



IKER
GAZTE
NAZIOARTEKO
IKERKETA EUSKARAZ

V. IKERGAZTE

NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

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

ANTOLATZAILEA:
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)



Aitortu-PartekatuBerdin 3.0

INGENIARITZA ETA ARKITEKTURA

PEM motako erregai-pilen
zenbakizko analisia eta balioztatze
esperimentalak

*Aitor Arotzena Lopez,
Laura Oca Perez,
Ander Goikoetxea Arana
eta Joanes Berasategi Arostegi*

215-222 or.

<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.v.03.28>

ANTOLATZAILEA:



BABESLEAK:



LAGUNTZAILEAK:



PEM motako erregai-pilen zenbakizko analisia eta balioztatze esperimentalak

Aitor Arotzena Lopez^{1,a}, Laura Oca Perez^{1,b}, Ander Goikoetxea Arana^{1,c},
Joanes Berasategi Arostegi^{2,d}

¹*Elektronika eta Informatika Saila, Mondragon Goi Eskola Politeknikoa,
Mondragon Unibertsitatea, 20500 Arrasate, Euskadi*

²*Mekanika eta Ekoizpen Industrialeko Saila, Mondragon Goi Eskola Politeknikoa,
Mondragon Unibertsitatea, 20500 Arrasate, Euskadi*

^aaitor.arotzena@alumni.mondragon.edu, ^blauraoca@mondragon.edu,
^cagoikoetxeaa@mondragon.edu, ^djberasategui@mondragon.edu

Laburpena

Gaur egungo aldaketa klimatikoa dela medio, energia elektrikoa lortzeko alternatiba berri ugari sortzen ari dira. Horien artean erregai-pilek abantaila suposatzen dute hainbat esparrutan. Ikerketa honetan gaur egun garapen mailan dagoen teknologia horren azterketa egin da, zeinari esker PEM motako erregai-pilak ezaugarritzea den helburua. Horrela, ordenagailu bidezko simulazio eta laborategi esperimenduei esker, haien funtzionamendu analisia gauzatu da. Honen bidez, PEM motako erregai-pilak optimizatzeko aukera ireki da, haien erabilera zabaldu ahal izateko.

Hitz gakoak: erregai-pila, PEM, plataforma esperimentalak, polarizazio kurba.

Abstract

Many new ways of generating electric energy are becoming mainstream because of the climatic change. Among those, the fuel cells are great advantage in various fields. In this research an analysis of such technology that is in growth nowadays has been carried out, with the final objective of characterizing PEM type fuel cells. With this, using computer simulations and experiments performed in the laboratory, an operation or performing analysis has been carried out. Thanks to this, the option to optimize PEM fuel cells has been opened, with perspectives to extend their use in the future.

Keywords: fuel cell, PEM, experimental platform, polarization curve.

1. Sarrera eta motibazioa

Aldaketa klimatikoak gizartean duen eragin nabarmena dela eta, aldaketa hori eteteko ekimenak sustatzen ari dira. Esaterako, gaur egun ibilgailu elektrikoaren inguruko ikerketa indartu egin da. Honi esker, baterietan eta erregai-piletan oinarritutako alternatiben garapena nabarmen hazi da (Muthukumar et al., 2021). Garapen hau handia izan den arren (batez ere jasangarritasunean eta kutsaduraren murrizketan), gaur egun erregai-fosiletan oinarritutako ibilgailuekin alderatuta hobetu beharreko gauzak ere badira (adibidez, karga-prozesua, bizi-iraupena, autonomia eta prezioa). Teknologia honen hedapena bultzatzeko, kargarako azpiegiturak ere handitu behar dira (Chen et al., 2020). Arazo hauen aurrean, hidrogeno erregai-pilako autoak alternatiba interesgarria bilakatzen dira. Gaur egun Espainia mailan mota honetako bi modelo bakarrik badaude ere (Toyota Mirai eta Hyundai Nexso modeloak), fabrikatzaileek hauen aldeko apustua egin dezakete. Hauek konponbideak eskaintzen dituzte auto elektriko entxufagarrien desabantailen aurrean: adibidez, depositua betetzeko garaian gasolina edo diesel auto baten denbora berdina behar du, besteen denbora tarte luzeekin alderatuz.

Erregai-pila kontzeptua XIX mendearen hasieran sortu zen lehen aldiz, Sir Humphry Davy kimikari ingelesaren eskutik. Honen ostean, 1838 urtean, Sir William Grove-k erregai-pilen etorkizunerako garrantzia handia izango zuen aurkikuntza egin zuen. Hain zuzen ere, elektrizitatea uraren elektrolisiaren alderantzizkatzearen bidez sor zitekeela aurkitu zuen, oxigenoa eta hidrogenoa erabiliz (Boudghene Stambouli & Traversa, 2002). Honek lehen erregai-pilaren sorkuntza bideratu zuen, ingelesez “fuel cell” izenez ezagutu zena. Duela ia 200 urteko kontzeptua

izan arren, gaur egungo garapen teknologikoei esker, erregai-pilek indarra hartu dute, elektrizitate sorkuntzako beste alternatiba batzuekin lehiatzeko aukera emanaz.

Azken urteetan erregai-pilak erabili ahal izateko sektore berriak sortzen ari dira eta ibilgailu elektriko entxufagarrien nahi adinako arrakasta eza aprobetxatuta, erregai-pilak ospea irabazten ari dira. Haien aplikazioen artean garraioa, aplikazio eramangarriak (mugikorak adibidez) edota bizitoki motako aplikazioak (enpresetan bero sorgailu bezala erabiltzeko, esate baterako) aurki ditzakegu (Barbir & Yazici, 2008). Dena den, oraindik ere ezjakintasuna dago erregai-pilek izan ditzaketen segurtasun kontuekin eta arriskuekin erlazionatuta, haien biltegitzeko modua izan daitekeen bezala (Moradi & Groth, 2019).

Hori guztia ikusita, garapen bidean dagoen teknologia interesgarria eta aukera aniztuna dela kontutan hartuta, PEM motako erregai-pilen inguruko ikerkuntzarekin ekin da (ingeleseko "Proton Exchange Membrane"-tik etorria), horrek eskainiko dituen ezagutza guztiak aprobetxatzeko asmoz. Izan ere, mundu mailan PEM motako erregai-pilen inguruko ikerkuntza puntu gorenean dago, etorkizunean izango dituen aplikazio eta abantailak aprobetxatzeko asmoz, aldi berean haien prezioa jaitea lortzen den bitartean. Horretarako, lan honen motibazioa erregai-pilei aipatutako etorkizuneko aplikazioetan errendimendu gehiago ateratzea da (hezetasuna, tenperatura eta abarren eragina aztertuz). Hori barne-funtzionamendua hobeto ulertuz egingo da, bai esperimentalki bai zenbakizko analisi baten bitartez.

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

PEM motako erregai-pilek dituzten aplikazio bat elektromugikortasun aplikazioak dira. Hortaz, hidrogenoari esker lorturiko erregai-pilako autoak ekoizteko aukera dago. Erregai-pila motak hainbat irizpideren arabera sailka daitezke (operazio tenperaturaren eta elektrolitoaren arabera, adibidez) (Sundén, 2019). Garaturiko ikerketan aztertu den erregai-pila PEM motakoa da, zeinak elektrolito moduan H^+ protoiak bidaiarazten dituen polimero solidozko mintz bat duen. Erregai-pila mota horiek hidrogenoaren purutasun altua eskatzen badute ere, abantaila asko eskaintzen dituzte, funtzionamendu tenperatura eta efizientziaren arteko konpromiso ona (30-100 °C-ko operazio tenperatura eremua eta % 40-50-eko efizientzia), diseinu konpaktua edota zarata baxua izan daitezkeen bezala, besteak beste (Du et al., 2021).

Dena den, aipatu berri den aplikazioan eta bestelako aplikazioetan erabilera zabala eduki ahal izateko, erregai-pilek oraindik ere erronka ugari aurre egin behar diete. Erronka hauek bi ikerketa lan-eremu nagusi zabaltzen dituzte. Lehen ildoak erregai-pilen diseinua eta elementuen aukeraketarekin du zerikusia, bigarrena funtzionamenduaren optimizazioan zentratzen den bitartean.

Lehenengo lan-eremua (diseinuan) gaur egun erregai-pilek duten erronka handienetarikoa zentratzen da: haien prezioa. Izan ere, pila hauek "stack"-a edo multzoa garestitzen duten osagaiak dituzte. Adibidez, katalizatzaile moduan platinoa erabili ohi da eta, hori dela eta, pilaren prezioak gora egiten du. Horrez gain, osagai honek iraunkortasun mugatua du, erregai-pilen degradazioaren errudun izanik (Borup et al., 2020). Arazo hori murrizteko hainbat aukera daude: platino horren erabileraren efizientzia handitzea edota prezio murriztagoko alternatiba bat bilatzea. Bestalde, pilaren mintzetan erabili ohi diren materialek (konposite perfluoratuak) arazo asko eragiten dituzte hainbat arazoengatik: prezio altua, soberakin toxikoak eragiten dituzten produkzio prozesuak edo degradazio kimikoa (Baroutaji et al., n.d.). Horren aurrean, ikerkuntza esfortzu nabarmenak aplikatzen ari dira arazo hauek konponduko dituen material bat topatzeko.

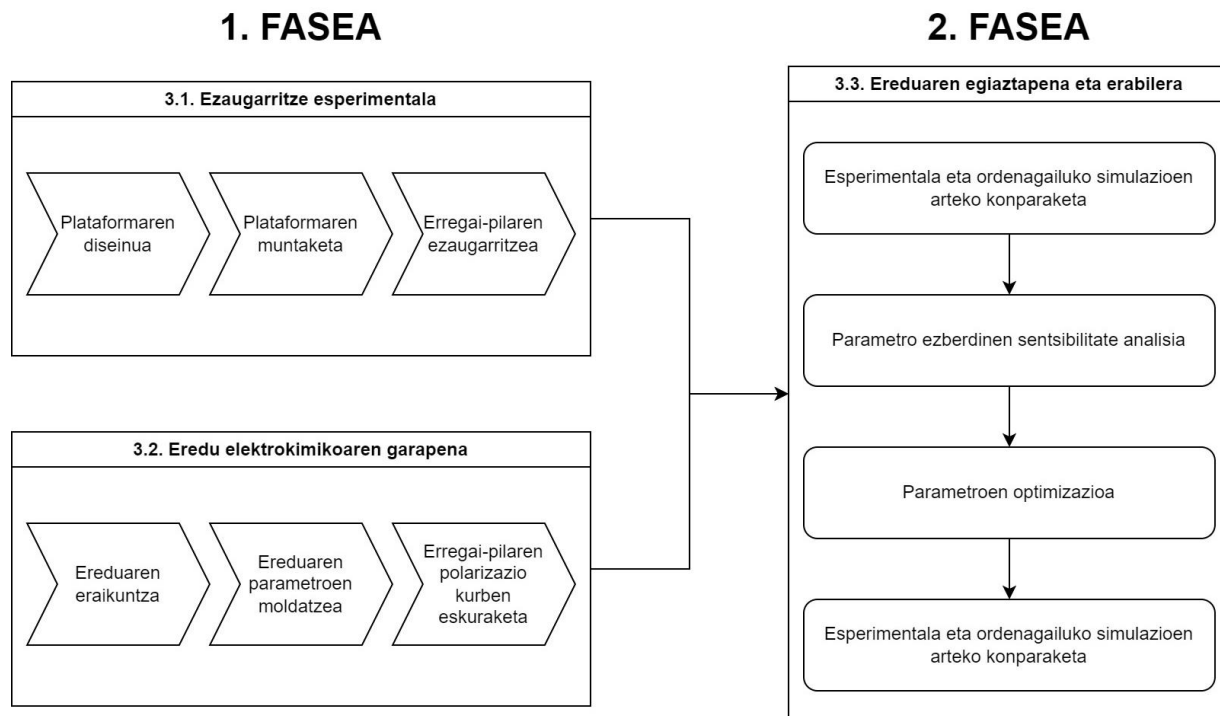
Bigarren lan-eremua, erregai-pilen funtzionamendu puntu optimoa aurkitzean datza. Erregai-pilen errendimendu globala baldintzatzen duten aldagai asko daude. Esaterako, sarrera gasen tenperatura edo hezetasunak zeresan handia dute lortutako emaitzetan. Ondorioz, ikerketa ildoetariko bat aldagai horien aldaketak ikastea oinarritzen da, funtzionamendu puntu optimoa noiz lortuko den ikasteko asmoz.

Ikerketa honen helburu nagusia erregai-pilen zenbakizko analisiaren eta esperimentalaren arteko korrelazioa egitea da. Ondoren, erregai-pilaren erabileran eraginiko parametroen optimizazioa gauzatu ahal izateko errendimendua maximizatzeko asmoz.

3. Ikerketaren muina

Ikerketa hau aurrera eraman ahal izateko, proiektua bi fase ezberdinetan banatu da, ikerketaren helburura iristeko asmoz. 1. Irudia-n ikerketaren fluxu-diagrama aurki daiteke.

1. Irudia. Ikerketaren faseen fluxu-diagrama.



Lehenengo fasea bi ataletan banatu da, non lehenengo atalean plataforma esperimentalaren diseinua garatu den eta diseinu horretatik abiatuz, behar zen guztiarekin plataformaren muntaketa egin den. Behin hori eginda, erregai-pilaren ezaugarritzea garatu ahal izan da. Bestalde, 1. fasean eredu elektrokimikoa eraiki da ordenagailu bidez, modu horretan simulazioei esker lorturiko erregai-pilaren polarizazio kurbak eskuratuz. Azkenik, orain garapenean dagoen 2. fasean bi ereduaren arteko konparaketari ekin zaio. Horri esker, plataforma esperimentalak eta ordenagailu simulazioak alderatu dira. Handik abiatuta, hainbat bide zabaldu dira, parametro ezberdinen sentzibilitate analisiarekin eta optimizazioarekin lotura dutenak.

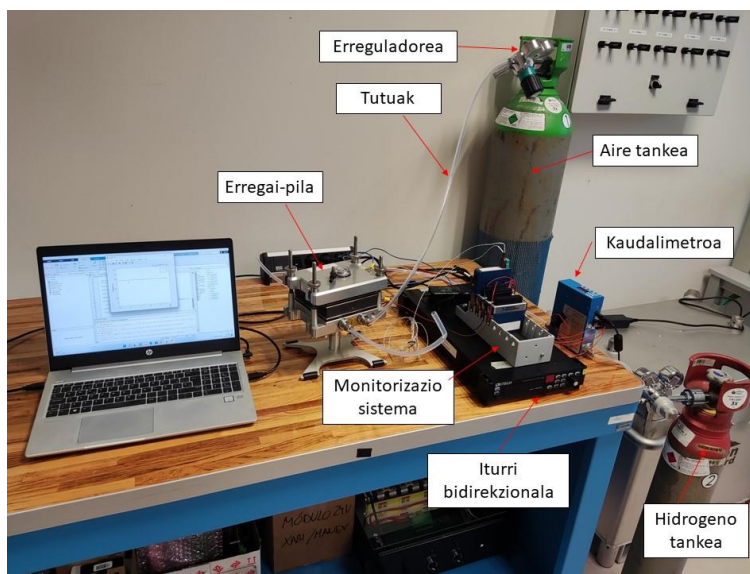
3.1. Erregai-pilaren plataforma esperimentalak

PEM motako erregai-pilen kasuan, “katodo irekiko” eta “katodo itxiko” modeloak existitzen dira (Kurnia et al., 2021). Lehenengo kasuan, oxigenoa zuzenean atmosferatik pilara sartzen da, katodo itxikoetan tutuen bidez egiten den bitartean. Laborategian aztergai den erregai-pila katodo itxikoa da. Hori kontutan hartuta, plataforma esperimentalaren eraikuntzarekin ekin zen. Hau da, erregai-pilari gehitu behar zitzaizkion osagai guztiak gehitu zitzaizkion (2. Irudian agertzen direlarik).

Lehenik eta behin, “expandable 50 cm² tandemtechnologies PEM fuel cell” erregai-pilaz (*Expandable PEM Research Test Cell - 50cm²*, n.d.) aparte, hidrogeno eta aire tankeak daude, zeinetatik erreazio kimikoan parte hartuko duten gasak hartzen diren. Presiopean dauden gas horiek funtzionamendu presioetara aldatzeko erreguladoreak erabiltzen dira. Bestalde, gasen konexioa osatzeko, tutuak baliatzen dira, tankeetatik pilara doazenak eta baita pilaren irteeran daudenak. Gainera, hidrogenoaren kasuan Kofloc 8550 kaudalimetro bat erabiltzen da, zeinak

hidrogenoaren fluxua neurtzeko balio duen. Horrez gain, karga moduluak sartzeko ITECH iturri bidirekzionala (*IT6000C Bidirectional Programmable DC Power Supply*, n.d.) erabiltzen da, erregai-pilak korrante profil ezberdinen aurrean nola erreazionatzen duen ikusteko. Azkenik, pilan ematen diren erreazioak monitorizatzeko eta, besteak beste, tentsio eta korrantearen bilakaera ikusteko National Instruments-eko monitorizazio sistema erabiltzen da. Muntaketa hau 2. Irudia-n ikusten da.

2. Irudia. Laborategian muntatutako plataforma esperimentalak



3. Irudia-n, zoom egitean, erregai-pilaren barne osagaiak ikusten dira, non hurrengo lerroetan aipatzen diren elementuak nabarmentzen diren.

- Elektrodoak. Anodoa eta katodoa dira. Bi elementu hauetan erregaia oxidatzen da (anodoan) eta oxigenoa erreduzitzen da (katodoan).
- Plaka bipolarrak. Gasen ibilbidea zehazten dute pilara sartzetik erreazioak ematen diren arte. Erreakzio kimikoetan sorturiko H_2O soberakina ere kanporatzeko balio dute.

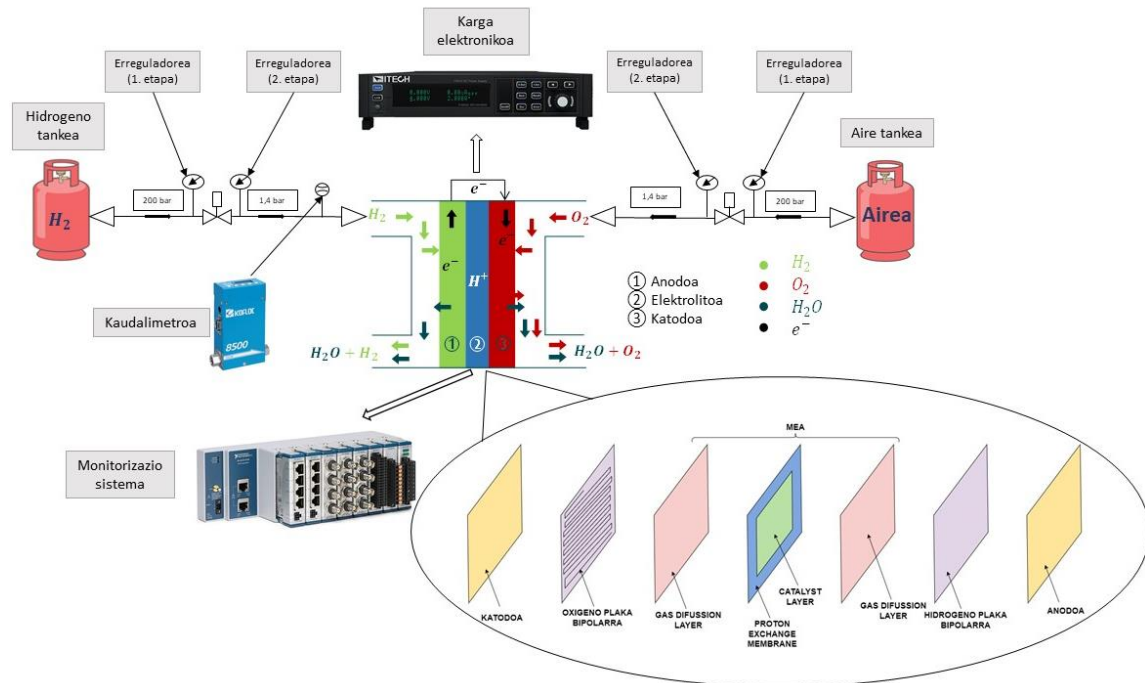
MEA (*Membrane Electrode Assembly*) bost geruza ezberdinetan banatzen da. Bere osotasunean simetrikoa da, eta kanpotik barnera ikusita hauek dira elementuak eta haien funtzioak (Baroutaji et al., 2016).

- GDL (Gas Diffusion Layer). Beste eginkizunen artean, katalizatzailea korrosiotik babestea da bere helburuetako bat, baita bero disipazioan laguntzea ere. Ondorioz, eroankortasun termiko eta elektroniko handia izan beharra du. GDL ohikoenak karbono zuntz paperez edo karbono oihalez eginak daude.
- CL (Catalyst Layer). Geruza honen funtzioa hidrogenoaren disoziazioari hasiera ematea eta oxigenoaren erredukzioa azkartzea da. Horrela, elektrodoek kanpo zirkuitu baten bidez korrantea sortzen dute, protoiek mintza gurutzatzen duten bitartean. Metal noble aktiboena izanda, katalizatzailea platinozkoa izan ohi da, erregai-pilen prezioa nabarmen igoz.
- PEM (Proton Exchange Membrane). Mintza protoiak garraiatzeko gai izan behar da, beraz, eroankortasun ionikoa funtsezko ezaugarria da. Mota ezberdinetakoa izan daiteke, baina betiere bere helburua gasak separatuta mantentzea da, anodoan sorturiko H^+ ioien bidea ahalbidetzen (erregaia hidrogenoa den kasuetan). Gaur egun, mintz hau eraikitzeko erabiltzen den material ohikoa Nafion-a da, uraren presentzian protoien eroale paregabe bihurtzen den materiala (Kusoglu & Weber, 2017).

Ezagutza guzti horiek laborategiko erregai-pilari aplikatzen zaizkio (ikusi Irudia 3). Kasu honetan, hainbat zelda pilatu daitezkeen arren, garatuko diren lehen esperimentuak zelda

bakarrarekin egingo dira. Horrela, pilaren portaera ezaugarritzen duen polarizazio kurbak eta bestelako ezaugarritzeak ahalbidetzen duen plataforma eraiki da.

3. Irudia. Plataforma experimentalaren eskema erregai-pilaren atalak agertzen direlarik.



3.2. Zenbakizko analisia

Eredu elektrokimikoa egin ahal izateko, COMSOL Multiphysics® software komertziala erabili da, plataforma horretan dagoen “Transport Phenomena in a Polymer Electrolyte Fuel Cell Membrane-Electrode Assembly” adibidea erreferentziatzen hartuta azterketa egiteko. Eredu horrek 1Dn deskribatzen du zelda unitario bat. Eredu horren oinarri diren ekuazioak (Limeres, 2022) erreferentzian aurkitu daitezke. Erabilitako erregai-pilaren osagaien propietateak datasheet-etik hartu eta ereduaren parametro modura sartu dira. 1. Taulan erreferentziako modeloaren parametro garrantzitsuenak laburbilduta agertzen dira.

1. Taula. Erregai-pilaren ereduaren parametroak.

Parametroa	Deskribapena	Balioa	Unitatea
L_GDL	“Gas Diffusion Layer”-aren lodiera	2,35e-4	m
L_MPL	“Micro Porous Layer”-aren lodiera	2e-5	m
L_CL	“Catalyst Layer”-aren lodiera	1,00e-5	m
L_mem	Mintzaren lodiera	5,08e-5	m
eps _l _CL	“Catalyst Layer”-aren ionomero bolumen frakzioa	0,200	-
eps _s _CL	“Catalyst Layer”-aren elektrodo bolumen frakzioa	0,400	-
eps _s _GDL	“Gas Diffusion Layer”-aren elektrodo bolumen frakzioa	0,365	-
eps _s _MPL	“Micro Porous Layer”-aren elektrodo bolumen frakzioa	0,400	-
sigmas _{CL}	“Catalyst Layer”-aren eroankortasun elektrikoa	76,923	S m ⁻¹
sigmas _{GDL}	“Gas Diffusion Layer”-aren eroankortasun elektrikoa	90,909	S m ⁻¹
sigmas _{MPL}	“Micro Porous Layer”-aren eroankortasun elektrikoa	50	S m ⁻¹
RH _{an}	Anodoaren hezetetasun erlatiboa	85	%

RH_cath	Katodoaren hezetasun erlatiboa	95	%
a_CL	Katalizatzaile geruzaren azalera espezifikoa	5,00e7	m ⁻¹
i0_H2	Hidrogenoaren oxidazioaren korrante dentsitate trukea	10	A m ⁻²
i0_O2	Oxigenoaren erredukzioaren korrante dentsitate trukea	1	A m ⁻²

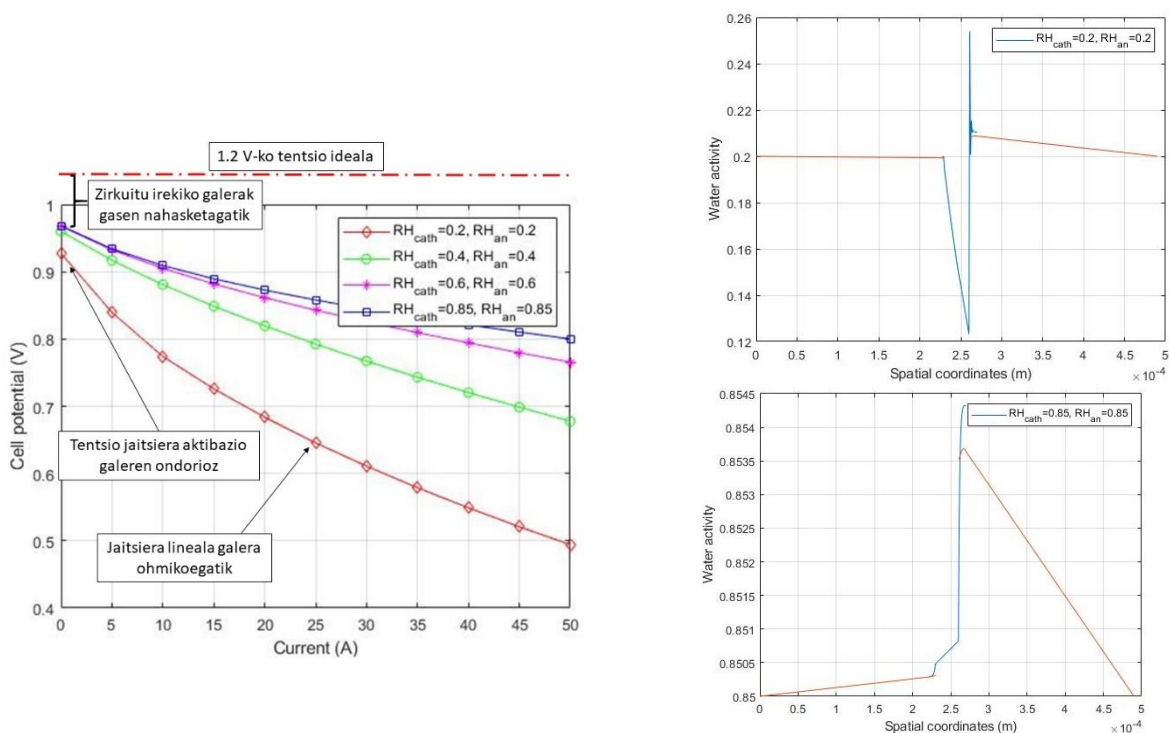
Eraikitako ereduaren jokabidea ikusteko, bi azterketa kasu definitu dira, non sarrerako hezetasun baldintzak aldatzen diren bai anodoan bai katodoan ere. 2. Taulan, aldatu diren parametroak eta aztertutako balioak agertzen dira.

2. Taula. Azterketa-kasuen definizioa.

Parametroa	Deskribapena	Balioak	Unitatea
RH_an	Anodoaren hezetasun erlatiboa	20 – 40 – 60 – 85	%
RH_cath	Katodoaren hezetasun erlatiboa	20 – 40 – 60 – 85	%

4. Irudia-n, simulazioen bitartez lortutako emaitzak agertzen dira. Hor, parametro horiek polarizazio kurban duten eragina ikusten da. 4. Irudia a)-n ikus daiteke zenbat eta hezetasun erlatibo handiagoa izan orduan eta tentsio altuagoak lortuko ditugula. Polarizazio kurba hauetan erregai-pilaren tentsioa eta korrontea grafikatzan dira, non korrontea handitu ahala tentsioa jaitsi egiten den. Tentsio jaitsiera horrek hainbat jatorri ditu. Lehenik eta behin, korrontearen balio baxuetan tentsio jaitsiera katalizatzailearen aktibazio polarizazioaren ondorio da. Ondoren kurba tentsio galera linealeko gunean sartzen da, non galerak zeldaren elementuen erresistentzia elektrikoak sortzen dituen (ohmic drop bezala ezagutzen direnak). Azkenik, korrontea handia denean, masa garraioagatik galerak aurkituko liratezke (grafikoetan ez da horretaraino iritsi), erreaktibo eta produktuen kontzentrazioek erregai-pilaren errendimenduan galerak sorraraziz (*Polarization Curves*, 2017). Bestalde, 4. Irudia b) eta c)-n muturreko kasuetan hezetasunak pilaren geruza ezberdinetan duen eragina ikusten da. Hortaz, ondoriozta daiteke anodoaren eta katodoaren hezetasun balio altuagoekin, korrante dentsitate altuagoak lortzen direla.

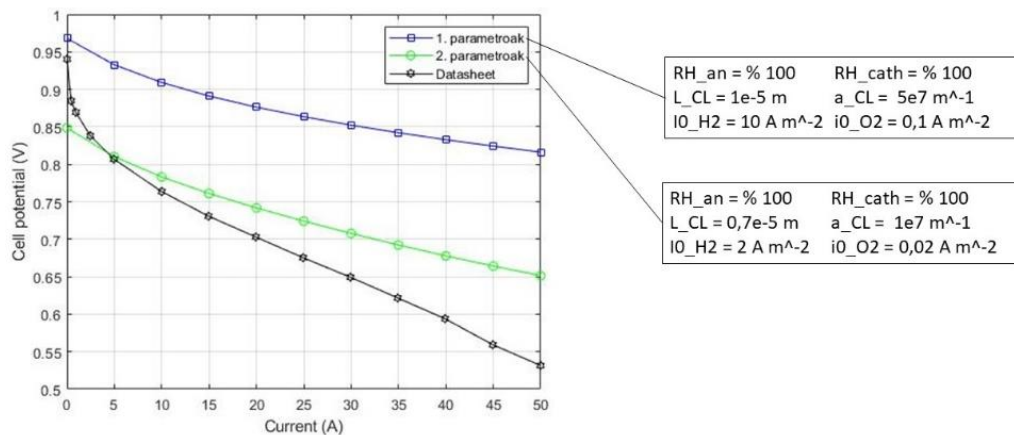
4. Irudia. a) Hezetazun maila ezberdinetarako polarizazio kurban eragina; b) Water activity 20 – 20 %; c) Water activity 85 – 85 %.



3.3. Egiatzapena

Fase hau oraindik garapenean egon arren, dagoeneko lehen ordenagailu simulazioak aurrera eramanez ahal izan dira, non erreferentziako parametroei aldakuntza faktoreak aplikatu zaizkien. Horrela, modeloko parametroen, aldatutako parametroen eta erregai-pilaren datasheet-ean gehituta zegoen polarizazio kurbaren arteko alderaketa egin daiteke. Aipaturiko hau **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**-n adierazitako kurbetan ikus daiteke.

5. Irudia. Polarizazio kurba parametro ezberdinekin eta datasheet-ak emandako kurba.



Antzeman daitekeen modura, balioek guztiz bat egin ez arren, parametroak aldatzean lorturiko polarizazio kurbak fabrikatzaileak emandakoaren antza handiagoa du, forma bera mantentzen ibiltarte osoan. Horrekin ondoriozta dezakegu erabilitako modeloak balio handiegiak ematen zizkiola polarizazio kurbari eta beraz, laborategiko erregai-pilarekin bat egiteko kurbaren balioak jaitsi egin behar direla. Hortaz, ikerkuntza eta esperimenduzkoak bide honetatik jarraitu behar du. Emaitza berdinak lortu ahal izateko, simulazioetan sartu beharreko parametro guztiak datasheet-eko kurba lortzeko hartutako guztien berdinak izan behar dute. Datu horiek ez-jakinak direnez, simulazioak garatzen jarraituko da kurbek bat egin arte.

4. Ondorioak

Dokumentu honetan hainbat alditan aipatu den moduan, PEM motako erregai-pilek hainbat erronkari aurre egin behar dioten arren, oso alternatiba interesgarria dira etorkizunean energiaren sorkuntza jasangarria izateko.

Proiektu honetan zehar dagoeneko plataforma esperimentalaren muntatzea lortu da eta horrekin lehenengo saiakuntzak gauzatzea. Honi esker etorkizunean mota ezberdinetako saiakuntzak egin ahal izango dira, aurretik esandako jokabidea ezaugarritzeko asmoz.

Bestalde, oraingoz egin diren simulazioekin ikusi ahal izan da bai simulazioen polarizazio kurbak baita erregai-pilaren datasheet-ean emandako polarizazio kurbak hein handi batean bat egiten dutela. Honek ordenagailu saiakuntzen abiapuntu garrantzitsua suposatzen du, izan ere, baliokidetasun hau izanda, optimizazio faseari hasiera emateko aukera irekitzen da.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Hori dela eta, etorkizunera begira laborategietako saiakuntzek eta ikerkuntzek garrantzia handia izango dute garapenean jarraitzeko. Hau horrela, erregai-pilen optimizazioa funtsezkoa izango da, modu honetan pilen funtzionamendua hobeto ulertzeko asmoz. Honi esker, erregai-pilen errendimendua mugatzen duten degradazio, korrosio eta bestelako fenomenoak ulertu ahal izango dira eta, optimizazioari esker, haiekiko jokabidea hobetu ere.

Bestalde, erregai-pilen errendimendu galerak eragiten dituzten beste eragileak aztertuko dira. Modu honetan, erregai-piletan hozte- edo berotze-sistema sartzeak duen aldaketa ikusiko da, edo gasen sarrera tenperatura edota hezetasun erlatiboa aldatzeak dakartzan ondorioak aztertu ahal izango dira. Honen guztiaren helburua erregai-pilaren ezaugarritzea guztiz ulertzea izango da, modu honetan errendimendu gorenara lortzeko asmoz.

6. Erreferentziak

- Barbir, F., & Yazici, S. (2008). Status and development of PEM fuel cell technology. *International Journal of Energy Research*, 32(5), 369–378. <https://doi.org/10.1002/er.1371>
- Baroutaji, A., Carton, J. G., Sajjia, M., & Olabi, A. G. (n.d.). *MATERIALS SCIENCE AND MATERIALS ENGINEERING Materials in PEM fuel cells*.
- Baroutaji, A., Carton, J. G., Sajjia, M., & Olabi, A. G. (2016). Materials in PEM Fuel Cells. In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.04006-6>
- Borup, R. L., Kusoglu, A., Neyerlin, K. C., Mukundan, R., Ahluwalia, R. K., Cullen, D. A., More, K. L., Weber, A. Z., & Myers, D. J. (2020). Recent developments in catalyst-related PEM fuel cell durability. In *Current Opinion in Electrochemistry* (Vol. 21, pp. 192–200). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2020.02.007>
- Boudghene Stambouli, A., & Traversa, E. (2002). Fuel cells, an alternative to standard sources of energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(3), 295–304. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(01\)00015-6](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(01)00015-6)
- Chen, T., Zhang, X.-P., Wang, J., Li, J., Wu, C., Hu, M., & Bian, H. (2020). A Review on Electric Vehicle Charging Infrastructure Development in the UK. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 8(2), 193–205. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2018.000374>
- Du, Z., Liu, C., Zhai, J., Guo, X., Xiong, Y., Su, W., & He, G. (2021). A review of hydrogen purification technologies for fuel cell vehicles. In *Catalysts* (Vol. 11, Issue 3, pp. 1–19). MDPI. <https://doi.org/10.3390/catal11030393>
- Expandable PEM Research Test Cell - 50cm²*. (n.d.). Retrieved March 24, 2023, from https://www.fuelcellstore.com/product/product&product_id=1066
- IT6000C Bidirectional Programmable DC Power Supply*. (n.d.). Retrieved March 24, 2023, from <https://www.itechate.com/en/product/dc-power-supply/IT6000C.html>
- Kurnia, J. C., Chaedir, B. A., Sasmito, A. P., & Shamim, T. (2021). Progress on open cathode proton exchange membrane fuel cell: Performance, designs, challenges and future directions. *Applied Energy*, 283. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116359>
- Kusoglu, A., & Weber, A. Z. (2017). New Insights into Perfluorinated Sulfonic-Acid Ionomers. *Chemical Reviews*, 117(3), 987–1104. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00159>
- Limeres, M. (2022). *MODELADO Y CARACTERIZACIÓN DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE PEM ALIMENTADA CON HIDRÓGENO VERDE*. ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE MONDRAGON UNIBERTSITATEA.
- Moradi, R., & Groth, K. M. (2019). Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis. In *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 44, Issue 23, pp. 12254–12269). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.041>
- Muthukumar, M., Rengarajan, N., Velliyangiri, B., Omprakash, M. A., Rohit, C. B., & Kartheek Raja, U. (2021). The development of fuel cell electric vehicles – A review. *Materials Today: Proceedings*, 45, 1181–1187. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.679>
- Polarization Curves*. (2017). <https://www.fuelcellstore.com/blog-section/polarization-curves>
- Sundén, B. (2019). Fuel cell types - overview. In *Hydrogen, Batteries and Fuel Cells* (pp. 123–144). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816950-6.00008-7>

7. Eskerrak eta oharrak

Eusko Jaurlaritzak emandako diru laguntza Elkartek programa barruan, ErabilH2 (KK-2021/00086 kodea) proiektuaren baitan.