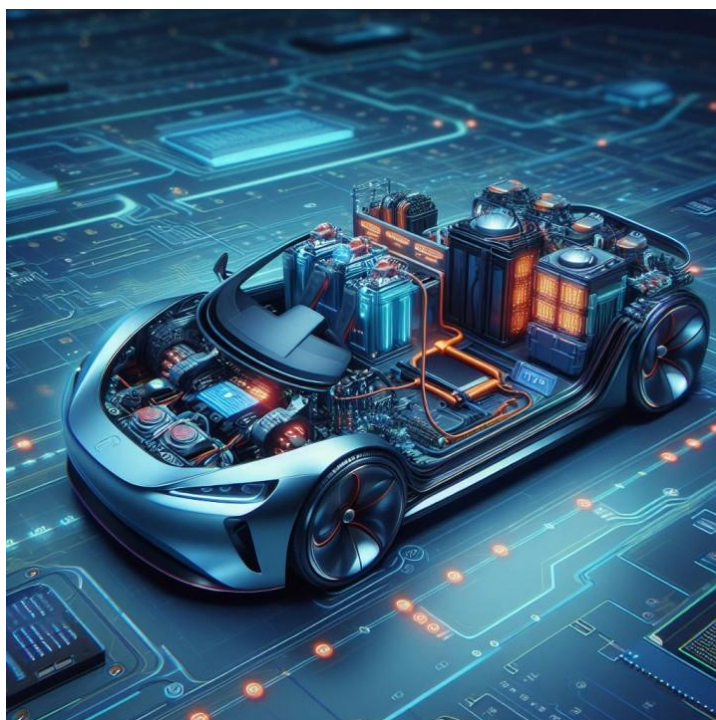


TELEKOMUNIKAZIO TEKNOLOGIAREN INGENIARITZAKO GRADUA

GRADU AMAIERAKO LANA

MUGIKORTASUN ELEKTRIKORAKO BMS PLATAFORMAREN GARAPENA



Ikaslea: Gelbentzu Arriaga, Ane

Zuzendaria: Ibarra Basabe, Edorta

Ikasturtea: 2023-2024

Data: Bilbon, 2024ko Maiatzaren 28an

Laburpena

Trantsizio energetikoak mugikortasun elektrikoaren erabilera sustatu du, bereziki azken urteotan. Ibilgailu elektrikoen eskaera gero eta handiagoa da, eta auto-fabrikatzaileek inbertsioak egin dituzte eskaera horri aurre egiteko, bai ikerkuntzan bai fabrikazioan. Ikerkuntza arloan, energia-biltegitratze sistemak garapen gehien behar duten teknologiak, horiek direlako ibilgailuen autonomian eta fidagarritasunean eragin handiena dutenak.

Ibilgailu elektrikoetan energia-biltegitratze sistemak Li-ioi baterietan oinarritzen dira, horiek dituzten ezaugarriak direla eta. Bateria-teknologia hau baldintza zehatzetan erabili behar da. Horregatik kudeaketa- edo kontrol-sistema bat behar dute. Sistema horiei *Battery Management System* deritze, Bateria Kudeaketa Sistema, eta bateriaren monitorizazioaz eta kontrolaz arduratzen dira.

Monitorizazioaz gain beste hainbat funtzio izango ditu BMSak: zelulen orekatzeko pasiboa, beste azpi-sistemetara konektatzeko erabiltzen diren kontaktoreen kontrola, eta sistemaren etena eta ebaluazioa. Ezinbestekoa da BMSa bateriaren segurtasun maila bermatu ahal izateko.

Gradu Amaierako Lan honetan *Battery Management System* baten kontrol-softwarea garatu da. Lan hau Euskal Herriko Unibertsitatearen, EuskoIker fundazioaren eta Tecnia Research and Innovation fundazioaren arteko kolaborazioa den Tecnia Gelan garatu da, unibertsitateko irakasle baten eta enpresako ikerlari baten laguntzarekin. Softwarea garatzeko *Matlab/Simulink* programa erabili da, eta *Model Based Design* edo Modeloetan Oinarritutako Diseinua erabili da, ere.

BMSa garatzeko bateria baten zirkuitu baliokidea sortu da, eta horren gainean garatu eta probatu da sistema osoaren funtzionaltasuna. Bateriaren zirkuitu baliokidea eratzeko *Matlabeko Simscape Battery* liburutegia erabili da, eta BMSa *Simulink*eko liburutegien bidez garatu da. Kontrol-sistemaren zati nagusia egoera-makinetan oinarrituta dago. Garapenaren amaieran, simulazio bidez sistemaren eginkizun guztiak frogatu eta egiaztatu dira.

Hitz gakoak: BMS; Bateria; Modeloetan Oinarritutako Diseinua; Bateria-zelulen orekatzea

Resumen

La transición energética está fomentando la movilidad eléctrica, especialmente en los últimos años. La creciente demanda de vehículos eléctricos ha supuesto una inversión de los fabricantes de automóviles para hacer frente a esta demanda, tanto en la investigación como en fabricación. En el ámbito de la investigación, las tecnologías que requieren un mayor desarrollo son los sistemas de almacenamiento de energía, los cuales son fundamentales para proporcionar autonomía y fiabilidad a los vehículos.

Los sistemas de almacenamiento de energía en los vehículos eléctricos se basan, comúnmente, en baterías de Litio-ion, por sus características. Esta tecnología de batería debe utilizarse en condiciones concretas, por lo que se requiere incorporar un sistema de gestión y control. Este sistema se conoce como el *Battery Management System*, Sistema de Gestión de Batería, y se encarga de la monitorización y control de la batería.

Además de la monitorización, el BMS cumple con una serie de funciones: el equilibrado pasivo de las células, el control de los contactores utilizados para conectar otros subsistemas, y la interrupción y evaluación ante errores del sistema. El BMS es imprescindible para mantener el nivel de seguridad de la batería.

En este Trabajo de Fin de Grado se ha desarrollado el software de control de un *Battery Management System*. Este trabajo se ha desarrollado en el Aula Tecnalia, creada por la colaboración entre la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea, la fundación EuskoIker y la fundación Tecnalia Research and Innovation. Además, en el desarrollo del TFG se ha contado con la ayuda de un profesor de dicha universidad y un investigador de Tecnalia. El *software* se ha desarrollado a través del programa *Matlab/Simulink*, siguiendo el paradigma *Model Based Design* o Diseño Basado en Modelos.

Para el desarrollo del BMS se ha creado el circuito equivalente de una batería, sobre el que se ha desarrollado y probado la funcionalidad de todo el sistema. Para crear el circuito equivalente de la batería se ha utilizado la biblioteca *Simscape Battery* de *Matlab* y el BMS se ha desarrollado con la ayuda de las bibliotecas de *Simulink*. La parte principal del sistema está basada en máquinas de estado. Al finalizar la fase de desarrollo, se han demostrado y verificado todas las funciones

del sistema mediante simulaciones.

Palabras clave: BMS; Batería; Diseño Basado en Modelos; Equilibrado de celdas de batería

Abstract

Energy transition has encouraged the use of electromobility solutions, especially in recent years. A growing demand for electric vehicles has led car manufacturers to invest in both research and manufacturing. Regarding research, the technologies that require the most development are the energy storage systems, which are critical elements to provide autonomy and reliability for the vehicles.

Energy storage systems in electric vehicles are based on Li-ion batteries because of their characteristics. This battery technology must be used under specific conditions, so they must incorporate a management or control system. This system, known as the Battery Management System, will carry the monitoring and control tasks of the battery.

In addition to monitoring, the BMS is in charge of the passive balancing of cells, the control of contactors used to connect other subsystems, and the suspension and evaluation of the system in case of error. The BMS is thus essential for maintaining battery safety levels.

In this project, the control software of a battery management system has been developed. This work has been carried out in *Aula Tecnalia*, a collaboration between the University of the Basque Country/Euskal Herriko Unibertsitatea, EuskoIkler and Tecnalia Research and Innovation. The project has been done with the collaboration of a professor of the aforementioned University and a researcher from Tecnalia. The software has been developed through Matlab/Simulink and by Model Based Design.

The BMS has been developed using the equivalent circuit of a battery, on which the functionalities of the entire system have been developed and tested. The equivalent battery circuit has been constructed using the *Matlab* library *Sim-scape*, and the BMS has been developed using *Simulink* libraries. The main part of the system is based on state machines. At the end of the development stage, all the functions of the system have been tested and verified through various simulations.

Key words: BMS; Battery; Model Based Design; Battery Cell balancing

Aurkibidea

Taulen Zerrenda	13
Irudien Zerrenda	16
Nomenklatura	17
Akronimoen Zerrenda	19
I. MEMORIA	21
1. Sarrera	23
1.1. Aldaketa klimatikoa	23
1.2. Igorpenak murrizteko helburuak	24
1.3. Ibilgailu elektrikoa eta bateriak	27
2. Testuingurua	29
3. Proiektuaren helburuak eta irismena	31
3.1. Helburuak	31
3.2. Irismena	32
4. Proiektuak dakartzan onurak	33
5. Artearen egoera	37
5.1. Bateria-sistemaren deskribapena	37
5.1.1. Bateria-motak	37
5.1.2. Li-ioi zelularen modelo baliokidea	38
5.1.3. Bateria-sistemaren zirkuitu elektrikoa	38
5.2. BMSaren deskribapen orokorra	40
5.2.1. BMSaren eginkizuna eta garrantzia	40
5.2.2. BMSaren atalak	42

5.2.3.	BMSaren funtzioak	43
5.3.	BMSaren funtzio aurreratuak	44
5.3.1.	EKF bidezko SoCaren estimazioa	44
5.3.2.	Zelulen orekatze-algoritmoa	46
6.	Diseinua	47
6.1.	Zirkuitu elektriko baliokidea	47
6.2.	BMSaren espezifikazioak	48
6.3.	Algoritmoaren eskema kontzeptuala	49
II.	JARRAITUTAKO METODOLOGIA	51
7.	Proiektuaren faseak	53
8.	Gantt-en diagrama	55
9.	Kalkuluak eta algoritmoak	59
9.1.	Garatutako BMS softwarearen deskribapena	59
9.1.1.	Egoera-makina nagusia	59
9.1.2.	Trantsizioak	62
9.1.3.	Sekuentziak	63
9.1.4.	Segurtasuna eta alarmen kudeaketa	71
9.1.5.	Funtzioak	77
9.1.6.	Neurketen egokitzapena	79
9.1.7.	Komunikaziorako sarrera- eta irteera- blokeak	79
10.	Simulazio-emaitzak	81
10.1.	Kondentsadoreen aurre-karga prozesua	81
10.2.	Karga-prozesua	81
10.3.	Kontaktoreak eta sekuentziak	88
10.3.1.	<i>Idle to charging</i> eta <i>Charging to idle</i> sekuentziak	88
10.3.2.	<i>Idle to discharging</i> eta <i>Discharging to idle</i> sekuentziak	88
10.4.	SoCaren estimazioa	92
10.5.	Alarmak	97
III.	ALDERDI EKONOMIKOAK	105
11.	Gauzatutako aurrekontua	107
11.1.	Giza-baliabideak	107
11.2.	Erabilitako materiala	108

<i>AURKIBIDEA</i>	11
11.3. Proiektuaren aurrekontu osoa	108
IV. ONDORIOAK	111
12. Garatutako lanaren ondorioak	113
13. Ekarpenak	115
Bibliografia	120

Taulen zerrenda

8.1. Proiektuaren mugarriak.	55
8.2. Entregagaiak.	57
9.1. Sekuentziak eta horien deskriptorea.	62
9.2. Komunikazio-kanaleko seinaleak eta horiekin lotutako trantsizioak.	64
9.3. Kontaktoreak ireki eta ixteko sekuentziak.	64
9.4. Kontaktoreak irekitzeko ordena, sekuentziaren arabera.	67
9.5. Kontaktoreak irekitzeko ordena, korrontearen norantzaren arabera.	70
9.6. Kontaktore bakoitzeko erreleak eta horien deskriptorea.	76
10.1. Zelulen hasierako SoC balioak.	83
11.1. Proiektua garatu duten partaideen aurrekontua.	107
11.2. Erabilitako materialen aurrekontua.	108
11.3. Proiekturako egindako aurrekontua.	109

Irudien zerrenda

1.1. Herrialde ezberdinek sortutako berotegi-efektuko gasen isurketak 2020. urtean [1]	24
1.2. Berotegi-efektuko gasen isurketak sektoreka. [2]	24
1.3. Garraioaren ondoriozko igorpenak Europar Batasunean [2].	25
1.4. Berotegi efektuko gasen igorpenen joera [3]	26
1.5. Bateria eta entxufagarriak diren ibilgailu elektrikoen kopurua urteetan zehar, Europar Batasunean [4]	26
5.1. Litio ioizko bateria baten zirkuitu elektriko baliokidea	39
5.2. Bateriaren zirkuitu orokorra, ibilgailuaren beste azpisistemekin dituen konexioekin.	40
6.1. Erabili den zirkuitu elektrikoa, 2P12S konfigurazioa duen bateria-pack-arekin.	48
6.2. Proiektuaren kronograma	50
8.1. Proiektuaren kronograma	56
9.1. BMSaren softwarea osatzen duten bloke funtzionalen eskema orokorra.	60
9.2. Egoera-makinaren fluxu-diagrama	61
9.3. Itxarote azpi-egoeratik karga-egoerara igarotzeko sekuentziaren fluxu diagrama.	66
9.4. Deskarga-egoeratik itxarote-egoerara igarotzeko fluxu diagrama.	68
9.5. Huts-egite egoeran kontaktore guztiak irekitzeko sekuentziaren fluxu diagrama.	69
9.6. Karga-prozesuaren mugak.	72
9.7. Tenperatura-alarmen atalaseen eskema.	73
9.8. Korrante-alarmen atalaseen eskema.	74
9.9. Zelulen tentsio-alarmen atalaseen eskema.	74
9.10. Kontaktu-alarma baten aktibazio blokeak	77
9.11. Coulomb kontua aplikatzeko erabilitako blokeak.	78

10.1. Kondentsadoreen aurre-karga.	82
10.2. Karga prozesua.	84
10.3. Karga prozesuan zehar <i>bleeder</i> erresistentziak aktibatze MOS-FETen seinaleak.	86
10.4. Karga prozesuan zehar <i>bleeder</i> erresistentziak aktibatze MOS-FETak (2).	87
10.5. Aurre-karga kontaktoreen seinalea <i>idle to charging</i> sekuentzian. .	89
10.6. Kontaktore positiboaren seinalea <i>idle to charging</i> sekuentzian. . .	89
10.7. $S_{chg,j}$ kontaktoreen seinalea <i>idle to charging</i> sekuentzian.	90
10.8. $S_{load,j}$ kontaktoreen seinalea <i>idle to charging</i> sekuentzian.	91
10.9. Aurre-karga kontaktoreen seinalea <i>idle to discharging</i> sekuentzian.	92
10.10. Kontaktore positiboaren seinalea <i>idle to discharging</i> sekuentzian. .	93
10.11. $S_{chg,j}$ kontaktoreen seinalea <i>idle to discharging</i> sekuentzian. . . .	94
10.12. $S_{load,j}$ kontaktoreen seinalea <i>idle to discharging</i> sekuentzian. . . .	95
10.13. EKF bidezko SoCaren estimazioa.	96
10.14. Coulomb kontuaren bidezko SoCaren estimazioa.	96
10.15. Coulomb kontuaren bidezko SoCaren estimazioa	97
10.16. Alarma gorri seinalea eta lehenengo zelularen tenperatura.	98
10.17. Alarma gorri seinalea eta zirkuituko korrontea.	99
10.18. Alarma gorri seinalea eta $V_{c,load}$	100
10.19. Alarma Global Gorriaren seinalea.	101
10.20. $S_{pch,j}$ kontaktoreen erreleen seinaleak.	102
10.21. $S_{chg,j}$ kontaktoreen erreleen seinaleak.	103
10.22. $S_{p,j}$ kontaktoreen erreleen seinaleak.	104

Nomenklatura

F	Prozesu-matrizea
G	Kontrol-matrizea
H	Behaketa-matrizea
i	Bateriatik igarotzen den korrontea
k	Denbora diskretuko indizea
K	Kalman irabazia
P	Errorearen kobariantza
Q	Prozesuaren zarataren kobariantza
R	Neurketen zarataren kobariantza
SoC	Karga-egoera
SoH	Osasun-egoera
V_t	Bateriaren borneen arteko tentsioa
x	Egoera-bektorea
R_j	Tanga-zirkuituaren erresistentzia
C_j	Tanga-zirkuituraren kondentsadorea
V_0	Zirkuitu irekiko tentsioa
R_0	Barne erresistentzia
C_{dc}	Motorraren korronte-iturrira lotutako kondentsadorea
C_{chg}	Kargagailuaren korronte-iturrira lotutako kondentsadorea

S_{pch}	Aurre-karga kontaktorea
S_p	Terminal positiboaren kontaktorea
S_{chg}	Kargagailura konektatzeko kontaktorea
S_{load}	Motorrera konektatzeko kontaktorea
$R_{b,j}$	Orekatze-zirkuituaren erresistentziak
$D_{b,j}$	Orekatze-zirkuituaren diodoak
$M_{b,j}$	Orekatze-zirkuituaren mosfetak
R_{pch}	Aurre-karga erresistentzia
Q_c	Zelularen karga
T_s	Laginketa periodoa

Akronimoen Zerrenda

APERT	Applied Electronics Research Team
BMS	Battery Management System
CAN	Controller Area Network
CB	Cell Balancing
DC	Direct Current
ECU	Engine Control Unit
EKF	Extended Kalman Filter
SoC	State of Charge
SoH	State of Health
ICE	Internal Combustion Engine
ASIL	Automotive Safety Integrity Level
MBD	Model Based Design
GJH	Garapen Jasangarrirako Helburuak
ZTBP	Zientzia eta Teknologia Plana
BTMS	Battery Thermal Management System
EMS	Energy Management System
OCV	Open Circuit Voltage
CAN	Controller Area Network
I2C	Inter-Integrated Circuit
SPI	Serial Peripheral Interface

I. atala

MEMORIA

1. kapitulua

Sarrera

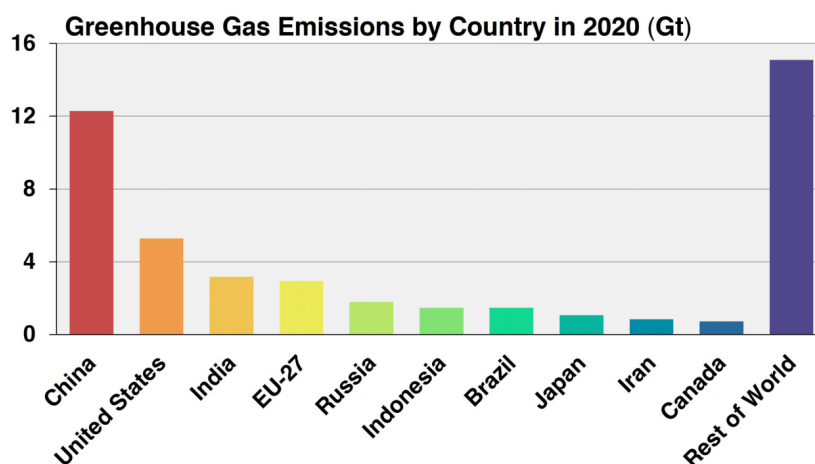
1.1. Aldaketa klimatikoa

Gaur egun, gizarteko eta bizitzako hainbat esparrutan presente dagoen gaia da klima aldaketa. Lehen mailako arazo internazioanala da, eta ez da arazo ekologikoa bakarrik: lehen mailako arazo sozial, ekonomiko eta politikoa da, komunitate zientifikoaren arabera.

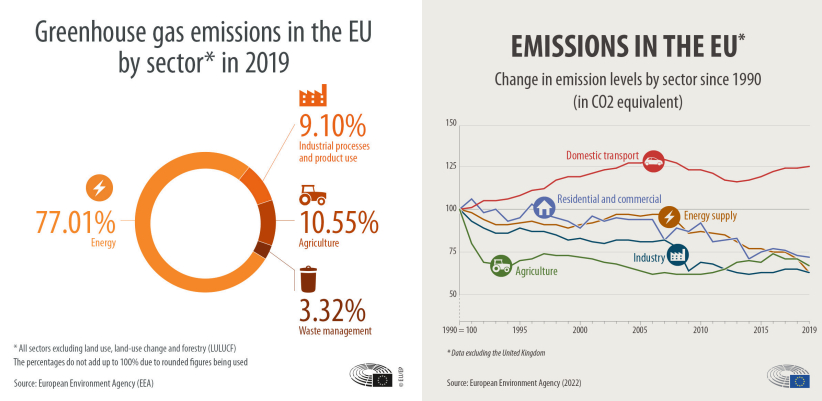
Europa da gehien berotzen ari den kontinentea. *Copernicus* programak bere *Klimaren Egoeraren* inguruko txostenean argi adierazten duen bezala, kontinentearen tenperatura 2,2 °C igo da industriaurreko garaitik [5]. Europar Batasuna izan zen 2020an munduko gas-emisio gehien izan zituen hirugarren zonaldea, 1.1. irudian ikus daitekeen bezala [1].

Gasen isurketa ez da sektoreen artean berdin gertatzen. Gehien kutsatzen duen sektorea, 1.2.(a) irudiaren arabera [6], energiaren sorkuntzari dagokiona da, gasen % 77,01 isuriz. Sektore horren barnean garraioarena egongo litzateke, Europar Ingurumen Agentziaren arabera Europako CO₂ igorpenen laurdena sektore horren erruz gertatu da [7]. Argi ikusten da 1.2.(b) irudian garraio sektorea energiatik banatzean, CO₂ igorpenetan ekarpen handiena duen sektorea dela [2].

Garraioa izan da azken hamarkadan igorpenak handitu dituen esparru bakarra, % 33,5eko igoerarekin [7]. Errepideko garraioa da bereziki kutsatzailea den garraio mota, 1.3. irudian ikusten den bezala [2]. Automobil-industriak igorpenen % 71,7a sortzen du garraio-sektorean [7]. Horregatik, garrantzitsua da bertan zentratzea igorpenenak murrizteko.



1.1. irudia. Herrialde ezberdinek sortutako berotegi-efektuko gasen isurketak 2020. urtean [1]

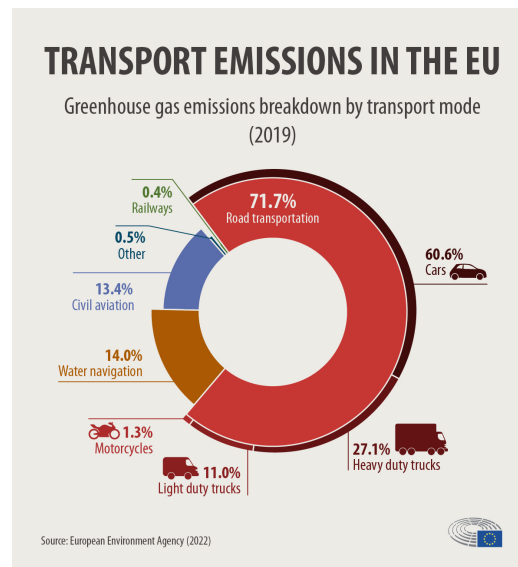


(a) Berotegi-efektuko gasen isurketa, (b) Sistema trakzio-sistemara konektatzeko erabiltzen den kondentsadorea.

1.2. irudia. Berotegi-efektuko gasen isurketak sektoreka. [2]

1.2. Igorpenak murrizteko helburuak

Aurreko datuak kontuan hartuta, helburu argi bat ezarri du Europar Batasunak: 2030. urterako berotegi-efektuko igorpenak % 55 murriztea, 1990. urtekoekin konparatuta [3]. Gainera, *Estrategia de descarbonización a largo plazo 2025* estrategia garatu du, 2050. urterako isurpen nuluak lortzeko [8]. Ezarritako hel-

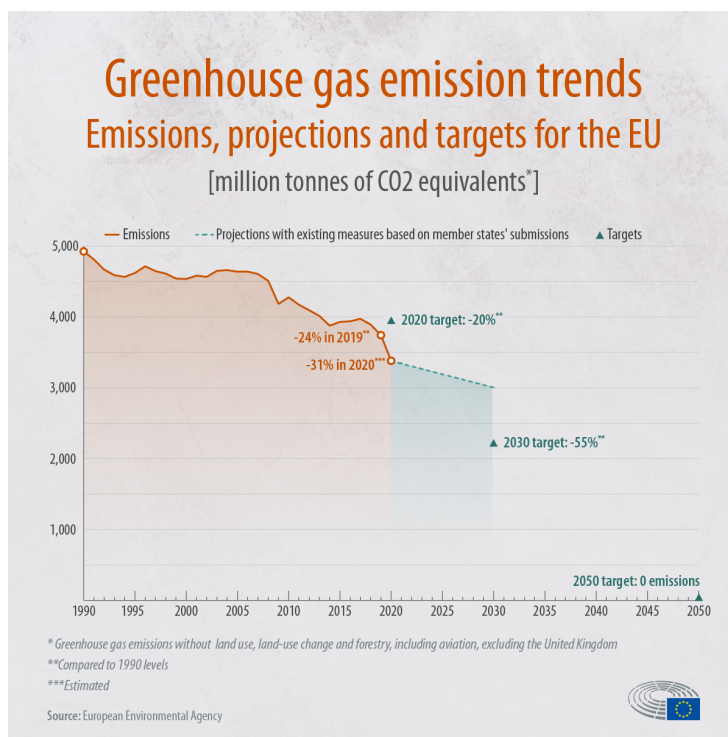


1.3. irudia. Garraioaren ondoriozko igorpenak Europar Batasunean [2].

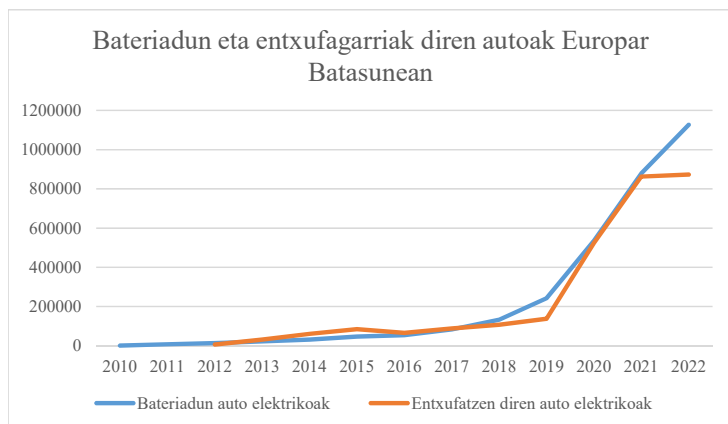
mugak eta denborarekin igorpenak nola murriztu behar diren erakusten da 1.4. irudian [3].

Asmo handiko helburua bada ere, aldaketa handiak gertatu dira automobil-industrian jada. ICE (*Internal Combustion Engine*, ingelesez) ibilgailuek garraioaren % 91,5 hartzen zuten 2019an. Zifra hori 2021. urterako nabarmen aldatu zen, garraioaren % 17,8 ibilgailu elektrikoek eratzuten baitzuten [7]. Urteekin igotzen joango da ibilgailu elektrikoen erabilera, 1.5. irudian [4] aurreikusten den bezala. Bertan, 2010. urtetik 2022. urtera saldu diren ibilgailu elektriko-mota nagusiak erakusten dira, eta argi ikusten da azken urteetan nabarmen igo direla mota horretako ibilgailuen salmentak. Gainera, erabilera gehiago sustatzeko, neurri bereziak ezarri dituzte gobernu eta udaletxeek [9].

Europar Batasunaren helburua da 2035 urtetik aurrera saltzen diren autoek CO₂ igorpenik ez izatea [10]. Horien orde, joera ibilgailu elektrikoen salerosketa izango da, hidrogenozko edota e-erregaiez (hidrogenotik lortzen den emisio nuluko erregaia [11]) propulsatutako ibilgailuak baino merkeagoak baitira [10]. Hori guztia aurrera eraman ahal izateko, 600 km eta goragoko irismena duten autoak garatzen hasiak dira fabrikatzaileak [10].



1.4. irudia. Berotegi efektuko gasen igorpenen joera [3]



1.5. irudia. Bateria eta entxufagarriak diren ibilgailu elektrikoen kopurua urteetan zehar, Europar Batasunean [4]

1.3. Ibilgailu elektrikoa eta bateriak

Mugikortasun elektrikoaren sustapenarekin batera, horrekin lotutako teknologien ikerkuntza bizkortu da. Fabrikatzaileek, enpresek eta gobernuek teknologia horien garapenean inbertitu dute. European, adibidez, mugikortasun elektrikorako arrisku-kapitalaren finantzaketa mugikortasunerako inbertsio osoaren % 61a izan zen 2022-an [12].

Aurretik existitzen ziren energia-biltegiatze sistemen aurrean, ibilgailu elektrikoen eskaerak berrikuntzaren beharra sortu du. Mugikortasun elektrikoaren fidagarritasuna, autonomia eta egonkortasuna bateria-teknologien menpe dago. Gainera, bateriak ez dira mugikortasunean besterik erabiltzen, energia berriztagarriak sortzeko sistemetan eta beste hainbat aplikaziotan ere erabiltzen dira [13]. Beraz, ezinbesteko teknologia bihurtu dira azken urteotan.

Mugikortasun elektrikoan erabiltzen den bateria-mota ohikoena Litio-Ioizkoa (Li-ioi) da. Aurretik, Berun-azidozko bateriak erabiltzen ziren ICE motako ibilgailuetan, baina horiek ez dira gaur egungo ibilgailu elektrikoetarako egokiak. Li-ioi bateriek hainbat ezaugarri dituzte aplikazio horretarako egokiak egiten dituztenak: energia-dentsitate eta efizientzia-coulombiko altua, bizi-ziklo luzea, auto-deskarga ratio baxua eta memoria-efektu eza [14].

Ibilgailu elektrikoetako bateriak zelula ugariz osatuta daude. Hori da, zelulak paraleloan eta seriean konektatuz lortzen dira ibilgailuan beharrezkoak diren tentsio- eta korrante-maila altuak. Bateria-packak modu seguruan erabili ahal izateko, ezinbestekoa da haien monitorizazioa, kontrola eta optimizazioa, bai zelula-mailan, bai bateria-mailan ere [15]. Zelula-mota horien funtzionamendu egokia bermatzeko lan-baldintza oso zehatzeak izan behar ditu bateriak. Hori ziurtatu ahal izateko, *Battery Management System* (BMS) izeneko kudeaketa sistemak garatu dira.

Bateria-packaren monitorizazioa gauzatuko du BMSak, hurrengoak kontrolatuz: karga-egoera (SoC, *State of Charge*, ingelesez) [16] eta osasun-egoera (SoH, *State of Health*, ingelesez) [16, 13] monitorizatzea, beste sistema batzuekiko konexio eta deskonexioa, karga-prozesua, zelulen-orekatzea, eta sistemako hainbat parametro monitorizatzea (tentsioak, korrantea eta tenperaturak).

Kontuan hartzekoa da, baita ere, segurtasun- eta fidagarritasun-maila altuak bete behar dituztela fabrikatzaileek. Ibilgailu elektrikoetako sistema kritikoek C edo D ASIL (*Automotive Safety Integrity Level*, ingelesez) mailak bete behar dituzte, ISO 26262 arauaren testuinguruan [17]. Bateria-aren Kudeaketa Sis-

tema garatzeko orduan arau horiek izango dira kontuan, eta sistemak beharrezko funtzioak izango ditu ibilgailuak segurtasun-maila zuzena duela ziurtatzeko.

Testuinguru honetan, lan honek BMS baten kontrol sistema garatzen du, modeloetan oinarritutako diseinurako (MBD, *Model Based Design*, ingelesez) tresnak erabiliz. Kontrol-sistemaren balioztatzea MBD bidez eginez, posible da garapendebora nabarmen laburtzea [18, 19, 20]. Definizioz, sistemaren modelo bat erabiltzen du MBD hurbilketak garapen-prozesuan zehar, espezifikazioen exekutagarri gisa erabiltzeko. Lan egiteko modu honek diseinua eta simulazioa ahalbidetzen ditu, bai sistema-mailan bai osagai-mailan ere, testatze eta egiaztatze jarraitua bermatuz prozesu osoan zehar [21].

2. kapitulua

Testuingurua

Tecnalia Research and Innovation (Tecnalia R&I aurrerantzean) Fundazioarekin elkarlanean garatu da Gradu Amaierako Lan hau. Tecnalia R&I *Basque Research and Technology Alliance* taldearen kide da eta estatu mailako ikerkuntza aplikatuko eta garapen teknologikoko enpresarik handiena da. Zehazki, **Mugikortasun jasangarria** sailean dagoen "*Clean Powertrain and Electrification*" (Propultsio Garbia eta Elektrifikazioa) atalaren barnean garatu da lan hau. Hurrengo helburuak ditu sail horrek:

1. Garraio- eta mugikortasun-sistemen eraginkortasuna hobetzea.
2. Energia alternatiboen erabileraren bidez ingurumena hobetzea.
3. Mugikortasun jasangarriaren modeloetara eboluzionatzea.

Gainera, "*Clean Powertrain and Electrification*" sailak beste helburu bat du: propultsio-sistema berrientzako teknologia berrien garapena.

Tecnalia Ikasgelan garatu da proiektu hau. Tecnalia R&Iren eta Bilboko Ingeniaritza Eskolaren arteko lankidetzaren emaitza da ikasgela. Aurretik *Robotiker Ikasgela* deitzen zen, eta 2001. urtetik dago abian. Tecnalia Ikasgelak ingeniartzaren, zientziaren eta teknologien ikerketa eremuan jarduerak sustatzen ditu. Gainera, arlo horietan Gradu Amaierako Lanak, Master Amaierako Lanak, konferentziak etab. egitea sustatzen da.

Lan honen tutorea Bilboko Ingeniaritza Eskolako **Elektronika Aplikatuko Ikerketa Taldeko** (APERT) irakasle bat da. Hurrengo jarduerak garatzen dira ikerketa-talde horretan:

- Administrazio publikoek finantzaturako Ikerkuntza eta Garapen (I+G) proiektuetan lankidetzak.
- Enpresetarako I+G proiektuak gauzatzea.

- Enpresei zuzendutako trebakuntza-ikastaroak ematea taldearen ikerkuntza lerroen inguruan.
- Aholkularitza teknikoa, azterketa teknikoak edo txostenak garatzea taldearen ikerkuntzarekin erlazionatutako gai ezberdinetan.
- Hainbat publikazio argitaratzea: doktorego-tesiak, nazioarteko aldizkari-etarako artikuluak, kongresuetarako artikuluak, patenteak etab.

Jarduera horiek bete ahal izateko, bi ikerketa-arlotan banatzen da taldea:

- *Zirkuitu birkonfiguragarriak eta System-On-Chip-ak*. Komunikazioetarako zirkuitu digitalak eta Industria 4.0rako zirkuitu digitalak garatzen dira, bereziki, arlo honetan.
- *Energia bihurgailuentzako kontrol- eta potentzia-zirkuituak*. Ibilgailu elektrikoen propulsiarako eta karga-azpiegiturarako elektronika eta potentzia-bihurgailuak garatzen dira, besteak beste, ikerkuntza-ildo horretan.

Ikerketa-taldearen jarduerak eta arloak jakinda, ulertu daiteke nola irakasleak proiektu honen garapenean lagun dezakeen, energia bihurgailuentzako eta kontrol- eta potentzia-zirkuituak ikerkuntza-ildoak zuzenean baitago erlazionatuta gradu amaierako lan honen gaiarekin.

3. kapitulua

Proiektuaren helburuak eta irismena

3.1. Helburuak

Bateria Kudeaketa Sistema (BMS) baten softwarea garatzea da Gradu Amaierako Lan honen helburu nagusia. Helburu hori betetzeko, Tecnalian eskuragarri den bateria-zelulak konbinatzen dituen bateria-packaren zirkuitu baliokidea inplemtatu eta erabili da plantaren modelo gisa. Espezifikazio-modelo horrekin, Modeloetan Oinarritutako Diseinuaren (MBD) laguntzaz garatu ahal izan da BMSaren kontrol-sistema. Definitutako helburua gauzatu ahal izateko, hurrengo atazak eta bigarren mailako helburuak ezarri dira:

1. BMSen inguruko artearen egoera aztertzea, eta baita ere merkatuan diren soluzio industrialen funtzionamendua ezagutzea. BMSak beharrezkoak dituen funtzionalitateak identifikatzea eta horien funtzionamendua ulertzea.
2. Garapenerako erremintetan trebatzea. Zehazki, *Matlab/Simulink* erreminta erabiltzen da, industriako estandarra delako MBD prozeduretarako, batez ere automobilgintza-sektorean. Helburu hori betetzea ezinbestekoa da proiektua bermez garatu ahal izateko.
3. *Matlab/Simulink*-eko blokeak erabiliz sistemaren azpi-sistema nagusiak garatzea. Modeloetan oinarritzen da kontrol-sistema; balioztapen-prozesua amaitu ondoren, kodea automatikoki sortu ahal izango da garatutako modeloetatik. Horretarako, espezifikak diren erremintak erabil daitezke *Matlab/Simulink*-en.
4. Azken helburua da bateria-sistema kudeatzen duen BMSaren funtzionalitateak balioztatzea. Alde horretatik, arreta berezia jarriko da kritikoak di-

ren prozesuetan: karga-prozesua, alarmak, kontaktoreen kudeaketa, etab. Matlab/Simulink-en egingo da Balioztapen-prozesua MBD prozedurak jarraituz.

3.2. Irismena

BMS bat industrializatu ahal izateko hainbat pauso jarraitu behar dira, hasierako definizio eta simulazioetatik abiatuz esperimentaziora helduz, algoritmoen inplementazio digitaletik eta kontrol-txartelaren garapenetik pasata. Gradu Amaierako Lan hau garapen-prozesuaren lehenengo ataletan zentratzen da. Hain zuzen ere, algoritmoen definizioan, modelo bidezko inplementazioan eta simulazio bidezko balioztapenean.

BMSak garatzeko proiektuetan ari da sartuta Tecnalia R&I fundazioa, eta interes oso handia du teknologia horietan etorkizunari begira. Gradu Amaierako Lan honek ekarpenak egingo ditu lehenengo pausoetan, Tecnaliak etorkizuneko dituen helburuak betetzeko. Lehen garapen-etapa horiek zuzen gauzatzea garrantzi handikoa da. Algoritmoak ongi definituta eta balioztatuta egon behar dira plataforma esperimentalean integratu aurretik.

Beraz, aipatu beharra dago Gradu Amaierako Lan honetan garatutako guztiak jarraipena izango duela etorkizunean, eta beste Gradu Amaierako Lan edota Master Amaierako Lan berriak ekarriko dituela.

Amaitzeko eta irismenari dagokionez, esan beharra dago aurretik aipatutako helburu industrialez gain helburu akademikoak ere dituela Gradu Amaierako Lan honek. Gauzatutako garapenak eta erabilitako prozedurak artikuluan formatuan dokumentatu eta foro akademikoetara aurkeztuko dira. Horrela, bi esparrutan trebatuko da ikaslea, alde teknologiko-industrialean, eta baita ere ikerkuntzaren komunikazioan.

4. kapitulua

Proiektuak dakartzan onurak

Gradu Amaierako Lan honek onura asko ekar litzake hainbat esparrutan. Bateriek etorkizuneko teknologien oinarria dira, bai ibilgailu elektrikoekin lotura zuzena dutelako, bai energia-biltegiatze sistema hurbil eta ohikoenak direlako, jasangarritasunarekin lotura zuzena dutenak. Gainera, Tecnalia R&In baterien inguruko ikerkuntza gehiago zabaltzera lagunduko du.

1. Jasangarritasunarekin erlazionatutako onurak

Jasangarritasunaren inguruan hitz egitean, *Garapen Jasangarriko Helburuak* (GJH) aipatu behar dira. GJHak mundu osoarentzako etorkizun jasangarria lortzeko maisu-plana dira [22]. Jendeak egunerokotasunean aurre egiten dituen erronkak jasotzen dituzte: justizia, pobrezia, bakea, etab. Garatutako lanaren kasuan, jarraian azalduko diren hiru GJHak beteko dira:

(a) *GJH 7: Energia Eskuragarria eta Ez-Kutsagarria*

Helburu honekin lortu nahi dena zera da: Energia garbi eta eskuragarria irismena, gakoa dena enpresen, hezkuntzaren, nekazaritzaren, osasunaren, komunikazioen eta garraioaren garapenerako [23]. Egia da helburu honek, bereziki, energiaren eskuragarritasuna duela kontuan, baina energia eskuragarria izan ahal izateko, biltegiatze-sistemak garatu behar dira, proiektuaren gaiarekin lotura zuzena dutenak. Horrekin batera, sistema horien babes ezinbestekoa izango da, erabiltzaileentzako segurtasuna bermatu ahal izateko, eta monitorizazioa ere ezinbestekoa izango da erabilera errazteko eta sistema kontrolatzeko. GrALak lotura zuzena du garraioaren energiaren bilketa eta kontrolarekin.

(b) *GJH 11: Hiri eta Komunitate Iraunkorrak*

Hamaikagarren GJHak hurrengo hartzen du kontuan: hiri eta giza kokaguneak seguruak, erresilienteak eta jasangarriak izatea nahi da [24].

Gaur egungo munduko biztanleriaren % 50 baino gehiago bizi da hiri-etan, eta zifra hori 2050.urterako % 70era igoko dela espero da. Biztanleriaren igoera honek airearen kutsaduraren igoera ere ekarriko du, bereziki ibilgailuen erabileragatik. Horregatik ezinbestekoa da ibilgailu elektrifikatuaren garapena, bai auto bai ibilgailu publikoetan, kutsadurarik gabeko eta jasangarriagoa izango den mugikortasuna bermatzeko.

(c) *GJH 13: Klimaren Aldeko Ekintza*

Gradu Amaierako Lan honek betetzen duen azken GJHa Klimaren Aldeko Ekintza da. Hurrengoa adierazten da helburu horretan: Erabakigarria da premiazko neurriak hartzea, planen eta hitz emateez gain doazenak, klima aldaketak mundu osoan izango baitu eragina hori ez gertatzekotan [25]. Argi dago klima aldaketaren arrazoi nagusietako bat errekontzaren bidez mugitzen diren ibilgailuak direla, eta horregatik ibilgailu elektrikoen garapenak klima aldaketaren kontrako borrokan lagunduko du, mugikortasun jasangarria indartuz. Proiektu honetan ibilgailu elektrikoetan erabiliko diren baterien kontrola gartzten da. Beraz, lotura zuzena izango du hamahirugarren GJHarekin.

Jasangarritasunaren inguruan hitz egitean, Garapen Jasangarriko Helburuez gain, EAEEn, Espainian edota European garatu diren planak begiratzea garrantzitsua da. Proiektu honek plan horietako atalak ere betetzea lortzen du, jarraian azalduko den bezala.

EAEren testuinguruan, *Zientzia, Teknologia eta Berrikuntzako Plana Euskadi 2030* (ZTBP 2030) garatu da. Plan horretan, Euskal Autonomi Erkidegoaren mailan, teknologia, zientzia eta berrikuntzarako erronka ezberdinak ezarri dira, eta proiektu honek zuzeneko lotura du horietako atal batekin. ZTBPan Zeharkako Trakzio Ekimenen barnean, mugikortasun elektrikoa jorratzen da, eta hainbat erronka ezarri dira gai horren inguruko atal ezberdinak kontuan izanda. Horien artean, eta GrALarekin zuzeneko harremana dutenak, bateriekin lotutako erronkak daude. Planaren arabera metal arraroen erreserbekiko mendeotasun txikiagoa duten teknologia berriak, litioaz haraindiko teknologia berriak (*beyond Li*) eta bateria elektrokimikoen bizi-itxaropena handitzea eta bigarren bizi-tza garatu nahi dira [26]. Bertatik ondorioztatu dezakegu proiektu honek baterien bizi-itxaropenarekin erlazioa duenez, planaren barne egongo litzakeela. Ez hori bakarrik, proiektuak karga-prozesua ere kontuan hartzen duenez, horrekin lotutako erronkei ere aurre egiten zaie.

Espainia mailan *Zientzia, Teknologia eta Berrikuntza 2021-2027 Estrategiarekin* lotuta dago Gradu Amaierako lan hau. Estrategia horrek *Horizon Europe* programa jarraitzen du, eta horregatik Klima, Energia eta Mugikortasun atala izango du, GrALarekin zuzenean lerrokatuta.

Azkenik, Europan aurretik aipatutako *Horizon Europe* programa garatu da, Europar Batasuneko ikerkuntza-politikak zehazten dituen. Gradu Amaierako Lan hau programako bigarren zutabeko bostgarren klusterrarekin zuzenean dago lotuta, aurretik aipatutako *Klima, Energia eta Mugikortasuna* klusterrarekin. Horren arabera, energia berriztagarrien eta energia sistemen, baterien, karbonoaren kapturaren, eraikin jasangarrien eta abarren inguruko ikerkuntza, berrikuntza eta soluzio berriak garatzen dituzten proiektuak laguntzen ditu programak [27]. Hemendik, argi ikus daiteke proiektuak bateriekin lotura zuzena duenez, programa horren barnean garatu daitekeela.

2. Bestelako onurak

Aurretik aipatutakoaz gain, egilearen bizitza akademikoan onurak izan ditu proiektu honek. Alde batetik, Tecnalía R&I barnean praktikak izan dituenek, gai berrien inguruan asko ikastea lortu du, eta horrekin batera baliabide ezberdinak erabiltzea ere ahalbidetu zaio. Bestalde, tutoreari esker, programa berriak menperatzea lortu du ikasleak, aurretik karreran erabili ez dituenak, *Simulink* eta *LaTeX* horien artean.

Azkenik, aipatzekoa da proiektu honek dakarren ikerkuntza-aukera onuragarria dela baita ere Tecnalía R&Irentzat. Garatzen hasitako BMSak etorkizunera begira bateriekin lotutako teknologia gehiagoren ikerkuntza ekar dezake, adibidez BTMS (*Battery Thermal Management System*) edota EMS (*Energy Management System*) sistemetan, besteak beste.

5. kapitulua

Artearen egoera

5.1. Bateria-sistemaren deskribapena

Mugikortasun jasangarriaren oinarria da bateria elektrikoaren erabilera. Baterien inguruko teknologia ezberdin asko daude, bakoitzak bere onurak eta desabantailak dituena. Hori dela eta, ezinbestekoa da bateria-teknologiak aztertzea, eta proiektuaren beharretarako egokiena zein izan litekeen zehaztea. Atal honetan hainbat bateria teknologia aurkeztuko dira, eta horien artean Gradu Amaierako Lan honetan erabili dena zehaztasunez azalduko da.

5.1.1. Bateria-motak

Bateriak erabilera finituko objektuak dira, eta horiek fabrikatzeko erabiltzen diren materialak parametro ezberdinengatik erabakitzen dira [28], hurrengoak izanik: dentsitate energetikoa, potentzia, eraginkortasuna, kostua eta bizi-zikloa.

Parametro horiek guztiak kontuan hartuta, hiru bateria-mota dira erabilienak, gaur egun:

- **Berun-azidozko bateriak.** Bateria erabilienak dira, eta baita zaharrenak ere. Kostu baxua dute, eta horrek abiorako, argiztapenerako eta euskarri elektrikorako ezin hobeak egiten ditu. Hala ere, haien pisu altuagatik, ez dira ibilgailu elektrikoentzako egokiak [28].
- **Nikel-Metalhidruo bateriak.** Nikel-cadmio baterien ondorengoak dira. Ni-Ca baterien materialak lortzeko prozesuak kostu altua du. Horregatik hegazkin, helikoptero eta antzeko ibilgailuentzako erabiliagoak dira. Gainera, memoria efektua dute eta, beraz, karga bakoitzean haien kapazitatea murriztu egiten da. Ni-MH bateriak, bestalde, ingurumenerako hobeak dira,

kapazitate handiagoa dute eta memoria efektua gutxitzen dute. Dena dela, etengabeko mantenua behar dute, eta korrante eta tenperatura altuengatik hondatzen dira. Ez hori bakarrik, bateriak berak tenperatura altuak sortzen ditu, eta astiro kargatzen dira [28].

- **Litio-ioi bateriak.** Energia espezifikoa altua, efizientzia altua, memoria efektua indargabetzea, mantenuaren behar eza eta birziklatzeko erraztasuna dira Li-ioizko baterien ezaugarri nagusiak. Gainera, Ni-Ca baterien kapazitatearen bikoitza dute, tamainaren herenarekin. Edonola ere, fabrikazio-kostu altuko bateriak dira, hauskorak eta tenperatura altuetan eztanda egin dezakete. Ez hori bakarrik, Li-ioi baterien biltegitratzea ez da batere erraza, karga minimoa izan behar dutelako, eta gordeta dauden lekuko tenperatura kontrolpean izan behar da. Oraindik ere bateria teknologia hau garapenean dago [28]. Hala ere, Li-ioi bateriek eskaintzen dituzten abantailak oso onuragarriak izanik, oso teknologia egokia dira dentsitate energetiko eta kapazitate handiak behar dituzten aplikazioetan erabiltzeko.

Aurreko guztia kontuan izanda, gaur egun ibilgailu elektrikoetan gehien erabiltzen diren bateriak dira Litio-ioizkoak.

5.1.2. Li-ioi zelularen modelo baliokidea

Li-ioi zelulak erabiltzen dira ibilgailu elektrikoetan, 5.1.1. atalean azaldu diren arrazoiengatik. Teknologia horien modeloak garatu behar dira biltegitratze-sistemak simulatu eta birtualki aztertu ahal izateko. Alde horretatik, zelulen zirkuitu baliokidea erabiltzen da gehien bat baterien modelizaziorako.

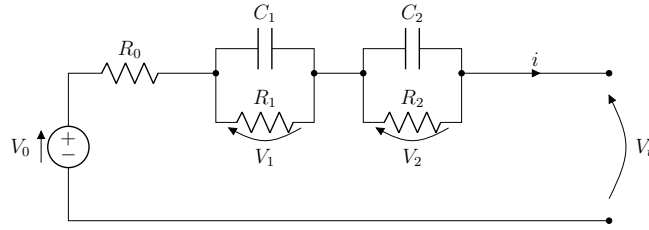
Li-ioi baterien modelizaziorako bigarren mailako Randle zirkuitu baliokidea erabiltzen da (5.1. irudia) [29], batez ere, non $V_0(SoC, T)$ zirkuitu irekiko tentsioa (OCV, *Open Circuit Voltage*, ingelesez) den, $R_0(SoC, T)$ barne erresistentzia, eta $R_j(SoC, T)$ eta $C_j(SoC, T)$ tanga-zirkuituen erresistentziak eta kapazitateak, non $j = \{1, 2\}$. Tentsioen dinamika tanga-zirkuituetan, k une diskretu baterako, hurrengo erara defini daiteke:

$$V_j(k+1) = e^{-\frac{T_s}{\tau_j}} \cdot V_j(k) + R_j \cdot (1 - e^{-\frac{T_s}{\tau_j}}) \cdot i(k), \quad (5.1)$$

non $\tau_j = R_j C_j$.

5.1.3. Bateria-sistemaren zirkuitu elektrikoa

Ibilgailu elektrikoan bateria-sistema zelulaz eratuta dago. Zelula horiek seriean eta paraleloan jarritik osatzen da bateria, seriean nahi den tentsioa lortzeko, eta pa-



5.1. irudia. Litio ioizko bateria baten zirkuitu elektriko baliokidea

raleloan beharrezkoak dira korrante-mailak lortzeko. Bateria baten zelula-kantitatea $mPnS$ erara adierazten da, m paraleloan dauden zelula-kopurua eta n seriean daudenak izanda.

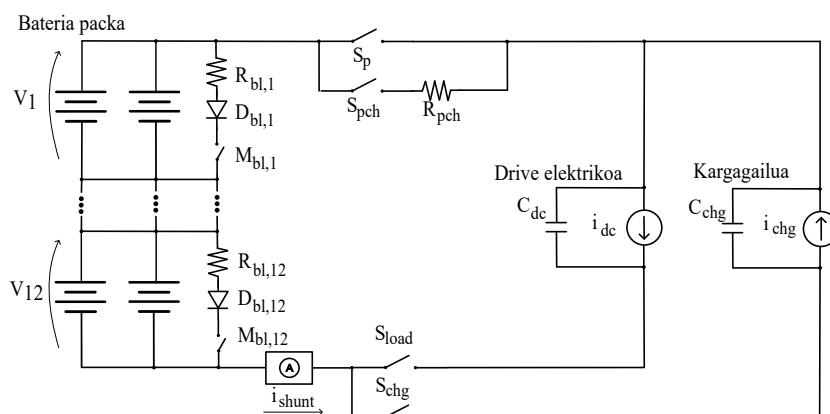
Biltegitratze-sistemari dagokion zirkuitu baliokidean trakzio-sistema eta kargagailua korrante-iturri bezala adieraz daitezke, era sinplifikatu batetan, bata bestearen kontrako noranzkoan ezarrita. Korrante-iturriari kondentsadoreak (C_{dc} eta C_{chg}) gehitu zaizkie (5.2. irudia), kargadorearen eta trakzio-sistemaren portaera erreala goa errepresentatu ahal izateko. Kondentsadore horiek aurre-kargatu egin beharko dira bateria-sistema elementu horiekin konektatzerakoan.

Bestalde, kontaktoreak erabiltzen dira zirkuitua ibilgailuaren trakzio-sistemara edo kanpoko kargagailu batera konektatzeko. Zirkuituak guztira lau kontaktore ditu, bi terminal positiboan eta bi negatiboan (5.2. irudia):

- S_{pch} aurre-kargarako kontaktorea da. Terminal positiboko kontaktorea da, eta kondentsadoreen aurre-karga ahalbidetzen du, R_{pch} erresistentziaren bidez.
- S_p terminal positiboaren kontaktore nagusia da. Kontaktore honek trakzio-sistemaren eta kargagailuaren terminal positiboa konektatzen ditu kondentsadoreen aurre-karga prozesua bukatu denean.
- S_{chg} terminal negatiboaren kontaktorea da, kargagailua sistemara konektatu eta sistematik deskonektatzeko. Elementu hori ez da trakzio-sistemara inola konektatzen.
- S_{load} terminal negatiboko konektaktorea da, trakzio-sistema konektatu eta deskonektatzeko. Aurrekoaren kontrara, kontaktore hori ez da kargagailura inola konektatzen. Era horretara, posible da bateriak kargagailura edota trakzio-sistemara independenteki konektatzea.

Aurretik azaldutako guztiaz gain, zelulen orekatze-zirkuitu pasiboa ere badu sistemak [30, 31], $R_{bl,j}$ erresistentziez, $D_{bl,j}$ diodoez eta $M_{bl,j}$ MOSFETez osatua

(5.2. irudia). Erresistentziek zelulen deskarga eragiten dute, diodoek korrontearen noranzkoa bermatzen dute eta MOSFETek prozesua aktibatu eta desaktibatzen dute. Zirkuitu horiek izatea ezinbestekoa da zelulen karga-egoera orekatzeko karga-prozesuaren azken fasean.



5.2. irudia. Bateriaren zirkuitu orokorra, ibilgailuaren beste azpisistemekin dituen konexioekin.

5.2. BMSaren deskribapen orokorra

Oro har, bateria elektrikoak erabiltzen dituzten teknologiek segurtasun maila altua izan behar dute. Horretarako, Bateriaren Kudeaketa Sistemak (*Battery Management System*, BMS, ingelesez) erabiltzen dira. Atal honetan, BMSarekin lotutako alde ezberdinak azalduko dira, osagaietatik sistemak betetzen dituen funtzioetara.

5.2.1. BMSaren eginkizuna eta garrantzia

Bateria-teknologia guztiek ez dute BMS baten beharra, baina bai Li-ioi motako bateriek, degradazioa jasateko emanak direlako [34]. BMSaren erabilerak baterien segurtasuna bermatzen dute, sistemak fidagarriagoak eginez. Atal honetan BMSaren garrantzia arrazoituko da.

1. BMSaren testuinguru historikoa

Berriz kargatu daitezkeen baterien garapenarekin batera heldu zen bateriaren kudeaketarako sistemen beharra. Berun-azidozko baterietan tentsio-

erreguladoreak erabiltzen ziren XIX. eta XX. mendeetan [35]. 1960. hamarkadarako, Nikel-kadmiozko bateriak erabiltzen hasi ziren. Horiek kudeaketa-sistema sofistikatuagoa behar zituzten, karga- eta deskarga-egoeretan sentikorragoak zirelako [35].

Ondoren, 1990. hamarkadan hasi zen li-ioizko baterien komertzializazioa, eta bertan hasi zen baita ere BMSaren beharra. Li-ioizko baterien sentikortasun-maila aurrekoena baino askoz altuagoa baitzen. BMSen konplexutasuna eta garrantzia ibilgailu elektrikoen garapenarekin nabarmendu zen XXI. mendean. Aurretik erabiltzen ziren kontrol-sistemekin konparatuta, gaur egungo BMSek lan askoz konplexuagoak bete ahal dituzte [35].

2. Bateriadun sistemetan BMSaren beharra

Bateriadun sistemen portaera egokia, fidagarritasuna eta iraunkortasuna bermatzeko ezinbestekoa da BMSa [35]. Hurrengo faktoreek justifikatze dute BMSaren beharra:

(a) *Segurtasuna*

Li-ioizko bateriak tenperaturaren menpe daude, eta tenperatura altuen kasuan egoera arriskutsuak gerta daitezke. BMSak operazio-egoerak monitorizatzen ditu eta egoera arriskutsuak ekiditen ditu bateria deskonektatuz edo karga- edo deskarga-ratioak aldatuz.

(b) *Fidagarritasuna eta iraunkortasuna*

BMSak bateriaren fidagarritasuna eta iraunkortasuna nabarmen hobetzen ditu. Bateriaren operazioak kontrolatzen ditu egoera idealean gerta daitezen, SoCa, SoHa eta beste faktore garrantzitsuak kontrolatuz [35]. Gainera, BMSak erabiliz bateriaren iraunkortasuna maximiza daiteke. Bateriak potentzia maximoarekin lan egiten duela bermatzen du BMSak, aldi berean bere luzarorako segurtasuna eta jokaera mantenduz.

(c) *Kostua*

BMSaren instalazioak hasierako kostuaren igoera ekarriko du, baina etorkizuneko gastuak murriztuko ditu. BMSak gastuak murriztuko ditu bateriaren bizi-zikloa luzatuz eta izan ditzakeen arazoak saihestuz.

(d) *Aplikazio ezberdinetarako moldagarritasuna*

Aplikazioaren arabera bateriaren beharrak ezberdinak izan daitezke. Horregatik, funtsezkoa da BMSaren erabilera, bateriaren parametroak moldagarriak egin ahal dituelako.

5.2.2. BMSaren atalak

Bateriaren kudeaketarako sistema batek bai hardware bai software osagaiak ditu. Alde batetik, sentsoreak izango ditu zirkuitutik beharrezko neurketak egin ahal izateko, eta baita kontroladoreak eta babes-zirkuituak ere. Bestetik, algoritmoak eta komunikazio interfazeak izango ditu bete beharreko funtzioak aurrera eramateko. Jarraian BMSaren atalak azalduko dira:

1. Sentsoreak

Ezinbestekoa da sentsoreak izatea bateriaren hainbat propietate monitorizatu ahal izateko [32]. Jarraian, erabiltzen diren sentsore nagusiak zerrendatu eta azalduko dira:

(a) *Tentsio-sentsoreak*

Tentsio-sentsoreak funtsezko osagaiak dira zelulen tentsio-mailaren monitorizaziorako. Tentsioen neurketak zelulen orekatzea ahalbidetzen du, karga segurua bermatuz, eta SoC balioen zenbaketa ahalbidetzen dute.

(b) *Korronte-sentsoreak*

BMSra konektatutako korronte-sentsoreek biltegitratze-sistemara sartu eta sistematik irteten den korrontea neurtzen dute [32]. Sisteman zehar korrontea neurtzea ezinbestekoa da SoCaren zenbaketarako eta gainkorronteak eta zirkuitu laburrak identifikatzeko [32].

(c) *Temperatura-sentsoreak*

Temperatura-sentsoreek baterian temperatura-egoera nagusiak monitorizatzeko dituzte. Li-ioizko baterien eraginkortasuna eta degradazioa tenperaturaren menpe daude, eta, beraz, monitorizazioa ezinbestekoa da. Ez hori bakarrik, gehiegizko beroak baterian *thermal runaway* deritzen egoerak sor ditzake, bateriaren integritatea arriskuan jarritz.

2. Bateriaren kontroladorea

BMSaren elementu nagusienetakoa izango da bateriaren kontroladorea. Bateriaren inguruko hainbat erabaki hartzen ditu. Hurrengo osagaiak ditu kontroladoreak:

(a) *Bateriaren Monitoreo eta Babeslea*

Bateriaren monitoreak etengabe monitorizatuko ditu bateriaren korrontea, tentsioa eta temperatura. Bestalde, babesleak monitorearekin batera egingo du lan, eta anomaliaren bat detektatzean erantzungo du.

(b) *Kontrol-algoritmoak*

Arau-bilduma edo modelo matematiko horiek ezinbestekoak dira bateria-sistemaren funtzionamendua denbora errealean kontrolatzeko.

(c) *Mikrokontroladorea*

Monitorizazioa, babesak eta kontrola exekutatzen diren mikrokontroladoreak erabiltzen dira.

3. **Komunikazio-interfazeak**

BMSa beste sistema edo tresna batzuekin komunikatzeko erabiltzen dira komunikazio-interfazeak. Ezinbestekoa da protokolo ezberdinak izatea sistemak ondo komunikatu ahal izateko. Hurrengo protokoloak izaten ditu normalean BMS batek [32]:

- *Controller Area Network (CAN)*: Oso erabilia da automobilen munduan, haren erresistentzia eta fidagarritasunagatik kontrol gabeko egoeretan.
- *Inter-Integrated Circuit (I2C)*: Sistema integratuetan, abiadura txikiko periferikoak konektatzeko erabiltzen da.
- *Serial Peripheral Interface (SPI)*: Bereziki sistema integratuetan erabiltzen da, distantzia txikiko komunikazioetarako. I2Parekin konparatuz gero abiadura handiagoa duenez, erantzun azkarra behar duten periferikoak konektatzeko erabiltzen da [32].

5.2.3. **BMSaren funtzioak**

BMSa ulertzeko, haren helburuak ulertzea da lehenengo pausoa. BMS guztiek hiru helburu nagusi dituzte [33]:

- Zelulak eta bateria kaltetzea saihestea.
- Bateriaren bizitza luzatzea.
- Bateria egoera zehatz batean mantentzea, eskatu zaizkion funtzioak bete ahal izateko.

Helburu horiek betetzeko, BMSak funtzio ezberdinak izango ditu [33]. Hurrengo zerrendan horietako garrantzitsuenak laburbiltzen dira:

1. *Zelularen babesa*: Edozein gertaeraren aurrean babesa emango die zelulei. Babesa bermatzeko, zelulen parametroen atalaseak sistema diseinatzean ezartzen dira.

2. *Karga-kontrola*: Ezinbestekoa da funtzionalitate hori. Karga modu desegokian egiten bada, zelulak kaltetu egiten dira.
3. *Eskariaren kudeaketa*: Bateriaren erabileraren arabera korrontea mugatzen du, kargen arteko denbora luzatzeko.
4. *SoCaren determinazioa*: Bateria geratzen den energia zehaztea beharrezkoa da hainbat aplikaziotarako, hala nola ibilgailu elektrikoetarako.
5. *SoHaren determinazioa*: Kasu batzuetan garrantzitsua da ere batarian osasun-egoera edo SoHa (*State of Health*, ingelesez zehaztea).
6. *Historia*: Bateriaren funtzionamendu-historia gordetzea beste funtzio bat izan liteke. Karga/deskarga kopurua, tentsio maximo eta minimoak, etab. gorde daitezke analisirako.
7. *Egiaztatzea eta identifikatzea*: Proba automatikoak egiteko, BMSak fabrikatzaileak ezarritako parametroen balioak grabatzea ahalbidetzen du. Baita fabrikazio-zenbakia ere, huts egiten duen kasuan fabrikatzaileari zuzenean informazio guztia bidali ahal izateko.
8. *Komunikazioak*: BMS gehienek komunikazioa ahalbidetzen dute karga-gailuaren sistemarekin edota aplikazioko beste sistema batzuekin.

5.3. BMSaren funtzio aurreratuak

Aurreko atalean (5.2.3. atalean) azaldutako funtzionalitateez gain, espezializatuak diren bi funtzionalitate izango ditu garatutako BMSak. SoCaren estimazioa, alde batetik, Kalman iragazkietan oinarritutako algoritmoen bidez gauzatuko da zehaztasuna hobetzeko eta ibilgailu elektrikoek beharrezkoak diren aurre egiteko. Bestalde, garatutako zelulen orekatze-algoritmoa ere deskribatuko da, oso garrantzitsua delako ibilgailuak bateria-packa orekatuta izateko karga/deskarga prozesutik prozesura.

5.3.1. EKF bidezko SoCaren estimazioa

EKF bidezko SoCaren estimazio-algoritmoa hainbat fasetan exekutatzen da. Lehenengo fasean $\hat{x}(0|0)$ bektorea hasieratzen da, non $x = [SoC, V_1, V_2, R_0, 1/C_{bat}]^T$ Kalman iragazkiaren egoera-bektorea den, eta $1/C_{bat}$ bateriaren alderantzizkoa. Fase honetan $\hat{P}(0|0)$ 5 x 5 tamainako kobariantza-matrizea ere hasieratu behar

da. x bektorearen elementuen kobariantzaren erroreak adierazten dituzte P matrizeko diagonaleko elementuek.

Ondoren, a priorizko iragarpen-fasea egiten da:

$$\hat{x}(k+1|k) = F \cdot \hat{x}(k|k) + G \cdot i. \quad (5.2)$$

non F hurrengoa den:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -\frac{i \cdot T_s}{3600} \\ 0 & e^{-\frac{T_s}{\tau_1}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\frac{T_s}{\tau_2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5.3)$$

eta G kontrol-matrizea den, zirkuitu elektriko baliokidetik (5.1) datorrena :

$$G = \begin{bmatrix} 0 & R_1(1 - e^{-\frac{T_s}{\tau_1}}) & R_2(1 - e^{-\frac{T_s}{\tau_2}}) & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad (5.4)$$

Jarraian, estimazioaren errorea zehazten da. Horretarako, horren kobariantza kalkulatzeko da lehenengo:

$$\hat{P}(k+1|k) = F(k) \cdot \hat{P}(k, k) \cdot F^T + Q, \quad (5.5)$$

non Q egoeren zarataren kobariantza den (modeloaren erroreak edo parametroen desbideratzeak ezin dira neurtu, beraz, balio horiek optimizazio bidez doi daitezke, adibidez). Aurrekoa gauzatuta, kalkulaturako iragarpena zuzendu behar da. Horretarako, Kalmanen irabazia, K kalkulatu behar da:

$$K(k+1) = \hat{P}(k+1|k) \cdot H^T(k) \cdot [H(k) \cdot \hat{P}(k+1|k) \cdot H^T(k) + R]^{-1}, \quad (5.6)$$

non H behaketa-bektorea den eta R neurketen zarataren kobariantza (Q ren antzera, H ezin da neurtu eta estimatu behar da). H bornen arteko V_t tentsioa zehazteko erabiltzen da:

$$H = \frac{\partial h}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_0}{\partial SOC} & -1 & -1 & i & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.7)$$

non

$$h(x, i) = V_0(SOC, T) - i \cdot R_0 - V_1 - V_2. \quad (5.8)$$

Behin K kalkulaturik, a posterioriko estimazioa egin daiteke, (5.9)-n erakusten den bezala. Bornen arteko tentsioa kalkulatu da 5.8 bidez, eta bateriaren tentsio fisikoarekin konparatu da.

$$\hat{x}(k+1|k+1) = \hat{x}(k+1|k) + K(k+1) \cdot [V_t(k) - h(\hat{x}(k|k), i)]. \quad (5.9)$$

Bukatzeko, P kalkulatu da a posteriori:

$$\hat{P}(k+1|k+1) = (I - K(k+1) \cdot H) \cdot \hat{P}(k+1|k). \quad (5.10)$$

5.3.2. Zelulen orekatze-algoritmoa

Zelulen-orekatzea bateriako zelulen iraunkortasuna bermatzeko egiten den prozesua da. Karga-prozesuan zelulen gain-tentsioa ez izatea lortzen da, eta zelula bakoitzaren tentsio-mailak oso ezberdinak izatekotan, berdintasun puntu batera heltzea da.

Zelulen orekatzea 5.2. irudiko MOSFETak kontrolatzen gauzatzen da, hurrengo eran:

- Tentsio altuena duten zelulak ustu egingo dira, geldoago kargatuz.
- Tentsio baxuena duten zelulak etengabe kargatuko dira, aurrekoen tentsio-mailara heldu arte.

Bateria bakoitzaren fabrikatzaileak ezarriko du zelulen arteko tentsio ezberdintasuna zenbatekoa izan daitekeen. Gainera, modu ezberdinak egon daitezke orekatzea gauzatzeko. Karga-prozesuaren parte da zelulen orekatzea. Korrantea mugatuz eta aurretik aipatutako MOSFETak irekiz eta itxiz lortzen da zelulen tentsio-mailak orekatzea, karga etengabe geldituz eta abiaraziz. Karga-prozesua egiteko denbora orekatzeagatik nabarmen luzatuko da.

6. kapitulua

Diseinua

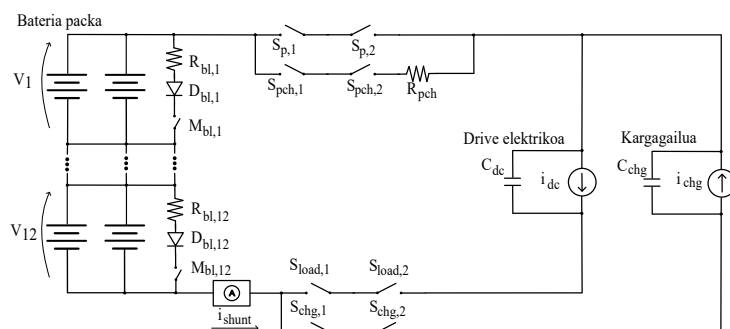
6.1. Zirkuitu elektriko baliokidea

BMSa garatzeko, 5.1.3. atalean azaldu den zirkuitu baliokidea hartu da abiapuntutzat. Hala ere, hainbat aldaketa egin behar izan zaizkio zirkuituari, jarraian azalduko direnak.

Erabilitako zirkuituak 2P12S motako bateria bat du, hori da, 2 zelula paraleloan eta 12 serian dituenak. Zelula bakoitzak 4,1 V-eko tentsio nominala du, bateriaren tentsioa, gutxi gorabehera, 50 V-etara heltzeko. Zelula bakoitzaren kapazitatea 8 A/h-koa da.

Bestalde, bateria trakzio-sistemara eta kargagailura konektatzeko erabiltzen diren kontaktoreak aldatu dira. Hain zuzen ere, 5.1.3. atalean erabiltzen diren kontaktore mekanikoen ordez, kontaktore elektromekanikoak ezarri dira, bi errelez osatuak. Errele horiek kontrako norantzan ezarrita daude, falta egoeran irekiera segurua ahalbidetuz, korrontearen norantzaren menpe eta desaktibazio-sekuentzia jakin bat jarraituz [36]. Hala ere, errele-bikote bakoitza kontaktore bakarra izango da sistemaren ikuspuntutik, eta 5.1.3. ataleko kontaktoreek bezala funtzionatu dute. Gainera, errele bakoitzak itxiera-baieztapen seinalea bidaliko dio sistemari, BMSak kontaktoreen egoeraren inguruko kontrola izan dezan, eta kontaktoreen batek huts egiten duenean neurriak hartuko ditu BMSak.

Orekatze pasiboa egiteko zirkuituan ez da aldaketarik egongo, baina MOS-FETei itxiera-baieztapen seinalea gehitu zaie. 6.1. irudian erakusten da ibilgailu elektrikoaren aplikaziorako moldatutako zirkuitu baliokidea.



6.1. irudia. Erabili den zirkuitu elektrikoa, 2P12S konfigurazioa duen bateria-pack-arekin.

6.2. BMSaren espezifikazioak

Gradu Amaierako Lan honetan garatutako BMSak hainbat eginkizun bete behar ditu. Betebehar horiek funtzioen bidez betetzen dira, jarraian azalduko direnak:

1. SoCaren estimazioa.

Ezinbestekoa da bateria baten kontrola izateko horren SoCaren balorea ahalik eta zehatzen estimatzea. Metodo ezberdinak egon daitezke estimazio hori egiteko. Garatutako BMSaren kasuan, bi metodo erabiliko dira, 5.3.1. atalean azalduko EKF bidezko estimazioa eta Coulomb kontuaren bidezko SoCaren estimazioa. Modu horretan, bien arteko konparaketa egin daiteke SoCaren zehaztasuna bermatzeko.

2. Alarmen kontrola.

Aurreko kapituluetan argi adierazi den bezala, ezinbestekoa da BMSak segurtasuna bermatzea kontrolatzen duen baterian. Hori dela eta, BMSak alarma-sistema zehatza izan behar du, bateriarekin lotutako parametro eta aldagai guztiak kontrolatuko dituen.

3. Karga-prozesuaren kontrola.

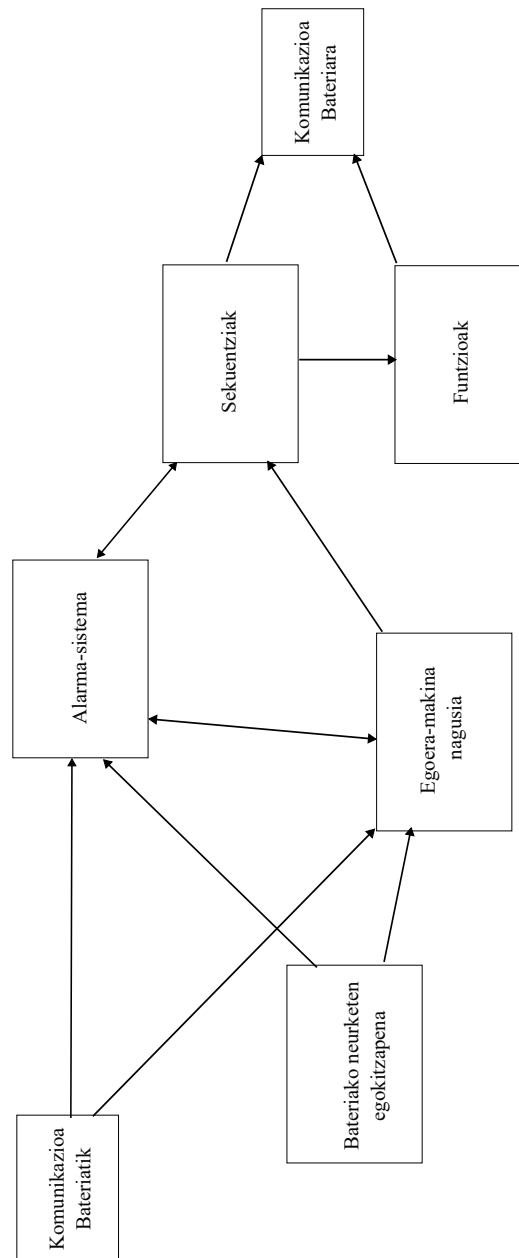
Bateriaren bizi-iraupena ziurtatzeko, BMSak karga-prozesuaren kontrol osoa izan beharko du, 5.2.3. atalean adierazi den bezala. Horren bidez erabiltako korronea, zelulen tentsioak eta gain-karga eta behe-kargak kontrolatu ahalko dira. Karga-kontrola izanda, baterien karga desegokiak saihestu ahalko dira.

4. *Kontaktoreen-kontrola*

Bateriaren konexioa eta deskonexioa BMSaren bidez gertatuko da. Horregatik, sistemak kontaktore guztien kontrola izango du, eta ezarritako parametro eta atalaseen bidez eragingo ditu konexio eta deskonexio seguruak egin ahal izateko. Kontaktoreen kontrola sekuentzien bidez garatuko da.

6.3. Algoritmoaren eskema kontzeptuala

BMSaren softwarearen garapena aurrera eramateko bete beharreko eginkizunak eta funtzioak zehaztu dira. Hori kontuan izanda, Matlab/Simulink-en modeloa zehaztu aurretik, algoritmoaren hasierako egitura bat garatu da, era kontzeptualean. Horrekin, bloke ezberdinak zehaztu dira eta horien arteko konexioak definitu dira, aurrerako modeloa erraztasun gehiagoz antolatzeke. Eskema kontzeptual hori 6.2. irudian ikus daiteke.



6.2. irudia. Proiektuaren kronograma

II. atala

JARRAITUTAKO METODOLOGIA

7. kapitulua

Proiektuaren faseak

Gradu Amaierako Lana garatu ahal izateko faseak ezarri behar dira. Ez da posible proiektu bat bere osotasunean antolakuntza gabe aurrera eramatea, eta horregatik zereginak banatu egiten dira, ezarri den denboran zehar horiek betetzeko.

Gradu Amaierako Lanarekin erlazionatzen den proiektua enpresa batekin elkar-lanean egin denez, faseak bertako tutorearekin ere adostu dira. Jarraian azaltzen dira lanaren faseak:

1. **Enpresarekin kontaktua.** Enpresako langileak unibertsitateko tutoreari proiektua aurkeztu dio eta tutorea ikaslearekin kontaktuan jarri da proiektua azaltzeko.
2. **Proiektuaren proposamena.** Enpresako tutorea, irakaslea eta ikaslea bildu dira eta proiektuaren helburuak ezarri dituzte.
3. **Informazioa biltzea.** Behin proiektuaren nondik norakoak jakinda, ikasleak haren inguruko informazioa bildu du tutoreen laguntzarekin. Informazioa lagungarria izan da proiektuaren ulermenerako eta garapenerako.
4. **Trebakuntza-fasea.** Proiektuaren garapenari hasiera emateko, eta *Matlab/Simulink*en trebatzen hasteko, lehenengo zeregin bezala bateriaren zirkuitu baliokidea garatzea izan da. Hasierako fase honetan, zirkuituak 2P12S konfigurazioa izan ordez 2P2S konfigurazioa izan du, hasierako lana errazteko.
5. **Sekuentzien-garapena MBDen bidez.** Behin plantaren modeloa izanda, sekuentzien garapenarekin hasi da ikaslea, beti tutorearen laguntzaz. Garapena planta sinplifikatuarekin frogatu da, funtzionaltasun guztiak konprobatuz. Fase honetan garatu dira BMSaren softwarearen parte diren egoerak guztiak.

6. **Alarma-sistemaren garapena eta sistemaren parametrizazioa.** Behin sekuentziak martxan izanda, alarma-sistema garatu da, eta neurketak egokitu dira. Gainera, sistema osoaren parametrizazioa egin da, eta datu guztiak busetan batu dira. Fase honetan amaierako sisteman egongo diren bloke guztiak sortu dira eta haien arteko konexio guztiak egiten hasi da ikaslea.
7. **Bateriaren egokitzapena.** Planta sinplifikatuarekin egindako guztia konfigurazio handiago batetara moldatu da (2P12S konfigurazioa). Honekin batera, sisteman zehar dauden seinale guztiak moldatu behar izan dira baterria berrira egokitzeko.
8. **Zelulen orekatze-algoritmoaren garapena.** Azkenengo sekuentzia garatu da, zelulen-orekatzea egiten duena. Horrekin batera, plantan karga-prozesua ahalbidetzeko blokeak konektatu dira, eta karga-prozesuaren parametroak ezarri dira. SoC estimadorearekin batera karga-konputazional handiena duen atala denez, azkenengoa izan da sistemara gehitzen, aurreko bloke eta sekuentzien konprobaketak erraztu ahal izateko.
9. **Simulazioak eta errorearen konponketa.** Bederatzigarren fase bezala jarri bada ere, simulazioak lehenengo zereginetik egiten hasi dira, sistemaren garapena zuzena izan dela frogatu ahal izateko (MBD prozedurak zehazten duen bezala). Garrantzitsua da erroreak gutxinaka zuzentzea, zailagoa izan daitekeelako amaieran guztiak aurkitzea. Hala ere, fase honetan lortu da bateriaren karga-prozesu osoa simulatzea, eta beharrezko aldaketak egitea bateriaren ezaugarrietara moldatu ahal izateko.
10. **Txostena idatzi.** Proiektuaren azkenengo pausoa haren inguruko txostena idaztea da. Txostenak proiektu osoaren deskribapena eta emaitzak jasoko ditu eta hori izango da Gradu Amaierako Lan bezala entregatuko dena.

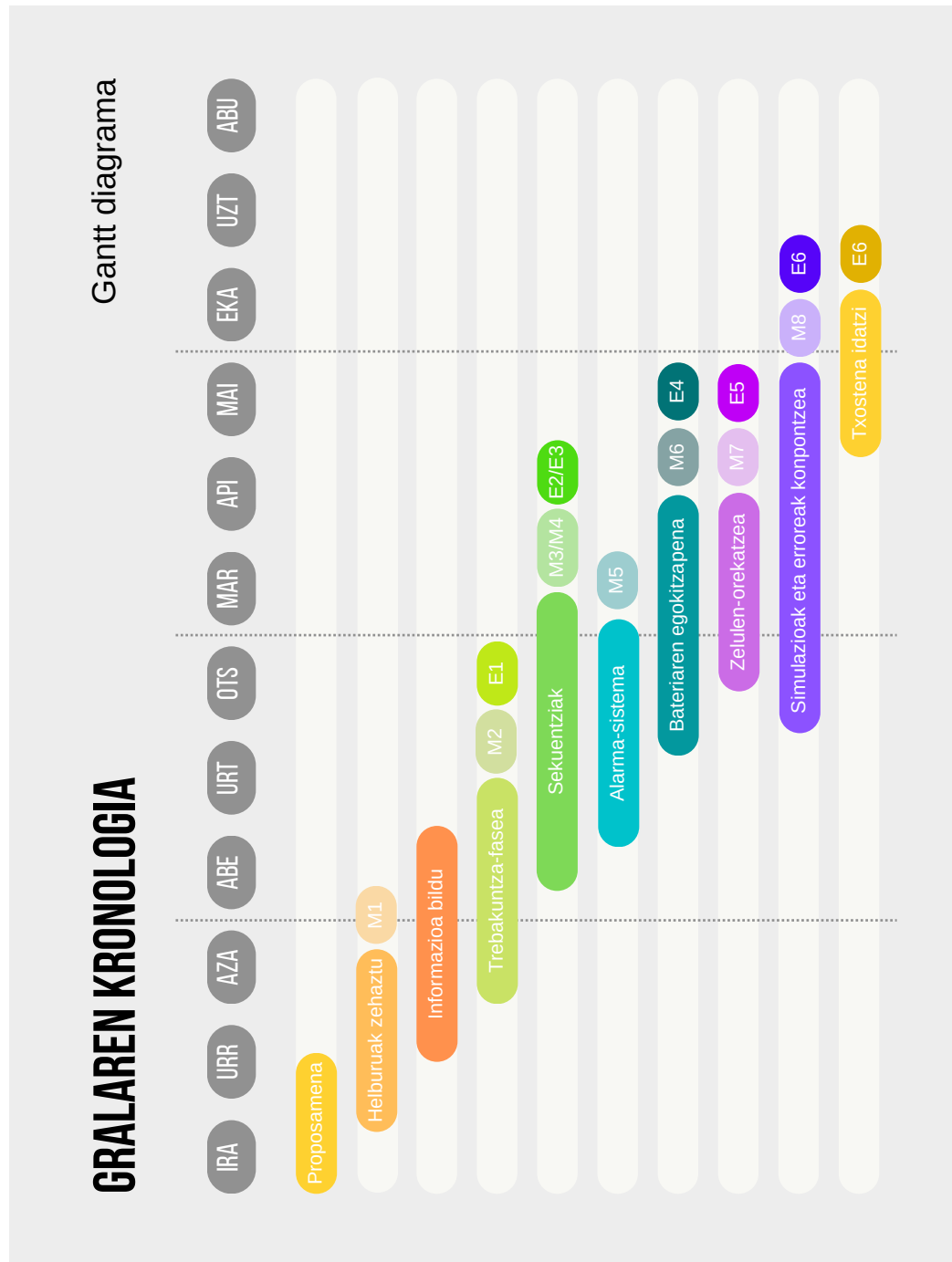
8. kapitulua

Gantt-en diagrama

Proiektuaren faseak denboran zehar nola bete diren adierazteko Gantt-diagrama bat erabili da, 8.1. irudian erakusten den bezala. Aurreko kapituluan deskribatu dira fase horiek. GrALaren garapenean zehar bete diren mugarriak eta bidali diren entragagaiak 8.1. eta 8.2. tauletan erakusten dira, hurrenez hurren.

8.1. taula. Proiektuaren mugarriak.

Mugarria	Deskribapena	Data
<i>M1</i>	Helburuak zehaztu dira	2023/11/03
<i>M2</i>	Ikasketa	2023/11/17
<i>M3</i>	Softwarearen lehenengo bertsio osatua	2023/12/01
<i>M4</i>	Sekuentzien amaierako bertsioaren balioztapena	2024/01/12
<i>M5</i>	Alarma-sistemaren garapena	2024/02/02
<i>M6</i>	Softwarea bateriara egokituta	2024/03/01
<i>M7</i>	Zelulen-orekatzea garatuta	2024/03/22
<i>M8</i>	Balioztatuko softwarea amaituta	2024/04/11



8.1. irudia. Proiektuaren kronograma

8.2. taula. Entregagaiak.

Entregagaia	Deskribapena	Data
<i>E1</i>	Plantaren lehenengo bertsioa	2023/11/17
<i>E2</i>	Softwarearen lehenengo bertsioa	2023/12/01
<i>E3</i>	Sekuentzien bertsio finala	2024/01/12
<i>E4</i>	Bateriara egokitutako softwarea	2024/03/01
<i>E5</i>	Zelulen-orekatze softwarea	2024/03/24
<i>E6</i>	Baieztatutako softwarearen azken bertsioa	2024/04/11
<i>E7</i>	Gradu Amaierako Lanaren txostena	2024/05/30

9. kapitulua

Kalkuluak eta algoritmoak

9.1. Garatutako BMS softwarearen deskribapena

Proposatu eta garatutako BMSaren software atalak azalduko dira kapitulu hone-tan, horien funtzionalitateak eta betekizunak zehaztuz. Zenbait blokek osatzen dute BMSaren softwarea: egoera-makina nagusia, sekuentziak, funtzioak eta alar-mak. Horien arteko trantsizioak azalduko dira jarraian. Aipatutako sistemaren bloke funtzionalak erakusten ditu 9.1. irudiak.

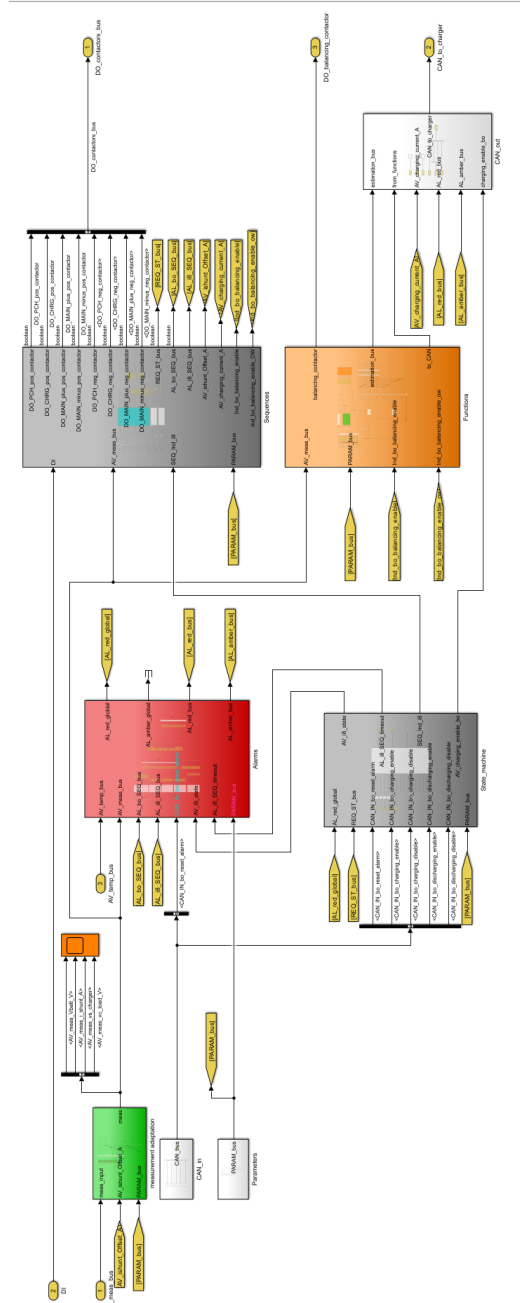
9.1.1. Egoera-makina nagusia

MDB paradigma jarraituz, Matlab/Simulink plataformaren *Stateflow toolboxa* era-biliz garatu da egoera-makina nagusia. Hiru egoera nagusiz osatuta dago: *idle* (ez-aktibo), *charging* (kargatzen) eta *discharging* (trakzio modua). Egoera bakoitza azpi-egoerez osatuta dago, eta sistemak jasotako seinaleen bidez gertatuko dira horien arteko trantsizioak. Egoera-makinaren eskema orokorra erakusten du 9.2. irudiak. Jarraian azalduko dira egoera nagusiak eta horien azpi-egoerak.

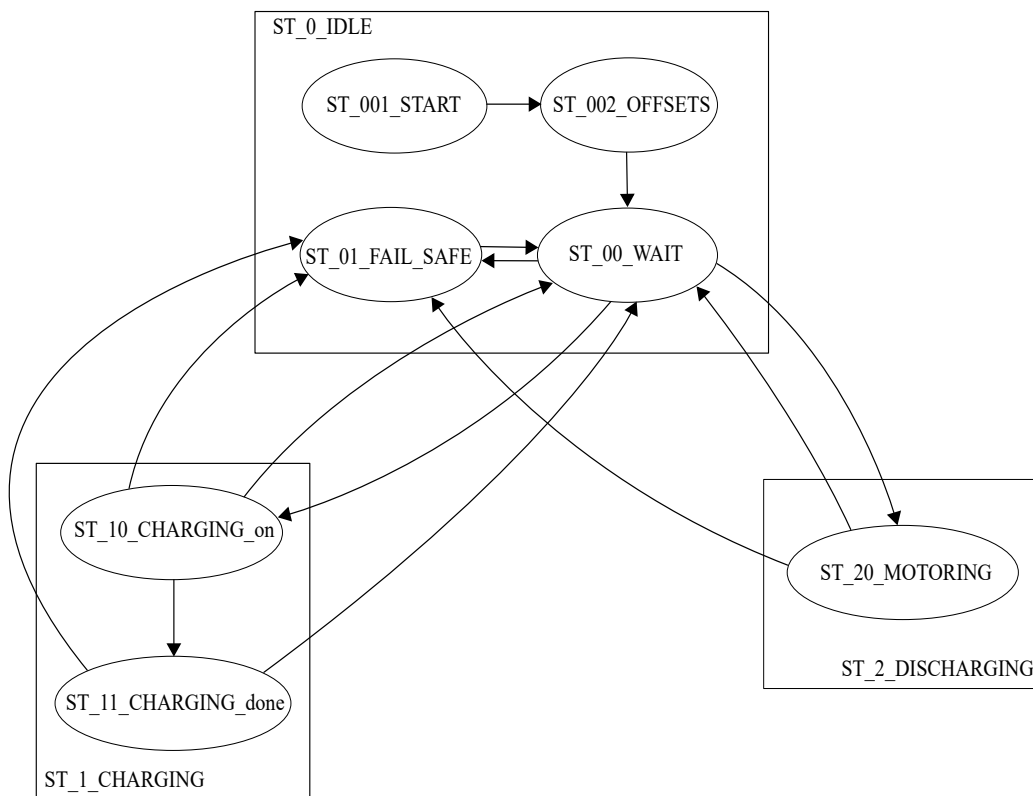
1. *Idle* egoera.

Idle egoera izango da sistemaren hasieraketa-egoera. Lau azpi-egoerek osa-tzen dute: *start* (hasiera), *offsets* (kalibrazioa), *wait* (itxaron) eta *fail safe* (hutsegite segurua).

Lehenengo bi azpi-egoerek osatzen dute hasieraketa-prozesua (*start* eta *off-sets*), eta sistema piztean besterik ez dira erabiltzen. Egoera horietatik iga-rotzeko, korrante-sentsoreen *offsetak* ezartzen dituen sekuentzia erabiltzen da. Geldialdian dagoenean itxarote-egoeran egongo da sistema, seinaleren bat jasotzeko zain. Azkenik, *Fail safe* egoerak alarma-egoeran sistema des-gaituta eta modu seguruan egongo dela bermatzen du. Bertan geratuko da



9.1. irudia. BMSaren softwarea osatzen duten bloke funtzionalen eskema orokorra.



9.2. irudia. Egoera-makinaren fluxu-diagrama

sistema berrezartze seinalea heldu arte. Azken egoera horretara edozein egoeratik hel daiteke sistema.

2. *Charging* egoera.

BMSa *Charging* egoerara heltzean bateriaren karga abiarazten da. Bi azpi-egoeraz osatuta dago: *Charging on* (karga piztuta, ingelesez) eta *Charging done* (karga bukatuta, ingelesez).

Trantsiziorako seinalea heltzean, sistema *Charging on* egoerara igaroko da. Bertan bateriaren karga-prozesua abiaraziko da, horrekin lotutako sekuentziak aktibatuz. Behin ataza hori bukatuta, sistema *Charging done* egoerara igaroko da, itxarote-egoerara pasatzeko seinalea jaso arte.

3. *Discharging* egoera.

Discharging egoerak bateriaren deskarga-prozesua ahalbidetzen du, hori da, ibilgailua martxan jartzen den momentua adierazten du. Proiektu hone-tan ez da operazio-modu hori sakon aztertuko. Egoera horretan, BMSak

monitorizazio-atazak gauzatu behar ditu soilik, eta emaitzak beste kontrol-unitate batzuei transmititu. Beraz, azpi-egoera bakarra izango du egoera horrek, eta bertan geratuko da trantsizioa sortuko duen seinaleari itxaroten.

9.1.2. Trantsizioak

Egoera batetik bestera igarotzean gertatzen dira trantsizioak. Aldaketa horiek sistemak jasotako seinaleen bidez abiarazten dira, bai kanpo-seinaleekin bai barnekoekin ere. Trantsizioak errazteko, sistemak sekuentziak erabiliko ditu, seinaleen bidez aktibatutak.

Uint8 motako aldagai batekin egongo dira lotuta trantsizioak. Aldagai horren balioaren arabera sekuentzia bat edo beste aktibatuko da. Aldagaia barne seinale bezala sisteman zehar bidaliko da, eta sekuentzien blokeak zero ez den seinalea jasotzekotan dagokion sekuentzia aktibatuko du. Aldagai bakoitzaren balioa sekuentzia batekin egongo da lotuta, 9.1. taulan ikus daitekeen bezala. Aurrerago azalduko dira sekuentziak zehaztasunez.

9.1. taula. Sekuentziak eta horien deskriptorea.

Sekuentziaren izena	deskrip.	Sekuentziaren izena	deskrip.
<i>Sekuentziarik ez aktibo</i>	0	<i>Open all contactors while charging</i>	5
<i>Idle to charging</i>	1	<i>Open all contactors while discharging</i>	6
<i>Charging to idle</i>	2	<i>Offset</i>	7
<i>Idle to discharging</i>	3	<i>Cell balancing</i>	8
<i>Discharging to idle</i>	4		

Trantsizioek aurretik azaldutako aldagai batzuk eta jasotako mezuen konbinazioak erabiliko dituzte egoera batetik bestera igarotzeko. Jarraian, egoera batetik besterako trantsizioak azalduko dira.

1. *Hasieraketa-egoerak*

BMSak hasieratze-prozesua beteko du, sistema erabiltzeko prest gera dadin. Horretarako, *Idle* egoerako *Start* eta *Offsets* egoeretatik igaroko da. Horien arteko trantsizioak ez daude komunikazio-kanaletako seinaleen menpe. Al-diz, sistemak berak dituen barne seinaleak erabiltzen dira. Hasteko, sistema

piztean, segundo bat itxarongo da eta *offset* sekuentzia aktibatuko da. Horrekin batera, sistema *Offsets* egoeran geratuko da, sekuentziaren bukaera-seinalea jaso arte. Hori jasotzean, itxarote-egoerara joango da sistema, sekuentzien aldagaia zerora ezarriz, eta bertan geratuko da komunikazio-kanaleko seinaleak itxaroten.

2. *Itxarote-egoeratik charging- edo discharging-egoeretara trantsizioak*

Itxarote-egoeratik *Charging* edota *Discharging* egoeretara igarotzeko trantsizioak komunikazio-kanaleko mezuen bidez gertatzen dira.

3. *Edozein egoeratik itxarote-egoerara trantsizioak*

Offsets ez den egoeretatik itxarote-egoerara gertatzen diren trantsizio guztiak komunikazio-kanaletik heltzen diren seinaleen bidez gertatzen dira. Bateria motorretik edo kargagailutik deskonektatu dela adierazten duten seinaleek abiaraziko dute *Charging*- eta *discharging*-egoeretatik trantsizioa. *Fail safe* egoeratik, berriz, berrezartze seinaleak abiaraziko du.

4. *Fail safe* egoerara trantsizioak

Fail safe egoerara trantsizioak alarmen bidez gertatzen dira. Alarmak barne seinaleak dira, eta edozein momentutan aktiba daitezke, trantsizioa abiaraziz.

Komunikazio-kanaletik jasotzen diren seinaleak 9.2. taulan ikus daitezke, haien deskribapenarekin eta abiarazten dituzte trantsizioarekin batera.

9.1.3. Sekuentziak

Egoeren arteko trantsizioak ahalbidetzen dituzten prozesuak dira sekuentziak. Horien helburua sistema prestatzea da, eskatu ahalko litzaiokeen edozein ataza bete ahal izateko. Sekuentzia gehienak bigarren mailako egoera-makinak dira, sistemaren prestakuntza era sekuentzialen egiten baitituzte. Egoera-makina baten bidez egiten ez den sekuentzia bakarra dago sisteman, baina aurrerago azalduko da. Sistema osoaren karga konputazional handiena sekuentzien blokeak izango du.

Sistemako sekuentziak hiru taldetan sailka daitezke: Kontaktoreak ireki eta ixteko eragiten dizkieten sekuentziak, korrante-sentsoreen *offset*ak zehazten dituzten sekuentziak eta zelulen orekatzea ahalbidetzen duten sekuentziak. Guztira, BMSak zortzi sekuentzia izango ditu, jarraian azalduko direnak. Sekuentzia bakoi-tzari zenbaki bat ezarri zaio, 9.1.2. ataleko 9.1. taulan ikusi daitezkeenak. Horrekin, sistemak jakingo du trantsizioan zein sekuentzia abiarazi behar duen.

9.2. taula. Komunikazio-kanaleko seinaleak eta horiekin lotutako trantsizioak.

Seinalea	Deskribapena	Trantsizioa
<i>Charging enable</i>	Kargagailua konektatu dela adierazten du.	Itxarote-egoeratik karga-egoerara
<i>Charging disable</i>	Kargagailua deskonektatu dela adierazten du.	Karga-egoeratik itxarote-egoerara
<i>Discharging enable</i>	Trakzio-sistema piztu dela adierazten du.	Itxarote-egoeratik deskarga-egoerara
<i>Discharging disable</i>	Trakzio-sistema itzali dela adierazten du	Deskarga-egoeratik itxarote-egoerara
<i>Reset alarms</i>	Alarma guztia berrezartzen ditu	<i>Fail Safe</i> egoeratik itxarote-egoerara

1. Kontaktoreak ireki eta ixteko sekuentziak

BMSak plantako kontaktoreen kontrola izango du, eta behar den heinean ireki eta itxiko ditu. Talde honetan, guztira, sei sekuentzia egongo dira, guztiak egoera-makinak. Bakoitzak egoera batetik besterako trantsizioa ahalbidetzen duenez, trantsizio horiekin izendatu dira. 9.3. taulan erakusten dira sekuentziak.

9.3. taula. Kontaktoreak ireki eta ixteko sekuentziak.

Sekuentziaren izena	Sekuentziaren izen euskaratua
<i>Idle to charging</i>	Geldialditik kargara
<i>Charging to idle</i>	Kargatik geldialdira
<i>Idle to discharging</i>	Geldialditik deskargara
<i>Discharging to idle</i>	Deskargatik geldialdira
<i>Open all contactors while charging</i>	Karga bitartean kontaktore guztiak ireki
<i>Open all contactors while discharging</i>	Deskarga bitartean kontaktore guztiak ireki

Azalpena errazteko, jarraian bikoteka azalduko dira sekuentziak.

(a) *Idle to charging/discharging.*

Geldialdi-egoeratik karga- edo deskarga-egoerara pasatzeko kontaktoreak ixtea dute helburu sekuentzia horiek. Haien arteko ezberdintasun bakarra da terminal negatiboan konektatzen den kontaktorea. Hurrengo pausoak jarraituko dituzte sekuentziek, 9.3. irudian erakusten direnak:

1. Sisteman zehar korronterik ez dagoela egiaztatzen da.
2. Aurre-karga kontaktorea itxi egiten da eta oraindik ere korronterik ez dagoela frogatzen da.
3. Terminal negatiboko kontaktorea ixten da. Karga-egoerara pasatzeko sekuentzian, $S_{chg,j}$ kontaktorea itxiko da, eta deskargara pasatzekoan $S_{load,j}$. 6.1. atalean azaldutako kondentsadoreetan tentsioa neurtuko da, gutxi gorabehera bateriaren tentsio nominal bera izan arte.
4. $S_{p,j}$ kontaktorea itxiko da eta tentsioak berdin jarraitzen duela egiaztatuko da.
5. Aurre-karga kontaktorea irekiko da.
6. Egoera-makina nagusira sekuentzia bukatu denaren seinalea bidaliko da.

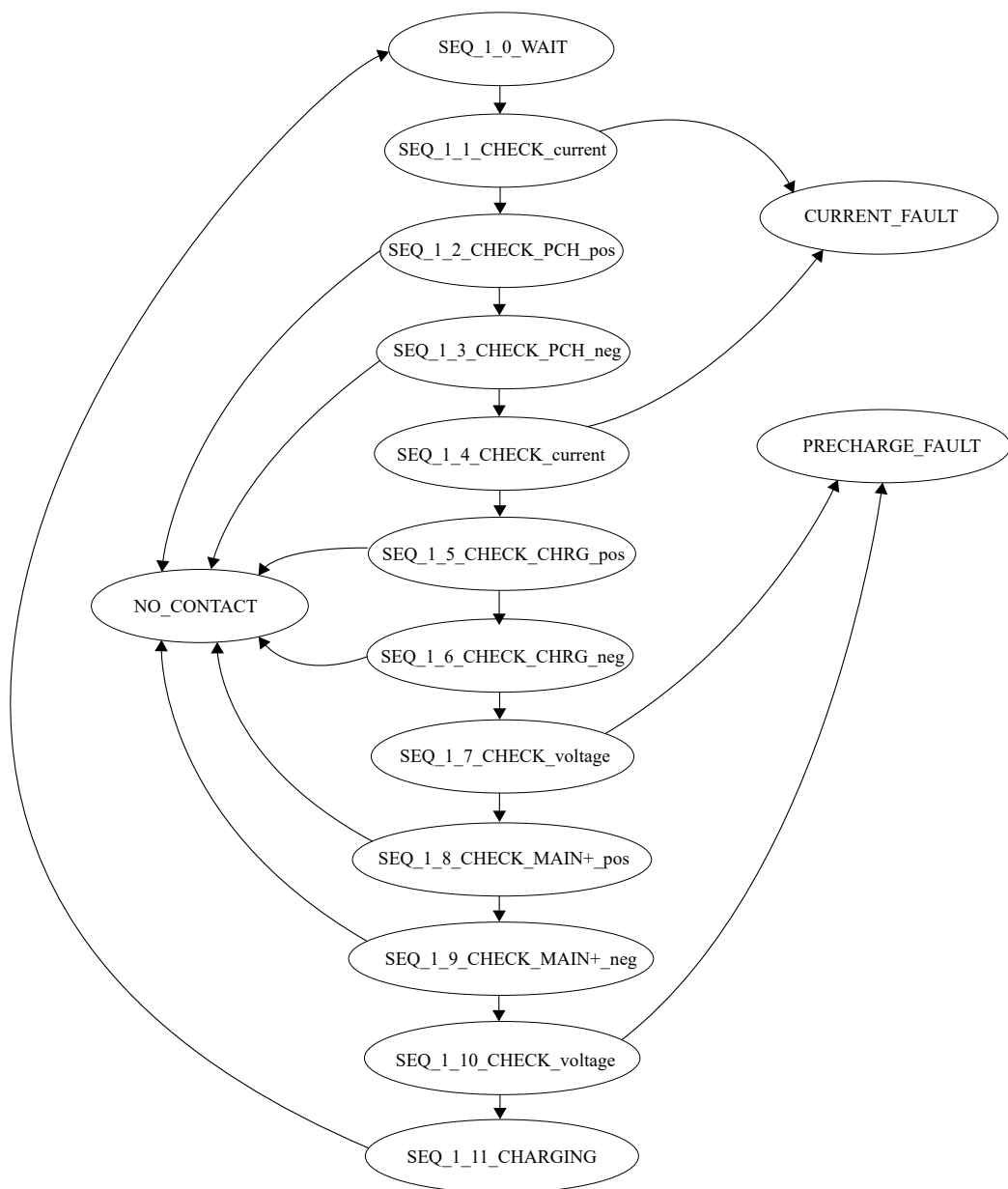
Arazorik gertatzen ez denean gauzatuko da sekuentzia azaldu bezala. Kontrako kasuan, egoera-makinak hiru egoera izango ditu arazoak kudeatzeko: *No contact* (kontakturik ez), *Current fault* (korrontearen falta) eta *Precharge fault* (aurre-kargaren falta).

Sistemak denbora jakin batean kontaktorearen baieztapen seinalea jasotzen ez badu kontaktoreen falta gertatuko da. Korrontearen balioa nulua ez denean, ordea, korrontearen falta geltatuko da. Azkenik, kondentsadoreetan neurtzen den tentsioa bateriaren tentsiora hurbiltzen ez denean emango da kondentsadoreen falta.

Egoera-makina horietako egoera batera heltzekotan, sistemaren alarma global gorria piztuko litzateke. Egoera-makinak hori jaso eta sistema *Fail Safe egoerara* bidaliko luke.

(b) *Charging/Discharging to idle.*

Charging/Discharging to idle sekuentzia pareak aurrekoen kontrako prozesua egiten dute. Itxarote azpi-egoerara igarotzeko aurretik era-



9.3. irudia. Itxarote azpi-egoeratik karga-egoerara igarotzeko sekuentziaren fluxu diagrama.

bili diren kontaktoreak irekitzea dute helburu. Horregatik, aurrekoak baino askoz sinpleagoak dira.

Hasieran, bi sekuentziek terminal positiboko kontaktore bera irekitzen dute, $S_{p,j}$. Terminal negatiboko kontaktorea, berriz, ezberdina izango da. Deskarga-egoeran, $S_{load,j}$ kontaktorea ireki beharko da, eta karga-egoeran $S_{chg,j}$. Kontaktoreak irekitzeko ordena, modu argian, 9.4. taulan ikus daiteke. Aurre-karga kontaktorea agertzen da taulan, baina azaldutako sekuentzietan kontaktore hori sekuentzia bukatu aurretik irekiko da.

Azaldutako sekuentzietan ez dago errorearen kontrako egoerarik. Kontaktoreen baieztapen-seinaleak itxiera besterik ez du adierazten, beraz, ezingo da jakin modu egokian irekin diren. Adibide bezala, 9.4. irudian *Discharging to idle* sekuentzia erakusten da.

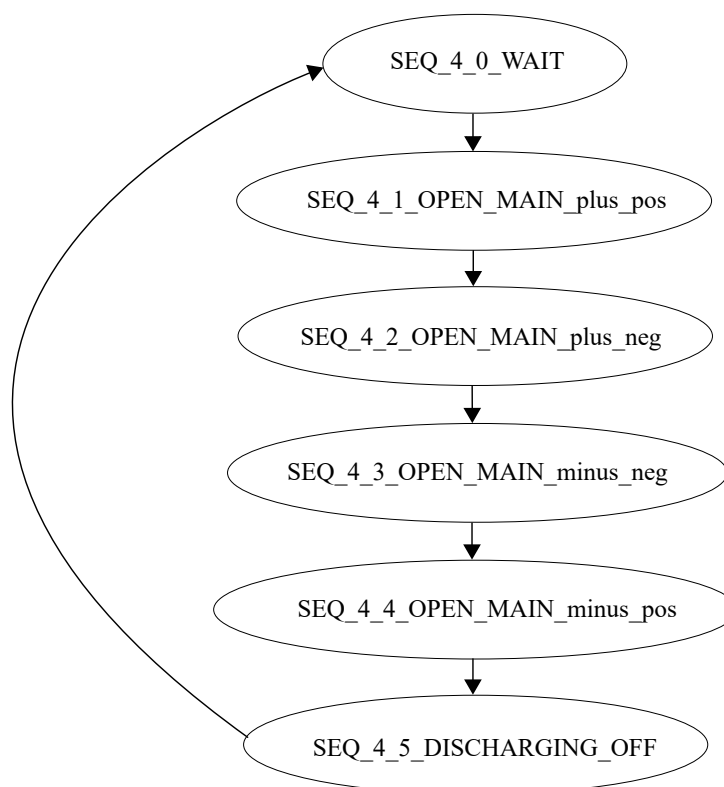
9.4. taula. Kontaktoreak irekitzeko ordena, sekuentziaren arabera.

Ordena	Karga-egoera	Deskarga-egoera
1	$S_{pch,j}$	$S_{pch,j}$
2	$S_{chg,j}$	$S_{load,j}$
3	$S_{p,j}$	$S_{p,j}$

(c) *Open all contactor while charging/discharging*

Alarma-egoera gertatzean erabiltzen da sekuentzia-pare hori. Haien helburua kontaktore guztiak era ordenatuan irekitzea da. Bi sekuentzia ezberdinak dira, aurretik azaldu bezala, egoera bakoitzean kontaktore ezberdinak erabiltzen direlako.

Gainera, korrontearen norabidearen menpe dauden sekuentziak dira. Aurreko atal batean (6.1. atala) azaldu da kontaktoreen errele bakoitzaren erabileraren garrantzia, eta sekuentzia hauetan aplikatu behar izan da. Korrontearen norabidearen arabera, kontaktoreen erreleen ordena aldatuko da, eta horregatik egoera-makina bakoitzak bi bide izango ditu kontaktoreak irekitzeko.



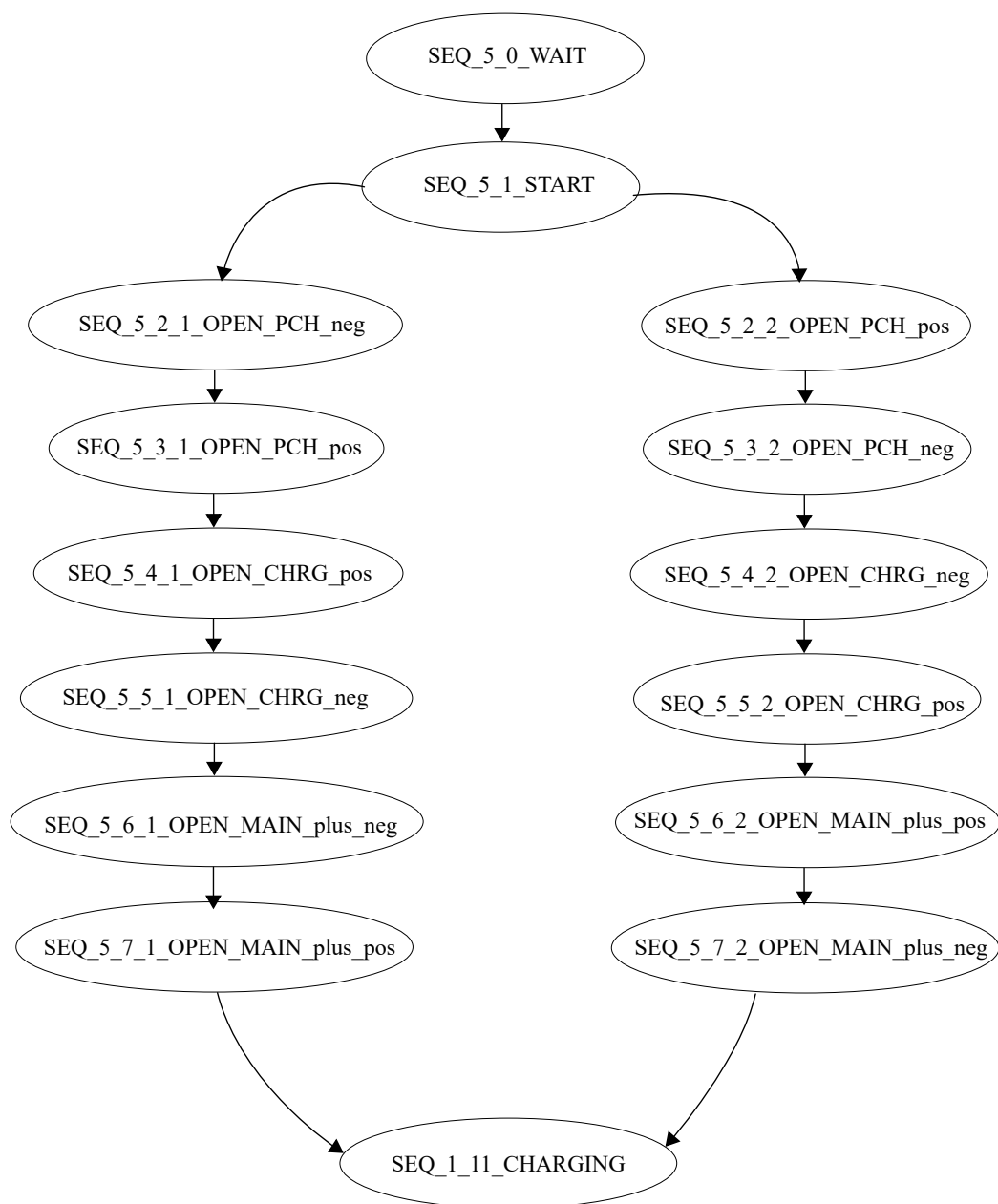
9.4. irudia. Deskarga-egoeratik itxarote-egoerara igarotzeko fluxu diagrama.

Lehenengo bideak korrontearen norabide positiboa izango du kontuan, eta bigarrenak negatiboa. Bi sekuentzia horien adibide moduan, 9.5. irudiak karga-egoeran kontaktore guztiak irekitzeko sekuentziaren fluxu-diagrama erakusten du. Bestalde, 9.5. taulan zehaztasunez ikus daiteke zein ordenatan ireki behar den errele bakoitza, korrontearen arabera.

Kontaktore bakoitza irekitzeko sekuentzia 9.4. taulan agertzen den ordenaren arabera egingo da, sistema dagoen egoeraren arabera. Aurrekarga kontaktoreen irekiera bermatzen da, errorea edozein momentutan gerta daitekeelako, eta, beraz, garrantzitsua da kontaktore guztiak kontuan izatea.

2. *Offsetak zehazteko sekuentzia*

Sistemak korrante-sentsorea du, kontrolerako aldagai garrantzitsua baita.



9.5. irudia. Huts-egite egoeran kontaktore guztiak irekitzeko sekuentziaren fluxu diagrama.

9.5. taula. Kontaktoreak irekitzeko ordena, korrontearen norantzaren arabera.

Korrontearen norabide positiboan		Korrontearen norabide negatiboan	
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	<i>2</i>
$S_{pch,2}$	$S_{pch,1}$	$S_{pch,1}$	$S_{pch,2}$
$S_{chg,1}$	$S_{chg,2}$	$S_{chg,2}$	$S_{chg,1}$
$S_{p,2}$	$S_{p,1}$	$S_{p,1}$	$S_{p,2}$
$S_{load,1}$	$S_{load,2}$	$S_{load,2}$	$S_{load,1}$

Simulazioetan, sentsore hori erreala izateko, *offset* balio bat gehitu zaio, eta baita zarata ere. Offseta sekuentzia blokean kalibratzean du BMSaren kontrol-sistemak.

Sekuentzia guztien artean hauxe izango da egoera-makina baten bidez garatu ez den bakarra. Balioaren kalkulua egiteko, sekuentziak kontadore bat eta bat az bestekoa kalkulatzeko duen bloke bat erabiltzen ditu. Kalkulu hori sistemaren hasieraketa-prozesuan egiten da, BMSa pizten denean. Balioa lortutakoan, egoera-makina nagusiari seinale bat bidaliko dio, amaiera adierazteko. Momentu horretan egongo da sistema lanean hasteko prest.

3. Zelulen-orekatze pasiboa/ Karga-prozesua

Sistemaren karga konputazional handienetarikoa izango duen sekuentzia zelulen-orekatze pasiboa izango da (*Cell Balancing*, ingelesez). Sekuentzia horrek bateriaren karga-prozesua simulatuko du, zelulen orekatze pasiboa ahalbidetuz bitartean. Orekatze-sekuentzia egoera-makina baten bidez garatu da, modu sekuentzian kargaren pauso ezberdinak adieraziz.

Sekuentziak 6.1. atalean azaldutako elementuak (diodoa, erresistentzia eta MOSFETa) kontrolatzen ditu irteera portu digitalen bidez. Orekatzearen helburua da zelulen arteko tentsio ezberdintasun handiak ez egotea, segurtasuna bermatuz. Sekuentzia hori ulertzeko, karga prozesu osoa azalduko da jarraian:

1. Kargagailua konektatzen den momentuan, bateria tentsio maximoz kargatzen hasten da.

2. Zelula batek lehenengo muga bat gainditzean, karga-korrontearen balioa gutxiagotuko da, karga geldotuz.
3. Kargak aurrera jarraituko du, zelula batek bigarren muga gainditzen duen arte. Muga hori zelulan onartzen den karga minimoa izango da, eta momentu horretan hasiko da "*Orekatze-prozesua*".
4. Karga aurrera doan bitartean tentsio altuena duten zeluletan *Bleeding* (odolustea, ingelesez) aplikatuko da. Hori da, aurretik azaldutako zirkuituaren bidez, atalase bat pasatzen duten zeluletan MOSFETa itxi eta erresistentziaren bidez tentsioa galduko dute.
5. *Bleeding*-prozesua gertatzen ari bada ere, zelulak kargatzen jarraituko dira. Horregatik, zelula batzuk kargaren balio maximora hel daitezke. Balio maximoa *Cell Target Voltage* (zelularen helburu tentsioa, ingelesez) gehi *Overshoot Window* (maximoaz gain onartzen den atalasea, ingelesez) izango da. Momentu horretan, karga geldituko da eta muga hori gainditzen duten zelulak hustuko dira.
6. Azkenik, 4. eta 5. pausoak errepikatuko dira zelula guztiak onartutako karga minimoaren eta maximoaren artean dauden arte. Zelula guztiak tarte horretan daudenean sekuentziaren bukaera-seinalea bidaliko da egoera-makina nagusira eta karga-prozesua amaitutzat emango da.

Azaldu den erara, karga-prozesuan muga ezberdinak ezarri dira zelulen tentsioak modu errazean kontrolatu ahal izateko. Muga horiek errazago ulertu ahal izateko, 9.6. irudian ikus daitezke.

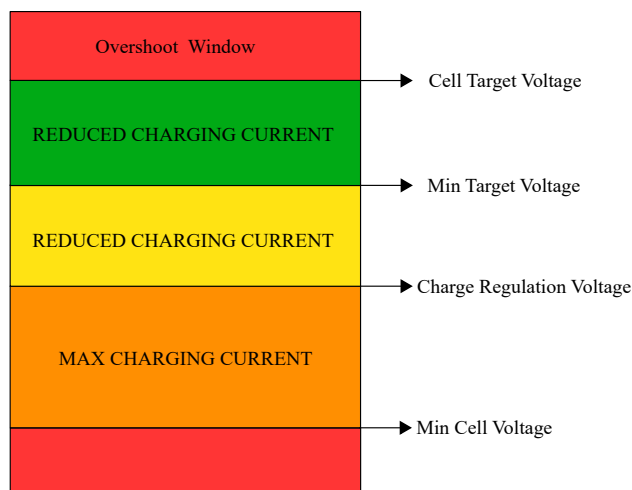
9.1.4. Segurtasuna eta alarmen kudeaketa

BMSak bateriaren segurtasuna bermatzea du helburu. Horretarako, parametro eta aldagai guztien kontrola du, balioak kudeatuz. Hori ziurtatzeko, *Matlab/Simulink* bloke estandarren bidez alarmen kudeaketarako azpi-sistema garatu da Gradu Amaierako Lan honetan.

Alarma-sistema bi multzo nagusitan banatzen da: alarma gorriak eta anbar-koloreko alarmak. Lehenengoak larritasun-maila altueneko alarmak dira, sistema geldiaraziko dutenak. Bigarrenak, berriz, oharrak besterik ez dira izango, sistemak arazo larria gertatu aurretik egoera kudeatu dezan.

Bestalde, alarma-mota nagusien barruan azpi-multzo ezberdinak egongo dira, parametro-motaren arabera banatuta. Azpi-multzo horiek jarraian azalduko dira, zehaztasunez. Guztira, 34 alarma gorri eta 26 anbar koloreko alarma izango ditu

garatutako BMSak.



9.6. irudia. Karga-prozesuaren mugak.

1. Alarma gorriak

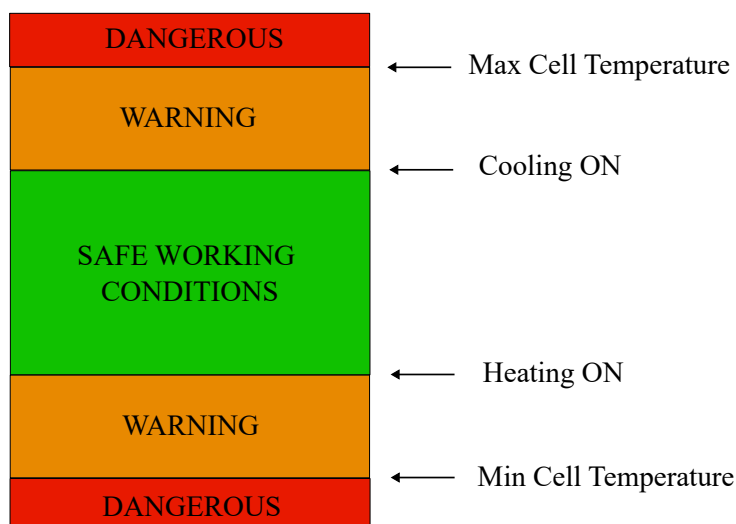
Larritasun altueneko alarmak, alarma gorriak, sistema osoa geldituko dutenak izango dira. Horiek izango dira aurretik aipatu den alarma globala aktibatzen dutenak, eta sistemaren egoera edozein izanda *Fail Safe* egoerara pasako da sistema. Lau azpi-multzotan banatzen dira alarma gorriak: tenperatura, neurketak, *timeout* eta kontaktoreak.

(a) *Tenperatura-alarmak*

Sistemak zelulen tenperatura neurtuko du etengabe. Balio horiek aurretik parametrizatutako mugekin konparatuko ditu, eta tenperaturak muga horien barnean mantentzen diren heinean, alarma-sistemak ez du abisurik bidaliko. Zelularen batek muga gainditzen duen momentuan sistemak alarma gorri globala aktibatuko du eta egoera-makina nagusia *Fail Safe* egoerara pasako da.

Tenperatura-mugak ez dira berdinak izango sistema karga- edo deskarga-egoeran badago. Horregatik garrantzitsua da muga guzti horiek fabrikatzailearen espezifikazioen arabera parametrizatuta izatea. BMS honen mugak 9.7. irudian ikus daitezke. Irudian gorritz ikus daitezke

alarma gorria aktibatuko luketen zonaldeak, bai tenperatura altuengatik, bai baxuengatik ere.



9.7. irudia. Tenperatura-alarmentzat eskema.

(b) *Neurketa-alarmaak*

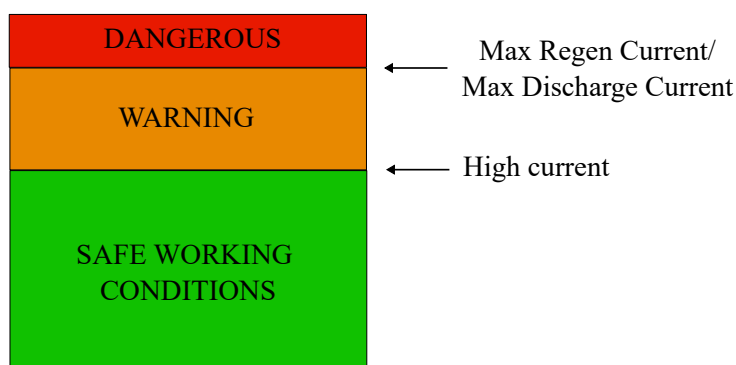
Aurreko atalean aipatu bezala, sistemak zirkuituaren hainbat parametro neurtuko ditu sentsoreen bidez eta parametrizatutako balioekin konparatuko ditu. Balio horiek alarmak aktibatzeko muga ezberdinak izango dira. Neurketen artean zelulen tentsioa, bateriaren tentsioa eta zirkuituan zehar dagoen korrontea egongo dira.

i. *Zirkuituan zehar dagoen korrontea.*

Korrontearekin lotutako alarmak aktibatzeko bi muga besterik ez ditu sistemak: deskarga-egoeran zirkuituak jasan dezakeen korrante maximoa eta karga-egoeran jasan dezakeena. Korrontearen balio minimoarekin ez dago inolako alarmarik, horrek sistema geldotuko balu ere, ez luke arazo larriarik sortuko. Mugak argi ikusteko 9.8. irudian erakusten dira.

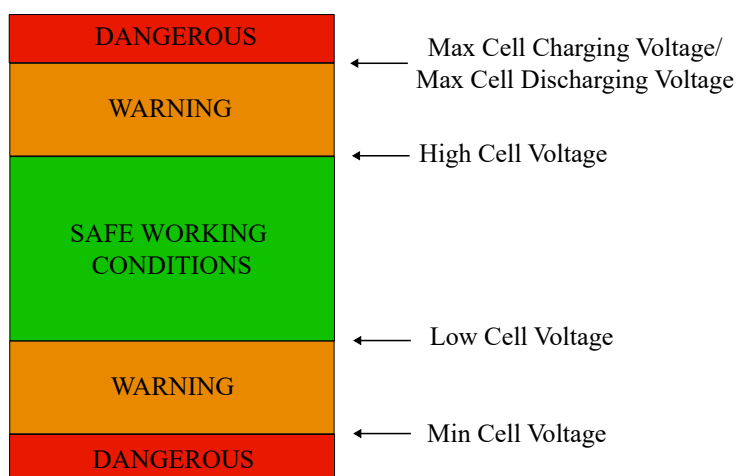
ii. *Zelulen tentsioak*

Zelula bakoitzaren tentsioen alarmak eta bateriaren tentsioaren alarma modu berean kudeatzen dira. Sistemak zelulen tentsioekin lotuta hiru muga izango ditu: karga-egoeran eta deskarga-egoeran



9.8. irudia. Korrante-alarmen atalaseen eskema.

tentsioa maximoa eta zelularen tentsio minimoa. Bateriaren segurtasuna bermatzeko ezinbestekoa da muga horiek ez gainditzea. Horregatik, zeluletako edozeinek mugaren bat gaindituko balu, sistema gelditu egingo litzateke. Muga horiek 9.9. irudian ikus daitezke.



9.9. irudia. Zelulen tentsio-alarmen atalaseen eskema.

iii. *Bateriaren tentsioa*

Zelulen tentsioarekin bezala, sistemak bateriaren tentsiorako hiru muga izango ditu. Normalean, zelulen tentsioa kontuan izanda bateriaren tentsioaren kudeaketa ez litzateke beharrezkoa izango. Hala ere, lagungarria da zelula guztien tentsioen baturaren kontrola izatea, neurketa-erroreak izatekotan konparaketa errazago

egiteko. Bateriarentzako alarmen mugen grafikoa zelulenaren berdina izango da, 9.9. irudian ikusi daitekeena, baina ,argi da goenez, parametrizatutako balioak zelulenak baino askoz altuagoak izango dira.

(c) ***Timeout-alarma***

Timeout-alarma aktibatuko da sistemak ezarritako denbora tarte batean sekuentzia edo prozesu bat betetzen ez bada. Denbora-tarte horiek BMSak ezarriko ditu, blokearen arabera, eta seinalerik jasotzen ez badu denbora horren barruan *Fail Safe* egoerara pasako da.

Sistema osoan zehar, guztira, lau *timeout*-alarma egongo dira. Hori-etako bi 9.1.3. ataleko *Idle to charging/discharging* atalean azaldu diren errore-etako bi izango dira: aurre-kargaren falta eta korrontearen-falta. Beste biak egoera-makina nagusiaren barnean aurki daitezke. Bi horiek karga- eta deskarga-egoeretara igarotzeko sekuentziekin lotuta daude. Egoera-makinak segundo bat itxarongo du trantsizioa betetzeko, eta denbora horren barruan sekuentziek bukaera seinalea bidaltzen ez badute, egoera-makinak *timeout*-alarma aktibatuko du eta sistema gelditu egingo da. Azkeneko bi *timeout*-alarma pareak *uint8* aldagai batekin adieraziko da. "1" karga-egoerara igarotzeko sekuentziaren *timeouta* izango da eta "2" deskarga-egoerakoa.

(d) ***Kontaktore-alarma***

Sistemarentzako oso garrantzitsua da kontaktoreak modu egokian itxi direla jakitea. BMSaren zeregina da kontaktoreen itxiera-seinaleak kudeatzea eta horiek ondo ez heltzekotan sistema geldiaraztea. Alarma horiek 1 atalarekin daude lotuta, hori da, konektoreak ireki eta isteko sekuentziekin. Bereziki, *Idle to charging* eta *Idle to discharging* sekuentziekin, sekuentzia horiek egoera bat baitute kontaktoreen kontaktu eza kudeatzeko.

Kudeaketa sinplifikatzeko, *int8* aldagai bat erabili da. Kontaktore bakoitzeko errele bakoitzari balio bat eman zaio, 9.6. taulan ikus daitezkeenak. Balio hori alarma-kudeaketa blokeari bidaliko da. Hala ere, balioak ez dira ausazkoak. Alarma-kudeaketak ahalik eta sinpleenak izateko, errele bakoitzari 8 biteko zenbaki bitar batekin lotutako balio bat ezarri zaio. Horrela, arazoa eman duen errelea identifika daiteke, 8 bloke besterik ez direlako behar, errele bakoitzeko bat, eta aurretik

bitak banatzeko bloke bat.

9.6. taula. Kontaktore bakoitzeko erreleak eta horien deskriptorea.

Kontakorearen errelea	deskrip.	Kontakorearen errelea	deskrip.
$S_{pch,1}$	1	$S_{pch,2}$	2
$S_{chg,1}$	4	$S_{chg,2}$	8
$S_{p,1}$	16	$S_{p,2}$	32
$S_{load,1}$	64	$S_{load,2}$	128

Sistemak errele bakoitzarentzat alarma zehatzak baditu ere, garrantzitsuagoa da kontaktore-sistema osoaren huts egitea erregistratzea. Horregatik, errele pare bakoitzaren arteak OR bloke batean sartzen dira, kontaktore bakoitzearen kontaktu-alarma eratuz.

Alarma aktibatzeke erabiltzen diren blokeak 9.10. irudian ikus daitezke. Kontaktu-alarma guztien blokeak modu berean eratu dira, OR bloke bat, AND bloke bat eta *Set/Reset* motako Flip-flop bat erabiliz.

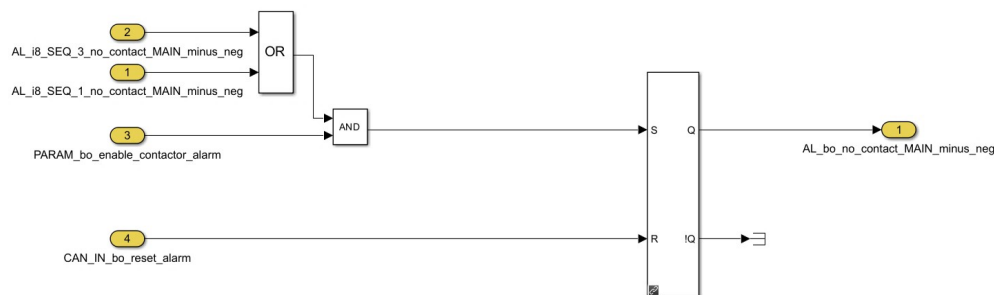
2. Anbar koloreko alarmak

Anbar koloreko alarmak sisteman zehar arazoren bat egongo delakoaren oharra dira. Ez dute inola ere sistema geldiaraziko, baina erabiltzailea edota sistema jakinarazten dute, arazo larria gertatzea saihestu ahal izateko. Alarma gorriak bezala, anbar koloreko alarmak konparaketa blokeekin egiten dira. Bi multzotan sailkatzen dira anbar-koloreko alarmak: tenperatura alarmak eta neurketa alarmak.

(a) *Tenperatura-alarma*

Anbar koloreko tenperatura alarmak arazo larri baten konponbidea izan daitezke. Sistemak zelula bakoitzaren tenperatura neurtuko du, eta alarmaren muga gainditzean, bi ekintza gerta daitezke:

- Tenperaturaren goi-muga gainditzean, sistemak hozkailu bat aktibatuko du.



9.10. irudia. Kontaktu-alarma baten aktibazio blokeak

- Tenperaturaren behe-muga gainditzean, sistemak berogailu bat aktibatuko du.

Gestio termikoa duten sistemetan besterik ez litzateke gertatuko aurretik azaldutakoa. Bestela, erabiltzailearen edota ECU nagusiaren esku egongo litzateke alarmaren kudeaketa, alarma gorrira ez heltzeko.

(b) *Neurketa-alarmak*

Anbar koloreko neurketa-alarmak oharrak dira, eta erabiltzailearen edo ECU nagusiaren esku egongo da neurtutako aldagaiak sistema egoera larriago batera ez heltzea.

9.1.5. Funtzioak

Sekuentziez gain, funtzioen azpi-sistema bat izango du BMSak trantsizioekin lotuta ez dauden zereginak kudeatzeko. Funtzioen azpi-sistemak hurrengoak izango ditu: SoCaren estimazioa eta zelulen orekatzeaz arduratzen diren blokeak.

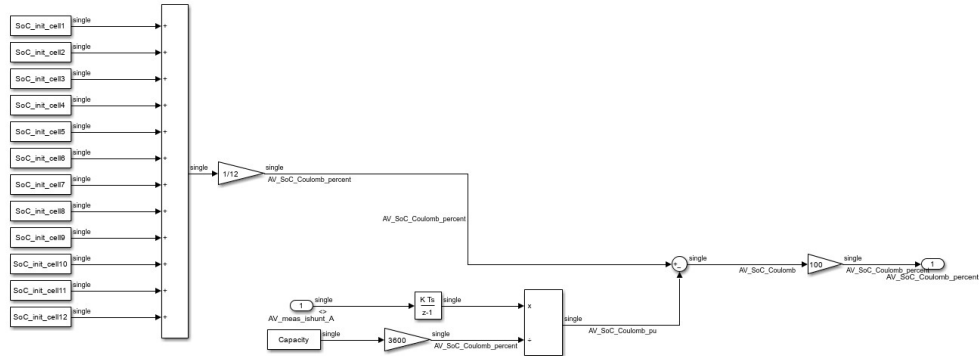
1. SoCaren estimazioa

Garatutako BMSak bateriaren SoCaren estimazio orokorra egingo du, zelula bakoitzaren SoCarenaren orde. Horretarako, bi era erabiltzen ditu sistematik: EKF bidezko estimazioa, 5.3.1. atalean azaldu dena, eta Coulomb kontuaren bidezko estimazioa.

EKF bidezko estimaziorako blokeari zelula guztien batz besteko tentsioa bidaliko zaio, eta horrekin SoC orokorraren balioa itzuliko du EKF algoritmoak. Metodo honen bidez ez da posible zelula bakoitzaren SoCa kalkulatzeara.

Bestalde, Coulomb kontuarekin egindako SoCaren estimazioa 9.11. irudian erakusten den eran egin da. Irudian, (9.1) errepresentatzen da, baina matematikoki egin ordez MBD erabiliz. Kontuan izan da estimazioa karga-prozesua gertatzen denez, korrontea beti negatiboa izango dela. Hori dela eta, batuketa egin ordez kenketa egin da, korrontearen zeinua aldatuz.

$$SoC(k) = SoC(k-1) + \frac{i(k)}{Q_c} T_s, \quad (9.1)$$



9.11. irudia. Coulomb kontua aplikatzeko erabilitako blokeak.

Zehazki, (9.1)n Q_c zelularen karga izango da, parametro bezala sartuta sisteman, eta T_s laginketa-periodoa. Metodo hori oso erabilia da industrian, karga konputazional txikia duelako eta konponbide sinplea delako [30].

Hala ere, lan honetan Coulomb kontua EKF bidezko estimazioarekin konbinatzea proposatzen da, estimaziorako bi emaitza alternatibo izanik sistema mardulagoa delako. ECU nagusiak erabakiko luke zer egin bi metodoen arteko emaitzek dibergentzia handia sortuko balukete.

2. Zelulen oreka egiteko blokeak

Karga-prozesua eta zelulen-orekatzea sekuentzia baten bidez kudeatzen bada ere, *Simscape* liburutegiko bloke batek egingo du zelulen deskarga/karga bera. Bloke horrek zelula guztien tentsioak jasotzen ditu eta haien artetik tentsio minimoa hartzen du. Beste guztiekin konparatu, eta parametro bezala ezarritako atalase bat gainditzen duten zelulei seinalea bidaliko die, deskarga ahalbidetuz. Garatutako sistemaren kasuan bi atalase ezberdin ezarri behar izan dira: karga geldoa gertatzen den bitartekoa eta karga geldi dagoenekoa. Horregatik, bi bloke ezberdin erabiltzen dira. Zelula guztien tentsioak ezarritako balio minimo eta maximoen artean daudenean blokeek orekatzea geldituko dute eta sekuentzia bukatu egingo da.

9.1.6. Neurketen egokitzapena

BMSa bateria baten zirkuitu baliokide batera dago konektatuta, eta bertatik hainbat aldagaien inguruko neurketak jasotzen ditu. Neurtutako aldagaiak horiek sisteman erabili ahal izateko sistemaren espezifikazioetara egokitu behar dira (sistema-internazionala). Horretarako, sistema parametrizatu da eta tentsio guztiei offset balio bat eta irabazi bat gehitu zaie. Korrontearen kasuan, parametrizatutako irabazi eta offsetaz gain, 2 atalean azaldutako sekuentziatik lortutako sentsorearen offseta ere gehitu behar zaio. Azkenik, aldagai guztiak single motara aldatuko dira, horiek baitira sistemak onartzen duen formatu numerikoa, eta egokitzapena bukatutzat emango da. BMSan erabiltzen diren neurketa-parametro guztiak azpi-sistema horretatik hartuko dira.

9.1.7. Komunikaziorako sarrera- eta irteera- blokeak

BMSak bere funtzioak bete ahal izateko ibilgailuaren beste atal batzuekin komunikatu behar izango da. Horretarako, komunikazio-kanalak erabiltzen dira. Horien bidez, alarmen-kudeaketa eta kargagailuaren kudeaketa egin daiteke, adibidez.

Gradu Amaierako Lan honetan ez da komunikaziorik garatu. Hala ere, azpi-sistemen bidez CAN (Controller Area Network, ingelesez) komunikazioaren sarrera eta irteera simulatu da. Sarrera blokeak 9.1.2. atalean azaldutako trantsizio-

rako mezuak jasotzen ditu, eta egoera-makina nagusiari bidaltzen dizkio. Irteerak, berriz, hurrengo seinaleak bidaltzen ditu: Alarma guztiak batzen dituen busa, bi SoC estimazioak eta kargagailuak funtzionatzeko behar duen informazioa.

Etorkizunerako lan modura, hurrengo pausoa komunikazio azpi-sistemen ordeztu mikroprozesadore batean aplikatu daitezkeen komunikazio-kanalak inplementatzea izango litzateke. Masterreko Amaierako Lanean garatu litezke funtzionalitate horiek guztiak, mikrokontrolagailu batetan integratuz eta sistema esperimentalki balioztatuz.

10. kapitulua

Simulazio-emaitzak

Sistemaren egiaztapen funtzionala egin ahal izateko proba ugari gauzatu dira *Matlab/Simulink*en bidez. Simulazio horiek intereseko kasuak kontuan hartuz egin dira, garatutako bloke guztiak frogatuz. Kontrol-algoritmoa plantaren modeloaren gainean probatu da, 200 ms-eko laginketa-periodoarekin. Zarata bayesiarra gehitu zaie korrante eta tentsio sensoreei simulazio egoera erreala goa lortu ahal izateko.

10.1. Kondentsadoreen aurre-karga prozesua

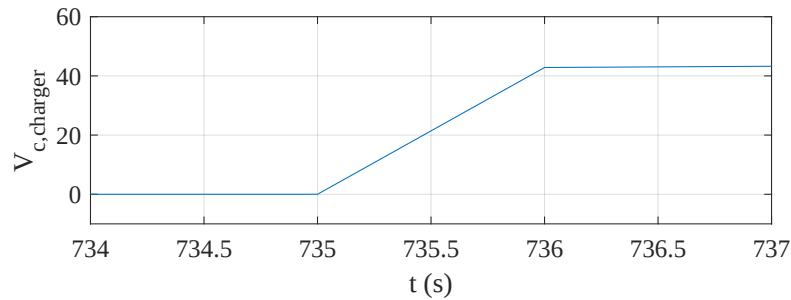
Bereziki garrantzitsua da karga- eta deskarga- egoeretara igarotzean kondentsadoreen aurre-karga egitea. Horrek, zirkuitu-laburrak saihestuko ditu zirkuituan.

Aurre-karga sekuentzien bidez gauzatzen da, aurre-karga kontaktorea ($S_{pch,j}$) erabiliz. Sekuentziak aurrera egin aurretik, bateriak momentuan duen tentsio bertsua lortu behar dute kondentsadoreek, terminal positiboko kontaktore nagusia ($S_{p,j}$) konektatu aurretik. Aurre-karga prozesua zuzena izango ez balitz, sistema alarma egoerara pasatuko litzateke.

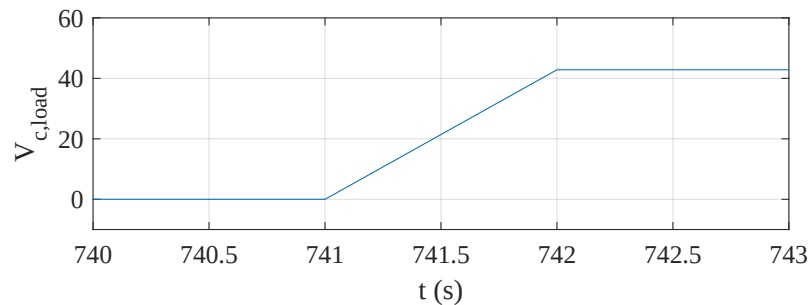
Kondentsadoreen aurre-karga prozesua azkarra da, 10.1.(a) eta 10.1.(b) irudietan ikus daitekeen bezala. Prozesu osoak karga-prozesuaren segundo bakarra hartuko du, kargak berak behar dituen ordukin konparatuta.

10.2. Karga-prozesua

Zehaztasunez azaldu da sekuentzia hau 9.1.3. ataleko *Zelulen-orekatze pasiboa/Karga-prozesua* atalean, eta atal honetan prozesuarekin lotutako hainbat simulazio erakutsiko dira: zelulen tentsioaren aldaketa, zelulen SoC balioen aldaketa



(a) Kargagailuaren sarrerako kondentsadorearen aurre-karga.



(b) Propultsio-sistema eragiten duen inbertsorearen sarrerako kondentsadorearen aurre-karga.

10.1. irudia. Kondentsadoreen aurre-karga.

prozesuan zehar, zirkuituaren korrantearen aldaketa, bateriaren tentsioa prozesuan zehar, eta orekatze-prozesuko MOSFETen itxiera eta irekiera seinaleak.

Karga-prozesua simulatzeko, desoreka bat inposatu da zeluletan, 10.1. taulako balioak emanez. Hasieran, korrante maximoarekin egingo da karga, eta zelulen tentsioak azkar igoko dira. $t = 811$ s-tan tentsio altueneko zelulak lehenengo muga gainditzen du, eta sistemak tentsioaren balioa txikituko du. Karga geldotuko da, baina ez da zelulen orekatzea hasiko. Zelulen orekatze-prozesua $t = 2548$ s-tan hasten da, tentsio maximoa duen zelulak *Cell Target Voltage* atalasea igarotzean. Momentu horretatik aurrera tentsioen balioak berdintzen doaz, refsub:sek ataleko *Zelulen-orekatze pasiboa/ Karga-prozesua* atalean azaldutako 4. eta 5. pausoak errepikatuz, 10.2.(a) irudian ikusten den bezala. Zelulen tentsioak berdindu egiten dira 0,01 Veko ezberdintasuna izan arte, $t = 22171$ s-an gertatu dena. Orokortasunik galdu dabe eta sinpletasunagatik, grafikoan ez dira hamabi zelulen tentsioak errepresentatu balioak hobeto ikusi ahal izateko.

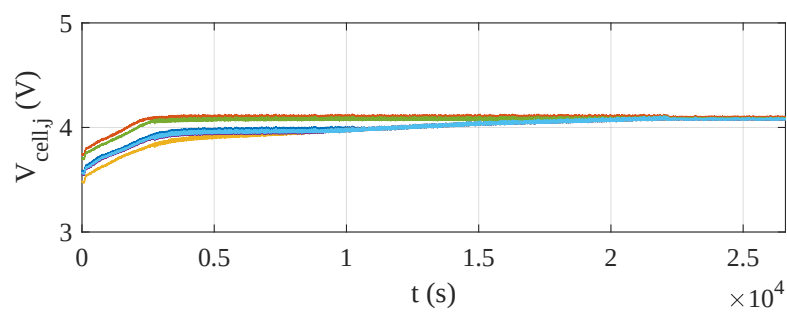
Zelula guztiak SoC ezberdinarekin hasten direla jakinda, karga-prozesua era egokian bete dela ikusi dezakegu 10.2.(b). irudian, orekatzea gertatu eta SoC balioak berdindu direlako. Grafiko horretan, hamabi zelulen SoC balioen erre-presentazioa ikus daiteke, kargaren hasieratik amaierara. Hasierako segundoetan SoC balioak nabarmen hasiko dira, karga korronte maximoarekin egingo delako. Zelulen-orekatzea hasten denean, igoera hori moteldu egiten da, SoC altuenak geldi mantenduz. Karga-prozesua amaitzen denean zelula guztiak 0.1 V-eko ezberdintasunarekin egongo dira bakarrik.

Karga-prozesuan zehar korrontearen aldaketak egongo direla aipatu da aurretik. Aldaketa horiek argi ikusten dira 10.2.(c). irudian. Bertan, karga-prozesu osoan zehar korrontearen aldaketak errepresentatzen dira. Hasieran, denbora labur batean, korronteak bere balio maximoa izango du, 4 A. Aurretik azaldu den bezala, tentsio altuera duen zelulak lehenengo atalasea igarotzean, korrontearen balioa jaitsi egingo da, baina konstante mantenduko da oraindik. Zelulen-orekatzea zelulen tentsioak bigarren atalasea igarotzean hasiko da, eta 10.2.(c). irudian argi ikusten da zehazki noiz gertatzen den hori. Momentu horretatik aurrera, korrontea 0 A eta 3,7 A artean oszilatzen ibiliko da, $t = 22171$ s-an karga-prozesua bukatu eta 0 A-tan geratu arte. Korrontearen balioaren oszilazioak 3. atalean azaldutako 4. eta 5. pausoak baieztatzen ditu.

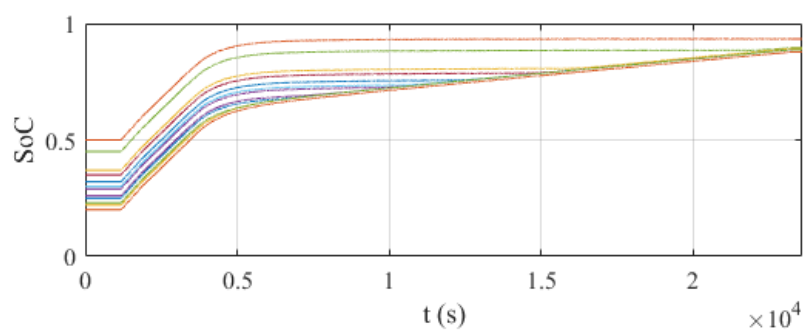
10.1. taula. Zelulen hasierako SoC balioak.

Zelula zenbakia	SoC(%)	Zelula zenbakia	SoC (%)
1	32	7	35
2	50	8	95
3	22	9	20
4	29	10	37
5	45	11	26
6	30	12	23

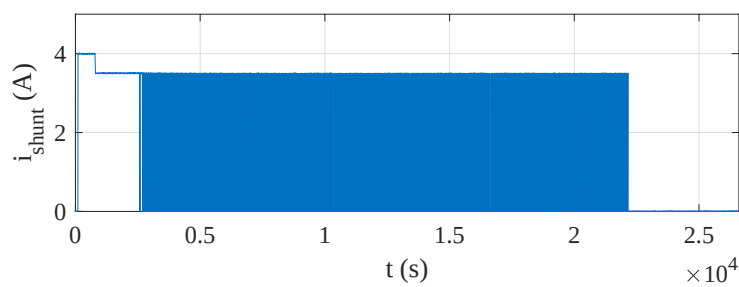
Zelula-mailan ikusi da aurretik karga-prozesua, baina interesgarria da ere bateri-mailan balioen aldaketak ikustea. Simulaziorako erabiltzen den bateriak 4,1 V-eko 12 zelula izango ditu, gutxi gorabehera 50 V-eko tentsio nominala izanda. Kargaren hasieran bateriaren tentsioa 42 V-etan dago. Kargatzen hasten denean,



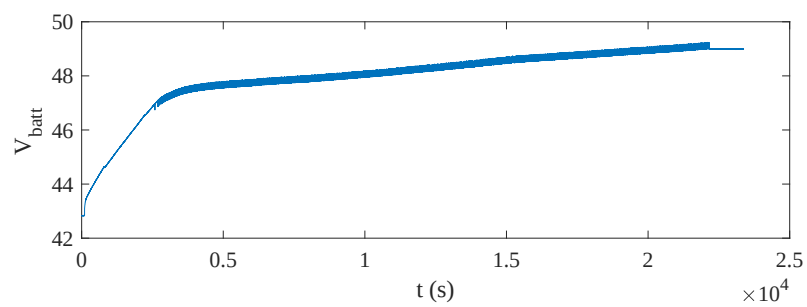
(a) Karga prozesuan zehar zelulen tentsioak, desoreka-egoeratik hasita.



(b) Zelulen SoC balioa karga-prozesuan zehar.



(c) Karga prozesuan zehar korrontearen aldaketak.



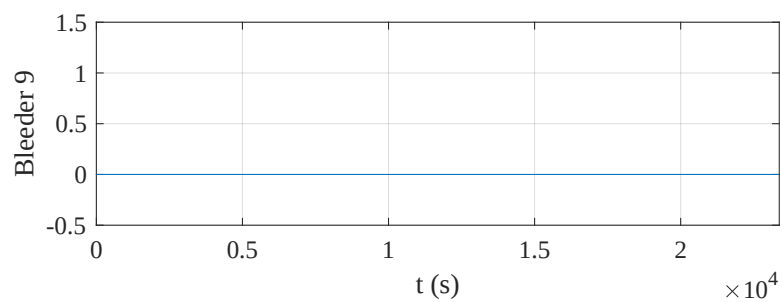
(d) Bateriaren tentsioa, karga-prozesuan zehar.

10.2. irudia. Karga prozesua.

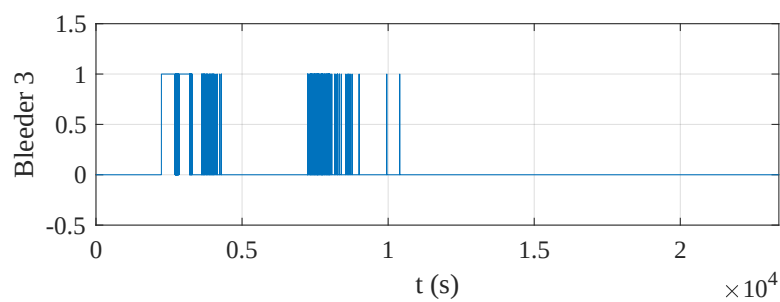
balioa azkar hasten da, ia 47 V-etara helduta kargaren lehenengo zatian. Hala ere, 10.2.(d). irudian ikusten den bezala, azkenengo 2 V-ek karga-prozesuaren zati gehiena hartzen dute. Horren arrazoia da zelulen orekatzea, karga etengabe gelditu eta hasten delako. Azkenean, karga bukatutzat ematen denean, bateriak 49 V izango ditu.

Azkenik, interesgarria da zelulen-orekatze pasiboa ahalbidetzen duten MOSFETen seinaleak ikustea. Haien seinaleak aztertuta, bost kasu interesgarri daudela ondoriozta daiteke:

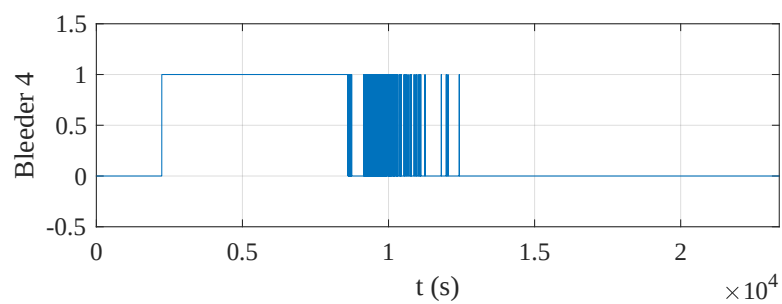
1. *MOSFETa ez da ixten.* SoC balio baxuena duen zelulak, 10.1. ikusten den bederatzigarrenak, ez du karga-prozesuan zehar deskargarik izango. Horregatik, 10.3.(a). irudian ikus daiteke nola harekin lotutako MOSFETera ez dela inolako seinalerik heltzen.
2. *Zelula orekatuko da, baina denbora laburrez.* Kasu honetan, zelularen hasierako tentsioa baxua bada ere, ez da baxuena izango. Horregatik, SoC baxuena duen zelulara berdindu arte orekatuko da zelula horren tentsioa. Momentu horretatik aurrera, ez du deskarga gehiagorik izango. Kasu hori 10.3.(b). irudian ikus daiteke, eta 10.1. taulako hirugarren zelularekin bat dator.
3. *Zelula hasieran asko deskargatzen da.* Zelula gehienek betetzen duten kasua izango da hori. SoC altuenaren eta baxuenaren arteko erdialdean dauden zelulak izango dira. Karga-prozesuaren zati handia emango dute deskarga-egoeran, baina prozesua amaitu baino lehen orekatuko dira, eta prozesuaren azken zatia seinalerik gabe beteko dute. 10.3.(c). irudian ikusten da kasu hori. Kasu horretan 10.1. taulako laugarren zelula hartu da adibidetzat.
4. *Zelula ia prozesu osoan zehar deskargatzen da.* Kasu hori hasieratik SoC nahiko altua duten zeluletan gertatuko da, baina SoC altuena ez dutenean. Karga-prozesuan zehar, zelulen-orekatzea hastean, etengabe deskargatuko da, karga amaitzear dagoen arte. Azkenengo momentu horietan, bere deskarga geratuko da, zelula orekatutzat emanda, 10.4.(a). irudian ikusten den bezala. 10.1. taulako hamargarren zelula izango da hori betetzen duena.
5. *Zelula prozesu osoan zehar deskargatzen da.* Azken kasua SoC altuena izango duen zelularekin lotuta dago, 10.1. taulako bigarrena. Zelula horren kasuan orekatze-prozesu osoan zehar deskargatzen egongo da. Horrek esan nahi du kargaren hasierako zatian bakarrik kargatuko dela. Zelula hori izango da kargaren atalaseak igarotzen dituen lehena.



(a) Karga-prozesuan zehar hustu behar izan ez den zelula.

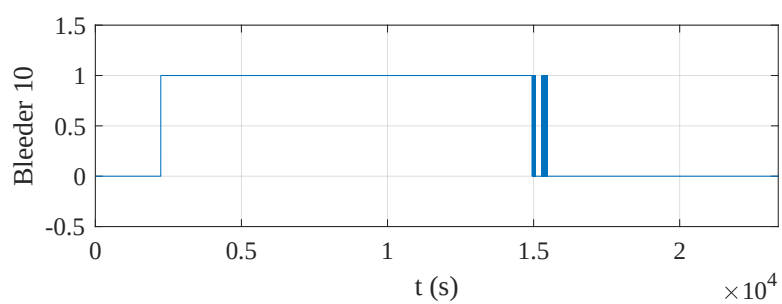


(b) Karga-prozesuan zehar hasieran besterik ez hustu behar izan den zelula, aldizka.

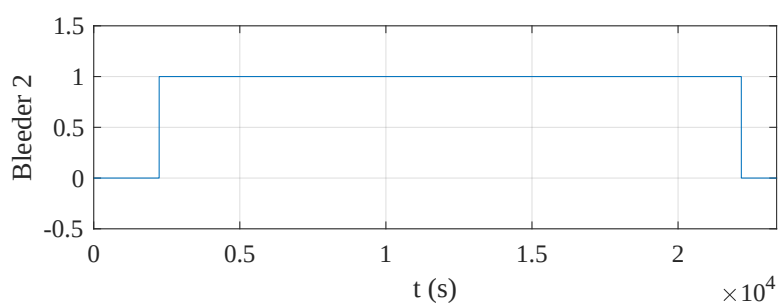


(c) Karga-prozesuaren hasieran hustu, baina erdialdera orekatu den zelula.

10.3. irudia. Karga prozesuan zehar *bleeder* erresistentziak aktibatzeke MOSFETen seinaleak.



(a) Karga-prozesu gehiena husten eman duen zelula.



(b) Karga-prozesua bukatu den arte orekatu ez den zelula.

10.4. irudia. Karga prozesuan zehar *bleeder* erresistentziak aktibatzeko MOSFETak (2).

10.3. Kontaktoreak eta sekuentziak

BMSaren funtzio nagusietako bat zirkuitua konektatzen duten kontaktoreen kontrola da. Sistemak haien irekiera eta itxiera baimenduko ditu bateria modu seguruan erabili ahal izateko. Kontaktoreek itxiera-baieztapen seinalea dutenez, erraza da simulazio bidez haien funtzionamendu egokia frogatzea. Jarraian erakutsiko dira, sekuentzietan banatuta, kasurik interesgarrienak.

10.3.1. *Idle to charging* eta *Charging to idle* sekuentziak

Idle to charging eta *Charging to idle* sekuentziak aurreko atal batean (9.1.3. atala) azaldu dira, haiekin lotutako kontaktoreen erabilera zehaztasunez azalduz. Jarraian, haien funtzionamendua baieztatuko da hainbat simulazioen bidez. Emaitzak lortzeko karga-prozesu osoa simulatu da, kontaktoreen erabilera osoa hartzen baitu.

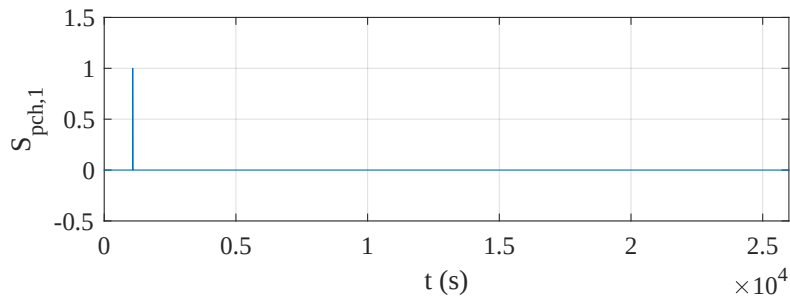
Bateria kargarako prestatzea da sekuentzia horien helburua, eta jakina da bateria konektatzeko $S_{pch,j}$, $S_{p,j}$ eta $S_{chg,j}$ kontaktoreak erabiltzen direla. Hala ere, kontaktore bakoitzak denbora jakin bat emango du itxita karga-prozesuan zehar. Aurre-karga kontaktorea, adibidez, segundo bakarrez itxiko da, hori delako kondentsadoreen aurre-karga egiteko behar den denbora, 10.5. irudietan ikusten den bezala. Bi erreleak aldi berean ixten ez diren arren, simulazioan horrela nabarrituko da, ixten diren denboren arteko ezberdintasuna ez delako nahiko handia.

Bestalde, $S_{p,j}$ eta $S_{chg,j}$ kontaktoreak karga-prozesu osoan zehar egongo dira irekita, baina ez denbora bera. Terminal positiboko kontaktorea terminal negatiboko kontaktorea baino segundo bat gutxiago egongo da itxita, aurre-kargan ez delako erabiliko. Hala ere, 10.6. eta 10.7. irudietan ezberdintasun hori ez da nabarrituko. Azkenik, $S_{load,j}$ kontaktorea ez denez erabiltzen, 10.8. irudian ikusten den bezala, ez da seinalerik egongo.

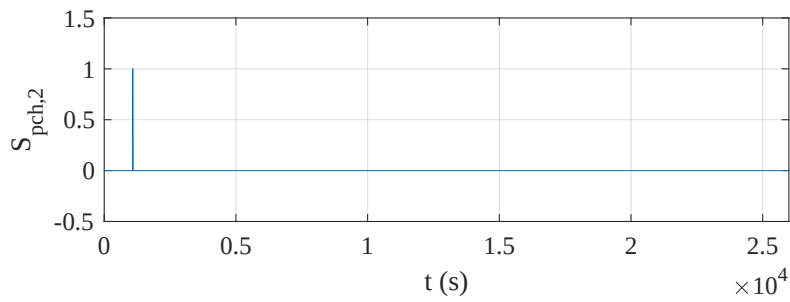
10.3.2. *Idle to discharging* eta *Discharging to idle* sekuentziak

Idle to discharging eta *Discharging to idle* sekuentziak deskarga ahalbidetzeko bateriaren prestakuntza besterik ez dira, GrAL honetan deskarga bera ez baita landu. Hala ere, interesekoa da kontaktoreen jokaera ikuskatzea, horretarako simulazioan zehar lortutako irudiak erabiliz.

10.9. irudiek erakusten dute sekuentzia horretan ere, aurrekoetan bezala, segundo bakarreko prozesua dela. Gainera, simulazio denbora batez gelditu denez, 10.10. eta 10.12. irudiek erakusten dute nola kontaktore hauek, $S_{p,j}$

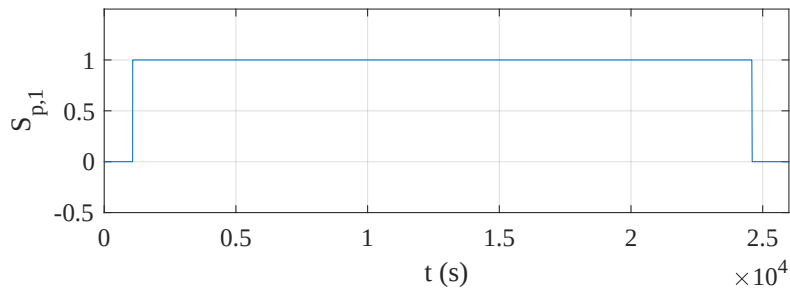


(a) Aurre-karga kontaktorearen errele positiboa.

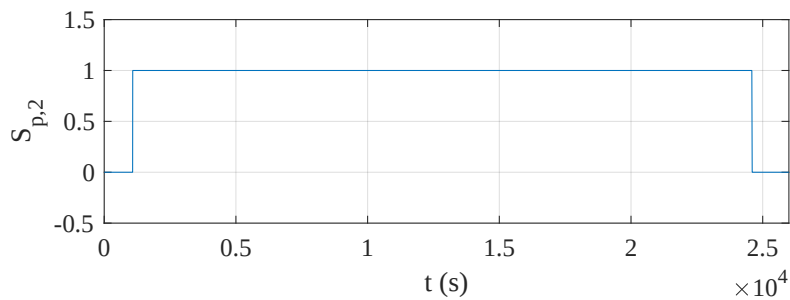


(b) Aurre-karga kontaktorearen errele negatiboa.

10.5. irudia. Aurre-karga kontaktoreen seinalea *idle to charging* sekuentzian.

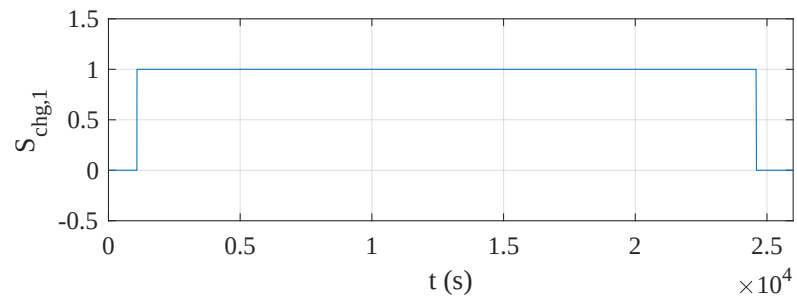
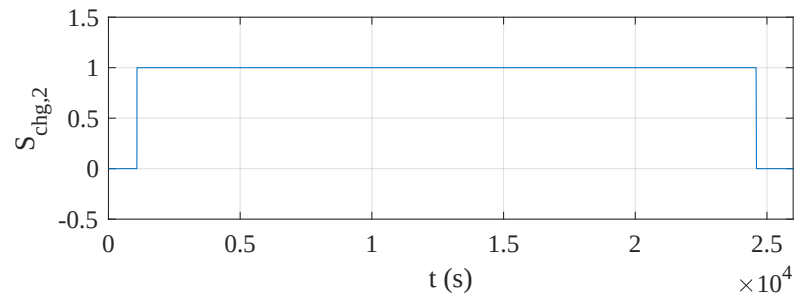


(a) Kontaktore positiboaren errele positiboa.

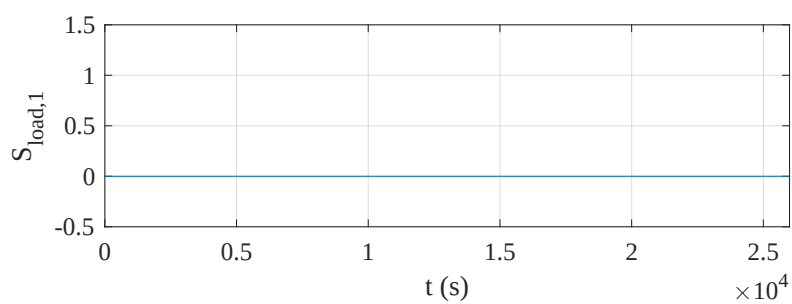
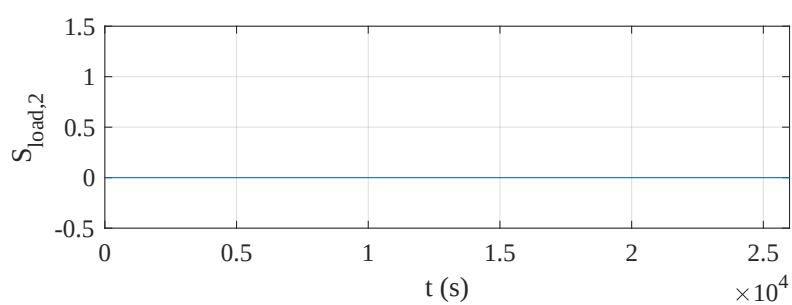


(b) Kontaktore positiboaren errele negatiboa.

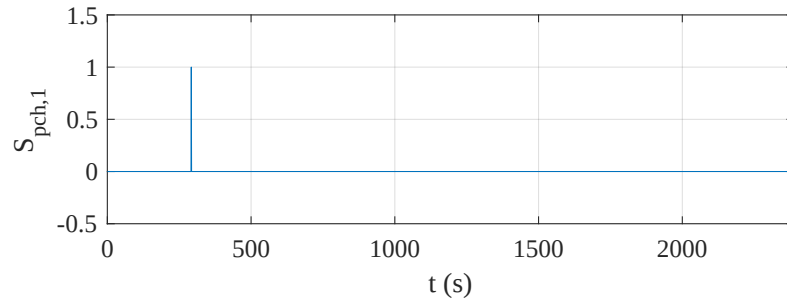
10.6. irudia. Kontaktore positiboaren seinalea *idle to charging* sekuentzian.

(a) $S_{chg,1}$ errelea.(b) $S_{chg,2n}$ errelea.

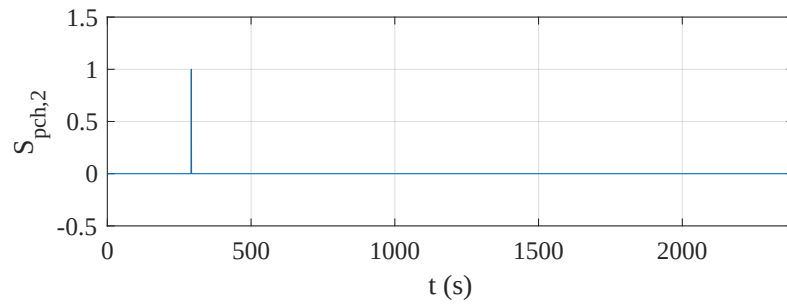
10.7. irudia. $S_{chg,j}$ kontaktoreen seinalea *idle to charging* sekuentzian.

(a) $S_{load,1}$ errelea.(b) $S_{load,2}$ errelea.

10.8. irudia. $S_{load,j}$ kontaktoreen seinalea *idle to charging* sekuentzian.



(a) Aurre-karga kontaktorearen errele positiboa.



(b) Aurre-karga kontaktorearen errele negatiboa.

10.9. irudia. Aurre-karga kontaktoreen seinalea *idle to discharging* sekuentzian.

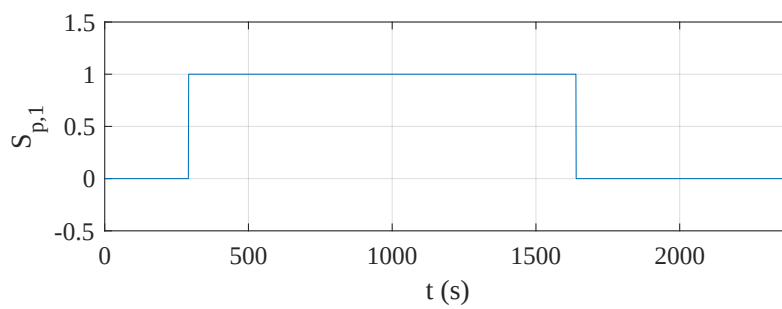
eta $S_{load,j}$, itxita egongo direla deskarga hasi ahal izateko. Halaber, 10.11. irudiak erakusten du $S_{chg,j}$ kontaktorea ez dela erabiltzen zirkuitua deskargarako prestatzeko.

10.4. SoCaren estimazioa

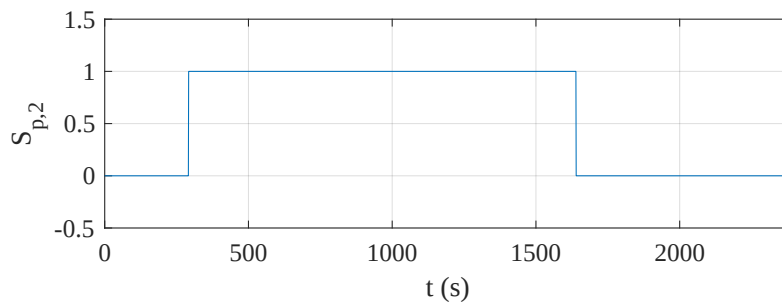
SoCaren estimazioa BMSaren funtsezko funtzioa da. Hori dela eta, GrAL honetan bi eratan estimatzea erabaki da: EKF bidez eta Coulomb kontuaren bidez. Horien funtzionamenduaren inguruko azalpen zehatza 5.2.3. ataleko *SoCaren estimazioa* atalean egin da, eta jarraian metodo horiekin lotutako simulazio-emaitzak erakutsiko dira. Horiek lortzeko, karga-prozesu osoa simulatu da, SoCak aldaketa gehien jasotzen duen prozesua baita.

1. EKF bidezko estimazioa

EKF bidezko estimazioak bateria-pack osoaren SoC balioa erakusten du.

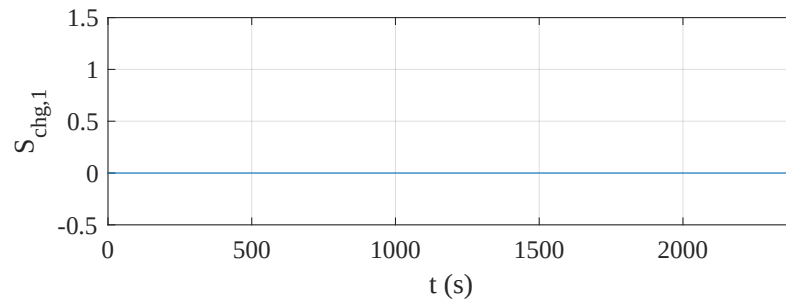
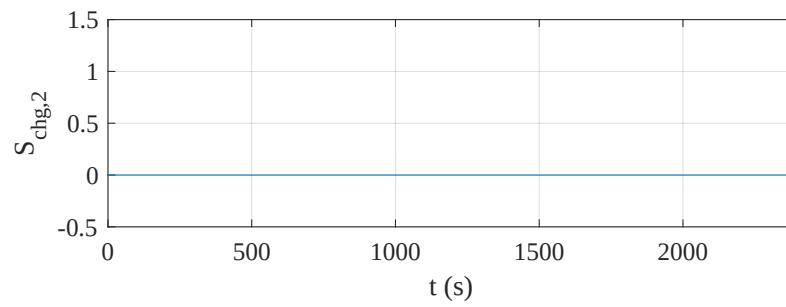


(a) Kontaktore positiboaren errele positiboa.

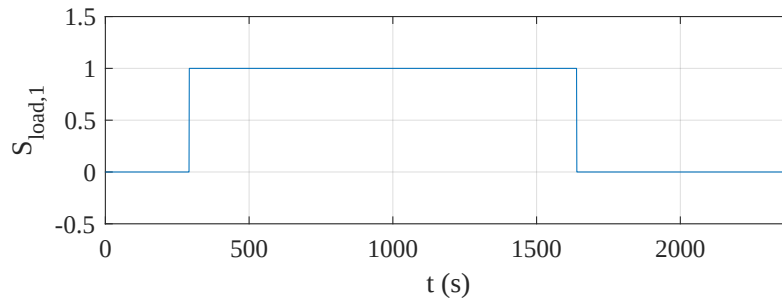
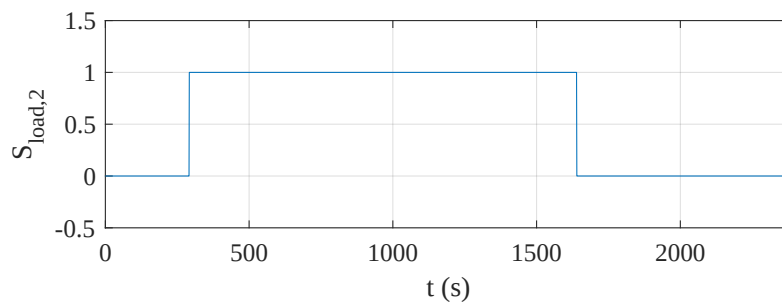


(b) Kontaktore positiboaren errele negatiboa.

10.10. irudia. Kontaktore positiboaren seinalea *idle to discharging* sekuentzian.

(a) $S_{chg,1}$ errelea.(b) $S_{chg,2}$ errelea.

10.11. irudia. $S_{chg,j}$ kontaktoreen seinalea *idle to discharging* sekuentzian.

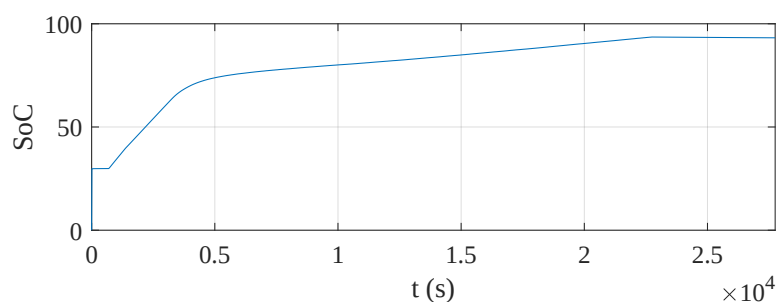
(a) $S_{load,1}$ errelea.(b) $S_{load,2}$ errelea.

10.12. irudia. $S_{load,j}$ kontaktoreen seinalea *idle to discharging* sekuentzian.

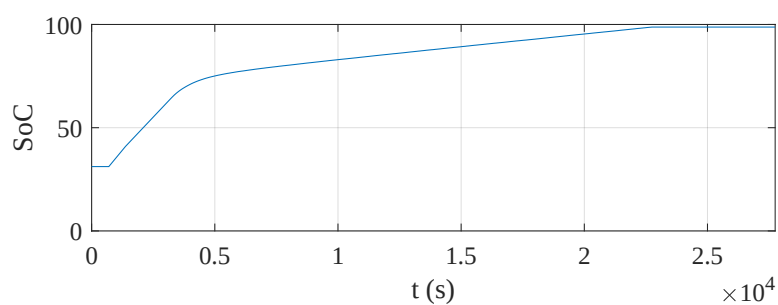
Karga-prozesuan zehar balio horren bariazioa 10.13. irudian ikus daiteke. Irudia begiratzuz ikusi daiteke kargaren hasieran bateriak % 50eko SoCa baino gutxiago duela, eta prozesuaren amaieran % 93ra heldu dela. Bateria baten karga ez da inoiz % 100 izango, gehiegizko karga saihesteko.

2. Coulomb-kontuaren bidezko estimazioa

Coulomb kontuaren bidezko estimazioa ez da EKF bidezkoa bezain zehatza. Hala ere, oso erabilia da industria karga konputazional txikia duelako (EKF algoritmoak karga konputazional eta konplexutasun handiak ditu). Kasu horretan, 10.14. irudiari erreparatuz, ikus daiteke EKFaren kasuan bezala, % 50 baino baxuagoa den balio batetik hasten dela sistema, baina, kasu honetan, ia % 100 helduko da karga amaitzean. Honen arrazoia zehaztasun falta da, aurretik esan bezala bateria ez bai da karga osora inoiz heltzen errealitatean.



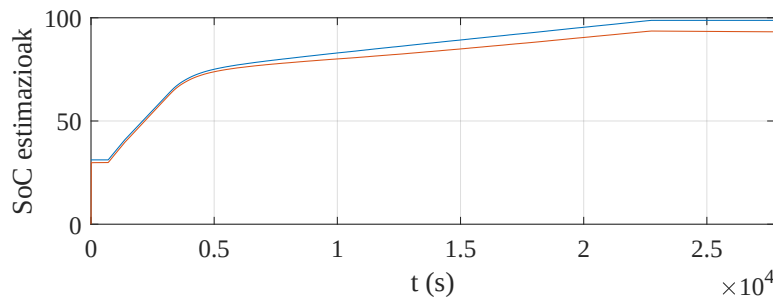
10.13. irudia. EKF bidezko SoCaren estimazioa.



10.14. irudia. Coulomb kontuaren bidezko SoCaren estimazioa.

3. Bi estimazio-metodoen konparaketa

Azkenik, interesgarria da bi estimazio-metodoak grafiko berdinean ikustea, haien arteko ezberdintasunak argi ikusi ahal izateko. 10.15. irudian, gorri, EKF bidezko estimazioa ikus daiteke, eta urdinez Coulomb kontuaren bidezkoa. Bata bestearen ondoan ikusita, argi geratzen da Coulomb kontuak balio altuagoak estimatzen dituela, zehaztasun falta duelako (errorea integratuz doa). Bestalde, ondoriozta daiteke ez bata ezta besteak ez duela zehaztasun osoa, bateriaren karga totala, normalean, % 80 inguruan geratzen baita. Hala ere, karga-prozesua amaituta egoera ezagun batera heltzen denez sistema (tentsio nominalaren arabera), estimadoreak erreseteari daitezke erroreak murrizteko.



10.15. irudia. Coulomb kontuaren bidezko SoCaren estimazioa

10.5. Alarmak

BMSak segurtasuna bermatu behar du bateriaren erabilera egokia izateko. Horregatik, alarma-sistema osoa garatu da. Atal honetan alarma horien funtzionamendu zuzena baieztatuko da, sisteman erroreak behartuz.

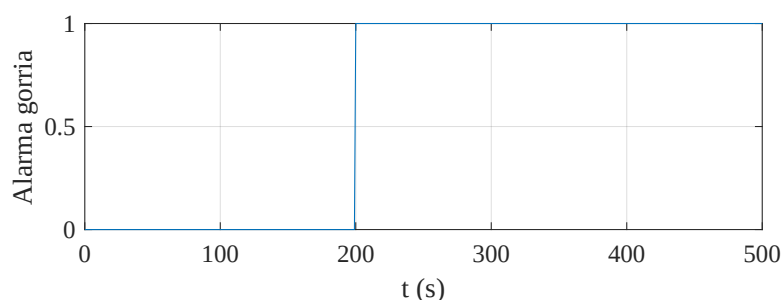
1. Temperatura-alarmak

Bateriaren erabileran zehar bere temperatura aldatuko da, bai ingurunearen arabera, bai egoeraren arabera. Horregatik, ezinbestekoa da zelula bakoitzaren temperatura kontuan izatea. Sistema honetan, modelo termikorik ez dagoenez integratuta oraingoz, temperaturak konstante bezala ezarri dira. Alarma frogatu ahal izateko denborarekin igotzen doan funtzio bat ezarri zaio zelula baten temperatura-neurketari, eta karga-prozesua simulatu da. 10.16.(b) irudian ikus daiteke nola igotzen den temperatura, ezarritako muga gainditu arte. Momentu horretan, 200 s-tan, 10.16.(a). irudian ikusten den bezala, alarma gorria aktibatzen da eta sistema osoa *Fail Safe* egoerara pasatzen da.

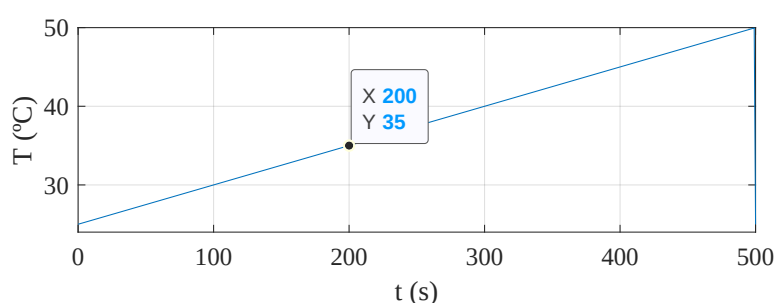
2. Neurketa-alarmak

Neurketa-alarman funtzionamendu baieztatzeko, aldagaien mugak aldatu behar izan dira. Askok dira neurketa-alarmak, beraz, bakarra aukeratu da simulazioa egiteko, korrontearena. Horretarako, korronte maximoaren balioa 4 A-etara jaitsi da, eta karga-korronte maximoa handitu da, 4,2 A-tara. Simulazio emaitzak lortzeko karga-prozesua aktibatu da.

Argi dago balio horiek jarritz karga-prozesua hasi eta jarraian joan beharko litzatekeela sistema *Fail Safe* egoerara, eta 10.17. irudiek hori bera era-



(a) Alarma global gorria.



(b) Zelularen tenperatura.

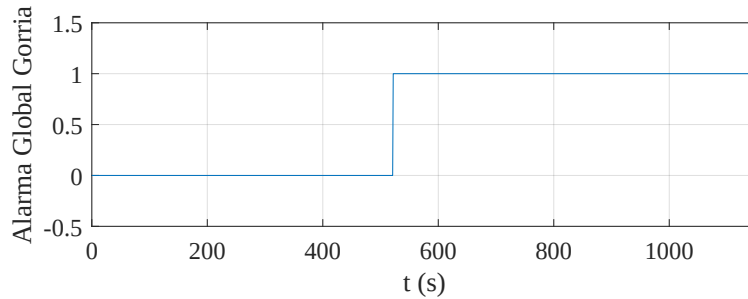
10.16. irudia. Alarma gorri seinalea eta lehenengo zelularen tenperatura.

kusten dute. Sistemaren korronea handitzen den momentuan alarma gorria aktibatu egiten da, sistema geldiaraziz eta korronea berriro ere zerora ezarriz.

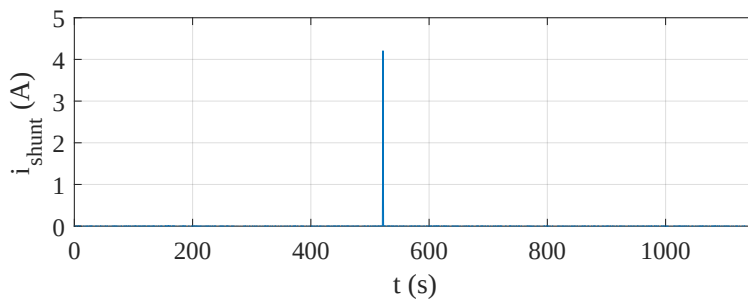
3. *Timeout* alarmak

Timeout-alarmen baieztapena egiteko, aurre-karga prozesuaren luzapena behartu da. Horretarako, trakzio-sistemeekin lotutako kondentsadorearen balioa handitu da. Balio hori handitzean, kondentsadorea kargatzeko behar den denbora handiagoa izango da korrone berarekin. Ezarritako balioa 40 F izan da, aurretik zituen $400 e^{-3}$ F-ren orde. Argi dago fisikoki balio irrealak dela, baina alarma frogatzeko test baliagarria da.

10.1. atalean frogatu da aurre-karga segundo bakarreko prozesua dela. Kondentsadorearen jatorrizko balioarekin gertatzen zen hori, baina balioa handituta, 10.18.(b) irudian ikusten den bezala, aurre-karga irauten duen se-



(a) Alarma global gorria.



(b) Zirkuituan zehar doan korrontea.

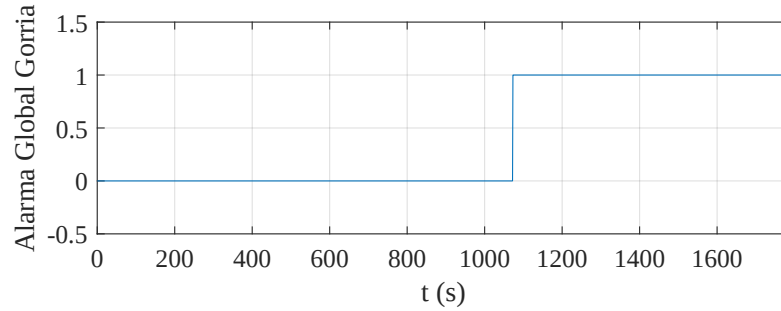
10.17. irudia. Alarma gorri seinalea eta zirkuituko korrontea.

gundo horretan kondentsadorearen tentsioa 20 V ingurura besterik ez da heltzen. Horregatik, segundo hori pasa ostean sistemaren alarma gorri globala aktibatzen da eta kontaktore guztiak irekitzen dira.

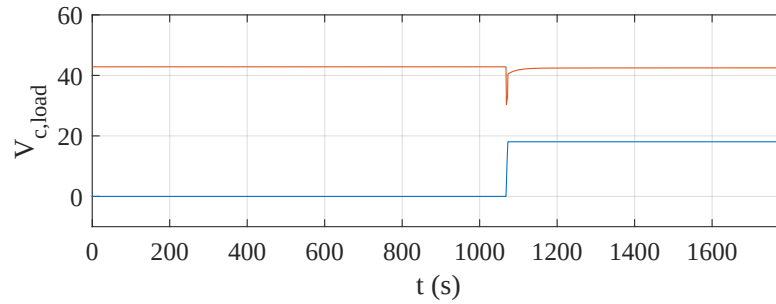
4. Kontaktu ezarekin lotutako alarmak

Alarma-sistemako azken alarma-mota kontaktoreekin lotuta dago. Kasu horretan kontaktore batek ireki edo itxi denaren seinalea bidaltzen ez duenean joango da sistema alarma-egoerara. Hori simulatu ahal izateko, kontaktore bateko errelearen seinalea moztu egin da, $S_{chg,2}$ errelearena hain zuzen ere. Grafikoen bidez azalduko da, jarraian, zer gertatzen den sisteman alarma-egoera horretan.

Karga-prozesua hasten denean sistemak itxi egiten duen lehenengo kontaktorea $S_{p,j}$ da. Kontaktore hori, 10.20. irudian ikus daitekeen bezala,



(a) Alarma global gorria.



(b) Sistema trakzio-sistemara konektatzeko erabiltzen den kondentsadorearen tentsioa.

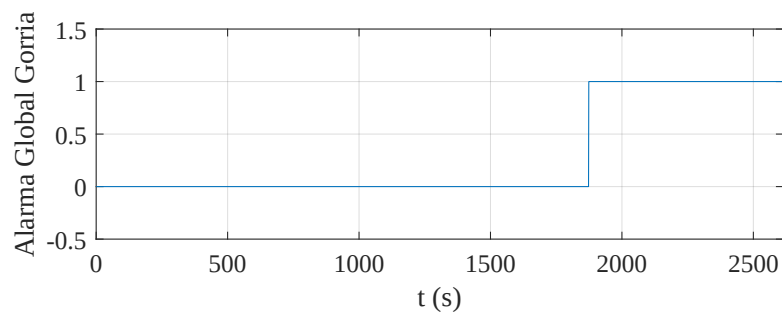
10.18. irudia. Alarma gorri seinala eta $V_{c,load}$.

modu egokian itxi da. Irudian, lau grafiko ezberdin ikus daitezke, horietako bik kontaktorearen errele bakoitzaren itxiera seinalera erakusten dute, eta beste biek baieztapena. Ikus daiteke nola biak jarraian heltzen diren, inolako atzerapenik gabe.

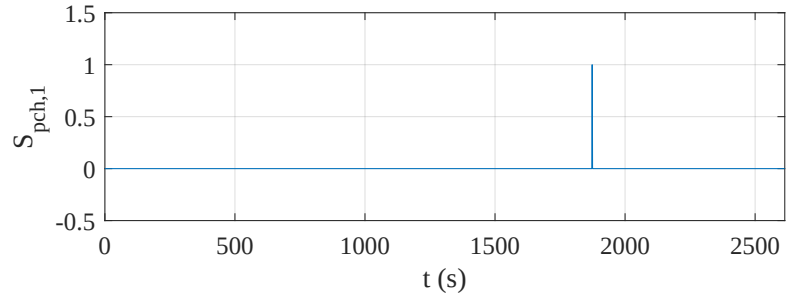
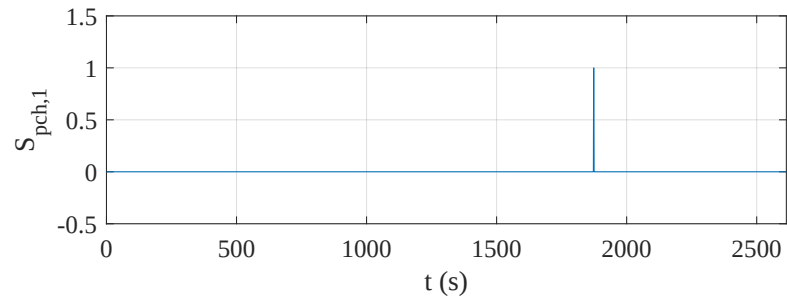
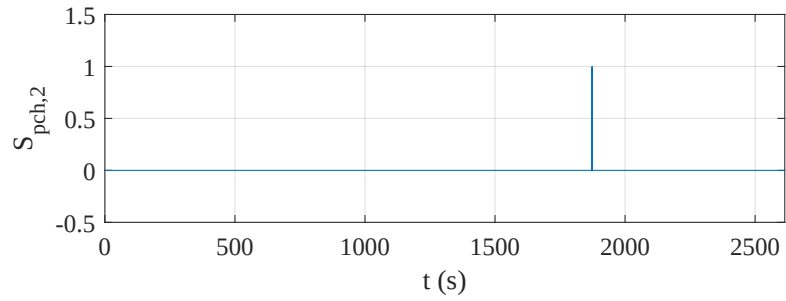
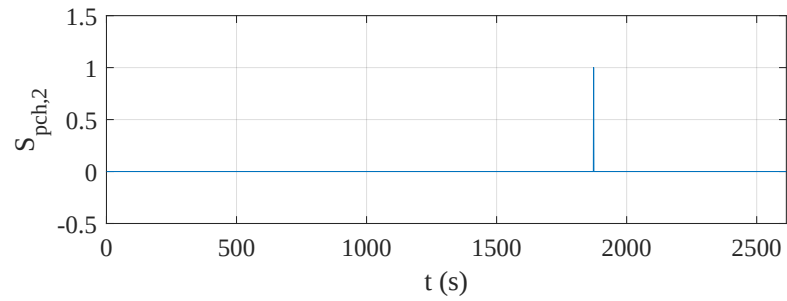
Prozesuan itxi beharko litzatekeen hurrengo kontaktorea $S_{chg,j}$ izango litzateke. Kontaktore horren bigarren errelearen baieztapen-seinala deskonektatu egin da. Horregatik, 10.21. irudien artean, 10.22.(d). irudiak ez du inolako seinalerik irakurtzen. Hori ikusita, sistemak alarma gorria pizten du, 10.19. irudian ikusten den bezala, eta sistema *Fail Safe* egoerara pasatzen da. Horregatik, ere 10.21. irudietan erreleak momentu bakarrez daude itxita, eta ez denbora jarraian.

Azkenik, eta alarma-egoera ondo ezarri dela ikusteko, interesgarria da proze-

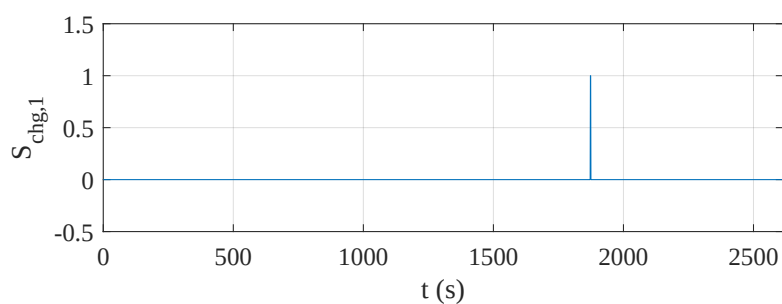
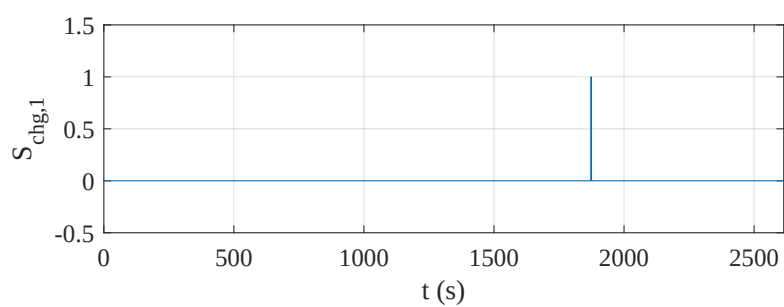
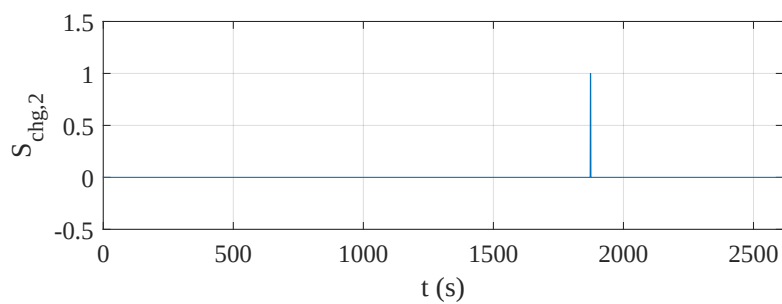
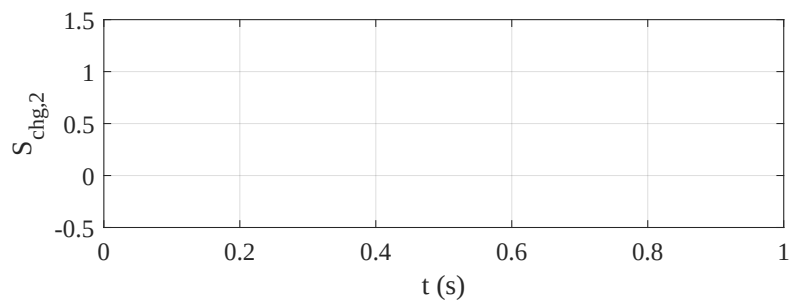
suan itxi beharko litzatekeen azken kontaktorea begiratzea. 10.22. irudian ikus daiteke, nola ez den inolako itxiera-seinalerik heltzen ezta baiezta penik jasotzen, sistema *Fail Safe* egoerara heldu dela frogatuz.



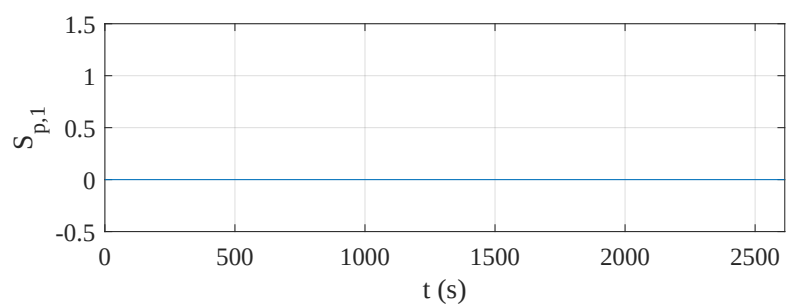
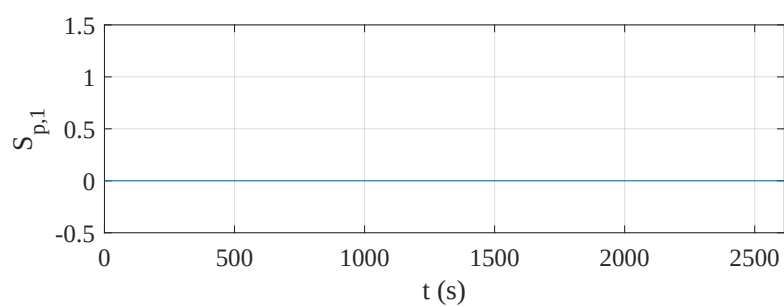
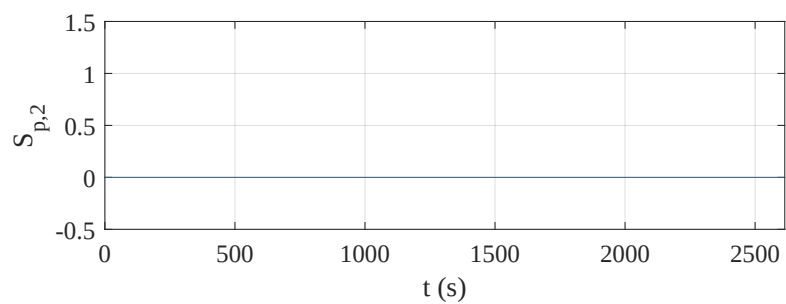
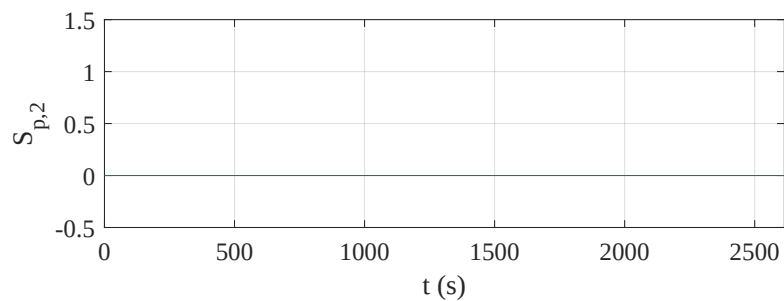
10.19. irudia. Alarma Global Gorriaren seinalea.

(a) $S_{pch,1}$ errelearen itxiera seinalea.(b) $S_{pch,1}$ errelearen baieztapen seinalea.(c) $S_{pch,2}$ errelearen itxiera seinalea.(d) $S_{pch,2}$ errelearen baieztapen seinalea.

10.20. irudia. $S_{pch,j}$ kontaktoreen erreleen seinaleak.

(a) $S_{chg,1}$ errelearen itxiera seinalea.(b) $S_{chg,1}$ errelearen baieztapen seinalea.(c) $S_{chg,2}$ errelearen itxiera seinalea.(d) $S_{chg,2}$ errelearen baieztapen seinalea.

10.21. irudia. $S_{chg,j}$ kontaktoreen erreleen seinaleak.

(a) $S_{p,1}$ errelearen itxiera seinalea.(b) $S_{p,1}$ errelearen baieztapen seinalea.(c) $S_{p,2}$ errelearen itxiera seinalea.(d) $S_{p,2}$ errelearen baieztapen seinalea.

10.22. irudia. $S_{p,j}$ kontaktoreen erreleen seinaleak.

III. atala

ALDERDI EKONOMIKOAK

11. kapitulua

Gauzatutako aurrekontua

Proiektu baten garapenean, kontuan hartu behar da partaideen eta erabilitako materialen kostua. Hori da, garrantzitsua da finantziaziorako aurrekontua egitea, lanaren alderdi guztiak kontuan izateko. Aurrekontu hori azalduko da jarraian, bi ataletan banatuta: Giza-baliabideak eta erabilitako materiala.

11.1. Giza-baliabideak

Proiektua garatu duten partaideen arabera eta lan egindako ordu-kopuruaren arabera ezarri dira proiektuaren kostuak. Aurrekontuaren atal hori 11.1.taulan ikus daiteke.

11.1. taula. Proiektua garatu duten partaideen aurrekontua.

Partaideak	Lanbidea	Orduko kostua	Orduak	Kostu osoa
Ikaslea	Telekomunikazio Teknologian Inge- niaria	20,00 €	270	5400 €
Tecnaliako ikerlaria	Ingeniari Elek- tromekanikoa	70,00€	35	2450 €
GrALaren Zuzendaria	Ikertzailea eta EHUko irakaslea	80,00€	60	3200 €
GUZTIRA				11050 €

11.2. Erabilitako materiala

Proiektu honen garapenerako 11.2. taulan azaldutako materialak erabili dira. Hori-en kostuak kontuan izan behar dira proiektua modu egokian finantzatu ahal izateko. Lan honetan lizentziak eta ekipamendu informatikoa besterik ez dira kontuan hartzen, ez delako garatutako *softwarea* benetako egoera batera aplikatu momentuz. Ekipamendu informatikoaren kostua kalkulatzeko, amortizazioa izan beharko da kontutan. Horrelako proiektu batetan erabiltzen den ekipamendua hamar urtetarako izango da baliagarria. Beraz, kostua zati hamar egin beharko da proiektuaren aurrekontuan sartzeko. Proiektua egoera erreal batetan aplikatuko balitz, bateria, mikroprozesadorea eta erabilitako osagai guztiak izan beharko lirateke kontuan, eta kostua asko igoko litzateke.

11.2. taula. Erabilitako materialen aurrekontua.

Materiala	Urte baterako prezioa
Matlab lizentzia	900 €
Simulink lizentzia	1360 €
Simscape	900 €
Ekipo informatikoa	150 €
GUZTIRA	3310 €

11.3. Proiektuaren aurrekontu osoa

Behin atal ezberdinen aurrekontua eginda, gastu guztiak kalkulatzeko dira. Kalkulu horiek 11.3. taulan azaltzen dira, eta bertako balioa izango da proiektuaren aurrekontu osoa.

11.3. taula. Proiekturako egindako aurrekontua.

Aurrekontuaren atala	Prezioa
Proiektuaren partaideak	11050€
Erabilitako materiala	3310€
GUZTIRA	14360€

IV. atala
ONDORIOAK

12. kapitulua

Garatutako lanaren ondorioak

Artearen egoeraren azterketatik ondorioztatzen da Li-Ioi motako bateriak direla erabilienak ibilgailu elektrikoetan energia elektrikoa metatzeko. Beharrezkoak diren tentsio- eta korrante-mailak direla bide, seriean eta paraleloan konektatzen dira hainbat bateria-zelda, bateria-pack handiak sortuz. Sistema horien segurtasuna bermatu beharra dago, bai aldagai elektrikoek dagokienez (tentsioak, korranteak), eta baita ere operazio-tenperaturei dagokienez. Gehiegizko edo gutxiegizko tenperaturek arriskuan jar dezakete bateriaren integritatea, eta bateria-zeldak azkar zahartu daitezke 20 °C ta 40 °C bitartean ez badute lan egiten. Horrez gain, ondoriozta daiteke oso garrantzitsua dela bateriaren karga-egoera eta osasun-egoera era egokian zehaztea. Aipatutako lehenengo aldagaiak ibilgailuaren autonomia zehazten du. Horrez gain, % 20 eta % 80 bitartean mantendu behar da karga-egoera bateriaren funtzionamendu egokia bermatzeko eta bizitza operatiboa luzatzeko.

Bateria-pack-en karga-prozesua beste puntu garrantzitsu bat da. Prozesuan zehar bateria osatzen duten zelden fabrikatzaileek zehaztutako baldintzetan kargatu behar dira horiek. Horrez gain, karga-prozesua amaitzeko, zelda ezberdinen arteko tentsio edota karga-egoera orekatu beharra da. Horretarako soluzio aktibo edo pasiboak aurki daitezke. Industrian, batez ere, MOSFETen bidez kontrolatutako *bleeding* erresistentziak erabiltzen dira orekatze-prozesuan. Segurtasunari dagokionez, kontaktore elektromekaniko bidez isolatu behar da bateria potentzia-elektronikatik alarma egoera bat sortzen denean, bateriak babestuz eta hutsegiteak isolatuz.

Ondorioz, ezinbestekoa da ibilgailu elektrikoek bateria-pack-ek monitorizazio- eta kontrol-sistemak integratzea. Hain zuzen ere, BMS deritzen sistema elektronikoak erabiltzen dira industrian. Horietan, mikrokontrolagailu batek gauzatzen ditu software bidez deskribatutako monitorizazio- eta kontrol-atazak. Gauzatu-

tako algoritmoak ongi balioztatu behar dira funtzionaltasun guztiak egoki gauzatzeko eta modu seguruan. Gainera, hainbat parametro zehaztu behar dira, hala nola bateria-zelulen parametro elektrokimikoak, eta baita ere alarma-sistemari dagozkion limite operazionalak, besteak beste.

Kontrol-algoritmoen garapenari dagokionez, goi mailako lengoia bat erabiliz eskuz programatzea izan daiteke inplementaziorako hurbilketa ezagunena. Hala ere, kodifikazio-erroreak sortzen dira sarritan eskuz programatzean, eta arazketa-prozesua ez da oso erraza izaten. Hori dela eta, modeloetan oinarritutako diseinua (MBD) erabiltzen da gehienetan automobilgintza-sektorean. MBD prozeduran kontrolatu nahi den plantaren modelo zehatza gauzatzen da simuladore batetan. Modeloen bidez garatzen da kontrolerako softwarea ondoren. Balioztapen-prozesu jarraitu bat gauzatzen da gero, etengabe inplementatzen ari diren azpisistemen funtzionamendu egokia modeloaren aurka frogatuz. Azkenik, sortutako algoritmoen kodea erraminta automatikoen bidez sortzen da, eskuzko kodifikazioak sortzen dituzten erroreak ekidinez. Gradu Amaierako Lan honetan frogatu ahal izan da MBD prozedurek algoritmoen fidagarritasuna hobea ahalbidetzen duela, oso erraza baita balioztapen-prozesua. Gainera, ikusi da garapenerako denborak nabarmen murriztu direla, algoritmoak *Matlab/Simulink* bidez grafikoki inplementatzea eskuz kodetzea baino errazagoa eta intuitiboagoa delako.

Aurretik aipatu bezala, balioztapenerako oso egokia da MBD paradigma. Balioztapenerako test-baldintzak definitu dira lan honetan eta garatu diren funtzionalitate guztiak balioztatu ahal izan dira ingurune birtualean: karga- eta orekatze-algoritmoak, egoera-makinak, karga-egoera estimatzeko algoritmoak, alarmak, kontaktoreen kontrola, etab. Lortu diren emaitzak oso positiboak izan dira.

Proiektuaren irismenari dagokionez, algoritmoak ingurune birtualean probatu dira, momentuz, beraien osotasunean. Hala ere, BMSak beharrezkoak dituen funtzionalitate guztiak integratzen ditu garatutako modeloak. Etorkizunari begira, sortutako algoritmoak kontrolerako unitate elektronikoko batetan integratuko dira eta espermentalki balioztatuko dira Tecnalia fundazioan. Balioztapen-prozesu birtualari esker espero da integrazio-prozesu espermentala nahikoa azkarra izatea. Bestalde, espero da datorren urtean Gradu Amaierako Lan honek Master Amaierako Lan batetan jarraipena izatea, algoritmoen integrazio fisikoan jardungo dena.

13. kapitulua

Ekarpenak

Gradu Amaierako Lan honen testuinguruan SAEI 2024 (*Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación*) kongresurako bi artikulua bidali dira.

1. *Desarrollo de software de control para sistema BMS embarcado en vehículo eléctrico mediante el empleo de herramientas de diseño basado en modelos*

- *Izenburua:* Ibilgailu elektriko batetan sartuta dagoen BMS sistema baten kontrol-softwarearen garapena modeloetan oinarritutako diseinuaren tresnak erabiliz.
- *Egileak:* Ane Gelbentzu, Jon Romero, Alfredo Rubio, Eneko Otaola, Elena Trancho, Edorta Ibarra.
- *Laburpena:* Baterien kudeaketarako sistema elektronikoak (BMS, *Battery Management System*, ingelesez) oinarritutakoak dira segurtasun-maila altua behar duten aplikazio aurreratuetan, adibidez energia berriztagarria sortzeko sistemetan eta ibilgailu elektrikoetan. BMS kontrol softwarearen fidagarritasuna bereziki garrantzitsua da. Lan honetan, modeloetan oinarritutako diseinua (MBD, *Model Based Design*, ingelesez) erabiltzen da, ASIL (*Automotive Safety Integrity Level*, ingelesez) maila betezen duen softwarea garatzea errazteko. Bloke funtzional nagusiak deskribatzen dira eta simulazio emaitzak eta emaitza esperimentalak aurkezten dira, blokeen inplementazio egokia frogatzeko.

2. *Modelado electro-térmico de un pack de baterías cilíndrico de ion de litio para el desarrollo de sistemas de gestión térmica en vehículos eléctricos*

- *Izenburua:* Litio-ioizko bateria-pack zilindriko baten eredua ibilgailu elektrikoaren kudeaketa termikoaren sistemarako

- *Egileak*: Ane Sainz de la Maza, Ane Gelbentzu, Edorta Ibarra, Beñat Arteta, Eneko Otaola
- *Laburpena*: Ibilgailu elektriko eta hibridoetan erabiltzen diren litio-ioizko bateria-pack-ak ingurune-baldintzetara oso sentikorrak dira. Haien funtzionamendu egokia bermatzeko eta bizi-ziklo luzea ziurtatzeko, bateriek 20 °C eta 40 °C gradu artean lan egin behar dute. Horregatik, ibilgailuek bateriaren kudeaketa termikorako sistema (BTMS, *Battery Thermal Management System*, ingelesez) izan behar dute. Artikulu honetan modelo elektro-termiko bat garatzen da, automobilgintzarako konfigurazio zilindrikoa duen bateria-pack baten portaera izango duena. Modeloa, Matlab/Simulinken garatua, etorkizuneko BTMS kontrol-software bat balioztatzeko erabiliko da, eta baita ere bere kontrol unitatea (ECU, *Electronic Control Unit*, ingelesez), MBD (*Model Based Design*, ingelesez) paradigma jarraituz. Plantaren modelo elektriko eta termikoa errepresentatzen dituzten modelo matematikoak aurkezten dira, eta funtzionamendua erakusten duten simulazioak erakusten dira.

Bibliografía

- [1] Global greenhouse gas overview. United States Environmental Protection Agency. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-overview>
- [2] (2019) CO2 emissions from cars: facts and figures (infographics). European Union. [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20190313STO31218/co2-emissions-from-cars-facts-and-figures-infographics>
- [3] (2018) EU progress towards its 2020 climate change goals (infographic). European Union. [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20180706STO07407/eu-progress-towards-2020-climate-change-goals-infographic>
- [4] (2023) New registrations of electric cars, EU-27. European Environment Agency. [Online]. Available: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/new-electric-vehicles-in-eu-3#tab-chart_3
- [5] S. Parra. (2023) Las temperaturas en Europa aumentan el doble de rápido que en el resto del mundo. National Geographic España. [Online]. Available: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/europa-se-esta-calentando-doble-rapido-que-resto-mundo_19812
- [6] (2018) Greenhouse gas emissions by country and sector (infographic). European Union. [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20180301STO98928/greenhouse-gas-emissions-by-country-and-sector-infographic>
- [7] (2022) Emisiones de CO2 de los coches: hechos y cifras. Parlamento Europeo. [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20190313STO31218/emisiones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-infografia>

- [8] Estrategia de descarbonización a largo plazo 2050. Comisión Europea. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/sites/its/lts_es_es.pdf
- [9] P. Frías Marín and J. Román Ubeda, *Vehículo Eléctrico: Situación actual y perspectivas futuras*, Insituto de Investigación Tecnológica IIT-ICAI Std.
- [10] (2022) EU ban on the sale of new petrol and diesel cars from 2035 explained. European Parliament. [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20221019STO44572/eu-ban-on-sale-of-new-petrol-and-diesel-cars-from-2035-explained>
- [11] Álvaro Escobar. Qué es el e-fuel y cuándo llegará de verdad a los coches en España. [Online]. Available: <https://www.autobild.es/noticias/fuel-cuando-llegara-verdad-coches-espana-1236808>
- [12] (2023) La movilidad eléctrica pisa el acelerador: carreras y baches de un sector clave para el futuro del planeta. BBVA Spark. [Online]. Available: <https://www.bbvaspark.com/contenido/es/noticias/movilidad-electrica/>
- [13] B. Yang, Y. Qian, Q. Li, Q. Chen, J. Wu, E. Luo, R. Xie, R. Zheng, Y. Yan, S. Su, and J. Wang, “Critical summary and perspectives on state-of-health of lithium-ion battery,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 190, no. 114077, pp. 1–28, 2024.
- [14] J. Tian, Y. Fan, T. Pan, X. Zhang, J. Ying, and Q. Zhang, “A critical review on inconsistency mechanisms, evaluation methods and improvement features of lithium-ion battery energy storage systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 189, no. 113978, pp. 1–21, 2024.
- [15] H. Gabbar, A. Othman, and M. Abdussami, “Review of battery management systems (BMS) development and industrial standards,” *Technologies*, vol. 9, no. 2, p. 28, Apr. 2021.
- [16] L. Zhou, X. Lai, B. Li, Y. Yao, M. Yuan, J. Weng, and Y. Zheng, “State estimation models of lithium-ion batteries for battery management system: status, challenges, and future trends,” *Batteries*, vol. 9, no. 131, pp. 1–23, 2023.
- [17] C. Lidstrom, M. Nyberg, C. Bondesson, and J. Westman, “Improved pattern for ISO 26262 ASIL decomposition with dependent requirements,” in *Proc. of the IEEE International Conference on Software Quality, Reliability and Security Companion (QRS-C)*, 2019, pp. 28–35.

- [18] J. Martins, S. Spataru, T. Kerekes, D. Sera, P. Douglass, G. Yang, and K. Moth, “Test platform for rapid prototyping of digital control for power electronic converters,” in *Proc. of the IEEE Industrial Electronics Society Conference (IECON)*, 2019, pp. 2056–2061.
- [19] A. Rón, A. Tarrasó, A. Luna, and P. Rodríguez, “Analysis of rapid control prototyping performance for power conversion applications,” in *Proc. of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2020, pp. 3225–3230.
- [20] E. Ibarra, A. Arias, I. Martínez de Alegría, A. Otero-Olavarrieta, A. Matalana, and L. de Mallac, “Rapid control prototyping platform to regulate a high-current low-voltage DC/DC power converter prototype to feed superconducting electromagnets,” in *Proc. of Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI)*, 2023, pp. 1–6.
- [21] Matlab, “Model based desing.” [Online]. Available: <https://es.mathworks.com/solutions/model-based-design.html>
- [22] Objetivos y metas de desarrollo sostenible. Naciones Unidas. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- [23] ODS 7. energía asequible y no contaminante. Naciones Unidas. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- [24] ODS 11. ciudades y comunidades sostenibles. Naciones Unidas. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>
- [25] ODS 13. acción por el clima. Naciones Unidas. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>
- [26] “Zientzia, Teknologia eta Berrikuntzako Plana Euskadi 2030,” in *ZTBP 2030*. Eusko Jaurlaritza, 2030.
- [27] European Commission, “Horizon Europe. The EU Research and Innovation Programme,” in *Horizon Europe Programme*. European Union, 3 2021.
- [28] Tipos de baterías de coches eléctricos. Electromovilidad. [Online]. Available: <https://electromovilidad.net/tipos-de-bateria-para-coche-electrico/>
- [29] C. Taborelli and S. Onori, “State of charge estimation using extended Kalman filters for battery management system,” in *Proc. of the IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*, 2014, pp. 1–8.

- [30] “User manual s-BMS, single boards: scalable battery management system for automotive, industrial and storage battery pack applications,” Lithium Balance, Tech. Rep., 2016.
- [31] Z. Omariba, L. Zhang, and D. Sun, “Review of battery cell balancing methodologies for optimizing battery pack performance in electric vehicles,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 129 335–129 352, 2017.
- [32] Major components of a BMS. Monolithic Power. [Online]. Available: <https://www.monolithicpower.com/en/battery-management-systems/bms-basics/major-components-of-bms>
- [33] Battery management system (BMS). Electropedia. [Online]. Available: <https://www.mpoweruk.com/bms.htm>
- [34] D. Plaza. Qué es un BMS y por qué es clave en el buen funcionamiento de las baterías de los coches eléctricos. motor.es. [Online]. Available: <https://www.motor.es/que-es/bms>
- [35] Role and importance of BMS. Monolithic Power. [Online]. Available: <https://www.monolithicpower.com/en/battery-management-systems/bms-basics/role-and-importance-of-bms>
- [36] P. Industry, *Automotive relays. EV RELAYS (DC Contactors)*, Datasheet, 2023.
- [37] J. Romero, *Modeloetan oinarritutako diseinuaren bidezko SoC/SoH estimatzailearen garapena baterientzat*, Euskal Herriko Unibertsitatea Gradu Amaierako Lana, 2023.