

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Desenvolupament i validació de models matemàtics per a reproduir el comportament elèctric de bateries recarregables

MEMÒRIA

Autor: Díaz Font, Pol
Director: Díaz González, Francisco
Convocatòria: Juny de 2020



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

El projecte s'inicia amb l'estudi de l'estat de l'art de les bateries recarregables en l'emergent sector del vehicle elèctric. Es presenta la problemàtica associada a la mesura del seu estat de càrrega i es selecciona el mètode combinat que s'empra en el projecte. Es segueix amb un procés de documentació relatiu als models matemàtics existents per a reproduir el comportament elèctric d'aquestes bateries. Es finalitza aquest primer bloc documental de l'estat de l'art amb una introducció conceptual bàsica del filtre de Kalman i com aquest pot ser determinant en la gestió de les bateries del vehicle elèctric.

Posteriorment, en un segon bloc de caràcter experimental, es desenvolupen i s'implementen en un programa de simulació els tres models matemàtics seleccionats a l'estat de l'art (el Combinat, el Simple i l'Estat Zero Histèresi) amb l'objectiu de poder mesurar l'estat de càrrega de les bateries. Es pretén reproduir el més fidelment possible el comportament de les bateries recarregables, però alhora resultant en una solució de baix cost que eviti costos computacionals excessius. S'exposa l'origen de les dades emprades i la metodologia amb la que s'han adquirit. Es descriuen amb precisió les modelitzacions dutes a terme per als diferents models matemàtics i el procediment d'obtenció de tots els seus paràmetres de funcionament. Amb aquestes modelitzacions com a base s'implementa un filtre de Kalman que demostra la robustesa que pot afegir als models matemàtics i que necessiten els sistemes de gestió de bateria del vehicle elèctric. Finalment, es mostren els resultats que validen els models matemàtics i la seva implementació, i també s'extreuen conclusions de tot el procés.

S'inclou un últim bloc amb possibles aplicacions de les modelitzacions desenvolupades, i els seus resultats, amb la finalitat de fer una gestió eficient i òptima de la bateria del vehicle elèctric. A més, s'inclou un resum de l'impacte ambiental de la tecnologia presentada en el projecte i el pressupost i la planificació que ha seguit el mateix.

Sumari

RESUM	3
SUMARI	4
1. GLOSSARI	6
1.1. Llistat de símbols.....	6
1.2. Definicions preliminars	8
2. INTRODUCCIÓ	10
2.1. Objectius del projecte.....	10
2.2. Justificació del projecte.....	10
2.3. Abast del projecte.....	12
3. ESTAT DE L'ART	14
3.1. Vehicle elèctric	14
3.2. Bateries recarregables	16
3.2.1. Bateria de liti i de liti, ferro i fosfat.....	18
3.3. Mètodes d'estimació del SOC	19
3.4. Models matemàtics.....	22
3.4.1. Model matemàtic Combinat	25
3.4.2. Model matemàtic Simple.....	26
3.4.3. Model matemàtic Estat Zero Histèresi	27
3.5. Filtre de Kalman	29
4. ASSAIG	35
4.1. Instrumentació.....	35
4.2. Metodologia	38
4.2.1. Metodologia desitjada	38
4.2.2. Metodologia emprada	40
5. SIMULACIÓ	42
5.1. Modelització.....	42
5.1.1. Model Simple	43
5.1.2. Model Combinat.....	46
5.1.3. Model Estat Zero Histèresi.....	48
5.2. Parametrització	50
5.3. Resultats modelització	53
5.4. Implementació del filtre de Kalman	57

5.5. Resultats filtre de Kalman	62
6. APLICACIONS _____	69
7. IMPACTE AMBIENTAL _____	72
8. PRESSUPOST _____	74
9. PLANIFICACIÓ _____	76
CONCLUSIONS _____	77
AGRAÏMENTS _____	79
BIBLIOGRAFIA _____	80

1. Glossari

1.1. Llistat de símbols

A	Amper
AC	<i>Alternating Current.</i> Corrent alterna
Ah	Ampers hora
As	Ampers segon
BEV	<i>Battery Electric Vehicle.</i> Vehicle elèctric de bateries
BMS	<i>Battery Management System.</i> Sistema de gestió de bateria
CO₂	Diòxid de carboni
C-rate	Rati C o de descàrrega
DC	<i>Direct Current.</i> Corrent continu
DOD	<i>Depth Of Discharge.</i> Profunditat de descàrrega
EIS	<i>Electrochemical Impedance Spectroscopy.</i> Espectroscòpia d'Impedància
EOL	<i>End Of Life.</i> Final vida útil
EQM	Error Quadràtic Mitjà
EV	<i>Electric Vehicle.</i> Vehicle elèctric
GS/s	Graham-Stetzer partit per segon
HEV	<i>Hybrid Electric Vehicle.</i> Vehicle elèctric híbrid
HV	<i>High Voltage.</i> Alt voltatge
I	Intensitat elèctrica
Kg	Quilogram
kVA	Quilovolt amper

kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt hora
LFP	<i>Lithium FerroPhosphate</i> . Liti, ferro i fosfat
Li⁺	Ió de liti
Li	Liti
LIB	<i>Lithium-Ion Battery</i> . Bateria d'ió liti
LiFePO₄	Fosfat de ferro-liti
Li-ion	<i>Lithium-ion</i> . Ió liti
MHz	Mega Hertz
MOSFET	Transistor d'Efecte de Camp Metall-Semiconductor
OCV	<i>Open-Circuit Voltage</i> . Voltatge en circuit obert
PbA	Plom i àcid
PHEV	<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i> . Vehicle híbrid elèctric endollable
R	Resistència elèctrica
RMS	<i>Root Mean Square</i> . Mitjana quadràtica
SOC	<i>State Of Charge</i> . Estat de càrrega
SOH	<i>State of Health</i> . Estat de salut
SPM	<i>Single Particle Model</i> . Model de partícula simple
SVM	<i>Support Vector Machine</i> . Màquina de vectors de suport
UE	Unió Europea
V	Voltatge elèctric
Wh/kg	Watt hora partit per quilogram
Wh/l	Watt hora partit per litre

1.2. Definicions preliminars

- **BMS:** El sistema de gestió de bateria (BMS, *Battery Management System*) és un sistema electrònic que s'encarrega de gestionar una bateria recarregable. Això implica la seva protecció per no operar fora del seu rang de seguretat, el seguiment del seu estat de càrrega, l'estimació dinàmica de la potència disponible o l'equilibri entre les seves diferents cel·les (subdivisions de la bateria).
- **Capacitat:** La capacitat és la quantitat "d'energia" que pot ser emmagatzemada en una bateria. Aquesta es basa en el corrent proporcionat en la descàrrega. S'expressa en ampers hora (Ah) que representen la quantitat d'electricitat que, en una hora, passa pels terminals d'una bateria quan aquesta proporciona un corrent elèctric d'un amper (A). Una bateria de 100 Ah, teòricament, pot entregar un corrent de 10 A durant 10 hores, o d'1 A durant 100 hores.
- **Cicle:** És la acció de càrrega i descàrrega d'una bateria recarregable que es repeteix a intervals regulars.
- **Densitat d'energia:** És l'energia disponible en una bateria per unitat de volum i s'expressa en watts hora partit per litre (Wh/l).
- **Energia:** La quantitat d'energia que pot subministrar una bateria depèn de la seva capacitat i del seu voltatge i s'expressa habitualment en watts hora (Wh).
- **Estat de càrrega:** El SOC (*State Of Charge*) és el nivell de càrrega d'una bateria elèctrica en relació a la seva capacitat. Les seves unitats són els punts percentuals.
- **Estat de salut:** El SOH (*State Of Health*) és un paràmetre d'estimació de la condició de la bateria en comparació amb les seves condicions inicials. Les seves unitats són els punts percentuals.
- **Energia específica:** És l'energia disponible en una bateria per unitat de massa i s'expressa en watts hora partit per kilogram (Wh/kg).
- **Potència específica:** És la potència disponible en la bateria per unitat de massa i s'expressa en watts partit per kilogram (W/kg).
- **Profunditat de descàrrega:** la DOD (*Depth Of Charge*) és una mesura alternativa (inversa) al SOC. Les unitats també són els punts percentuals.

- **Rati C:** és la mesura del rati al qual una bateria recarregable es càrrega o descàrrega en relació a la seva capacitat. Una mateixa bateria de 4 Ah a 4 A, a 1C es descarregarà en una hora, a 2C en mitja hora i a C/2 en dues hores.
- **Resistència interna:** resistència elèctrica inherent a la bateria, generalment diferent per la càrrega i la descàrrega. Quan la resistència interna augmenta, l'eficiència de la bateria disminueix i l'estabilitat tèrmica es redueix, ja que la majoria d'energia es converteix en calor.
- **Terminal:** És la connexió elèctrica al circuit extern de la bateria. Cada terminal està connectat a l'inici o al final de la connexió en sèrie de les cel·les d'una bateria.
- **Voltatge als terminals:** És en una bateria la diferència de potencial entre els seus dos terminals quan s'hi connecta una càrrega. Per tant, és la diferència de potencial quan hi ha un pas de corrent entre els terminals. El voltatge als terminals varia amb el SOC i amb el corrent de càrrega i descàrrega.
- **Voltatge de circuit obert:** l'OCV (*Open Circuit Voltage*) és la diferència de potencial elèctric entre dos terminals d'una bateria quan es troba desconnectada de cap circuit, és a dir quan no hi ha cap càrrega externa connectada. En anàlisi de xarxes també s'anomena voltatge de Thévenin.

2. Introducció

En la introducció s'estableixen els objectius i l'abast del projecte. També s'hi inclou una breu justificació de la seva elecció i la seva contextualització.

2.1. Objectius del projecte

L'objectiu principal del projecte és simular i verificar una sèrie de models matemàtics escollits per a reproduir el comportament d'una bateria recarregable. Es pretenen aconseguir modelitzacions fidels a una bateria real per a poder simular hipotètics escenaris sense la necessitat d'assajar la mateixa. Amb aquestes modelitzacions, també es pretén demostrar l'eficàcia dels filtres de Kalman combinats amb models matemàtics representatius de la cel·la per gestionar adequadament la bateria dels vehicles elèctrics. A més, la implementació d'aquest sistema pretén ser simple, per minimitzar tot el possible els càlculs computacionals hipotètics a realitzar per un sistema de gestió de bateria, però alhora oferir resultats robustos i fiables amb els quals prendre decisions per a maximitzar la seva vida útil, i alhora les seves prestacions. Aquest àmbit d'estudi és d'actualitat i pretén donar una solució a la demanda generalitzada d'augment d'autonomia i disminució de costos dels vehicles elèctrics.

Altres objectius, secundaris, són l'exposició resumida de l'estat de l'art dels vehicles elèctrics, de les bateries i de les formes i reptes que existeixen per conèixer l'estat de càrrega d'aquestes. També objectius secundaris, són l'explicació bàsica del filtre de Kalman i dels models matemàtics amb els que es du a terme la simulació i la documentació sobre els assajos necessaris per a verificar els mateixos.

2.2. Justificació del projecte

Després de més d'un segle d'història, el vehicle elèctric sembla disposat, ara sí, a imposar-se en el mercat. Cada cop són més els fabricants tradicionals que tenen un o més models elèctrics a la seva gama i la tendència sembla reforçar-se dia rere dia.

Avui en dia ja comencen a ser palpables les conseqüències d'un canvi climàtic [1] que sembla complicat d'aturar, i encara més de revertir. Des de mitjans del segle XX el planeta ha vist un augment exponencial de les emissions anuals de gasos d'efecte hivernacle, com el diòxid de carboni [2], a l'atmosfera. Aquest creixement ha provocat l'augment sostingut de la temperatura mitjana de la Terra [3]. Els 19 dels 20 registres anuals de temperatura més elevada del planeta són a partir de 2001, amb l'excepció de 1998. L'any 2016 va ser el més

calorós enregistrat mai.

Dia rere dia, augmenta tant la pressió social, com la pressió institucional, en la presa de decisions que contribueixin a frenar el canvi climàtic. La situació de la Unió Europea (UE) n'és un exemple. La indústria del transport es responsable a dia d'avui de prop del 30% de les emissions totals de CO₂ de la UE, un 72% del les quals provenen del transport per carretera [4]. Actualment la UE té fixat l'objectiu de reduir les emissions provinents del transport un 60% fins a 2050, respecte els nivells de 1990. El 60,7% de les emissions totals del transport per carretera a Europa provenen dels cotxes de passatgers.

El desenvolupament del vehicle elèctric ha crescut ràpidament els darrers 10 anys [5], amb un estoc de vehicles elèctrics de passatgers que superaven els 7,2 milions el 2019, un increment del 40% respecte l'any anterior. Al voltant del 37% dels vehicles elèctrics privats a la carretera el 2019 es trobaven a la Xina, amb un 23% als països europeus de Noruega, França , Alemanya, Països Baixos i el Regne Unit, i un 24% als Estat Units d'Amèrica.

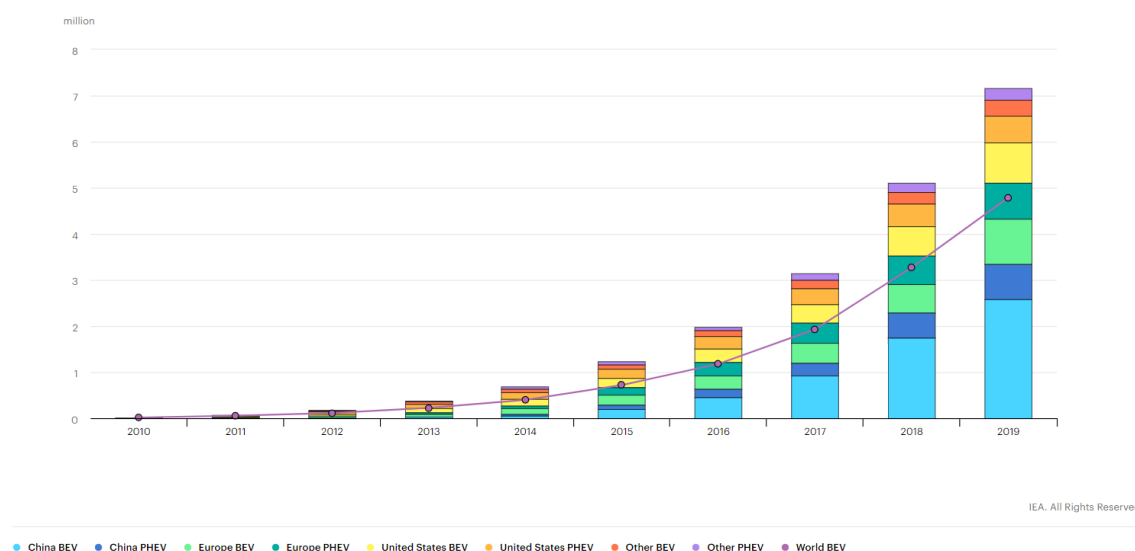


Fig. 1. Implementació del vehicle elèctric 2013-2018 (BEV: elèctric pur; PHEV: híbrid endollable) [6]

Les vendes de vehicles elèctrics nous en països com Suècia, Islàndia o Països Baixos ja van superar el 5% el 2018, i a Noruega el 46%. Sent xifres absolutes encara discretes, les previsions arriben a projectar quotes del mercat mundial superiors al 30% el 2030, incentivades pel desenvolupament en les polítiques governamentals i els avenços tecnològics.

Quan es parla de vehicles elèctrics, els dos grans obstacles en augmentar la quota de mercat són el preu i l'autonomia. I sorprenentment aquests dos obstacles tenen origen en el mateix component, que esdevé clau en el vehicle elèctric: les bateries recarregables. Per exemple, les bateries d'ió de liti, les més comuns en els vehicles elèctrics, han disminuït el seu preu prop d'un 85% del 2010 al 2018 [7]. La previsió és que la tendència segueixi a la baixa, tot i que a partir d'ara a un ritme més sostingut. Aquest hauria de ser un factor clau en la reducció del preu del vehicle elèctric.

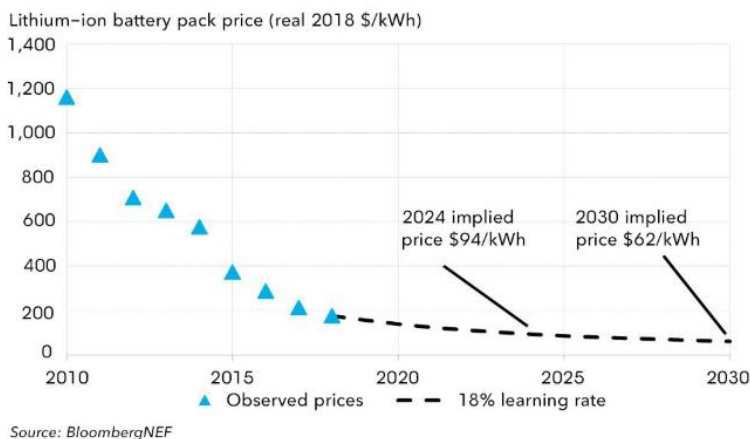


Fig. 2. Previsió del preu de les bateries d'ió de liti [7]

Una altra línia de treball en ple desenvolupament és la gestió de l'energia en la pròpia bateria, que es fa mitjançant un sistema de gestió anomenat BMS (*Battery Management System*). Una adequada gestió de la bateria es pot traduir en l'explotació agressiva, eficient i segura de les seves possibilitats. És per això que el desenvolupament i la validació de models matemàtics que reproduïxien el comportament elèctric de les bateries, que puguin fer-se servir en els BMS, i permetin una millor gestió de tant els seus components físics com de la seva energia, està totalment a l'ordre del dia.

2.3. Abast del projecte

El projecte està estructurat de tal manera que faciliti que un públic molt general pugui arribar a comprendre els resultats obtinguts en el bloc experimental. Això, implica una immersió gradual en el sector del vehicle elèctric, les bateries i els mètodes per a poder conèixer l'estat de càrrega de les mateixes.

Acte seguit, s'introdueixen els models matemàtics i els filtres de Kalman, que són la teoria més important sobre la qual es recolza el projecte. De literatura sobre aquests dos àmbits n'hi ha molta però es pretén fer una exposició ordenada i assequible dels conceptes.



Un cop aquesta teoria fonamental ha estat exposada, s'entra de ple en la simulació dels models escollits i en la verificació d'aquests, no sense abans detallar els processos i assajos que s'han seguit per arribar-hi.

També s'intenta profunditzar una mica més en l'aplicació d'aquests models de simulació en un sistema de gestió de bateria i es discuteixen tant els resultats obtinguts com les línies mestres d'una possible continuació del projecte. Per últim es fa un resum de l'impacte ambiental associat a les tecnologies tractades al llarg del projecte i s'afegeix el pressupost i la planificació temporal del mateix.

3. Estat de l'art

En l'estat de l'art s'aporta resumidament la documentació necessària que du a la comprensió de la necessitat de desenvolupar i validar els models matemàtics proposats en el projecte. En primer lloc, es fa una breu aproximació al sector del vehicle elèctric, seguit per una descripció més detallada de les bateries que aquests usen. També s'especifiquen les característiques de la composició concreta de la bateria utilitzada en el projecte.

En segon lloc, s'exposen les metodologies existents per a conèixer l'estat de càrrega de les bateries recarregables i perquè això és tant important en el funcionament dels vehicles elèctrics. Es justifica la metodologia escollida per a la part experimental del projecte.

En tercer lloc, es sintetitza la informació existent referent als models matemàtics més importants per a la gestió de bateries i emprats en el sector dels BMS dels vehicles elèctrics. També es justifica l'elecció de tres d'ells per al bloc experimental del projecte. L'estat de l'art finalitza amb l'exposició de què és un filtre de Kalman i quina és la seva dinàmica de funcionament.

3.1. Vehicle elèctric

En el mercat del vehicle elèctric (EV, *Electric Vehicle*) és habitual trobar-se amb una sèrie de sigles que denoten els diferents tipus que es poden trobar. Els més importants són els següents:

- **BEV:** els vehicles de bateria elèctrica (*Battery Electric Vehicle*) són els elèctrics purs. Són vehicles propulsats per un o varis motors i que consumeixen únicament l'energia emmagatzemada a les seves bateries recarregables. No disposen de cap altre mitjà de propulsió, de manera que un cop descarregada la bateria cal recarregar-la connectant-los de nou a la xarxa elèctrica.
- **HEV:** els vehicles elèctrics híbrids (*Hybrid Electric Vehicle*) són els híbrids no endollables. Combinen un o varis motors elèctrics amb un altre de combustió interna. Poden circular en mode totalment elèctric però la seva autonomia és molt limitada i en el moment d'assolir una certa velocitat el motor de combustió entra en acció. Les bateries que alimenten la part elèctrica es recarreguen gràcies al sistema de recuperació d'energia durant la frenada.
- **PHEV:** els vehicles elèctrics híbrids endollables (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*) són els cotxes híbrids endollables que funcionen amb un motor de combustió i un o varis

d'elèctrics. La diferència respecte als HEV és que els PHEV compten amb un paquet de bateries habitualment més gran i recarregable mitjançant un punt de recàrrega. Això els acostuma a permetre recorre distàncies més grans en mode purament elèctric.

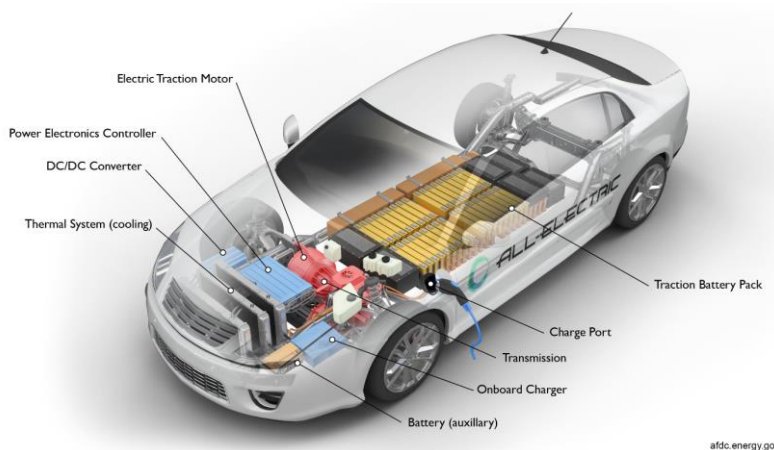


Fig. 3. Elements característics del vehicle elèctric (BEV) [8]

Des del punt de vista del sistema elèctric, els components bàsics de tots tres tipus d'EV són pràcticament els mateixos. Per a tots tres la bateria esdevé el centre del sistema. Aquestes bateries són d'alt voltatge i la seva mida varia en funció de la tipologia d'EV i dels models. Aquesta bateria disposa d'un BMS que és el mòdul encarregat del control i gestió de les principals característiques de càrrega i descàrrega, com el voltatge, el corrent o la temperatura. És la unitat que pot decidir, en última instància, si subministrar o no l'energia elèctrica requerida pel motor.

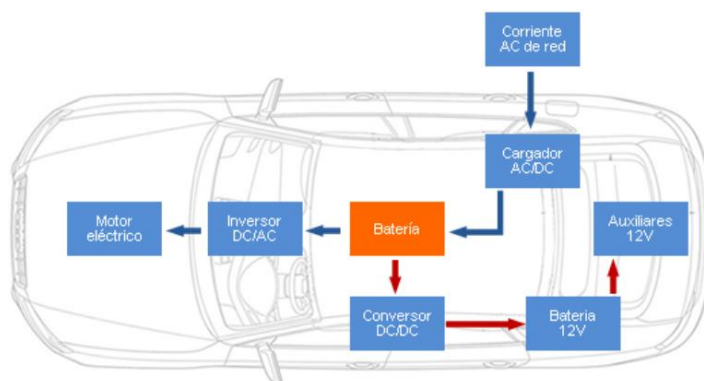


Fig. 4. Principals components del sistema elèctric d'un BEV [9]

Per al cas dels BEV i PHEV, la bateria recarregable disposa d'un convertidor AC/DC que converteix el corrent altern (AC) d'entrada de la xarxa elèctrica a corrent continu (DC), que és com s'emmagatzema l'electricitat en una bateria. Per a recàrregues més ràpides, aquest

procés en el convertidor AC/DC s'estalvia subministrant directament DC d'entrada. Tots els EV disposen igualment d'una bateria auxiliar de 12 V que proveeix d'electricitat al vehicle abans que s'encengui la bateria principal i els seus sistemes auxiliars. Aquesta bateria auxiliar es recarrega amb un convertidor unidireccional DC/DC.

Per altre banda, l'energia elèctrica proporcionada arriba al motor elèctric passant per un convertidor DC/DC i un inversor DC/AC, tots dos bidireccionals. El motor i l'inversor estan controlats per la unitat de control del motor que s'encarrega de regular la velocitat, el parell i la direcció del motor. Aquest control té en compte en tot moment la disponibilitat màxima d'energia que el BMS estima que la bateria pot oferir, mitjançant la comunicació amb la unitat central de control del vehicle. Per últim, el motor elèctric és l'encarregat de transformar l'energia elèctrica en moviment que acciona les rodes del vehicle per mitjà de la transmissió. En el cas del HEV i el PHEV, a la transmissió s'hi pot sumar el moviment aportat pel motor de combustió.

3.2. Bateries recarregables

Una bateria [10] és un artefacte que transforma l'energia química continguda en els seus materials actius directament a energia elèctrica, mitjançant una reacció electroquímica d'oxidació-reducció (redox). En el cas d'un sistema recarregable, la bateria es recarrega pel procés invers. Aquest tipus de reacció representa la transferència d'electrons d'un material a un altre mitjançant un circuit elèctric.

Encara que el terme bateria està àmpliament estès, la unitat electroquímica base a la qual realment es fa referència és la cel·la. Així doncs, una bateria consisteix en una o més cel·les, connectades en sèrie o paral·lel, o una combinació d'ambdues, depenent del voltatge i la capacitat desitjades.

La cel·la consisteix en tres components principals (anomenats segons el procés de descàrrega):

- **L'ànode o l'elèctrode negatiu** (l'elèctrode reductor) el qual proporciona electrons al circuit extern i es oxidat (cedeix els seus electrons) durant la reacció electroquímica.
- **El càtode o l'elèctrode positiu** (l'elèctrode oxidant) el qual accepta electrons del circuit extern i es reduït (guanya electrons) durant la reacció electroquímica.
- **L'electròlit** (el conductor iònic) que proporciona el medi de transferència dels ions dins de la cel·la entre l'ànode i el càtode. L'electròlit típicament és un líquid, com aigua o altres solvents, amb sals, àcids o alcalins dissolts per induir la conductivitat iònica.

De manera pràctica, l'ànode es seleccionat amb una sèrie de propietats en ment: l'eficiència com a agent reductor, la bona conductivitat, l'estabilitat, la facilitat de fabricació o el cost. Els materials més usats com a ànode són certs metalls. El càtode, en canvi, es seleccionat segons l'eficiència com a agent oxidant, l'estabilitat en contacte amb l'electròlit i el seu rang d'operativitat amb voltatge. Els materials més usats com a càtode són els òxids metàl·lics.

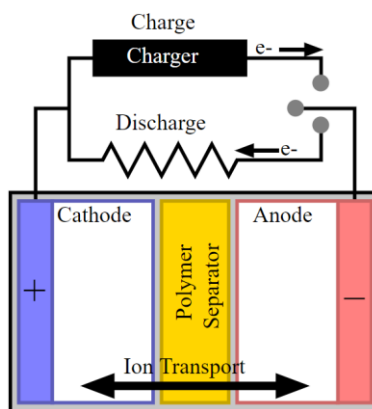


Fig. 5. Funcionament general d'una bateria recarregable [11]

L'operació de descàrrega en una cel·la es produeix quan aquesta es troba connectada a una càrrega externa. Aleshores, els electrons flueixen de l'ànode, que s'ha oxidat, i a través de la càrrega externa fins el càtode, on els electrons són acceptats i el material del càtode es redueix. El circuit elèctric es completat a l'electròlit amb el flux d'anions (ions amb càrrega negativa) i cations (ions amb càrrega positiva) a l'ànode i el càtode, respectivament. Durant l'operació de recàrrega el flux de corrent s'inverteix i l'oxidació es produeix a l'elèctrode positiu i la reducció a l'elèctrode negatiu. Com l'ànode és, per definició, l'elèctrode en el que es produeix l'oxidació i en el càtode la reducció, l'elèctrode positiu realment ara seria l'ànode i el negatiu el càtode.

Electroquímicament les cel·les i les bateries s'identifiquen com a no-recarregables, també anomenades primàries, i recarregables, o també anomenades secundàries, depenent de la seva possibilitat de ser recarregades. Les bateries recarregables es poden recarregar elèctricament, després de la descàrrega, fins al seu estat inicial fent circular corrent a través d'elles en direcció contrària a la corrent de descàrrega. Aquestes bateries es caracteritzen per tenir una gran densitat de potència, un rati de descàrrega (rati C) alt o un bon comportament en condicions de baixes temperatures.

Dos paràmetres essencials en les bateries són el voltatge i la capacitat de la cel·la, ja que teòricament són funció exclusiva dels materials de l'ànode i el càtode. Així, el potencial teòric de la cel·la ve determinat pel tipus de material actiu present. Aquests valors es poden obtenir de forma experimental o tabulada. Per altra banda, la capacitat teòrica de la cel·la ve determinada per la quantitat dels materials actius presents. Aquesta s'expressa com la

quantitat total d'electricitat involucrada en la reacció electroquímica i s'expressa en ampers hora (Ah). També es pot entendre com la quantitat d'energia que es pot emmagatzemar en una bateria. Sovint s'usa un tercer paràmetre per descriure la capacitat d'una cel·la basant-se amb l'energia. Aquesta energia és el producte dels dos paràmetres descrits anteriorment i s'expressa en watts hora. Aquest valor d'energia teòrica és el màxim que pot oferir un sistema electroquímic específic.

A continuació, es descriuen amb més profunditat les característiques i els processos que es duen a terme en les bateries de liti, i específicament en les de liti, ferro i fosfat. El motiu és que és la tipologia específica de bateria recarregable, dins la família de les d'ió liti, que s'ha emprat en el bloc experimental del projecte.

3.2.1. Bateria de liti i de liti, ferro i fosfat

Les bateries d'ió-liti (Li-ion) són un tipus de família de bateria recarregable, de la qual forma part la de liti, ferro i fosfat (LFP, *lithium ferrophosphate*). L'ús de les bateries de Li-ion està àmpliament estès en els dispositius electrònics portàtils, els vehicles elèctrics i recentment en aplicacions militars i aeroespacials. En les bateries els ions de liti (Li^+) es mouen de l'elèctrode negatiu al positiu a través de l'electròlit en la descàrrega. En la càrrega es produeix la situació inversa. Les bateries de Li-ion usen un compost de liti (Li) com a material de l'elèctrode positiu i usualment grafit a l'elèctrode negatiu.

Aquestes bateries tenen una alta densitat energètica d'entre 250 i 700 Wh/l, una energia específica també alta d'entre 100 i 265 Wh/kg, les seves cel·les són d'alt voltatge, tenen una auto-descàrrega baixa i no tenen efecte memòria (pèrdua de capacitat produïda per descàrregues repetidament incompletes). Tot i així, tenen un important problema de seguretat ja que contenen electròlits inflamables, i si aquestes bateries pateixen desperfectes o són carregades incorrectament poden produir un procés anomenat fuga tèrmica (*thermal runaway*) que desemboca en foc i explosions. Un *thermal runaway* és un fenomen que es produeix per una funció defectuosa de la bateria i suposa un increment de la temperatura descontrolat. Acte seguit, els elèctrodes i l'electròlit es descomponen i es produeixen reaccions potencialment perilloses entre l'oxigen del càtode amb els solvents de l'electròlit. Factors desencadenants d'una fuga tèrmica poden ser sobrecàrrega i desperfectes, o bé un sobreescalfament o un curt-circuit en la bateria. Aquests tipus de bateries requereixen una supervisió continua i això es una de les funcions dels BMS.

La química, el rendiment, el cost i les característiques de seguretat varien en funció del tipus de bateria de Li-ion. Algunes de les àrees de recerca actuals inclouen l'extensió de la vida útil, la densitat energètica, la seguretat, la reducció de cost o la velocitat de recàrrega. Les bateries de LFP destaquen específicament d'entre les Li-on per tenir una baixa toxicitat, per tenir un baix cost, disposar d'un cicle de vida llarg i ser força estables tèrmicament.

Els tres components funcionals principals d'una bateria Li-ion són els elèctrodes positiu i negatiu i l'electròlit. Generalment, l'elèctrode negatiu d'una cel·la de Li-ion es de carboni en forma de grafit. L'elèctrode positiu és un metall oxidat, i l'electròlit és una sal de liti en un solvent orgànic. Els rols electroquímics dels elèctrodes s'intercanvien entre l'ànode i el càtode depenent de la direcció del flux de corrent de la cel·la. Les característiques de la bateria de Li-ion (rang de voltatge, voltatge nominal, *thermal runaway*, cicles de vida, potència) depenen aleshores de la química del càtode.

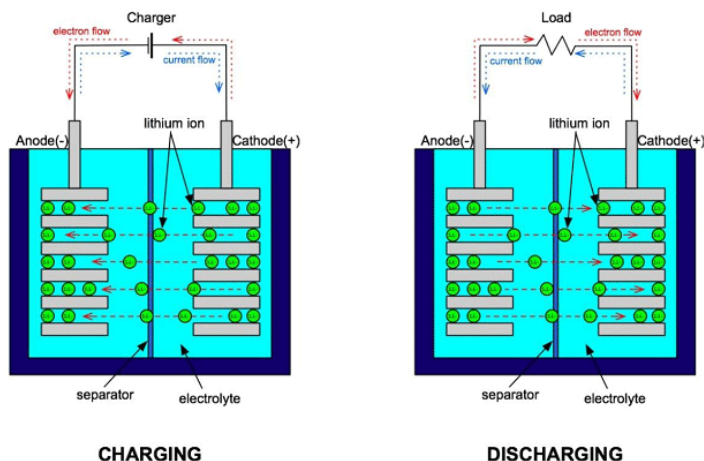
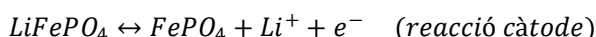
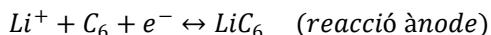


Fig. 6. Funcionament general d'una bateria recarregable de liti [12]

La LFP concretament fa ús del liti, del ferro i del fosfat (LiFePO_4) com a material del càtode. Els processos elementals que es produeixen són els següents:



Les bateries de LFP tenen un voltatge de descàrrega molt constant proper als 3,2 V. Aquesta característica permet oferir la màxima potència durant tota la descàrrega. El voltatge mínim de descàrrega és de 2,5 V, i el màxim de 3,65 V. La densitat d'energia es situa al voltant dels 325 Wh/l i l'energia específica entre els 90 i 160 Wh/kg. Les LFP es troben d'entre les bateries de liti amb un cicle de vida més prolongat [13]. La mitjana se situa per sobre dels 2000 cicles. També es troben d'entre les bateries de liti amb una potència més elevada, més segures (el *thermal runaway* es produeix al voltant dels 270 °C) i més estables, com ja s'ha indicat. Per contra, sacrifiquen densitat energètica i són més cares.

3.3. Mètodes d'estimació del SOC

El SOC o estat de càrrega és el nivell de càrrega d'una bateria elèctrica relatiu a la seva capacitat. La unitat del SOC són els punts percentuals (0% indica buit i 100% indica ple).

Una manera alternativa de fer la mateixa mesura és la profunditat de descàrrega (DOD), l'invers del SOC (100% indica buit i 0% indica ple). El SOC s'usa normalment quan es discuteix l'estat actual d'una bateria en ús, mentre que el DOD s'usa més habitualment quan es parla de la vida útil de la bateria després d'un ús repetit.

En un BEV, un HEV o un PHEV el SOC per la bateria és l'equivalent al dipòsit de carburant d'un vehicle de combustió. Per tant, resulta evident la necessitat de conèixer el SOC de qualsevol bateria i especialment de les recarregables que equipen aquests vehicles. El gran problema és que el SOC no pot ser mesurat directament, però sí que pot ser estimat amb mesures directes de variables, ja sigui en funcionament (dinàmic) o bé interrompent el funcionament principal de la bateria. Aquesta darrera metodologia resulta en una estimació precisa del SOC però resulta llarga, costosa i interromp el seu funcionament principal. Per tant, la tendència és usar tècniques que permetin mesurar aquest indicador durant el funcionament habitual de la bateria. Una estimació adequada del SOC proporciona beneficis sobre la longevitat, el rendiment i la densitat de les bateries necessàries en els EV.

Sobre-carregar o sobre-descarregar la cel·la d'una bateria pot resultar en un dany irreversible i reduir la seva vida útil. Una estimació del SOC precís permet evitar aquests danys i maximitzar la vida útil de la mateixa. Sense un estimador òptim o fiable del SOC cal ser conservador per evitar el danys anteriorment descrits. Això significa no exprimir la totalitat del potencial de la bateria. Per tant un indicador fiable del SOC permet extreure tot el rendiment de la bateria i conseqüentment de l'EV, i alhora evita haver de sobre-dimensionar-la, permetent bateries en conjunt més petites i lleugeres (i més barates).

La qüestió fonamental en els EV és utilitzar mètodes no invasius que simplement llegeixin senyals disponibles per extreure aproximacions de l'estat de càrrega de la bateria. En un entorn on el BMS no té control directe sobre el corrent i el voltatge de la bateria (aquests depenen del controlador i l'inversor del vehicle elèctric) els mètodes no invasius són imperatius. Cal basar-se únicament en les mesures instantànies del voltatge en els terminals de les cel·les (i tota la bateria), la corrent en aquestes i la temperatura externa de la bateria. A més, la química específica de cada bateria pot limitar el nombre de mètodes disponibles. A continuació, es citen els principals mètodes d'estimació del SOC i la viabilitat que tenen en aquest projecte enfocat als BMS dels EV:

- **Mètode de laboratori:** Un mètode de laboratori per determinar el SOC és descarregar completament la cel·la o la bateria (quan aquesta està totalment carregada), anotant els ampers hora descarregats, per determinar la capacitat restant. Aquesta és la mesura més acurada del SOC, però en l'entorn de l'EV és poc pràctic ja que representaria gastar l'energia de la bateria en l'assaig i aquesta no es podria estimar de manera dinàmica.

- **Mètode químic:** Un mètode químicament depenent funciona únicament amb certes bateries que ofereixen accés a l'electròlit. La bateria que més usualment admet aquest mètode és la de plom i àcid (PbA). L'hidròmetre és l'instrument utilitzar per mesurar la densitat relativa dels líquids basant-se en el concepte de la flotabilitat i ofereix una alternativa de mesura del SOC en les bateries de PbA. Quan la bateria de PbA accepta càrrega, l'àcid sulfúric es torna més pesat, causant que la densitat relativa augmenti. Mentre que el SOC disminueix en la descàrrega, l'àcid sulfúric es desprèn de l'electròlit i s'adhereix a l'elèctrode, formant sulfat de plom. Aleshores és quan la densitat de l'electròlit disminueix i alhora ho fa la densitat relativa. Aquesta densitat està tabulada per a l'electròlit i això permet relacionar-la directament amb el SOC. Tot i així, la temperatura o l'estratificació poden influir en aquestes lectures. A nivell pràctic aquest mètode només es útil en situacions estàtiques i sempre i quan hi hagi accés a l'electròlit. Per a les bateries de liti no funciona.
- **Lectura directa del voltatge:** A nivell teòric, mesurar el SOC a partir del voltatge és senzill (només cal comparar taules representatives del comportament de la bateria), però pot ser poc acurat perquè els materials exactes de la cel·la i la seva temperatura, així com la histèresi, el rati de descàrrega o la degradació de la bateria, poden afectar aquesta lectura del voltatge. Tot i així, el problema principal d'aquest mètode basat en la lectura del voltatge és que les lectures que ofereix en la càrrega, descàrrega i moments posteriors són molt imprecises. L'agitació resultant d'aquests processos distorsiona el voltatge i ja no representa correctament el nivell de SOC de la bateria. Per a disposar de lectures realment fiables cal prendre les mesures després de períodes de temps d'hores. Aquest mètode resultaria molt interessant al requerir simplement la lectura directa del voltatge (facilitada en els vehicles elèctrics) però el fet que aquestes estiguin distorsionades per diversos factors suposa un gran escull. Un altre obstacle és que avui en dia un dels principals objectius en el disseny de bateries és proporcionar un voltatge constant amb independència del SOC, fet que complica encara més aplicar el mètode.
- **Espectroscòpia d'impedància:** Un altre mètode molt estès sobretot en test de bateries és l'espectroscòpia d'impedància electroquímica de freqüència múltiple (EIS) [14]. Aquest mètode implica mesurar la impedància de les cel·les en un ampli rang de freqüències de corrent alterna a diferents estats de càrrega. Aquestes mesures s'han d'introduir en uns models de cel·la que permetran conèixer el SOC indirectament mitjançant la impedància actual de la cel·la i correlacionant-la amb les impedàncies conegudes a diferents valors de SOC. Aquest mètode en el nostre cas no és adequat degut a les limitacions operatives del vehicle elèctric, doncs aquest no permet injectar senyals a les cel·les per mesurar les impedàncies amb precisió.

- **Integració del corrent:** La integració del corrent (o *Coulomb counting*) és un altre mètode àmpliament usat que calcula el SOC mesurant el corrent de la bateria i integrant-lo en el temps. És una solució elegant però les pèrdues (en la mesura del corrent) redueixen l'energia total proporcionada. A més, al mesurar el corrent, a llarg termini es perd el punt de referència (per la càrrega i descàrrega) i cal tornar a calibrar el SOC periòdicament. Per tant és un mètode que perd fiabilitat entre calibratges de forma progressiva. Mesurar amb alta precisió el corrent sol ser complicat i costós.
- **Mètodes combinats:** Per últim, existeixen uns mètodes que combinen alguns dels mètodes descrits i els milloren. Un exemple, és el filtre de Kalman que s'implementa en el projecte. El filtre de Kalman s'utilitza per superar els punts dèbils del mètode de lectura directa del voltatge i de la integració del corrent. La bateria pot ser modelitzada segons un model matemàtic que el filtre de Kalman utilitzarà per predir el sobre-voltatge gràcies al corrent. En combinació amb el *Coulomb counting* és un mètode que presenta unes molt bones estimacions del SOC. El punt fort del filtre de Kalman és que es capaç d'ajustar la seva fiabilitat en la lectura del voltatge entre terminals de la bateria i del *Coulomb counting* en temps real. El punt comú dels mètodes combinats és que requereixen un model matemàtic, que tenen un cost computacional elevat i que fan correccions de les estimacions fetes per aquests models. Altres exemples de models combinats es basen en les xarxes neuronals *Backpropagation* (BP) [15], en la lògica difusa [16] o en màquines de vectors de suport (SVM).

El mètode que ofereix una millor relació entre fiabilitat de l'estimació del SOC i dificultat tècnica d'implementació és el combinat amb filtre de Kalman. És per això que ha estat l'escollit per a implementar en el bloc experimental del projecte. És un mètode, que com ja s'ha indicat, es basa en les lectures del corrent i del voltatge de la cel·la i és capaç de millorar la seva estimació del SOC en dinàmic, i aquestes són precisament les lectures i la condició que presenten els EV. No obstant, aquest mètode és més complex que els altres que s'han descrit (exceptuant els mètodes combinats) i requereix d'una tècnica més elevada. L'ús del filtre de Kalman en l'estimació del SOC és un dels mètodes implementats habitualment en els BMS.

3.4. Models matemàtics

Els models matemàtics de bateria recarregable s'usen en moltes aplicacions i amb moltes finalitats diferents. Pretenen ser representatius del seu comportament incorporant diferents variables d'estat i paràmetres. En el present projecte són d'interès en dos àmbits d'aplicació diferenciables i concrets:

- **Simulació de comportament:** Els models matemàtics són una valuosa eina que permet desenvolupar sistemes de modelització més o menys complexes que representen amb més o menys fidelitat i robustesa el comportament d'una determinada bateria elèctrica. Aquest fet facilita l'experimentació sobre un suport digital com a pas previ o complementari a un assaig de laboratori i permet reduir notablement els costos d'investigació. A més, també es pot percebre com una eina de disseny de noves bateries i de predicció del comportament de les mateixes. Un matís important és que cada modelització d'una bateria específica ha d'incorporar un model matemàtic únic per aquesta en quant a paràmetres obtinguts d'un assaig.
- **Mètodes d'estimació del SOC per a BMS d'EV:** El mètode combinat del filtre de Kalman requereix la implementació d'aquest mateix filtre en qüestió a un model matemàtic representatiu de la bateria on s'aplica. El filtre no deixa de ser un element afegit al modelitzat de la bateria que li augmenta la fiabilitat i la robustesa i permet aplicar-lo en sistemes dinàmics, com és el cas del BMS d'un EV.

A l'hora de parlar de models matemàtics cal fer un previ incís aclaridor sobre el terme model i el seu ús en el projecte. Un model és simplement una cosa que serveix com a pauta per ser imitada, reproduïda o copiada. En el projecte s'usa el terme model per a referir-se a dos conceptes lleugerament diferents. Per una banda, apareixen els models matemàtics. Aquests són la descripció d'un sistema utilitzant conceptes matemàtics i són els representatius del comportament de les cel·les de la bateria en el projecte. Per altra banda, apareixen els models de Simulink que s'expliquen més endavant. Aquests models o modelitzacions són sistemes (també matemàtics representatius de sistemes físics) que representen el comportament global de la bateria i que permeten amb certa facilitat, i de manera interactiva, modificar condicions de contorn, paràmetres o l'extracció de dades. Al referir-se tots dos conceptes a models es procura anomenar els primers com a models matemàtics (per la seva naturalesa matemàtica més evident) i els segons com a modelitzacions o simplement models.

Existeixen molts models matemàtics de bateria [16] especialment dissenyats per als BMS. Els més estesos són els basats en les reaccions químiques que es produeixen a la bateria, anomenats models electroquímics, i els que busquen definir un sistema elèctric que es comporti com una bateria real, anomenats models de circuit equivalent. Els paràmetres de qualsevol model de bateria han d'extreure's per a cada bateria específica mitjançant assajos. Cal destacar que la recerca de models de bateria prou precisos però computacionalment eficients encara és un repte.

Els models electroquímics utilitzen habitualment equacions diferencials no lineals per descriure el transport d'ions pertinent, la termodinàmica i els fenòmens cinètics que es produeixen a la cel·la. El problema és que típicament fan ús d'equacions diferencials parcials amb un gran nombre de paràmetres desconeguts que duen a grans requeriments de memòria i gran càrrega computacional. Per aquest motiu aquests models no acostumen a ser desitjables per als BMS. Models implementats amb filtres passa-baixos, de l'única partícula (*Single Particle Model*, SPM) [17] o el pseudo-bidimensional [18] en són exemples. Tot i així, existeixen uns models electroquímics anomenats simplificats que ignoren la termodinàmica i els efectes quàntics que es proposen per simular el funcionament electroquímic i de voltatge. El model d'Shepherd, d'Unnewehr, de Nernst o una combinació el tres són opcions típiques.

Els models de circuit equivalent es desenvolupen usant resistors, capacitors i fonts de voltatge per formar un circuit elèctric. Típicament, una font ideal de voltatge es seleccionada per descriure el voltatge de circuit obert i la resta del circuit simula la resistència interna i el fenomen de la relaxació [19]. El model simple, el model de Thévenin [20] o altres revisions són àmpliament utilitzats. Aquests models són sovint escollits en els BMS perquè permeten un bon equilibri entre resultats fiables i requeriments de càlculs en temps real dels seus microprocessadors.

L'objectiu principal de la simulació dels models escollits és poder conèixer en tot moment el SOC i el voltatge dels terminals de la bateria, podent així en tot moment gestionar el seu ús eficientment i extraient-li tot el potencial disponible a la bateria. Els models incorporen una equació d'estat (comuna per a tots els que es presenten) i una altra equació de sortida, que permetrà conèixer el voltatge de la bateria. Conèixer el voltatge de terminals permet caracteritzar el funcionament de la bateria i resulta indispensable per a implementar un filtre de Kalman (ja que és la magnitud que compara constantment amb la real). Aleshores, fer que el SOC sigui membre del vector d'estat facilitarà els càlculs i serà una imposició afegida. Es pot relacionar el SOC amb la corrent de la següent manera:

$$SOC(t) = SOC(0) - \int_0^t \frac{\eta_i \cdot i(\tau)}{C_n} d\tau$$

On $SOC(t)$ és el SOC de la cel·la, $i(\tau)$ és el corrent instantani de la cel·la (assumit com a positiu en la descàrrega i negatiu en la càrrega), i C_n en Ah és la capacitat nominal de la cel·la. L'eficiència coulòmbica de la cel·la (η_i) descriu l'eficiència de càrrega amb la que els electrons són transmesos a la bateria. Es pot interpretar com el rati de la càrrega total extreta de la bateria respecte la càrrega total proveïda a la bateria en un cicle complet. L'eficiència coulòmbica és $\eta_i = 1$ per la descàrrega i $\eta_i \leq 1$ per la càrrega.

Utilitzant una aproximació rectangular per la integració i un període de mostreig Δt suficientment petit, una aproximació discreta en el temps àmpliament acceptada resulta amb l'equació d'estat següent:

$$SOC_{k+1} = SOC_k - \left(\frac{\eta_i \cdot \Delta t}{C_n} \right) i_k$$

Aquesta equació és la base per incloure el SOC en el vector d'estat del model de la cel·la, atès que ja es troba amb el format de l'equació d'estat, amb el SOC com a estat i l' i_k com a entrada.

A continuació, es presenten tres models [21] molt presents en la literatura i que han estat els escollits, d'entre molts altres, per a implementar degut a que reuneixen unes característiques especialment equilibrades entre rendiment i recursos necessaris per a ser emprats. La característica comuna que reuneixen aquests quatre models és que l'únic estat en l'equació d'estat és el SOC. Els tres models estimen el voltatge als terminals de cel·la.

Un cop es seleccionen els models cal trobar els valors dels seus paràmetres mitjançant assajos en cada bateria que es vol modelitzar. Combinant aquests assajos amb algun mètode d'identificació de paràmetres, aquests s'estableixen en els models i s'usen posteriorment per a la simulació de la bateria o per a la determinació del SOC. En els models seleccionats es pot aplicar un mètode d'identificació de paràmetres simple com és l'estimació per mínims quadrats. Tot i així, una alternativa més complexa, però que proporciona valors dels paràmetres més precisos, seria implementar la teoria del filtre de Kalman per a estimar dinàmicament aquests paràmetres.

3.4.1. Model matemàtic Combinat

Aquest model matemàtic Combinat, un tipus de model electroquímic, integra diferents models de cel·la i el seu sistema d'equacions (format per l'equació d'estat i l'equació de sortida) té la forma següent:

$$SOC_{k+1} = SOC_k - \left(\frac{\eta_i \cdot \Delta t}{C_n} \right) i_k$$

$$v_k = K_0 - Ri_k - \frac{K_1}{SOC_k} - K_2 SOC_k + K_3 \ln(SOC_k) + K_4 \ln(1 - SOC_k)$$

On v_k és el voltatge al terminal de la cel·la, R és la resistència interna de la cel·la, i K_0 , K_1 , K_2 i K_3 són constants introduïdes per a que el model reflecteixi el comportament real de la cel·la. Aquest model és la combinació d'altres d'adaptats de la literatura:

$$v_k = E_0 - Ri_k - \frac{K_i}{SOC_k} \quad \text{Model d'Shepherd}$$

$$v_k = K_0 - Ri_k + K_1 \ln(SOC_k) + K_2 \ln(1 - SOC_k) \quad \text{Model de Nernst}$$

$$v_k = E_0 - Ri_k - K_i SOC_k \quad \text{Model universal d'Unnewehr}$$

On K_i és una resistència de polarització. Els paràmetres desconeguts del model combinat han de ser estimats utilitzant un sistema de procediment d'identificació. Aquest model és lineal en els paràmetres, el que vol dir que les incògnites respecten la linealitat en l'equació resultant. Donat un conjunt de N cel·les amb les seves entrades i sortides $\{v_k, i_k, SOC_k\}$, els paràmetres es poden obtenir mitjançant una estimació amb mínims quadrats. Per a dur a terme aquest procediment, primerament, es forma el vector V i la matriu H :

$$V = [v_1, v_2, \dots, v_N]^T$$

$$H = [h_1, h_2, \dots, h_N]^T$$

On les files de la matriu H són:

$$h_j^T = [1, i_j^+, i_j^-, \frac{1}{SOC_k}, SOC_k, \ln(SOC_k), \ln(1 - SOC_k)]$$

On i_j^+ és igual a i_j si $i_j > 0$, i_j^- és igual a i_j si $i_j < 0$, d'altra manera i_j^+ i i_j^- són zero. Aleshores es pot observar que $V = H \cdot \theta$, on $\theta^T = [K_0, R^+, R^-, K_1, K_2, K_3, K_4]$. Així doncs, utilitzant la teoria del mètode de mínims quadrats, es resolen els paràmetres θ utilitzant les matrius conegudes V i H com $\theta = (H^T \cdot H)^{-1} \cdot H^T \cdot V$.

3.4.2. Model matemàtic Simple

El model matemàtic Simple és un model de circuit equivalent però que pot ser deduït a partir dels resultats del model anterior. L'equació del model combinat realment pot ser dividida en dues parts: una part dependent exclusivament del SOC, i una altra part dependent exclusivament del i_k . Si s'anomena $fn(SOC_k)$ a la part dependent del SOC i es dibuixa la corba d' $fn(SOC_k)$ respecte SOC_k és fàcil adonar-se'n que aquesta $fn(SOC_k)$ intenta representar la corba d' $OCV(SOC_k)$. Per tant, una implementació més fàcil i senzilla del model combinat seria el següent:

$$SOC_{k+1} = SOC_k - \left(\frac{\eta_i \cdot \Delta t}{C_n}\right) i_k$$

$$v_k = OCV(SOC_k) - Ri_k$$



Aquesta equació resultant pot ser interpretada com un circuit elèctric equivalent, on poden ser utilitzades diferents resistències per a la càrrega i la descàrrega. Aquest model també és lineal en els paràmetres. En el sistema d'identificació, per mínims quadrats, primerament es forma el vector V i la matriu H :

$$V = [v_1 - OCV(SOC_1), v_2 - OCV(SOC_2), \dots, v_N - OCV(SOC_N)]^T$$

$$H = [h_1, h_2, \dots, h_N]^T$$

On les files de la matriu H són:

$$h_j^T = [i_j^+, i_j^-]$$

De nou, s'utilitza que $V = H \cdot \theta$, on $\theta^T = [R^+, R^-]$ és el vector d'incògnites. Aquestes incògnites de θ es resolen utilitzant les matrius V i H com $\theta = (H^T \cdot H)^{-1} \cdot H^T \cdot V$.

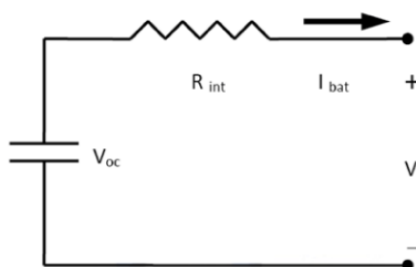


Fig. 7. Circuit elèctric equivalent del model matemàtic Simple. La R_{int} es pot substituir per una R^+ i una R^- amb dos díodes associats

3.4.3. Model matemàtic Estat Zero Histèresi

La histèresi [22] es produeix quan el voltatge de la cel·la pateix un retard respecte el voltatge predit. També es pot definir com una característica del sistema on el canvi en la direcció d'una variable independent du a la variable dependent a fracassar el l'intent de seguir el camí en direcció contrària. Aquest fenomen electroquímic, estable en la majoria d'elèctrodes de bateria, es mostra amb un potencial de cel·la més elevat en la càrrega que en la descàrrega per a cada valor del SOC. Si s'analitza una càrrega i descàrrega d'una bateria recarregable es pot observar fàcilment que el voltatge en els terminals de la cel·la en la descàrrega és inferior. És a dir, per a cada SOC existeixen dos voltatges de cel·la i en quin dels dos es troba realment la bateria depèn de la història prèvia (d'on es prové).

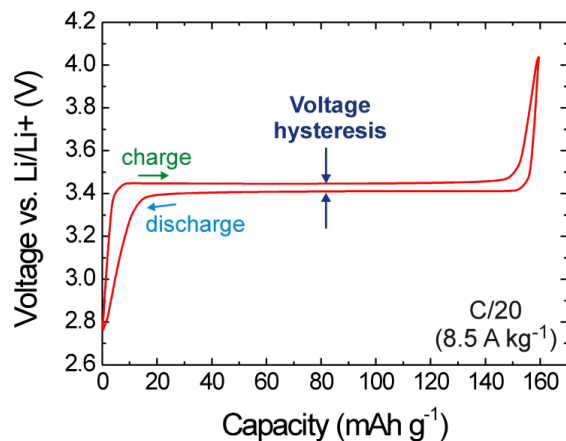


Fig. 8. Fenomen histèresi en les bateries recarregables [23]

Aquest fenomen d'histèresi es degut a l'estrès mecànic, els efectes termodinàmics entròpics i les distorsions microscòpiques en el material actiu de l'elèctrode, i és únic per a cada material. La histèresi del voltatge de cel·la està descrita com un factor rellevant en la modelització de bateries, especialment a baixes temperatures quan el fenomen apareix amb més facilitat.

La polarització [24] no canvia immediatament de signe quan hi ha un canvi en la direcció del corrent, sinó que ho fa gradualment. Per captar aquesta dinàmica cal afegir un o més estats al model. Per simplificar el model, sense afegir un nou estat, s'explora una versió més senzilla. El nom d'aquest model prové del fet que no s'afegeix cap estat addicional per a representar el fenomen de la histèresi. Un model bàsic d'histèresi simplement afegeix un terme a l'equació de sortida resultant:

$$SOC_{k+1} = SOC_k - \left(\frac{\eta_i \cdot \Delta t}{C_n}\right) i_k$$

$$v_k = OCV(SOC_k) - s_k M - R i_k$$

On s_k representa el signe del corrent amb memòria durant un període de repòs i M és una constant representativa del procés d'histèresi. Suposant ϵ un valor suficientment petit i positiu s_k valdrà 1 per a $i_k > \epsilon$, s_k valdrà -1 per a $i_k < -\epsilon$ i s_k valdrà s_{k-1} per a $|i_k| \leq \epsilon$. Aquest tipus de model de nou és lineal en els paràmetres i en el sistema d'identificació dels paràmetres desconeguts, primerament, es forma el vector V i la matriu H :

$$V = [v_1 - OCV(SOC_1), v_2 - OCV(SOC_2), \dots, v_N - OCV(SOC_N)]^T$$

$$H = [h_1, h_2, \dots, h_N]^T$$



On les files de la matriu H són:

$$h_j^T = [i_j^+, i_j^-, s_j]$$

De nou, s'utilitza que $V = H \cdot \theta$, on $\theta^T = [R^+, R^-, M]$ és el vector d'incògnites. Aquestes incògnites de θ es resolen utilitzant les matrius V i H com $\theta = (H^T \cdot H)^{-1} \cdot H^T \cdot V$.

Resumint, interessa fer modelitzacions de les bateries per poder-les estudiar a baix cost i per a poder implementar aquests models, conjuntament amb altres metodologies com els filtres de Kalman, en els BMS dels vehicles elèctrics. Aquestes modelitzacions requereixen models matemàtics que reproduïen la dinàmica i el comportament de les bateries estudiades. Els tres escollits en el present projecte consten d'una equació d'estat que permet conèixer el SOC de la bateria (no mesurable directament) i una equació de sortida que actualitza el valor del voltatge entre terminals de la bateria per a una determinada entrada de corrent. En aquests sistema de dues equacions apareixen també una sèrie de paràmetres que cal trobar específicament per a cada bateria.

3.5. Filtre de Kalman

El filtre de Kalman és un mètode que permet estimar variables d'estats no observables (en el cas del present projecte el SOC) a partir de variables observables (en aquest cas el voltatge i el corrent) que poden contenir algun error de mesura. És un algoritme que requereix unes equacions principals, que relacionen les variables d'estat (en aquest cas una única variable) amb les variables observables, i unes equacions d'estat, que determinen l'estructura temporal de les variables d'estat. El filtre de Kalman és una tecnologia molt establerta per estimar estats en sistemes dinàmics i és molt comú en camps com el control, el seguiment, la navegació o la comunicació, però és menys habitual en el camp de les bateries recarregables on la seva aparició és més insipient.

Les estimacions de les variables d'estat es realitzen en base a la seva dinàmica, així com de les mesures de les variables observables que es van obtenint en cada instant de temps. És a dir, en un primer pas s'estimen les variables d'estat utilitzant la seva pròpia dinàmica (en l'etapa anomenada de predicció), i en un segon pas es millora aquesta primera estimació utilitzant la informació de les variables observables (en l'etapa anomenada de correcció).

Una característica molt atractiva de la metodologia de Kalman és que té un caràcter recursiu. Una cop l'algoritme pronostica un nou estat en l'instant k , afegeix un terme de correcció i el nou estat corregit serveix com a condició inicial en la següent etapa, $k+1$. D'aquesta manera, l'estimació de les variables d'estat utilitza tota la informació disponible fins al moment i no només la informació fins a l'etapa anterior quan es realitza l'estimació.

Realment el filtre de Kalman busca minimitzar l'error quadràtic mitjà (EQM), oferint un estimador que minimitza l'EQM a partir d'unes observacions, i per això l'objectiu és trobar el valor del guany que garanteix aquesta propietat. Així doncs, el filtre ofereix, en l'instant k , un estimador lineal que serà combinació dels estimadors fins l'instant $k-1$ i de la nova observació en l'instant k . L'EQM és un criteri per seleccionar un estimador apropiat. En termes pràctics, equival a la suma de la variància i la desviació al quadrat de l'estimador. Aquest criteri amplifica i penalitza amb més força els errors de major magnitud.

En el present projecte la teoria del filtre de Kalman s'aplica veient la bateria com un sistema dinàmic que té com a entrada el corrent i com a sortida el voltatge als seus terminals. El vector d'estat en aquest cas és el SOC. Amb la finalitat que sigui computable de manera eficaç per un hipotètic BMS, es considera una versió discreta en el temps de la dinàmica de la bateria. El filtre també és un mètode eficient per resoldre el problema de mínims quadrats, tot i que no s'aplica en el projecte.

A cada interval de mesura, indexat amb un nombre enter k , el model actualitza el seu estat i els seus valors de sortida en base als seus valors d'entrada. A continuació, es fa servir un model discret en el temps genèric il·lustratiu de sistemes lineals [25] com el dels models matemàtics escollits (en l'apartat d'implementació del filtre de Kalman a la modelització realitzada es particularitza tota aquesta teoria):

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + w_k \quad (1)$$

$$y_k = C_k x_k + D_k u_k + v_k \quad (2)$$

L'equació (1) del sistema s'anomena d'estat i la $x_k \in \mathbb{R}^n$ és el vector d'estat del sistema en l'índex de temps k . L'equació d'estat captura tota la dinàmica de l'evolució del sistema. L'entrada coneguda del sistema és $u_k \in \mathbb{R}^p$, i $w_k \in \mathbb{R}^p$ és soroll o pertorbació del procés que modela entrades desconegudes que afecten l'estat del sistema. La sortida del sistema és $y_k \in \mathbb{R}^m$ que apareix a l'equació (2), anomenada equació de mesura (o de sortida), com una combinació lineal d'estats i entrades més $v_k \in \mathbb{R}^m$, que modela el soroll del sensor que afecta la mesura de la sortida del sistema però no l'estat del sistema. Les matrius $A_k \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B_k \in \mathbb{R}^{n \times p}$, $C_k \in \mathbb{R}^{m \times n}$ i $D_k \in \mathbb{R}^{m \times p}$ descriuen la dinàmica del sistema i poden ser variables en el temps.

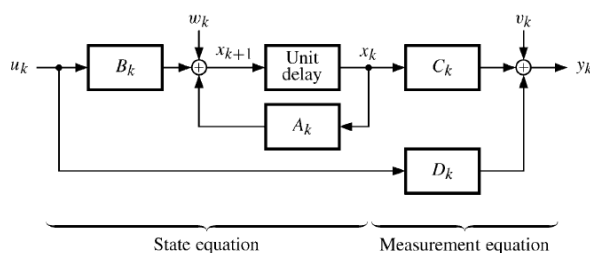


Fig. 9. Diagrama del sistema genèric lineal i discret en el temps [25]

Donat un model com el sistema d'equacions proposat, es desitja estimar l'estat desconegut (no mesurable, el SOC per al projecte) x_k del corresponen sistema físic, en temps real i un entorn dinàmic, coneixent les senyals d'entrada i sortida mesurades del sistema. S'assumeix que la distribució de probabilitat del soroll del procés és $p(w) \sim N(0, Q)$, i la del soroll del sensor és $p(v) \sim N(0, R)$. Així, són sorolls independents, d'esperança matemàtica igual a zero i de distribució gaussiana. Tots aquests requeriments del soroll gairebé mai es compleixen a la pràctica, però el consens de la literatura és que el mètode funciona igualment bé. Aquest projecte també pretén precisament corroborar la robustesa del filtre. En resum, el filtre de Kalman usa les dades mesurades $\{u_0, u_1, \dots, u_k\}$ i $\{y_0, y_1, \dots, y_k\}$ per trobar l'estimació del mínim error quadràtic mitjà $\hat{x}_k \in \mathbb{R}^n$ de l'estat real x_k .

$$\hat{x}_k = \min_{\hat{x}_k} \langle \text{traça} \{ E[(x_k - \hat{x}_k) \cdot (x_k - \hat{x}_k)^T] \} \rangle$$

L'essencial de la solució és un conjunt de relacions recursives que involucren tant l'estimació del propi estat com l'estimació de la matriu de variància-covariància $P_k = E[e_k e_k^T]$ de l'error de l'estat $e_k = x_k - \hat{x}_k$. La matriu de variància-covariància indica la incertesa de l'estat estimat i s'usa per a generar l'interval d'incertesa de l'error.

El filtre de Kalman discret computa dues estimacions diferents de l'estat i la matriu de variància-covariància per cada interval de mostreig. La primera estimació, \hat{x}_k^- , està basada en l'estimació de l'estat anterior computat en la iteració anterior, \hat{x}_{k-1}^+ , i modelada en un interval de mostreig segons la dinàmica del sistema. La segona estimació, \hat{x}_k^+ , modifica la primera estimació després de mesurar la sortida y_k del sistema. Aleshores, les estimacions de l'estat \hat{x}_k^+ i la variància-covariància P_k^+ són més acurades que \hat{x}_k^- i P_k^- ja que incorporen el coneixement adquirit de la mesura y_k , i són utilitzats pel BMS per comunicar el SOC amb més precisió al vehicle elèctric.

La inicialització del filtre s'ha de fer amb la millor informació disponible de l'estat i l'error de la covariància:

$$\hat{x}_0^+ = E[x_0] \quad P_0^+ = E[(x_0 - \hat{x}_0^+) \cdot (x_0 - \hat{x}_0^+)^T]$$

Molt sovint aquesta informació no es coneix amb gaire precisió i la inicialització s'ha de fer amb un valor poc fiable. Precisament el filtre de Kalman, tal i com es demostra més endavant, és conegut per ser molt robust davant inicialitzacions pobres i ràpidament convergeix amb el valor real. Per tant, en un primer moment cal inicialitzar el sistema i posteriorment ja s'entra en l'algorisme recursiu de predicció i correcció.

En l'etapa de predicció es calcula el valor de l'estat esperat al següent punt de mesura. Això s'aconsegueix propagant l'entrada del sistema a través del model matemàtic dinàmic del sistema, assumint un soroll de procés igual a zero:

$$\hat{x}_k^- = A_{k-1}\hat{x}_{k-1}^+ + B_{k-1}u_{k-1}$$

També s'actualitza la variància-covariància o incertesa de l'estat:

$$P_k^- = A_{k-1}P_{k-1}^+ + A_{k-1}^T + Q$$

Si el sistema és estable el terme $A_{k-1} \cdot P_{k-1}^+ \cdot A_{k-1}^T$ és convergent, reduint la incertesa en cada iteració. En canvi el terme Q sempre afegeix incertesa ja que no es pot mesurar el soroll w_k per determinar amb més precisió com afecta a l'estat.

En l'etapa de correcció, un cop incorporada la mesura de la sortida, apareix la següent equació:

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + Mn_k[y_k - (C_k\hat{x}_k^- + D_k u_k)]$$

Així doncs, la nova estimació de l'estat és igual a la estimació de l'estat predita més un factor de correcció ponderat. El terme $[y_k - (C_k\hat{x}_k^- + D_k u_k)]$ correspon a la sortida mesurada menys la sortida predita pel model dinàmic. Es pot dir que $\hat{y}_k = (C_k\hat{x}_k^+ + D_k u_k)$ i que la diferència entre y_k i \hat{y}_k (s'anomena innovació) no és zero degut al soroll de mesura, una estimació incorrecta de l'estat \hat{x}_k^- o un model no prou acurat. Mn_k és el vector de guany de Kalman i es defineix com:

$$Mn_k = P_k^- C_k^T [C_k P_k^- C_k^T + R]^{-1}$$

Cal aplicar seguidament la correcció de la variància-covariància:

$$P_k^+ = (I - Mn_k C_k) P_k^-$$

La incertesa del nou estat sempre es redueix degut a la nova informació proporcionada per cada nova mesura. Com a resum de la dinàmica del filtre de Kalman, el sistema real té una mesura d'entrada u_k , una mesura de sortida y_k i un estat intern no mesurat o mesurable x_k (per al present projecte voltatge entre terminals, corrent i SOC, respectivament). Un model del sistema funciona en paral·lel amb el sistema real simulant i fent una predicció del seu funcionament. Aquest model té la mateixa entrada u_k i una sortida \hat{y}_k . També té un estat intern \hat{x}_k que té un valor conegut ja que és una part de la simulació del model. La sortida del sistema real es compara amb la sortida del model i la diferència s'anomena innovació. Aquesta innovació es multiplica pel guany de Kalman Mn_k i adapta l'estat \hat{x}_k del model a un valor més proper al real x_k .

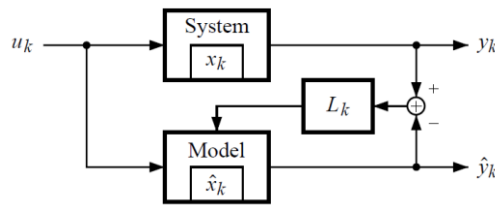


Fig. 10. Diagrama d'actualització de l'estat. El sistema correspon al sistema real [25]

Així doncs, el filtre de Kalman proporciona un mètode teòric elegant per filtrar mesures d'entrada i sortida d'un sistema per produir estimacions de l'estat del sistema dinàmic. Un efecte colateral del filtre és que produeix automàticament la matriu d'incertesa de l'estat, donant un interval de l'error comès en l'estimació. L'estat real no mesurable x_k es troba el 99,7% dels cops dins de l'interval $\hat{x}_k + 3\sqrt{\text{diag}(P)}$ i això permet no només estimar x_k , sinó que també saber l'interval on es trobarà aquest x_k amb gran seguretat. Això, permet augmentar notablement el rendiment del BMS i consegüentment el rendiment de la bateria.

A continuació, s'adjunta un resum amb totes les equacions involucrades en el procés recursiu descrit pel filtre de Kalman:

- **Model lineal**

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + w_k \quad (\text{Equació d'estat})$$

$$y_k = C_k x_k + D_k u_k + v_k \quad (\text{Equació de la sortida})$$

- **Inicialització, per $k = 0$**

$$\hat{x}_0^+ = E[x_0] \quad (\text{Estimació inicial de l'estat})$$

$$P_0^+ = E[(x_0 - \hat{x}_0^+) \cdot (x_0 - \hat{x}_0^+)^T] \quad (\text{Estimació inicial de la variància-covariància})$$

- **Recursivitat, per $k = 1, 2, \dots$**

$$\hat{x}_k^- = A_{k-1} \hat{x}_{k-1}^+ + B_{k-1} u_{k-1} \quad (\text{Actualització temporal de l'estimació de l'estat})$$

$$P_k^- = A_{k-1} P_{k-1}^+ + A_{k-1}^T Q \quad (\text{Actualització temporal de l'error de covariància})$$

$$Mn_k = P_k^- C_k^T [C_k P_k^- C_k^T + R]^{-1} \quad (\text{Càlcul matriu de guany de Kalman})$$

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + Mn_k [y_k - (C_k \hat{x}_k^- + D_k u_k)] \quad (\text{Actualització de l'estimació de la mesura de l'estat})$$

$$P_k^+ = (I - Mn_k C_k) P_k^- \quad (\text{Actualització de la mesura de l'error de covariància})$$

S'ha descrit el funcionament del filtre de Kalman amb la profunditat necessària per a la seva implementació en els models del projecte. També s'ha exposat la seva dinàmica de funcionament general en un sistema tot mostrant les seves equacions fonamentals i necessàries per a la implantació. No obstant, existeix una base matemàtica més profunda sobre la qual es conforma el filtre i, que tot i no considerar-se matèria del projecte, és important [26].

Existeix poca documentació més assequible que la exposada però sí que es recomana visitar-ne una de concreta [27] que conté molta informació relativa als filtres de Kalman i amb nivells de dificultat de comprensió molt diversos.

Per últim, també es recomana una documentació [28] que exposa de manera molt comprensible la dinàmica del filtre de Kalman des del punt de vista estadístic. S'ha fet referència a l'esperança matemàtica, a la variància, a la covariància... i tots aquests són termes propis de l'àmbit estadístic en els que es basa el filtre. La documentació suggerida ofereix una visió diferent focalitzada en el funcionament a nivell estadístic del filtre.

4. Assaig

És indispensable adquirir dades o bé realitzar assajos quan es vol desenvolupar i validar un model matemàtic per a reproduir el comportament elèctric d'una bateria recarregable. Per una banda, i com ja es va indicar en l'estat de l'art, aquest model matemàtic és un model genèric amb una sèrie de paràmetres que cal ajustar específicament per a cada bateria. És únicament i exclusivament en aquest moment quan el model matemàtic pot realment representar el comportament elèctric d'una bateria específica. Per tant, aquest model matemàtic parametritzar, tot i servir per a una bateria concreta, no serveix per a una altra amb unes característiques diferents. En els propers apartats s'especifica com es du a terme aquest procés de parametrització a partir d'un assaig de laboratori.

Per altra banda, un cop el model matemàtic ja s'ha concretat per a la bateria d'interès, aleshores cal validar-lo. Això es fa comparant dades reals de la bateria obtingudes en un assaig amb les dades resultants de la simulació del model matemàtic parametritzat per a la bateria en qüestió. És aleshores quan es pot fer un estudi exhaustiu de com de bo és el model proposat i es pot comparar amb d'altres. Addicionalment, en aquest moment, i si el model resulta ser suficientment bo, ja es pot fer ús de la modelització per estudiar hipotètiques situacions de la bateria assajada.

A continuació, s'exposa la instrumentació de la qual s'ha fet ús en la recollida de les dades tractades i la metodologia duta a terme en l'assaig per adquirir aquestes dades. S'inclou dos apartats relatius a aquesta metodologia. Per una banda, la metodologia dissenyada i prevista inicialment, i per altra banda, la metodologia usada finalment, degut a les circumstàncies d'excepcionalitat dels temps en els que s'ha realitzat el projecte.

4.1. Instrumentació

Les dades provinents d'un únic assaig provenen del Laboratori del Departament d'Enginyeria Elèctrica de la UPC, del grup de recerca CITCEA-UPC [29], de l'Escola Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB). La instrumentació bàsica per a l'obtenció de les dades de l'assaig d'una bateria recarregable consta de la pròpia bateria, d'un carregador bidireccional i d'un oscil·loscopi.

La bateria recarregable assajada i utilitzada per a validar els models matemàtics proposats és de liti-ferro-fosfat (LiFePO_4) i consta de 9 mòduls en sèrie de cel·les de la companyia Fenecon de la sèrie 50 [30].



Fig. 11. Bateria recarregable assajada amb inversor

Les principals característiques d'aquesta bateria recarregable són la capacitat de 90 Ah, o 324.000 As, l'energia de 3,45 KWh per mòdul, 31,05 KWh per tota la bateria, o el voltatge nominal per mòdul de 38,4 V, 345,6 V de tota la bateria. Altres característiques són un corrent màxim de càrrega i descàrrega de 90 A o un pes de 30 kg per mòdul. Addicionalment l'estructura presenta un inversor AC/DC que declara un pes de 75 kg.



Fig. 12. Placa de característiques de cada mòdul

El carregador bidireccional trifàsic utilitzat per carregar i descarregar la bateria en l'assaig és un model anomenat KUBECEA desenvolupat pel grup de recerca CITCEA-UPC. Aquest té una potència nominal de 100 kVA i funciona amb 400 V de corrent alterna trifàsica o <1000 V de corrent continua.

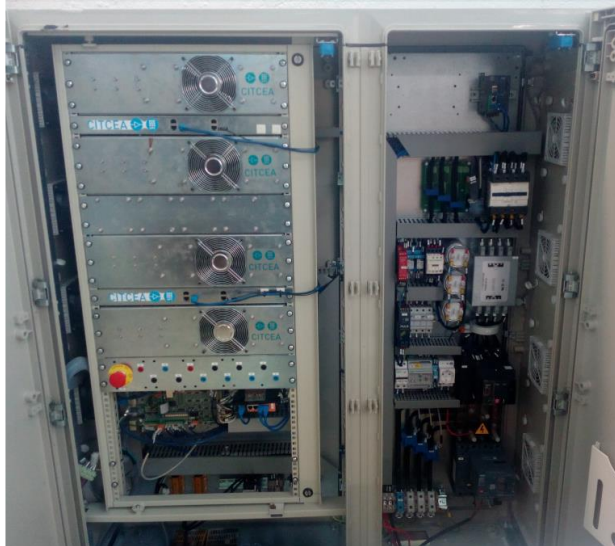


Fig. 13. Carregador bidireccional KUBECEA

Per últim, l'oscil·loscopi utilitzat en la recollida de dades és el model DLM2024 (de la sèrie 2000) de la companyia Yokogawa [31]. Disposa d'un ample de banda de fins a 200 MHz i una velocitat de mostreig de fins a 2,5 GS/s.

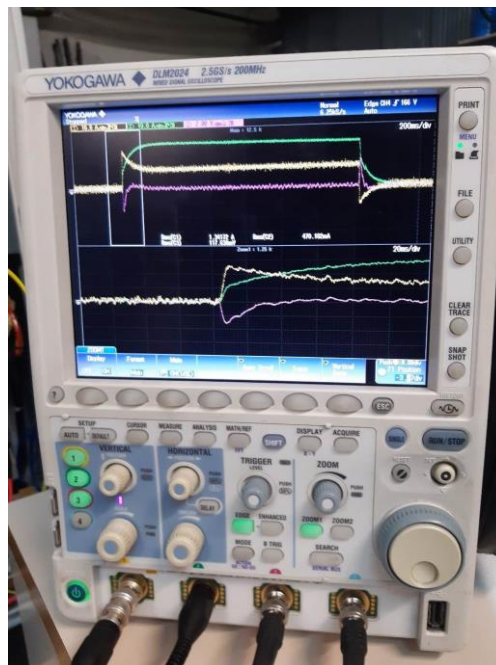


Fig. 14. Yokogawa DLM2024

4.2. Metodologia

La metodologia escollida en la realització dels assajos, tant per a caracteritzar una bateria com per validar models, determina la qualitat de les dades obtingudes i ha d'anar enfocada segons les necessitats específiques de l'aplicació. En el cas d'aquest projecte i la seva aplicació és molt important que les dades obtingudes caracteritzin suficientment bé dos aspectes de la bateria recarregable:

- Les dades han d'oferir un perfil dinàmic del voltatge als terminals de la bateria en funció de l'entrada de corrent imposada a l'assaig. A més, és adequat disposar d'aquestes dades en tot el rang de SOC de la bateria tant en càrrega com en descàrrega.
- Degut a les característiques pròpies dels models matemàtics a estudiar, els quals tenen un paràmetre que és l'OCV en funció del SOC, són necessàries unes dades que mostrin el més fidelment possible aquesta relació per a que l'hora de parametritzar els models aquests siguin una representació fidel de la realitat. L'OCV és el voltatge en circuit obert, sense càrrega als terminals, i per tant per definició és impossible mesurar-lo amb total fidelitat. El que s'acostuma a fer és prendre la mesura de l'OCV per a un SOC determinat quan la bateria es troba en repòs el suficient temps per a que el voltatge als terminals coincideixi amb l'OCV.

4.2.1. Metodologia desitjada

La proposta era fer dos assajos diferents per a conèixer per una banda l'OCV respecte el SOC, i per altra banda, les relacions dinàmiques de la cel·la. Fer dos assajos separats permet conèixer amb més precisió les característiques buscades en cada assaig. A continuació es descriuen quins assajos [32] són i com s'han de realitzar.

- **Test de cel·la per determinar la relació OCV**

Cal descarregar la bateria molt lentament i després carregar-la molt lentament de nou mentre es mesura el voltatge de cel·la i els ampers-hora acumulats. Primerament es du a terme aquesta descàrrega a un rati C (corrent de descàrrega normalitzada respecte la capacitat de la bateria, 1C equival a que la bateria es descarrega completament en una hora) de C/30 fins que el voltatge als terminals de la cel·la correspon amb el voltatge de cel·la mínim especificat pel fabricant. Acte seguit cal deixar la cel·la reposant 2 hores. Un cop reposada cal procedir a carregar-la novament a C/30 fins que el voltatge als terminals de cel·la equival al voltatge màxim de cel·la especificat pel fabricant.

El voltatge i els ampers-hora acumulats durant la descàrrega i la càrrega són enregistrats periòdicament. Al utilitzar un rati C tan baix de corrent, la generació de calor en la cel·la es considera negligible, i es pot considerar que totes les dades recollides estan a la mateixa temperatura al llarg de tot el test.

Per obtenir la relació de la cel·la entre OCV i el SOC cal recordar el concepte de profunditat de descàrrega o DOD (en Ah) que es calcula en cada mostreig segons:

$$DOD(t) = Ah \text{ totals fins a } t$$

Utilitzant aquesta mètrica la capacitat C_n de la cel·la és el DOD al final de la descàrrega a C/30 anteriorment esmentada. Aleshores el SOC corresponent a cada mostreig és:

$$SOC(t) = 1 - DOD(t) \cdot C_n^{-1}$$

Com a comprovació cal apuntar que el SOC al final de la descàrrega a C/30 ha de ser 0% i el SOC al final de la càrrega a C/30 ha de ser 100%.

- **Test de cel·la per determinar les relacions dinàmiques**

La dinàmica del sistema es pot capturar mentre s'excita la cel·la amb un perfil de corrent elèctric respecte el temps representatiu de la seva aplicació final. Un exemple de perfil pot ser el WLTP-3 [32] o el UDDS. Aquests perfils s'utilitzen per a la certificació de bateries d'EV i s'han de repetir en tot el SOC.

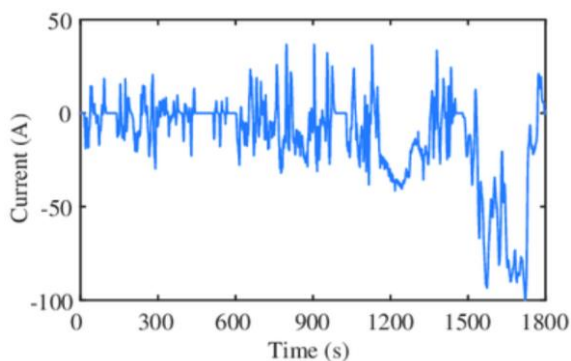


Fig. 15. Perfil WLTP [32]

En primer lloc cal descarregar a C/1 un 10% de la capacitat de la cel·la (assegurant evitar condicions de sobre-voltatge durant les porcions de càrrega del perfil). Aleshores cal executar els perfils dinàmics en el SOC d'interès (entre el 90% i el 10% del SOC). Acte seguit cal deixar la cel·la en repòs durant 2 hores. Finalment, cal carregar la cel·la a C/1 fins que el voltatge equival al voltatge màxim de la cel·la.

Les dades dinàmiques serveixen per identificar els paràmetres del sistema, excepte la relació del OCV amb el SOC. Aquesta metodologia d'obtenció de dades de la bateria és la desitjada ja que permet obtenir la relació OCV-SOC més precisa possible i completar la resta dels paràmetres amb la precisió d'un perfil molt dinàmic. A més, aquest perfil tan dinàmic és ideal per a poder verificar en condicions reals d'ús els models un cop parametritzats.

4.2.2. Metodologia emprada

Les circumstàncies excepcionals del moment no han permès dur a terme els assajos planificats (i desitjats) i la parametrització i la verificació dels models s'ha hagut de dur a terme amb dades històriques d'arxiu del grup de recerca CITCEA-UPC, tal i com s'ha descrit en el punt d'instrumentació.

Aquestes dades han estat obtingudes d'un sol assaig i són una seqüència de polsos de càrrega a corrent constant i repòs seguits d'una seqüència de polsos de descàrrega a corrent constant i també repòs. Els polsos de corrent, tant de càrrega com de descàrrega, són constants a 30 A durant 1077 segons. Hi ha 11 polsos de càrrega i 10 de descàrrega en un total de 29730 segons (més de 8 hores) i 17236 mostres (0,58 mostres per segon). El SOC inicial és del 0,5% i el final de l'1%, arribant a un màxim del 99,5%.

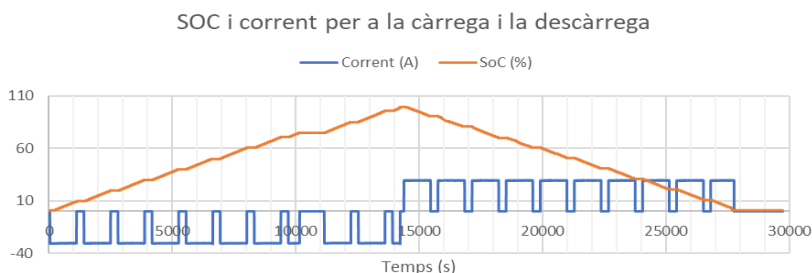


Fig. 16. Corrent i SOC de l'assaig en funció del temps

El voltatge inicial en els seus terminals és de 332,4 V (descarregada) i el final de 330,4 V (novament descarregada), amb un pic màxim de 376,9 V.

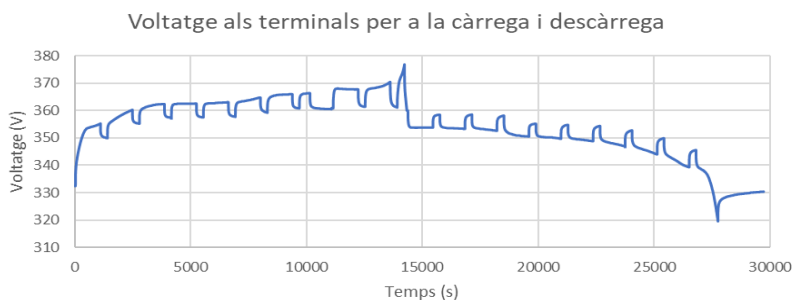


Fig. 17. Voltatge als terminals de l'assaig en funció del temps



Aquesta metodologia permet unificar els dos assajos planificats anteriorment, tot oferint resultats de qualitat. Si bé és cert que la metodologia planificada és més adequada, i pot oferir resultats de més alta qualitat, per a la finalitat que es necessiten les dades aquesta metodologia emprada és totalment correcta. Ofereix un perfil dinàmic per a tot el seu rang d'operativitat (encara que no amb un perfil tan real com l'WLTP-3 o l'UDDS) i la possibilitat de mesurar amb bona precisió el voltatge de circuit obert.

Per a mesurar l'OCV cal escollir a consciència una sèrie de punts representatius. Aquests són els punts on la bateria obté la màxima relaxació i coincideixen amb l'instant previ a un nou pols de corrent. Com ja s'ha comentat, aquest OCV en funció del SOC és vital perquè els models matemàtics fan servir-lo per a funcionar, conjuntament amb el voltatge de terminal i el corrent. L'OCV és un voltatge realment termodinàmic i no s'adquireix fins passades hores de repòs de la bateria [33]. Però la funció amb la que es relaxa és logarítmica i per tant prenent la mesura al final del període entre pols el valor obtingut és prou representatiu. De totes maneres, més endavant, s'explica quina limitació té aquesta forma de mesurar condicionada per l'assaig.

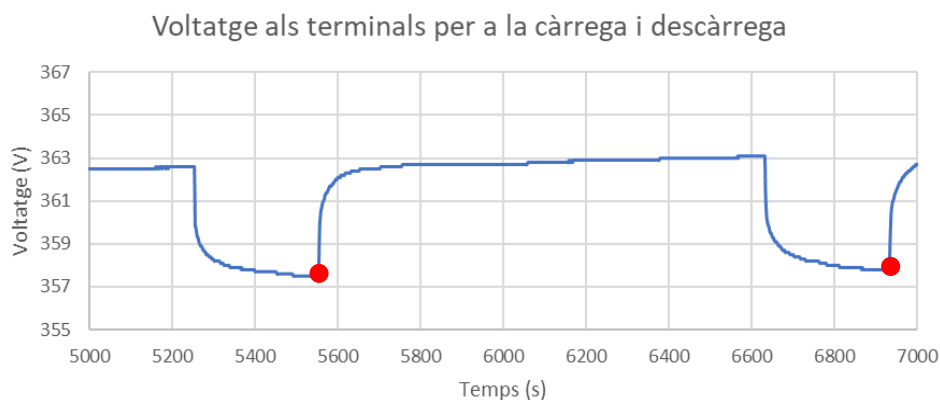


Fig. 18. Dos punts de mesura de l'OCV de la bateria assajada

Els punts vermells de la figura 18 mostren dos dels punts que s'han pres com a referència per a determinar la relació OCV-SOC. S'aprecia com al ser una funció logarítmica, la qual regeix la relaxació del voltatge als terminals fins assolir l'OCV, en el punt mesurat la corba ja és bastant horitzontal. Per a la parametrització s'utilitzen tots aquests punts i es fa una interpolació per obtenir la resta, obtenint així la corba global OCV-SOC.

5. Simulació

Aquest apartat recull tota la part experimental realitzada en el projecte, on es desenvolupen i validen els models matemàtics escollits dels descrits prèviament. També es fa ús de tot l'estat de l'art exposat amb la finalitat de fer comprensible tot el procés. Primerament, es desenvolupen els models. Seguidament, es troben els seus paràmetres per la bateria assajada i es continua amb la simulació d'aquests models, que gràcies a l'assaig realitzat permet validar-los. Finalment, s'aplica una versió senzilla d'un filtre de Kalman que permet certificar la seva idoneïtat en aplicacions BMS del vehicle elèctric.

5.1. Modelització

S'ha escollit Matlab [34], de l'empresa MathWorks, com a eina de suport per a desenvolupar els models matemàtics. Matlab és un programari àmpliament reconegut que ofereix llicències gratuïtes per a estudiants. A més, Matlab compta amb una eina dedicada anomenada Simulink [35] que permet dissenyar i simular basant-se en models. D'aquesta manera amb una única eina es poden desenvolupar els models matemàtics proposats i validar-los posteriorment.

S'ha pres com a punt de partida per a la modelització un material del curs "Energy Storage" del Màster en Enginyeria d'Energia de la UPC [46]. Aquest material tracta sobre modelat de bateries i convertidors DC-DC. A partir d'aquí, s'ha anat evolucionant i redefinint el material amb la finalitat de complir les necessitats requerides en el projecte. Per a la parametrització, el proper punt, també s'ha fet ús de material preexistent del mateix curs i també s'ha adaptat a les demandes específiques del projecte.

En la modelització es pretén donar forma a tot un sistema o model que faci ús dels models matemàtics seleccionats (model Combinat, Simple i Estat Zero Histèresi) i permeti reproduir el comportament de la bateria de LiFePO_4 assajada. D'aquesta manera es pot obtenir un model o sistema que operant en les condicions de l'assaig resulti amb unes dades el més semblants possibles, i que alhora permeti operar en condicions diferents a les del assaig i pugui servir per a fer prediccions fidels en el marc d'un sistema de gestió de bateries d'un vehicle elèctric.

Es desenvolupen tres sistemes o modelitzacions diferents. Tots tres models desenvolupats tenen petites variacions per ajustar-se als models matemàtics que representen. El principal punt comú de tots ells és que a partir d'un corrent de càrrega o descàrrega mostren el voltatge entre terminals i el SOC, entre d'altres. Com ja es va apuntar en l'estat de l'art, l'objectiu principal del projecte és poder conèixer en tot moment

amb precisió aquest SOC (no mesurable directament) per a poder consegüentment actuar en benefici de la bateria.

Cada un del models o sistemes està comprès per un programa de Matlab d'inicialització on es declaren tots els paràmetres (alguns d'ells propis de la bateria obtinguts en la parametrització) necessaris per a fer funcionar el sistema. Per altra banda, també està comprès per un fitxer de Simulink que conté el model elèctric i matemàtic capaç de simular el comportament de la bateria recarregable.

La tipologia general del model consta d'una font de corrent controlable (representativa del corrent de càrrega i descàrrega en l'assaig), una font de tensió, també controlable (representativa de l'OCV en funció del SOC), dues resistències amb els seus respectius díodes (representatives del paràmetre R per a càrrega i descàrrega) i una funció de Matlab on s'insereix el model matemàtic en qüestió.

A continuació, s'adjunta tota aquesta informació detallada però s'aprofita el model Simple per comentar-la amb més profunditat, mentre per als altres dues modelitzacions la descripció es centra més en destacar-hi les diferències. S'aprofita el model Simple perquè és el més senzill i genèric de tots tres.

5.1.1. Model Simple

La tipologia general del model es presenta a la figura 19. Hi ha tres principals blocs anomenats *Externally Applied Load*, *Battery* i *Measurements*.

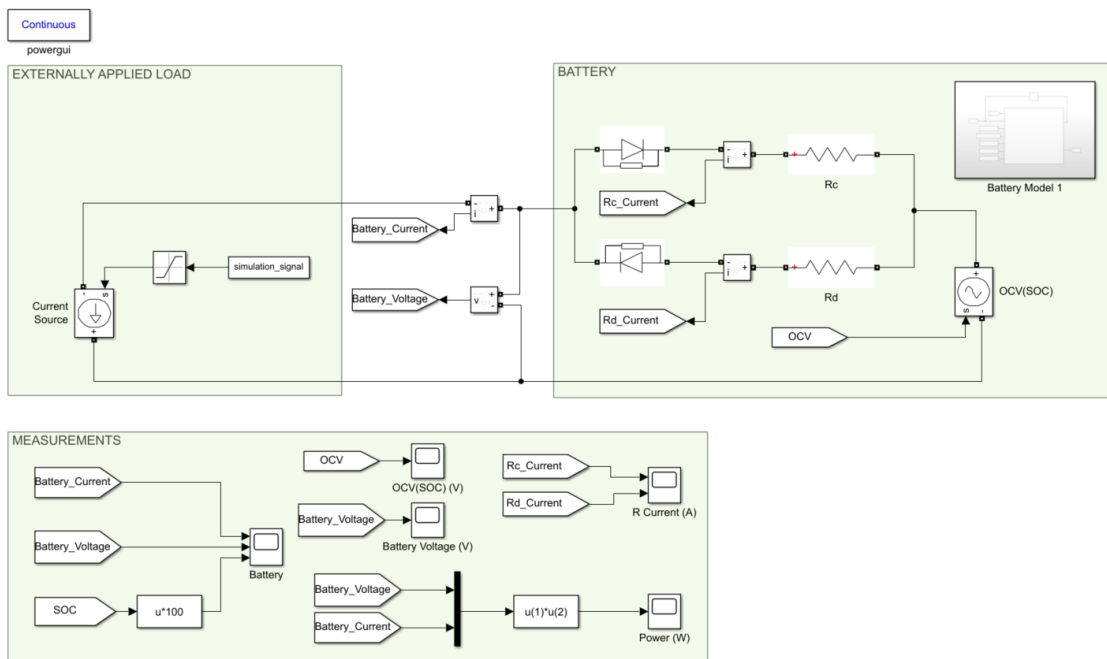


Fig. 19. Tipologia general del model Simple

- Externally Applied Load:** Representa la càrrega aplicada externament en forma de corrent tal i com succeeix a l'assaig. La *simulation_signal* (inicialitzada a *simulation_signal*) conté el perfil de corrent desitjat (per exemple el de l'assaig) i va seguit d'un bloc de saturació que limita el valor del corrent al mòdul de 90 A segons les indicacions del fabricant de la bateria del projecte. També es poden observar els marcadors de *Battery_Current* i *Voltage_Current* que indiquen, respectivament, el corrent que circula per la bateria i el voltatge entre els seus terminals.

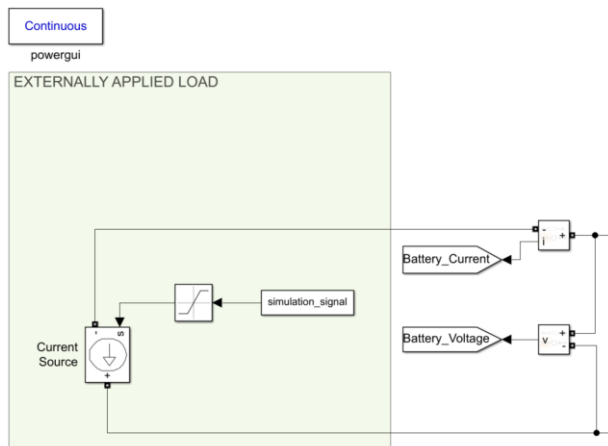


Fig. 20. Bloc Externally Applied Load del model Simple

- Battery:** L'*OCV(SOC)* representa el paràmetre en qüestió del model matemàtic i cal inicialitzar-lo a *bat1.initial_ocv*. Hi ha dues resistències seguides de dos díodes. *Rc* representa el paràmetre *R* en la càrrega i s'inicialitza a *bat1.Rc_pack*. *Rd* representa el paràmetre *R* en la descàrrega i s'inicialitza a *bat1.Rd_pack*. Les característiques dels díodes són els valors per defecte.

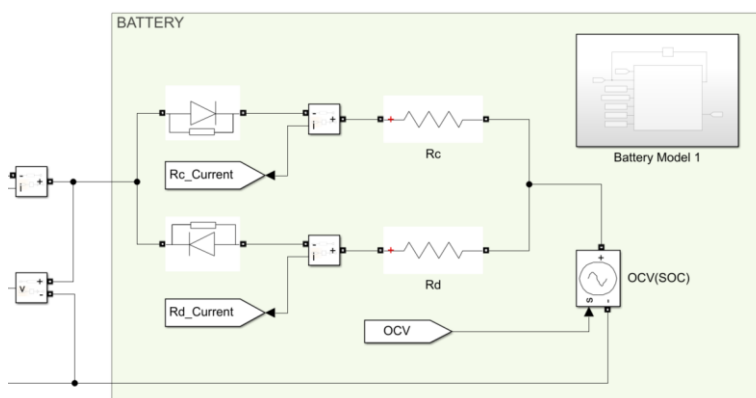


Fig. 21. Bloc Battery del model Simple

A dins del bloc *Battery Model 1* hi ha els paràmetres i funcions necessàries per a resoldre el SOC i l'*OCV(SOC)* segons el model matemàtic Simple.

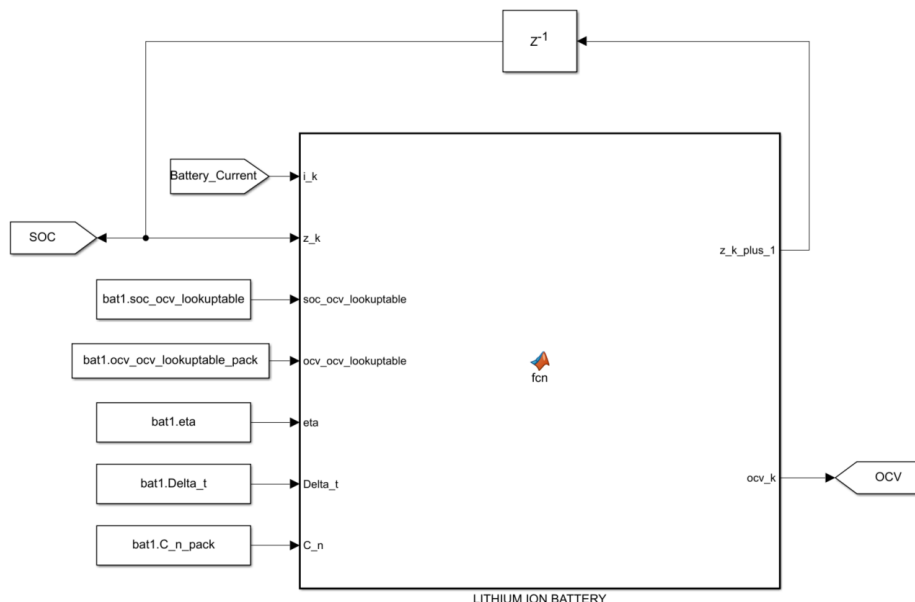


Fig. 22. Bloc Battery Model 1 del model Simple

La condició inicial del retard és *bat1.initial_z* i el valor del retard és 1. El temps de mostreig és *bat1.Delta_t*. La funció associada al bloc és la següent:

```
function [z_k_plus_1, ocv_k]= fcn(i_k, z_k, soc_ocv_lookupable, ocv_ocv_lookupable, eta, Delta_t, C_n)
z_k = z_k * 100;
ocv_k = interp1(soc_ocv_lookupable, ocv_ocv_lookupable, z_k, 'pchip', 'extrap');
z_k = z_k / 100;
z_k_plus_1 = z_k + (eta * Delta_t / C_n) * (i_k * (-1));
```

Fig. 23. Funció associada al bloc Battery Model 1 del model Simple

Per a cada mostra es calcula el nou OCV en funció del SOC tot fent una interpolació de les taules de SOC i OCV disponibles. Posteriorment, s'actualitza el SOC segons l'equació d'estat del model matemàtic Simple.

- **Measurements:** Aquest bloc només serveix per a la recollida de dades i per a fer el gràfic d'alguns paràmetres d'interès.

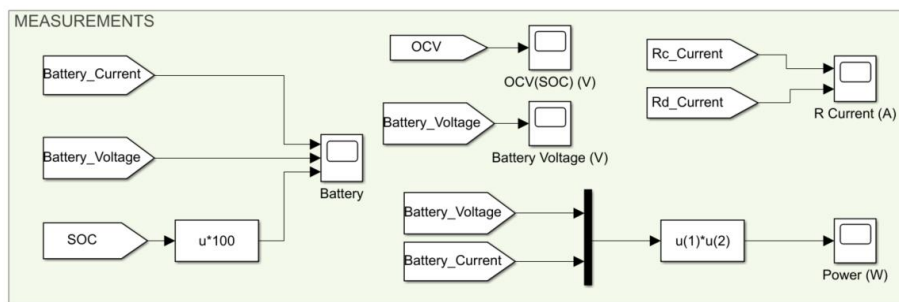


Fig. 24. Bloc Measurements del model Simple

Com ja s'ha comentat, aquest model ha d'anar precedit de l'execució d'un programa de Matlab. Aquest és l'encarregat d'inicialitzar els paràmetres. A continuació, es mostra aquest programa ja amb els paràmetres obtinguts en la parametrització, tot i que és en el següent punt on s'explica com s'obtenen.

Inicialització

```
clear all;
clc;
```

Bateria

```
bat1.Rd_cell = 0.212187714396115; % (Ohm) - Resistència descàrrega
bat1.Rc_cell = 0.202331359029660; % (Ohm) - Resistència càrrega
bat1.eta = 1; % (-) - eficiència colòmbica
bat1.Delta_t = 0.5; % (s) - Temps de mostreig
bat1.C_n_cell = 324000; % (As) - Capacitat de la cel·la
bat1.soc_ocv_lookuptable = [0.75;10.5;20.5;30.5;40.5;50.5;61;70.5;78;88;97.75];
bat1.Nseries = 9; % Cel·les en sèrie de la bateria
bat1.Nparallel = 1; % Cel·les en paral·lel de la bateria
bat1.Rd_pack = bat1.Rd_cell;
bat1.Rc_pack = bat1.Rc_cell;
bat1.C_n_pack = bat1.C_n_cell*bat1.Nparallel; % Capacitat total de la bateria
bat1.ocv_ocv_lookuptable_pack = [331.4;347.75;352.55;355.05;355.95;356.25;357.2;359.5;359.65;359.95;360.75];
```

Condicions inicials per simular

```
bat1.initial_z = 0.005; % (tant per u) - SOC inicial
bat1.initial_ocv = interp1(bat1.soc_ocv_lookuptable,bat1.ocv_ocv_lookuptable_pack,bat1.initial_z,'linear','extrap');
```

Importació senyal corrent

```
importdata('Li_ion_test.xlsx');
t_test = ans.data.Hojal(:,1);
I_test = ans.data.Hojal(:,3);
simulation_signal = [t_test,I_test]; % Senyal font corrent
```

Obrir model Simulink

```
opened_files=find_system('SearchDepth',0);
if find(strcmp(opened_files, 'Simple_Model_v1'))
    else
        open('Simple_Model_v1'); % Obre el fitxer Simulink
    end
```

Fig. 25. Programa de Matlab del model Simple

5.1.2. Model Combinat

La tipologia general del model combinat es presenta a la figura 26. L'únic canvi apreciable respecte la tipologia general del model Simple és que la OCV(SOC) ara s'anomena *Constant*. Això és degut a que tota la part del model matemàtic Combinat que no és la resistència passa a ser aquesta *Constant*. Aquí, es confirma el que ja es va plantejar a

l'estat de l'art quan es va parlar de que els paràmetres del model Combinat (excepte la R) intentaven representar la corba OCV-SOC.

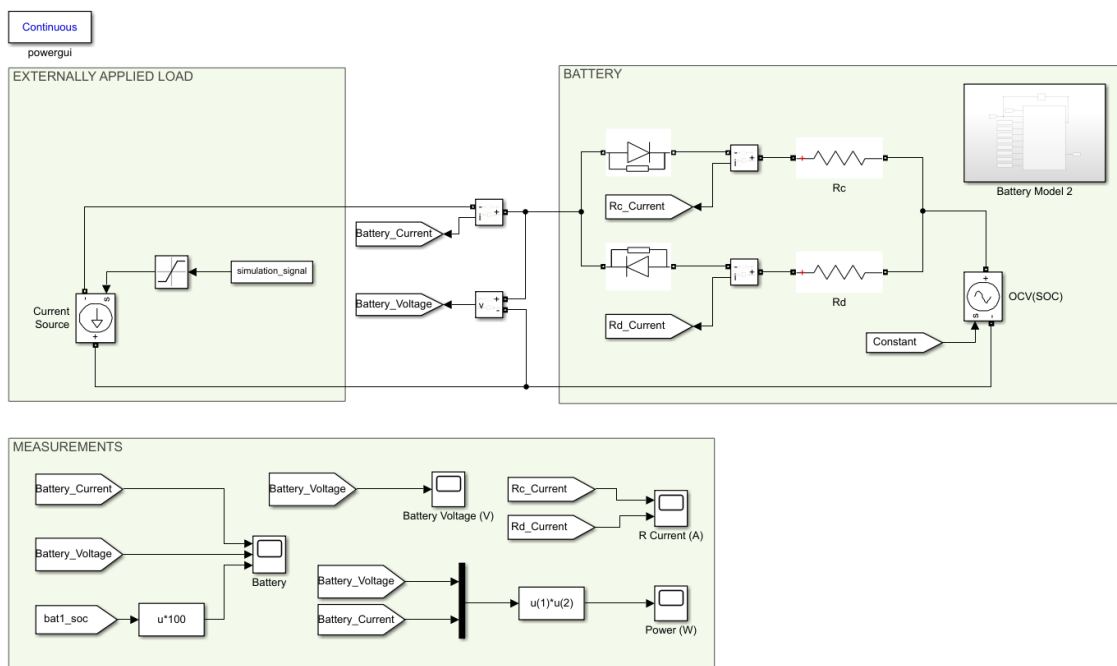


Fig. 26. Tipologia general del model Combinat

Dins del bloc *Battery Model 2* també sí s'hi poden apreciar canvis substancials. Alguns dels paràmetres de la funció són diferents degut a la diferència de paràmetres entre models matemàtics.

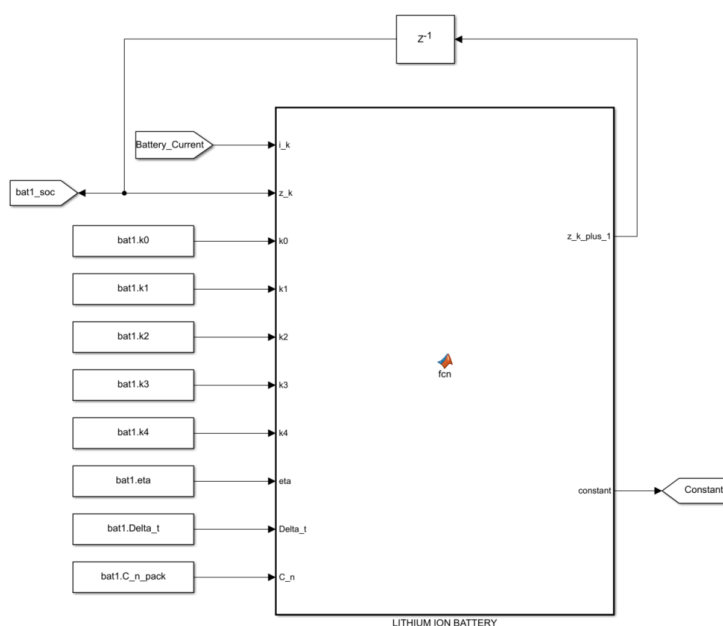


Fig. 27. Bloc Battery Model 2 del model Combinat

La funció també canvia perquè la constant es calcula conforme als nous paràmetres. Aquests són k_0 , k_1 , k_2 , k_3 i k_4 .

```
function [z_k_plus_1, constant]= fcn(i_k, z_k, k0, k1, k2, k3, k4, eta, Delta_t, C_n)
constant = k0 - (k1 / z_k) - (k2 * z_k) + (k3 * log(z_k)) + (k4 *log(1 - z_k));
z_k_plus_1 = z_k + (eta * Delta_t / C_n) * (i_k * (-1));
```

Fig. 28. Funció associada al bloc Battery Model 2 del model Combinat

El programa necessari per a l'execució del model pateix lleugeres variacions en els paràmetres de la bateria i en la inicialització de la constant que procura representar l'OCV-SOC.

Bateria

```
bat1.k0 = 361.894644453050;
bat1.k1 = 0.0284211036275068;
bat1.k2 = 2.66639589306246;
bat1.k3 = 6.31500043784378;
bat1.k4 = -0.798268163373450;
bat1.Rd_cell = 0.271519316323854;
bat1.Rc_cell = 0.243656904781975;
bat1.eta = 1;
bat1.Delta_t = 0.5;
bat1.C_n_cell = 324000;
bat1.Nseries = 9;
bat1.Nparallel = 1;
bat1.Rd_pack = bat1.Rd_cell;
bat1.Rc_pack = bat1.Rc_cell;
bat1.C_n_pack = bat1.C_n_cell*bat1.Nparallel;
```

Condicions inicials de simulació

```
bat1.initial_z = 0.005;
bat1.initial_constant = bat1.k0 - (bat1.k1 / bat1.initial_z) -
    -(bat1.k2 * bat1.initial_z) + (bat1.k3 * log(bat1.initial_z)) + (bat1.k4 *log(1 - bat1.initial_z));
```

Fig. 29. Programa de Matlab del model Combinat

5.1.3. Model Estat Zero Histèresi

La tipologia general del model Estat Zero Histèresi es presenta a la figura 30. L'únic canvi apreciable respecte la tipologia general del model Simple és que l'OCV(SOC) ara s'anomena *OCV_plus*. Això és degut a que el model Estat Zero Histèresi, amb la finalitat de tenir en compte el fenomen d'histèresi propi de les bateries, afegeix un paràmetre addicional *M* per a modelar-lo. És a dir, l'*OCV_plus* conté l'OCV(SOC) amb una petita modificació introduïda per aquest nou paràmetre *M*.



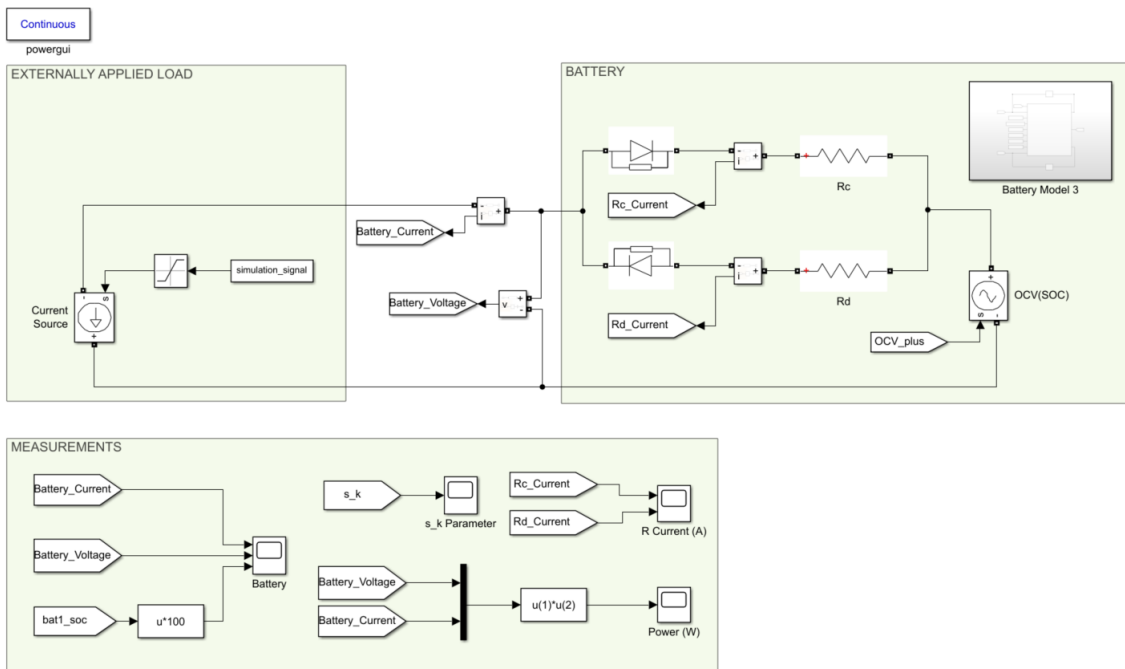


Fig. 30. Tipologia general del model Estat Zero Histèresi

Dins del bloc *Battery Model 3* s’aprecia un canvi substancial que és un retard associat a s_k . s_k determina el signe de la corrent en cada instant i multiplica al paràmetre M segons el model matemàtic. La condició inicial del retard per aquest nou bloc és $bat1.initial_s_k$ i el valor del retard és 1.

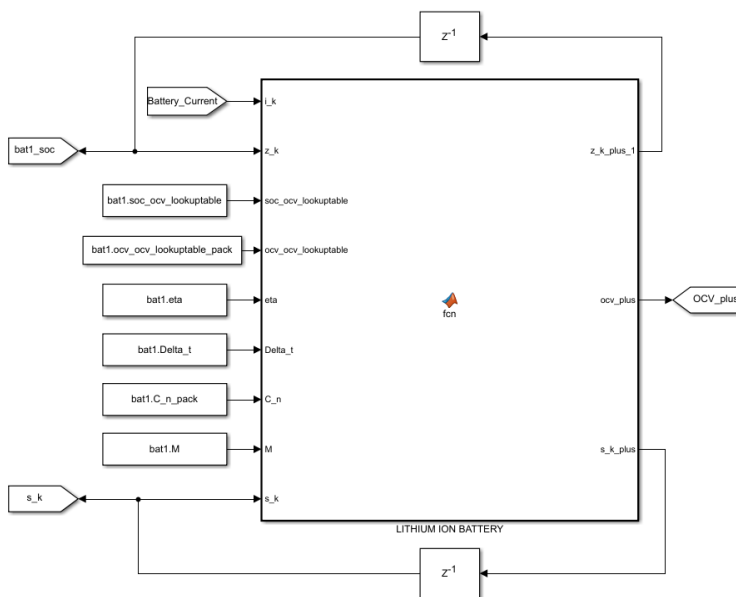


Fig. 31. Bloc Battery Model 3 del model Estat Zero Histèresi

El temps de mostreig és $bat1.Delta_t$. La funció associada del bloc és la següent:

```
function [z_k_plus_1, ocv_plus,s_k_plus] = fcn(i_k, z_k, soc_ocv_lookuptable, ocv_ocv_lookuptable, eta, Delta_t, C_n, M, s_k)
if i_k > 1
    s_k_plus = 1;
elseif i_k < -1
    s_k_plus = -1;
else
    s_k_plus = s_k;
end
z_k = z_k * 100;
ocv_plus = interp1(soc_ocv_lookuptable, ocv_ocv_lookuptable, z_k, 'pchip', 'extrap') - (s_k_plus * M);
z_k = z_k / 100;
z_k_plus_1 = z_k + (eta * Delta_t / C_n) * (i_k * (-1));
```

Fig. 32. Funció associada al bloc Battery Model 3 del model Estat Zero Histèresi

Es pot veure com la funció és idèntica a la del model Simple i només varia el càlcul de s_k segons el signe de la corrent i el terme que s'afegeix al càlcul d'aquest nou ocv_plus .

Pel que fa referència al programa necessari per a l'execució del model, només varia pel nou paràmetre M que presenta el model matemàtic.

Bateria

```
bat1.M = 2.4917;
bat1.initial_s_k = -1;
bat1.Rd_cell = 0.1300;
bat1.Rc_cell = 0.1179;
bat1.eta = 1;
bat1.Delta_t = 0.5;
bat1.C_n_cell = 324000;
bat1.soc_ocv_lookuptable = [0.75;10.5;20.5;30.5;40.5;50.5;61;70.5;78;88;97.75];
bat1.Nseries = 9;
bat1.Nparallel = 1;
bat1.Rd_pack = bat1.Rd_cell;
bat1.Rc_pack = bat1.Rc_cell;
bat1.C_n_pack = bat1.C_n_cell*bat1.Nparallel;
bat1.ocv_ocv_lookuptable_pack = [331.4;347.75;352.55;355.05;355.95;356.25;357.2;359.5;359.65;359.95;360.75];
```

Condicions inicials de simulació

```
bat1.initial_z = 0.005;
bat1.initial_ocv = interp1(bat1.soc_ocv_lookuptable,bat1.ocv_ocv_lookuptable_pack,bat1.initial_z,'linear','extrap')
- (bat1.initial_s_k * bat1.M);
```

Fig. 33. Programa de Matlab del model Estat Zero Histèresi

5.2. Parametrització

Un cop es desenvolupa el model amb Matlab i Simulink per a reproduir el comportament de la bateria recarregable, amb l'ajuda dels corresponents models matemàtics, cal identificar els paràmetres d'aquests models per a la bateria assajada. Això es fa amb l'ajuda d'un programa de Matlab que fa ús de la teoria dels mínims quadrats per obtenir-los, tal i com es va descriure a l'estat de l'art. En un primer estadi s'obtenen les dades procedents d'un fitxer Excel que conté les dades de l'assaig. Seguidament, comença el tractament de les dades.

Bàsicament cal determinar en quins punts de l'assaig es mesurarà l'OCV i com s'obindrà el signe del paràmetre s_k associat al paràmetre M del model Estat Zero Histèresi. Per últim, es realitza l'operació de mínims quadrats pròpiament dita i s'obtenen els paràmetres per a cada model. A continuació s'adjunta el programa amb alguns gràfics que obté:

Identificació de paràmetres del model

This script aims to implement the least-squares estimation theory for solving the parameters BETA, using the known matrices Y and X.

```
% The vector BETA is composed by unknown parameters of the model. Y is
% the output of the model; and X is the matrix of observed covariables
% explaining the output of the system.

% Original author and date: francisco.diaz-gonzalez@upc.edu, 11.03.2019
% Edíton author and date: pol.diaz@estudiant.upc.edu, 15.05.2020
```

Inicialització

```
clear all;
close all;
clc;
```

Dades

```
filename = 'Li_ion_test.xlsx'; % Fitxer de l'assaig
sheet = 1;
xlRange = 'A2:A17236';
time = xlsread(filename,sheet,xlRange);
xlRange = 'C2:C17236';
current = xlsread(filename,sheet,xlRange);
xlRange = 'B2:B17236';
voltage = xlsread(filename,sheet,xlRange);
xlRange = 'E2:E17236';
soc = xlsread(filename,sheet,xlRange); % Lectura SOC de l'assaig

current = -current; % Canvi de signe corrent per diferents convenis

figure
plot(time,current,time,soc,time,voltage)
xlabel('Time (s)'); ylabel('Voltage (V); Current (A); SoC (p.u.)')
title('Test (rough) data')
legend('Current (A)','SoC (%)','Voltage (V)')
```

Tractament

```
% Obtenint les dades per a corrent polsant de càrrega i descàrrega
sample = 1;
epsilon = 0.1; % Obtenció signe corrent

discharge_current_sample = zeros(ceil(size(current,1)/sample),1);
charge_current_sample = zeros(ceil(size(current,1)/sample),1);
current_sample = zeros(ceil(size(current,1)/sample),1);
voltage_sample = zeros(ceil(size(current,1)/sample),1);
soc_sample = zeros(ceil(size(current,1)/sample),1);
time_sample = zeros(ceil(size(current,1)/sample),1);
sk_sample = zeros(ceil(size(current,1)/sample),1);
ocv_sample = zeros(ceil(size(current,1)/sample),1);

j = 1;
for i=1:sample:size(current,1)
    if current(i,1) >= 0
        discharge_current_sample(j,1) = current(i,1);
        charge_current_sample(j,1) = 0;
    else
        charge_current_sample(j,1) = current(i,1);
        discharge_current_sample(j,1) = 0;
    end
    voltage_sample(j,1) = voltage(i,1);
    soc_sample(j,1) = soc(i,1);
    time_sample(j,1) = time(i,1);
    j = j + 1;
end

% Obtenint el signe del corrent amb memòria(Model Zero Histèresi)
if current(1,1) > epsilon
    sk_sample(1,1) = 1;
else
    sk_sample(1,1) = -1;
end

j = 2;

for i=(sample+1):sample:size(current,1)
    if current(i,1) > epsilon
        sk_sample(j,1) = 1;
    elseif current(i,1) < -epsilon
        sk_sample(j,1) = -1;
    else
        sk_sample(j,1) = sk_sample(j-1,1);
    end
    j = j + 1;
end
```

Tractament 2

Obtenint els perfils OCV

```

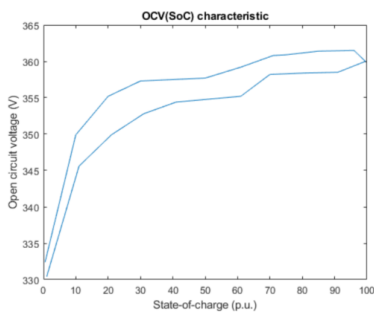
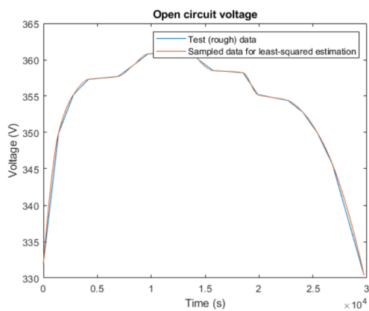
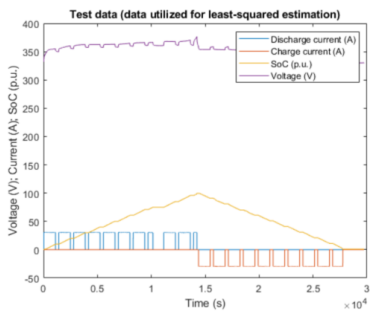
sample_ocv = 1;
time_ocv = transpose([]*22);
ocv_ocv = transpose([]*22);
soc_ocv = transpose([]*22);

list=[16;741;1530;2235;2925;3657;4339;5027;5743;6486;7273;7618;8348;8914;9794;10541;11427;12269;13109;13978;15024;17234];
% Llista dels punts de lectura del OCV
j = 1;
for elm=1:length(list)
    i = list(elm);
    ocv_sample(i,1) = voltage(i,1);
    time_ocv(j,1) = time(i,1);
    ocv_ocv(j,1) = voltage(i,1);
    soc_ocv(j,1) = soc(i,1);
    j = j + 1;
end

ocv_sample = interp1(time_ocv,ocv_ocv,time_sample,'pchip');

soc_ocv_lookuptable = flipud(soc_ocv(1:11));
ocv_ocv_lookuptable = flipud(ocv_ocv(1:11));

% Graficat
figure
plot(time_sample,discharge_current_sample,time_sample,charge_current_sample,time_sample,soc_sample,time_sample,voltage_sample)
xlabel('Time (s)'); ylabel('Voltage (V); Current (A); SoC (p.u.)')
title('Test data (data utilized for least-squared estimation)')
legend('Discharge current (A)','Charge current (A)','SoC (p.u.)','Voltage (V)')
figure
plot(time_ocv,ocv_ocv,time_sample,ocv_sample)
xlabel('Time (s)'); ylabel('Voltage (V)')
title('Open circuit voltage')
legend('Test (rough) data','Sampled data for least-squared estimation')
figure
plot(soc_ocv,ocv_ocv)
xlabel('State-of-charge (p.u.)'); ylabel('Open circuit voltage (V)')
title('OCV(SoC) characteristic')
    
```



Estimació per mínims quadrats

For combined model BETA = [k0, R+, R-, k1, k2, k3, k4]

```

Y_combined_model = voltage_sample;
nova = soc_sample / 100;
X_combined_model = [ones(size(discharge_current_sample,1),1), discharge_current_sample, charge_current_sample,
    -(ones(size(discharge_current_sample,1),1))./nova, -nova, log(nova), log(1-nova))];
BETA_combined_model = pinv(X_combined_model)*Y_combined_model;
    
```



For simple model BETA = [R+, R-]

```
Y_simple_model = [voltage_sample-ocv_sample];
X_simple_model = [discharge_current_sample, charge_current_sample];
BETA_simple_model = pinv(X_simple_model)*Y_simple_model;
```

For zero-state hysteresis model = [R+, R-, M]

```
Y_zero_hysteresis_model = [voltage_sample - ocv_sample];
X_zero_hysteresis_model = [discharge_current_sample, charge_current_sample, sk_sample];
BETA_zero_hysteresis_model = pinv(X_zero_hysteresis_model)*Y_zero_hysteresis_model;
```

Fig. 34. Programa de Matlab usat per a la parametrització dels tres models matemàtics

És interessant el gràfic que mostra la corba OCV-SOC de la bateria. Aquesta corba és la que fan servir els tres models matemàtics per ajustar els seus paràmetres (excepte el paràmetre *R*). Es pot apreciar clarament el fenomen d'histèresi. L'OCV en la càrrega és clarament superior a l'OCV en la descàrrega.

En el cas de voler utilitzar els models desenvolupats per a una altra bateria faria falta tornar a fer aquesta operació de parametrització. Aquests paràmetres són únics per a la bateria assajada. Els paràmetres obtinguts per a tots tres models són els següents:

Paràmetre	R+	R-	M	k0	k1	k2	k3	k4
ModelSimple	0,202	0,212						
ModelCombinat	0,2437	0,2715		361,9	0,028	2,666	6,315	-0,798
ModelEstat0-Histèresi	0,118	0,130	2,492					

Taula 1. Valors dels paràmetres obtinguts per a cada model matemàtic

5.3. Resultats modelització

Un cop s'ha tingut el model desenvolupat, d'acord a cada model matemàtic proposat i els seus paràmetres identificats segons l'assaig realitzat a la bateria, s'ha procedit a validar-ho i a obtenir resultats que permetin extreure conclusions. S'ha fet ús de Simulink per a simular durant 29729 segons el comportament dels models amb el perfil de corrent utilitzat a l'assaig. La capacitat de la bateria és de 324000 As (90 Ah), el període de mostratge és de 0,5 s i l'eficiència colòmbica del 100 %. El SOC inicial de la bateria està fixat en 0,5 % d'acord a l'assaig. La intenció és reproduir l'assaig per poder saber fins a quin punt són bones les modelitzacions desenvolupades (i els seus models matemàtics associats) i quines diferències hi ha entre elles (i perquè). Els paràmetres de configuració de Simulink són els següents:



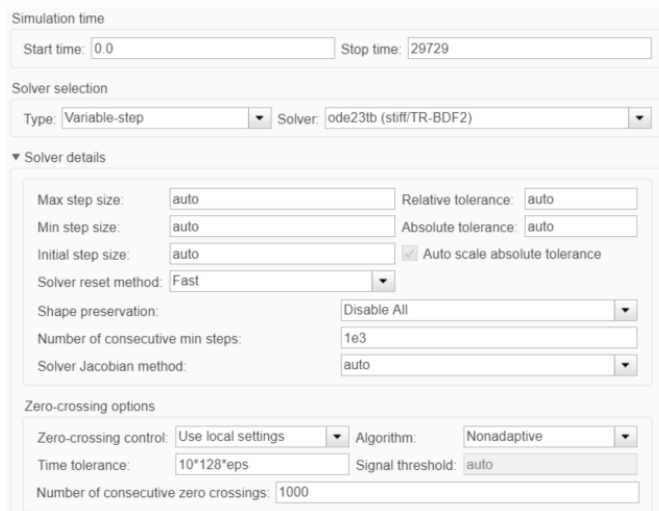


Fig. 35. Paràmetres de simulació de Simulink

Per a obtenir totes les dades resultants de la simulació s'ha fet ús d'un temps de mostreig de 1,725 segons, donant lloc a un total de 17236 mostres de cada paràmetre d'interès. Aquests paràmetres d'interès extrets són bàsicament quatre: el voltatge entre terminals de la simulació, el corrent de la simulació (coincideix amb la senyal de corrent introduïda, com és esperable), el SOC de la simulació i l'OCV de la simulació (o el paràmetre equivalent com s'explica en l'apartat anterior). A continuació, es mostren els gràfics dels tres models on se superposa el voltatge entre terminals de la simulació al voltatge de l'assaig:

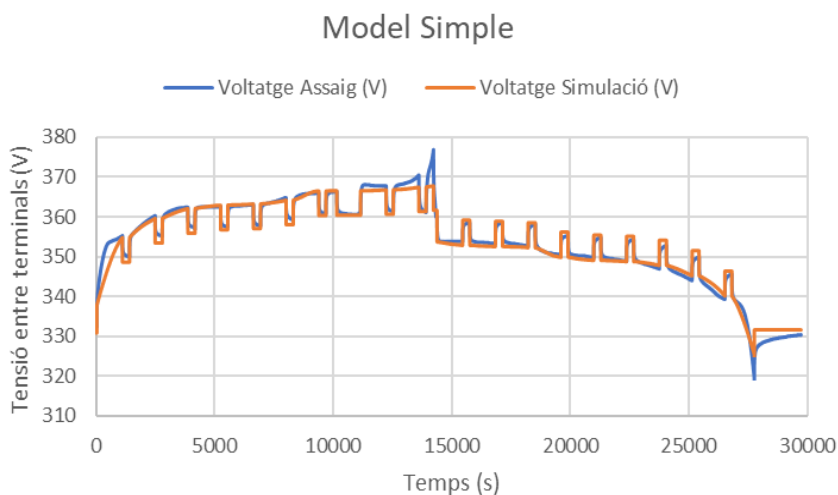


Fig. 36. Voltatge entre terminals d'assaig i simulació en funció del temps, per al model Simple

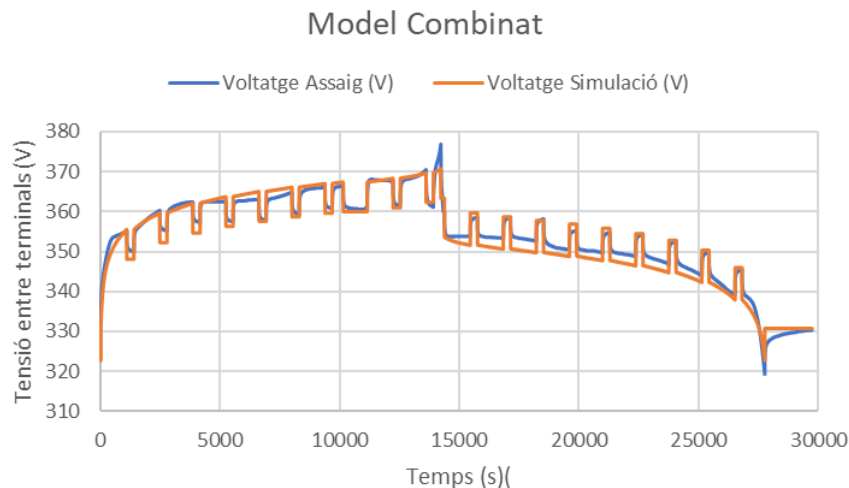


Fig. 37. Voltatge entre terminals d'assaig i simulació en funció del temps, per al model Combinat

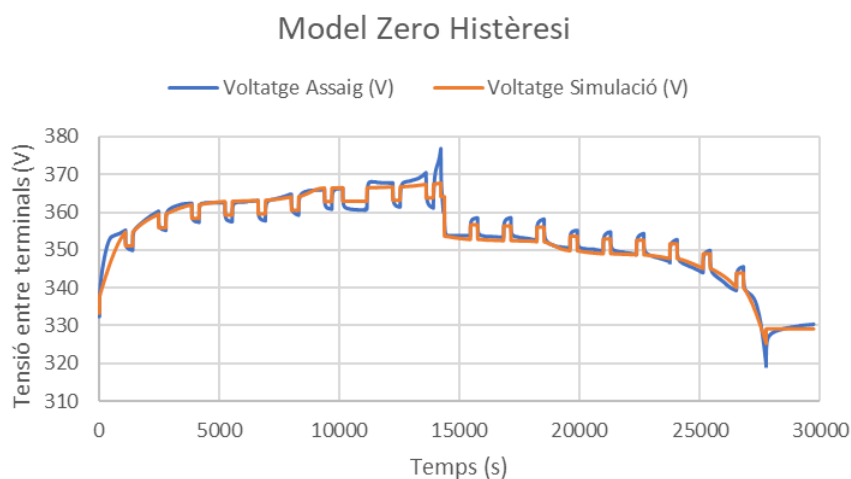


Fig. 38. Voltatge entre terminals d'assaig i simulació en funció del temps, per al model Estat Zero Histèresi

Es pot observar com les modelitzacions ressegueixen amb bastanta precisió el comportament real de la bateria per als tres models matemàtics estudiats. Els trams que presenten una mica més de dificultats a ser ben modelats són els extrems i l'últim pols de corrent de càrrega. Això es degut a que els models amb els paràmetres disponibles han de representar amb el màxim de fidelitat el comportament al llarg de tot el seu rang d'operativitat (0-100% SOC) i per tant els punts on es produeixen canvis bruscs és on apareixen les dificultats pels models.

Pel que fa a diferències entre els tres models a simple vista ja són observables. Tot i així, és difícil determinar quin model és millor (modelitza millor el comportament real de la bateria) o pitjor sense fer ús d'un mètode objectiu que pugui realment ponderar-los. La metodologia proposada és obtenir la mitjana quadràtica de l'error de modelatge (RMS, *root mean square*) [36]. Aquest error es defineix com el voltatge als terminals de la bateria real (assaig) menys

el voltatge als terminals de la bateria simulada, i s'expressa en volts.

$$RMS_{error\ modelatge} = \sqrt{\frac{1}{17235} \sum_{i=1}^{17236} (V_{assaig} - V_{simulació})^2}$$

S'ha fet una taula resum amb les mitjanes quadràtiques de l'error de modelatge per a cada model. Quan més petit és aquest error més fidel és el model a la bateria real assajada.

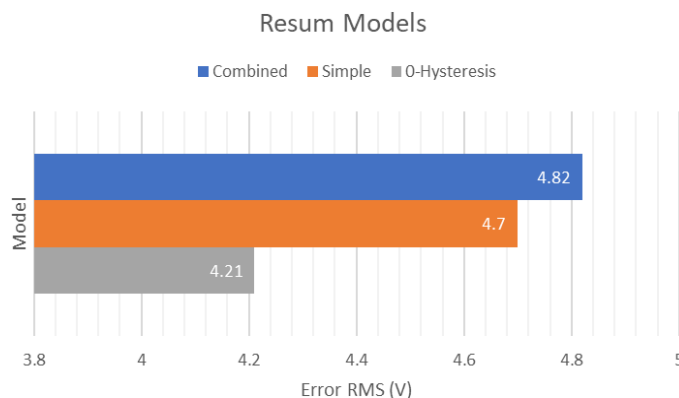


Fig. 39. Resum models segons error RMS

S'observa que el millor model és el que empra el model matemàtic Estat Zero Histèresi a una certa distància del model Simple i Combinat. Aquest resultat és l'esperable a nivell teòric (afegeix un paràmetre representatiu de la histèresi respecte als altres dos models). El model Simple i el Combinat es diferencien perquè el primer fa servir el paràmetre OCV(SOC) i el segon fa servir una sèrie de relacions logarítmiques i aritmètiques que varien amb el SOC (tots dos models matemàtics empen una *R*). Cal recordar que totes aquestes relacions del model Combinat simplement pretenen representar la corba OCV-SOC del model Simple, i per tant, té molt sentit que totes dues modelitzacions obtinguin valors semblants.

A continuació, es pot observar aquest fenomen amb la corba OCV-SOC del model Simple i la corba "OCV-SOC" equivalent del model Combinat:

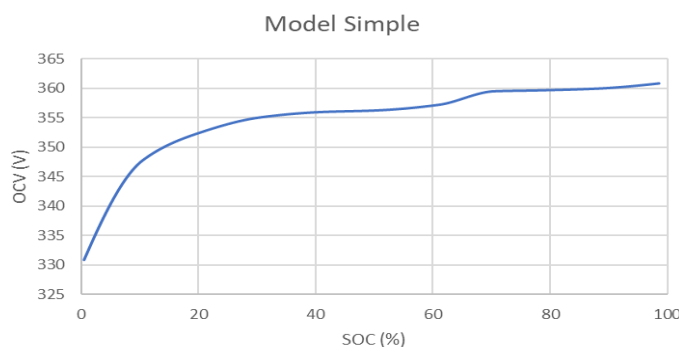


Fig. 40. OCV en funció del SOC pel model Simple



Fig. 41. OCV en funció del SOC pel model Combinat

La millora del model Estat Zero Histèresi respecte als dos altres models s'atribueix, com ja s'ha dit, a la introducció d'un nou paràmetre (M) que modela el fenomen de la histèresi en la bateria. Aquest fenomen bàsicament descriu una diferència de potencial en les bateries recarregables en funció de si operen en un sentit o l'altre (càrrega o descàrrega). Així aquest paràmetre permet aproximar l'OCV equivalent (que inclouria l'OCV(SOC) i el paràmetre M) a l'OCV observat en l'assaig.



Fig. 42. OCV en funció del SOC pel model Estat Zero Histèresi

També és important destacar que la relació entre l'OCV i el SOC no s'ha obtingut experimentalment de la manera més desitjada possible. Els punts on es mesura l'OCV són vàlids però podrien ser més bons i això condiciona la fidelitat dels tres models respecte al funcionament real de la bateria (ja que tots tres models es parametrizen amb la relació OCV-SOC).

5.4. Implementació del filtre de Kalman

Un cop s'ha validat la modelització proposada, mitjançant la simulació, es pretén anar una mica més enllà en l'horitzó d'un BMS. Un BMS s'encarrega de gestionar tot el relacionat amb la bateria, com ja es va explicar a l'estat de l'art, amb la finalitat de fer-la segura i

eficient. Les modelitzacions exposades fins ara no tenen la capacitat de respondre a canvis que es poguessin produir durant el seu funcionament. És a dir, serveixen per a poder tenir coneixement de com es comportaria la bateria en un entorn estàtic. En canvi, un BMS necessita prendre les decisions relatives a la bateria en funció del que succeeix al voltant de forma dinàmica. Alguns exemples de situacions que pot haver de resoldre un BMS poden ser una mala inicialització del SOC (per l'autodescàrrega de la bateria en el temps) o un canvi al llarg del temps de la resistència interna de la bateria. En altres paraules, les modelitzacions fetes fins ara són molt útils només quan totes les variables i condicions de funcionament es controlen, però presenten moltes deficiències en cas contrari.

Aquest comportament dinàmic de la bateria es pot modelitzar tot implementant un filtre de Kalman. Ja s'ha descrit la utilitat d'aquests filtres i de com fan ús constant de les dades reals aportades i les dades del model i les comparen per obtenir resultats més fiables i robustos. Amb aquesta implementació es pretén validar com el filtre de Kalman és una eina molt potent quan treballa conjuntament amb un model de bateria recarregable i com millora notablement la robustesa del sistema. No es centra l'interès en els resultats obtinguts com a tal, sinó en demostrar la robustesa del filtre, i per tant es fan dues simplificacions.

Per una banda, s'implementa el filtre de Kalman a un sol model. El model escollit es el Simple ja que tot i no ser el model més bo (tal i com es veu en l'apartat anterior) és el model més senzill en quant a cost de computació. Amb l'aplicació del filtre la càrrega computacional augmenta de forma molt rellevant i per limitar el seu augment, i conseqüentment complir l'objectiu del projecte de ser una aplicació de baix cost, s'ha pres aquesta determinació.

L'altra simplificació que es du a terme es linealitzar la corba OCV-SOC emprada pel model amb la intenció de simplificar-lo encara més. Com ja s'ha apuntat, l'objectiu és conèixer la robustesa de la implementació d'aquest filtre i no els resultats de fiabilitat que pugui proporcionar en el cas concret de la bateria assajada. Tot i així, la configuració del model es realitza en base a l'assaig per a poder verificar el correcte funcionament del filtre.

Per aplicar el filtre es necessari afegir tres paràmetres al programa a l'apartat de *Bateria* i també fer servir un període de mostreig diferent d'1 s. Addicionalment, cal introduir un nou paràmetre anomenat *simulation_signal2* que representa el perfil de tensió real dels terminals (en aquest cas el voltatge entre terminals obtingut a l'assaig):

Bateria

```

bat1.Rd_cell = 0.212187714396115;
bat1.Rc_cell = 0.202331359029660;
bat1.eta = 1;
bat1.Delta_t = 1;
bat1.C_n_cell = 324000;
bat1.soc_ocv_lookuptable = [0.75;10.5;20.5;30.5;40.5;50.5;61;70.5;78;88;97.75];
Q = 5000;
B = -(bat1.eta * bat1.Delta_t / bat1.C_n_cell);
bat1.initial_P = B*Q*B';
bat1.Nseries = 9;
bat1.Nparallel = 1;
bat1.Rd_pack = bat1.Rd_cell;
bat1.Rc_pack = bat1.Rc_cell;
bat1.C_n_pack = bat1.C_n_cell*bat1.Nparallel;
bat1.ocv_ocv_lookuptable_pack = [331.4;347.75;352.55;355.05;355.95;356.25;357.2;359.5;359.65;359.95;360.75];
    
```

Importació senyals

```

importdata('Li_ion_test.xlsx');
t_test = ans.data.Hoja1(:,1);
I_test = ans.data.Hoja1(:,3);
simulation_signal = [t_test,I_test];

V_test = ans.data.Hoja1(:,2);
simulation_signal2 = [t_test,V_test];
    
```

Fig. 43. Programa de Matlab del model Simple amb filtre

La resta del programa de Matlab resulta inalterat. On s’han de fer canvis substancials es al model de Simulink. La tipologia general del nou model és la següent:

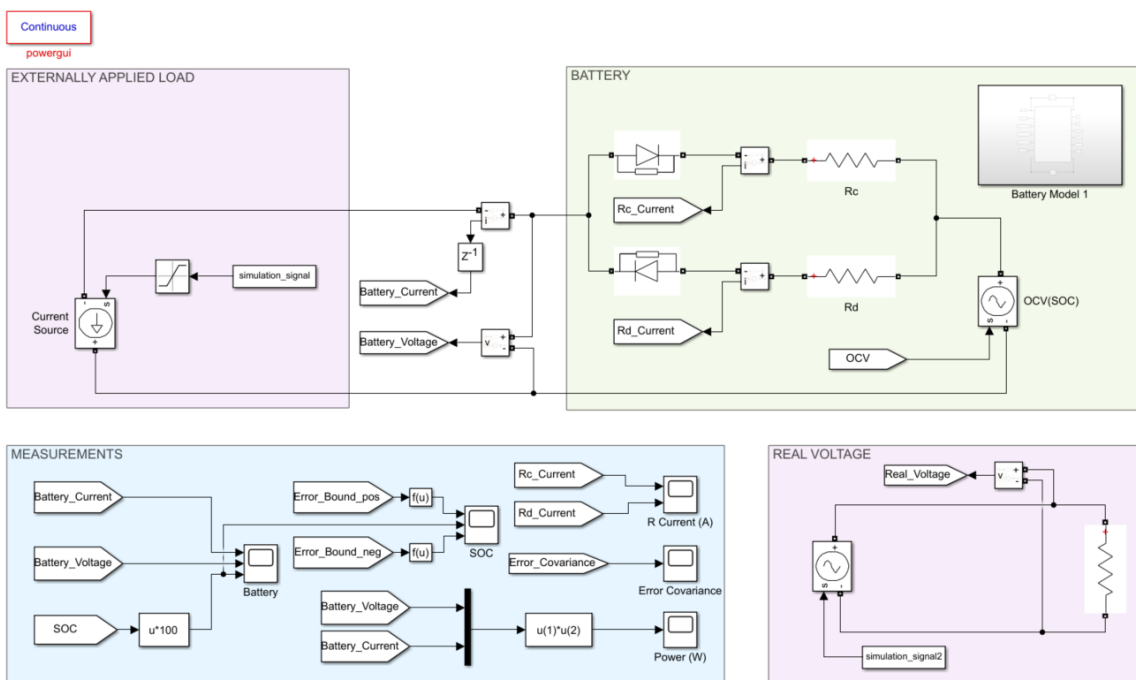


Fig. 44. Tipologia general del model Simple amb filtre

Pel que fa a l'*Externally Applied Load* i a la *Battery* els canvis són mínims. Simplement s'ha d'introduir un retard a la lectura del corrent per evitar recursivitats en el sistema. El bloc de *Measurements* introdueix la lectura de l'interval d'error del SOC (una de les característiques pròpies de l'aplicació del filtre de Kalman). Respecte al model Simple sense filtre de Kalman apareix un nou bloc anomenat *Real Voltage* que simplement serveix per introduir el voltatge real entre terminals de la bateria per a poder comparar-lo amb el resultat del model. Es fa ús d'una font variable de tensió amb el perfil *simulation_signal2* (el perfil obtingut a l'assaig i que es considera el real per poder verificar la robustesa del filtre).

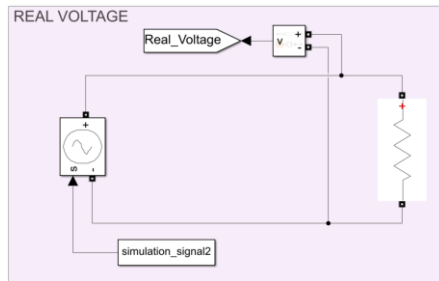


Fig. 45. Bloc Real Voltage del model Simple amb filtre

Els canvis substancials del model es troben dins del bloc *Battery Model 1*. Al paràmetre *P* (error de covariància) se li afegeix un retard d'una unitat inicialitzat en *bat1.initial_P* i amb un període de mostreig de *bat1.Delta_t*.

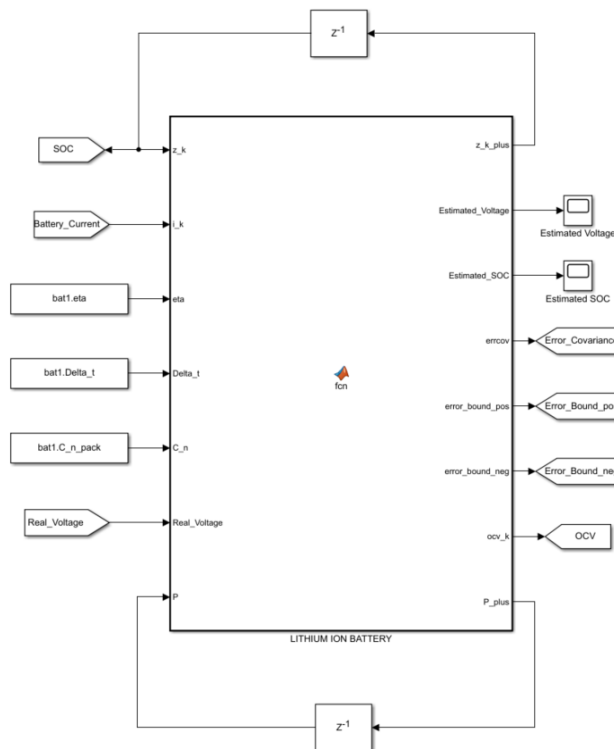


Fig. 46. Bloc Battery Model 1 del model Simple amb filtre

La funció de Matlab ara incorpora la implementació del filtre de Kalman [47]. Primerament, el filtre verifica que el SOC es trobi dins del rang 0-100%. Seguidament es defineixen els paràmetres C i D que representen la linealització de la corba OCV-SOC (i substitueixen el paràmetre associat) segons la recta:

$$Y = 0,2176 \cdot X + 343,55$$

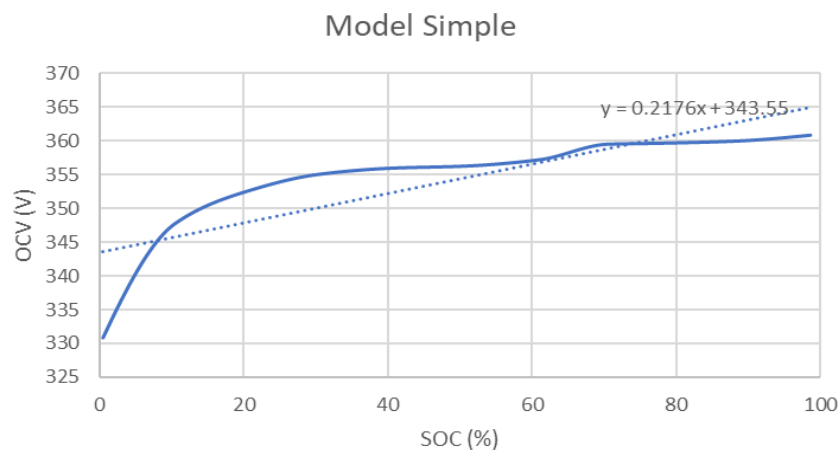


Fig. 47. OCV en funció del SOC pel model Simple amb la seva linealització

S'especifiquen la Q i la R (variàncies-covariàncies del respectiu soroll del procés i del sensor) i es calculen w i v , respectivament. En un moment donat es recalcula el SOC (z_{kk}) comparant el voltatge real (el de l'assaig) amb el voltatge obtingut pel model. Aquest és el moment en el qual el filtre té la capacitat d'actualitzar el SOC en funció de la discrepància observada entre voltatges. Es calcula l'error de covariància i l'interval de l'error amb el qual s'obté el SOC. Per últim, es calcula l'OCV linealitzat resultant i s'actualitza el SOC d'acord amb el model matemàtic Simple.

```
function [z_k_plus, Estimated_Voltage, Estimated_SOC, errcov, error_bound_pos, error_bound_neg, ocv_k, P_plus] = fcn(z_k, i_k, eta, Delta_t, C_n, Real_Voltage, P)

if z_k>1
    z_k = 1;
end
if z_k<0
    z_k = 0;
end

C = 21.76;
D = 343.55;

Q = 5000;
R = 1;
rng default
w = sqrt(Q)*randn(1,1);
v = sqrt(R)*randn(1,1);
realvoltagev = Real_Voltage + v;

Mn = P*C'/(C*P*C'+R);
z_kk = z_k + Mn*(realvoltagev - (C*z_k + D + 0.207259*i_k*(-1)));
P_plus = (eye(1)-Mn*C)*P;
Estimated_Voltage = C*z_kk + D - 0.207259*i_k;
errcov = C*P*C';
error_bound_pos = z_kk + 3*sqrt(P_plus);
error_bound_neg = z_kk - 3*sqrt(P_plus);
```

```

B = (eta * Delta_t / C_n);
A = 1;
P_plus = A*P_plus*A' + B*Q*B';

if z_kk>1
    z_kk = 1;
end
if z_kk<0
    z_kk = 0;
end

ocv_k = C*z_kk + D;
z_k_plus = z_kk + (eta * Delta_t / C_n) * (i_k * (-1));
Estimated_soc = z_kk;
    
```

Fig. 48. Funció associada al bloc Battery Model 1 del model Simple amb filtre

5.5. Resultats filtre de Kalman

Els resultats s’obtenen amb les mateixes condicions de simulació ja descrites. En una primera simulació s’introdueix com a senyal de corrent la de l’assaig (la mateixa que a les modelitzacions sense el filtre) i com a senyal de voltatge entre terminals també la de l’assaig (en aquest cas aquest voltatge obtingut a l’assaig representa el voltatge real del sistema). Seguint aquesta metodologia a mesura que la simulació avança, a cada instant, el model fa ús dels resultats proporcionats pel mateix model i els millora tenint en compte la comparació que fa amb els valors reals (es suposa que els valors resultants de l’assaig són els que produiria el sistema real a cada instant).

Cal recordar que aquest resultats s’aconsegueixen amb la implementació del filtre de Kalman al model Simple i amb la relació OCV-SOC linealitzada.

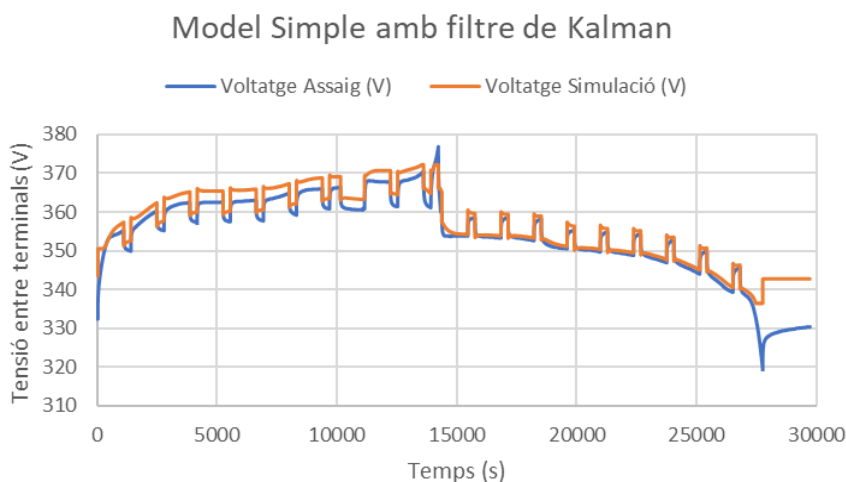


Fig. 49. Voltatge entre terminals d’assaig i simulació en funció del temps, per al model Simple amb filtre

Tal i com s’ha predit, a simple vista es pot apreciar que el voltatge entre terminals simulat és més dolent que l’obtingut en els tres models sense filtre. Això és degut a la linealització de la corba OCV-SOC. Es pot veure que la corba OCV-SOC és l’esperada:

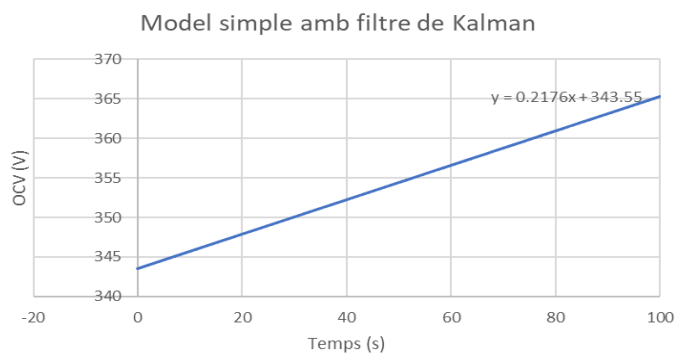


Fig. 50. OCV en funció del SOC pel model Simple amb filtre

A la següent figura també es pot apreciar com el SOC es mostra influenciat fortament per l'OCV real ja que el seu càlcul té en compte la comparació entre els voltatges real i modelitzat (aquest últim depèn de la linealització feta de l'OCV real).

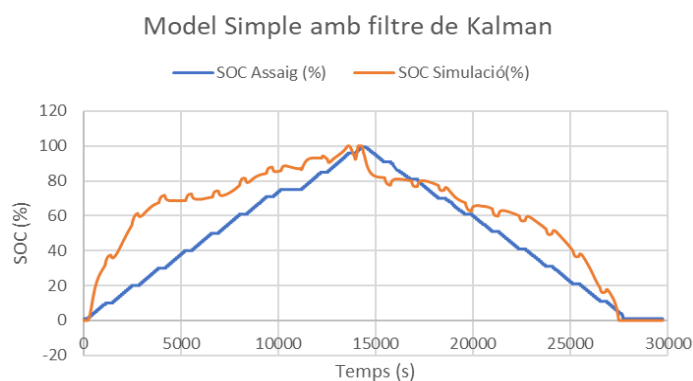


Fig. 51. SOC d'assaig i simulació en funció del temps, pel model Simple amb filtre

Encara que no sigui l'objectiu de la implementació del filtre de Kalman, s'ha calculat la mitjana quadràtica de l'error de modelatge RMS i en el següent gràfic es compara amb les obtingudes per als models sense filtre:

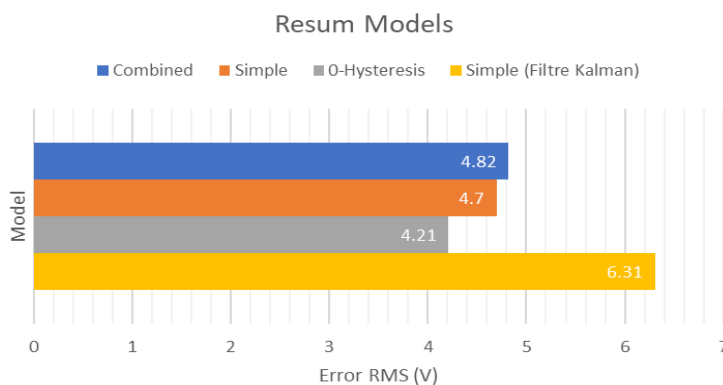


Fig. 52. Resum models segons error RMS

Com ja s’ha comentat el model com a tal és més dolent que els altres per aquesta linealització de l’OCV(SOC) que no és prou fidel al comportament real. El gràfic de la figura 53 mostra l’error de l’estimació definit com el SOC real (el de l’assaig) menys el SOC estimat pel model en la simulació. Un cop més s’evidencia la influencia de la linealització del OCV(SOC).

Model Simple amb filtre de Kalman

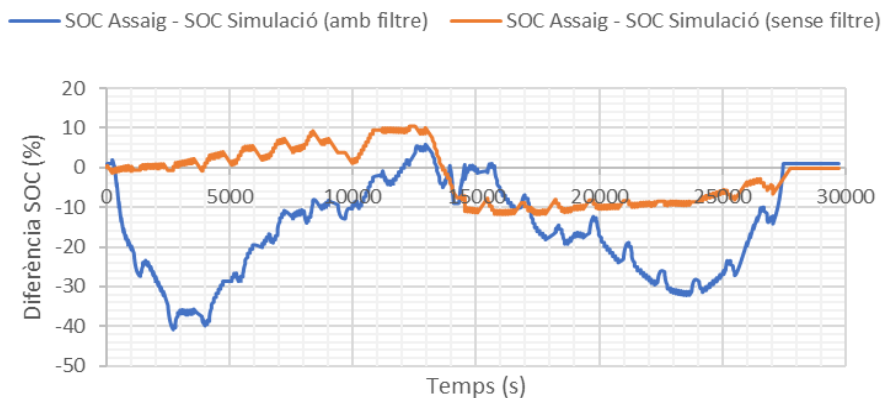


Fig. 53. Error SOC amb i sense filtre

Seguidament, s’ha fet una recollida de dades amb la finalitat d’estudiar l’objectiu de la implementació del filtre de Kalman en el projecte: provar la robustesa que la seva aplicació suposa en la modelització d’una bateria recarregable. El que s’ha fet és sotmetre el model Simple amb i sense filtre a una mala inicialització. És a dir, el paràmetre d’inicialització en el programa de Matlab dels dos models s’ha anat modificant, mentre el SOC real d’assaig de la bateria ha seguit sent el SOC inicial de 0,5%. Aquest és un cas molt habitual en les bateries recarregables ja que el fenomen d’autodescàrrega [37] ocasiona que el SOC de la bateria, quan es fa servir de nou al cap d’un temps, hagi disminuït. Un model capaç de seguir sent útil tot i ser mal inicialitzat és considerat robust. En canvi, el model que un cop mal inicialitzat només fa que acumular l’error no es pot considerar robust en absolut.

Per a dur a terme aquest experiment s’ha inicialitzat el model de la bateria, tant amb el filtre de Kalman com sense, amb el SOC de 10% i 50%. Aquests són casos extrems però que permeten observar amb contundència la diferència de funcionament del model amb i sense filtre. S’han adquirit dades de la simulació fins que el SOC ha arribat al 100% (en el procés de càrrega) i passats 7860 segons.

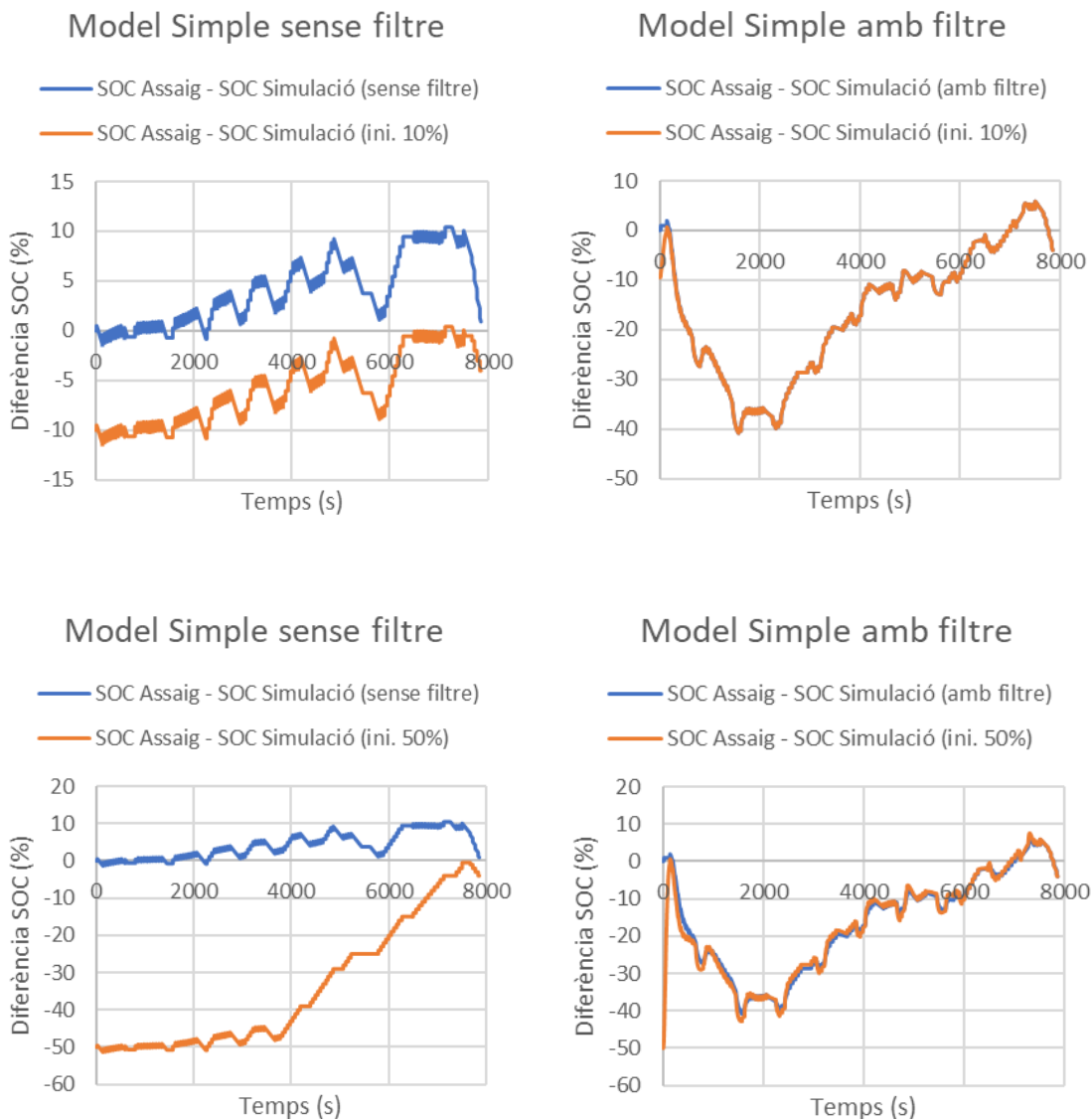


Fig. 54. Error SOC amb i sense filtre. De dreta a esquerra i de dalt a baix: sense filtre amb inicialització errònia del 10%, amb filtre amb inicialització errònia del 10%, sense filtre amb inicialització errònia del 50% i amb filtre amb inicialització errònia del 50%.

Aquests quatre gràfics ofereixen una visió inequívoca de la robustesa del filtre de Kalman. No interessa l'error en nombre absolut sinó la diferència d'error de cada model mal inicialitzat respecte el model ben inicialitzat. Amb una inicialització errònia en un 10% del SOC, amb filtre, l'error és gairebé nul. Sí que s'observa com la inicialització errònia en un 10% ràpidament convergeix amb la corba d'inicialització correcta en 0,5% del SOC. En canvi, s'observa com sense filtre, l'error es perpetua i el model no es capaç de tendir a la corba correcta.

El cas és idèntic en la inicialització errònia en un 50% del SOC, encara que la magnitud de l'error és superior. El model amb filtre és clarament capaç de convergir amb error pràcticament nul i el model sense filtre no (segueix acumulant l'error del 50%). La raó per la qual a la figura X s'aprecia la disminució de l'error aproximadament als 4000 segons és que el SOC en el model mal inicialitzat i sense filtre arriba abans al 100% del SOC (valor màxim de SOC de la bateria, ja totalment carregada).

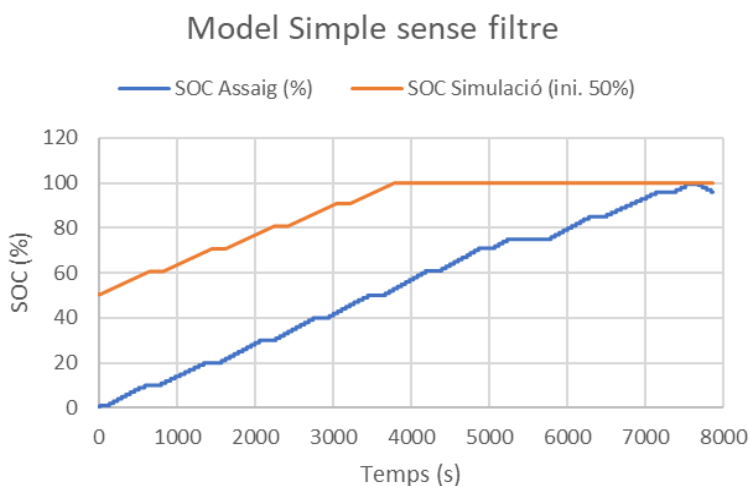


Fig. 55. SOC de l'assaig i de la simulació amb inicialització errònia del 50% en funció del temps per al model Simple sense filtre

S'han tabulat aquests resultats obtinguts pel model Simple amb inicialitzacions errònies del SOC. El resultat mostra la mitjana quadràtica de l'error de modelatge (RMS i en aquest amb el SOC en comptes del voltatge entre terminals) amb i sense filtre i amb una inicialització correcta, una d'errònia en un 10% i una altra d'errònia en un 50% del SOC.

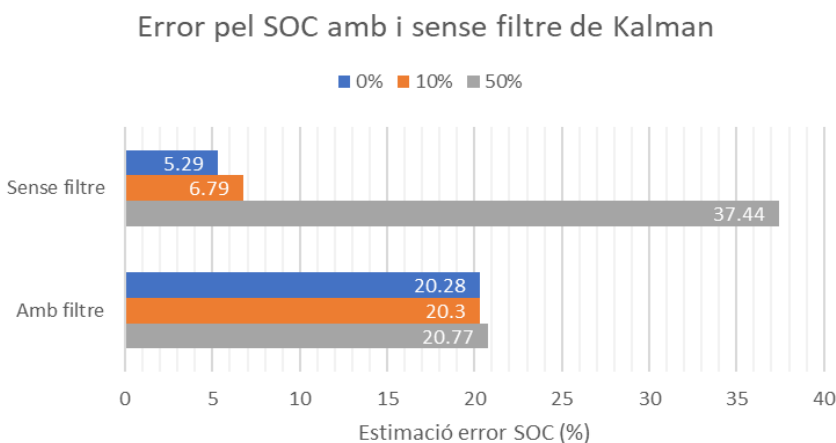


Fig. 56. Resum model Simple amb i sense filtre per a inicialitzacions sense error i amb error del 10 i 50%

Es pot apreciar com el model sense filtre, tot i presentar inicialment un error absolut més petit (del 5,29% del SOC davant del 20,28% del SOC del model amb filtre per la linealització de l'OCV-SOC), amb l'increment de l'error d'inicialització accentua molt el seu error (de l'ordre de 7 vegades).

Com s'acaba de demostrar la capacitat del filtre de Kalman aplicat a un model de bateria recarregable el prové d'una gran robustesa i li confereix la capacitat d'adaptar el model a l'estat del sistema real en condicions dinàmiques. Analitzant la covariància del filtre de Kalman, en la inicialització errònia del 50%, es pot apreciar com el sistema necessita entre 500 i 700 segons per convergir a valors d'estat estacionari. La raó perquè el filtre de Kalman mai convergeix al valor real del voltatge entre terminals és pel soroll que contínuament existeix en el sistema.

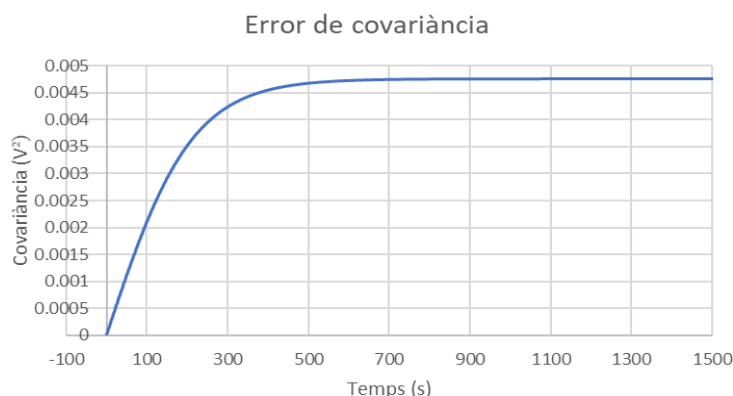


Fig. 57. Error de covariància per al model Simple amb filtre i inicialització errònia en un 50%

Addicionalment, s'ha volgut comprovar una altra de les virtuts del filtre de Kalman. Tenint en compte el model matemàtic Simple, es pot apreciar que la segona equació del model (la referent al voltatge entre terminals) sí que incorpora la R que correspon a la resistència interna de la bateria recarregable. En canvi, la primera equació del model (la que fa referència al càlcul del SOC) no incorpora aquest terme R .

$$SOC_{k+1} = SOC_k - \left(\frac{\eta_i \cdot \Delta t}{C_n} \right) i_k$$

$$v_k = OCV(SOC_k) - R i_k$$

El resultat és que el càlcul del SOC en el model Simple sense filtre no es veu mai afectat per aquesta R . En un eventual cas de degradació de la bateria [38] al llarg del cicle de vida comportaria un augment de l'error del SOC predit respecte al real. I és precisament aquí on el filtre de Kalman ofereix de nou una millora notable respecte al model Simple.

Per a poder veure aquest fenomen s'ha fet de nou la simulació del model amb filtre modificant la R en 0,5 Ohms (un 250% respecte la R original per a poder veure magnificats els resultats):

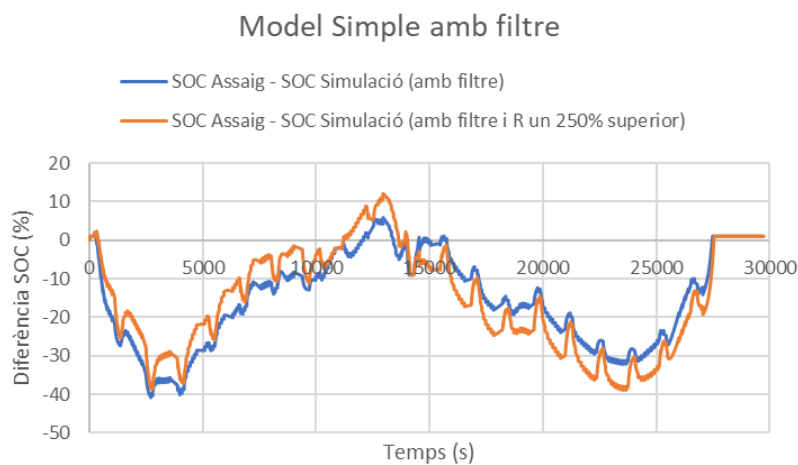


Fig. 58. Error SOC amb i sense filtre amb una resistència interna del 250% superior a l'assaig

6. Aplicacions

En el projecte s'ha desenvolupat i validat una eina per poder fer simulacions associades a una bateria assajada prèviament. Això pròpiament ja és una aplicació molt important perquè permet simular situacions sense la necessitat de realitzar assajos costosos sobre la bateria. Ja s'ha pogut observar com existeix una relació directa entre els resultats de la simulació i la qualitat de l'assaig, i el cost de l'assaig augmenta proporcionalment amb aquesta qualitat.

També s'ha pogut implementar un filtre de Kalman i apreciar les seves virtuts amb la perspectiva de ser aplicat a un BMS. Les tasques dutes a terme pel BMS en un vehicle elèctric, a tots els nivells de la bateria, inclouen des de prevenir danys a les cel·les fins a garantir un voltatge o una temperatura d'operativitat adequats, passant per augmentar la vida útil de la bateria o simplement oferir un càlcul acurat del SOC. I és en aquest àmbit on apareixen més aplicacions de la modelització realitzada i propostes on incidir en una possible continuació del projecte.

- **Gestió tèrmica:** és una de les principals responsabilitats atribuïdes al BMS. El voltatge és proporcional a la resistència i la resistència augmenta amb la temperatura degut a l'increment de la vibració molecular dins del conductor. Per tant, les bateries presenten una forta relació entre voltatge als terminals i temperatura.

Aquesta relació no es té en compte en el present projecte degut a la complexitat afegida que suposa als models desenvolupats i validats. Al llarg de tot el projecte s'ha suposat que la bateria està sotmesa a la mateixa temperatura de l'assaig, temperatura ambient. Però definitivament és un factor important a tenir en compte si es vol reproduir el més fidelment possible el comportament de la bateria.

Les temperatures d'entre 0 i 40 °C no influeixen gaire el voltatge entre terminals, però les temperatures que es troben fora d'aquest rang sí. El fenomen d'histeresi és més important a baixes temperatures i és per això que la addició de la temperatura en el model augmentaria considerablement la seva fiabilitat. Per a les temperatures altes el BMS ha de ser capaç de gestionar els sistemes de refrigeració que du associats la bateria, no només per a maximitzar l'eficiència de la bateria, sinó també per evitar un possible *thermalrunway*. Els BMS sovint també disposen de mecanismes per escalfar les bateries quan estan operant a temperatures inferiors a les òptimes. Per a això, les bateries d'EV equipen sensors de temperatura.

En una possible continuació del projecte caldria estudiar com incorporar aquest nou paràmetre de tal manera que el càlcul del voltatge entre terminals de la bateria es vegi influenciat per la temperatura de treball.

- **SOH:** L'estat de càrrega és una mesura indirecta que reflecteix la condició general d'una bateria i la seva disposició a rendir respecte quan era nova. És una mesura a llarg termini. Durant el cicle de vida d'una bateria la seva salut tendeix a deteriorar-se gradualment per canvis físics i químics irreversibles provocats per l'ús i l'edat.

Per tant, és necessari, primerament, estudiar com es vol definir el SOH. Qualsevol paràmetre que varia amb el temps de funcionament es pot fer servir com a indicador. L'indicador més simple que es pot emprar és la mesura periòdica de la impedància de les cel·les. És necessari conèixer les condicions inicials de la bateria atès que el SOH és una estimació relativa a aquestes.

Altres definicions del SOH més complertes poden incloure com a indicadors la capacitat, la resistència interna o l'autodescàrrega. Tots aquests indicadors conjuntament amb el recompte històric de cicles de la bateria acostumen a oferir resultats fiables que permet prendre decisions al BMS relatives a la operativitat de la bateria amb la finalitat de retardar el màxim possible el seu EOL (*End Of Life*, final de vida).

En una possible continuació del projecte es podrien establir els indicadors del SOH i dissenyar un algoritme que els combinés i prengués decisions conseqüentment. És important disposar d'aquests indicadors per a cada cel·la i no per a tota la bateria, com s'explica en el següent punt.

- **Equilibri entre cel·les:** L'objectiu d'equilibrar una bateria és mantenir-la en l'estat on es pot utilitzar la màxima potència de càrrega i descàrrega. En el projecte s'ha tractat tota la bateria com a una unitat uniforme on hi entra corrent pels terminals i s'hi produeix una diferència de potencial. Aquesta aproximació té grans limitacions en una bateria constituïda per diferents cel·les.

Les petites diferències dinàmiques entre cel·les, principalment en l'eficiència colòmbica i la capacitat, causen la diferenciació entre els seus SOC amb el pas del temps. Aleshores apareix el perill de que una o més cel·les limitin el rendiment de les altres. Si una cel·la disposa d'un SOC inferior a la resta limita la seva descàrrega, i si per contra disposa d'un SOC superior limita la càrrega de les altres cel·les. El cas extrem es produeix quan la bateria no es pot ni carregar ni descarregar perquè una cel·la es troba en el seu SOC límit superior i l'altra en el seu SOC límit inferior.

Les cel·les disposades en paral·lel s'acostumen a equilibrar de forma natural ja que disposen del mateix voltatge i permet a la càrrega distribuir-se adequadament. En les cel·les en sèrie són necessaris mètodes per equilibrar-ne el SOC i garantir el correcte funcionament de tota la bateria.

Existeixen principalment dos maneres d'equilibrar les cel·les en una bateria: amb equilibrament passiu i amb equilibrament actiu. L'equilibrament passiu implica un circuit elèctric paral·lel a cada cel·la amb una resistència i un MOSFET (*metal-oxide-semiconductor field-effect transistor*, transistor d'efecte de camp metall-semiconductor) de descàrrega. Així les cel·les amb la càrrega més alta de la bateria dissipen l'energia en excés fins que s'equiparen a la resta de cel·les. No representa la millor opció degut a les pèrdues d'energia.

L'equilibrament actiu, en canvi, transfereix l'energia de les cel·les més carregades a les menys carregades. Generalment aquesta transferència s'aplica seqüencialment. S'acostuma a fer ús de convertidors DC-DC o basats en capacitors o inductors. Aquest mètode és energèticament parlant molt eficient, però econòmicament és costós.

Una possible continuació del projecte pot aplicar un mètode actiu d'equilibrament entre cel·les. Les dades desglossades de cada una de les cel·les constituents de la bateria són indispensables per aplicar-lo. A més, es podria introduir l'estimació del SOH per a cada cel·la per a poder actuar sobre les que més ho necessitessin.

7. Impacte ambiental

Les bateries són una eina molt important de descarbonització del sistema elèctric mundial, tant pel que fa a xarxes com a transport [39]. En relació a les xarxes, permet fer una gestió eficient de la producció energètica, especialment amb la irrupció de les energies renovables. En relació al transport, permet dur a terme la transició dels vehicles de combustió als vehicles elèctrics.

La fallada d'una bateria recarregable de liti pot provocar conseqüències catastròfiques en incendiar-se o explotar. És un dels motius pel que el SOH ha de ser monitoritzat constantment pel BMS. El BMS protegeix de descàrregues i càrregues perillosament intensives i estima de forma acurada l'estat funcional de la bateria. Com ja s'ha comentat, també s'encarrega de monitoritzar la temperatura de la bateria per garantir que sempre opera en un rang d'eficiència alt. [40].

L'impacte mediambiental més positiu que es pot produir en la indústria de les bateries elèctriques és haver-ne de produir menys. La seva producció implica quantitats molt elevades d'energia i de minerals d'obtenció molt costosa, tant econòmicament com energèticament i socialment [41].

Amb les conclusions extrems de les simulacions del projecte hi ha dues possibles vies d'actuació.

- **La primera**, és la de la limitació del DOD de la bateria, ja que aquest influeix críticament en els seus cicles de vida útil [42]. La vida útil de les bateries disminueix al operar amb SOC elevat i amb el DOD, com es pot apreciar en la següent figura:

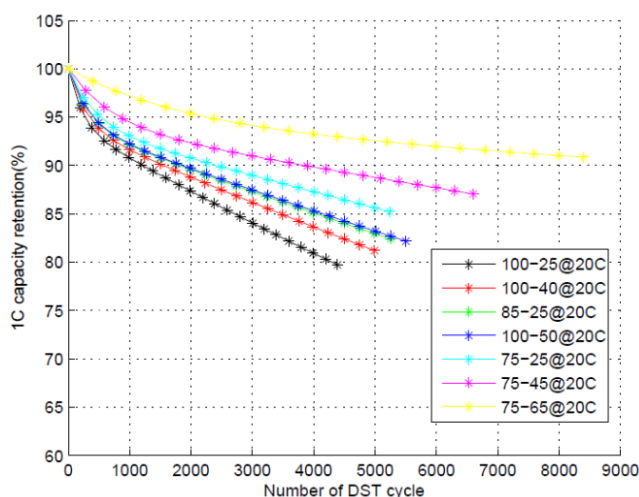


Fig. 59. Retenció de capacitat en funció dels cicles de funcionament d'una bateria de liti per a diferents DOD i

SOC [43]

Es pot observar, per exemple, que la pèrdua del 15% de capacitat de la bateria es produeix als 4000 cicles per a un DOD de 50% (100-50%) mentre que per a un DOD de 75% (100-25%) es produeix als 2600 cicles. Això vol dir que fent ús del 50% del DOD en comptes del 75% s'augmenta en 1400 cicles (un 54%) el moment d'ús en el que la bateria presenta una pèrdua del 15% de capacitat. D'aquí la vital importància d'operar la bateria dins del rang desitjat que permeti l'equilibri perfecte entre la durabilitat de la bateria i les seves prestacions. Quan la lectura del valor del SOC no és precisa cal treballar amb marges d'error importants que minven aquest equilibri entre durabilitat i prestacions, el que resulta en una reducció del temps de vida de la bateria.

- **La segona** via d'actuació, és la limitació de la vida útil de la bateria en funció de la precisió del voltatge, sobretot de càrrega [44]. Una diferència de 0,15 V en una cel·la de liti pot significar la pèrdua de 100 mAh en 500 cicles o en poc més de 100.

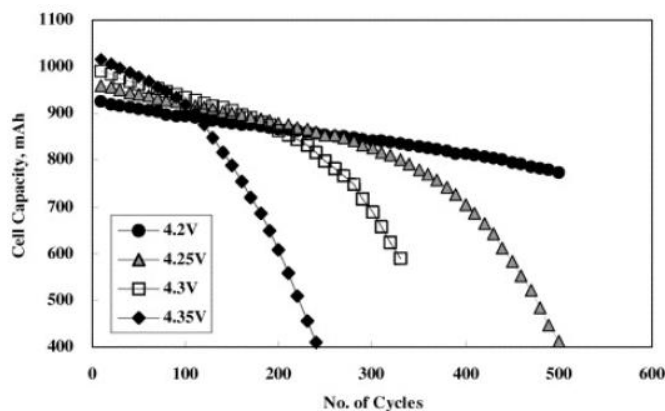


Fig. 60. Capacitat d'una cel·la de liti en funció dels cicles de funcionament per a diferents tensions de funcionament

Per evitar aquestes sobretensions que redueixen notablement la durabilitat de la bateria cal fer lectures precises del voltatge entre terminals a cada instant. Per això la importància de bons models matemàtics que reflecteixin el comportament de la bateria i de mètodes com el filtre de Kalman que permetin atorgar robustesa al sistema.

Aquestes dues línies d'actuació que es desprenen de les simulacions realitzades en el projecte contribueixen notablement a la prolongació del cicle de vida de les bateries recarregables, i consegüentment, a la disminució de la producció de les mateixes que té un impacte negatiu en el medi ambient. Aquestes eines presentades aplicades als BMS dels vehicle elèctrics generen grans beneficis a nivell de seguretat, medi-ambient i sostenibilitat.

8. Pressupost

El projecte ha constat de dos tipus de recursos: els de desenvolupament i els humans. Els de desenvolupament fan referència a les eines emprades i que en aquest cas són llicències de programari amb subscripció anual obligatòria. Totes les llicències són professionals i el seu preu no inclou IVA. Per una banda es troba la llicència de Matlab i Simulink [45], i per l'altra la llicència d'Office (s'ha fet ús intensiu de l'Excel en el processament de les dades). El preu total dels recursos de desenvolupament han estat 2572 euros.

New Annual License for MATLAB R2020a

Product	Service Period	Price
New Products		
MATLAB	19 Jun 2020 - 30 Jun 2021	EUR 800,00
Simulink	19 Jun 2020 - 30 Jun 2021	EUR 1.200,00
Subtotal:		EUR 2.000,00

Fig. 61. Pressupost Matlab i Simulink anual per a professionals

10,50 €
 por usuario al mes
 (suscripción anual)
 El precio no incluye IVA.

**Microsoft 365 Empresa
 Estándar**
 (anteriormente Office 365 Empresa
 Premium)

[Comprar ahora](#)

Fig. 62. Cost llicència professional mensual Office per a subscripció anual

Els recursos humans són les hores de dedicació al projecte en totes les seves fases. Aquestes són la planificació del projecte, l'estudi de l'estat de l'art, el tractament de les dades de l'assaig, la modelització de la bateria, la parametrització dels models, la simulació dels models i l'elaboració final de la memòria. Les hores de dedicació tècnica es perceben a 40 €/h amb impostos inclosos i la resta a 25 €/h, també amb impostos inclosos. La dedicació total al projecte és de 315 hores. El preu total dels recursos humans ha estat de 10950 euros.

Cal afegir que no hi ha hagut cap cost en l'adquisició de les dades utilitzades en el projecte, atès que no s'han pogut realitzar els assajos planificats i s'ha fet ús de dades de caràcter públic sense cost addicional. El cost total del projecte s'eleva als 13522 euros.

	Concepte	Hores (h)	Cost Unitari (€/h)	Cost sense IVA (€)	Cost Total (€)
Recursos Desenvolupament					2572
	Llicència anual MATLAB			800	968
	Llicència anual Simulink			1200	1452
	Llicència anual Office			126	152,46
Recursos Humans					10950
	Planificació del projecte	7	25		175
	Estudi estat de l'art	28	25		700
	Tractament dades assaig	8	40		320
	Modelització bateria	82	40		3280
	Parametrització models	19	40		760
	Simulació models	96	40		3840
	Elaboració memòria	75	25		1875
TOTAL					13522

Taula 2. Pressupost detallat del projecte

9. Planificació

El projecte té data d'inici del 17 de febrer i data de finalització del 22 de juny. Això és un total de 18 setmanes. Primerament s'ha treballat en un gran bloc documental de planificació i recerca i estudi de l'estat de l'art. Seguidament s'ha iniciat la part experimental del projecte en un període que ha comprès des del tractament de dades de l'assaig emprades fins a la simulació dels models amb l'obtenció de dades corresponent. Per últim, s'ha realitzat l'elaboració de la present memòria que recull tot el procés seguit en el projecte per arribar fins a les seves conclusions.

S'ha realitzat un diagrama de Gantt amb la finalitat de poder mostrar gràficament com s'ha distribuït la dedicació al projecte. Es pot remarcar el fet que no s'ha iniciat la part experimental fins que la part documental ha estat acabada, igual que ha succeït amb la parametrització dels models i la seva simulació (és necessari conèixer els paràmetres per a poder realitzar la simulació del model).

Destacar que l'elaboració de la memòria des d'un punt de vista més formal sí que ha estat en les últimes cinc setmanes del projecte però que al llarg del mateix s'ha anat realitzant un esbós amb totes les idees i resultats recollits al llarg de les seves diferents etapes.

Setmana del projecte	17 febrer	24 febrer	2 març	9 març	16 març	23 març	30 març	6 abril	13 abril	20 abril	27 abril	4 maig	11 maig	18 maig	25 maig	1 juny	8 juny	15 juny
Planificació del projecte	■	■																
Estudi estat de l'art		■	■	■	■													
Tractament dades assaig						■	■											
Modelització bateria							■	■	■	■								
Parametrització models								■	■	■	■							
Simulació models											■	■	■	■	■			
Elaboració de la memòria																■	■	■

Taula 3. Diagrama de Gantt del projecte

Conclusions

El projecte presenta diverses conclusions que responen als objectius proposats. S'exposen a continuació en l'ordre que s'obtenen al llarg de la memòria:

- Els BMS, conjuntament amb la reducció dels costos de la cadena de producció, es presenten com l'eina per reduir el cost final de les bateries elèctriques recarregables, optimitzant el seu rendiment i la seva vida útil, i ser els impulsors del canvi en la mobilitat mundial.
- Models matemàtics de bateries recarregables que són lineals en els paràmetres admeten la seva parametrització segons el mètode de mínims quadrats. Altres mètodes més avançats com el filtre de Kalman també poden ser aplicats tot i que tenen un cost computacional més elevat.
- Els tres models matemàtics seleccionats per a modelitzar la bateria assajada han estat desenvolupats i validats amb èxit. Oferint millor o pitjors resolucions tots ells representen el comportament de la bateria assajada.
- El model és tant bo com les dades experimentals en les que està basat. Les dades utilitzades provinents d'un sol assaig han complert amb els objectius proposats, però no obstant, una recollida de dades en dos o més assajos, com la planificada, hagués resultat en models més precisos.
- El model matemàtic Estat Zero Histèresi modelitza millor la bateria estudiada que el Simple i el Combinat. Alhora, el model matemàtic Simple modelitza també millor la bateria estudiada que el Combinat. Les diferències de fidelitat entre tots tres reflecteixen les tesis matemàtiques de cada un dels models.
- Amb els resultats obtinguts i per a aplicacions de baix cost el model matemàtic predilecte és el Simple. El motiu és ser el model que inclou menys paràmetres i que per tant simplifica el cost computacional associat.
- La linealització del paràmetre OCV-SOC en el model matemàtic Simple conjuntament amb la implementació d'un filtre de Kalman ofereix resultats amb baixa precisió. Aquest era un fet pronosticat i que s'ha pogut confirmar. S'ha buscat simplificar el model al màxim amb la finalitat de provar la seva robustesa.

- La implementació del filtre de Kalman al model matemàtic Simple augmenta clarament la robustesa del sistema. Aquest no afegeix gairebé error en el cas d'inicialitzacions errònies del sistema, mentre que els models sense filtre el disparen.
- La implementació del filtre de Kalman al model matemàtic Simple fa dependre el SOC de la resistència interna de la bateria recarregable. Sense el filtre els models no són capaços de percebre una variació en aquest paràmetre per la seva naturalesa matemàtica.
- La implementació de models matemàtics conjuntament amb un filtre de Kalman permet l'obtenció de BMS robusts amb la capacitat de perllongar la vida útil de les bateries recarregables i contribuir positivament al medi-ambient evitant la necessitat de fabricar-ne de noves.
- Possibles continuacions del projecte podrien anar en la direcció de completar la modelització amb filtre duta a terme amb altres funcions i aplicacions pròpies dels BMS: l'equilibri entre cel·les, la gestió tèrmica o el càlcul del SOH són àmbits d'actuació que definitivament millorarien la fiabilitat i la robustesa del sistema.

Agraïments

Agraeixo molt al Paco la predisposició mostrada des del primer dia en dirigir-me el projecte. M'ha guiat per les diverses etapes d'aprenentatge necessàries i m'ha facilitat els recursos adients en cada una d'elles.

Les circumstàncies del moment han complicat la comunicació, que ha estat resolta amb èxit des del primer dia, i sobretot, ha obligat a fer modificacions de pes respecte el plantejament original del projecte. Tot i així, conjuntament, s'ha pogut anar triant el rumb correcte que dugués a la consecució dels objectius plantejats des del principi, i és una fet que crec que li dona un valor afegit al projecte.

Bibliografia

- [1] CAITLYN KENNEDY, REBECCA LINDSEY, *What's the difference between global warming and climate change?* Climate.gov: 2015 [https://www.climate.gov/news-features/climate-qa/whats-difference-between-global-warming-and-climate-change, 17 de febrer de 2020]
- [2] NASA. *Vitals signs. Carbone Dioxide*, Estadístiques [https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/, 26 de febrer de 2020]
- [3] NASA. *Vitals signs. Global temperature*, Estadístiques [https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/, 26 de febrer de 2020]
- [4] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Scaling up the transition to electric mobility*. Tecnology report, París, 2019 [https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019, 26 de febrer de 2020]
- [5] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Entering the decade of electric drive?* Tecnology Report, París, 2020 [https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020#the-global-electric-vehicle-fleet-expanded-significantly-over-the-last-decade-underpinned-by-supportive-policies-and-technology-advances, 26 de febrer de 2020]
- [6] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Electric car deployment in selected countries, 2013- 2018*. Estadístiques. París, 2019 [https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electric-car-deployment-in-selected-countries-2013-2018, 26 de febrer de 2020]
- [7] LOGAN GOLDIE-SCOT, *A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices*. BloombergNEF, 2019, [https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/, 5 de març de 2020]
- [8] DEPARTAMENT D'ENERGIA D'ESTATS UNITS, *How do All-Electric Cars Work?* Eficiència energètica i energia removable, Centre de dades de combustibles alternatius [https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work, 12 de març de 2020]
- [9] ECONOTICIAS. *Componentes principales del coche eléctrico*. 2012 [https://www.ecoticias.com/motor/67802/Componentes-principales-coche-electrico, 12 de març de 2020]
- [10] THOMAS B. REDDY, *Linden's handbook of batteries, fourth edition*. MC Graw hill: 2008

- [11] WIKIMEDIA COMMONS. *Battery with polymer separator*, 2012 [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=21882537, 28 de febrer de 2020]
- [12] WORDPRESS. *The Rocking Chair Battery (Lithium Ion Battery)*, Issues in Physics and Society, 2013 [https://physicsandsocietybc.wordpress.com/2013/04/03/the-rocking-chair-battery-lithium-ion-battery/, 28 de febrer 2020]
- [13] RACE. *Como son las baterías de los coches eléctricos*, Tecnología y motor, 2019 [https://www.race.es/como-son-baterias-coches-electricos, 12 de març de 2020]
- [14] ISIDOR BUCHMANN, *Recognizing Battery Capacity as the Missing Link, Lifting the battery fuel gaugeout of the middle ages*. Battery University, 2013 [https://www.cadex.com/_content/EIS-BMS.pdf, 18 de març de 2020]
- [15] V. M GUTIÉRREZ, *Red Neuronal Artificial Back propagation aplicada al reconocimiento de dígitos hexadecimales*, Congreso Nacional de Control Automático, Mèxic: 2017 [http://cnca2017.fime.uanl.mx/MemoriaCNCA17/media/files/0065.pdf, 18 de març de 2020]
- [16] WEN-YEAU CHANG, *The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review*. Hindawi: 2013 [https://www.hindawi.com/journals/isrn/2013/953792/#copyright, 18 de març de 2020]
- [17] S. J. MOURA, F. B. ARGOMEDO, R. KLEIN, A. MIRTABATABAEI Y M. KRSTIC, *Battery State Estimation for a Single Particle Model With Electrolyte Dynamics*, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 25, no. 2, 2017 p. 453-468,
- [18] ALI JOKAR, BARZIN RAJABLOO, MARTIN DÉSILETS, MARCEL LACROIX, *Review of simplified Pseudo-two-Dimensional models of lithium-ion batteries*, *Journal of power Sources*, Vol. 327, 2016, p. 44-55
- [19] M. MESSING, T. SHOA I S. HABIBI, *Lithium-Ion Battery Relaxation Effects*, *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, Detroit, USA, 2019, p. 1-6
- [20] NING TIAN, YEBIN WANG, JIAN CHEN I HUAZHEN FANG, *One-shot parameter identification of the Thevenin's model for batteries: Methods and validation*, *Journal of Energy Storage*, Vol. 29, 2020

- [21] GREGORY L. PLETT, *Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 2. Modeling and identification*. Journal of Power Sources, Vol. 134, 2004, p. 262-276
- [22] JEAN DOMINIQUE DEUSCHEL, WOLFGANG DREYER, PETER FRIZ, CLEMENS GUHLKE, *ECMath Projecti SE17: Stochastic methods for the analysis of lithium-ion batteries*, Weiertrass Institute, Berlin: 2019 [<http://www.wias-berlin.de/projects/ECMath-SE17/>, 29 de març de 2020]
- [23] M. GARCÍA-PLAZA, J. ELOY-GARCÍA CARRASCO, A. PEÑA-ASENSIO, J. ALONSO-MARTÍNEZ I S. ARNALTES GÓMEZ, *Hysteresis effect influence on electrochemical battery modelling*. Electric Power Systems Research, Vol. 152, 2017, p. 27-35
- [24] JIANG YAN, *Modeling charge polarization voltage for large lithium-ion batteries in electric vehicles*. Journal of Industrial Engineering and Management, Juliol 2013, vol. 6, núm. 2, p. 686-697.
- [25] GREGORY L. PLETT, *Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 1. Background*. Journal of Power Sources, vol. 134(2), 2004, p. 252-261
- [26] MARIA CRISTINA MUNUERA RAGA. *Filtro de Kalman y sus aplicaciones*. Facultat de matemàtiques i informàtica de la Universitat de Barcelona. Departament de Probabilitat i Estadística. Treball de fi de grau, Barcelona, 2018 [<http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/127417/2/memoria.pdf>, 8 de març de 2020]
- [27] ALEX BECKER, *The Kalman Filter. The background break*, 2018 [<https://www.kalmanfilter.net/background.html>, 8 de març de 2020]
- [28] LABORATORIO GLUÓN. *Filtro de Kalman: Deducción y ejemplos*, 2019 [<https://www.laboratoriogluon.com/filtro-de-kalman-deduccion-ejemplos/>, 8 de març de 2020]
- [29] UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. CENTRE D'INNOVACIÓ TECNOLÒGICA EN CONVERTIDORS ESTÀTICS I ACCIONAMENTS. *Power electronics and its applications*. Barcelona 2020 [<https://www.citcea.upc.edu/>, 20 d'abril de 2020]
- [30] FENECON, ENERGY ENGINEERING. *The FENECON Commercial 50-series*, Alemanya, 2018 [<https://www.42technology.ch/wp-content/uploads/2018/09/Energy-Storage50-240kWh-V1.0.pdf>, 6 de juny de 2020]
- [31] YOKOGAWA. *DLM2000 Mixed Signal Oscilloscopes*. Producte, 2017 [https://tmi.yokogawa.com/es/solutions/products/oscilloscopes/digital-and-mixed-signal-oscilloscopes/dlm2000-mso-series/#Details_Updates, 6 de juny de 2020]

- [32] J. YANG, B. XIA, Y. SHANG, W. HUANG I C. MI, *Improved battery modeling approach considering operating scenarios for HEV/EV applications*, IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Tampa, 2017, pp. 1216-1222
- [33] V. J. OVEJAS, A, *Effects of cycling on lithium-ion battery hysteresis and overvoltage*. Scientific Reports, vol. 9, Article number: 14875, 2019
- [34] MATHWORKS, *MATLAB, El lenguaje del cálculo técnico* [<https://es.mathworks.com/products/matlab.html>, 26 de juny de 2020]
- [35] MATHWORKS. *SIMULINK. Simulación y diseño basado en modelos*. [<https://es.mathworks.com/products/simulink.html>, 26 de juny de 2020]
- [36] ERIC W. WEISSTEIN, *Root-Mean-Square*. Mathworld, a Wolfram Web Resource, [<https://mathworld.wolfram.com/Root-Mean-Square.html>, 14 d'abril de 2020]
- [37] PANASONIC. BATTERIES. *What is self-discharge?* [<https://www.panasonic-batteries.com/en/faq/what-self-discharge>, 18 de maig de 2020]
- [38] XUEBING HAN, LAGUANG LU, YUEJIU ZHENG, XUNING FENG, ZHE LI, JIANQIU LI I MINGGAO OUYANG, *A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle*, eTransportation, vol. 1, 2019
- [39] CLEAN ENERGY WIRE. ENERGY STORAGE AND THE ENERGIEWENDE. *Electricity storage is next feat for Germany's energy transition*, Alemania, 2018 [<https://www.cleanenergywire.org/dossiers/energy-storage-and-energiewende>, 16 de juny de 2020]
- [40] M. WOODY, M. ARBABZADEH, GEOFFREY M. LEWIS, GREGORY A. KEOLEIAN I A. STEFANOPOULOU, *Strategies to limit degradation and maximize Li-ion battery service lifetime - Critical review and guidance for stakeholders*, Journal of Energy Storage vol. 28, 2020
- [41] DANIEL KUPPER, KRISTIAN KUHLMANN, SEBASTIAN WOLF, CORNELIUS PIEPER, GANG XU I JUSTIN AHMAD, *The Future of Battery Production for Electric Vehicles*, Boston Consulting group (BCG), Automotive y Mobility, 2018 [<https://www.bcg.com/publications/2018/future-battery-production-electric-vehicles.aspx>, 16 de juny de 2020]
- [42] E. WIKNER, T. THIRINGER, *Extending Battery Lifetime by Avoiding High SOC*. Applied Sciences, vol. 8, 2018

- [43] B. XU, A. OUDALOV, A. ULBIG, G. ANDERSSON, I D. S. KIRSCHEN, *Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment. IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9(2), 2018, p. 1131-1140
- [44] SOO SEOK CHOI, HONG S. LIM, *Factors that affect cycle-life and possible degradation mechanisms of a Li-ion cell based on LiCoO₂*, *Journal of Power Sources*, vol. 111(1), 2002, p. 130-136
- [45] WOLFRAM MATHWORLD, *Pricing and Licensing*, [https://es.mathworks.com/pricing-licensing.html?intendeduse=comm&s_tid=htb_learn_gtwy_cta1, 16 de juny de 2020]
- [46] F. DIAZ-GONZALEZ, *Material de curs "Energy Storage" (codi 820773)*, Màster Enginyeria Energia
- [47] THE MATHWORKS INC, *Help Center: Kalman Filtering* [<https://es.mathworks.com/help/control/ug/kalman-filtering.html>, 25 de maig de 2020]