



IKER  
GAZTE  
NAZIOARTEKO  
IKERKETA EUSKARAZ

## IV. IKERGAZTE NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2021eko ekainaren 9, 10 eta 11a  
Gasteiz, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:  
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)

### INGENIARITZA ETA ARKITEKTURA

**Hidrogeno tren baten diseinu  
eta operazioaren optimizazioa**

*Josu Olmos, Andoni Saez-de-Ibarra,  
Dimas Lopez, Txomin Nieva  
eta Iosu Aizpuru*

145-152 or.

<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.iv.03.18>



# Hidrogeno tren baten diseinu eta operazioaren optimizazioa

Olmos, J.<sup>1,3</sup>, Saez-de-Ibarra, A.<sup>1</sup>, Lopez, D.<sup>2</sup>, Nieva, Tx.<sup>2</sup>, Aizpuru, I.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ikerlan Technology Research Centre, BRTA. J.M. Arizmendiarieta Pasalekua 2, 200500 Arrasate-Mondragón

<sup>2</sup> CAF Power and Automation. Mikeletegi Pasalekua 58-2º, 20009 Donostia-San Sebastian.

<sup>3</sup> Mondragon Unibertsitatea, Ingenieritza Fakultatea. Loramendi Kalea 4, 20500 Arrasate-Mondragón.

jolmos@ikerlan.es

## Laburpena

Artikulu honek hidrogeno tren baten diseinu eta operazioa optimizatzeko algoritmo genetikoetan oinarritutako metodologia bat proposatzen du. Hain zuzen ere, metodologiaren bidez hidrogeno pilaren tamaina, bateriaren tamaina, eta kudeaketa energetikoko estrategia optimizatzen dira, helburua trenaren bizitza-ziklo osoko kostua minimizatzea izanik. Proposatutako metodologia balidatzeko benetako trenbide linea batean oinarritutako ikerketa kasu bat aurkezten da. Optimizazioak itzultitako emaitza oinarritzko kasu batekin alderatzen da, trenaren kostu totala % 4,9 murrizten dela frogatuz. Lortutako emaitzek metodologiaren eraginkortasuna egiaztatzen dute.

**Hitz gakoak:** erregai pila, bateria, kudeaketa energetikoa, optimizazioa, trena

## Abstract

*This paper proposes an optimization methodology based on genetic algorithms for the design and operation of a hydrogen train. Indeed, the proposed approach optimizes the size of the hydrogen fuel cell, the size of the battery, and the energy management strategy. The aim of the optimization is to minimize the life cycle cost of the train. In order to validate the proposed methodology, a case study based on a real railway line is proposed. The results of the optimization are compared with a base case, what unveils that with the proposed methodology the total cost of the train can be reduced a 4.9%. The results validate the proposed methodology.*

**Keywords:** fuel cell, battery, energy management, optimization, railway engineering

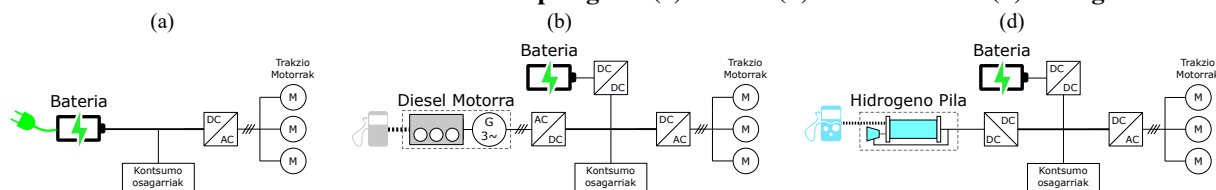
## 1. Sarrera eta motibazioa

Trenbidea funtsezko garraio mota da gure gizartean, bai bidaiariak zein ondasunak mugitzeko. Ibilgailu hauen erabiltzaileko energia kontsumoa errepideko ibilgailuena baino baxuagoa da (IEA). Ondorioz, trenbidearen sektorea eragile nagusi bihurtu daiteke garraioa deskarbonizatzeko bidean. XX. mendean zehar trenbideak elektrifikatzen hasi ziren, baina prozesuaren kostu altua dela eta (500.000 €/km inguru<sup>1</sup>), ez da lortu dieselaren bidez mugitzen diren tren guztiak ordezkatzeko. Dena den, azken urteetan garatu diren teknologia berritzaileek aukera berriak ireki dituzte sektore honetan (González-Gil *et al.*, 2013). Hain zuzen ere, diesel trenak ordezkatzeko helburuarekin, litio-ioizko bateriak eta hidrogenozko erregai pilak integratzen dituzten ibilgailuak proposatu dira (Olmos *et al.*, 2020). Teknologia hauek modu desberdinetan konbinatu daitezke tren topologia berritzaileak sortzeko. 1 irudian erakusten den moduan, guztira hiru topologia berritzaile proposatu dira:

- **Bateria Trena.** Trena soilik baterien bidez elikatzen da, ibilgailu elektrikoaren modura (1a irudia).
- **Diesel Tren Hibridoa.** Topologia hau diesel eta bateria trenen tarteko aukera moduan proposatzen da. Diesel trenarekin konparatuz, motorraren tamaina txikitzen da eta bateriak integratzen dira (1b irudia).
- **Hidrogeno Tren Hibridoa.** Trenaren energia iturri printzipala hidrogeno pila da. Hala ere, ibilgailuaren azeleazioan potentzia piko altuak eskatzen direnez, eta pilaren dinamika baxua denez, bateriekin batera hibridatu behar da (1d irudia). Terminologia sinplifikatzeko, artikuluan zehar *hidrogeno tren* izena erabiliko da.

<sup>1</sup><https://www.20minutos.es/noticia/4480797/0/talgo-tren-hidrogeno-renovable-sustituir-diesel/>

## 1. Irudia: Diesel trenak ordezkatzeko topologiak: (a) bateria (b) diesel hibridoa (d) hidrogeno



Aurkeztu diren topologia berritzaileen artean, kutsadura gehien murrizten dituztenak bateria eta hidrogeno trenak dira, beti ere kontuan izanik zein den elektrizitate edo hidrogenoaren jatorria (% 100 jatorri berriztagarria badute, ibilgailuak emisiorik gabekoak direla kontsideratu daiteke). Baterien energia dentsitatearen eraginez, zaila da trenak egiten dituzten bidai luzeak burutu ahal izatea soilik bateria batekin. Arazo hau ekidin daiteke ibilbidean zehar karga puntuak instalatuz, baina kontuan izanik gaur egungo karga azkarrenak 15 minutu ingurukoak direla, logistika arazoak sor daitezke. Hidrogeno tren hibridoak, hala ere, arazo hauek ekiditen ditu, bateria hidrogeno pilatik kargatu baitaiteke ibilbidean zehar. Hortaz, trenbide linea luzeetan diesel trena ordezkatzeko aukerarik egokiena hidrogeno trena dela ondorioztatu daiteke: batetik, diesel trenaren kutsadura murrizten du; eta bestetik, ez du zailtasun logistikoko zein tekniko gehigarrikerik eragiten.

Nahiz eta hidrogeno trena teknologikoki baliabide egokia izan, beharrezkoa da ere ekonomikoki interesgarria izatea, bestela trenbide operatzaileek diesel trena eskatzen jarraituko dute eta. Hori saiheste aldera, hidrogeno trenak erronka batzuk gainditu behar ditu. Alde batetik, kontuan izanik bi energia iturritz osatutako ibilgailua dela, kudeaketa energetikoak eginkizun garrantzitsua burutu behar du (Herrera *et al.*, 2016). Hau da, trakzio eskaria nola banatu galderari erantzun egokia eman behar zaio. Unez uneko banaketa honek eragin zuzena izango du bai hidrogeno kontsumoan zein bi iturrien bizitza erabilgarrian. Izan ere, orokorrean hidrogeno pila eta bateria hainbat aldiz berritu behar dira trenaren bizitza erabilgarria amaitu baino lehen, beraien prestazio elektrikoak azkar egiten baitute behera. Beraz, kudeaketa energetikoko estrategia apropos baten bidez posible da trenaren operazioa optimizatzea, hau da, hidrogeno kontsumoa gutxitu eta bai hidrogeno pila zein bateriaren bizitzak luzatzea.

Kudeaketa energetikoarekin estu lotuta dagoen beste erronka bat energia iturrien dimentsionamendua da (Wu *et al.*, 2020). Alegia, erantzun beharreko bigarren galdera hidrogeno pilak eta bateriak izan behar duten tamainarekin erlazionatuta dago. Honek eragina izango du kudeaketa energetikoan, iturri bakoitzak eman ditzakeen potentzia zein energia balioak desberdinak izango dira eta. Gainera, zenbat eta tamaina handiagoa, bateria eta hidrogeno pilaren hasierako kostua altuagoa izango da, eta baita egin beharreko ordezkapenen kostua ere.

Laburbilduz, trenaren diseinu eta operazioa optimizatzea premiazko eginkizuna bihurtzen da hidrogeno trena aukera ekonomiko lehiakorra izateko diesel trenaren aurrean.

## 2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Hainbat dira literaturan hidrogeno trenen kudeaketa energetikoa eta iturrien dimentsionamendua jorratu duten lanak. Kudeaketa energetikoko estrategiak bi kategoria nagusietan bereizten dira: batetik, arauetan oinarritzen direnak, eta bestetik, optimizazio batean oinarritzen direnak (Olmos *et al.*, 2020).

Lehenak arau sinpleetan oinarritzen dira, gehienetan diseinatzen duen pertsonaren jakintza eta esperientziaren arabera zehazten direnak. Beraz, estrategia hauek ez dute ziurtatzen operazio optimoa lortzea. Kategoria honetan sar daitezke hidrogeno trenetarako proposatu diren karga gutxitu/mantendu estrategia (Aroua *et al.*, 2020), droop kontrola (Han *et al.*, 2018), logika lausoan oinarritutako estrategia (Zhang *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2015), edo egoeren makina batean oinarritutako kontrola (Han *et al.*, 2017; García *et al.*, 2013). Zhang *et al.* autoreek (2017) publikazioan, gainera, bateria eta hidrogeno pilaren tamaina optimoa lortzeko metodologia bat proposatzen dute. Beste aldetik, optimizazio estrategiak kostu-funtzio bat minimizatu edo maximizatzen duten algoritmoetan oinarritzen dira. Algoritmo horrek zuzenean zehaztu dezake hidrogeno pila eta bateriaren arteko distribuzioa, edo arauetan oinarritutako estrategia baten parametroak optimizatu ditzake. Kategoria honetan sar daitezke hidrogeno trenetarako proposatu diren kontrol prediktiboan oinarritutako estrategia (Deng *et al.*, 2021; Torreglosa *et al.*, 2014) edo kontsumo baliokidearen minimizazioan oinarritutako estrategia (Yan *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2018).

Ikusi denez, berrikusitako lanetatik gutxiak proposatu dute kudeaketa energetiko optimizatu bat hidrogeno trenetarako. Oraindik gutxiago dira bateria eta hidrogeno pilaren tamaina optimo bat bilatzen duten lanek. Gai-

nera, optimizazio bat proposatzen den kasuetan, helburua beti hidrogeno kontsumoaren minimizazioa da, eta ez trenaren kostu ekonomiko totalaren minimizazioa. Lan honen helburua, beraz, hidrogeno trenaren operazio eta diseinu optimoa lortzeko metodologia bat proposatzea da. Metodologiaren bidez, kudeaketa energetikoko estrategia, hidrogeno pilaren tamaina, eta bateriaren tamaina optimizatuko dira batera, trenaren kostu totala txikitzeko helburuarekin. Proposamena ikerketa kasu batean balioztatuko da, eta emaitzak oinarritzko kasu batekin alderatuko dira lortutako operazio eta diseinuaren eraginkortasuna ebaluatzeko.

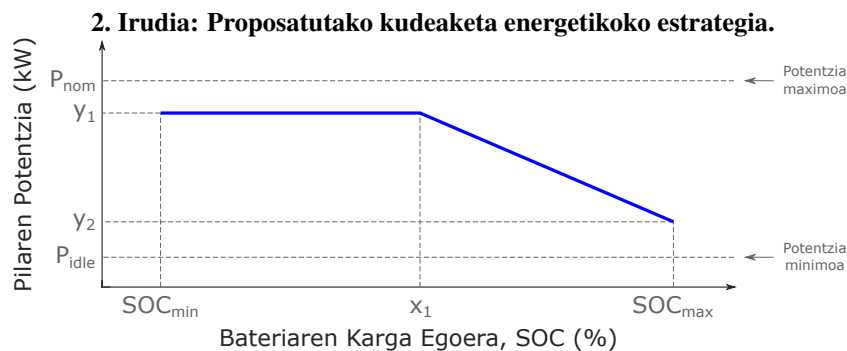
### 3. Ikerketaren muina

Atal honetan, lehenik optimizatuko den kudeaketa energetikoko strategiaren oinarri teorikoak aurkeztuko dira (3.1 atala). Ondoren, estrategia eta energia iturrien tamaina batera optimizatuko dituen metodologia azalduko da (3.2 atala). Azkenik, ikerketa kasua aurkeztu ondoren (3.3 atala), lortutako emaitzak eztabaidatuko dira (3.4 atala).

#### 3.1. Proposatutako kudeaketa energetikoko estrategia

Lan honetan arauetan oinarritzen den estrategia bat proposatzen da kudeaketa energetikorako. Estrategia definitzen dituen parametroak hurrengo atalean aurkeztuko den metodologiaren bidez optimizatuko dira. Estrategiaren ezauzgarri nagusiak diseinatzeko orduan honako gogoetak hartu dira kontuan: (1) Suposatu da trenaren ibilbidean zehar bateriak kargatzeko punturik ez dela egongo. Beraz, ziurtatu behar da ibilbidearen amaieran bateriaren karga (ingelesez SOC, State-of-Charge) hasierako berdina edo altuagoa izatea. Helburu hori lortu ahal izateko, beharrezkoa da hidrogeno pilak potentzia altuetan lan egitea SOC-a baxua denean, eta aldiz, potentzia baxuagoetan lan egitea SOC-a handitzen den heinean. (2) Sarreran aipatu den moduan, hidrogeno pila dinamika baxuko elementua da. Bat-bateko potentzia aldaketak eskatzen bazaizkio, azkarrago degradatuko da, eta ondorioz trenaren bizitzan zehar egin beharrezko ordezkapen kopurua eta trenaren kostu totala handituko dira. Beraz, strategiak ziurtatu behar du pilaren operazioa leuna izatea, hau da, bat-bateko eskakizun aldaketak ekiditea.

2 irudian erakusten denez, proposatutako estrategia hidrogeno pilaren potentzia eta bateriaren SOC-a erlazionatzen dituen kurba baten bidez definitzen da. Hau da, pilaren operazio puntua potentzia eskariarekiko independentea da. Bateriari dagokionez, buffer lana egingo du, pila eta eskariaren arteko desberdintasuna eman edo jasoz. Irudian erakusten den erlazioak SOC-aren mantentzea ziurtatzeko beharrezkoa den irizpidea betetzen du. Gainera, SOC-a eta pilaren potentzia arteko erlazioa funtzio jarrai bat izanik, ziurtatu egiten da pilaren funtzionamendua leuna izatea. Ikusten denez, kurba hiru puntu karakteristikoekin definitu daiteke: pilaren potentzia altuko operazio puntua ( $y_1$ ), potentzia baxuko operazio puntua ( $y_2$ ), eta kurbaren inflexio puntua ( $x_1$ ). Puntu hauek proposatutako metodologiaren bidez optimizatuko dira.



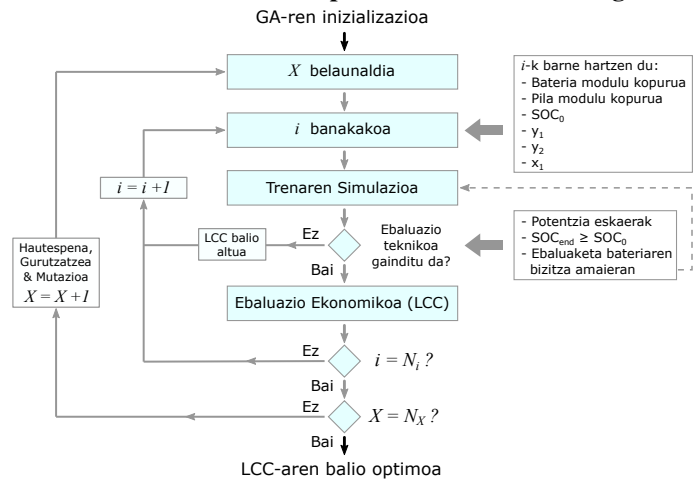
#### 3.2. Proposatutako optimizazio metodologia

Lan honetan hidrogeno trenaren operazio eta diseinua optimizatuzeko algoritmo genetikoetan (ingelesez GA, Genetic Algorithm) oinarritutako metodologia bat proposatzen da. GA selekzio naturalaren kontzeptuan oinarriturik dagoen optimizazioak ebazteko metodo bat da. Metodo hau erabiltzea erabaki da estruktura konplexua dituzten optimizazio problemetarako aproposa delako, adibidez aldagaiek elkarren arteko erlazio konplexuak erakusten dituzten kasuetarako (Herrera *et al.*, 2016). Algoritmoa banakakoen ( $i$ ) eta belaunaldien ( $X$ ) kontzeptuetan oinarritzen da. Banakako bat optimizazio aldagaien konbinazio zehatz bat da, eta belaunaldi bat  $N_i$  banakakoen multzo bat. Algoritmoak hasierako ausazko belaunaldi bat sortzen du, eta banakako bakoitza ebaluatzen du kostu funtzio

baten arabera. Ondoren, hurrengo belaunaldi bat sortzen du hautespen (aurreko belaunaldiko banakako hoberenak mantentzea), gurutzatze (banakako enzaugarriak trukatzeta) eta mutazioaren (banakako berrien enzaugarriak ausaz zehaztea) bidez. Algoritmoak belaunaldi berriak sortzen eta ebaluatzen jarraitzen ditu definitzen den belaunaldi kopuru batera iritsi arte ( $N_x$ ). Beraz, lortzen den emaitza ez da beti optimo globala izango, baina ekiditen da optimizazio aldagaien konbinazio posible guztiak ebaluatu beharra.

3 irudian lan honetan proposatzen den eta GA-n oinarrituta dagoen optimizazio metodologia aurkezten da. Metodologiaren bidez, kudeaketa energetikoko aldagaiak ( $y_1$ ,  $y_2$  eta  $x_1$ ), hidrogeno pilaren tamaina (pilaren modulu kopuruaren bidez definitua,  $n_{FC}$ ) eta bateriaren tamaina (bateriaren modulu kopurua,  $n_{BT}$ ) optimizatzen dira. Osagarri moduan, estrategian eragina duen bateriaren hasierako karga egoera ( $SOC_0$ ) optimizatzea erabaki da ere. Optimizazio funtzioa trenaren bizitza-ziklo kostuaren bidez (ingelesez LCC, Life Cycle Cost) definitu da. Hurrengo azpiataletan banakako bakoitzari dagokion LCC balioa lortzeko eman beharreko pausuak laburtzen dira.

**3. Irudia: GA bidezko optimizaziorako metodologia.**



**3.2.1. Banakako parametrizazioa**

1 taulak banakako bakoitza osatzen duten aldagaien mugak definitzen ditu.  $N_{BT}$  eta  $N_{FC}$  balioek paraleloan konektatu daitezkeen bateria eta pila modulu kopuru maximoa zehazten dute. Kontuan izan behar da trenean erabilgarri dagoen eremu mugatuaren eraginez,  $N_{BT}$  balioa  $N_{FC}$ -ren arabera aldatzen dela, hau da, zenbat eta hidrogeno pila modulu gehiago integratu, leku gutxiago egongo dela erabilgarri baterientzat (eta alderantziz ere).

**1. Taula: Optimizazio aldagaiak eta definitutako mugak.**

Aldagaia	Mugak	Unitatea	Aldagaia	Mugak	Unitatea
$n_{BT}(i)$	$\in \{1, 2, \dots, N_{BT}\}$	[-]	$y_1(i)$	$\in \{P_{idle} - P_{nom}\}$	[kW]
$n_{FC}(i)$	$\in \{1, 2, \dots, N_{FC}\}$	[-]	$y_2(i)$	$\in \{P_{idle} - P_{nom}\}$	[kW]
$SOC_0(i)$	$\in \{20 - 90\}$	[%]	$x_1(i)$	$\in \{20 - 90\}$	[%]

**3.2.2. Hidrogeno trenaren simulazioa**

Banakako bakoitzak hidrogeno trenaren funtzionamenduan duen eragina ebaluatzeko, simulazio modelo bat garatu da MATLAB ingurunean. Modeloa kuasi-estatiko izaerakoa da, eta trenak abiadura profil bat jarraitzeko kontsumitu beharreko potentzia kalkulatu du denbora pausu bakoitzean ( $\Delta t = 1s$ ). Gainera, trakzio elementuen funtzionamendua ebaluatzen du ere (1d irudia). Horretarako, bateria egoera egonkorreko zirkuitu elektriko baten bidez modelatu da ( $V_{oc}$ -R seriean), eta hidrogeno pila eraginkortasuna ( $\eta$ ) eta potentzia ( $P_{FC}$ ) erlazioztatzen dituen kurba baten bidez. Gainerako elementuen modelizazioaren xehetasun gehiagorako, ikus (Herrera *et al.*, 2016).

**3.2.3. Ebaluazio Teknikoa**

Simulazio emaitzak teknikoki ebaluatzen dira hiru aspektu kontuan izanik: (1) simulazio pausu bakoitzean trenaren potentzia eskaera asebetetzen da hidrogeno pila eta bateriaren ekarpenen bidez; (2) simulazio amaierako bateriaren

karga egoera hasierakoaren berdina edo altuagoa da; eta (3) aurreko bi puntuak betetzen dira batera bizitza amaieran dagoenean ere. Azken punturako, bigarren simulazio bat egiten da bateriaren kapazitatea % 20 murriztuz. Ebaluazio teknikoak gaintzen ez bada, algoritmoak LCC balio altu bat ezartzen dio banakakoari. Gaintzekotan, ebaluazio ekonomikoaren pausura igarotzen da.

### 3.2.4. Ebaluazio Ekonomikoa

Modelo ekonomiko baten bidez ebaluazio teknikoak gaintu duten banakakoen LCC balioa kalkulatu da, hau da, optimizazio funtzioaren balioa. Funtsean, modeloak hidrogeno trenaren bizitza osoan zehar sortutako kostuak kalkulatu ditu, eskuratze ( $C_{acq}$ ), operazio ( $C_{op}$ ), eta mantentze kostuen ( $C_{maint}$ ) artean banatuz, (1) ekuazioak erakusten duenez. LCC-aren atal bakoitza kalkulatzeko (2)-(5) ekuazioak erabili dira. Ekuazio hauetan  $C_{train}$  batera eta pilarik gabeko trenaren kostua da,  $c_{BT}$  eta  $c_{FC}$  batera eta hidrogeno pilaren kostu erreferentzialak,  $C_{h2}$  hidrogeno kontsumoaren kostua,  $C_{BTrepl}$  eta  $C_{FCrepl}$  batera eta hidrogeno pilaren ordezkapenen kostuak,  $L_{h2}$  eguneko hidrogeno kontsumoa,  $c_{h2}$  hidrogenoaren kostu erreferentziala,  $t_{op}$  urteko egun operazionalak,  $I$  mozkin ratioa,  $T$  trenaren bizitza erabilgarria,  $y$  ebaluazio urtea, eta  $c_{maint}$  urteko batezbesteko mantentze kostua.

$$LCC(i) = C_{acq}(i) + C_{op}(i) + C_{maint} \quad (1)$$

$$C_{acq}(i) = C_{train} + c_{BT} \cdot n_{BT}(i) + c_{FC} \cdot n_{FC}(i) \quad (2)$$

$$C_{op}(i) = C_{h2}(i) + C_{BTrepl}(i) + C_{FCrepl}(i) \quad (3)$$

$$C_{h2}(i) = \sum_{y=1}^T L_{h2}(i) \cdot c_{h2} \cdot t_{op} \cdot (1 + I)^{-y} \quad (4)$$

$$C_{maint} = \sum_{y=1}^T c_{maint} \cdot (1 + I)^{-y} \quad (5)$$

$C_{BTrepl}$  eta  $C_{FCrepl}$  balioak kalkulatzeko (6) ekuazioa jarraitzen da. Bertan,  $ESS$  azpi-indizeak  $BT$ -ri edo  $FC$ -ri erreferentzia egiten dio, hau da, ekuazio hau bitan aplikatu behar da: batetik, bateriaren ordezkapenen kostua kalkulatzeko; eta bestetik, pilaren ordezkapenen kostua kalkulatzeko.  $R_{ESS}$  iturriaren ordezkapen kopuru totala da,  $r_{ESS}$  ebaluatzen ari den ordezkapena, eta  $y_{ESS}$  iturriaren bizitza. Bateriaren bizitza kalkulatzeko Olmos *et al.* autoreek (2021) publikazioan proposatutako degradazio modelo empirikoa erabili da. Modelo honek bateriaren bizitza zehazten du tenperaturaren ( $Temp$ ), deskarga zikloaren sakoneraren ( $DOD$ ), karga eta deskarga korronteen ( $C_{ch}$  eta  $C_{dch}$ ) eta tarteko SOC balioaren ( $mSOC$ ) arabera, (7) ekuazioak erakusten duenez. Bestetik, hidrogeno pilaren bizitza estimatzeko Pei *et al.* autoreek (2008) publikazioan proposatutako modeloa erabili da. Modeloa formula lineal bat da, zeinak kontuan hartzen dituen pilaren piztu/itzali kopurua ( $w_1$ ), operazio puntuaren aldaketak ( $w_2$ ), eta potentzia baxuko zein altuko funtzionamendu denbora ( $w_3$  eta  $w_4$ ), (8) ekuazioak erakusten duenez.

$$C_{ESSrepl}(i) = \sum_{r_{ESS}=1}^{R_{ESS}(i)} c_{ESS} \cdot n_{ESS}(i) \cdot (1 + I)^{-r_{ESS}(i) \cdot y_{ESS}(i)} \quad (6)$$

$$y_{BT}(i) = f(Temp, DOD, C_{ch}, C_{dch}, mSOC) \quad (7)$$

$$y_{FC}(i) = f(w_1, w_2, w_3, w_4) \quad (8)$$

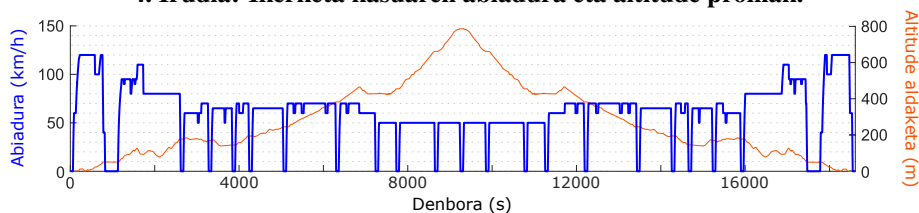
### 3.3. Ikerketa kasua

Optimizazio metodologia balioztatzeko, atal honetan ikerketa kasu bat aurkezten da. Horretarako, CAF tren fabrikatzailearen Civia trenea simulatuko da Tardienta-Canfranc linean zehar (Aragón, Espainia). Ibilbidearen abiadura eta altitude profilak 4 irudian erakusten dira. Bestetik, 2 taulak Civia trenaren datu esanguratsuak erakusten ditu. Integratuko den batera LTO (Lithium Titanate Oxide) kimikakoa da,  $n_{BT}$  modulu bakoitzaren energia nominala 20 kWh izanik. Aldiz, hidrogeno pila PEM (Proton Exchange Membrane) motakoa da,  $n_{FC}$  modulu bakoitzaren potentzia nominala 100 kW izanik. Azkenik, optimizaziorako beharrezkoak diren GA algoritmoaren eta modelo ekonomikoaren parametroak (literaturatik hartuak) 3 eta 4 tauletan erakusten dira.

### 3.4. Emaitzak eta eztabaida

Optimizazio emaitzen eraginkortasuna neurtzeko eta proposatutako metodologia balioztatzeko helburuekin, oinarritzko kasu bat definitu da. Oinarritzko kasuan optimizazio aldagaietako balio zehatzak definitu dira arau logi-

#### 4. Irudia: Ikerketa kasuaren abiadura eta altitude profilak.



#### 2. Taula: Civia Hidrogeno Trenaren datu esanguratsuak.

Aldagaia	Balioa	Unitatea	Aldagaia	Balioa	Unitatea	Aldagaia	Balioa	Unitatea
Luzera	62	[m]	$n_{BT}$ modulu baten energia nominala	20	[kWh]	$N_{BT}$	36	[-]
Abiadura maximoa	120	[km/h]	$n_{FC}$ modulu baten potentzia nominala	100	[kW]	$N_{FC}$	12	[-]

#### 3. Taula: GA algoritmoaren parametro esanguratsuak.

Aldagaia	Balioa	Unitatea	Aldagaia	Balioa	Unitatea	Aldagaia	Balioa	Unitatea
Banakakoen biztanlearia	60	[-]	Hautespen frakzioa	5	[%]	Belaunaldi maximoen kopurua	100	[-]
Gurutzatze frakzioa	80	[%]	Tolerantzia	0,0001	[%]	Optimizazio denbora maximoa	24	[h]

#### 4. Taula: Modelo ekonomikoaren parametro esanguratsuak.

Aldagaia	Balioa	Unitatea	Aldagaia	Balioa	Unitatea	Aldagaia	Balioa	Unitatea
$t_{op}$	320	[egun/urte]	$I$	2,5	[%]	$c_{BT}$	1.500	[€/kWh]
$T$	30	[urte]	$c_{h2}$	11	[€/kg]	$c_{FC}$	1.000	[€/kW]

ko batzuk jarraituz: iturrien tamainetarako eskaera pikoak asetzeko beharrezkoa den dimentsionamendu txikiena zehaztu da, pilaren tamaina batz besteko trakzio eskaeratik ahalik eta gertuen definituz (400 kW hidrogeno pilarentzat eta 220 kWh bateriarentzat); eta kudeaketaren  $y_1$ ,  $y_2$  eta  $x_1$  parametroentzat potentzia maximoa ( $P_{nom}$ ), minimoa ( $P_{idle}$ ) eta bateriaren hasierako SOC balioa ( $SOC_0$ ) definitu dira, hurrenez hurren (ikus 2 irudia). Gainera,  $SOC_0$  balioa bateriaren karga mantentzea ziurtatzen duen balio batean definitu da (% 70).

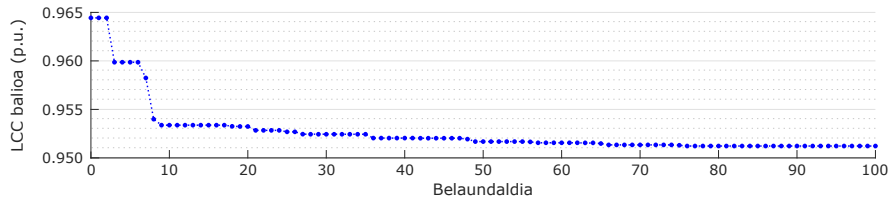
Optimizazioa martxan egon da 100 belaunaldi ebaluatu arte, 5 irudiak erakusten duen moduan. Irudian LCC balioa oinarritzko kasuarekiko adierazten da, p.u. unitateetan. Ikusten da optimizazioak % 4,9-eko hobekuntza lortu duela kasu horrekiko. Ondorioz, egiaztatu da proposatutako metodologia egokia dela hidrogeno trenaren kostua murrizteko. Irudian ikusi daiteke eboluzio handiena lehen belaunaldietan lortu dela, izan ere, 10. belaunalditik aurrera soilik % 0,2-ko hobekuntza lortu da. Beraz, optimizazioa gelditzeko unea egokia izan dela frogatu da ere.

Lortutako emaitzek, metodologiaren eraginkortasuna frogatzeaz gain, aukera optimoaren analisi tekno-ekonomiko bat garatzea ahalbidetzen dute. Horretarako, 5 taulak optimizazioak itzulitako emaitzak laburtzen ditu, oinarritzko kasuaren emaitzekin alderatuz. Kasu bakoitzerako LCC balioa, optimizazio aldagaiak, hidrogeno kontsumoa eta bateria zein pilaren ordezkapen kopuruak erakusten dira. Azterketa errazteko,  $n_{BT}$  eta  $n_{FC}$  balioak potentzia eta energia nominalaren bidez adierazten dira, hurrenez hurren. Pila tamaina desberdinen arteko konparazioa juxtua izateko,  $y_1$  eta  $y_2$  parametroak  $P_{nom}$  balioarekiko adierazi dira (%-tan). Bestetik, 6 irudiak oinarritzko kasuaren eta optimizazioak itzulitako kasuaren simulazioen emaitza esanguratsuak erakusten ditu.

Optimizazioak aldaketa esanguratsuak proposatu ditu trenaren diseinu eta operazioan. Alde batetik, oinarritzko kasuarekiko 4 bateria modulu eta 2 hidrogeno pila modulu gehiago integratzea proposatu du. Estrategiari dagokionez, aldaketa esanguratsuenak  $y_1$  eta  $x_1$  parametroetan eragin ditu: % 100-etik % 74,28-ra, eta %70-etik %27,53-ra aldatzea, hurrenez hurren.  $y_2$  eta  $SOC_0$  balioetan ere aldaketak proposatu ditu optimizazioak. Aldaketa hauek pilaren funtzionamenduan eta bateriaren bizitzan eragin dute, gehien bat. Batetik, hidrogeno kontsumoan % 12,6-ko murrizketa lortu da. Honen arrazoi nagusia hidrogeno pilak efizientzia altuagoko puntuetan lan egin duela izan da. Izan ere, pilaren efizientzia handitu egiten da operazio puntua jaisterakoan. Beraz, pila handituz, baina sortzen duen potentzia absolutua antzeko balioetan mantenduz (ikus 6d irudia), efizientzia orokor altuagoa eta hidrogeno kontsumo txikiagoa lortzen dira. Estrategia berriarekin pilaren funtzionamendu leunagoa lortzen da ere (ikus 6d irudia), bere bizitza luzatuz (% 7.25), baina pilaren ordezkapen kopurua gutxitu ezinik. Azkenik, optimizazioaren bidez bateriaren bizitza luzatzea lortu da. 6e irudiak erakusten duenez, bi profilak nahiko antzekoak dira. Dena den, eragindako aldaketa txikiei esker, bizitza % 15 luzatzea eta ordezkapen bat aurrezteko lortu da.

Laburtuz, optimizazio algoritmoak hidrogeno kontsumoa gutxitzea (% 12,6) eta bateriaren bizitza luzatzea lortu du (ordezkapen bat gutxiago), gehienbat iturrien tamaina handituz, eta estrategiaren  $y_1$  eta  $x_1$  parametroak aldatuz. Ondorioz, trenaren LCC-a % 4,9-ko gutxitzea lortu da.

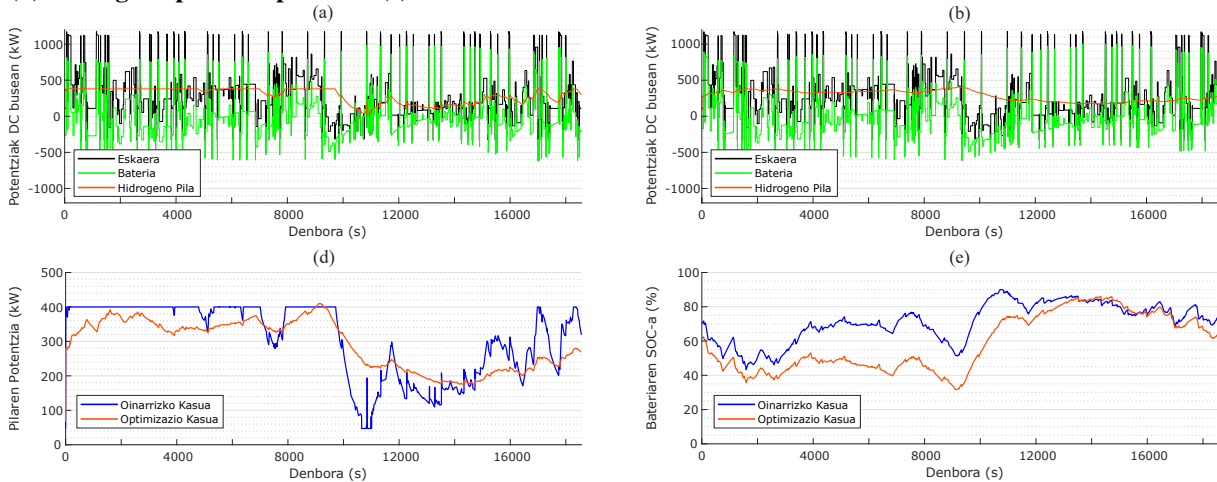
### 5. Irudia: GA algoritmoaren eboluzioa.



5. Taula: Optimizazio emaitzen laburpena.

Kasua	LCC [p.u.]	$n_{BT}$ [kWh]	$n_{FC}$ [kW]	$y_1$ [%]	$y_2$ [%]	$x_1$ [%]	$SOC_0$ [%]	$L_{h2}$ [p.u.]	$R_{BT}$ [-]	$R_{FC}$ [-]
Oinarritzkoa	1	220	400	100	12	70	70	1	3	5
Optimizatua	0,951	300	600	74,28	27,53	28,45	61,53	0,874	2	5

### 6. Irudia: Emaitzak: (a) Potentzia banaketa, oinarritzko kasua (b) Potentzia banaketa, optimizazio kasua (d) Hidrogeno pilaren operazioa (e) Bateriaren SOC-a.



## 4. Ondorioak

Artikulu honetan hidrogeno tren baten LCC-a minimizatzeko metodologia bat proposatu eta balidatu da. Lehenik, trenaren kostua minimizatzeko optimizatu beharreko aldagaiak kudeaketa energetikoko estrategia, eta bateria zein hidrogeno pilaren tamaina direla identifikatu da. Ondoren, GA-n oinarritzen den optimizazio metodologia bat proposatu eta urratsez-urrats azaldu da. Metodologia balidatzeko, benetako trenbide linea batean oinarritzen den ikerketa kasu bat proposatu da. Optimizazioak itzulitako emaitza oinarritzko kasu batekin alderatu da, ondorioztatuz trenaren kostu totala % 4,9 gutxitu daitekeela. Beraz, metodologiaren eraginkortasuna egiaztatuta da. Gainera, lortutako emaitzak soluzio optimoaren analisi tekno-ekonomiko bat garatzea ahalbidetzen duela frogatu da.

## 5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Lan honetan proposatutako estrategia energetikoa simulazio ingurumen batean balioztatu eta gero, hurrengo pausua hardware-in-the-loop plataforma batean balioztatzea izango da, amaierako aplikazioan integratu baino lehenagoko tarteko etapa moduan. Bestetik, LCC-ari sentsibilitate analisi bat egitea proposatzen da, hainbat bateria teknologia (esaterako, LFP, NMC edo LCA) edo kudeaketa energetikorako beste estrategia batzuk proposatuz (hala nola, logika lausuan edo dynamic programming optimizazioan oinarritutakoa).



## 6. Eskerrak eta oharra

Lan hau Eusko Jaurlaritzaren Ekonomiaren Garapena, Jasangarritasuna eta Ingurumena sailaren BIKAINTEK 2018 programaren barruan garatu da (20-AF-W2-2018-00010 erreferentzia).

## 7. Erreferentziak

- Aroua, Ayoub, Amadou Ball, Sabrina Messal, Walter Lhomme, eta Clement Depature. 2020. Fuel Cell Dual-mode Train: Impact of Charge Depleting Strategy on Hydrogen Consumption. In *2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 1–6. IEEE.
- Deng, Kai, Hujun Peng, Steffen Dirkes, Jonas Gottschalk, Cem Ünlübayir, Andreas Thul, Lars Löwenstein, Stefan Pischinger, eta Kay Hameyer. 2021. An adaptive PMP-based model predictive energy management strategy for fuel cell hybrid railway vehicles. *eTransportation* 7.100094.
- García, Pablo, Luis M. Fernández, Juan P. Torreglosa, eta Francisco Jurado. 2013. Operation mode control of a hybrid power system based on fuel cell/battery/ultracapacitor for an electric tramway. *Computers & Electrical Engineering* 39.1993–2004.
- González-Gil, Arturo, Roberto Palacin, eta Paul Batty. 2013. Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy. *Energy Conversion and Management* 75.374–388.
- Han, Ying, Qi Li, Tianhong Wang, Weirong Chen, eta Lei Ma. 2018. Multisource Coordination Energy Management Strategy Based on SOC Consensus for a PEMFC–Battery–Supercapacitor Hybrid Tramway. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 67.296–305.
- , Xiang Meng, Guorui Zhang, Qi Li, eta Weirong Chen. 2017. An energy management system based on hierarchical control and state machine for the PEMFC-battery hybrid tramway. In *2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, 1–5. IEEE.
- Herrera, Victor Isaac, Haizea Gaztañaga, Aitor Milo, Andoni Saez-de Ibarra, Ion Etxeberria-Otadui, eta Txomin Nieva. 2016. Optimal Energy Management and Sizing of a Battery–Supercapacitor-Based Light Rail Vehicle With a Multiobjective Approach. *IEEE Transactions on Industry Applications* 52.3367–3377.
- IEA, International Energy Agency. Railway handbook 2017. Technical report.
- Li, Qi, Weirong Chen, Zhixiang Liu, Ming Li, eta Lei Ma. 2015. Development of energy management system based on a power sharing strategy for a fuel cell-battery-supercapacitor hybrid tramway. *Journal of Power Sources* 279.267–280.
- , Tianhong Wang, Chaohua Dai, Weirong Chen, eta Lei Ma. 2018. Power Management Strategy Based on Adaptive Droop Control for a Fuel Cell-Battery-Supercapacitor Hybrid Tramway. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 67.5658–5670.
- Olmos, Josu, Inigo Gandiaga, Dimas Lopez, Xabier Larrea, Txomin Nieva, eta Iosu Aizpuru. 2020. In-depth Life Cycle Cost Analysis of a Li-ion Battery-based Hybrid Diesel-Electric Multiple Unit. In *2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 1–5, Gijón. IEEE.
- , Iñigo Gandiaga, Andoni Saez-de Ibarra, Xabier Larrea, Txomin Nieva, eta Iosu Aizpuru. 2021. Modelling the cycling degradation of li-ion batteries: Chemistry influenced stress factors. *Errebisioan* .
- Pei, P, Q Chang, eta T Tang. 2008. A quick evaluating method for automotive fuel cell lifetime. *International Journal of Hydrogen Energy* 33.3829–3836.
- Torreglosa, Juan P., Pablo Garcia, Luis M. Fernandez, eta Francisco Jurado. 2014. Predictive Control for the Energy Management of a Fuel-Cell–Battery–Supercapacitor Tramway. *IEEE Trans. on Industrial Informatics* 10.276–285.
- Wu, Chaoxian, Shaofeng Lu, Fei Xue, Lin Jiang, eta Minwu Chen. 2020. Optimal Sizing of Onboard Energy Storage Devices for Electrified Railway Systems. *IEEE Trans. on Transportation Electrification* 6.1301–1311.
- Yan, Yu, Qi Li, Weirong Chen, Bo Su, Jiawei Liu, eta Lei Ma. 2019. Optimal Energy Management and Control in Multimode Equivalent Energy Consumption of Fuel Cell/Supercapacitor of Hybrid Electric Tram. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 66.6065–6076.
- Zhang, Guorui, Weirong Chen, eta Qi Li. 2017. Modeling, optimization and control of a FC/battery hybrid locomotive based on ADVISOR. *International Journal of Hydrogen Energy* 42.18568–18583.