



IKER  
GAZTE  
NAZIOARTEKO  
IKERKETA EUSKARAZ

## V. IKERGAZTE NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2023ko maiatzaren 17, 18 eta 19a  
Donostia, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:  
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)



Aitortu-PartekatuBerdin 3.0

### INGENIARITZA ETA ARKITEKTURA

**Litio-ioizko bateriak kudeatzeko  
sistemen segurtasun funtzionala**

*Xabier Arraztoa Lazkanotegi,  
Maitane Garmendia Elorza,  
David Marcos eta  
Eñaut Muxika Olasagasti*

223-229 or.

<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.v.03.29>

ANTOLATZAILEA:



BABESLEAK:



LAGUNTZAILEAK:



# Litio-ioizko bateriak kudeatzeko sistemen segurtasun funtzionala

Xabier Arraztoa-Lazkanotegi<sup>1,2</sup>, Maitane Garmendia<sup>1</sup>, David Marcos<sup>1</sup>, Eñaut Muxika<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ikerlan Technology Research Centre, BRTA. J. M. Arizmendiarieta Pasealekua 2, 20500 Arrasate (Gipuzkoa)

<sup>2</sup> Mondragon Unibertsitatea, Elektronika eta Informatikoa Departamentua. Loramendi Kalea 4, 20500 Arrasate (Gipuzkoa).

xarraztoa@ikerlan.es

## Laburpena

Litio-ioizko bateriak izatez arriskutsuak dira. Hortaz, modu seguru eta efizientean lan egiteko kudeaketa-sistema elektronikoa (*Battery Management System*, BMS hemendik aitzinera) dituzte txertaturik. Bertzalde, segurtasun funtzionalaren diseinu-metodologiaren helburua gizakiak eta ingurumena elektronikaren akatsen ondoriozko kalteetatik babestea da. Lan honetan segurtasun funtzionalera bideratutako BMSen egungo egoera aztertu da, bertan identifikatutako gabezia eta hutsuneetatik abiatuz BMSen diseinu-metodologia aurkezteko. Azkenik, metodologia balioztatutako duen BMS prototipo baten diseinua proposatu da etorkizuneko lan-lerro moduan.

**Hitz gakoak:** bateriak kudeatzeko sistemak, segurtasun funtzionala, litio-ioizko bateriak

## Abstract

*Lithium-ion batteries are intrinsically dangerous. Therefore, to operate safely and efficiently they have embedded electronics known as Battery Management Systems (BMS). Besides, the aim of functional safety design methodologies is to prevent humans and environment from harm caused by the malfunctioning of electronics. In this work the state of the art of functional safety oriented BMS is reviewed and, based on the identified gaps and omissions, a BMS design methodology is presented. Finally, the design of a prototype BMS has been proposed as a future work line in order to validate this design methodology.*

**Keywords:** battery management systems, functional safety, lithium-ion batteries

## 1 Sarrera eta motibazioa

Egungo energia-kontsumoaren joera gorakorra eta erregai fosilekiko menpekotasuna direla eta, klima aldaketa gure gizarteetako erronka nagusienetakoa da. Honi aurre egiteko, etorkizuneko ekonomia jasangarriaren ibilbide-orrian nabarmentzen diren estrategiak energia-kontsumoaren eraginkortasuna, energia-iturri berriztagarrietarako trantsizioa eta garraio sistemen elektrifikazioa dira. Estrategia horien aplikaziorako energia biltegitzeko sistemak, eta bereziki bateria elektrikoek, paper garrantzitsua jokatuko dute<sup>1</sup>.

Horien artean litio-ioizko bateriak dira etorkizunik oparoenetarikoak izan dezaketenak, eta jada kontsumoko elektronikaren nagusi dira. Izan ere, bertze kimika moten aldean energia- eta potentzia-dentsitate handiak baitituzte. Gainera, azken urteetan teknologia honen kostua jaitsi denez (Ziegler eta Trancik, 2021), orain arte berun-azidozko bateriak gailentzen ziren potentzia ertaineko aplikazio geldikor eta mugikorretan ere aitzinera doaz. Bertzalde, ezaugarri bikain horiek ahalbideratzen dituen kimika konplexua bera da litio-ioizko baterien hutsegiteek dakartzaten arrisku larrien jatorria. Hala nola, sua, deflagrazioak edo gas pozoitsuak atera daitezke bateriaren karkasatik (Doughty eta Roth, 2012). Beraz, aipatutako aplikazioetan arrakasta edukitzeko litio-ioizko bateriek beraien lan-eremu seguruaren (*Safe Operating Area*, SOA hemendik aintzinera) barnean jardutea ziurtatu behar da, eta horretarako kudeaketa-sistemak dituzte.

<sup>1</sup><https://cicenergigune.com/eu/blog/eb-arauen-eguneratzea-bateria-sektorea>

Bateriak kudeatzeko sistemak (*Battery Management System*, BMS) sistema elektronikoko txertatuak dira, hau da, beraiek baino handiagoa den sistema mekaniko edo elektriko baten barnean (kasu honetan, baterien barnean) denbora errealeko funtzio jakinak gauzaten dituzten hardware eta software multzoak. Beraien helburu nagusia bateriak SOAren barnean lan egitea da; honek tentsio, temperatura eta korrontearen mugak gainditu ez ditzan. Honekin batera, baterien errendimendua optimizatzeko eta bizitza erabilgarria luzatzeko funtzioak ere badituzte. Erraterako, bateriak osatzen dituzten zelula elektrokimikoen arteko karga desoreken konpentsazioa; eta baterien kargaren (*State of Charge*, SOC), degradazio mailaren (*State of Health*, SOH) eta potentzia emateko ahalmenaren (*State of Power*, SOP) algoritmo bidezko estimazioa dira ohikoenak.

Euren segurtasun bermatzaile eginkizuna dela eta, BMSei fidagarritasun eta segurtasun handia eskatzen zaie. Orain arte ez dute araudi zorrotzik bete behar izan baina, litio-ioizko baterien erabileraren joera gorakorra ikusirik, etorkizun hurbilean segurtasun funtzionalerako araudiak betetzea eskatuko zaiela aurreikusten da. Hain justu ere, baterien arloko estandar batzuen azken eguneratzeetan aipamenak agertzen hasiak dira. Segurtasun funtzionala sistema elektronikoko txertatuen fidagarritasunaren arloko kontzeptua da (Avizienis et al., 2004), eta sistema horien akatsek pertsonak eta ingurumena kaltetzea eragozteko neurriak hartzean datza. Adibidez, martxan doan igogailu bat bere elektronikaren akats baten ondorioz neurriz kanpo azeleratzen bada, elektronikak berak igogailua gelditzeko funtzioa automatikoki burutu behar du hiru etapatan: detekzioa, prozesamendua eta aktuzioa<sup>2</sup>.

Segurtasun-funtzio horiek inplementatzeko metodologiaren jarraibideak IEC 61508 nazioarteko estandarrean zehazten dira (IEC, 2010), eta araudi orokor honetatik eratorri dira industria bakoitzeko aplikazio espezifikoetan oinarritutako bertzeak: automobilgintzako ISO 26262 (ISO, 2018), tren-industriako EN 5012X (CENELEC, 2012), industria nuklearreko IEC 61513 (IEC, 2011), igogailuentzako ISO 22201 (ISO, 2017), etab. Oro har, sistema mekaniko konbentzionalak sistema elektronikoeekin ordezkatzeko diren aplikazioetan orduan eta nabarmenagoa izanen da segurtasun funtzionalaren beharra.

Guzi honen harira, *Basque Research and Technology Alliance* zientzia- eta teknologia-partzuergoko kide den Ikerlan ikerketa zentro teknologikoak litio-ioizko baterien segurtasuna hobetzeko soluzio teknologikoak aztertzen dihardu. Bertzeak bertze, (Marcos, 2022) doktorego tesian segurtasun funtzionalerako estandar eta tekniketan oinarritutako BMSen diseinu-metodologia berritzailea proposatu da ibilgailu elektrikoaren litio-ioizko baterietarako. Ikerketa-lerro honen baitan gauzatu da honako ekarpen hau.

## 2 Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Atal honen ardatza segurtasun funtzionalera bideratutako BMSen egungo egoera da. Modu honetan, teknologia honi identifikatutako gabezia eta hutsuneetatik abiatuz ikerketaren helburua finkatzen da.

### 2.1 Bateriak kudeatzeko sistemak

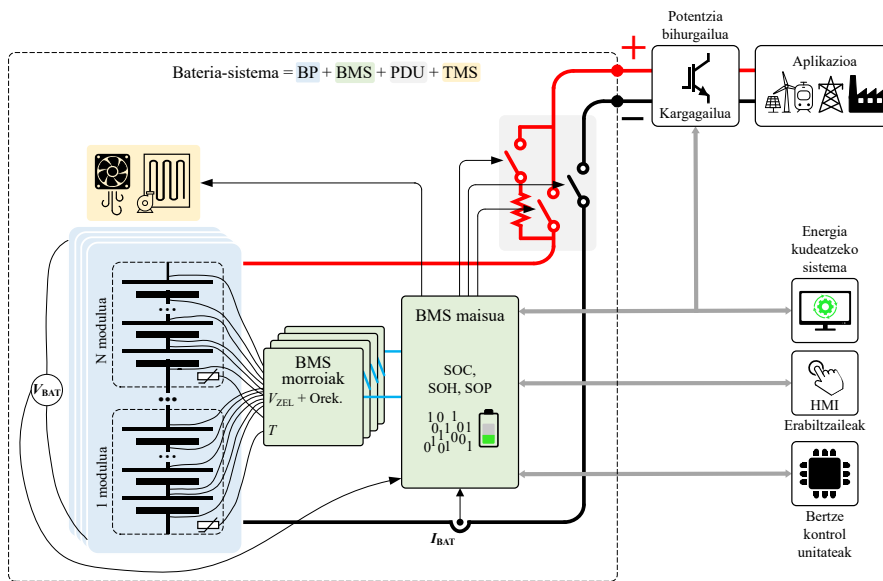
Funtsean, funtzionalitate jakin batzuk aplikazio batean integratzean datza sistema elektronikoko txertatuen diseinua. Zelula elektrokimiko gutxiko bateria elektriko txikien kasuan, funtzionalitate gehienak txartel elektronikoko (*Printed Circuit Board*, PCB) bakarrari esleitzen zaizkio, topologia zentralizatua eratuz. Aldiz, zelula aunitzeko bateria-sistema handietan hainbat PCBtan banatzen dira funtzionalitateak (Steinhurst et al., 2016). Topologia banatu honetan bi BMS unitate mota bereiz daitezke: batetik bateriaren magnitude fisikoak neurtzeaz arduratu ohi diren BMS morroiak; eta bertzetik morroiei aginduak emateaz, datuak prozesatzeaz eta kudeaketaz arduratzen den BMS maisua.

Adibidez, 1 irudian ilustratzen den bateria-sistema generikoaren bloke diagramako BMSak topologia banatua du. BMSarekin batera, bateria-sistema osatzen duten bertze azpimultzoak ere ikus daitezke: bateria multzoa (*Battery Pack*, BP) urdinez, kudeaketa-sistema termikoa (*Thermal Management System*, TMS) horiz, eta bateria multzoa aplikaziotik deskonektatzeko unitatea (*Pack Disconnection Unit*, PDU) grisez. Dena dela, BMSa bateria-sistemaren ardatza dela nabari da. Irudiaren ondotik BMSaren funtzionalitate nagusiak zerrendatzen dira (Lelie et al., 2018; Popp et al., 2021).

---

<sup>2</sup><https://www.eitb.eus/eu/irratia/euskadi-irratia/programak/hirigorrian/osoa/6693707/amaia-urkidi-ikerlan-segurtasun-funtzionala-hiri-gorrian-euskadi-irratia/>

## 1. Irudia: Bateria-sistema konpleto baten bloke diagrama orokorra



- Bateria eta zelulen magnitude fisikoen etengabeko monitorizazioa: tentsioa, tenperatura eta korrontea
- Bateria eta zelulen parametro neurgaitzen estimazioa: SOC (Garmendia, 2017), SOH (Berecibar et al., 2016), SOP (Xiang et al., 2018), etab.
- Kudeaketa elektrikoa: aplikazioarekiko konexio/deskonexioa (PDU), karga/deskargaren kontrola, zelulen orekatzea (Uzair et al., 2021), etab.
- Kudeaketa termikoa (TMS): haizagailuaren kontrola, fluido hozgarriaren ponpaketa, etab. (Wu et al., 2019)
- Komunikazioa elementu periferikoekin (potentzia bihurgailua edo kargagailua, bertze kontrol unitateak, maila altuagoko energia kudeaketa-sistemak) eta barne-komunikazioa (BMS maisu eta morroiaren artean)

Zerrendatutako funtzionalitateekin batera, BMSek bateria-sistemari balio erantsia eman diezaieketen bertze funtzio gehigarri batzuk ere izan ditzakete. Bertzeak bertze, isolamenduko inpedantziaren monitorizazioa (Song et al., 2017), elektrolito-ihesak detektatzeko CO sentsorea, erabiltzaileak BMSa konfiguratzeko edota erabiltzaileari bateria-sistemaren datuak bistartzeko interfazea, datu horien erregistroa, etab.

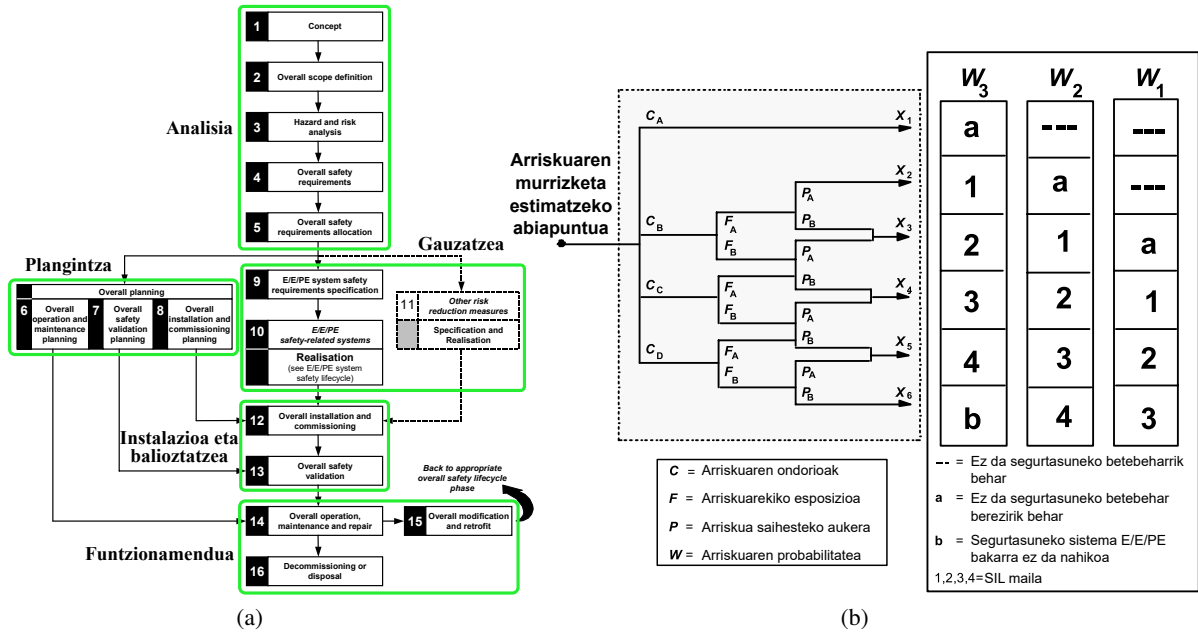
## 2.2 Segurtasun funtzionala

Segurtasun funtzionala babes-sistemen (lan honetan, BMSen) bizi-ziklo osoa barne hartzen duen segurtasun-kultura da, eta bere metodologiaren helburua ekipo jakin baten erabilpenak (kasu honetan, litio-ioizko baterienak) dakarren arriskua murriztea da, horretarako akatsak gutxitzeko eta diseinua kudeatzeko metodo egokiak baliatuz. Modu honetan, segurtasun funtzionalaren IEC 61508 araudi orokorrak babes-sistemen bizi-zikloan hamasei fase bereizten ditu. Dena dela, 2a irudian erakusten den moduan fase horiek bertz multzotan laburbildu daitezke: analisia, plangintza, gauzatzea, instalazioa eta balioztatzea, eta funtzionamendua.

Analisiari dagokionez, literaturan baterien arriskuak identifikatu dira (Li et al., 2018; Marcos et al., 2020; Shankar Kumar eta Balakrishnan, 2019), eta arrisku horiei larritasunaren, esposizioaren eta kontrolagarritasunaren balio kualitatiboak esleitu zaizkie. Ondotik, IEC 61508 araudiak arrisku bakoitza segurtasun-maila desberdinetan sailkatzen du (*Safety Integrity Level*, SIL), SIL 1 (arrisku txikiena) eta SIL 4 (arrisku handiena) artean. Parametro kualitatiboetatik abiatuz arriskua sailkatzeko adibide moduan, 2b irudian *risk graph* metodoaren diagrama erakusten da.

Erorritako SIL mailaren arabera segurtasun-helburu bat edo gehiago ezarri behar dira arriskuari aurrea hartzeko. Zenbat eta SIL handiagoa eduki, orduan eta segurtasun-neurri eta -mekanismo gehiago hartu behar dira babes-ekipoaren fidagarritasuna bermatzeko (Chen et al., 2021). Azkenik, ekipoaren fidagarritasuna zenbatetsi behar da akatsen analisi kuantitatiboaren bidez. Analisi kuantitatibo honen emaitza babes-sistemak huts egiteko probabilitatea da.

2. Irudia: IEC 61508 araudiaren: (a) segurtasuneko bizi-ziklo orokorra, (b) arriskua sailkatzeko risk graph teknikaren diagrama orokorra



Segurtasun funtzionalaren sustatzaile nagusiak automobilgintza eta elektromugikortasuna diren arren, aplikazio geldikorretan ere bateriek su hartu izan dutela azpimarratu behar da<sup>3</sup>, baina aplikazio horietako BMSen segurtasun funtzionala ez da literaturan espresuki jorratu. Aplikazioa edozein dela ere, baterien su-hartzeek eta horiek itzaltzeko zailtasunek agerian uzten dute bateria-sistemak hobetzeko beharra. Horrenbertzez, bateriek modu seguruan jardun dezaten beharrezko fidagarritasun-maila lortzeko, segurtasun-mekanismo aurreratuak BMSetan integratzea da erronka teknologikoa. Hona hemen segurtasun-mekanismo horietako batzuk:

- BMSren prozesatze-unitatearen erredundantzia (Nag et al., 2019; Wang et al., 2019) eta prozesatze-unitatearekin bateragarria den segurtasun-aplikazioetarako elikatze-iturria,
- puntu bakarreko hutsegiteek eragindako zirkuitulaburrak saihesteko BMSaren interfazeak babestea, (Marcos et al., 2021),
- baterien parametroen diagnostiko aurreratuak,
- komunikazioetako, neurketa-zirkuituetako eta elikatze-iturriko akatsen detekzioa, eta
- potentzia-kontaktoreen eta aktibazio-aginduen erredundantzia.

2.3 Helburuak

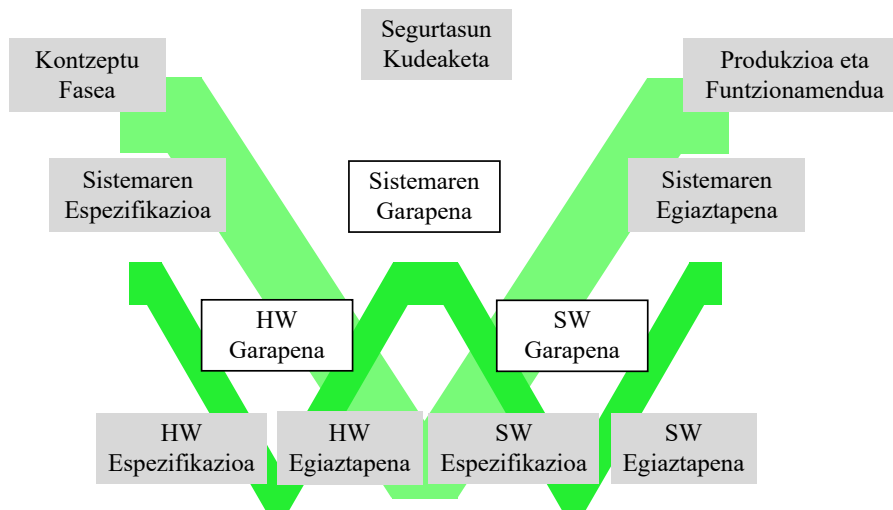
Oro har, esparru akademikoan eta ikerkuntzan segurtasun funtzionaleko BMSen diseinu-prozedurei buruzko informazio falta nabaritu da, batez ere aplikazio geldikorretan. Beraz, aplikazio horien baterietako hutsegiteen arriskua murrizteko, segurtasun-analisi sakonetan oinarritutako diseinu-prozedurak behar dira. Testuinguru honetan, honako hau jo da helburutzat: IEC 61508 araudiarekin bateragarria den BMS diseinu-metodologia proposatzea, segurtasun funtzionaleko teknikan oinarritua eta aplikazio geldikorretako litio-ioizko baterietara bideratua.

<sup>3</sup>[https://storagewiki.epri.com/index.php/BESS\\_Failure\\_Event\\_Database](https://storagewiki.epri.com/index.php/BESS_Failure_Event_Database)

### 3 Ikerketaren muina

Jarraian, segurtasun funtzionalerako IEC 61508 estandarra betetzeko proposatu den V ereduaren oinarritutako garapen-metodologia deskribatzen da, eta horretarako 3 irudiak metodologia honen bloke diagrama erakusten du. BMSaren diseinuaren jatorria bateriaren aplikazio mailako betebeharretatik eratorritako arkitektura dela adierazten du V eredu honen ezker aldeak. Eskuineko aldeak, berriz, bukaerako produktuaren integrazioa eta balioztatzea diseinu honen egiaztapenean oinarritzen dela irudikatzen du.

#### 3. Irudia: Segurtasun funtzionalera bideratutako diseinu-metodologia



Lehenik eta behin, metodologia honek kontzeptu fasearekin ekiten dio bateria-sistemaren ingurumena deskribatuz eta bateria multzoa eta BMSaren arteko mugak definituz. Ondotik, arriskuen analisiaren (*Hazard and Risk Analysis*, HARA) bidez saihestu, arindu edo kontrolatu beharreko arriskuak identifikatzen dira. Modu honetan, arrisku horiek murrizteko inplementatu behar diren funtzioak definitzen dituen segurtasun funtzionalaren kontzeptua da fase honen emaitza.

Jarraian, diseinua hiru mailatan (sistema, hardwarea eta softwarea) eta maila bakoitzeko bi zatitan (espezifikazioa eta egiaztapena) gauzatzen da. Lehenbiziko zatia arriskua murrizteko segurtasun-funtzioetatik eratorritako espezifikazioei dagokie, eta espezifikazio horiek BMSaren hardware eta software azpisisitemei esleitzen zaizkie arkitektura diseinatzerakoan. Gainera, espezifikazioak BMSaren segurtasun-analisetan oinarrituko dira. Izan ere, analisi horiek BMSaren hutsegite arriskutsuen kausa potentzialak identifikatu eta sistema elektronikoko osoaren hutsegite-tasa estimatzen dute. Bigarren zatian, berriz, espezifikazio guztiak eta segurtasun funtzionalerako arauak betetzen direla egiaztatzen da. Diseinua berrikusteko, probatzeko, eta aurki daitezkeen akatsak aldatu behar dituen estrategiarentzako plangintza ere bigarren zati honetan burutzen da.

BMSaren bizi-zikloaren akaberako produkzio eta funtzionamenduaren faseetan, segurtasunarekin erlazionatutako arazoak monitorizatu eta aktuatzeko prozedura zehazten da. Azkenik, 3 irudiko goitiko aldean ageri den 'Segurtasun Kudeaketa' blokeak metodologia honekin diseinatutako BMSarekin zerikusia duten jarduera guzien trazabilitateari eta dokumentazioari egiten dio erreferentzia.

### 4 Ondorioak

Ekarpen honetan BMSen egungo egoera eta segurtasun funtzionalak teknologia honetan duen ezarpena aztertu da. BMSaren funtzio nagusiak laburbildu dira, eta segurtasun funtzionalarekin betetzeko literaturan aztertutako neurriak ere ikusi dira. Jarraian, literaturan identifikatutako hutsune eta gabezietatik aplikazio geldikorrerako bideratutako segurtasun funtzionalerako metodologia proposatu da. Metodologia mailakatua da eta trazabilitateari ematen dio garrantzia, baterien arriskuen deskribapen kualitatibotik BMSaren hutsegite-tasaren kuantifikazioraino.

## 5 Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Proposatutako metodologia balioztatzeko, segurtasun funtzionalarekin bateragarria izanen den BMSa garatzea da etorkizunerako lan-lerroa. Horretarako, aplikazio geldikorretako litio-ioizko baterien arriskuak aztertuko dira eta horiek murrizteko BMSaren segurtasun funtzionaleko arkitektura proposatuko da. Gero, arkitektura honetatik abiatuz BMS maisuaren segurtasun-arkitektura teknikoak planteatu behar da, sistema mailan. Ondotik, sistema mailako espezifikazio horiek hardware eta software azpizistemetara eratorri behar dira. Azkenik, lan honen mugarri garrantzitsuetako bat segurtasun funtzionalaren ziurtagiri-emaile batek<sup>4</sup> BMS maisuaren garapenari bere onespena ematea izanen litzateke.

### Erreferentziak

- Avizienis, A., Laprie, J.-C., Randell, B., & Landwehr, C. (2004). Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 1:11–33.
- Berecibar, M., Gandiaga, I., Villarreal, I., Omar, N., Van Mierlo, J., & Van den Bossche, P. (2016). Critical review of state of health estimation methods of li-ion batteries for real applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56:572–587.
- CENELEC (2012). EN 50128: Railway applications - Communication, signalling and processing systems - Software for railway control and protection systems.
- Chen, M., Xie, G., Ming, Z., Liu, G., & Li, W. (2021). Functional safety research of battery management system based on risk graph methods. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 645(1):012058.
- Doughty, D. H. & Roth, E. P. (2012). A general discussion of li ion battery safety. *The Electrochemical Society Interface*, 21:37–44.
- Garmendia, M. (2017). *State-of-Charge (SoC) Algorithm Design Methodology for Implementation on Battery Management Systems (BMS) of Industrial Li-ion Battery Packs*. Doktorego tesia, Mondragon Unibertsitatea.
- IEC (2010). IEC 61508: Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems.
- IEC (2011). IEC 61513: Nuclear power plants - Instrumentation and control important to safety - General requirements for systems.
- ISO (2017). ISO 22201: Lifts (elevators), escalators and moving walks — Programmable electronic systems in safety-related applications systems.
- ISO (2018). ISO 26262: Road vehicles - Functional safety.
- Lelie, M., Braun, T., Knips, M., Nordmann, H., Ringbeck, F., Zappen, H., & Sauer, D. U. (2018). Battery management system hardware concepts: An overview. *Applied Sciences*, 8(4).
- Li, L., Li, Z., Zhao, J., & Guo, W. (2018). Lithium-ion battery management system for electric vehicles. *International Journal of Performability Engineering*, 14(12):3184.
- Marcos, D. (2022). *Functional Safety in Battery Management Systems for Lithium-based Batteries*. Doktorego tesia, Euskal Herriko Unibertsitatea.
- Marcos, D., Garmendia, M., Crego, J., & Cortajarena, J. A. (2020). Hazard and risk analysis on lithium-based batteries oriented to battery management system design. In *2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 1–6.
- Marcos, D., Garmendia, M., Crego, J., & Cortajarena, J. A. (2021). Functional safety bms design methodology for automotive lithium-based batteries. *Energies*, 14(21).
- Nag, P., Ghanekar, U., & Harmalkar, J. (2019). A novel multi-core approach for functional safety compliance of automotive electronic control unit according to iso 26262. In *2019 IEEE 5th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, 1–5.
- Popp, A., Fechtner, H., Schmuelling, B., Kremzow-Tennie, S., Scholz, T., & Pautzke, F. (2021). Battery management systems topologies: Applications : Implications of different voltage levels. In *2021 IEEE 4th International Conference on Power and Energy Applications (ICPEA)*, 43–50.

<sup>4</sup><https://www.tuv.com/world/en/functional-safety-product-certification.html>

- Shankar Kumar, M.Ñ. & Balakrishnan, K. (2019). Functional safety development of battery management system for electric vehicles. In *2019 IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India)*, 1–6.
- Song, C., Shao, Y., Song, S., Peng, S., Zhou, F., Chang, C., & Wang, D. (2017). Insulation resistance monitoring algorithm for battery pack in electric vehicle based on extended kalman filtering. *Energies*, 10(5).
- Steinhorst, S., Shao, Z., Chakraborty, S., Kauer, M., Li, S., Lukasiewicz, M., Narayanaswamy, S., Rafique, M. U., & Wang, Q. (2016). Distributed reconfigurable battery system management architectures. In *2016 21st Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC)*, 429–434.
- Uzair, M., Abbas, G., & Hosain, S. (2021). Characteristics of battery management systems of electric vehicles with consideration of the active and passive cell balancing process. *World Electric Vehicle Journal*, 12(3).
- Wang, X., Huang, D., Wang, Y., & Zhou, L. (2019). Battery management system based on aurix multi-core architecture. In *2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, volume 1, 1790–1794.
- Wu, W., Wang, S., Wu, W., Chen, K., Hong, S., & Lai, Y. (2019). A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management. *Energy Conversion and Management*, 182:262–281.
- Xiang, S., Hu, G., Huang, R., Guo, F., & Zhou, P. (2018). Lithium-ion battery online rapid state-of-power estimation under multiple constraints. *Energies*, 11(2).
- Ziegler, M. S. & Trancik, J. E. (2021). Re-examining rates of lithium-ion battery technology improvement and cost decline. *Energy and Environmental Science*, 14:1635–1651.

## 6 Eskerrak eta oharrak

Mondragon Unibertsitatearen Ingeniaritza Aplikatuko Doktorego Programaren baitako lan honek Ikerlan ikerketa zentro teknologikoko Energiaren Biltegitratze eta Kudeaketa alorrean dihardu, David Marcos Guerrero ikerlariaren *Functional Safety in Battery Management Systems for Lithium-ion Batteries* doktorego tesiaren jarraipen modura. Mondragon Unibertsitateko Euskara Batzordeari eskertzen zaio ekarpen honen matrikulazioaren ordainketarekin lagundu izana.