

Litio-Ioizko bateria-modulu baten modelizazio elektrotermikoa eta gestio termikorako soluzioen analisisia

(Electro-thermal modelling of a lithium-ion based battery module and analysis of thermal management solutions)

Ane Sainz de la Maza^{*1}, Edorta Ibarra², Elena Trancho¹,
Beñat Arteta¹, Eneko Otaola¹, Nicola Delmonte³


¹Tecnalia, Basque Research and Technology Alliance (BRTA), 48160 Derio
²Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU), 48013 Bilbao
³Parmako Unibertsitatea (UNIPR), 43124 Parma, Italia

LABURPENA: Gaur egun, Litio-Ioizko (Li-Ion) bateriak dira erabilienak ibilgailu elektrikoetan, horien ezaugarriak direla eta. Eraginkortasuna eta segurtasuna bermatu ahal izateko ezinbestekoa da horien erazio-tenperatura 20 °C eta 40 °C artean mantentzea. Ondorioz, bateria-moduluak osatzen dituzten zeluletan sortzen den beroa kanporatu behar da, aire edo likido bidezko hozte-sistemak erabiliz, besteak beste. Ibilgailuentzako Litio-Ioi bateria-modulu baten modelo elektrotermikoa aurkezten da artikulu honetan. Artearen egoeratik abiatuz, karga konputazional baxua duten soluzioak aukeratu eta konbinatu dira modelo garatzeko. Horrela, mikrokontroladore batetan denbora errealean exekutatzeko ahalmena izango du modeloak. Amaitzeko, gestio termikorako bi soluzio aztertu eta konparatzen dira. Analisisik ondorioztatzen da urperatze bidezko hozketak behartutako aire bidezkoak baino emaitza hobekiagoak lortzen dituela, bai zelularen erazio-tenperaturei dagokienez, eta baita energia-kontsumoari eta eraginkortasunari dagokienez ere.

HITZ GAKOAK: Litio-Ioizko bateriak, ibilgailu elektrikoa, modelizazio elektrotermikoa, aire bidezko hozketa, urperatze bidezko hozketa.

ABSTRACT: Nowadays, lithium ion (Li-Ion) batteries are being mainly used in electric vehicles thanks to their features. Their operating temperatures must be constrained between 20°C and 40 °C to guarantee safety and efficiency. Thus, it is required to precisely develop thermal management strategies, which can be based on air or liquid cooling, among other solutions. In this work, an electro-thermal model of an automotive battery module is presented. Modeling solutions with low computational complexity are selected from the state of the art and are combined. This way, the model can be executed in real-time in a microcontroller. Finally, two thermal management approaches are analysed and compared. It is concluded that immersion cooling provides better performance figures than forced air cooling, both regarding operation temperatures and power consumption and efficiency.

KEYWORDS: Lithium-Ion batteries, electric vehicle, electro-thermal modelling, air cooling, immersion cooling.

* **Harremanetan jartzeko/Corresponding author:** Ane Sainz de la Maza, Tecnalia, Basque Research and Technology, Alliance (BRTA), 48160 Derio.  <https://orcid.org/0009-0007-5559-5936>

Nola aipatu/How to cite: Sainz de la Maza, A.; Ibarra, E.; Trancho, E.; Arteta, B.; Otaola, E.; Delmonte, N. (2025). «Litio-Ioizko bateria-modulu baten modelizazio elektrotermikoa eta gestio termikorako soluzioen analisisia». *Ekaia*, 47, 2025, 299-328. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.26827>).

Jasoa: uztailak 24, 2024; Onartua: azaroak 15, 2024

ISSN 0214-9001-eISSN 2444-3225 / © UPV/EHU Press



Lan hau Creative Commons Aitortu-EzKomertziala-PartekatuBerdin 4.0 Nazioartekoa lizentzia baten mende dago

1. SARRERA

Mugikortasun elektrikorako soluzio berriak garatzen ari dira, gaur egun, aldaketa klimatikoari aurre egiteko. Horien artean ibilgailu elektrikoak [1] eta MEA (*More Electric Aircraft*, ingelesez) edota AEA (*All Electric Aircraft*, ingelesez) hegazkinak [2] nabarmen daitezke, besteak beste. Bateria elektrokimikoak ezinbesteko teknologiak dira kasu horietan.

Oro har, hauexek dira merkatuan aurki daitezkeen bateria-teknologia ohikoena [3]:

- a) Berun-azido bateriak. Teknologia horiek dira erabilienak helburu orokorreko aplikazioetan, oso merkeak direlako. Hala ere, ez dira aukera oso ona propulzio elektrikoa helburu duten potentzia-sistemak elikatzeke, oso energia-dentsitate baxua baitute.
- b) Nikel-metal hidruro bateriak (Ni-Ca, Ni-MH). Berun-azidokoak baino ezaugarri hobekak dituzte, baina tenperatura handiak sortzen dituzte eta horien karga-prozesuak motelak dira.
- c) Litio-Ioizko (Li-Ioi) bateriak. Energia espezifiko altua dute teknologia horiek. Horrez gain, oso eraginkorrak dira, ez dute memoria-efekturik pairatzen eta mantentzea erraza da. Adibidez, Ni-Ca baterien kapazitatearen bikoitza daukate tamainaren erdiarekin (dituzten tentsio-maila altuei esker). Hala ere, Li-Ioi baterien fabrikazioa garestia da (berun-azido motakoak baino eskala txikiagoan fabrikatzen direlako), kalteak izateko joera dute (gain-tentsioekiko oso sentikorrek direlako), ihes termikoa (*thermal runaway*, ingelesez) jasan dezakete operazio-tenperatura altuetan, karga-maila minimo bat behar dute eta kontrolpeko tenperaturetan gorde eta metatu behar dira.

Aurretik azaldu diren arrazoiak direla bide, Litio-Ioi teknologiak dira gaur egun erabilienak trakzio elektrikorako aplikazioetan [4, 5].

Ibilgailu elektrikoetan, hibridoetan, hegazkinetan edo bestelako diren moduko eskala handiko aplikazioetan, seriean eta paraleloan konektatzen dira Li-Ioi zelulak. Horiek paketatuz sortzen dira bateria-moduluak. Ondoren, zenbait modulu konektatzen dira seriean eta paraleloan haien artean, bateria-pack-a eratuz, eta aplikaziorako beharrezkoak diren kapazitatea, korrante- eta tentsio-mailak lortuz.

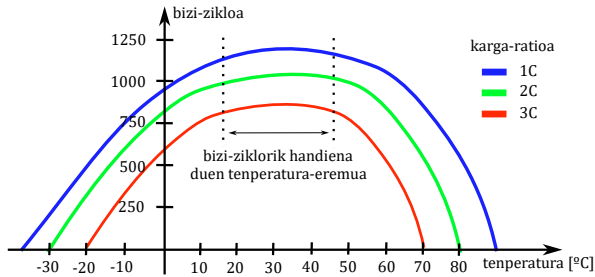
Oro har, hiru zelula-konfigurazio aurki daitezke: zilindrikoak, prismatikokoak eta *pouch* motakoak (1. irudia). Egonkortasun mekaniko oso ona dute zelula zilindrikoek. Gainera, fabrikatzeko errazak direnez, bateria-sistemaren kostuak murrizten dira. Desabantaila gisa, aipatu beharra dago zelula zilindrikoak pisutsuak direla, eta paketzeko dentsitate txikia dutela, zelulen artean sortzen diren hutsuneak direla bide [6]. Hala ere, zelu-

lak elkarren ondoan kokatzean sortzen diren aire-barrunbe horiek abantailak eskaintzen dituzte, zelulen hozketari dagokionez. Zelula prismatikoak eta *pouch* motakoak, berriz, zenbait aplikaziotan hobesten dira, sortzen dituzten espazio hil txikiagoengatik, eta teknologia horien malgutasunagatik. Gauzak horrela, aplikazio konkretu batetarako hiru konfigurazioen artean aukeratu behar denean, produktuaren tamaina eta forma, interkonexiorako zirkuituen konfigurazio eta segurtasun-baldintzak zehaztu beharko dira [6].



1. irudia. Zelula-geometria ohikoena: (a) zilindrikoa, (b) prismatikoa, eta (c) pouch motakoa [6].

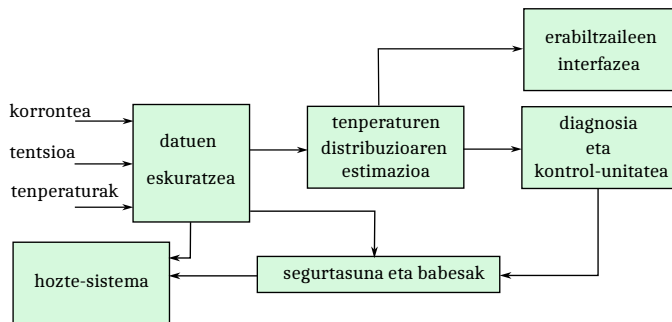
Bateria kudeatzeko sistema (BMS, *battery management system*, ingelesez) bat behar da Li-Ioi bateria-*pack* baten fidagarritasuna hobetzeko eta horren funtzionamendu eraginkorra bermatzeko. Hainbat funtzio ditu BMS batek: bateria osatzen duten zelulen karga- (SoC, *state of charge*, ingelesez) eta osasun-egoerak (SoH, *state of health*, ingelesez) estimatzeaz arduratzen da, kargadorearekin komunikatzen da, eta karga-prozesua eta zelulen tentsioen orekatze-prozesua kontrolatzen ditu, bateria-*pack*aren, trakzio-sistemaren eta kargadorearen artean diren kontaktoreak kontrolatzen ditu, alarmak monitorizatzen ditu, sistema modu seguruan jartzen du beharrezkoa denean, etab. [7, 8]. Horrez gain, oso garrantzitsua da bateria termikoki kudeatzeko sistema bat (BTMS, *battery thermal management system*, ingelesez) edukitzea. Bateria-*pack*aren bizi-itxaropenean eragin oso handia du tenperaturak, zeluletan gertatzen diren degradazio-fenomenoak operazio-tenperaturaren menpekoak direlako, 2. irudian erakusten den bezala [9]. Adostasun handia dago literatura zientifikoan aipatzen denean Li-Ioi zelulek 20 °C eta 40 °C artean operatu behar dutela beti, bizi-itxaropen luzea lortzeko [10]. Tarte horretatik kanpo, tenperatura 0,1 °C igotzen den bakoitzean, bateriaren kapazitatea % 5 degradatzen da [11]. Zelulen arteko tenperatura-distribuzio homogeneo bat mantendu beharra dago bateria-*pack*ean ere. Tenperatura-banaketa irregular batek ondorio txarrak ditu bateriaren kapazitatean eta bizi-zikloan, zelulen zahartze ez-homogeneoa gertatzen baita. Komunitate zientifikoaren uste orokorra da zelulen arteko tenperatura-gradienteak ez duela inoiz 5 °C-ko balioa gain-ditu behar [12].



2. irudia. Li-Ioizko bateria baten bizi-zikloa vs temperatura eta deskarga-maila ([9]-tik moldatuta).

Ihes termikoa edo *thermal runaway* deritzon fenomenoa ere oso garrantzitsua da [13, 14, 15]. Horrelako gertaerak potentzialki suntsitzaileak izan daitezkeen egoerak sor ditzakete (kea, suteak), baterien eta ibilgailuaren osotasuna arriskuan jarriz. Beraz, ihes termikoak arriskuan jar ditzake bidaiariak, bereziki ibilgailuak lur azpian operatzen ari direnean (tunel batetan edo estazio batetan), edota hegazkinetan, horiek hegan ari direnean, besteak beste.

Oso zaila da ere ibilgailuak ingurune hotzetan operatzea. Baterien kapazitatea nabarmen jaisten da sistemak baldintza gogor horietan lan egiten duenean. Sarritan, aurre-beroketarako zirkuitu bat behar izaten dute bateriek, temperatura-tarte optimora igo ahal izateko zelulen operazio-temperatura, ibilgailua martxan jarri aurretik [16]. Bateria-*pack*ek duten ohiko tamaina handia kontuan hartuta, argi dago energia asko behar dela sistema berotzeko.



3. irudia. BTMS sistema baten eskema orokorra, BTMSa osatzen duten bloke nagusiekin ([17] erreferentziatik moldatuta).

Oro har, hurrengo elementuek osatzen dute BTMS sistema bat [6]: datuak eskuratzeko blokea, zelulen arteko temperatura-banaketa estimatzeko algoritmoa, diagnosirako/kontrolerako unitate bat (hozte-sisteman eragiteko), se-

gurtasuna bermatzen duen babes-sistema bat, eta, azkenik, hozte-sistema bera (3. irudia).

BTMSei dagokienez, hainbat ikerketa-lan gauzatzen ari dira komunitate akademikoan eta industrian, hurrengo gaietan zentratuta:

- i) Gestio termikorako *software*-soluzioen (algoritmoen) garapena. Normalean, DSP (*digital signal processor*, ingelesez) bat izan behar du BTMS moderno batek gestio termikorako funtzioak gauzatzeko. Lioizko zelulen tenperaturak zehaztasun-maila nahikoarekin estimatu behar dira, lehenik eta behin. Estimaturako tenperatura horien baliokideak zehatzak izan behar dute gestio termikorako algoritmo aurretatuak era egokian ezarri ahal izateko [18] eta ihes termikoko egoerak saihesteko (kasu batzuetan, hozketarako ponpak erregulatu behar dira). Tenperaturak ongi ezagutzea oso garrantzitsua da ere *pack*-ren funtzionamendu egokia bermatzeko, eta BMSko hainbat funtzio osagarri ongi exekutatzeko, hala nola SoCa, SoHa eta RULa (*remaining useful life*, ingelesez) zehaztasunez estimatzeko [14]. Zirkuitu baliokideak (enpirikoki lortutako datuetan oinarritutakoak, normalean Randles hurbilketari jarraitzen diotenak) eta fisikan oinarritutako PBM (*physics based model*, ingelesez) eredu elektrikoak erabil daitezke, modelo termikoekin konbinatuta, aipatutako parametroen estimazioak denbora errealean gauzatu ahal izateko.
- ii) Joera nahiko berria da biki digitalen garapena [19]. Ibilgailuaren BTMSarekin komunikatuz eta bertatik datuak jasoz, konputazio-nodo batean exekuta daiteke bateria-sistemaren biki digitala, lainoan adibidez, degradazio-fenomenoak aurreikusteko (prognosia).
- iii) Trakziorako bateria-*pack* osatzen duten hozte/berotze-sistemen modelizazioa eta diseinua. Sistema horietan gertatzen den bero-transferentzia fenomenoak zehaztasunez karakterizatzen dituzten modelo elektrotermikoak gauzatzea oso onuragarria da bateriaren funtzionamenduaren analisirako, diseinurako, eta monitorizazio- eta kontrol-algoritmoen aurretiazko balioztapenerako, modeloetan oinarritutako diseinuan (MBD, *model based design*, ingelesez) oinarritutako prozedurei jarraituz [6].

Bateria-sistemen modelizazio termikoaz arituko da lan hau. Zehazki, lanaren helburua da parametriza daitekeen modelo elektrotermiko bat erakitzea, bateria-*pack* baten modulu bat deskribatzen duena eta bere funtzionamendua aztertzeko baliagarria dena. Automobilgintzarako modulu bat modelatzen da, konfigurazio zilindrikoa duten zelulez osatzen dena eta ohikoa den zelula kokapena duena (errenkadetan antolatua). Sinpletasuna eta karga konputazional baxua izan behar ditu modeloak, denbora errealean exekutatu nahi baita hori, bai BTMSak osatzen dituzten mikrokontroladoreetan integratzeko (begizta itxiko kontrolagailu termikoetan tenperatura-

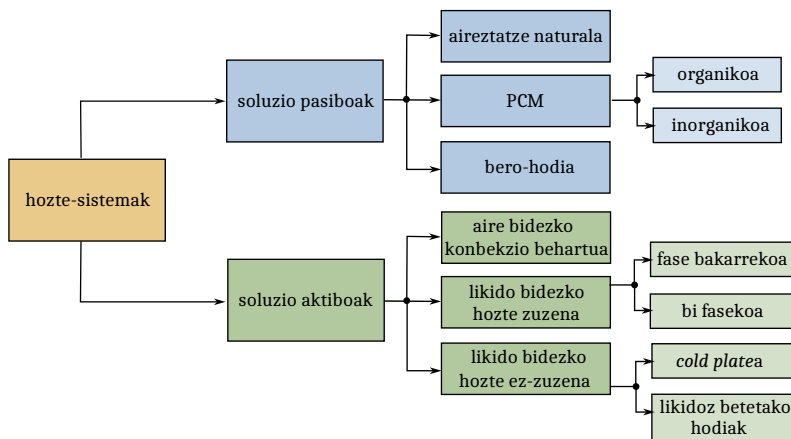
baliok estimatzeko), edota baita ere Hardware-in-the-Loop (HiL) aplikazioetan erabiltzeko. Artearen egoeratik abiatuta, ezaugarri horiek betetzen dituzten modelizazio-hurbilketak aukeratu eta konbinatuko dira.

Hainbat diseinu-parametroren eragina aztertzea ahalbidetzen du garatutako modelook, hala nola erabilitako hozgarri-mota eta jario-tasa. Gainera, sistema egoera iragankorrean azter daiteke, gidatze-ziklo estandarizatuak kontuan hartuta, adibidez. Azkenik, posible izango da zenbait hozte-hurbilketaren arteko konparaketa-analisia gauzatzea, diseinuari dagozkion erabaki garrantzitsuak hartu ahal izateko.

Honelaxe dago antolatuta artikulua. Mugikortasun elektrikorako baliagarriak diren gestio termikorako soluzio ohikoenak (behartutako aire bidezko hozketa, murgiltze bidezko hozketa, eta likido bidezko hozketa ez-zuzena) aztertzen dira 2. atalean. Ondoren, zelula zilindrikoak dituen bateria-modulua deskribatzeko garatutako modelo termikoa aurkezten da 3. atalean. Hozketarako hurbilketa ezberdinak aztertu eta konparatzen dira, berriz, 4. atalean. Garatutako modelook dituen mugak zerrendatzen dira 5. atalean. Azkenik, lanaren ondorioak laburbiltzen dira 6. atalean.

2. BATERIA-MODULUETARAKO HOZTE-SISTEMAK: ARTEAREN EGOERA

Aire bidezko (behartutako aire bidezko hoztean, bereziki), urperatze bidezko eta likido bidezko hozte ez-zuzenean oinarritzen dira ibilgailu elektrikoetako bateria-moduluak hozteko erabiltzen diren soluzio gehienak [20], 4. irudiko eskeman adierazten den bezala. Aukera ohikoenak berri-kusten dira jarraian.



4. irudia. Hozte-sistemak ezartzeko dauden aukeren diagrama orokorra.

2.1. Behartutako aire bidezko hoztea

Ibilgailu elektrikoa mugitzen ari denean era naturalean sartzen da airea bateria-*pack*ean, eta irteeratik kanporatzen da, beroa trukatu ondoren. Hala ere, bero-trukaketa hori ez da nahikoa izaten bateria osatzen duten zelulak hozteko, ibilgailuaren abiadura baxua bada, giroko tenperatura altuegia bada, edota bateriaren karga termikoa handiegia bada, besteak beste. Zenbat eta aire-emaria baxuagoa izan, hainbat eta baxuagoa da bero-transferentziarako koefizientea. Hortaz, esan daiteke bero-transferentziarako gaitasuna oso mugatuta dagoela aire bidezko hozte naturalean oinarritutako hozte-sistemak erabiltzen direnean [21].

Aipatutako arazo horri aurre egiteko, haizagailu gehigarriak jartzen dira bateria-*pack*aren aire-sarreran, aire-emaria handitzeko (konbekzio behartua). Batez ere, bero-karga baxuko aplikazioetarako da egokia behartutako aire bidezko hoztea, beraren abantailak direla eta [22]:

- a) Arrisku baxua duen hozgarri bat erabiltzen da (airea), likatsua ez dena eta zelulekin zuzenean kontaktuan dagoena.
- b) Diseinu konpaktu eta arina dute behartutako aire bidezko hozte-teknologiek.
- c) Mantentze-kostuak eta hozte-sistema ezartzeko inbertsioa txikiak dira.
- d) Fidagarritasun ona dute mota horretako soluzioek.

Hala ere, airearen eroankortasun termikoa eta bero espezifikoa baxuak dira; ondorioz, hozteko ahalmena mugatua da (hozte-errendimendua baxua da). Oro har, tenperatura altuagoak lortuko dira zeluletan, eta tenperatura-uniformetasuna txikiagoa izango da zelulen artean [23, 24]. Ondorioz, aire bidezko teknologiak hozteko modu merkeak diren arren, aire-emari handiak erabili behar dira, aipatutako parametro termikoen balio baxuak kontentsatzeko.

Haizagailuak gehitzeak sistemaren kostua handitzen du, baina bateria-*pack*aren tenperatura erregulatzea ahalbideratzen da haizagailuak kontrolatuz (karga termikoa kontuan hartuta). Horrela, sistemaren eraginkortasuna eta fidagarritasuna hobetzen dira [25].

Bestelako hozte-teknologiekin alderatuta aire bidezko hozketak gaitasun nahikoa mugatuak dituenez, oso garrantzitsua da beroaren transferentzia-prozesuan parte hartzen duten faktore guztiak ahal den neurrian optimizatzea. Lehenik eta behin, zelulen antolaketak eragina izango du errendimendu termikoan. Lerrokatutako eta mailakatutako gelaxka-konfigurazioak nabarmentzen dira kokapenerako aukeren artean. Era berean, tenperaturen uniformetasunarekin zerikusia dute zelulen arteko luzetarako hutsuneak. Horrez gain, lortzen diren batez besteko tenperaturak hozgarri modura erabilitako airearen tenperaturaren araberakoak dira. Aplikazioaren

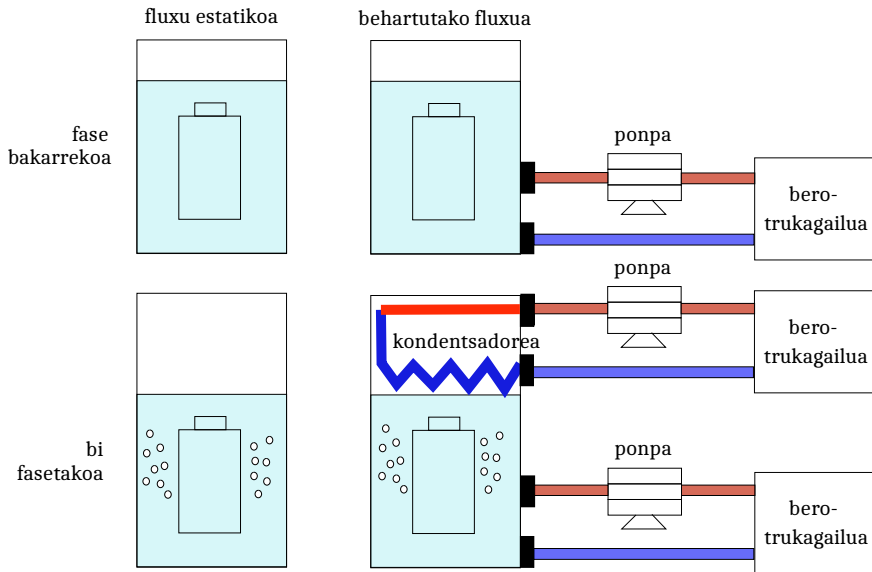
eta diseinuaren eskakizunen menpe egongo da zelulen antolaketa optimoa. Garrantzitsua da kontuan hartzea hainbat faktorek mugatuko dutela antolaketa hori, hala nola bateria-moduluek izan dezaketen bolumen maximoak.

Bateria-moduluen hainbat antolaketa konparatu zituzten Fan *et al.*-ek [26]. Lan horretatik ondorioztatzen da zelulak lerrokatuta antolatuz lortzen direla hozketarako errendimendurik onenak. Era berean, doikuntzak egin daitezke bateria-moduluaren sarreretan eta irteeretan hozketa-prozesua optimizatzeko; hau da, sarrerako eta irteerako bideen kopurua, kokapena edo sarrerako airearen tenperatura, etab. aldatzea kontsidera daiteke. Zehazki, eragin oso handia du sarrerako hozgarriaren (airearen) tenperatura murrizteak. Hala ere, kontuan izan behar da aire girotuaren unitateak potentzia gehiago kontsumitu beharko lukeela, ibilgailuaren eraginkortasun globala murriztuz. Testuinguru horretan, faktore horien guztien eragina aztertu zuten Hwang *et al.*-ek [27] ere, eta ondorioztatu zuten hozteko estrategia eraginkorrena airea bertikalki zirkulatzea dela (ezkerretik eskuineko aire-fluxuaren ordez). Hala ere, aire-hozte bertikala ez da praktikoa ibilgailu-mota guztientzat, norabide horretan moduluaren tamaina handituko delako eta, sarritan, espazioari dagozkion muga handiak daudelako ibilgailuetan. Horregatik eta praktikan, aire-fluxurako bestelako konfigurazioak aukeratzen dira.

Bestalde, eroankortasun termiko handia duten materialak ere erabil daitezke, hala nola aluminio-aparra, bero-eroapena areagotzeko. Aldi berean, aparreko poroek ere areagotu dezakete aire-fluxuaren zurrumbiloa. Beste irtenbide interesgarri bat da fase-aldaketako materialak eta aire bidezko hozketa konbinatzea, hozketa-sistemaren errendimendua hobetzeko [21].

2.2. Urperatze bidezko hozketa

Erresistentzia elektriko handia duen hozgarri batek zelulekin egiten du zuzenean kontaktua, urperatze bidezko hozketa erabiltzen denean. Hozgarri gisa ur desionizatua, hidrofuruo eterrak, fluorokarbonoak (adibidez, NOVEC 7300) eta olio minerala erabiltzen dira [28, 29, 30], besteak beste. Zuzeneko hozte likido ere esaten zaio soluzio mota horri. Bateria-zelulak hozgarri dielektriko monofasikoetan zuzenean murgiltzeak, zelulak tenperatura-tarte egokian mantentzea errazten du, eta zelulen arteko tenperatura-gradiente murrizten da [28]. Urperatze bidezko hoztea inplementatzeko aurki daitezkeen aukerak erakusten ditu 5. irudiak. Hozte-soluzio behartuak erabiltzen direnean, hozgarri dielektrikoa ponpa batekin zirkularazi ohi da, zelularen horma, erlaitz eta kable elektriko guztiekin etengabeko kontaktua bermatzeko bateria-moduluaren barruan. Zelulek sortutako beroa hozgarriak xurgatu ondoren, bero-trukagailu batetara bideratzen da, bero-energia ingurunera eramateko. Hozgarria zelulekin zuzenean kontaktuan dagoenez, beste edozein erresistentzia termiko gehigarri egotea ekiditen da [31].



5. irudia. Urperatze bidezko hozketarako aukerak ([28] erreferentziatik moldatuta).

Hozgarri dielektrikoak seguruak direnez bateria-zelulekin zuzenean kontaktuan jartzeko (hori ez da horrela beste eroale batzuen kasuan, hala nola ur/glikol nahasketekin), bero-transferentziaren errendimendua hobetzen da, zeluletan ihes-termikoak gertatzearen arriskua murriztuz, osagai elektronikoetan akatsak murriztuz edo erabiltzaileentzat shock-arriskuak gertatzeko aukerak gutxituz. Gainera, aipatu beharra dago ur/glikol hozgarrien isurpenei dagozkien ingurumen-arazoak kontuan izan behar direla. Hozgarri dielektrikoek, berriz, biodegradagarriak eta ez-toxikoak izatearen abantaila dute [28].

Hurrengo aukerak bereiz daitezke urperatze bidezko hozketari dagokionez:

- a) Fase bakarreko urperatze bidezko hozketa. Kasu honetan, hozgarria gelaxkekin kontaktu zuzenean dago, birzikulatu egin dezake, eta ez dago fase-aldaketarik [30]. Oro har, bero-transferentziari dagozkien ekuazioak aire bidezko hozte behartuari dagozkien baliokideak dira, baina fluidoari dagozkien parametroak aldatzen dira (dentsitatea, biskositatea, etab.).
- b) Fase-aldaketa bidezko hozketa. Bi faseko urperatze bidezko hozketarako teknologia interesgarriak izan daitezke. Bero-transferentzia eta zelulen arteko tenperatura uniformetasuna hobetzea ahalbideratzen dute teknologia horiek [32, 33]. Horrelako soluzioetan, bai bero sentikorra, eta baita bero latentea ere erabiltzen dira moduluko

zeluletatik beroa xurgatzeko. Bi etapa bereizten dira beroa disipatzeko prozesuan [28, 34]:

- Hasieran, hozgarri dielektrikoan murgilduta dago modulua, inolako fase-aldaketarik gertatu gabe. Ondoren, xurgatutako beroak hozgarria lurruntzen du irakite-puntua pasatzen denean. Lurrundutako hozgarriak gora egiten du eta goialdean kokatuta dagoen kondentsadorearen azalera kondentsatzen da (5. irudia).
- Azkenik, beroa disipatzen da, tenperatura baxuko termostato-bainua zeharkatzen duen hozte-likidoaren bidez. Grabitatearen eraginez, hozgarriaren tantek behera egiten dute, likido hozgarriaren bolumena konstante mantenduz.

2.3. Zeharkako likido bidezko hozketa

Aire bidezko hozketa-teknologiekin alderatuta, beroa trukatzeko gaitasun handiagoa du zeharkako likido bidezko hozketak, urperatze bidezko hozketa-rekin gertatzen zen bezala. Alde horretatik, berrikusitako hozte-teknologiaren ezaugarri nagusiak laburbiltzen dituzte 1. eta 2. taulek, bateria-moduluak hozteko aplikazioaren funtzionamendu-baldintzak kontuan hartuta.

1. taula. Airearen, olio mineralaren eta ur/glikolaren propietateen arteko konparaketa.

Ezaugarria	Airea	Olio Minerala	Ur/Glikol nahasketa
Dentsitatea (kg/m^3)	1.185	924.1	1069
Bero-ahalmen espezifikoa ($J/kg \cdot K$)	1007	1900	3323
Eroankortasun termikoa ($W/m \cdot K$)	0.026	0.130	0.389
Biskositate zinematikoa (m^2/s)	1.55e-5	5.60e-5	2.58e-6

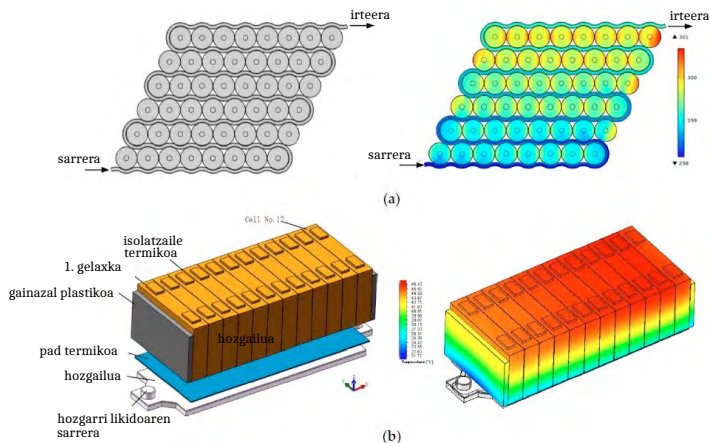
2. taula. Airearen, olio mineralaren eta ur/glikolaren bero-transferentziarako koefizienteen alderaketa.

Fluxu masikoa (G/S)	Haire (W/m^2K)	Holio (W/m^2K)	Hur/Glikol (W/m^2K)
2.5	58	81	297
7.1	112	123	297
14.0	171	161	297

Zeharkako hozte-likido bidezko soluzioetan oinarritzen diren BTMSe-tan hozgarriak ez du zuzenean ukitzen bateria-zelulen azalera. Aldiz, plaka hotz (*coldplate*, ingelesez) baten edo tutuen bidez gertatzen da bateriaren eta likido hozgarriaren arteko bero-trukaketa, 6. irudian erakusten den bezala. Bateria-moduluaren edota *pack*-aren konplexutasuna handitu egiten da gailu gehigarri horiek erabiltzen direnean. Horrez gain, bero-trukaketari dagokion erresistentzia termikoa handitu egiten da. Bero-transferentziaren eraginkortasuna gutxitzea ekar dezake horrek [31]. Kostu ekonomikoa eta pisua ere handiagoak dira [21]. Alde horretatik, kontuan izan behar da beharrezkoa dela plakak edo tutuak erabiltzea shock-elektrikoa saihesteko, zeharkako likido bidezko hozketan hozgarri ez-dielektrikoak erabiltzen direlako.

Hauexek dira zeharkako likido bidezko hozte-sistemetan erabiltzen diren likido arruntenak: ura, metal likidoak, ur/glikol nahasketak edo nanofluidoak [35]. Metalen eroankortasun termikoa bero-transferentziarako erabiltzen diren likidoena baino askoz handiagoa da, normalean. Horrela, partikula metaliko esekiak hozgarri likidoan gehitzeak hozgarriaren eroankortasun termikoa hobeto dezake. Nanopartikulak gehitzen direnez, nanofluido deritze hozgarri likido horiei. Normalean, Al, Cu, Ni, Ag, Al_2O_3 , CuO, Fe_3O_4 , TiO_2 , eta bestelako metal edota metal-oxidoak aurki daitezke nanofluido horietan [36, 23].

Nahiz eta zeharkako hozte likidoan atal elektrikoak eta hozgarria bananduta egon, kezkak sortzen dira likido-isuriei dagokienez, hozgarrien eroankortasun elektriko handiaren ondorioz zirkuitulaburrak eta istripu larriak sor daitezkeelako. Erabileran eta mantentze-lanetan segurtasuna bermatu ahal izateko, hozte-sistema likidoaren zigilatze-diseinuan jarri behar dute arreta ingeniarietik.



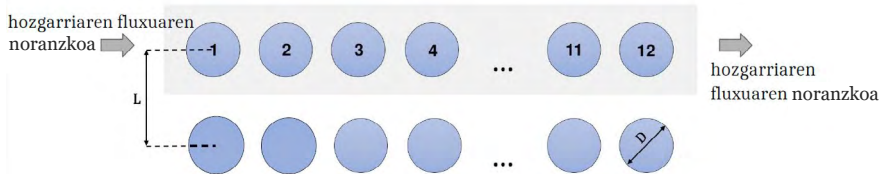
6. irudia. Zeharkako likido bidezko hozketarako soluzioak: a) tutuak b) hozte-plaka ([21] erreferentziatik moldatutako irudia).

Zeharkako hozte-likidoaren diseinua eta egitura optimizatzea funtsezkoa da hozte-errendimendua hobetzeko. Zirkulatu ahala, hozgarriaren tenperaturak gora egiten du; ondorioz, bateria-*pack*eko zelulen tenperaturetan gradienteak sortuko dira. Zeharkako hozte likidoari buruzko ikerketa ugari hozte-kanalen egitura optimizatzerara bideratuta daude, hozgarrien errendimendua hobetzeko [21]. Hodien geometria alda daiteke, dauden eskakizun geometrikoen arabera. Hala ere, bero-transferentziarako aplikazioetan ohikoa da hodi zirkularrekin topo egitea. Izan ere, gainazal jakin baterako bero-transferentziarako gaitasunik handiena dute hodi zirkularrek, presio-beherakada txikiena sortuz [37]. Bestalde, hozgarrien tenperaturak eta bateriek xurgatutako edota emandako korrante-mailek eragin handia dute Li-Ioi baterien eraginkortasunean eta exergia-suntsiketetan [23].

3. BEHARTUTAKO AIRE BIDEZKO EDO FASE BAKARREKO URPERATZE BIDEZKO HOZTE-SISTEMA DUEN KONFIGURAZIO ZILINDRIKOKO BATERIA-MODULU BATEN MODELIZAZIO TERMIKOA

3.1. Zirkuitu elektriko baliokidea eta modelizaziorako kontsiderazioak

Bateria-sistemak hozteko literatura zientifikoan aurki daitezkeen teknologia ohikoenak berrikusi ondoren, konfigurazio zilindrikoa duten bateria-moduluen modelizazio termikoa aztertzen da matematikoki. Hain zuzen ere, 7. irudian azaltzen den zelulen antolaketarako modelo termiko bat sortzea du helburu lan honek. Garatutako modeloaren bidez posible izango da hozte-sistemak baldintza ezberdinetan nola erantzuten duen aztertzea.

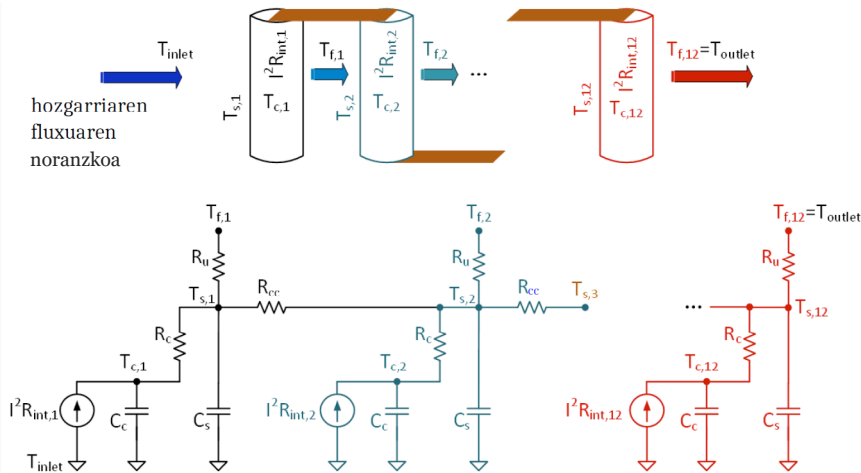


7. irudia. Gelaxka zilindrikoak dituen aztertutako 2P12S bateria-moduluaren egitura.

Modelizatu nahi den sistemaren zirkuitu elektriko baliokidea azaltzen du 8. irudiak, zelulek sortutako beroa korrante-iturri gisa irudikatuz:

$$Q = I^2 R_{int,j} [W], \quad (1)$$

non I gelaxkan zehar zirkulatu den, eta $R_{int,j}$, berriz, j . gelaxkaren barne-erresistentzia den. Zelularen Randles eredu baliokidea-aren parte da $R_{int,j}$ barne-erresistentzia, eta zelularen egoeraren menpekoa da: SoC-aren, operazio-tenperaturaren eta zelularen zahartzearen edota SoH-aren menpekoa [8].



8. irudia. Bero-transferentziari dagokion zirkuitu elektriko baliokidea.

Beroaren transferentziari dagokion fenomenoak erresistentzia eta kapazitate termikoen bidez adierazten dira (8. irudia). Hain zuzen ere, T_s , T_c eta T_f zelularen gainazaleko, nukleoko eta hozgarriaren temperaturak dira, hurrenez hurren. R_c erresistentzia termikoa da, nukleoren eta zelularen azaleraren arteko bero-transferentzia deskribatzen duena (eroapen-fenomenoaren bitartez). Era berean, zelula-azaleraren eta ingurumenaren arteko bero-transferentzia deskribatzen du R_u erresistentzia termikoa. Aldiz, zelulen arteko konexio posibleen bero-eroapenarekiko erresistentzia adierazten du R_{cc} -k [38]. Azkenik, C_c zelularen barneko bero-ahalmena da, eta C_s estaldurari dagokion bero-ahalmena.

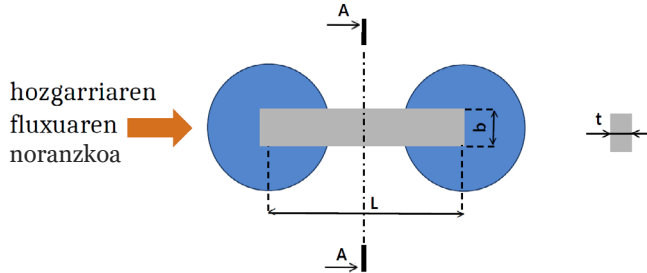
Hurrengo alderdiak kontsideratu dira modeloa garatzeko:

1. R_{cc} parametroari dagokionez, honela kalkulatu da beraren balioa:

$$R_{cc} = \frac{L}{k \cdot A} \quad [m^2 K / W], \quad (2)$$

non k pletina metalikoan erabilitako materialaren (nikela) eroankortasun termikoa den, eta A hozgarriaren emari-norabideari dagokion

zeharkako sekzioa ($A = b \cdot t$) (9. irudia). Gelaxkak konektatzen dituen pletina metalikoaren neurriak ezagutu behar dira R_{cc} parametroa kalkulatu ahal izateko (3. taula).



9. irudia. Alboko gelaxkak konektatzen dituen xafla metalikoaren diagrama.

3. taula. Gelaxkak konektatzen dituen pletina metalikoaren parametro esanguratsuenak.

Luzera	L	23.00 mm
Zabalera	b	7.95 mm
Lodiera	t	0.15 mm
Eroankortasun termikoa	kNi	90.7 W/(mK)

2. Kasu batzuetan eta aurretik aipatu den bezala, zelularen barruan gertatzen den eroankortasun-fenomenoa arbuaitu egin daiteke, zelulan zehar dagoen tenperatura konstantea dela kontsideratuz. Hurbilketa hori nahikoa zehatza izan daiteke Biot-en zenbakia 0.1 baino txikiagoa denean ($Bi < 0,1$). Alde horretatik, honela kalkulatu da dimentsiorik gabeko Biot-en zenbakia:

$$Bi = \frac{L_c \cdot h}{k} < 0,1, \quad (3)$$

non k gelaxken eroankortasun termikoa den, h bero-transferentzia konbektiboaren koefizientea eta $L_c = V/A_s$ luzera karakteristikoa. Horrez gain, V solidoaren bolumena da eta A_s beraren azalera.

Modelatutako gelaxken dimentsioak 22 cm \times 65 cm-koak dira. Bestalde, $k = 270$ da norabide axialean, $k = 3$ norabide erradialean, eta h parametroa hozte-sistemaren operazio-baldintzen arabera da. Norabide axialean (3) inekuazioa betetzen da, aztertutako opera-

zio-baldintza guztietarako. Operazio-baldintza batzuetarako (3) betetzen da norabide erradialean, baina, beste kasu batzuetan, 0,1eko magnitude-ordenakoa da Bi . Garatutako modeloan sinpletasuna hobesten denez, norabide erradialean sor litekeen errore gehigarria onartuz kasu horietan.

3. Bero-transferentzia zilindroaren norabide erradialean deskribatzena mugatzen da garatutako eredua, norabide axialeko transferentzia baino askoz ere esanguratsuagoa delako [39]. Aurreko puntuan aipatutakoaren harian, Kong *et al.* eta Li *et al.* bezalako autoreek egiaztatu zuten bateria zilindrikoko zeluletan norabide axialeko tenperatura-ezberdintasunak arbuigarriak izan daitezkeela deskarga-prozesuan zehar, eta zelularen erdiguneko tenperaturak zelularen tenperaturaren balioa adieraz dezakeela [40, 41].
4. Jo da ez dagoela bero-transferentziarik paraleloan jarritako bi zelulen artean. Hori horrela da paraleloan jarritako zelulek oso ezaugarri antzekoak dituztelako, eta operazio-baldintza ia berdinetan daudelako (hau da, ez dago tenperatura-gradienterik horien artean).
5. Garatutako modelo baliagarria da behartutako aire bidezko hozketa eta fase bakarreko urperatze bidezko hozketa karakterizatzen diren hodiekin sekzio zirkularra dutela jo da urperatze bidezko hozte-sisteman. Airearentzat, berriz, sekzio karratua erabili da. Hozteko bi aukeren arteko konparazio zuzena ahalbidetzeko (antzeko baldintzetan gertatzen dena), diametro hidrauliko berdina jotzen da bi kanaletarako:

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad [m], \quad (4)$$

non A kanalaren azalera den eta P horren perimetroa. Hurrengoak lortzen da azalera karratua kontsideratu denean:

$$D_h = \frac{4x^2}{4x} = x, \quad (5)$$

non x karratuaren alde bakoitzaren tamaina den.

Aldiz, hodi zirkular baten kasuan honela adierazten da D_h terminoa:

$$D_h = \frac{4\pi D^2/4}{\pi D} = D. \quad (6)$$

Beraz, 0,002 m²-ko sekzio karratuak $D_h = 0,00447$ m²-ko diametro hidraulikoa du. Horrela, 0,00157 m²-koa da sekzio zirkular balioki-dea.

3.2. Ekuazio diferentzialak eta eredu kontzentratuen bidezko sinplifikazioa

Orokorrean, hurrengo ekuazio diferentzialek deskribatzen dituzte 8. irudiko bero-transferentziako fenomenoak [38]:

$$C_c \frac{dT_{c,i}}{dt} = Q_i + \frac{T_{s,i} - T_{c,i}}{R_c}, \quad (7)$$

$$C_s \frac{dT_{s,i}}{dt} = \frac{T_{f,i} - T_{s,i}}{R_u} + \frac{T_{s,i} - T_{c,i}}{R_c} + Q_{cc,i}, \quad (8)$$

non i indizeak gelaxkaren zenbakia adierazten duen, eta Q_{cc} serie-kate bereko alboko zelulen arteko bero-transferentzia den. Honela kalkulatzeko da azken termino hori:

$$Q_{cc,i} = \begin{cases} (T_{s,2} - T_{s,1})/R_{cc}, & i = 1, \\ (T_{s,i-1} + T_{s,i+1} - 2T_{s,i})/R_{cc}, & i = 2, \dots, n-1, \\ (T_{s,n-1} - T_{s,n})/R_{cc}, & i = n, \end{cases} \quad (9)$$

Aurretik aipatutako hipotesiak kontuan hartzen badira, bero-transferentziari dagozkion ekuazioak honela adieraz daitezke:

$$m_{cell} \cdot c_{p,cell} \cdot \frac{dT_{s,i}}{dt} = h \cdot A_s (T_{f,i} - T_{s,i}) + Q_{gen,i} + Q_{cc,i}, \quad (10)$$

non, berriz ere, i terminoak gelaxkaren zenbakia adierazten duen, m_{cell} gelaxkaren masa den, eta lehenengo terminoak gelaxkaren gainazaleko bero-transferentziari erreferentzia egiten dion, batez ere konbekzioaren bidez gertatzen denari.

Hozgarria berotu egiten da, paraleloan muntatuta dauden bi zelula-serietan zehar beroa ateratzen duen ahala:

$$T_{f,i} = \begin{cases} T_{f,in}, & i = 1, \\ T_{f,i-1} + 2 \cdot (T_{s,i-1} - T_{f,i}) / (R_u R_f^{-1}), & i = 2, \dots, n, \end{cases} \quad (11)$$

non R_f^{-1} hozgarriaren eroankortasun termikoa den, eta R_u konbekzio-fenomenoari lotutako erresistentzia. Bero-ahalmen espezifikotik abiatuta, fluidoaren bero-ahalmena kalkulatzeko, honela defini daiteke sarrerako aire-emaria:

$$\dot{m} = \rho_f \cdot S_f \cdot v_f \quad [\text{kg/s}], \quad (12)$$

non ρ_f hozgarriaren dentsitatea den, v_f hozgarriaren abiadura eta S_f aireztapen-azalera.

Ondorioz, $Q_i > 0$ denez, $\forall i, T_{inlet} < T_{f1} < T_{f2} < \dots < T_{f11} < T_{outlet}$ betetzen da. Zelulen ezaugarriak homogeneoak direla kontsideratuz, hau da, zahartze berdina izan dutela eta parametro elektrikoak berdintsuak direla joz, orduan $T_{c1} < T_{c2} < \dots < T_{c11} < T_{c12}$ ere betetzen da.

Bestalde, nabarmendu beharra dago zelulak ez daudela isolatuta, moduluak osatzeko konbinatuta daude. Hori kontuan izan behar da konbektzio-beroaren transferentzia-koefizientea bezalako parametro bat kalkulatzeko. Zelula bakoitzak eragina du hozgarriaren fluxuaren erudian eta turbulentsia-mailan eta, ondorioz, bero-transferentzian. Hozgarria sartzen den aldean paraleloan muntatuta dauden lehenengo bi zelulei dagokienez, gainerako zelulen presentziak ez die eragiten, eta fluidoak horiek bakarrik egongo balira bezala jokaten du, batez ere bi zelulak beraien artean oso hurbil ez badaude. Berriz, bigarren ilarako (eta hurrengo ilarerako) fluxuaren izaera oso bestelakoa da, goiko gelaxken eraginez sortzen diren zurrubiloen ondorioz. Turbulentsia-maila dela eta, ilara-kopuruarekin batera handitzen da bero-transferentziaren koefizientea [37]. Kasu horietan, espermentalki aztertu ohi da fluxuaren portaera, analitikoki ebazteko problema konplexuegia delako. Sistema osoaren bero-transferentziaren batez besteko koefizientean jartzen da arreta batez ere, zeina ilara-kopuruaren, konfigurazio lerrokatu edo mailakatuaren eta gelaxken tamainaren araberrakoa den.

Bero-transferentziarako koefizientea, erresistentzia termikoaren aldeantzikkoa dena, hau da $h = 1/R_c$, honela kalkula daiteke:

$$h = \frac{Nu_D \cdot k_f}{D} \quad [W / m^2 K], \quad (13)$$

non k_f hozgarriaren eroankortasun termikoa den eta D gelaxkaren diametroa. Kanpo-konbektzio behartuaren menpe dauden zilindro bat baino gehiagorentzat hurrengo ekuazioak ezartzen dira [42]:

$$Nu_D = C_1 \cdot C_2 \cdot Re_{D,max}^m \cdot Pr^{0.36} \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{1/4}, \quad (14)$$

non C_1 , C_2 eta m konstanteak diren, Pr Prandtl-en zenbakia den, Pr_w gelaxkaren gainazaleko tenperaturan ebaluatutako Prandtl-en zenbakia den, eta $Re_{d,max}$ Reynolds-en zenbakirik handiena den. Nu-k balio hauek hartzen ditu Reynolds-en zenbaki ezberdinetarako [43]:

$$Nu = \begin{cases} 0.85 Re^{0.4} Pr^{0.61} Pr_w^{-0.25} & 10^0 < Re < 10^2, \\ 0.51 Re^{0.5} Pr^{0.61} Pr_w^{-0.25} & 10^2 < Re < 10^3, \\ 0.27 Re^{0.63} Pr^{0.61} Pr_w^{-0.25} & 10^3 < Re < 2 \cdot 10^5, \\ 0.021 Re^{0.84} Pr^{0.65} Pr_w^{-0.25} & 2 \cdot 10^5 < Re < 2 \cdot 10^6. \end{cases} \quad (15)$$

Prandtl-en zenbakia honela kalkula daiteke:

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{k}. \quad (16)$$

Azkenik, espazio librearen abiaduratik kalkula daiteke alboko bi gelaxken arteko espazioko ($L - D$) aire-fluxuaren gehieneko abiadura, (17)-n azaltzen den bezala. Fluido zelulen artean sartzen denean, fluxu-azalera murriztu egiten da; ondorioz, fluxu-abiadura handitzen da. Horregatik, fluxuaren ezaugarriak bateria-moduluaren hozgarriaren abiadura handienaren (V_{max}) menpe daude.

$$V_{max} = \frac{L}{L - D} v \quad [m / s]. \quad (17)$$

Era berean, honela definitzen da Reynolds-en zenbakia:

$$Re = \frac{\rho_f \cdot V_{max} \cdot D}{\mu_f}, \quad (18)$$

non ρ_f eta μ_f fluido hozgarriaren dentsitatea eta biskositatea diren, hurrenez hurren. Nusselt-en zenbakien batez besteko erlazioak 16 lerro edo gehiago dituzten hodi-bankuentzat garatutakoak dira. Adierazpen berdinak erabili daitezke lerro-kopurua txikiago izanez gero (lan honetan aztertzen ari den kasuan 12 lerro daude), lortutako Nusselt-en zenbakiari zuzenketa-faktore bat ezarriz [37]. Erabili beharreko zuzenketa-faktoreak 4. taulan daude laburbilduta.

4. taula. F zuzenketa-faktorea (FNu_D espresioan erabiltzeko), $N_L \leq 16$ eta $Re_D \geq 1000$ kasuetarako.

NL	1	2	3	4	5	7	10	13
Lerrokatuta	0.70	0.80	0.86	0.90	0.93	0.96	0.98	0.99
Mailakatuta	0.64	0.76	0.84	0.89	0.93	0.96	0.98	0.99

3.3. Presio-erorketa hozte-sisteman

Beste parametro interesgarri bat ΔP presio-erorketa da, sarreraren eta irteeraren presioen arteko diferentzia adierazten duena. Zelulek hozgarriari eragiten dioten erresistentziaren neurria da ΔP , eta honela adierazten da [37]:

$$\Delta P = N_L f \chi \frac{\rho V_{max}^2}{2} \quad [Pa], \quad (19)$$

non f marruskadura-faktorea den eta χ zuzenketa-faktorea. Gelaxkak era errektangeluarrean edo banaketa karratuan ordenatuta egoteak sortzen dituen desbideratzeak zuzentzeko erabiltzen da zuzenketa-faktore hori. Bestalde, Reynolds-en zenbakiaren eta gelaxka-antolaketaaren arabera zehaztu daiteke f , datu esperimentaletatik abiatuta. Alde horretatik, [37] erreferentzian aurki daitezke marruskadura-koefizientearen balioak, lerrokatutako gelaxken antolamendu baterako, Reynolds-en zenbakiaren eta P_L eta P_T parametroen arabera. Gelaxken arteko distantzia horizontal eta bertikalen eta gelaxken diametroaren arteko koefizientea zein den adierazten dute P_L eta P_T parametroek.

Kontuan izan behar da $\chi = 1$ dela zelulak karratu modura kokatuta daudenean. Bestalde, presioaren jaitsiera fluxuaren norabidean gertatzen da; ondorioz, ilara-kopuruaren balioa (N_L) agertzen da (19)-n termino bezala.

Presio-jaitsierarekiko proportzionala da bateria-moduluan zehar hozgarria mugitzeko kontsumitu behar den potentzia. Honela zehaztu daiteke ponpaketa-potentzia¹:

$$\dot{W} = \dot{V} \Delta P = \frac{\dot{m} \Delta P}{\rho} \quad [W], \quad (20)$$

non \dot{V} emari bolumetrikoa den eta \dot{m} bateria-modulua zeharkatzen duen emari masikoa.

Matlab/Simulink ingurunean inplementatu da 3. atalean matematikoki deskribatu den eredua. MBD paradigma baliatu da horretarako. Simulink-en Simscape *toolbox*eko bateriak simulatzeko modulua erabili da horien eredu elektrikoa inplementatzeko. Aldiz, m programazio-lengoaia erabili da eredu termikoari dagozkion ekuazio diferentzialak ezartzeko. Denbora-diskretuan inplementatu dira ekuazioak (z-domeinua), eta *backward Euler* diskretizazio-metodoa erabili da modeloak dituen ekuazio diferentzial arruntak ebazteko.

¹ Urperatze bidezko hozte behartuaren kasuan ponpa bat behar da likidoak zirkulatzeko. Aire bidezko hozketan, ordea, bi aukera daude. Alde batetik, haizagailu bat erabiltzea ohikoena litzateke. Hala ere, kasu partikular batzuetan posible litzateke ibilgailua martxan deneko aire-fluxu naturala erabiltzea hozketarako, disipatu beharreko bero-kopurua nahikoa txikia balitz.

4. FASE BAKARREKO URPERATZE BIDEZKO HOZKETA VS AIRE BIDEZKO HOZKETA: SIMULAZIOEN ANALISIA

Atal honetan, aztertutako bateria-modulua hozteko erabil daitezkeen bi alternatiba, aire bidezko eta fase bakarreko urperatze bidezko hozketa, alderatzen dira jarraian. Horretarako *Matlab/Simulink*en garatutako modeloa erabili da. Sistemaren parametro orokorrak erakusten ditu 5. taulak. Bestalde, 1. taulan erakusten diren bero-ahalmen espezifikoen balioen arabera, argi geratzen da, masa-emari jakin batetarako, olio minerala erabiltzen duen urperatze bidezko fase bakarreko hozte-sistemak duela bero-ahalmenik handiena. Adibidez, 7 g/s-ko masa-emari baten kasurako 13 J/Ks eta 7.16 J/Ks balioak lortzen dira, hurrenez hurren. Bero-transferentziarako koefizienteari dagokionez, 2. taulan ikus daitezke bi kasuetarako lortutako balioak.

5. taula. Aztertutako sistemaren parametro termiko orokorrak.

Parametroa	Sinboloa	Balioa	Unitateak
Gelaxkaren bero-ahalmen espezifikoa	$c_{p,cell}$	1000	$J/kg K$
Gelaxkaren eroankortasun termikoa	k_{cell}	3	$W/m K$
Gelaxkaren dentsitatea	ρ_{cell}	2450	$kg m^3$
Gelaxkaren masa	m_{cell}	0.1	kg
Aireztapen-azalera	S_a	0.002	m^2
Prandtl-en zenbakia	Pr	0.702	—
Prandtl-en zenbakia azaleran	Pr_w	0.7	—
Gelaxken arteko erresistentzia termikoa	R_{cc}	212.6	$W/m^2 K$

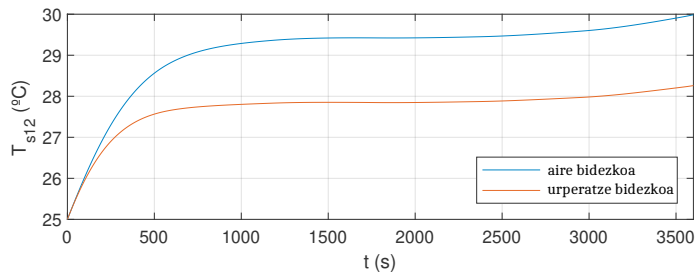
Bateria-modulua osatzen duten gelaxka guztien parametro elektriko eta termikoak orekatuak (berdinak) direla jo da sinpletasunagatik. Artikulu honetan, autoreak modeloaren atal termikoaren azterketan zentratzen direnez, ez dira zelulen modelizazio elektrokimikoari dagozkion xehetasunak azaltzen (emaitza esperimentalen bidez lortutako Randles motako zirkuitu baliokidea erabili da zelulen portaera elektro-kimikoa modelatzeko [8]).

Bi hozte-teknologietarako lortutako emaitzak alderatzeko, diametro hidrauliko berdinez gain, masa-emari berdina erabiltzen da. Hain zuzen ere, 7 g/s-ko masa-emaria jo da simulazioak egiteko.

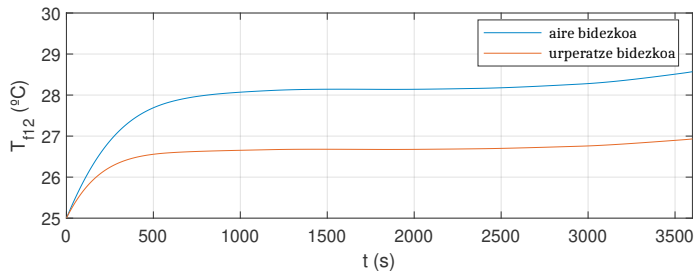
Gauzatutako simulazioetan Li-Ioi bateria-moduluaren zelulak deskargatu dira, hasierako % 80ko SoC batetik % 20ko baliora irisi arte. Zehazki, 3600 s irauten duen deskarga-prozesua simulatu da. Horretarako, 20 A-ko korrante konstantearekin gauzatzen da deskarga-prozesua; batez beste, 2 W-eko beroa sortu da modulua osatzen duen zelula bakoitzean.

Gauzak horrela, 10. eta 11. irudiek erakusten dute urperatze bidezko hozketa erabiliz tenperatura baxuagoak lortzen direla aire bidezko solu-

zioarekin baino. Aztertutako baldintzetan, zelulen temperatura maximoa ia 2 °C handiagoa da aire bidezko sisteman. Olio mineralaren C_p parametroa handiagoa denez, energia gehiago xurgatzeko gaitasuna du berotu aurretik (11. irudia). Gainera, 12. eta 13. irudietan ikus daiteke nola temperatura askoz uniformeagoak lortzen diren olio mineralarekin, bateria-modulua osatzen duten zelulen artean². Hala ere, 5 °C baino baxuagoa den gradiente termikoa lortzen da bi teknologiek. Gogoratu behar da irizpide hori jotzen dela literatura zientifikoan moduluko zelulen arteko zaharkitze ez-homogeneoa minimizatzeko balio maximotzat.



10. irudia. 2P12S konfigurazioko bateria-moduluko zelulen temperatura maximoaren arteko konparaketa, kontuan hartuta airearen eta olio mineralaren masaren fluxu-ratioa 7 g/s-koa dela.



11. irudia. 2P12S konfigurazioko bateria-moduluko hozgarrien irteerako tenperaturen arteko konparaketa, kontuan hartuta airearen eta olio mineralaren masaren fluxu-ratioa 7 g/s-koa dela.

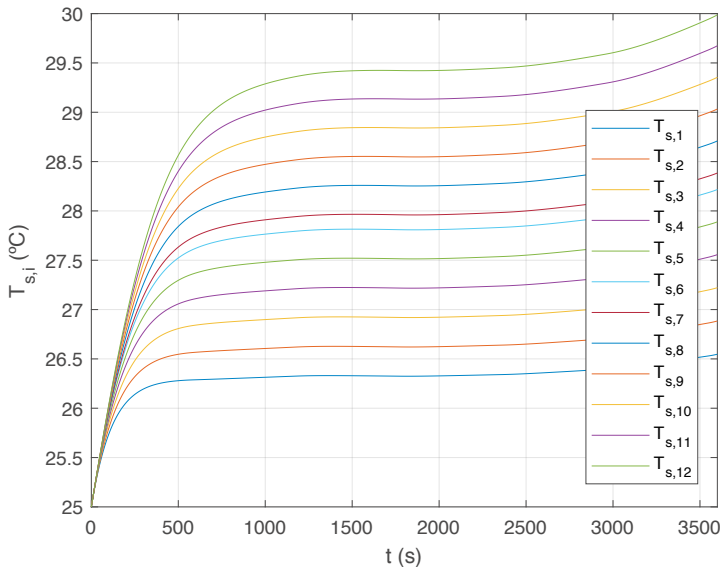
² Ondoz ondo kokatutako gelaxken arteko temperatura-gradiente nahikoa homogeneoak lortzen dira garatutako modeloaren bidez, 2P12S modulua h parametroaren batez besteko balioa kalkulatu delako eta, sinpletasunagatik, balio horixe ezartzen zaielako sistema osatzen duten gelaxka guztiei.

Azkenik, temperaturen balioak ez ezik, ponpen energia-kontsumoa ere aztertu behar da. Alde horretatik eta 7 g/s-ko masa-emarirako, honela kalkulatu da olio mineraleko eta aire bidezko hozte-sistemen kontsumoaren arteko ratioa:

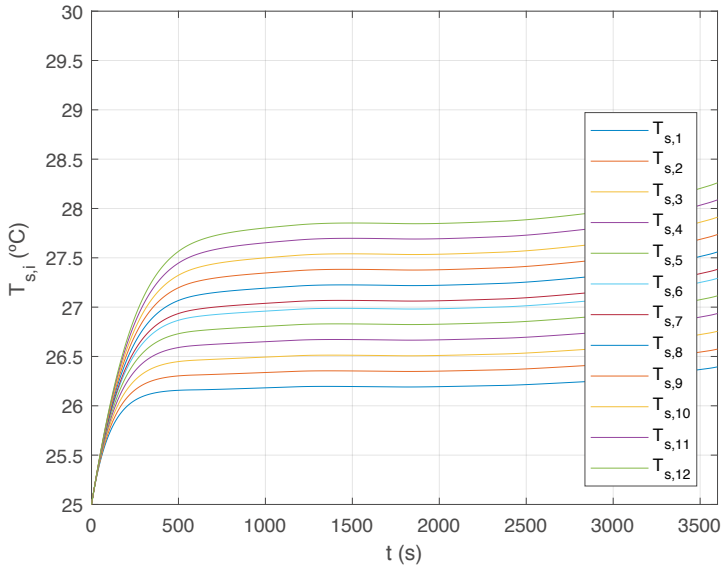
$$\frac{W_{air}}{W_{oil}} = \frac{\frac{\dot{m}}{\rho_{air}} N_L f_{air} \chi_{air} \frac{\rho_{air} V_{max,air}^2}{2}}{\frac{\dot{m}}{\rho_{oil}} N_L f_{oil} \chi_{oil} \frac{\rho_{oil} V_{max,oil}^2}{2}} = \frac{f_{air} \chi_{air} \rho_{air} V_{max,air}^2 \rho_{oil}}{f_{oil} \chi_{oil} \rho_{oil} V_{max,oil}^2 \rho_{air}} = 1.7 \cdot 10^3. \quad (21)$$

Beraz, moduluan zehar hozgarria gidatzeko energia-kontsumoa W batzuen ordenakoa da aire bidezko hozte-sistamarako, jo den masa-emarirako, eta mW batzuen ordenakoa urperatze bidezko hozte likidoko sistamarako.

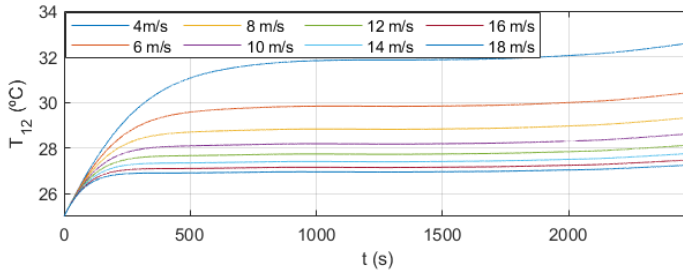
Ondoren, bateria-moduluan deskarga-ziklo berdina ezarri da, baina oraingoan aire bidezko hozketa-sisteman fluxu masikoak duen eragina aztertu da, 14. irudian erakusten den bezala. Argi dagoenez, serie-kateko azken zelulak jasango du temperatura altuena; horregatik azken gelaxkaren temperaturaren eboluzioa irudikatzen da bakarrik.



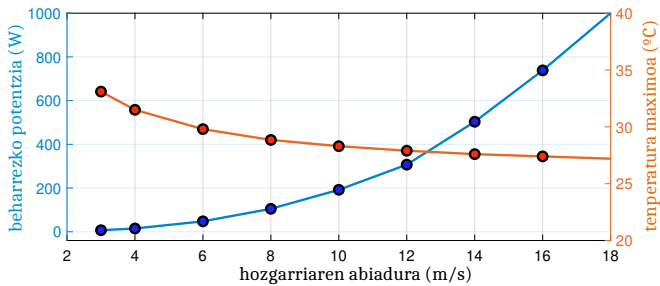
12. irudia. Bateria-moduluan seriean konektatutako hamabi gelaxken tenperaturen eboluzioa, aire bidezko hoztearekin eta 7 g/s-ko emari masikoarekin.



13. irudia. Bateria-moduluan serian konektatutako hamabi gelaxken temperaturan eboluzioa, murgiltze bidezko hoztearekin eta 7 g/s-ko emari masikoarekin.



14. irudia. Airearen abiadurak temperaturaren eboluzioan duen eragina.



15. irudia. Airearen abiadurak gehieneko temperaturaren eta ponpaketa-potentzian duen eragina.

Azkenik, bateria-moduluan zehar sortzen den presio-erorketa kalkulatu da, aire-masaren emari desberdinetarako, 3.2. atalean garatutako ekuazioak erabiliz. Presio-jaitsieraren araberakoa izango da hozgarriak abiadura jakin bat lortzeko behar duen potentzia (eta baita emari bolumetrikorearen araberakoa ere). Aldi berean, abiaduraren karratuaren araberakoa da presio-erorketa. Beraz, fluidoak abiadura handiagoa izateak termino horren balioa nabarmen handituko du. Horregatik, behar den potentzia 7.1 W-ekoa da 3 m/s-ko hozte-abiadurarako, eta 1 kW-ekoa 18 m/s-ko abiadurarako. Ondorio garrantzitsu bat lortzen da azken analisi horretatik. Fluidoak 8 m/s-tik 18 m/s-ra azeleratzeak 10 aldiz potentzia gehiago kontsumitzea dakar, baina 1.5 °C baino ez da jaisten tenperatura maximoaren balioa. Gainera, 15. irudiak erakusten du nola, puntu batetik aurrera, ponpaketa-potentzia handitzeak ez duen hozte-efektu esanguratsurik sortzen. Horregatik, lan-baldintzak optimoak izan daitezten, ezinbestekoa da tenperatura maximoa mugatzea ez ezik potentzia gehigarria kontsumitzearen ondorioak kontuan hartzea ere BTMS sistemaren diseinurako.

5. EREDU TERMIKOAREN ZIURGABETASUNAK ETA MUGAK

Lan honetan aurkezten den eredu termikoak bateria-modulua osatzen duten zelulen tenperaturak karga konputazional baxuarekin zehaztea ahalbidetzen du, zeina denbora errealeko aplikazioetan inplementatzeko ezaugarri egokia den. Hala ere, hurrengo ziurgabetasunak eta mugak ditu garatutako modeloak:

- Sinpletasunagatik, simulatutako zelula bakoitzak parametro elektriko eta termiko berdinak dituela jo da lan honetan. Hala ere, kalitate handiko zelulak erabiltzen badira ere, denborarekin ezberdintasunak sortuko dira horien artean, zahartze-prozesua ez-uniformea delako (simulazio-emaitzetan ikusi den bezala, tenperatura-gradiente bat sortzen da moduluan, halabeharrez, hozte-sistemen ezaugarriak direla bide). Ondorioz, erroreak sor daitezke modeloan nahikoa degradatuta dagoen bateria bat simulatu nahi denean [44]. Eredutermikoa denbora errealeko aplikazioetan erabili nahi bada, arazo hori minimiza daiteke EKF (*Extended Kalman Filter*, ingelesez) motako estimadoreak erabiliz, bateriaren parametro elektrikoaren eboluzioari jarrai dakiokelako [45, 46].
- Paraleloan muntatutako gelaxken tenperatura homogenea dela jo da. Alde horretatik, 3.1 atalean azaldu den bezala, moduluan paraleloan kokatuta dauden bi zilindroren artean tenperatura-gradienterik ez dagoela jo da; ondorioz, ez litzakete bero-transferentziarik gertatuko gelaxka horien artean. Baldintza ez-idealetan lan eginez gero, norabide horretako bero-transferentzia kontuan hartu beharko litzakete modeloan. Horrek karga konputazionala gehituko luke.
- Bateria-sistema abiaraztean gelaxken arteko tenperaturak homogeenak ez izatea posible izan daiteke kasu partikular batzuetan. Tenperatura-sentsore gutxi batzuk jarri beharko liriateke tenperatura-gra-

diente horiek zehazteko. Gelaxka bakoitzean sentsore bat instalatzea gehiegizkoa da praktikan. Horregatik, aztertu beharko litzateke jarri beharreko sentsore-kopuru minimoak zein izan behar duen, eta baita ere horien kokapena bateria-moduluan zehar. Behin sentsore horiek muntatuta, neurtutako tenperaturak lagungarriak izan daitezke modeloak tenperaturak estimatzeko duen zehaztasuna hobetzeko.

- Eredu kontzentratuek (*lumped thermal models*, ingelesez) erroreak sor ditzakete estimatutako tenperatura-balioetan. Richardson *et al.*-ek [47] erreferentzian frogatu zuten nukleoaren eta azaleko tenperaturaren arteko aldea $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ baino handiagoa izan daitekeela, kasu batzuetan, batez ere deskarga baldintza altuekin edo korrante oso fluktuagarria eskatzen duten kargekin lan egitean.
- Kasu gehienetan, konbekzio bero-transferentziarako koefizientean (h) % 15eko ziurgabetasuna izatea normalizat jotzen da. Ondorioz, % 30 arteko ezberdintasunak lor ditzakete simulazio-emaitzek errealitatearekin konparatuz. Bestalde, h konstantea eta uniforme delatzen da ere zalantzan jar daitekeen hurbilketa bat da, batez ere konfigurazio geometriko irregularrak direnean sisteman. Beraz, kalkulaturako konfigurazio geometrikorako datu esperimental nahikorik ez badago, ezin da bermatu emaitzen errorea % 15etik behera izango denik, ezta $Bi = 0$ bada ere [37].
- Aurkeztutako ereduak ez du kontuan hartzen bero-transferentzia erradiatiboa. Hori ez da arazoa artikulu honetan aztertutako kasu praktikoetan, erradiazioaren ekarpena fenomeno konbektiboena baino askoz txikiagoa baita. Hala ere, sinplifikazio horrek ez luke balio beharko beste kasu zehatz batzuetarako.

Laburpen gisa, esan daiteke modeloa hobetu egin daitekeela, aurretik aipatutako errore horiek minimizatzeko eta emaitza zehatzagoak lortzeko. Hala ere, modeloaren karga konputazionala edota konplexutasuna handitzen da, eta modeloa denbora errealean exekutatu nahi bada, oreka bat bilatu behar da zehaztasunaren eta karga konputazionalaren artean. Horrek guztiak ikerketarako bide berriak zabaltzen ditu autoreentzat.

6. ONDORIOAK

Aire behartu bidezko, urperatze bidezko eta zeharkako hozteko likido bidezko soluzioak asko ikertu dira komunitate zientifikoan eta industrian bateria-moduluak hozteko. Teknologia bakoitzak bere abantailak eta desabantailak ditu; beraz, aplikazio zehatz bakoitzaren eskakizunen arabera aukeratu beharko litzateke soluzio-mota bat edo beste.

Lan honetan garatutako eredu elektrotermikoa erabilgarria da aire eta urperatze bidezko hozte-metodoak aztertzeko eta alderatzeko, zelula zilindrikoak aplikatuta. Simulazioei dagokienez, zentzua duten emaitzak eta on-

dorio orokorrak lortu dira. Hozgarriaren abiadura handitzeak zelulen tenperatura maximoa murrizten du. Hozte-sistemek duten konfigurazioaren arabera, tenperatura-gradienteak sortzea normala da, lehenengo eta azken zelulen artean bereziki, fluido hozgarriaren zirkulazioaren norabidean. Aireari dagokionez, tenperatura maximo altuagoak eta zelulen arteko uniformetasun txikiagoa lortzen dira, olio mineralean oinarritutako urperaketa bidezko hoztearekin alderatuta. Hala ere, esan beharra dago literatura zientifikoan zehazten den 5 °C-tako gradiente-mugaren azpitik egon direla aztertu diren hozte-sistemen simulazio-eraketak. Gainera, airearen dentsitatea askoz txikiagoa denez, eta emari bolumetrikoa handiagoa, potentzia gehiago kontsumitu behar da aire bidezko hozte-sistemetan kanalaren marruskadura-galerak konpentsatzeko. Halaber, frogatu da hozgarriaren abiadura oso handietarako lortzen den hozte-efektu gehigarria ez dela hain esanguratsua kontsumitzen den energiarekin alderatuta. Beraz, hozte-sistemaren diseinuan kontuan hartu behar den parametro bat izango da hori.

Amaitzeko, aipatu beharra dago zenbait muga dituela garatutako modelo elektrotermikoak: baterien barruko prozesu elektro-kimikoak ez dira erabat ezagutzen, bateria-moduluan ez da zelulen arteko parametro-desorekarik kontuan hartzen, eta konbekzioko bero-transferentziarako koefizienteak kalkulatzeko ahalbideratzen duten ekuazioak ziurgabetasunen menpe daude. Gainera, eredu kontzentratuak erabiltzeko estimatutako tenpereturen balioetan erroreak sor ditzakete. Ondorioz, modeloaren hobekuntzan ikeretzen jarraitu behar da. Hala ere, esan beharra dago proposatutako eredu baliagarria dela analisi konparatibo kualitatiboak egiteko eta kudeaketa termikoaren sistema aztertzeko eta dimentsionatzeko. Garatutako modeloak duen sinpletasuna eta karga konputazional txikia direla eta, denbora errealean exekutatzeko egokia da. Horrela, estimazio termikorako erabil daitezke BMS bat osatzen duen mikrokontrolagailu batean, edo baita HIL (*Hardware in the Loop*, ingelesez) aplikazioetan, MBD metodologiaren testuinguruan. Azken prozedura hori oso interesgarria da mikrokontrolagailuetan oinarritutako BTMS-sistemak eta horien algoritmoak denbora errealean probatu eta egiaztatzeko. Hala ere, etorkizunean beharrezkoa izango da eredu esperimentera balioztatzea eta horren parametroak hobeto doitzeko, plataforma fisiko bat eskuragarri denean.

ERREFERENTZIAK

- [1] E. TRANCHO, E. IBARRA, N. SABIHI eta I. LÓPEZ, 2017, «Ibilgailu elektrikoaren propulsioko sistemak: motor elektrikoak eta horien kontrola», *Ekaia*, **Ale berezia**, 61-82.
- [2] A. SIERRA-GONZALES, E. IBARRA, I. KORTABARRIA, J. ANDREU eta J. LASA, 2019, «Hegazkinen elektrifikazioa: aktuazailu elektromekanikoak eta propulsioko elektrikoak», *Ekaia*, **35**, 259-277.

- [3] NJEMA, G.G. ANDOUMA, R.B.O. ANDKIBET, J.K., 2024, «A review on the recent advances in battery development and energy storage technologies», *Journal of Renewable Energy*, **2024**(232926), 1-35.
- [4] AZIZIGHALESARI, S. ANDVENUGOPAL, P. ANDSINGH, D.P. ANDSOEIRO, T.B. ANDRIETVELD, G., 2024, «Empowering Electric Vehicles Batteries: A Comprehensive Look at the Application and Challenges of Second-Life Batteries», *Batteries*, **10**(161), 1-39.
- [5] TROMBETTA, G.L. ANDLEONARDI, S.C. ANDALOISIO, D. ANDANDALORO, L. ANDSERGI, F., 2024, «Lithium-Ion batteries onboard: A review on their integration for enabling the energy transition in shipping industry», *Energies*, **17**(1019), 1-37.
- [6] N. NIETO, 2014, *A model based design of a thermal management system for a high power lithium-ion battery pack*, Ph.D. thesis, Universidad de Navarra.
- [7] A. RODRIGUEZ, G. L. PLETT eta M. S. TRIMBOLI, 2019, «Comparing four model-order reduction techniques, applied to lithium-ion battery-cell internal electrochemical transfer functions», *eTransportation*, **1**(100009), 1-18.
- [8] A. GELBENTZU, J. ROMERO, A. RUBIO, E. OTAOLA, E. TRANCHO eta E. IBARRA, 2024, «Desarrollo de software de control para sistema BMS embarcado en vehículo eléctrico mediante el empleo de herramientas de diseño basado en modelos», *Proc. of Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI)*, Orrialdeak 1-6.
- [9] S. M. REZVANIANI, Z. LIU, Y. CHEN eta J. LEE, 2014, «Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility», *Journal of Power Sources*, **256**, 110-124.
- [10] C. ALAOU, 2017, «Modular energy efficient and solid-state battery thermal management system», *Proc. of the International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS)*, Orrialdeak 1-6.
- [11] S. SURYA, V. MARCIS eta S. WILLIAMSON, 2020, «Core temperature estimation for a lithium ion 18650 cell», *Energies*, **14**(1), 1-21.
- [12] H. LIU, Z. WEI, W. HE eta J. ZHAO, 2017, «Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review», *Energy Conversion and Management*, **150**, 304-330.
- [13] S. SURYA, A. SAMANTA, V. MARCIS eta S. WILLIAMSON, 2022, «Smart core and surface temperature estimation techniques for health-conscious lithium-ion battery management systems: A model-to-model comparison», *Energies*, **15**(2), 1-21.
- [14] A. SAMANTA eta S. S. WILLIAMSON, 2021, «A comprehensive review of lithium-ion cell temperature estimation techniques applicable to health-conscious fast charging and smart battery management systems», *Energies*, **14**(5960), 1-25.
- [15] W. LI, Y. XIE, W. LI, Y. WANG, D. DAN, Y. QIAN eta Y. ZHANG, 2024, «A novel quick temperature prediction algorithm for battery thermal management systems based on a flat heat pipe», *Batteries*, **10**(1), 1-19.

- [16] S. ZHANG, K. XU eta T. JOW, 2003, «The low temperature performance of Li-ion batteries», *Journal of Power Sources*, **115**(1), 137-140.
- [17] H. X. LIU, Z. ANDLI eta H. X. LI, 2012, «Thermal modeling for vehicle battery system: A brief review», *Proc. of the International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*, Orrialdeak 74-78.
- [18] J. SHEN, Z. ZHANG, S. SHEN, Y. ZHANG, Z. CHEN eta Y. LIU, 2024, «Accurate state of temperature estimation for lithium-ion batteries based on square root cubature Kalman filter», *Applied Thermal Engineering*, **242**(122452), 1-14.
- [19] Y. PENG, X. ZHANG, Y. SONG eta D. LIU, 2019, «A low cost flexible digital twin platform for spacecraft lithium-ion battery pack degradation assessment», *Proc. of the IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Orrialdeak 1-6.
- [20] NASIRI, M. ANDHADIM, H., 2024, «Advances in battery thermal management: Current landscape and future directions», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **200**(114611), 1-17.
- [21] P. FU, L. ZHAO, X. WANG, J. SUN eta Z. XIN, 2023, «A review of cooling technologies in lithium-ion power battery thermal management systems for new energy vehicles», *Processes*, **11**(12), 1-34.
- [22] D. CHEN, J. JIANG, G.-H. KIM, C. YANG eta A. PESARAN, 2016, «Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells», *Applied Thermal Engineering*, **94**, 846-854.
- [23] Y. DENG, C. FENG, J. E. H. ZHU, J. CHEN, M. WEN eta H. YIN, 2018, «Effects of different coolants and cooling strategies on the cooling performance of the power lithium ion battery system: A review», *Applied Thermal Engineering*, **142**, 10-29.
- [24] R. SABBAB, R. KIZILEL, J. SELMAN eta S. AL-HALLAJ, 2008, «Active (air-cooled) vs. passive (phase change material) thermal management of high power lithium-ion packs: Limitation of temperature rise and uniformity of temperature distribution», *Journal of Power Sources*, **182**(2), 630-638.
- [25] C.-W. PARK eta A. K. JAURA, 2002, «Thermal analysis of cooling system in hybrid electric vehicles», *SAE Technical Paper Series*, Orrialdeak 1-10.
- [26] Y. FAN, Y. BAO, C. LING, Y. CHU, X. TAN eta S. YANG, 2019, «Experimental study on the thermal management performance of air cooling for high energy density cylindrical lithium-ion batteries», *Applied Thermal Engineering*, **155**, 96-109.
- [27] F. S. HWANG, T. CONFREY, C. REIDY, D. PICOVICI, D. CALLAGHAN, D. CULLITON eta C. NOLAN, 2024, «Review of battery thermal management systems in electric vehicles», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **192**(114171), 1-22.
- [28] C. ROE, X. FENG, G. WHITE, R. LI, H. WANG, X. RUI, C. LI, F. ZHANG, V. NULL, M. PARKES, Y. PATEL, Y. WANG, H. WANG, M. OUYANG, G. OFFER eta B. WU, 2022, «Immersion cooling for lithium-ion batteries: A review», *Journal of Power Sources*, **525**(231094), 1-19.
- [29] BEAU, V.V. ANDMARION, K. ANDPIETER, S., 2024, «Performance evaluation of a next generation ester based dielectric for single-phase precision immer-

- sion cooling», *Proc. of the IEEE International Conference on Dielectrics (ICD)*, Orrialdeak 1-6.
- [30] CHENG, C. C. ANDCHANG, P. C. ANDLI, H. C. ANDHSU, F. I., 2020, «Design of a single-phase immersion cooling system through experimental and numerical analysis», *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **160**(120203), 1-12.
- [31] G.-H. KIM eta A. PESARAN, 2007, «Battery thermal management design modeling», *World Electric Vehicle Journal*, **1**(1), 126-133.
- [32] N. P. WILLIAMS, D. TRIMBLE eta S. M. O'SHAUGHNESSY, 2023, «Thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles through immersion cooling», *Proc. of the 22nd IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITHERM)*, Orrialdeak 1-6.
- [33] Y. LI, M. BAI, Z. ZHOU, W.-T. WU, C. HU, L. GAO, X. LIU, Y. LI eta Y. SONG, 2023, «Thermal management for the 18650 lithium-ion battery pack by immersion cooling with fluorinated liquid», *Journal of Energy Storage*, **73**(109166), 1-14.
- [34] N. P. WILLIAMS eta S. M. O'SHAUGHNESSY, 2022, «Immersion cooling of lithium-ion batteries for electric vehicles», *Proc. of the International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC)*, Orrialdeak 1-4.
- [35] J. LIU, H. CHEN, S. HUANG, Y. JIAO eta M. CHEN, 2023, «Recent progress and prospects in liquid cooling thermal management system for lithium-ion batteries», *Batteries*, **9**(8), 400.
- [36] M. TOUSI, A. SARCHAMI, M. KIANI, M. NAJAFI eta E. HOUSHFAR, 2021, «Numerical study of novel liquid-cooled thermal management system for cylindrical li-ion battery packs under high discharge rate based on AgO nanofluid and copper sheath», *Journal of Energy Storage*, **41**(102910), 1-11.
- [37] Y. A. CENGEL, 2002, *Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico*, Mc Graw Hill.
- [38] X. LIN, A. G. STEFANOPOULOU, J. B. SIEGEL eta S. MOHAN, 2014, «Temperature estimation in a battery string under frugal sensor allocation», *Volume 1: Active Control of Aerospace Structure; Motion Control; Aerospace Control; Assistive Robotic Systems; Bio-Inspired Systems; Biomedical/Bioengineering Applications; Building Energy Systems; Condition Based Monitoring; Control Design for Drilling Automation; Control of Ground Vehicles, Manipulators, Mechatronic Systems; Controls for Manufacturing; Distributed Control; Dynamic Modeling for Vehicle Systems; Dynamics and Control of Mobile and Locomotion Robots; Electrochemical Energy Systems*, DSCC2014, American Society of Mechanical Engineers.
- [39] B. SHABANI eta M. BIJU, 2015, «Theoretical modelling methods for thermal management of batteries», *Energies*, **8**(9), 10153-10177.
- [40] D. KONG, R. PENG, P. PING, J. DU, G. CHEN eta J. WEN, 2020, «A novel battery thermal management system coupling with PCM and optimized controllable liquid cooling for different ambient temperatures», *Energy Conversion and Management*, **204**(112280), 1-17.

- [41] Y. LI, Z. ZHOU, L. HU, M. BAI, L. GAO, Y. LI, X. LIU, Y. LI eta Y. SONG, 2022, «Experimental studies of liquid immersion cooling for 18650 lithium-ion battery under different discharging conditions», *Case Studies in Thermal Engineering*, **34**(102034), 1-15.
- [42] E. B. PACCHAHERRERA, 2022, *Thermal Behavior and Stability Study of a lithium-ion battery pack with air cooling*, Ph.D. thesis, Universidad de Chile.
- [43] X. GAO, Y. MA eta H. CHEN, 2018, «Active thermal control of a battery pack under elevated temperatures», *IFAC-PapersOnLine*, **51**(31), 262-267.
- [44] J. V. BARRERAS, T. RAJ eta D. A. HOWEY, 2018, «Derating strategies for lithium-ion batteries in electric vehicles», *Proc. of the 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, Orrialdeak 4956-4961.
- [45] DOMENICO, G. FIENGO eta A. STEFANOPOULOU, 2008, «Lithium-ion battery state of charge estimation with a Kalman filter based on an electrochemical model», *Proc. of the IEEE International Conference on Control Applications*, Orrialdeak 702-707.
- [46] C. TABORELLI eta S. ONORI, 2014, «State of charge estimation using extended Kalman filters for battery management system», *Proc. of the IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*, Orrialdeak 1-8.
- [47] R. R. RICHARDSON, P. T. IRELAND eta D. A. HOWEY, 2014, «Battery internal temperature estimation by combined impedance and surface temperature measurement», *Journal of Power Sources*, **265**, 254-261.