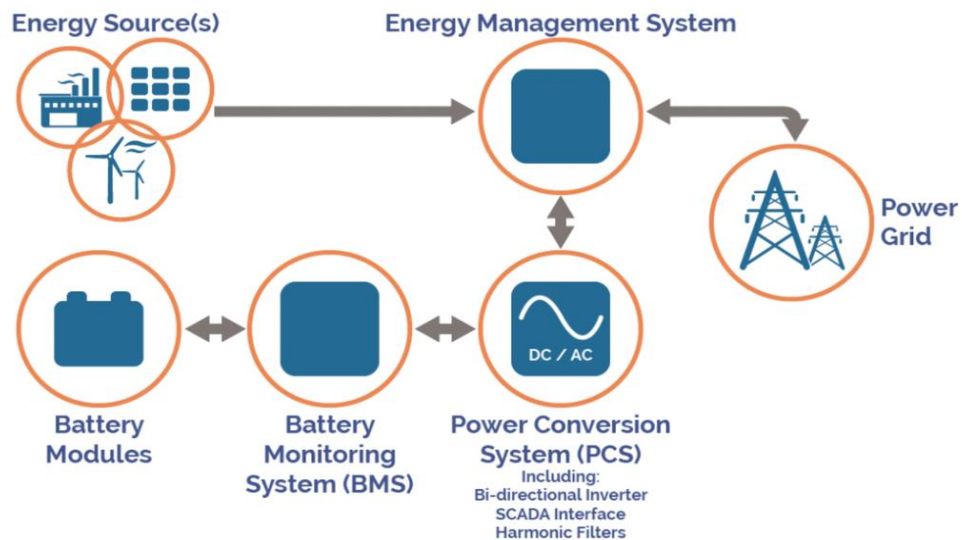


Fig. 9 esquema d'instal·lació de bateries [28]

Sistema de gestió de les bateries (BMS)

El rendiment, ús i seguretat d'un paquet de bateries són supervisats i gestionats per un sistema de gestió de bateries (BMS, per les seves sigles en anglès), un dispositiu electrònic intel·ligent. És un component crucial de la tecnologia de bateries moderna, especialment en aplicacions per a bateries de ions de liti. El BMS s'encarrega de diverses funcions, com el seguiment de la temperatura, el voltatge, l'estat de salut (SoH) i l'estat de càrrega (SoC) de cada cel·la en un paquet de bateries. També ofereix protecció contra situacions que poden danyar la bateria, com la sobrecàrrega, la descàrrega excessiva, els curtcircuits i desbordament la fuita tèrmica. En la figura es resumeixen les funcionalitats del BMS. Una descripció més detallada es pot trobar a l'annex del capítol 3.

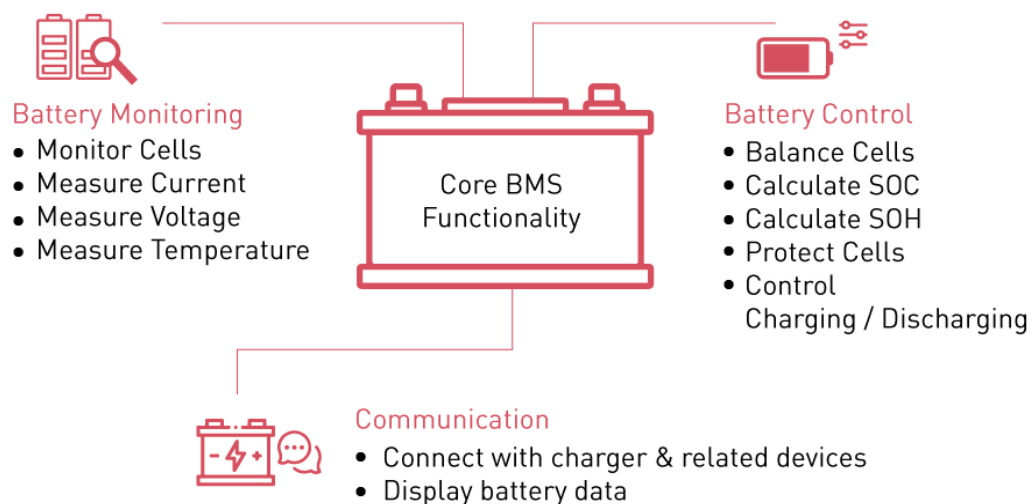


Fig. 10 esquema control BMS [29]

Convertidor de potència

El **convertidor de potència** o **inversor** és un dispositiu electrònic essencial en sistemes d'energia renovable, ja que permet transformar la tensió contínua (DC) generada per panells solars o emmagatzemada a les bateries en tensió alterna (AC), apta per al consum domèstic o per a la seva injecció a la xarxa elèctrica. En el següent apartat es definiran els principals tipus d'inversors utilitzats habitualment: l'**inversor DC-AC per a connexió a xarxa (Grid-Tie)**, l'**inversor DC-AC per a bateries**, i l'**inversor-carregador híbrid (tot en un)**, que integra diverses funcionalitats en un sol equip.

Energy Management System (Sistema de gestió energètica)

Els EMS poden comptar amb diferents mòduls que operen de forma coordinada depenent de la complexitat del sistema a gestionar (Fig. 11). Una arquitectura força completa seria la següent:

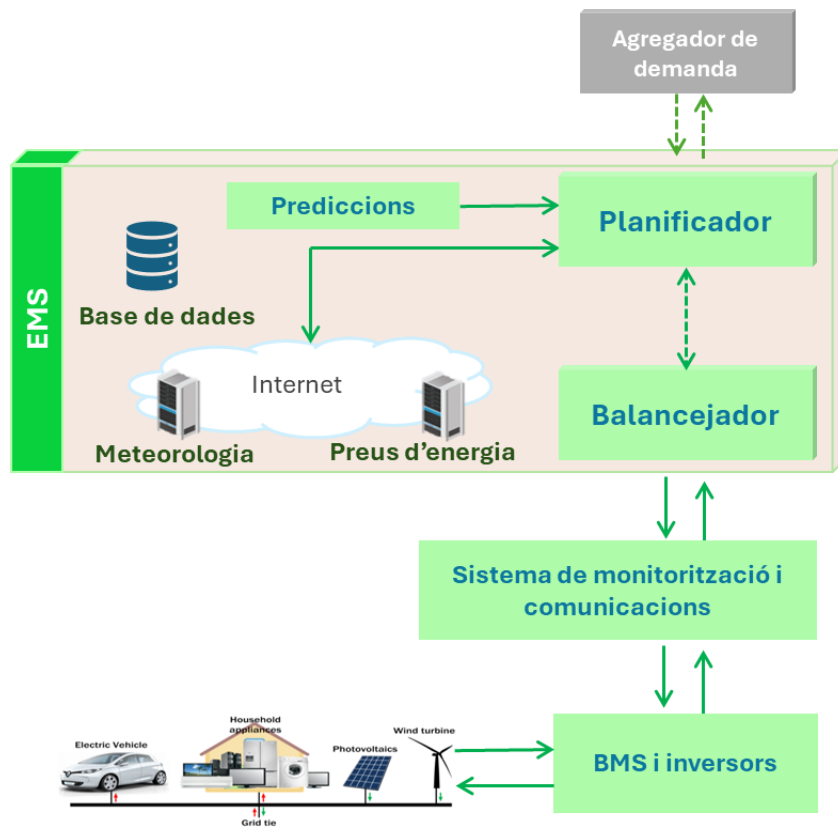


Fig. 11: Arquitectura EMS.

Per a la planificació hi ha diferents opcions diferenciades. La primera, és que sigui la pròpia instal·lació qui porti aquesta funció. L'alternativa és que es faci de forma externalitzada des d'un agregador de demanda. Les definicions de cadascun dels diferents mòduls estan incloses a l'Annex 3.

3.2 Opcions de configuració del sistema

Pel que fa a les diferents opcions de configuració del sistema cal diferenciar, per una part, en l'elecció de hardware que s'instal·larà per tal d'integrar el sistema fotovoltaic amb les bateries i, per altra banda, la connexió de les bateries a la xarxa.

3.2.1 Integració sistema fotovoltaic amb bateries

Existeixen diverses configuracions per integrar panells solars, bateries i la conversió d'energia en un sistema eficient i flexible. L'elecció adequada dependrà de les necessitats energètiques, la infraestructura existent i els objectius d'ús del sistema. A continuació, es descriuen els components clau i les principals opcions:

- **Inversor DC-AC (Connexió a Xarxa o Grid-Tie).** Aquest tipus d'inversor converteix l'energia generada pels panells solars (corrent contínua, DC) en corrent altern (AC), que pot ser utilitzada directament per electrodomèstics o injectada a la xarxa elèctrica.

Avantatges	Ideal per a instal·lacions on la xarxa elèctrica està sempre disponible. Permet reduir el consum elèctric provinent de la xarxa.
Desavantatges	No té capacitat per connectar bateries directament.
Aplicació	S'utilitza en instal·lacions solars orientades únicament a l'autoconsum o la injecció d'excedents a la xarxa elèctrica

- **Controlador MPPT (DC-DC) El controlador MPPT ("Maximum Power Point Tracking").** Optimitza la captació d'energia dels panells solars ajustant dinàmicament la tensió per carregar bateries de manera eficient.

Avantatges	Alta eficiència, propera al 99%. Permet carregar directament un banc de bateries des dels panells solars.
Desavantatges	Requereix un inversor addicional per convertir l'energia emmagatzemada (DC) en corrent altern (AC).
Aplicació	Ideal en sistemes que prioritzen l'emmagatzematge energètic i la gestió eficient de les bateries.

- **Inversor DC-AC (Per a bateries).** Converteix la corrent contínua (DC) emmagatzemada en un banc de bateries a corrent altern (AC) per alimentar càrregues elèctriques.

Avantatges	Permet subministrar energia en cas de talls elèctrics.
Desavantatges	No admet connexió directa amb panells solars. Necessita ser combinat amb un controlador MPPT per a sistemes solars.

Aplicació	S'utilitza en sistemes aïllats o com a suport energètic en situacions d'emergència.
------------------	---

- **Inversor-Carregador Híbrid (Tot en un).** Aquest dispositiu combina les funcions d'inversor DC-AC, carregador de bateries i controlador solar MPPT en un sol equip.

Avantatges	<p>Connexions tant en DC (per a panells solars i bateries) com en AC (per alimentar càrregues elèctriques).</p> <p>Pot gestionar automàticament la font d'energia més convenient (xarxa, bateries o panells).</p> <p>Simplifica la instal·lació i la gestió del sistema.</p>
Desavantatges	Sol ser més costós que els components individuals.
Aplicació	Ideal per a sistemes que requereixen flexibilitat i eficiència, permetent l'ús simultani d'energia solar i emmagatzematge en bateries.

Recomanacions segons la situació.

- **Si ja existeix una instal·lació solar fotovoltaica amb inversor DC-AC (grid-tie):** Afegir bateries pot requerir un inversor-carregador híbrid per gestionar l'emmagatzematge i la conversió d'energia o bé substituir l'existent per un inversor – carregador híbrid.
- **Si el sistema és nou:** El més eficient és optar per un sol inversor híbrid, que permeti connexions tant en DC com en AC (gestió càrrega i descàrrega de les bateries i de la fotovoltaica).
- **Si l'objectiu és la màxima eficiència:** Es recomana connectar els panells solars a un controlador MPPT i a les bateries, seguit d'un inversor DC-AC per alimentar les càrregues elèctriques (bateries a consum).

3.3 Configuració de connexió de bateries a xarxa contemplades per la legislació

Per altra banda, un cop elegit el tipus de dispositiu de hardware que s'instal·larà cal tenir en compte les diferents opcions connexió de les bateries a la xarxa, ja sigui interna o de distribució, que contempla la normativa actual [30]. En aquest sentit, cal mencionar que les configuracions permeses són les mateixes tant si es tracta d'una instal·lació individual com col·lectiva. D'aquesta manera les opcions són:

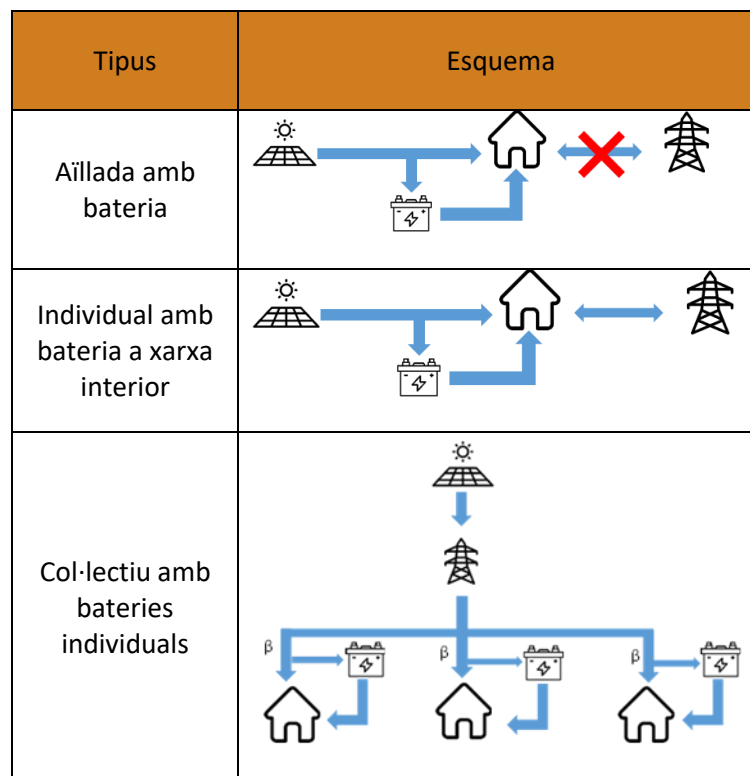
1. **Sistemes d'emmagatzematge connectat rere del comptador del consumidor:** Aquest model d'emmagatzematge consisteix en el fet que el consumidor individual o, cada consumidor dins d'un autoconsum col·lectiu, instal·li la seva pròpia bateria rere del comptador. Això permet gestionar individualment l'energia generada i emmagatzemada sense compartir un sistema centralitzat.

Alguns dels beneficis de la configuració són la possibilitat de poder gestionar la bateria de forma autònoma i obtenir estalvis en la potencia contractada del consumidor, ja

que, la bateria pot reduir els pics de potència evitant haver de contractar una potència major.

Per altra banda, els principals inconvenients són les restriccions per injectar energia a la xarxa (requereix de capacitat d'accés i una connexió concedida) i finalment que té un tractament regulatori similar al de la generació.

En casos d'autoconsum compartit, el principal avantatge d'aquest model és que no requereix d'una inversió obligatòria de tots els usuaris, cada usuari pot decidir si inverteix o no en un sistema d'emmagatzematge. Alhora, implica un increment en el cost de la inversió (instal·lacions separades).

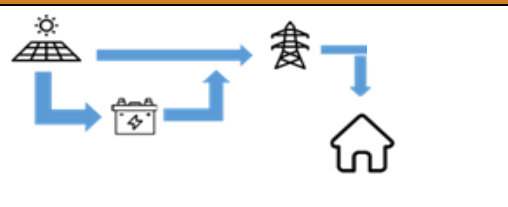
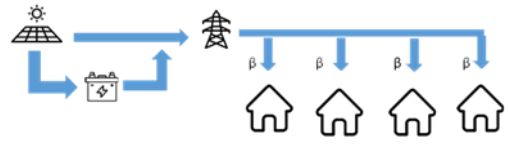


- Hibridació fotovoltaica + emmagatzematge amb mateix equip de mesura (rere del comptador):** A causa de la normativa vigent (DT 5a RD 244/2019), en instal·lacions on no aplica la ITC-BT-52 o ITC-BT-40, les bateries poden vincular-se directament a la instal·lació de generació en un autoconsum a través de la xarxa de distribució. Això implica que la bateria i la fotovoltaica comparteixen equip de mesura i proteccions.

Aquesta configuració és útil per optimitzar l'autoconsum diferint l'exportació d'energia i millorant l'autoconsum de l'energia generada. Concretament, aquesta

tipus de configuració es beneficiosa en cas d'autoconsums col·lectius ja que es realitza una inversió conjunta per part de tots els participants.

Per altre banda, el model presentat té certes limitacions com no permetre la reducció de pics de potència ja que es consumeix de la xarxa de distribució. A la vegada, tots els membres de l'autoconsum col·lectiu han d'estar d'acord per invertir en l'emmagatzematge, cosa que complica la implementació.

Tipus	Esquema
Instal·lació individual a través de xarxa	
AC col·lectiu i bateria col·lectiva	

4. Dimensionat de la bateria

El dimensionament de bateries no és un càlcul directe, no només s'han de tenir en compte els factors quantitius de la instal·lació, si no que també hi ha un pes important dels factors qualitius. Així, per exemple, no es pot fer un bon dimensionament de les bateries únicament tenint en compte la potència fotovoltaica instal·lada i el consum, es necessitarà saber també com es consumeix i com s'aprofita aquesta energia fotovoltaica.

4.1 Establiment dels criteris necessaris per dimensionar una bateria

El dimensionament d'un sistema de bateria dependrà molt de cada cas d'estudi, pel que la millor solució pot no ser la mateixa per casos aparentment similars. Per això és important tenir clars quins són els factors que poden condicionar la idoneïtat d'incorporar una o altra bateria en la instal·lació d'autoconsum fotovoltaic (existent o a implementar).

En primer lloc, les característiques bàsiques a tenir en compte alhora d'elegir quin és el sistema d'emmagatzematge d'energia que millor s'adapta a les necessitats de la instal·lació són les següents:

- Capacitat (kWh)
- Potència (kW) o C-Rate (1/h)
- Estat de càrrega (SoC) màxim i mínim o profunditat de càrrega (DoD) (%)

- Eficiència de la bateria (%)
- Nombre de cicles de vida útil

En aquest sentit, cal mencionar que el que acaba definint el dimensionament de la bateria és la capacitat de la bateria. Tot i això, la resta de paràmetres també poden influir en la decisió final.

En qualsevol cas, per poder extreure la capacitat de la bateria és necessari avaluar de forma quantitativa i qualitativa les dades de consum i generació de la instal·lació (més consideracions a l'Annex del capítol 4):

- Dades de consum:
 - Corba de consum de l'edifici horària/quart horària
 - Preu de consum (€/kWh o €/MWh)
- Dades de generació:
 - Corba de generació horària/quart horària
 - Preu de compensació d'excedents (€/kWh o €/MWh)

Així, la bateria té un cost de càrrega, ja sigui per deixar de percebre la compensació d'excedents si es carrega d'excedents o de pagar per consumir si es carrega de xarxa. I per l'altre costat, hi ha uns potencials estalvis que provenen d'evitar consumir de la xarxa en el moment que es descarrega la bateria.

Amb tot, creuant les corbes de generació i consum (amb l'estalvi/cost associat) s'extreuen els següents indicadors que ens permeten avaluar quina bateria encaixa millor segons les prioritats de la instal·lació:

- Autoconsum (%)
- Autosuficiència (%)
- Cicles de la bateria durant el període de temps avaluat
- Estalvis aconseguits (€)

Així, de forma resumida a la següent Taula 3 es pot veure que amb unes dades de partida de generació i consum s'extreuen uns indicadors operacionals que acabaran definit els paràmetres tècnics de la bateria que millor s'escaigui a la instal·lació.

Taula 3 Dades i paràmetres per escollir una bateria

Dades a introduir	Indicadors operacionals calculats	Paràmetres tècnics a determinar
<ul style="list-style-type: none"> ● Corba consum ● Preu consum ● Corba generació ● Preu compensació excedents 	<ul style="list-style-type: none"> ● Rati autoconsum ● Rati autosuficiència ● Cicles de la bateria ● Estalvis aconseguit 	<ul style="list-style-type: none"> ● Capacitat ● Potència ● Profunditat de descàrrega (DoD) ● Nombre cicles vida útil

5. Gestió de la instal·lació amb bateries

Les bateries, com a element flexible per definició, presenten un ampli ventall de potencials beneficis depenent de quina gestió se'n faci. Aquest capítol presenta diferents casos de gestió de les bateries associades a una instal·lació d'autoconsum tenint en compte el que es necessita en cada cas i els potencials beneficis. A més a més, també es fa una visió més concreta de la figura de la bateria en instal·lacions d'autoconsum col·lectiu.

5.1 Casos d'ús existents per la gestió de la demanda en escenaris amb autoconsum i sistemes d'emmagatzematge

Com s'ha mencionat anteriorment, les bateries com a element flexible poden tenir múltiples configuracions i objectius. D'aquesta manera, si es considera la configuració d'una bateria associada a una instal·lació fotovoltaica d'autoconsum, es poden extreure els següents casos d'ús Taula 4:

Taula 4 Configuracions i casos d'ús

Autoconsum	Arbitratge de preus	Reducció pics de consum	Serveis de regulació de la xarxa
<ul style="list-style-type: none">● Permet aprofitar l'energia excedentària de la instal·lació FV.● S'obtenen estalvis gràcies a tenir un menor consum de xarxa.● Millora el rati d'autoconsum i d'autosuficiència.	<ul style="list-style-type: none">● Permet evitar consumir en moments que el preu és elevat.● Pot existir tant si la bateria consumeix de xarxa o com si només ho fa d'excedents.● Permet fer un ús més intel·ligent de l'energia emmagatzemada a la bateria.● Va molt vinculat al tipus de contracte de consum elèctric.	<ul style="list-style-type: none">● Permet reduir pics de consum i els seus costos associats (excessos de potència).● Pot evitar obres de millora i ampliació del punt de connexió a xarxa.	<ul style="list-style-type: none">● Permet donar serveis a la xarxa elèctrica a canvi d'una remuneració econòmica.● Es requereix complir les condicions i tenir els permisos adients de l'operador del sistema elèctric (<i>Red Eléctrica Española</i>)

En aquest punt cal mencionar que els Sistemes de Gestió d'Energia (EMS per les seves sigles en anglès) s'erigeixen com una peça clau per poder assolir l'objectiu de la bateria. De fet, un Sistema de Gestió de l'Energia pot permetre a un sistema de bateries tenir més d'un objectiu alhora. De fet, amb alguns Sistemes de Gestió d'Energia es pot participar en els 4 casos d'ús mencionats.

Dels diferents casos d'ús anteriors s'ha de **separar**, per una banda, **els que es poden fer rere del comptador** sense necessitat de tenir més permisos per part de l'operador del sistema (*Red Eléctrica Española*) i **els que són per davant del comptador** que donen un servei a nivell de xarxa.

- **Casos darrere del comptador** (BTM per les sigles en anglès): són independents del sistema de distribució de la xarxa elèctrica. L'objectiu principal dels casos d'ús rere el comptador sempre és reduir el cost energètic provinent del contracte elèctric. Aquest ús de la flexibilitat intrínseca de les bateries s'anomena flexibilitat implícita i s'hi poden incloure els següents casos d'ús: Autoconsum, Arbitratge de preus, Reducció pics de potència.
- **Casos davant del comptador** (FTM per les sigles en anglès): es tracta del cas d'ús de Serveis de regulació de la xarxa. Aquest serveis de regulació de la xarxa consisteixen en aprofitar la flexibilitat de la bateria per evitar problemes relacionats en congestions, voltatge, freqüència o desviaments. D'aquesta manera, és l'operador del sistema (*Red Eléctrica Española*) qui els gestiona segons les necessitats de cada moment i, per tant, per poder participar-hi és necessari complir amb els requisits d'aquests mecanismes. Aquest ús de la flexibilitat de la bateria és el que s'anomena flexibilitat explícita.

Si es vol més informació sobre els casos d'ús tant darrere del comptador (flexibilitat implícita) com davant del comptador (flexibilitat explícita) es pot consultar l'apartat que parla sobre aquest tema a l'Annex del capítol 5.

5.2 Casos d'ús previstos en el full de ruta de la regulació espanyola

En el full de ruta de la Unió Europea s'ha determinat el paper de les bateries elèctriques dins del programa energètic per poder arribar als objectius marcats de cara al futur com a clau. Es defineix així el paper de les bateries com una peça fonamental de cara a l'ús de les renovables com a energia principal del mix elèctric i l'estabilització del sistema elèctric. En aquest sentit, el març de 2023, la UE va emetre una sèrie de directives amb l'objectiu de catalitzar l'adopció massiva de sistemes d'emmagatzemament elèctric dins l'àmbit europeu [30].

Dins l'àmbit de l'estat espanyol, el Pla Nacional Integrat d'Energia i Clima (PNIEC) 2021-2023 estableix les fites de reducció de gasos d'efecte hivernacle, augmentar l'adopció d'energies renovables i millorar l'eficiència del sistema. Dins d'aquest pla, es contempla l'ús de sistemes d'emmagatzematge elèctric com a eina per poder donar la flexibilitat que el sistema basat sobre l'energia renovable que es necessita per poder complir amb els objectius marcats.

Per altra banda, la flexibilització dels requisits per a poder participar en la regulació de la xarxa **obre la porta a una participació a gran escala dels sistemes de bateries dins d'aquests serveis**. Perquè això sigui possible és imprescindible que l'agregació de la demanda entri a participar en els serveis de regulació de la xarxa, és a dir, que diferents punts de subministrament puguin participar en aquests serveis de forma conjunta mitjançant la figura de l'**agregador**. En aquest sentit, durant els pròxims mesos es preveu que:

- S'obri la figura de l'agregador independent a Espanya. Aquesta figura ja reconeguda en altres països de la UE (França, Bèlgica, Països Baixos...) permetrà la participació de l'agregació de la demanda per punts de subministrament que no comparteixin la mateixa companyia comercialitzadora d'electricitat.
- Es permet l'agregació de la demanda en el Servei de Resposta Activa de la Demanda (SRAD), permetent que agregacions de consums menors d'1MW de consum hi puguin participar.

5.3 Anàlisi de les implicacions dels diversos casos d'ús en la gestió òptima i els potencials beneficis

L'any 2024, l'associació per a l'agregació i flexibilitat a Espanya (coneguda com "Entra") va elaborar un informe on es desglossen les diferents implicacions que tenen cada un dels casos considerats segons si es tracta d'una bateria instal·lada dins del sector residencial/comercial, industrial o col·lectiu [30]. D'aquesta manera, a la següent taula es fa un resum de les implicacions per cas d'ús i sector Taula 5.

En la majoria de casos les bateries a l'administració pública i a les comunitats energètiques es fan servir principalment per a l'autoconsum, però **cal anar més enllà i potenciar tots els usos possibles**, per garantir una major flexibilitat i estabilitat al sistema, a més d'optimitzar l'ús de l'energia elèctrica.

Taula 5 Casos d'ús i sectors

Cas d'ús\Sector	Residencial/Comercial	Industrial	Col·lectiu (bateria i generació al mateix comptador)
Autoconsum	<ul style="list-style-type: none"> ● Aprofitar excedents que no es poden abocar, en cas d'injecció 0. ● Principal ús de la bateria en la majoria de casos. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Aprofitar excedents que no es poden abocar, ja que, la majoria d'instal·lacions són de més de 100 kWp. ● Principal ús de la bateria en la majoria de casos. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Se solen adherir a la compensació simplificada d'excedents. ● Principal ús de la bateria en la majoria de casos.
Arbitratge de preus	<ul style="list-style-type: none"> ● Si la bateria consumeix de xarxa aquesta ha d'estar associada al mateix contracte de subministrament amb la comercialitzadora. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Si la bateria consumeix de xarxa, aquesta ha d'estar dins el contracte del mateix punt de subministrament o amb un de nou. 	<ul style="list-style-type: none"> ● És necessari un contracte de subministrament específic per la bateria, el que no permet adherir-se a la modalitat de compensació d'excedents.
Reducció de pics	<ul style="list-style-type: none"> ● Evita contractar més 	<ul style="list-style-type: none"> ● És una alternativa 	<ul style="list-style-type: none"> ● No és possible, ja

Cas d'ús\Sector	Residencial/Comercial	Industrial	Col·lectiu (bateria i generació al mateix comptador)
de potència	potència.	per no haver d'invertir en reforços del punt de connexió a xarxa.	que la potència es factura al comptador de cada usuari.
Serveis de regulació de xarxa	<ul style="list-style-type: none"> És necessari participar de forma agregada amb la mateixa comercialitzadora. 	<ul style="list-style-type: none"> Es pot participar sempre que es compleixin els requisits de <i>Red Eléctrica de España</i> (telemesura en temps real...). 	<ul style="list-style-type: none"> És necessari participar de forma agregada amb la mateixa comercialitzadora.

5.4 Rol de les bateries a les comunitats energètiques locals

En el context de les comunitats energètiques o autoconsums col·lectius la instal·lació de les bateries es troba en fase de desenvolupament, especialment pel que fa a la normativa existent en aquest sentit. Per altra banda, les bateries són un dels elements més rellevants per poder portar el concepte de comunitat energètica un pas més enllà.

Així, la possibilitat de tenir sistemes d'emmagatzematge en comunitats energètiques va molt lligat a la legislació vigent en quant a instal·lació i gestió de les bateries. En aquest sentit, i com s'ha comentat anteriorment, actualment es poden trobar dues possibilitats contemplades per la normativa Taula 6:

Taula 6 Bateries i comunitats energètiques

1. FV i bateria al mateix comptador	2. Bateries individuals per cada consumidor
<p>Avantatges:</p> <ul style="list-style-type: none"> Contemplat dins la normativa DT 5a RD 244/2019. Es comparteix equip de mesura y proteccions amb la generació. Permet diferir l'ús de l'energia generada (autoconsum), fer arbitratge de preus i participar en la regulació de la xarxa. És econòmicament més barata en ser una inversió conjunta. <p>Limitacions:</p> <ul style="list-style-type: none"> No permet la reducció de pics de potència. Impedeix una assignació òptima del consum per coeficients de repartiment fixes. Implica un acord de dels participant per realitzar la inversió. 	<p>Avantatges:</p> <ul style="list-style-type: none"> Permet la gestió individual de la bateria. Permet diferir l'ús de l'energia generada (autoconsum), fer arbitratge de preus, reducció de pics de potència i participar en la regulació de la xarxa. No es necessita d'un acord ni d'una inversió col·lectiva obligatòria. <p>Limitacions:</p> <ul style="list-style-type: none"> Hi ha un increment en el cost d'inversió. Pot haver-hi limitacions d'injecció a la xarxa. Es requereix de capacitat d'accés i connexió concedida a xarxa.

Existeix encara una tercera opció que actualment encara no es troba contemplada per la normativa per poder ser implementada, però que permetria ampliar els beneficis de la instal·lació de bateries a altres tipus de comunitats energètiques. **Es tracta de les bateries connectades directament a la xarxa de transport/distribució sense necessitat d'estar associades a una planta de generació.** En aquest sentit, s'obriria una nova oportunitat especialment en zones urbanes on existeixen dificultats per tenir una planta generació que doni servei a tota la comunitat.

5.5 Rol de les bateries dins dels sistemes d'agregació de demanda

Com s'ha comentat anteriorment, **l'agregació de la demanda** consisteix en moure els consums de diferents punts de subministrament de forma conjunta per tal de poder donar serveis de regulació a la xarxa. Aquest canvi del patró de consum de forma conjunta ve orquestrat per la figura de l'agregador que és qui actua com a representant de cara a l'operador del sistema (*Red Eléctrica de España*). És a dir, l'agregador usarà la flexibilitat dels consums agregats per donar resposta a les necessitats de la xarxa a canvi d'una remuneració econòmica que es repartirà amb els consumidors gestionats.

Per altra banda, també s'ha comentat que les bateries són l'actiu flexible per definició, ja que, pot moure el patró de consum/injecció en pocs segons sense que hi hagi un efecte rebot. Així, per exemple, una bateria es pot carregar/descarregar més del que s'havia planejat en un moment donat sense que a l'instant següent hagi de fer el contrari.

A més, els sistemes de comunicació i gestió de les bateries cada vegada són més avançats, el que permet fer un control acurat i segur de la bateria.

Per tot això, les bateries no només poden servir com a actius flexibles per sí mateixes, com en els casos d'hibridació de plantes de generació, si no que poden ser un canal facilitador en processos de consum menys flexibles. Per posar un exemple, una bateria podria facilitar que una planta industrial deixi de consumir (o redueixi el seu consum) en un moment donat sense que hi hagi cap afectació al procés.

Això no vol dir, per altra banda, que la bateria sigui una peça imprescindible per a l'agregació de la demanda, ja que molts dels consums ja es poden moure sense tenir afectacions negatives als usuaris. Però sí que pot permetre que alguns consums poc flexibles puguin participar (o puguin participar més fàcilment) als serveis de regulació de la xarxa.

5.6 Hardware i software necessari per a la gestió en temps real dels sistemes d'autoconsum amb bateries: Incorporació de la gestió de la demanda

El principal sistema necessari per poder fer una gestió en temps real de la bateria serà el software del Sistema de Gestió d'Energia (EMS). Aquest és el software que és capaç de portar a terme cada un dels casos d'ús on es pot usar una bateria (o més d'un hora). En aquest sentit, la bateria habitualment surt de fàbrica amb un Sistema de Gestió d'Energia que permet fer maximització d'autoconsum. Però, si es vol aprofitar tot el potencial que poden oferir les bateries, serà necessari tenir un Sistema de Gestió d'Energia intel·ligent que actuï per sobre de la bateria.

Per tant, serà necessari que la bateria es pugui comunicar amb el Sistema de Gestió d'Energia de forma ràpida i automàtica. Per poder establir aquesta comunicació dependrà del fabricant de la bateria si serà necessari un hardware o si es podrà fer una comunicació directe entre el software del fabricant i el del Sistema de Gestió d'Energia.

A més, **si es vol participar als serveis de regulació de la xarxa, serà necessari que la bateria es pugui comunicar amb l'agregador** de demanda o directament amb l'operador del sistema (*Red eléctrica de España*) segons sigui el cas. Habitualment, serà el mateix Sistema de Gestió d'Energia que es comunicarà amb l'agregador. Encara que, segons els requisits de cada cas concret, és possible que també sigui necessària al instal·lació d'algun hardware (com sistemes de telemesura en temps real, sistemes d'antiabocament...). Per poder-ho entendre millor es pot veure de forma resumida els sistemes de hardware/software necessaris per poder fer la gestió de la demanda per casos de bateries d'autoconsum fotovoltaic (Fig. 12).

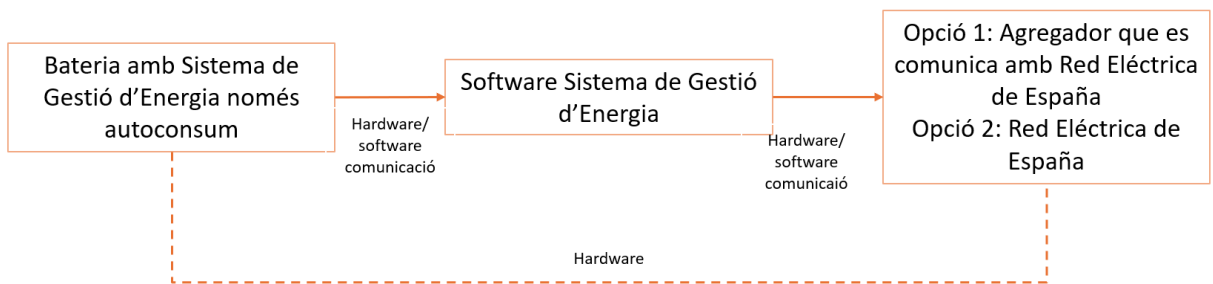




Fig. 12 Sistemes de software / hardware per gestió de la demanda

6. Casos d'estudi

6.1 Sunbatt

Endesa i Seat van liderar el projecte SUNBATT amb l'objectiu de donar una nova vida a les bateries dels vehicles elèctrics i desenvolupar casos d'ús i models de negoci productius a nivell econòmic i mediambiental, amb la col·laboració de l'IREC, Circe i l'UPC.

 SUNBATT	
Demostrador	Martorell instalaciones Centro tecnológico SEAT

<p>Equips</p>	
<p>Durada</p>	<p>2014-2016</p>
<p>Finançament</p>	<p>Acció</p>
<p>Objectius generals</p>	<p>Validar la tecnologia que permet utilitzar les bateries en usos estacionaris, des del punt de vista d'equipament, de comportament dinàmic en entorns reals i de resposta davant els casos d'ús.</p> <p>Poder valoritzar les solucions tecnològiques que ens permetin conèixer si té sentit econòmic la solució en funció del cas d'ús plantejat, permetent avançar en el model de negoci.</p> <p>Realitzar les proves conjuntament amb clients que ens permetin validar els resultats.</p>
	<p>https://www.sunbatt.eu/</p>

En finalitzar el projecte, es van aconseguir resultats importants que van establir les bases per a futurs desenvolupaments. Es van definir les especificacions necessàries per crear inversors / carregadors bidireccionals de 20 kW per a l'emmagatzematge, i es va implementar un sistema de commutació electrònica que permet la integració eficient de bateries amb inversors. A més,

es van desenvolupar sistemes avançats de gestió i operació, així com algorismes d'optimització que milloren el rendiment global del sistema.

Gràcies al coneixement adquirit, es van identificar oportunitats per dissenyar una solució més eficient, econòmica i ergonòmica. El cost total del contenidor utilitzat en el demostrador va ser de 300.000 €, amb un gran potencial de reducció de costos basat en els aprenentatges obtinguts durant el projecte.

6.2 REFER

El projecte REFER [31] va ha tenir com objectiu impulsar mecanismes per a la reducció i la flexibilitat del consum energètic en habitatges i equipaments en rehabilitació. El projecte s'emmarca dins de la comunitat RIS3CAT i està coordinat per l'IREC (Institut de Recerca en Energia de Catalunya). S'analitza l'ús de bateries per a la flexibilització energètica:

- Impacte en la degradació de les bateries per a diferents estratègies d'ús en edificació.
- Identificació i anàlisi dels models de re-utilització de bateries amb una anàlisi tècnica i econòmica dels casos aplicables al projecte.
- Caracterització i diagnòstic de bateries amb potencial d'ús per a una segona vida en edificis.

El projecte REFER s'ha finançat amb fons europeus FEDER per al desenvolupament regional.

	Reducció Energètica i Flexibilitat en Edificis en Rehabilitació
Demostrador	Biblioteca de Montgat
Equips	Generació solar (32.000 kWh/any, 19.8 kWp), bateria de segona vida (RENAULT Kangoo amb 23,3kWh de capacitat), Convertidor CC/CA & <i>Blackbox</i> (<i>dispositiu de comunicació entre la bateria i l'inversor</i>) per la bateria, i un sistema de clima HVAC (40% del consum de la biblioteca amb 40 kW de potencia màxima)
Durada	2017-2019
Finançament	RIS3CAT Energia
Objectius generals	Implementar un sistema intel·ligent de gestió energètica a la biblioteca de Montgat, per millorar l'eficiència energètica d'espais públics, Provar la viabilitat de bateries de segona vida, Testar el funcionament d'un agregador de demanda, el agent dels mercats energètics que permet participar als consumidors.
	https://fonseuropeus.gencat.cat/web/.content/feder/2014-2020/programa-operatiu-catalunya/comunicacio/bona-practica-feder-ris3cat-energia.pdf https://ris3catenergia.wordpress.com/2018/10/08/posada-en-marxa-de-la-flexibilitzacio-energetica-de-la-biblioteca-tirant-lo-blanc-montgat/

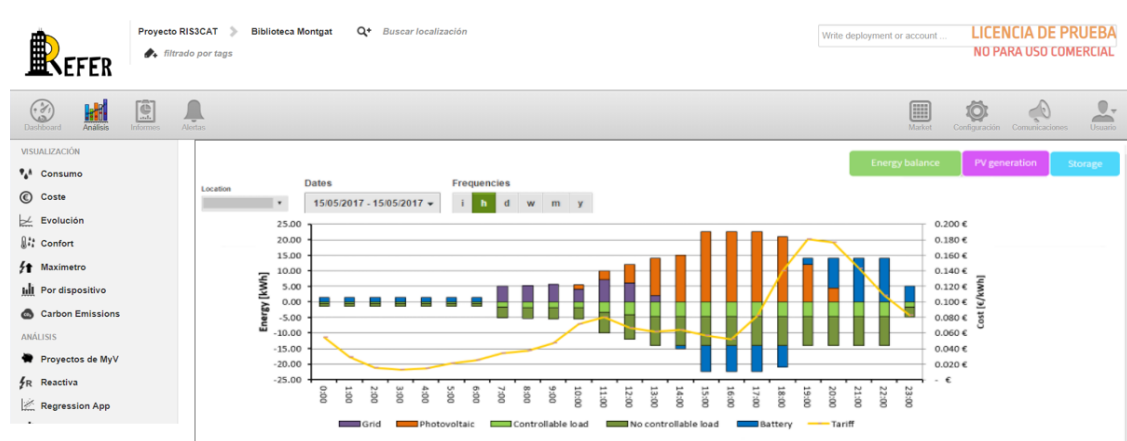
El 2019, la Comunitat RIS3CAT Energia, impulsada per ACCIÓ, va iniciar una prova pilot a la biblioteca Tirant lo Blanc de Montgat (Maresme) amb l'objectiu de gestionar l'energia de l'edifici mitjançant l'ús d'una bateria de segona vida provinent d'un cotxe elèctric en desús. El projecte REFER, liderat per l'empresa catalana COMSA, va comptar amb la participació de CINERGIA, l'IREC, AMB, i les empreses Dexma i World Sensing, a més de la col·laboració de RENAULT, que va cedir una bateria d'un dels seus vehicles elèctrics. Aquesta iniciativa va rebre finançament del Fons Europeu de Desenvolupament Regional de la Unió Europea, a través del Programa Operatiu FEDER de Catalunya 2014-2020, gestionat per ACCIÓ.

El projecte va néixer amb la finalitat de millorar la gestió energètica dels espais públics i residencials, donar nous usos a les bateries de segona vida dels cotxes elèctrics i estudiar la flexibilitat energètica que aquests edificis poden aportar al sistema elèctric. Després de començar a mitjans de 2016 amb un estudi teòric, el 2019 es va iniciar la fase pràctica amb el pilot a la biblioteca de Montgat, amb la voluntat d'ampliar-lo a altres espais. L'edifici, de més de 1.500 m² i amb una mitjana de 150 a 170 usuaris diaris, va ser el escenari de prova.



Fig. 13 Imatge de la instal·lació

La bateria de 23 kWh va emmagatzemar l'excident d'energia generat pels panells fotovoltaics amb 19,8 kWp de 150 m² instal·lats al sostre de la biblioteca, que prèviament es retornaven a la xarxa, per utilitzar-se de nit o en moments de demanda alta. A més, la bateria es carregava en hores de preus baixos de l'energia (a la nit) i es descarregava quan els preus eren més alts (durant el dia, a les hores punta). El sistema també estava preparat per respondre a les necessitats del mercat elèctric mitjançant un agregador de la demanda, contribuint a fer més viable la recuperació de la inversió mitjançant els beneficis de participar als mercats de gestió de la demanda



- Balance energètic indicant generació, demanda y almacenamiento con precios horarios.

Fig. 14 Balanç energètic indicant generació, demanda i emmagatzematge amb preus horaris


El projecte es va basar en una plataforma intel·ligent al núvol que gestionava de manera autònoma i automàtica la càrrega i descàrrega de la bateria. El sistema estava connectat a prediccions meteorològiques i de preus, i tenia en compte també el dia de la setmana. A més,

comptava amb tecnologies de *machine learning* que permetien aprendre sobre el funcionament de la biblioteca en funció del seu comportament i experiència, la qual cosa facilitava l'optimització de la gestió energètica de l'edifici i ajudava a resoldre el problema del reciclatge de bateries de cotxes elèctrics.

6.3 GROWSMARTER

GrowSmarter [32] va reunir ciutats i indústria per integrar i demostrar "12 solucions de ciutat intel·ligent" en energia, infraestructures i transport, per oferir a altres ciutats coneixements valuosos sobre com funcionen a la pràctica aquestes solucions i oportunitats de replicació.

La idea era crear un mercat preparat per a aquestes solucions intel·ligents per donar suport al creixement i la transició cap a una Europa intel·ligent i sostenible.

	<p>GrowSmarter: transforming cities for a smart, sustainable Europe</p>
<p>Demostrador</p>	<p>Mesura 11.2 E-mobility management system - Demostrador a les Instal·lacions de Nissan</p> <p>Mesura 4.2 Tres demostradors a Barcelona a un edifici residencial i dues edificis terciaris.</p>
<p>Equips</p>	<p>GS-Nissan: 2 punts de recàrrega V2X (<i>vehicle to everything</i>), un sistema fotovoltaic i d'emmagatzematge d'energia (ESS), un Sistema de Gestió de l'Energia (EMS), un sistema SCADA i la plataforma d'e-car sharing amb el SCADA-EMS .</p> <p>Mesura 4.2: Instal·lació de fotovoltaïques i emmagatzematge elèctric amb programari intel·ligent en 1 edifici residencial i 2 terciaris, utilitzant cèl·lules innovadores i integracions urbanes com pèrgoles fotovoltaïques. El programari optimitza els fluxos d'energia basant-se en el funcionament en temps real i previsions de consum, clima i preus de l'electricitat.</p>
<p>Durada</p>	<p>Gener 2015 - Desembre 2019</p>
<p>Finançament</p>	<p>Unió Europea Call H2020</p>
<p>Objectius generals</p>	<p>Millorar la qualitat de vida dels ciutadans europeus mitjançant una millor mobilitat, habitatge i qualitat de les infraestructures urbanes, alhora que millorava l'economia dels ciutadans mitjançant la reducció dels costos energètics i la creació de fins a 1500 llocs de treball nous (a nivell de demostració).</p> <p>Reduir l'impacte mediambiental amb una menor necessitat d'energia en un 60% i un major ús d'energies renovables, reduint així encara més les emissions de gasos amb efecte d'hivernacle.</p>

	<p>Crear un desenvolupament econòmic sostenible demostrant i preparant un desplegament més ampli de solucions intel·ligents.</p> <p>GrowSmarter va mostrar a 3 ciutats far 12 solucions intel·ligents i integrades com a forma de preparar-se per a un desplegament més ampli al mercat. Aquestes solucions es van integrar en llocs especialment escollits, fent que la demostració fos fàcil d'accedir i de participar per a les 5 ciutats seguidors i altres grups d'estudi europeus i internacionals.</p>
	<p>https://grow-smarter.eu/home/</p>

6.4 MESURA 4.2

L'empresa energètica Naturgy va provar la viabilitat del model de negoci com a ESCO, una empresa de serveis energètics que proporciona solucions per millorar l'eficiència energètica dels seus clients, oferint instal·lacions d'autoconsum elèctric (fotovoltaic i bateries) als propietaris d'edificis. El centre de recerca IREC va desenvolupar el programari intel·ligent de gestió que controla l'emmagatzematge de bateries per optimitzar el rendiment del sistema, tenint en compte l'ús d'energies renovables, emissions i costos.

Aquestes unitats locals de generació d'electricitat es van instal·lar a:

- Edifici residencial Sibelius, on l'electricitat s'utilitzava per al consum de l'escala comunitària;
- Centre de serveis de dia juvenil Valldonzella;
- Seu de Naturgy a Barcelona.

Les dades d'entrada per al sistema de gestió intel·ligent desenvolupat per l'IREC van incloure la previsió meteorològica que afectava la producció d'energia, la previsió de preus de l'electricitat i la demanda prevista dels edificis per equilibrar correctament el sistema en temps real.

Com a aprenentatge durant l'execució dels demostradors, es van extreure les conclusions següents:

- És important establir un procediment de manteniment de la base de dades, ja que el monitoratge precís requerit pels sistemes d'autoconsum intel·ligentment controlats genera grans quantitats de dades, i la coherència d'aquestes és essencial. **Depenent del fabricant de l'inversor de bateries, la integració dels sistemes de gestió energètica pot ser un desafiament tècnic.**
- Disposar d'una regulació que faciliti la instal·lació d'unitats de generació d'energia distribuïda és clau per garantir-ne la replicabilitat. La regulació espanyola (RD244), va permetre l'autoconsum col·lectiu, i aquest sistema va reduir dràsticament el període de retorn de la inversió i va resultar beneficiós per a consumidors amb corbes de càrrega complementàries.

- Les exempcions fiscals aplicades pels municipis per a la instal·lació fotovoltaica redueixen els períodes d'amortització i milloren el ROI. Per la seva viabilitat econòmica, l'adquisició de bateries per part de clients petits/mitjans requereix incentius per part de les institucions públiques.
- Per tal d'aconseguir tot el potencial de replicació de la solució, els dos motors principals són una regulació favorable i una **reducció dels costos de les bateries** (a través, per exemple, d'incentius públics).

6.5 Mesura 11.2

La mesura es va desplegar a la seu de Nissan de Gran Via, centrant-se en aplicacions V2B (*vehicle to Building*) amb la instal·lació de carregadors V2X (*vehicle to everything*) integrats a l'edifici amb energia fotovoltaica, sistema d'emmagatzematge d'energia i interconnectats amb una plataforma d'e-car sharing. El demostrador va explorar i demostrar els beneficis potencials de la tecnologia V2G (*vehicle to grid*) aplicada a edificis amb energies renovables i sistemes d'emmagatzematge. A més, es va avaluar el funcionament tècnic, la integració i la interoperabilitat de V2G per estudiar futures aplicacions. Tot i això, es preveia un canvi legislatiu a Espanya en poc temps per impulsar la penetració de les tecnologies V2B i V2G. Aquesta iniciativa va contribuir a generar experiències i informació tècnica, econòmica i normativa per al futur desplegament d'aquestes solucions a Espanya i altres països europeus.


Les funcionalitats avaluades van tenir en compte els següents casos pràctics:

- Peak shaving
- Desplaçament de càrrega
- Autoconsum
- Compartir cotxe elèctric
- V2B

L'avaluació de la mesura es va centrar en:

- Avaluació tècnica: protocols, requisits de temps de resposta, integració en plataformes de construcció del V2X, ESS i e-car sharing, altres KPI's
- Eficiències dels sistemes: PV2BAT, PV2B, BAT2B (BAT2G), BAT2V, V2B (V2G)
- Estalvi energètic, nivell d'autoconsum, pics de consum
- Avaluació econòmica i del model de negoci

6.6 Reschool - Comunitat energètica local Cornellà del Terri

 reschool	Reschool: Unlocking the potential of energy communities [33]
Demostrador	Comunitat energètica local de Cornellà de Terri [34]

Equips	Instal·lació fotovoltaica 47 kWp Bateria Sonnen 44 kWh capacitat i 20 kW de potència – La bateria va associada al punt de generació.
Durada	Gener 2023 - Juny 2026
Finançament	Unió Europea
Objectius generals	<p>Gestionar de forma òptima els excedents de l'autoconsum entre els membres i generar estalvis. (contracte de venda d'excedents, coeficients de repartiment òptims i maximitzar autoconsum mitjançant bateries i carregadors EV).</p> <p>Oferir la flexibilitat en els mercats de balanç per així percebre compensacions econòmiques per aquest servei.</p> <p>Oferir la flexibilitat en un projecte pilot i innovador amb una DSO local per gestionar les congestions dintre la seva xarxa.</p> <p>Més concretament, pel cas de la comunitat energètica de Cornellà de Terri els objectius de la gestió de la bateria són:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gestionar de forma òptima el repartiment de la generació fotovoltaica compartida a la qual està associada la bateria. • Fer arbitratge de preus en el moment de la descàrrega (es carrega només de generació fotovoltaica) per tal de reduir el cost energètic dels participants a la comunitat energètica de Cornellà de Terri.
	https://www.reschool-project.eu/

El projecte Reschool és un projecte europeu que es realitza a diferents països que se centra en incentivar i gestionar la flexibilitat de les comunitats energètiques amb recursos distribuïts. L'objectiu principal del projecte és millorar la gestió del actius, augmentar la participació de les comunitats energètiques dins dels serveis de la xarxa i col·laborar amb els agents del sector. El projecte es porta a terme a través de més de 16 entitats i es gestionen comunitats de 4 països europeus. Amb aquesta gestió es s'ofereixen nous serveis a la comunitat energètica com:

- Previsió de la generació, la demanda i el consums dels actius flexibles.
- Previsió de la flexibilitat disponible dels diferents actius i membres.
- Gestió dels actius i membres de la comunitat energètica en temps real. Optimització de la CE per maximitzar autoconsum (estalvis) i oferir flexibilitat en els mercats de balanç (ingressos).
- Operació intra-dia i en temps real sobre els recursos i actius flexibles.

Una de les comunitats dins d'aquest projecte és la comunitat energètica local de Cornellà del Terri (Girona). Aquesta comunitat energètica té un total de 28 membres amb 28 punts de subministrament.

En aquest sentit, hi ha una instal·lació fotovoltaica de 47 kWp en modalitat d'autoconsum compartit a través de xarxa amb una bateria associada al mateix punt de connexió a la xarxa de 44 kWh de capacitat i 20 kW de potència.

La gestió de la bateria pretén aprofitar per carregar la bateria amb l'energia generada de la planta fotovoltaica associada i fer arbitratge de preus en el moment de descarregar-la per tal de reduir el cost energètic de la comunitat fent un millor ús dels seus actius.

7. Cicle de vida de les bateries

La producció i l'ús de bateries tenen un impacte ambiental que ha de ser considerat. Aquest impacte es manifesta en diverses etapes del cicle de vida.

L'Anàlisi de Cicle de Vida (ACV) és una metodologia utilitzada que avalua els impactes ambientals d'un producte, procés o servei al llarg de totes les etapes de la seva existència, "del bressol a la tomba" (ISO 14040:2006) [35], [36], [37]. Entendre l'ACV és crucial per prendre decisions informades sobre la sostenibilitat dels seus productes i processos, especialment en el context actual de transició energètica i economia circular.

En el cas de les bateries per a sistemes fotovoltaics, similar a bateries para cotxes elèctrics, l'ACV considera les següents etapes:

- **Extracció de matèries primeres:** Es contempla l'impacte de l'extracció de materials claus i crítics, tal com el liti, cobalt, níquel, etc., incloent-hi l'ús d'energia, consum d'aigua, alteració del paisatge i emissions associades. Els impactes ambientals derivats de l'extracció d'aquests materials inclouen la degradació del sòl, la contaminació de l'aigua i la pèrdua de biodiversitat (Ex: Extracció de liti al "Triangle del Liti" a Sud-Amèrica) [38].
- **Fabricació, transport i distribució:** La gran majoria de les bateries de ions de liti que es produeixen actualment estan dirigides principalment al sector de l'automoció, especialment per alimentar vehicles elèctrics (cotxes, autobusos, camions i altres).

Tot i que també hi ha demanda creixent en altres sectors com l'emmagatzematge estacionari d'energia renovable i l'electrònica de consum, el sector automotriu és, amb diferència, el principal motor de la producció actual i futura de bateries. En aquesta etapa s'analitza el consum energètic i les emissions generades durant la producció dels components de la bateria i el seu assemblatge. Ellingsen et al. [39], en el seu article "Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack", realitzen un ACV específic per a bateries de ions de liti en vehicles, proporcionant dades rellevants sobre aquesta etapa, com ara el potencial d'escalfament global (Global Warming Potential, GWP) del paquet de bateries de 26,6 kWh i 253 kg va ser estimat en 4,6 tones de CO₂ equivalent.

Els impactes ambientals més significatius provenen de tres processos principals: La fabricació de les cel·les de la bateria, La producció de la pasta de l'elèctrode positiu (que inclou materials com níquel, cobalt i manganès), La producció del col·lector de corrent negatiu (generalment compost per coure). Una altra etapa, no menys

importa't és la del transport de materials i productes al llarg de la cadena de subministrament que també poden generar emissions considerables.

- **Ús:** Durant la seva vida útil inicial en vehicles elèctrics, les bateries són utilitzades principalment per emmagatzemar energia elèctrica que alimenta el motor. En aquesta etapa, l'impacte ambiental depèn en gran mesura del mix energètic utilitzat per carregar-les. Si l'electricitat prové de fonts renovables, l'impacte ambiental és significativament menor. Així, els beneficis ambientals nets dels vehicles elèctrics estan estretament vinculats a la descarbonització de la xarxa elèctrica i a l'eficiència energètica durant el seu ús. De la mateixa manera, en aquesta etapa per a bateries en sistemes fotovoltaics, s'avalua principalment el consum energètic indirecte associat a la càrrega de la bateria, depenent de la font d'energia elèctrica. Si l'energia prové de fonts renovables, l'impacte és menor [40].
- **Segona Vida:** Una bateria és un producte o residu que es pot utilitzar en una aplicació diferent a la de la seva primera posada en el mercat. Aquesta reutilització se li adjudiquen els "termes segon ús" i "segona vida" segons l'Especificació UNE 0075. Les bateries retirades de vehicles elèctrics, que encara conserven entre el 50% i el 70% de la capacitat inicial, poden ser utilitzades en sistemes estacionaris per emmagatzemar energia renovable, com la generada per panells solars o turbines eòliques. Això contribueix a reduir la necessitat de fabricar noves bateries per a aquestes aplicacions, disminuint l'impacte ambiental.

La reutilització evita l'esgotament de recursos minerals com liti, cobalt i níquel, i redueix la petjada de carboni associada amb la fabricació o el reciclatge de noves bateries. A més, fomenta una economia circular en estendre la vida útil de les bateries existents. Tot i que el reciclatge és una opció viable, s'estima que fins al 95% dels materials es poden recuperar. Tot i això, la reutilització en aplicacions secundàries pot ser més eficient des del punt de vista energètic i econòmic abans del reciclatge final [41].

- **Fi de vida:** En aquesta etapa, s'analitza l'impacte del reciclatge o la disposició final de la bateria, incloent-hi la gestió de residus perillosos i la recuperació de materials valuosos. La gestió inadequada de les bateries al final de la seva vida útil pot generar contaminació del sòl i de l'aigua a causa de l'alliberament de metalls pesants i altres components perillosos.

Així, reciclatge i la reutilització de les bateries de ions de liti són essencials per reduir l'impacte ambiental i garantir la sostenibilitat del creixement dels vehicles elèctrics. Tot i que les tecnologies actuals, com la pirometal·lúrgia i la hidrometal·lúrgia, permeten recuperar materials valuosos, encara presenten limitacions en termes d'eficiència, costos i emissions. A més, la reutilització de bateries en aplicacions estacionàries ofereix una oportunitat per allargar-ne la vida útil abans del reciclatge final.

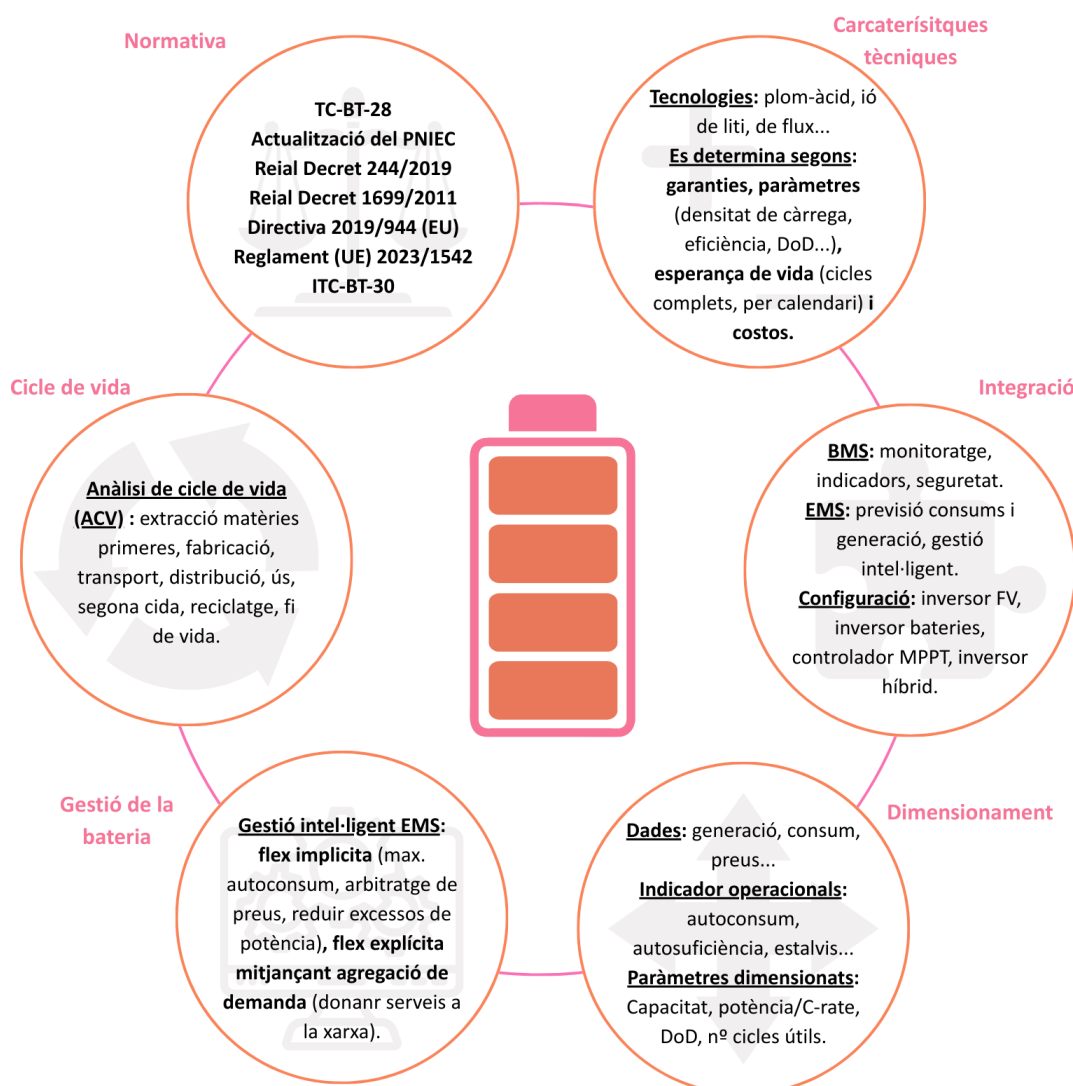
No obstant això, per assolir un sistema més sostenible, calen avenços en el disseny de bateries que facilitin el desmuntatge i la recuperació de materials, així com una

infraestructura robusta per gestionar-les al final de la seva vida útil. També és fonamental abordar els impactes ambientals associats als propis processos de reciclatge, que contribueixen al balanç global del cicle de vida de les bateries i poden limitar els beneficis ambientals si no es gestionen adequadament. En conjunt, l'estudi subratlla que abordar aquests reptes és clau per fomentar una economia circular i reduir la dependència de recursos naturals crítics com el liti i el cobalt.

Com a informació complementària per comprendre l'impacte ambiental i les oportunitats de millora en la gestió sostenible de les bateries, a l'Annex del capítol 7 s'ofereix una anàlisi exhaustiva dels aspectes metodològics i estàndards per a l'avaluació ambiental del cicle de vida de les bateries. Aquest annex abasta les principals tecnologies de bateries, les aplicacions de segona vida, i els processos de reciclatge, així com les normatives vigents en la regulació europea i espanyola relacionades amb la seva disposició final. Així mateix, s'analitzen els costos associats a la logística i el reciclatge de les bateries al final de la seva vida útil, i es presenten consideracions addicionals per a la integració de l'Anàlisi de Cicle de Vida (ACV) en sistemes d'autoconsum amb bateries.

8. Infografia

En aquest capítol es pot veure la infografia que resumeix en una imatge els 7 capítols d'aquest document.



9. Bibliografía

- [1] ONU, “La COP29 concluye con un acuerdo de 300.000 millones de dólares anuales para los países en desarrollo,” *Noticias ONU*, Nov. 2024.
- [2] Consejo Europeo, “Pacto Verde Europeo,” <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/>.
- [3] Consejo Europeo, “Objetivo 55,” <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/fit-for-55/>.
- [4] Consejo Europeo, “Cambio climático: lo que está haciendo la UE,” <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/climate-change/>.
- [5] IEA, “Electricity 2024: Executive summary,” <https://www.iea.org/reports/electricity-2024/executive-summary>.
- [6] Ramón Roca, “El mercado eléctrico registra por primera vez precios negativos en España,” *ElPeriodicoDeLaEnergia*, Mar. 2024.
- [7] CNMC, “Los precios mayoristas de la electricidad en España descendieron durante 2023,” <https://www.cnmc.es/prensa/boletin-anual-mercados-plazo-20240429>.
- [8] AURORA, “Grid Fee Outlook for the Netherlands 2045,” Aug. 2024.
- [9] Redacción el Periódico de la Energía, “Las comercializadoras piden regular el coste de los servicios de ajuste para estabilizar el precio de la electricidad,” <https://elperiodicodelaenergia.com/las-comercializadoras-piden-regular-el-coste-de-los-servicios-de-ajuste-para-estabilizar-precios/>, Oct. 18, 2024.
- [10] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), “Plan Nacional Integrado de Energía y Clima,” 2024.
- [11] Ministerio para la Transición Ecológica, “RD 244/2019,” 2019. [Online]. Available: <http://www.boe.es>
- [12] “BOE-A-2020-6621-consolidado”.
- [13] Comisión Europea, “DIRECTIVA (UE) 2019/ 944 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO - de 5 de junio de 2019 - sobre normas comunes para el mercado interior de la electricidad y por la que se modifica la Directiva 2012/ 27/ UE,” 2019.
- [14] Comisión Europea, “Reglamento 2023_1542,” 2023.
- [15] CENSOLAR, “<https://www.censolar.org/legislacion-fotovoltaica-2021/>.”
- [16] Ministerio de Ciencia y Tecnología, “Reial Decret 842_2002,” 2002.
- [17] M. DE Industria and T. Y. Comercio, “RD 1699_2011,” 2011.

- [18] "RD 1955/2000".
- [19] European Parliament, "DIRECTIVA 2014/35/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO," 2014.
- [20] UNE, "UNE-EN 62133:2013."
- [21] UNE, "UNE-EN 62619:2017 (Ratificada)." Accessed: Apr. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0070001>
- [22] "TRGS 510 Page 1 of 58-Committee on Hazardous Substances-AGS management-BAuA-www.baua.de," 2013. [Online]. Available: www.baua.de
- [23] Ministerio de Industria y Turismo, "ITC-BT-30." Accessed: Apr. 15, 2025. [Online]. Available: <https://industria.gob.es/Calidad-Industrial/seguridadindustrial/instalacionesindustriales/baja-tension/Paginas/guia-tecnica-aplicacion.aspx>
- [24] MINISTERIO DE INDUSTRIA TURISMO Y COMERCIO, "ITC-BT-28."
- [25] M. , P. A. , B. S. , K. A. , G. A. , L. S. , K. A. , M. A. , I. E. , S. D. , J. O. G. , E. O. and G. M. , Bielewski, "Clean Energy Technology Observatory: Batteries for Energy Storage in the European Union – 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets." doi: 10.2760/808352.
- [26] D. Yang, Y. Lv, M. Ji, and F. Zhao, "Evaluation and economic analysis of battery energy storage in smart grids with wind–photovoltaic," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 19, pp. 18–23, 2024, doi: 10.1093/ijlct/ctad142.
- [27] J. T. Frith, M. J. Lacey, and U. Ulissi, "A non-academic perspective on the future of lithium-based batteries," Dec. 01, 2023, *Nature Research*. doi: 10.1038/s41467-023-35933-2.
- [28] O. Chan, "Understanding role specifications BMS," <https://www.linkedin.com/pulse/understanding-role-specifications-battery-management-system-chan/>.
- [29] Monolithicpower, "Role and importance of BMS," <https://www.monolithicpower.com/en/learning/mpscholar/battery-management-systems/bms-basics/role-and-importance-of-bms>.
- [30] R. Gallart *et al.*, "Rol generador-consumidor sobre almacenamiento," 2024.
- [31] UPC, "REFER ." Accessed: Apr. 22, 2025. [Online]. Available: <https://giip.upc.edu/ca/projectes-i-d-i/projecte-refer/>
- [32] Growsmarter, "Growsmarter project." Accessed: Apr. 22, 2025. [Online]. Available: <https://grow-smarter.eu/home/>
- [33] reschool, "Reschool," <https://www.reschool-project.eu/>.

- [34] gencat, "Cornellà del Terri s'adhereix al projecte europeu Reschool i instal·la bateries per a la comunitat energètica de l'escola ," https://exteriors.gencat.cat/ca/ambits-dactuacio/afers_exteriors/ue/fons_europeus/detalls/noticia/20250213_reschool.
- [35] ISO-14040, "Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework," 2006.
- [36] ISO-14040, "Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework," 2006.
- [37] ISO-14040, "Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework," 2006.
- [38] D. A. Notter *et al.*, "Contribution of Li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles.," *Environ Sci Technol*, vol. 44, no. 17, pp. 6550–6556, Sep. 2010, doi: 10.1021/es903729a.
- [39] L. A. W. Ellingsen, G. Majeau-Bettez, B. Singh, A. K. Srivastava, L. O. Valøen, and A. H. Strømman, "Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack," *J Ind Ecol*, vol. 18, no. 1, pp. 113–124, 2014, doi: 10.1111/jiec.12072.
- [40] L. A. W. Ellingsen, C. R. Hung, and A. H. Strømman, "Identifying key assumptions and differences in life cycle assessment studies of lithium-ion traction batteries with focus on greenhouse gas emissions," *Transp Res D Transp Environ*, vol. 55, pp. 82–90, 2017, doi: 10.1016/j.trd.2017.06.028.
- [41] F. Esteban, "La solución europea para dar una segunda vida a las baterías de los coches," *Business Insider*. [Online]. Available: <https://www.businessinsider.es/solucion-europea-dar-segunda-vida-baterias-coches-1371530%0A>
- [42] wikireact, "https://wikireact.com/de-compromiso-de-unidades/Unit_commitment_problem_in_electrical_power_production."
- [43] W. K. A. Wan Ahmad and S. Ahmad, "Arima model and exponential smoothing method: A comparison," *AIP Conf Proc*, vol. 1522, no. 1, pp. 1312–1321, Apr. 2013, doi: 10.1063/1.4801282.
- [44] L. Breiman, "Random Forests. Machine Learning," *Machine Learning*, vol. 45, pp. 5–32, 2001.
- [45] A. and S. Vaswani, "Attention is all you need," *Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems*, pp. 6000–6010, 2017.
- [46] S. Bawankar *et al.*, "Environmental impact assessment of lithium ion battery employing cradle to grave," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 60, p. 103530, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103530>.

- [47] L. Gaines, "Lithium-ion battery recycling processes: Research towards a sustainable course," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 17, p. e00068, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.e00068>.
- [48] F. Khan, "El proceso completo de reciclaje y reutilización de baterías de vehículos eléctricos," SIGMAEARTH. [Online]. Available: <https://sigmaearth.com/es/the-complete-process-of-recycling-and-reusing-ev-batteries/>
- [49] E. Gucciardi, "Reciclaje directo de baterías de litio: haciendo la energía más sostenible," CIC Energi Gune. [Online]. Available: <https://cicenergigune.com/es/blog/reciclaje-directo-baterias-litio-energia-sostenible>
- [50] NCPOWER, "Operación Sostenibilidad: Una mirada al reciclaje y reutilización de baterías." [Online]. Available: <https://ncpower.es/operacion-sostenibilidad-una-mirada-al-reciclaje-y-reutilizacion-de-baterias/>
- [51] R. tus P. Andalucía, "El impacto del reciclaje de baterías en la minería." [Online]. Available: <https://www.reciclatuspilas.com/el-impacto-del-reciclaje-de-baterias-en-la-mineria/>
- [52] C. F. H.-C. Sucre, "A más baterías de litio, más reciclaje y reúso." [Online]. Available: <https://blogs.iadb.org/energia/es/a-mas-baterias-de-litio-mas-reciclaje-y-reuso/>
- [53] G. En Enginyeria De L'energia, A. : Àlex, and V. Collado, "TREBALL FI DE GRAU CONTEMPLANT L'ÚS D'ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA Memòria i Annexos."
- [54] "Rentabilidad." Accessed: Apr. 22, 2025. [Online]. Available: <https://solartradex.com/blog/autoconsumo-con-baterias-es-rentable/>
- [55] M. Etxandi-Santolaya, L. Canals Casals, T. Montes, and C. Corchero, "Are electric vehicle batteries being underused? A review of current practices and sources of circularity," *J Environ Manage*, vol. 338, p. 117814, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117814>.

DOCUMENT 2: ANNEXES

10. Annex capítol 1

A continuació es presenta el detall de les opcions d'autoconsum amb acollida a compensació o sense:

- Autoconsum amb excedents acollits a compensació: instal·lacions en les quals el productor i consumidor s'acullen al sistema de compensació simplificada d'excedents. Per tant, si els usuaris no consumeixen tota l'energia produïda per la seva instal·lació, poden injectar-la a la xarxa de distribució perquè a final de cada període de facturació, la comercialitzadora compensi pels sobrants energètics. Per pertànyer a aquesta modalitat, cal complir els requisits següents: La font d'energia ha de ser renovable. La potència de la instal·lació (o instal·lacions associades) no ha de ser major de 100 kW. El consumidor ha d'estar adherit a un sol contracte de subministrament per al consum amb una comercialitzadora. El consumidor i el productor han signat un contracte de compensació d'excedents tal com s'especifica en el RD 244/2019. El consumidor no pot obtenir benefici econòmic ja que no és una activitat retributiva. Això vol dir que únicament es pot compensar l'energia no consumida i el resultat de la factura mai serà negatiu.
- Autoconsum amb excedents no acollits a compensació: aquest tipus el componen les instal·lacions que no compleixen els requisits per pertànyer al mecanisme de compensació d'excedents (o que decideixen no acollir-s'hi). En aquesta modalitat, els excedents es venen al mercat elèctric. Les diferents modalitats d'autoconsum es poden classificar en individual (un únic consumidor) o col·lectiu (diversos consumidors).

11. Annex capítol 3

Funcionalitats del BMS

Monitoratge

Les operacions de control i gestió d'un BMS es basen en el monitoratge. És essencial supervisar de manera contínua variables importants com el voltatge, el corrent, la temperatura i l'estat de càrrega (SoC). El BMS monitora contínuament cada cel·la o grup de cel·les del paquet de bateries per assegurar que funcionin dins dels paràmetres especificats. El monitoratge és crucial tant per a la gestió en temps real com per recopilar informació que permet preveure el rendiment i la salut futura del paquet de bateries.

Protecció i Seguretat

Una de les principals responsabilitats d'un Sistema de Gestió de Bateries (BMS) és protegir la bateria i el sistema en el seu conjunt contra condicions que poden causar danys o representar riscos de seguretat. El BMS executa accions de protecció per contrarestar situacions com sobrecàrregues, descàrregues profundes, sobrecorrents, curtcircuits i sobreescalfament. Per exemple, si el voltatge d'una cel·la supera un llindar específic, cosa que indica una sobrecàrrega, el BMS pot desconnectar el circuit de càrrega o desviar el corrent per evitar una major càrrega d'aquesta cel·la.

Balanceig

La igualació és una tasca crucial que duu a terme el BMS per garantir un estat de càrrega (SoC) uniforme entre totes les cel·les dins d'un paquet de bateries. En una configuració en sèrie, fins i tot petites diferències en la capacitat o impedància de les cel·les poden generar desequilibris amb el temps. La igualació es pot aconseguir mitjançant mètodes passius o actius. La igualació passiva implica dissipar l'excés d'energia en forma de calor a les cel·les amb un SOC alt, mentre que la igualació activa implica transferir càrrega de les cel·les amb nivells més alts de càrrega a aquelles amb nivells més baixos. Aquest procés permet que el paquet de bateries utilitzi la seva capacitat total i contribueix a prolongar la seva vida útil.

Càlcul dels indicadors

La generació d'informes inclou el lliurament de dades i informació rellevant a l'usuari o altres sistemes. Un BMS transmet informació crucial, com el SOC, el SOH i qualsevol condició de falla. Aquestes dades poden ser utilitzades per proporcionar informació a altres sistemes per a control i presa de decisions, així com per informar l'usuari sobre l'estat actual de la bateria. Per exemple, en sistemes d'emmagatzematge d'energia estacionaria, el BMS interactua amb la unitat de control central per proporcionar dades sobre la condició del paquet de bateries, la qual cosa pot influir en el funcionament del vehicle.

Els BMS són dependents de cada bateria i el seu disseny canvia amb la seva química, mida o aplicació Fig. 15.

BMS Centralitzat

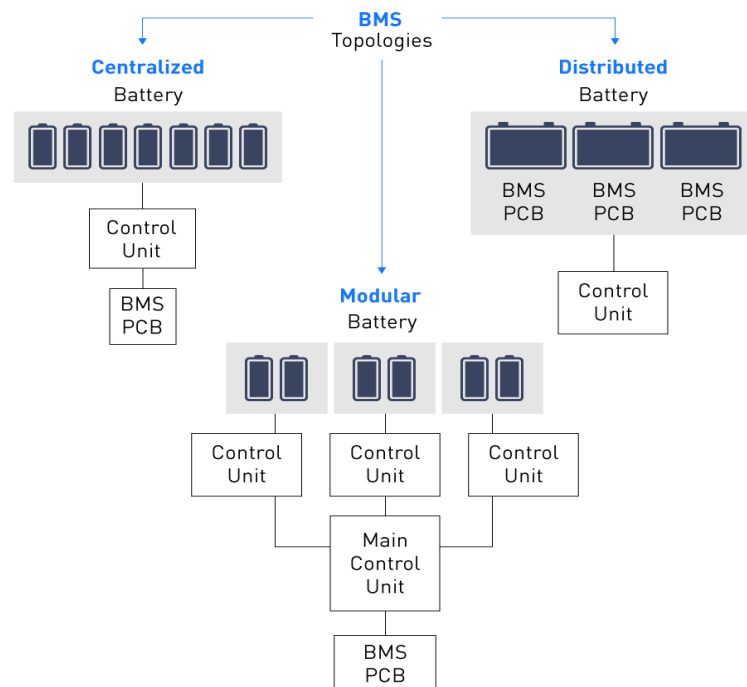


Fig. 15 arquitectures BMS

En el marc de l'anàlisi de la integració tècnica de bateries en instal·lacions d'autoconsum, s'han identificat dos nivells de gestió dels sistemes energètics actuals:

- **Sistemes lògics:** Aquestes solucions poden prendre decisions i actuar sobre els dispositius, però ho fan sota regles preestablertes, fet que els limita davant esdeveniments inesperats. Normalment, aquests sistemes treballen amb decisions instantànies, és a dir, no planifiquen a partir de pronòstics futurs. Els **BMS** són exemples típics de sistemes lògics, ja que estan dissenyats per gestionar les bateries en temps real però sense una planificació a llarg termini. Dins de les instal·lacions d'autoconsum, solen carregar les bateries amb l'excendent solar exclusivament, mai amb energia de la xarxa, i descarregar-les immediatament quan la demanda supera a la generació solar, sense tenir en compte els preus de l'energia per exemple.
- **Sistemes intel·ligents:** Un sistema intel·ligent és autònom i automàtic, capaç de reaccionar davant d'esdeveniments imprevistos i de fer una planificació anticipada. Aquesta planificació, amb una finestra temporal prou àmplia, permet maximitzar el rendiment dels equips en els moments més adequats. Per assolir aquest nivell de gestió, és necessari afegir una capa superior de control, coneguda com **EMS** (Energy Management System), que complementa el BMS i proporciona una gestió energètica més avançada, amb una planificació que es realitza amb almenys 24 hores d'antelació, mentre que el BMS continua operant en temps real sota les consignes de l'EMS.

Aquest enfocament amb dos programaris de control permet aprofitar al màxim el potencial de les bateries en les instal·lacions d'autoconsum, millorant tant l'eficiència com la seguretat del sistema. **Mòduls d'un sistema de gestió energètica intel·ligent (Segles en angles, EMS):**

Planificador

La metodologia habitual per a la planificació energètica d'un sistema elèctric segueix la resolució dels problemes clàssics d'optimització de compromís unitari i problema de despatx d'energia (en angles "Unit Commitment" i "*Economic Dispatch*") amb un horitzó temporal de 24 hores. Tenint en compte el pronòstic meteorològic, si el sistema inclou generació renovable i demanda elèctrica global, el planificador genera un programa energètic òptim i detallat amb intervals de 15 minuts. En aquest programa, depenent de l'objectiu prèviament seleccionat (econòmic, ambiental o tècnic) s'especifica la quantitat d'energia a genera, consumir o emmagatzemar per cada element i per a cada interval [42].

Balancejador

Per gestionar qualsevol esdeveniment no programat (menys generació solar de l'esperada per exemple), el Balancejador o control a temps real, assegura el balanç de potències i estabilitat energètica en tot moment. Per això, té en compte les consignes de planificació per als elements gestionables, i segons un llistat de prioritats o un altre model d'optimització, realitza les correccions d'acord amb els darrers mesuraments del sistema. Aquests mesuraments són presos cada cinc segons i, en conseqüència, les consignes són enviades als equips controlables amb aquesta periodicitat si les comunicacions ho permeten.

Prediccions

Per poder tenir una planificació energètica òptima d'una instal·lació d'autoconsum, s'han d'invertir gran part dels esforços en tenir una bona predicció del perfil horari de generació renovable i de la demanda elèctrica del sistema.

Els mètodes de predicció es poden classificar en quatre grups principals: models estadístics senzills, models d'aprenentatge automàtic (que fan servir intel·ligència artificial), models d'aprenentatge profund (per a casos més complexos), i combinacions de mètodes.

Demanda elèctrica

Hi ha molta informació sobre com predir el consum elèctric a curt termini, i tot i que han aparegut noves tècniques que assegurin ser millors, això no sempre és cert. El millor mètode a utilitzar dependrà de la pròpia naturalesa i ús de l'edifici o sistema a gestionar i sobre tot, de les **dades disponibles**.

Els models estadístics simples, com l'*ARIMA* o l'*Exponential Smoothing*, fan prediccions basant-se en patrons del passat. No obstant això, aquests models poden tenir problemes quan hi ha dades inesperades o si cal afegir altres factors externs [43].

Els models d'aprenentatge automàtic són més flexibles i poden adaptar-se a variacions més complexes. Alguns exemples són *K-Nearest Neighbours (KNN)* o *Random Forest*, que s'utilitzen amb èxit en moltes situacions. Tot i així, si les dades són molt complexes, els models d'aprenentatge profund, com les xarxes neuronals, poden ser més eficients [44].

Recentment, una tecnologia anomenada *Transformers* amb mecanismes d'atenció ha començat a ser molt utilitzada per la seva capacitat per processar dades de manera més ràpida i precisa, especialment quan es tracta de prediccions a llarg termini [45].

Però abans de seleccionar qualsevol tècnica, es necessari fer una anàlisi i preparació de les dades històriques disponibles per entendre millor els patrons de consum energètic del sistema a gestionar.

Generació Solar

Hi ha, com en el cas anterior, diferents metodologies per predir la generació solar. Des dels més estadístics, on amb un històric de dades es pot ajustar una funció que amb les prediccions ja esmentades, ens de la corba de potència esperada, com altres models més físics on cada característica de les plaques compta. Una altra diferència entre ambdues metodologies és que, amb els models estadístics, es pot fer la predicció del comportament de totes les plaques solars de manera conjunta, tractant-les com un únic conjunt. En canvi, amb els models físics, l'estimació s'ha de fer de manera individual per a cada placa, tenint en compte les característiques específiques de cadascuna.

La taula següent mostra les dades d'entrada principals necessàries per a la gestió òptima d'una bateria.

Categoria	Dada	Descripció
Sistema	Demanda elèctrica esperada	kW
Sistema	Nombre de bateries	
Sistema	Nombre de places solars	
Sistema	Potència contractada	kW
Sistema	Tarifa elèctrica contractada	€/kWh
Plaques Solars	Potencia nominal de les plaques	kW
Plaques Solars	Perfil de generació esperat	kW
Bateria	Potència màxima càrrega	kW
Bateria	Potencia mínima càrrega	kW
Bateria	Potència màxima descàrrega	kW
Bateria	Potencia mínima descàrrega	kW
Bateria	Costo cicle descarrega	€/cicle
Bateria	Capacitat nominal bateria	kWh
Bateria	Estado de carga mínim	%
Bateria	Estado de carga màxim	%
Bateria	Eficiència de càrrega	%
Bateria	Eficiència de descàrrega	%
Bateria	Estat de càrrega actual	%

Taula 1: Dades d'entrada al planificador energètic

Les dades d'entrada per al control primari són les descrites a la taula següent:

Categoria	Dada	Descripció
Consigna òptima	Potència de carga planificada para cada bateria.	kW
Consigna òptima	Potencia de descàrrega planificada para cada bateria.	kW
Mesura bateria	Lectura de potencia	kW

Categoria	Dada	Descripció
Mesura bateria	Lectura SOC	%
Mesura bateria	Estat d'operació de la bateria	
Mesura demanda	Lectura potència	kW
Mesura plaques solars	Lectura potència	kw
Mesura plaques solars	Lectura estat	

Taula 2: Dades d'entrada al Balancejador

A la taula següent, s'adjunta un exemple dels tipus de dades que poden ser necessaris conèixer per als models físics de predicció de la generació solar.

Paràmetres	Unitats
Irradiància difusa en el pla horitzontal	kW/m ²
Irradiància directa normal	kW/m ²
Irradiància global en el pla horitzontal	kW/m ²
Velocitat del vent	m/s
Temperatura ambient	[°C]
Desfasament horari. Horari d'estiu 1, horari d'hivern 0.	Hores
Latitud	Graus
Angle d'inclinació de la placa	Graus
Hora estàndard local. Hora respecte a la zona geogràfica.	Hores
Longitud estàndard (meridià estàndard)	Graus
Longitud local	Graus
Angle azimut de la normal a la superfície amb el sud real. 0° si la placa està orientada al sud real, 90° si està totalment a l'oest, i -90° si és orientació est.	Graus
Nombre de dia de l'any	[1,366]
Potència màxima del conjunt de plaques	kW
Temperatura de referència a la qual s'ha testat la placa	°C
Coeficient de temperatura [1/°C].	[0,1]
Eficiència de la placa sota les condicions de test. Per a condicions no STC	[0,1]
Àrea de totes les plaques del mateix tipu. Per a sistemes no STC	m ²

12. Annex capítol 4

Consideracions de les dades necessàries per realitzar un dimensionament:

- Dades de consum:
 - Corba de consum de l'edifici horària/quart horària: Com ja s'ha comentat no és suficient només tenint el consum anual d'una instal·lació per poder saber quina bateria s'adapta millor a les necessitats. Per això, és necessari poder disposar (o poder fer una aproximació) de la corba de consum total de l'edifici sense autoconsum. És important que el període de temps de la corba de consum sigui el mateix que el de la corba de generació. Per altra banda, si es tracta d'un edifici amb una instal·lació d'autoconsum amb compensació d'excedents habilitada ja existent i ja es disposa de la corba de comptador de la xarxa (tant consum com excedents vessats a xarxa) no és necessari disposar d'aquesta corba.
 - Preu de consum (€/kWh o €/MWh): tant la instal·lació de generació fotovoltaica com la mateixa bateria permeten percebre estalvis perquè eviten haver de consumir de la xarxa i, per tant, eviten el cost corresponent al consum evitat. S'ha de remarcar que el preu de consum que s'ha de pagar no es compon només pel preu de l'energia consumida en sí mateixa, també s'han d'afegir una part de càrrecs i peatges per ús de la xarxa així com els impostos (IVA i impost elèctric). En aquest sentit, per poder avaluar correctament la viabilitat econòmica de la instal·lació de bateries cal tenir en compte el preu de consum amb càrrecs, peatges i imports.

- Dades de generació:
 - Corba de generació horària/quart horària: de la mateixa manera que el consum, no és suficient només amb la potència pic de la instal·lació o la generació anual per poder fer el dimensionament d'una bateria. En aquest sentit, també és necessari disposar de la corba de generació. És important que el rang de temps de la corba de consum sigui el mateix que el de la corba de generació. Per altra banda, si es tracta d'un edifici amb una instal·lació d'autoconsum amb compensació d'excedents habilitada ja existent i ja es disposa de la corba de comptador de la xarxa (tant consum com excedents vessats a xarxa) no és necessari disposar d'aquesta corba.
 - Preu de compensació d'excedents (€/kWh o €/MWh): Amb el preu de compensació d'excedents es pot calcular els ingressos que es deixaran de percebre pel fet d'aprofitar part dels excedents per carregar la bateria.

13. Annex capítol 5

Diferència entre flexibilitat implícita i explícita:

- La flexibilitat de la demanda consisteix en la possibilitat de modificar el consum d'energia respecte al patró normal de funcionament a partir d'una senyal externa. Les accions implementades es divideixen de la següent manera:
 - Desplaçar el consum cap a períodes amb menor demanda o menor preu (load shifting).
 - Reduir el consum durant un període de temps, per exemple, apagant càrregues innecessàries o que tenen inèrcia (load-shedding).
 - Produir electricitat localment, i per tant no necessitar consumir des de la xarxa (load displacement).
- Es coneixen dos tipus de flexibilitat:
 - Flexibilitat implícita (darrere del comptador): Els consumidors modifiquen els seus consums en resposta a una senyal de preus. Per tant, els consumidors poden decidir reduir l'ús d'energia durant les hores del dia en què els preus de l'electricitat són més alts. Això s'aplica als consumidors que tenen contractes a preu indexat o amb diferents períodes de preu.
 - Flexibilitat explícita (davant del comptador): En aquest cas, la modificació dels consums es deu a la presència d'incentius econòmics que compensen els consumidors per les seves accions. Això pot ser, per exemple, un preu definit per cada acció implementada, o un pagament específic que depèn de la grandària de la flexibilitat oferida. En el cas d'Espanya, aquests incentius estan gestionats per l'operador del sistema (Red Eléctrica Española) a través dels mercats de balanç. La finalitat d'aquests mercats és mantenir l'equilibri entre la demanda i la generació en tot moment. Els serveis de regulació de la xarxa oberts actualment a punts de consum són:
 - Regulació secundària (aFRR): servei de resposta ràpida que té per objectiu principal mantenir l'equilibri entre la generació i la demanda, la qual cosa resulta fonamental per preservar l'estabilitat de la freqüència en 50 Hz. Aquest aspecte és essencial per garantir un subministrament fiable i segur als consumidors, evitant interrupcions a la xarxa elèctrica. S'activa després que la regulació primària (FCR) que es tracta d'un servei obligatori per als generadors d'energia i que no és remunerat.
 - Regulació terciària (mFRR): Com en el cas anterior és un servei amb l'objectiu de mantenir la freqüència de la xarxa, però que s'activa després de la regulació secundària. En aquest sentit, els requisits per participar també són menys restrictius (potència mínima per participar, temps de resposta...).
 - Reserves de substitució (RR): S'activa per tal de permetre restituir els actius activats en els mecanismes anteriors.
 - Serveis de Resposta Activa de la Demanda (SRAD): Servei d'últim recurs, un cop s'han activat tots els anteriors. Consisteix en reduccions de consum a hores de màxima tensió de la xarxa. Es fa una subhasta de disponibilitat per les hores considerades com de risc de tensió de la xarxa i es remunera en cas d'activació d'energia.

14. Annex capítol 7

Estàndards i Metodologia per a avaluar els impactes de les bateries en el seu cicle de vida

Per avaluar aquests impactes hi ha una metodologia estandarditzada anomenada Anàlisi de Cicle de Vida (ACV). L' ACV es regeix principalment per les normes ISO 14040:2006 i ISO 14044:2006 [36], [37] , que estableixen els principis i el marc per dur a terme un estudi d' ACV. Aquestes normes defineixen les fases següents:

- Definició de l' objectiu i abast: Es defineix el propòsit de l' estudi, el sistema a analitzar i els límits de l' estudi.
- Anàlisi de l'inventari del cicle de vida (ICV): Es recopilen dades sobre les entrades (matèries primeres, energia) i sortides (emissions a l'aire, aigua i sòl, residus) del sistema en cada etapa del cicle de vida.
- Avaluació de l'impacte del cicle de vida (EICV): S'avaluen els impactes ambientals potencials associats a les entrades i sortides de l'ICV, utilitzant diferents categories d'impacte com el canvi climàtic, l'acidificació, l'eutrofització, etc.
- Interpretació: S' analitzen els resultats de l' EICV per identificar els punts crítics del cicle de vida i proposar millores.

Beneficis de l'ús de l'ACV per a la Indústria de les bateries:

- Millora del disseny de productes i processos: Identificar oportunitats per reduir l' impacte ambiental.
- Presa de decisions informades: Seleccionar materials i tecnologies més sostenibles.
- Compliment de regulacions ambientals: Demostrar el compromís amb la sostenibilitat en consonància amb les regulacions actuals, tal com la nova regulació Europea per a les bateries i el passaport digital de bateries.
- Avantatge competitiu: Diferenciar-se en el mercat oferint productes més sostenibles.

En resum, l'ACV és una eina fonamental perquè la indústria, i projectes destinats a la innovació i desenvolupament de noves tecnologies, avaluï i millori l'acompliment ambiental dels seus productes i contribueixi a un desenvolupament més sostenible.

És crucial realitzar una anàlisi de cicle de vida (ACV) complet per avaluar l'impacte ambiental global de les diferents tecnologies de bateries. Aquesta anàlisi ha de considerar totes les etapes, des del bressol fins a la tomba ("cradle-to-grave"), és a dir, des de l'extracció matèries primeres, fabricació, usos i fi de vida.

Anàlisis del cicle de vida de les diferents tecnologies de bateries

Existeixen diverses tecnologies de bateries utilitzades en aplicacions d' autoconsum, cadascuna amb les seves pròpies característiques i perfils d' impacte ambiental:

- Bateria de plom-àcid: Són una tecnologia madura i econòmica, però tenen una vida útil relativament curta i un impacte ambiental significatiu a causa del plom. El seu reciclatge està ben establert [40].
- Bateria de ions de liti: Ofereixen una alta densitat d'energia i una llarga vida útil, però l'extracció de liti i altres metalls planteja desafiaments ambientals i ètics. Existeixen diferents químiques dins d'aquesta categoria (LFP, NMC, NCA, etc.), cadascuna amb les seves pròpies característiques de rendiment i impacte [39].
- Bateria de flux: Són una tecnologia emergent amb potencial per a aplicacions d'emmagatzematge a gran escala. Ofereixen una llarga vida útil i la possibilitat de separar la potència de l'energia, però el seu cost inicial encara és elevat.

Les anteriors són les bateries comunes que es poden fer servir en sistemes fotovoltaics, no obstant això, les bateries de ions de liti són les més populars actualment a causa de la seva alta eficiència, llarga vida útil, major densitat energètica i baix manteniment. Tot i que tenen un cost inicial més elevat, permeten descàrregues profundes sense afectar significativament el seu cicle de vida, cosa que les fa ideals per a instal·lacions solars tant aïllades com connectades a la xarxa.

Una anàlisi comparativa del cicle de vida d'aquestes tecnologies ha de considerar factors com:

- Consum d'energia en la fabricació.
- Emissions de gasos amb efecte d'hivernacle.
- Consum d'aigua.
- Toxicitat dels materials.
- Potencial de reciclatge.

Si considerem un dels molts estudis d'ACV de bateries de ions de liti per a cotxes elèctrics, per exemple, l'estudi de Swapnil et al [46], que van avaluar els impactes ambientals d'una bateria NMC811 amb un enfocament "cradle-to-grave", podem trobar que, segons les seves conclusions, les etapes més rellevants del cicle de vida, amb els resultats de caracterització per unitat funcional d'1 kWh i una contribució acumulada superior al 80 % en valors absoluts, indiquen el següent:

- Canvi climàtic (fòssil): representa el 45 % en l'adquisició de matèries primeres, el 26 % en la producció del producte principal, el 17 % en l'etapa d'ús i el 12 % en el final de vida.
- Ús de recursos (energia): suposa el 43 % en l'adquisició de matèries primeres, el 29 % en la producció del producte principal, el 18 % en l'etapa d'ús i el 10 % en el final de vida.
- Ús de recursos (minerals i metalls): contribueix amb un 65 % en l'adquisició de matèries primeres i un 34 % en el final de vida, mentre que només un 1 % s'atribueix a la producció del producte principal, descartant l'etapa d'ús.

- Inorgànics respiratoris: representen el 66 % en l'adquisició de matèries primeres, el 13 % en la producció del producte principal, el 6 % en l'etapa d'ús i el 41 % en el final de vida.

El que si coincideix amb la comunitat dedicada als estudis de ACV de les bateries és que la fase de producció de les bateries de ions de liti (LIB) és la que genera l'impacte ambiental més alt en el seu cicle de vida. No obstant això, hi ha una gran variabilitat en les emissions reportades entre diferents estudis, amb valors que oscil·len entre 48 i 350 kg de CO₂ eq per kWh produït. Les discrepàncies s'expliquen per diferències en les assumpcions metodològiques, com ara:

- La composició química de les bateries (NMC, LFP, etc.).
- El mix energètic utilitzat en la producció.
- Els límits del sistema considerats (per exemple, cradle-to-gate vs cradle-to-grave).

Un dels factors clau que limita la precisió dels resultats és la manca d'accés a dades primàries, ja que les indústries sovint protegeixen aquesta informació amb patents. Això obliga els investigadors a utilitzar dades secundàries d'informes industrials o a fer estimacions pròpies, fet que afecta significativament els resultats de l'avaluació d'impacte ambiental. Els estudis que utilitzen l'enfocament de "contingut reciclat" reporten reduccions d'emissions entre 3,6 i 27 kg CO₂-eq/kWh, mentre que aquells que consideren el reciclatge al final de vida estimen reduccions entre 16 i 32 kg CO₂-eq/kWh. No obstant això, hi ha una gran incertesa associada al final de vida degut a la limitada disponibilitat de dades sobre processos industrials reals [39]

Per l'altra banda, la fase d'ús pot tenir un impacte ambiental positiu o negatiu segons les fonts d'energia utilitzades per carregar les bateries, destacant la importància de descarbonitzar la xarxa elèctrica per maximitzar els beneficis ambientals dels vehicles elèctrics.

Aplicacions de 2a vida de les bateries de vehicle elèctric

Com es comenta en l'apartat 7.1, la gran majoria de les bateries de ions de liti que es produeixen actualment estan dirigides principalment al sector de l'automoció, de fet, s'estima que en els pròxims 20 anys, el 90% de la demanda de bateries de ions de liti procedirà del sector de la mobilitat elèctrica. Aquest apartat aborda per tant la segona vida una bateries després del seu primer ús en el vehicle elèctric. És a dir, cal tenir en compte que sota la denominació de *bateries de segona vida* sovint s'inclouen tant les bateries que han completat la seva primera vida útil en un vehicle elèctric, com aquelles que no han arribat a ser utilitzades, ja sigui per excedents de producció, defectes menors o decisions comercials.

Això pot generar certa confusió a l'hora d'analitzar el mercat real i les aplicacions pràctiques. No obstant això, ja existeixen iniciatives comercials i projectes pilot; com els de Nissan, Renault, B2U Storage Solutions o Connected Energy, que utilitzen bateries realment extretes de vehicles usats per a aplicacions estacionàries. Tot i que aquest mercat encara és incipient, la tendència apunta a un creixement sostingut a mesura que més vehicles elèctrics arribin al final de la seva vida útil. Per tant, l'anàlisi del cicle de vida i la viabilitat de la reutilització adquireixen cada cop més rellevància des d'un punt de vista ambiental, econòmic i regulador.

En aquest context, les bateries de vehicles elèctrics (VE) que ja no compleixen amb els requisits per al seu ús en automoció encara poden tenir una capacitat útil significativa per a altres aplicacions, com l'emmagatzematge estacionari d'energia en sistemes d'autoconsum. Donar una segona vida a aquestes bateries ofereix diversos avantatges:

- Reducció de l'impacte ambiental: Es retarda la necessitat de reciclar les bateries i es redueix la demanda de noves bateries.
- Reducció de costos: Les bateries de segona vida poden ser una opció més econòmica que les bateries noves per a certes aplicacions.
- Optimització de recursos: S'aprofita al màxim la vida útil dels materials.
- Les aplicacions de segona vida poden incloure:
 - Emmagatzematge d'energia en habitatges i edificis: Per optimitzar l'autoconsum fotovoltaic i proporcionar energia de suport.
 - Emmagatzematge a escala de xarxa: Per regular la freqüència i la tensió de la xarxa elèctrica i facilitar la integració d'energies renovables.
 - Sistemes d'alimentació ininterrompuda (UPS): Per proporcionar energia de recolzament en cas de talls de subministrament.

Des dels estudis d'Anàlisi de Cicle de Vida (ACV) sobre la segona vida de les bateries de ions de liti destaquen tant els impactes com els beneficis ambientals i econòmics associats amb la seva reutilització en aplicacions estacionàries. A continuació es presenten els punts clau:

Impactes de la segona vida

- Impactes ambientals residuals:
 - Tot i que les bateries es reutilitzen, persisteixen impactes relacionats amb el desmuntatge, el reacondicionament i el transport per a la seva nova aplicació.
 - Els processos necessaris per preparar les bateries per a la seva segona vida generen emissions addicionals, encara que significativament menors que fabricar bateries noves.
- Consum energètic:
 - La reutilització implica un consum energètic inferior en comparació amb el reciclatge directe o la fabricació de noves bateries, però segueix sent un factor a considerar en el balanç ambiental.

Beneficis de la segona vida

- Reducció de l'impacte ambiental total:
 - Allargar la vida útil de les bateries disminueix la necessitat de fabricar-ne de noves, fet que redueix el consum de recursos naturals com el liti, el cobalt i el níquel.
 - S'evita l'extracció minera i els impactes ambientals associats, com les emissions de CO₂ i la degradació del medi.
- Aplicacions estacionàries sostenibles:

- Les bateries en la seva segona vida s'utilitzen per emmagatzemar energia renovable (solar o eòlica), contribuint a l'estabilitat de les xarxes elèctriques i a la transició energètica.
- Això permet aprofitar entre el 50% i el 70% de la capacitat restant de les bateries, maximitzant-ne el valor funcional.
- Contribució a l'economia circular:
 - La reutilització fomenta un model més sostenible en reduir residus perillosos i minimitzar la petjada ambiental del cicle complet.
 - Comparat amb el reciclatge immediat, allargar la vida útil és més eficient des d'una perspectiva econòmica i energètica.

Reciclatge i gestió de bateries esgotades

El reciclatge eficient de les bateries és fonamental per minimitzar el seu impacte ambiental i recuperar materials valuosos. Els processos de reciclatge variaven segons la tecnologia de la bateria, però generalment implicaven la separació i recuperació de metalls com el liti, cobalt, níquel, plom i altre [47] s. En aquest sentit, és crucial establir una infraestructura de recollida i reciclatge eficient per assegurar la gestió adequada de les bateries al final de la seva vida útil. Això inclou:

- Punts de recollida accessibles per als usuaris.
- Processos de transport segurs.
- Tecnologies de reciclatge eficients.
- Regulacions clares i estrictes.

En els estudis d'ACV i de viabilitat econòmica cal considerar també el cost i la logística del reciclatge o gestió final de les bateries estacionàries, ja siguin de primera o segona vida. No obstant en la pràctica y en l'actualitat, el reciclatge de bateries estacionàries (com les d'instal·lacions fotovoltaïques) no sempre està inclòs en el preu d'adquisició, i no hi ha encara una xarxa de punts de recollida universal i normalitzada per a aquest tipus d'equips, especialment en l'àmbit domèstic. Això vol dir que, en molts casos, el cost de retirada i tractament pot recaure sobre l'usuari, tret que el fabricant o el distribuïdor ofereixi un servei específic (com alguns ho fan sota règims de responsabilitat ampliada del productor (RPA)).

A nivell europeu, la Directiva 2012/19/UE sobre residus d'aparells elèctrics i electrònics (RAEE) i la 2006/66/CE sobre bateries, juntament amb les seves transposicions nacionals, que regula la gestió ambiental de bateries i acumuladors), assignen al productor la responsabilitat de gestionar els residus, però això no sempre es tradueix en un servei gratuït o fàcilment accessible per al consumidor final.

En el caso de España, el Reial decret 710/2015, que transposa la Directiva 2006/66/CE sobre bateries i acumuladors i els residus que en deriven, assigna responsabilitats al productor dins del marc de la RAP. Això vol dir que els productors (fabricants o importadors) estan obligats legalment a fer-se càrrec de la recollida, tractament i reciclatge dels residus de bateries i acumuladors, una vegada han arribat al final de la seva vida útil. En concreto, es productors

han de finançar i organitzar sistemes de recollida selectiva i reciclatge adequats. Això afecta tant a les bateries portàtils com a les industrials (com les utilitzades en instal·lacions fotovoltaïques) i a les de vehicles.

Cal destacar, la nova regulació europea en forma de Reglament (UE) 2023/1542, adoptat el juliol de 2023, substitueix i deroga completament l'anterior directiva Directiva 2006/66/CE. Aquest nou reglament serà d'aplicació directa a tots els Estats membres i introdueix requisits molt més estrictes en matèria de disseny ecològic, traçabilitat, informació digital (passaport de bateria), contingut reciclat mínim obligatori i eficiència en la recollida i reciclatge. Això afecta totes les categories de bateries, incloent-hi les bateries estacionàries de primera o segona vida utilitzades en sistemes d'autoconsum energètic. De igual forma, como en la regulació anterior, el Reglament (UE) 2023/1542 estipula que la responsabilitat de la gestió i el reciclatge de les bateries segueix recaient en el productor.

Por lo tant, teòricament un usuari final (propietari d'una instal·lació fotovoltaïca amb bateries) no hauria d'assumir directament els costos de la logística i reciclatge de la bateria al final de la seva vida útil, perquè legalment aquesta responsabilitat recau en el productor. Però a la pràctica, poden existir costos indirectes o barreres logístiques. En el cas de les instal·lacions residencials o de petita escala, no sempre és evident com ni on s'ha de retornar la bateria un cop ha arribat al final de la seva vida útil. Tot i que la responsabilitat legal recau sobre el productor, alguns fabricants o distribuïdors no ofereixen serveis de recollida directa, o bé els condicionen a la contractació de serveis de manteniment específics.

La situació es complica encara més quan es tracta de bateries industrials reutilitzades en aplicacions estacionàries (segona vida), ja que pot haver-hi una major incertesa sobre qui és el productor legalment responsable i sobre la traçabilitat de la unitat. En absència de canals de retorn ben definits, és possible que l'usuari final acabi assumint els costos logístics associats al transport fins a un gestor autoritzat o a la retirada del dispositiu, especialment si aquests no han estat contemplats explícitament en l'oferta comercial inicial. En aquest context, els propietaris d'instal·lacions fotovoltaïques residencials que compti amb l'energia poden enfrontar certs costos indirectes relacionats amb la recollida i reciclatge de les bateries al final de la seva vida útil, a causa de la falta de canals de recollida definits, serveis de recollida condicionats i costos de transport i desmuntatge.

En general, es recomanen els passos per evitar aquests costos o minimitzar-los:

- Consultar amb l'instal·lador o proveïdor: És aconsellable verificar si el contracte d'instal·lació inclou la recollida i reciclatge de la bateria al final de la seva vida útil. Informar-se sobre punts de recollida: Contactar amb l'Institut Català d'Energia (ICAEN) o l'ajuntament local per conèixer els punts de recollida específics per a bateries a la seva àrea.
- Considerar els costos en estudis de viabilitat: Incloure una estimació dels costos i logística associats a la fi de vida de la bateria en estudis de viabilitat o sostenibilitat, especialment si el model comercial no el cobreix explícitament.

Procés de reciclatge

El desmuntatge de bateries inclou la separació de components com càtodes, ànodes i electròlits, amb l'objectiu de recuperar metalls valuosos com el liti, el cobalt i el níquel, així com assegurar un tractament segur dels residus. Els processos hidrometal·lúrgics són els més utilitzats gràcies a la seva selectivitat i baixes emissions de gasos tòxics, i permeten recuperar fins al 100% del liti i del cobalt, el 98% del manganès i el 75% de l'alumini. D'altra banda, els processos pirometal·lúrgics consisteixen a fondre els components a altes temperatures (800-1300 °C), recuperant metalls com el coure, el cobalt, el níquel i el ferro en forma d'aliatges. Tot i que aquest mètode és relativament senzill i productiu, no és adequat per recuperar materials orgànics. [48]

Impactes i beneficis del reciclatge de bateries de ions de liti en estudis d'ACV

El reciclatge de bateries de ions de liti és essencial per mitigar els impactes ambientals associats amb el seu cicle de vida. A continuació, es resumeixen els principals impactes i beneficis identificats en estudis d'Anàlisi de Cicle de Vida (ACV):

Impactes del reciclatge

- Consum energètic i emissions
 - Els mètodes convencionals, com la pirometal·lúrgia i la hidrometal·lúrgia, requereixen un alt consum energètic i poden generar contaminació secundària, com ara emissions derivades de l'ús intensiu de productes químics [49].
 - Tot i que el reciclatge redueix la necessitat d'extreure nous materials, els processos actuals encara tenen un impacte ambiental associat al transport, desmuntatge i tractament de les bateries [50].
- Contaminació secundària
 - En alguns casos, les tecnologies tradicionals poden alliberar substàncies tòxiques o generar residus addicionals durant el procés, la qual cosa pot limitar els beneficis ambientals si no es gestionen adequadament.

Beneficis del reciclatge

- Reducció de la dependència de recursos verges
 - El reciclatge permet recuperar fins al 95% del cobalt i el 85% del liti de les bateries, disminuint la necessitat d'extracció minera i conservant recursos naturals finits [51].
 - Això redueix significativament la pressió sobre ecosistemes sensibles i minimitza els impactes associats a la mineria, com la desforestació i la contaminació de l'aigua [51].
- Disminució de residus perillosos
 - El reciclatge evita l'acumulació de bateries usades en abocadors, on podrien alliberar substàncies tòxiques que contaminen el sòl i l'aigua, contribuint així a una gestió més segura dels residus perillosos.

- Reducció d'emissions de gasos d'efecte hivernacle (GEH)
 - El reciclatge disminueix la necessitat de fabricar noves bateries des de zero, reduint així les emissions associades a l'extracció i processament de metalls verges .
 - Mètodes innovadors, com el reciclatge directe, poden reduir encara més les emissions al requerir menys energia que les rutes tradicionals.
- Foment d'una economia circular
 - La recuperació i reutilització de materials valuosos promou un model econòmic més sostenible, reduint tant els costos de fabricació com la dependència de mercats volàtils de matèries primeres crítiques [52].
- Innovacions tecnològiques
 - Nous mètodes, com el reciclatge directe, permeten recuperar materials catòdics amb més eficiència energètica i menor impacte ambiental, generant materials reutilitzables per a noves bateries sense necessitat de processos intermedis intensius.

Malgrat dels impactes associats al reciclatge de les bateries, la seva complexitat i els avenços necessaris per a escala industrial, sí que podem dir que el reciclatge de bateries de vehicles elèctrics és un element fonamental per garantir la sostenibilitat del sector i promoure una economia circular. A Espanya, diverses empreses han destacat per les seves iniciatives innovadores en aquest àmbit, projectes impulsant que no només redueixen l'impacte ambiental sinó que també maximitzen la recuperació de materials crítics com el liti, el cobalt i el níquel. Entre aquestes empreses es troben Novolito, que lidera amb la primera planta de reciclatge de bateries a la Península Ibèrica; GDV Mobility, pionera en processos de recondicionament a Alacant; i BeePlanet, involucrada en projectes europeus com BATRAW. A nivell europeu, companyies com Umicore (Bèlgica), Northvolt (Suècia) i Fortum (Finlàndia) també estan establint referents en el reciclatge de bateries, demostrant el compromís global amb la transició energètica sostenible.

En definitiva, el reciclatge i la segona vida de les bateries de ions de liti son dos estratègies clau per abordar els desafiaments ambientals i econòmics associats al final de la seva vida útil. Mentre que el reciclatge es centra en recuperar materials valuosos com el liti, el cobalt i el níquel a través de processos com la hidrometal·lúrgia o el reciclatge directe, la segona vida busca estendre la utilitat de les bateries mitjançant la seva reutilització en aplicacions estacionàries, com el Emmagatzematge d'energia renovable o sistemes de recolzament elèctric. Ambdues opcions contribueixen a l'economia circular, però presenten diferències significatives en termes d'impacte ambiental, viabilitat econòmica i beneficis tecnològics. La Fig. 16 mostra un resum dels beneficis i els impactes des de la perspectiva de l'ACV.

There are several commercially **recycling processes** and also some are under research to regain maximum possible materials and quantity



Reusing (**second life**) of the battery is promising since batteries from EVs can be used in several applications:
-storing energy generated from renewable sources to support the government grid, and other



The option of recycling is not only useful for sustainability reasons, but also from an economical perspective, as it makes sense to regain precious materials after the EoL of a battery system.

Pyrometallurgy followed with hydrometallurgy, or **hydrometallurgy** only are the most common techniques

The **mechanical recycling route**, which is not in large scale yet, would be most energy efficient while the **hydrometallurgical** and **pyrometallurgical** routes are less energy efficient

-Pyrometallurgy has highest energy use, **1.33MWh/ton cells recycled**
-Followed by **0.84 from direct recycling**,
-0.81 from hydrometallurgical with inorganic acid leaching
-0.64 from hydrometallurgical with organic acid leaching

Regarding CO₂ emissions, pyrometallurgy causes clearly the highest CO₂ emissions from non-fuel combustion.

One LCA generalised method cannot provide an optimal approach for all cases. It is important to have a detailed study on each of the battery reusing applications¹.

Until now, it is safe to say that reusing the battery is a good option as it would give some time to recycling companies to develop cost and energy-efficient methods¹.

Some LCA figures

-**Total production and materials GWP range 61-146kg CO₂-eq/kWh battery capacity²**

-The PEFCR battery study reports that **12% of the GHG emissions of a lithium-ion battery's lifetime occurs in the end of life stage²**

-**70%** of emission and energy consumption can be reduced by extracting the materials and components by recycling

-**This overall percentage can be increased up to 91%** (combination of mechanical and hydrometallurgical processes²)

¹End of Electric Vehicle Batteries: Reuse vs. Recycle <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/8/2217>

²Lithium-Ion Vehicle Battery Production Status 2019 on Energy Use, CO₂ Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling https://www.tvl.se/download/18_14d7b12e16a3c5c36271070/1574923989017/C444.pdf

Fig. 16 Reciclatge vs Segona vida de las bateries (Font: ESA- Energy Technology ACV and Sustainability)

Consideracions addicionals per a la integració de l'ACV en sistemes d'autoconsum amb bateries

Impacte del sobredimensionament: Analitzar l' impacte ambiental del sobredimensionament de les bateries en sistemes d' autoconsum, considerant l' energia embeguda en la seva fabricació enfront dels beneficis d' un major autoconsum. Es dir, mentre que les bateries són essencials per maximitzar l'autoconsum i reduir emissions a llarg termini, el sobredimensionament pot neutralitzar aquests beneficis degut al seu alt impacte ambiental inicial, alguns aspectes a considerar son:

- Eficàcia ambiental: Sobredimensionar les bateries pot ser contraproductiu si la capacitat instal·lada supera les necessitats reals d'emmagatzematge. Això augmenta l'energia embeguda per kWh utilitzat durant la vida útil del sistema [53] .
- Costos i rendibilitat: Les bateries representen una inversió elevada i el seu sobredimensionament pot allargar molt el període de retorn econòmic, fent que no sigui viable en moltes situacions [54] .
- Optimització del disseny: És crucial dimensionar adequadament les bateries segons el perfil de consum energètic i la producció solar disponible per equilibrar els beneficis ambientals i econòmics[53] .
- Optimització de la vida útil: Estratègies de càrrega i descàrrega que maximitzin la vida útil de les bateries en aplicacions d' autoconsum, minimitzant la degradació i estenen el seu període de funcionament.

Un enfocament basat en la sostenibilitat en l'ús de bateries per a sistemes fotovoltaics hauria de seguir la jerarquia proposada per l'economia circular, prioritzant la màxima eficiència dels recursos al llarg de tot el cicle de vida. En primer lloc, cal maximitzar l'ús de la bateria dins de la seva aplicació estacionària original, promovent estratègies com la reparació, el manteniment proactiu i l'optimització de l'operació per allargar-ne la vida útil fins al seu límit

funcional. Aquest límit funcional ve determinat pel Estat de Funció (State of Function, SoF), un indicador proposat per a bateries de vehicles elèctrics que també es pot adaptar a bateries estacionàries [55].

Quan les exigències de l'aplicació superen la capacitat de la bateria degut a un cert nivell de degradació, el següent pas seria considerar-ne la reutilització en una altra aplicació amb requisits energètics menys estrictes. Això permet aprofitar la bateria en entorns on encara pot oferir un rendiment adequat, contribuint així a una nova vida útil i reduint la necessitat de fabricar noves bateries.

Finalment, quan la bateria ja no pot complir cap funció útil, el reciclatge esdevé l'última opció. Amb aquesta jerarquia, es construeix un model més resiliència i sostenible per a la gestió de bateries en sistemes fotovoltaics. Aquest plantejament no només maximitza l'ús de la bateria abans d'arribar al reciclatge, sinó que també contribueix a reduir l'impacte ambiental del procés. En treballs futurs, aquest enfocament podria integrar-se en una metodologia d'ACV, analitzant els impactes associats a cadascuna de les estratègies, a fi de trobar la més adequada.

En aquest sentit, l'ACV en la transició cap a una gestió sostenible de la vida útil de les bateries mitjançant l'Estat de Funció (SoF) és fonamental. En el context de l'anàlisi del cicle de vida (ACV) de les bateries per a vehicles elèctrics (VE), resulta crucial replantejar els criteris utilitzats per estimar el final de la seva vida útil, ja que aquests determinen les estratègies de reutilització, segona vida i reciclatge que poden reduir significativament l'impacte ambiental. Actualment, el criteri universal basat en un estat de salut (SoH) del 70-80% no considera les diferències individuals entre conductors ni les capacitats específiques de cada bateria. Aquesta limitació pot conduir a decisions poc eficients en la gestió del cicle de vida. Per abordar aquest repte, un nou enfocament basat en l'estat de funció (SoF) ofereix una perspectiva més precisa, ja que integra les necessitats històriques de conducció i la degradació de la bateria en condicions reals d'ús. Això permet establir ombralls individualitzats d'EoL i anticipar amb més fiabilitat el moment òptim per a pràctiques com la reutilització en aplicacions com el Vehicle to Grid (V2G) o la conversió a segona vida.

Aquest plantejament no només maximitza l'ús de la bateria abans d'arribar al reciclatge, sinó que també contribueix a reduir l'impacte ambiental del procés, fent compatible l'aposta pel vehicle elèctric amb els principis de l'economia circular. En treballs futurs, aquest enfocament podria integrar-se en una metodologia d'ACV, analitzant els impactes associats a la implementació d'estratègies com el V2G o la reutilització en diverses aplicacions estacionàries. A més, la definició de SoF obre la porta a un model predictiu basat en dades que podria ser ampliat per explorar nous escenaris d'ús i propostes tecnològiques, aportant informació essencial per a la presa de decisions estratègiques al llarg del cicle de vida de les bateries. Així, aquest enfocament representa una base sòlida per innovar en la gestió sostenible de les bateries, harmonitzant l'ús intensiu de recursos amb una transició ambientalment responsable cap a la mobilitat elèctrica.

Conclusions:

Els estudis d'ACV de bateries de liti, incloent les utilitzades en vehicles elèctrics, són crucials per la integració efectiva de bateries amb instal·lacions fotovoltaïques d'autoconsum individual o col·lectiu. Proporcionen una base sòlida per a l'optimització de processos, la millora de dissenys de productes, i la implementació d'estratègies que fomentin la sostenibilitat i la reducció de l'impacte ambiental. A més, l'ACV no només ajuda a identificar els impactes negatius, sinó que també pot revelar oportunitats per a la innovació i el desenvolupament de noves tecnologies que minimitzin l'impacte ambiental. En particular, la seva aplicació en la reutilització de bateries per a emmagatzematge d'energia fotovoltaïca proporciona una proposta clara per a l'extensió de la vida útil de les bateries, maximitzant el seu valor i reduint la necessitat de recursos nous. En un moment de transició energètica, l'ACV es una eina clau per garantir que les solucions d'emmagatzematge d'energia siguin no només eficients, sinó també responsables amb el medi ambient. La seva aplicació en la indústria de les bateries pot contribuir significativament a la consecució d'objectius de sostenibilitat i a la promoció d'una economia més circular, beneficiant tant a l'ecosistema com a la societat en general.



**Diputació
Barcelona**

**Àrea d'Acció Climàtica
i Transició Energètica**



**Oficina d'Impuls
a les Comunitats
Energètiques**

En el marc d'un Subprojecte finançat amb fons NextGenerationEU:



*Comte d'Urgell, 187
Recinte de l'Escola Industrial
08036 Barcelona*

*www.diba.cat/mediambient
@AccioClimaDiba*