

Arku Elektrikoaren FVM Bidezko Simulazioa Ibilgailu Elektrikoen Baterietako Hidrogenozko Etengailuetan

(Electric Arc FVM Simulation in Hydrogen Circuit Breakers
for Electrical Vehicles Batteries)

Pedro Sánchez¹, Araitz Iturregi^{1*}, Diego González², Pablo Eguia¹, Unai Villena¹

¹ Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU), Bilbao, Espainia

² Leibniz Institute of Plasma Science and Technology, Greifswald, Alemania

LABURPENA: Arku elektrikoa etengailuetan gertatzen den efektua da. Etengailuaren kontaktuak bata bestetik aldentzen direnean, etengailutik pasatzen den korrante elektrikoa kontaktuetatik etengailuaren gas isolatzaileera pasatzen da, eta hau ionizatuz, bertan arku elektrikoa sortzen da. Arku elektrikoak efektu ez-desiragarriak sor ditzake etengailuetan; beraz, efektu horiek murrizteko asmoz, lan honen helburu nagusia hidrogenoaren baliagarritasuna aztertzea da etengailuaren gas isolatzaile modura. Horretarako, Navier-Stokesen ekuazioak eta Bolumen Finituen Metodoa (ingelesez, Finite Volume Method, FVM) oinarritat hartuz, simulazio Magnetohidrodinamikoak (ingelesez, Magnetohydrodynamics, MHD) definitu dira ANSYS CFX programaren bitartez. Hala, arku elektrikoaren prozesuan oinarritzekoak diren aldagaiak kalkulatu dira, hala nola, tentsioa, temperatura eta presioa. Emaizta horiek airea isolatzaile modura darabilten etengailuetan lortu-takoekin alderatuz, hidrogenoa simulatutako aplikaziorako gas egokia den ala ez ondorioztatuko da.

HITZ GAKOAK: arku elektrikoa, etengailua, hidrogenoa, simulazio MagnetoHidroDinamikoak (MHD), Bolumen Finituen Metodoa (FVM).

ABSTRACT: *The electric arc is a phenomenon that takes place in electrical switching devices. When the contacts of a switch separate, the electrical current passing through the switching device passes from the switch contacts to the insulating gas ionizing it and the electric arc is formed. The electric arc often causes undesirable effects in the switches, and in order to minimize them, the main objective of this work is to analyse if hydrogen is suitable as insulating gas for switching devices. To achieve the aforementioned, the Navier-Stokes equations and Finite Volume Method (FVM) will be applied, and MagnetoHydroDynamic simulations (MHD) will be performed using ANSYS CFX software. The most significant variables will be extracted to predict the behaviour of the arc, such as voltage, temperature and pressure. By comparing the results with the results obtained on those switching devices where air has been used as insulating medium, it will be deduced if hydrogen is the appropriate gas for this application.*

KEYWORDS: *electric arc, switching devices, hydrogen, MagnetoHydrodynamic simulations (MHD), Finite Volume Method (FVM).*

* **Harremanetan jartzeko / Corresponding author:** Araitz Iturregi. UPV/EHU, Bilboko Ingeniaritza Eskola. Rafael Moreno, 2 (48013 Bilbao). – araitz.iturregi@ehu.eus – <https://orcid.org/0000-0002-3845-7183>

Nola aipatu / How to cite: Sánchez, Pedro; Iturregi, Araitz; González, Diego; Eguia, Pablo; Villena, Unai (2023). «Arku Elektrikoaren FVM Bidezko Simulazioa Ibilgailu Elektrikoen Baterietako Hidrogenozko Etengailuetan». *Ekaia*, 44, 2023, 319-333. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.23847>).

Jasotze-data: 2022, uztailak 30; Onartze-data: 2023, martxoak 7.

ISSN 0214-9001 - eISSN 2444-3255 / © 2023 UPV/EHU



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

1. SARRERA

2050erako, Europak klimatikoki neutroa den lehen kontinentea izan nahi du. Horretarako, garapen estrategia berria behar da, honako baldintza hauek beteko dituen [1].

- Ez da berotegi-efektuko gasen isuri garbirik izango.
- Hazkunde ekonomikoa baliabideen erabileratik bananduko da.
- Ez dira ez pertsonak ez herrialdeak ere atzean utziko.

Europar Batasunak isuri horiek % 90 murriztu nahi ditu 2050erako. Helburu hori lortzeko, ibilgailu elektrikoen erabilera asko handitu beharko da. Horretaz gain, Europak dituen helburu guztiak betetzeko, beharrezkoa izango da sektore askotan aldaketak egitea.

Ibilgailu elektrikoen optimizazioak ikerkuntza handia behar du oraindik hainbat alderditan: besteak beste, pisua eta galerak murriztea, energia biltegitratzeko ahalmena eta korrontea eteteko ahalmena handitzea, bateria pizteko eta itzaltzeko segurtasuna mantentzea eta abar [2]. Azken alderdi hori da artikulu honetan azaldutako ikerlanarekin lotura handiena duena, zeren erabiltzaileen segurtasuna eta, batez ere, etengailuen bizi-zikloa handitzea bilatzen baitu.

Etengailuen bizi-zikloa handitzea eta arkuaren iraupena txikitzea ekar dezaketen estrategien artean, gas desberdinen erabilerari erreparatu diogu ikerlan honetan. Izan ere, korronte zuzeneko etengailuetan, gasen erabilerak, arkuaren denbora txikitzeaz gain, arkuaren erresistentzia elektrikoa handitzen du, arkuamatatzeko lagungarria dena. Beste alde batetik, kontaktoreen fusioa handitzen da, kontrolatu beharreko fenomeno kaltegarria dena. Bai eragin positiboak bai negatiboak kuantifikatzeko, 3D simulazio magnetohidrodinamikoak (MHD) erabil daitezke. MHD simulazioak jariakinen dinamika konputazionalan (ingelesez, Computational Fluids Dynamics, CFD) oinarrituta daude, eta arku elektrikoaren jokaerari buruzko informazioa ematen dute jariakinen mekanikako legeak eta lege termodinamikoak aplikatuta. CFDA jariakinen mekanikako adarra da, zeinak problemak ebazteko zenbakizko metodoak eta algoritmoak erabiltzen dituen. Behin eredu eraikita dagoela, oso erraza eta merkea da aldaketak egitea, adibidez, geometrian, gasen konposizioan, materialetan eta abar.

Hala, badira simulazioa erabiliz egindako hainbat ikerketa esperimental, etengailuetan H₂/N₂ erabiltzeak airearekin alderatuta dakartzan abantailak erakusten dituztenak [3, 4]. Hori dela eta, artikulu honetan

laburbildutako ikerlanean, aireko simulazioen eruedetatik abiatuz hidrogenozkoak aztertzea erabaki da, arku elektriakoaren jokaera hainbat egoera desberdinetan behatuz eta horrek izan ditzakeen eraginak aztertuz.

Ikerlanak hainbat helburu izan ditu. Lehenik, hidrogenoa isolatzaile bezala erabiliz arku elektriakoaren jokaeran zer eragin duen aztertzea eta, aldi berean, isolatzaile horrekin arku elektriakoaren kokapena eta iraupena zehaztea eta etengailuaren atal ezberdinetan lortzen diren tenperatura, presioa eta bestelako aldagaiak kalkulatzeko. Bigarrenik, hainbat erradiazio-eredu desberdinen alderaketa egitea eta geometria sinple bat erabiliz emaitzak errealitatera ahal den heinean hurbiltzea. Azkenik, material isolatzailearen ezaugarrien eragina aztertzea arkuan, ibilgailu elektriakoaren efiizientzia hobetzeko.

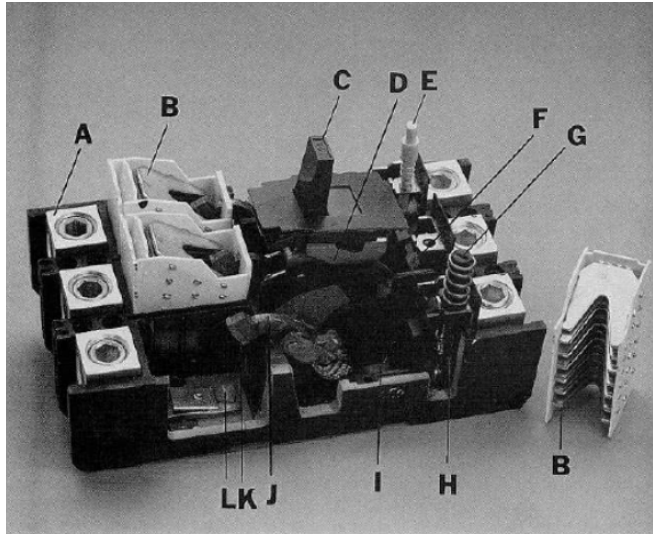
2. ETENGAILUEN ETA ARKU ELEKTRIKOAREN EZAUGARRIAK SIMULAZIOETAN

2.1. Etengailuak

Simulazioak era egokian ulertzeko edota garatzeko, etengailuen ezaugarriak eta atalak ezagutzea, arku elektriakoaren fenomenoak ezagutzea eta erradiazio ereduak menperatzea beharrezkoa da.

Etengailuen azterketa egiterakoan, elementu ideal edo erreal moduan har daitezke. Etengailu idealak ez du barne-inpedantziarik eta ez du berorik sortzen. Gainera, edozein korrante kantitate eteteko gai da. Aldiz, etengailu errealak inpedantzia txiki bat du, potentzia-galera bat eragiten duena. Horretaz gain, etengailuaren elementuetan higadura sortuko da, mantenu-eragiketarako komenigarriak izatea eragiten duena.

Hainbat motatako etengailuak daude etengailu automatiko txikiak (ingelesez, Miniature Circuit Breakers, MCB) kutxa moldeatutako etengailu automatikoak (ingelesez, Molded Cases Circuit Breaker, MCCB), eta Potentzia txikiko etengailu automatikoak, (ingelesez, Low Voltage Power Circuit Breakers, LVPCB). Hiru etengailu motek ezaugarri antzekoak dituzte, baina korrante izendatu desberdinetan lan egiteko diseinatuak daude. Haien atal nagusiak 1. irudian ikus daitezke: terminalak (A eta / irudian), plaka banatzaileak (B), kontaktuak (K, J), haril elektromagnetikoa (G) eta deserra komuneko barra (D).



1. irudia. Etengailu errearen atalak [5].

2.2. Arku elektrikoa

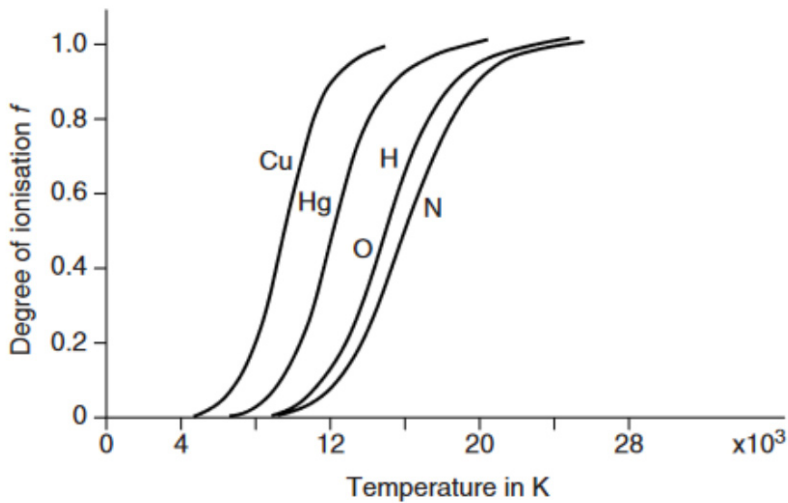
Arku elektrikoa, etengailuen kontaktuak bata bestetik aldentzean agertzen den efektua da, etengailua tentsiopean dagoenean. Arku elektrikoa oso fenomeno konplexua da, faktore askoren menpe dagoena, hala nola, jariakinen dinamika, lege elektromagnetikoak edota termikoak. Oso garrantzitsua da zer mediotan gertatzen den arkuaren iraungitzea, luzeran, denboran eta arkuaren bestelako ezaugarrietan eragin handia izango duelako medioak [6]. Aurretik aipatu bezala, ikerlan honetan aztertuko den medioa hidrogenoa da, airea hartuko da abiapuntutzat, eta bi gasen arteko alderaketa egingo da simulazio bidez etengailuaren geometria berbera erabilita.

Arkuak, inguruko gasa, kasu honetan hidrogenoa, ionizatu denean eta plasma bihurtu denean agertzen da. Beraz, arku elektrikoak, plasmaren menpekoak izango diren berezko propietate elektrikoak, magnetikoak eta termikoak ditu.

Arkuaren eraketa, kontaktoreen aldentzearen, aplikatutako korrontearen eta medioaren ionizazioaren menpekoa da. Korrontea ez bada behar bezain handia, ez da arku sortzeko tenperatura nahikoa lortuko, eta izpi bat bakarrik sortuko da. Behar den tenperaturara ailegatuz gero, ingurunea ionizatuko da (kasu honetan, hidrogenoa), plasma bihurtuko da eta arkuak agertuko da. Plasma materiaren laugarren egoera da, gasaren antzekoa da,

baina egoera honetan, partikulak ionizatuta daude, hau da, elektrikoki kargatuta daude.

Horretaz gain, esan beharra dago material bakoitzak ionizazio-gradua izango duela jasaten duen tenperaturaren arabera. 2. irudian hainbat materialen ionizazio-gradua ikus dezakegu, tenperaturaren menpe.



2. irudia. Materialen ionizazio-gradua [7].

Arkuaren bizitzan hiru etapa nagusi bereiziko dira, 3. irudian ikus daitezkeen bezala: 1) etengailuaren kommutazioa, 2) arkuaren mugimendua ganbaran eta 3) arkuaren bereiztea.

— Lehenengo etapan, etengailuaren kontaktuak aldentuko dira, eta arkuak sortuko da bien artean, arkuaren luzera handituz kontaktuak aldentu ahala. Arkuak ez du ibilbide zuzena izango, eta okertu egingo da indar magnetikoengatik. Ondoren, jauzi baten antzeko mugimendua egingo du, eta ganbaran barrena mugitzen hasiko da.



3. irudia. Arku elektriakoaren etapak.

- Bigarren etapan, arkuaren gainazalaren zehar mugituko da plaka banatzaileengan gasak eragindako presioaren eta indar magnetikoen eraginez. Etapa honetan tentsioa etengabe igoko da, eta, horregatik, oso garrantzitsua da etengailuaren diseinua tentsio hori jasan ahal izateko.
- Hirugarren etapan, arkuaren gainazalaren banatzaileetan sartuko da, eta arku txiki asko sortuko dira. Arkuaren korrontea oso handia denean, plaken gainazalak metalaren fusio-puntura ailega daitezke. Azkenean, arkuaren gainazala egingo da, baina etengailuaren diseinua egokia izan ezean, kalteak sor daitezke etengailua hainbat aldiz ireki ostean [8].

Arkuaren jokaera ezagutzeko, simulazio MHDak erabili dira. Arku elektrikoak hainbat partikula desberdinez osatuta daude, hala nola, elektroiak, ioiak, atomoak eta molekulak. Horietako bakoitzak egoera-ekuazio bat du, eta horrek kostu konputazional handia sortzen du simulazioetan. Horregatik, hainbat sinplifikazio behar dira kalkuluak errazteko.

Arku elektrikoaren aztertzean arkuaren sorrera eta berpiztea kontuan hartzen ez badira eta arkuaren sustraiak era makroskopikoan ebazten badira, arkuaren portaera era makroskopikoan ere aztertu ahal izango da, MHD hurbilketa erabiliz. Metodo horren bidez, plasma jariakin bakanak hartuko da, eta arkuaren eragina aztertuko da etengailuaren barnean.

Metodoa erabiltzeko, plasmak oreka termiko lokalean egon behar du, eta hori gertatzeko, honako baldintza hauek bete behar dira:

- Oreka termikoa: elektroien tenperatura eta partikula pisudunen tenperatura bera izatea.
- Ionizazio-oreka: elektroien dentsitatea, n_e , eta plasman egongo litzateke elektroien dentsitatea plasma Saha-k definitutako tenperatura uniformearen izango balu, $n_e Saha$. Saha plasman ionizazio-gradua adierazten du atomoen tenperaturaren, dentsitatearen eta ionizazio-energiaren menpean.
- Quasi-neutroa: plasma elektrikoki neutroa izatea.

Aurreko baldintzak ez dira beteko arkuaren sustraiak ez eta korrontea ere nulua denean; hala ere, MHD metodoa egokia da arkuaren jokaera orokorra aztertzeko [9].

Aurreko guztia kontuan izanda, plasman masaren, momentuaren eta energiaren kontserbazioaren ekuazioak adieraziko dira, Navier-Stokesen ekuazio eraldatuak izenez ezagunak (1-3). Ekuazio horiek jariakin baten mugimendua gertatzen ari den bitartean, presioaren, tenperaturaren, abiadura-eraren eta dentsitatearen erlazioak zehazten dituzte:

Masaren kontserbazioa

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

Momentuaren kontserbazioa

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\vec{\nabla} p + \frac{4}{3} \vec{\nabla} \mu (\vec{\nabla} \cdot \vec{v}) - \vec{\nabla} \times \mu (\vec{\nabla} \times \vec{v}) + \vec{J} \times \vec{B} + \rho \cdot \vec{g} \quad (2)$$

Energiaren kontserbazioa

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) h - \frac{\partial p}{\partial t} - (\vec{v} \cdot \vec{\nabla} p) = \vec{\nabla} \cdot \frac{\lambda}{C_p} \vec{\nabla} h - \vec{\nabla} \cdot \vec{q}_R + \Phi + \vec{j} \cdot \vec{E} \quad (3)$$

Eta Maxwellen ekuazioak ebatzi behar dira batera:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (4)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_e \quad (7)$$

Non:

ρ dentsitatea den, v abiadura, μ biskositatea, \vec{j} Korrante-dentsitatea, \vec{B} indukzio magnetikoa, h entalpia, C_p bero-espezifikoa, E eremu elektrikoa, φR , erradiazioa, H eremu magnetikoaren indukzioa, D fluxu elektrikoaren dentsitatea eta ρ_e karga-dentsitatea.

2.3. Erradiazioa

Temperatura eta presio handien menpean lan egiten denean, erradiazioa bero-transferentzia mekanismo nagusia bihurtu daiteke; beraz, berebiziko garrantzia du arku elektrikoaren azterketan. Erradiazioak eragindako bero-transferentzia kalkulatzeko, erradiazioaren bero-trukaketa

orokorreko formulazioa (ingelesez, Radiative Transfer Equation, RTE) erabiltzen da [10]:

$$\vec{n} \cdot \nabla I_v = k'_v (B_v - I_v) \quad (9)$$

Non:

K'_v absorzio-koefizientea induzitutako emisioaren bidez zuzenduta eta Kirchhoff legeak adierazitako emisio lokalaren koefizientearekin erlazionatuta, B_v Planck-en funtzioa eta I_v erradiazioaren intentsitatea diren.

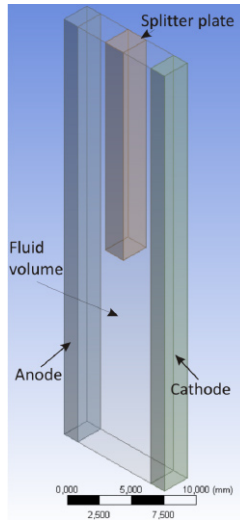
Lan honetan erabilitako erradiazio-eredua NEC da (ingelesez, Net Emission Coefficient). Eredu hori plasma isotermo eta homogeenarekin erabiltzen da, geometria sinpleetarako. NEC eredua RTE ereduaren sinplifikazioa da, eta erradiazioaren kalkulua bi geometria desberdinen bitartez egin daiteke, erradio isotermoa duen zilindro baten bidez eta R_p erradioa duen esfera isotermo eta homogeenaren zentroarentzat.

Aurreko metodoaz aparte, beste bi metodo existitzen dira RTE ekuazioan oinarrituta daudenak. Alde batetik, NECS eredua (ingelesez, Net Emission Coefficient Simplified), NECaren oso antzekoa baina kostu konputazional txikiagoa eta zehaztasun txikiagoa duena, NEC ereduaren sinplifikazioa baita [11].

Beste alde batetik, P1 erradiazio-eredua dugu, erradiazio-espektra hainbat bandatan banatzen duena maiztasun desberdinentzako. Maiztasun banda horietan, plasmaren absorzio-koefiziente espektralak tenperaturaren eta presioaren menpean ezartzen dira. Hiru erradiazio-ereduen alderaketa eredu berdinerako aurreko [9, 12] lanetan ere aurkitu daiteke.

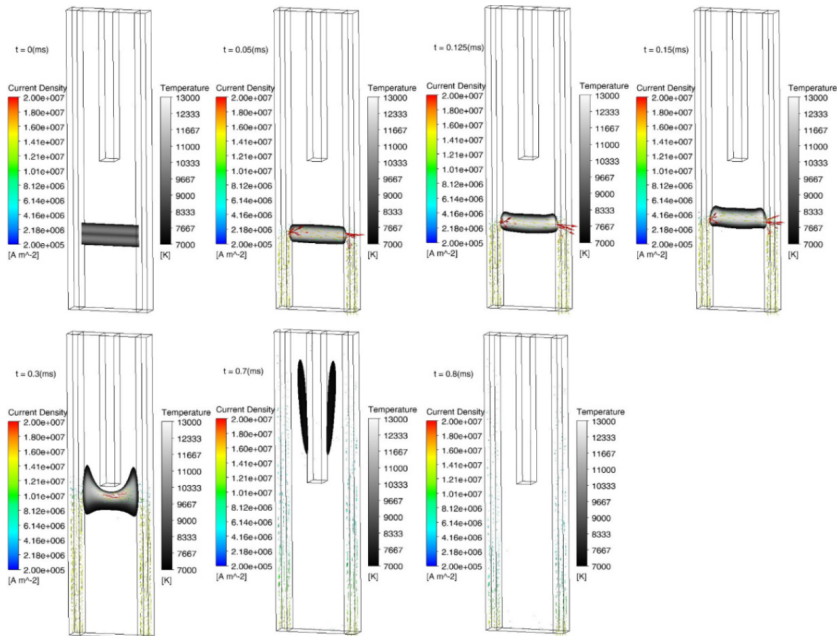
3. AIRE EREDUA ETA EMAITZAK

Lana garatzeko erabilitako oinarrizko ereduari, airea isolatzaile moduan erabili da. Hurrengo ereduari gertatzen den moduan, simulazioak garatu ahal izateko, etengailuaren geometria definitu da (4. irudia). Horren ostean, bolumen finituen metodoa erabili ahal izateko, mailatua eraiki da. Ondoren, eremuen eta muga-balioen definizioa egin da, non honako aldagai termodinamiko hauek definitu diren: dentsitatea, entalpia, bero espezifikoa, biskositatea, eroankortasun termikoa eta eroankortasun elektrikoa. Azkenik, erradiazio-ereduaren aukeraketa egin da, airearen kasuan bakarria izan dena. Eredu bere osotasunean [9, 12] lanean aurkitu daiteke.



4. irudia. Simulazioetarako etengailuaren geometria eta atalak

Horrela, airea erabiliz lortutako emaitzak 5. irudian ikus daitezke, non plasmaren mugimendua bi aldagaien bitartez adierazi den, korronte-dentsitatea eskala koloredunean, eta temperatura eskala grisean.

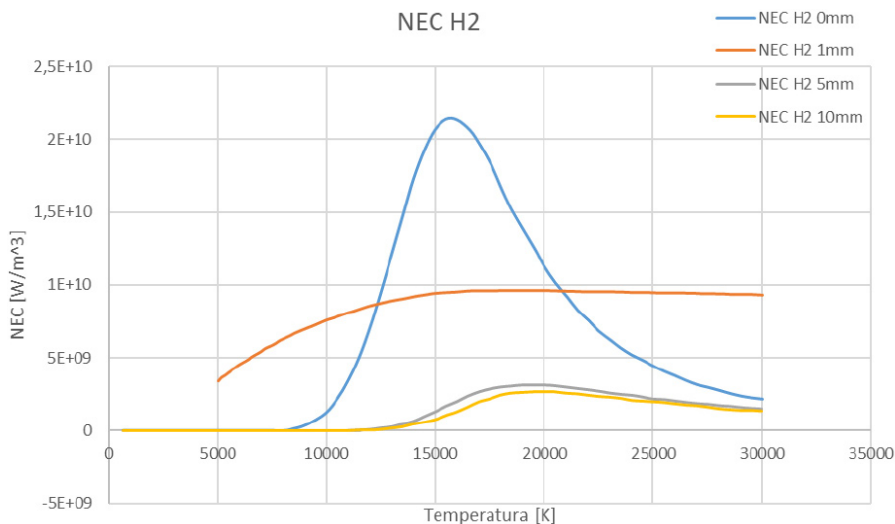


5. irudia. Airea erabilia lortutako emaitzak

Ikusten denez, arku elektrikoak goranzko mugimendua du, ganbarako plaken norabidean. Plaketara 0,35 ms-an ailegatzen da, eta okertzen hasten da. Arku elektrikoak era argi batean amatatzen da eta 0,8 ms igarotzean arku guztiz amatatuta dago. Simulazio hau oinarritzat hartuta, hidrogenoa isolatzaile moduan erabiliz beste zenbait simulazio garatu dira.

4. HIDROGENO EREDUA ETA EMAITZAK

Hidrogenoa erabiltzean, erradiazio-eredu berria ezarri behar da. Lehenengo garatu diren simulazioetan, NEC erradiazio-eredua aukeratu da. NEC kasuaren barruan 4 kasu desberdinu dira, erradiazioa kalkulatzeko erabiltzen diren esfera isotermoen erradioaren menpe: 0 mmkoa, 1 mmkoa, 5 mmkoa eta 10 mmkoa (6. irudian) [13].

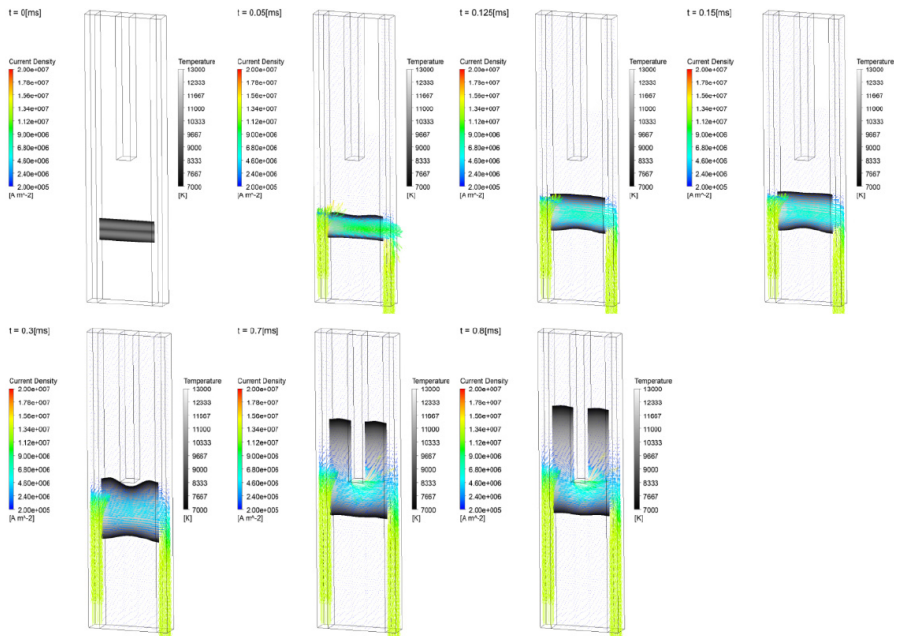


6. irudia. NEC kasurako esfera isotermoen araberako emisio-koefizienteak.

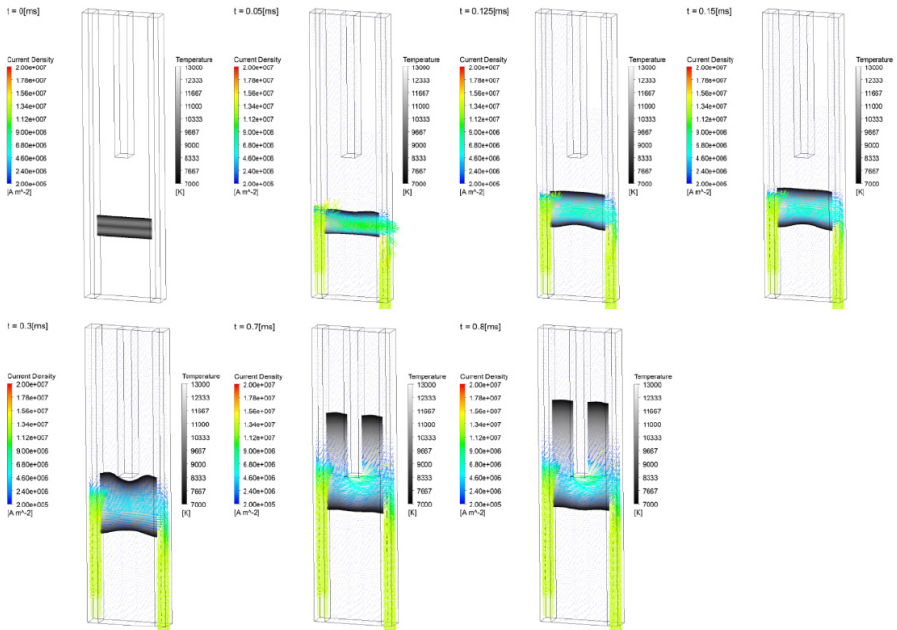
Emaitzak oso antzekoak izan dira kasu desberdinetan, eta 7. irudian 5 mm-ko esfera isotermoetako erradiazio-ereduarekin lortutako emaitzak eta 8. irudian 10 mmko esfera isotermoetako NEC ereduaren emaitzak erakusten dira, non berriz ere arkuaren mugimendua adierazten den korrondentsitatea, koloretan eta tenperaturaren bitartez eskala grisean simulazioaren 0 eta 0,8 ms arteko hainbat momentu ezberdinetarako.

Airearekiko konparatuta, hidrogenoak abantailak eta desabantailak ditu. Alde batetik, arku iraupen luzeagokoa eta handiagoa da, baina beste alde batetik, arkuaren tenperatura baxuagoa da; beraz, aplikazio batzuetarako onuragarria izan daiteke.

Arku Elektriakoaren FVM Bidezko Simulazioa Ibilgailu Elektrikoaren Bateria-tako Hidrogenozko Etengailuetan

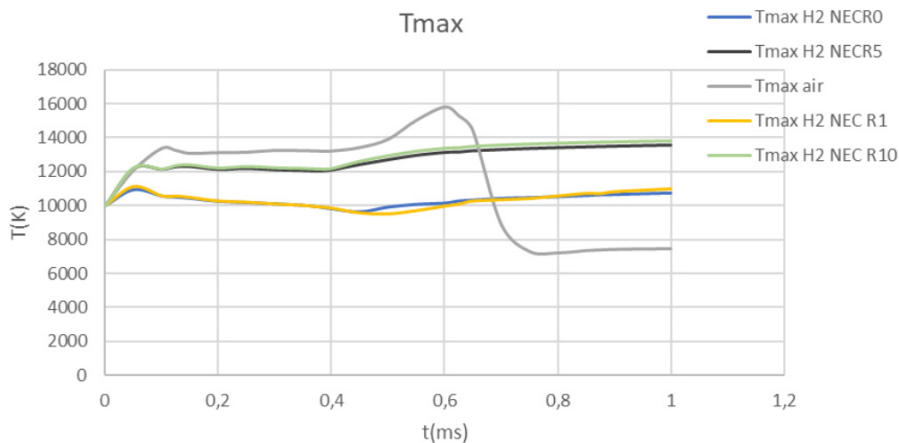


7. irudia. 5 mmko NEC kasuaren emaitzak.

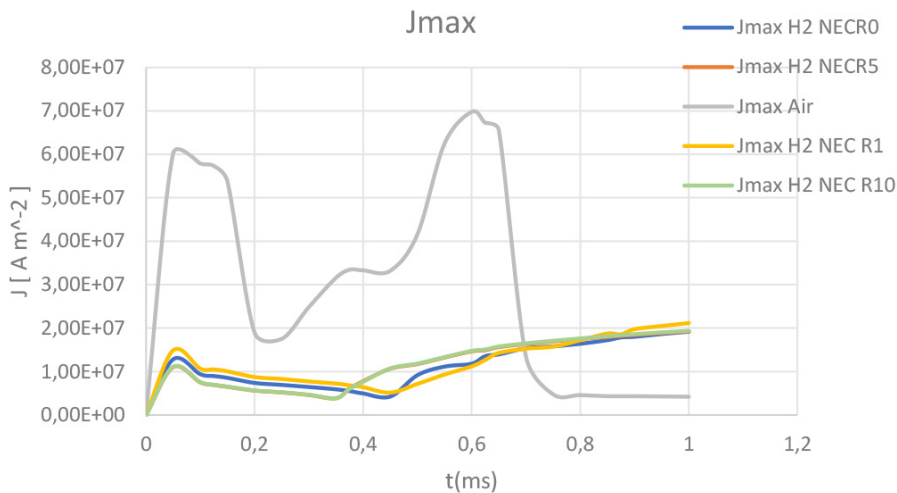


8. irudia. 10 mm-ko NEC kasuaren emaitzak.

Arkuaren efektua bere mugimenduko irudietan aztertzeaz aparte, honako lau aldagai hauen bidez aztertu daiteke: temperatura, korronte-dentsitatea, presioa eta tentsio-erorketa. Hauek dira 9, 10, 11 eta 12 irudietan aurkezten diren emaitzak, hain zuzen ere.



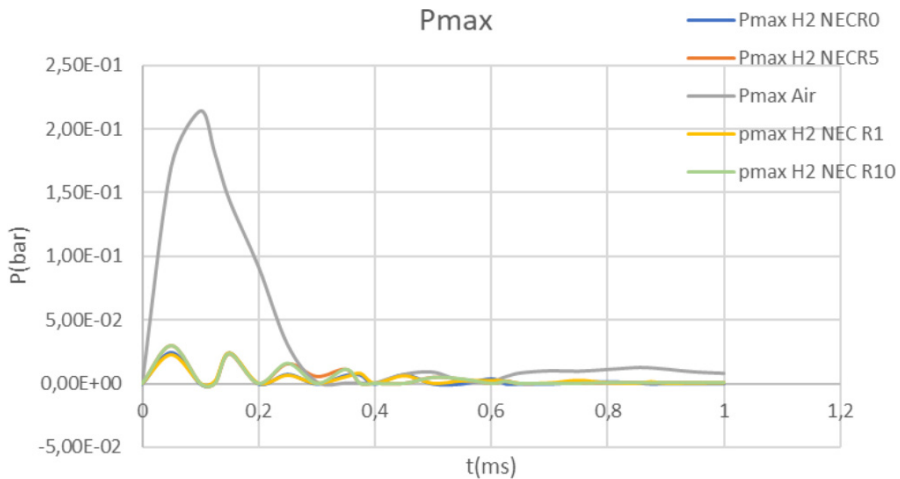
9. irudia. Kasu desberdinen temperatura maximoak.



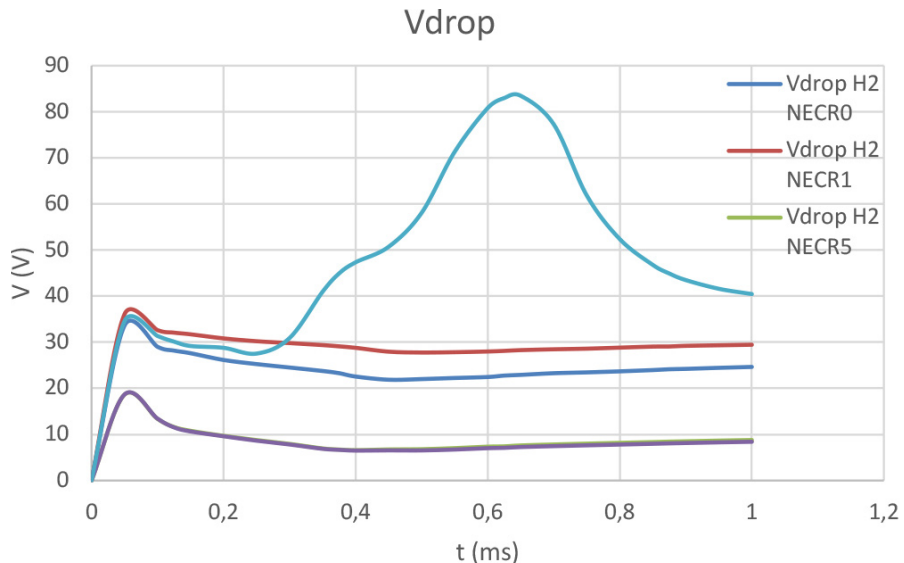
10. irudia. Kasu desberdinen korronte-dentsitate maximoak.

Temperatura (9. irudian) eta korronte-dentsitatearen kasurako (10. irudian) argi ikusten da hidrogenoarekin balio txikiagoak lortzen direla. 0,7 ms-an, aire-ereduan asko jaisten dira bi aldagaiak, momentu horretan

arku elektrikoa amatatzen delako. Erradiazio-ereduak haien artean aldatzen badira emaitzak oso antzekoak dira, nahiz eta desberdintasun txikiak egon. Ezberdintasunak erabilitako koefizienteen kalkulurako erabilitako metodoarengatik dira. Presio maximoa (11. irudia) eta tentsio jautsia (12. irudia) aztertzen badira, antzeko efektuak antzeman daitezke.



11. irudia. Kasu desberdinen presio maximoak.



12. irudia. Kasu desberdinen tentsio-erorketak.

5. ONDORIOAK

Etengailuak gaur egun asko erabiltzen diren gailuak dira, eta oso garrantzitsuak dira, pertsonentzat zein tresneriarentzat, eguneroko bizitzako jardura askotan. Etengailuek korrante elektrikoa eteteko ahalmena dute, baina hori egiterakoan arku elektrikoa sortzen da eta ondorio kaltegarriak izan ditzake. Burututako ikerlanak efektu horiek murriztea du helburutzat, eta atal honetan simulazioak eta kalkuluak egin ostean lortutako ondorioak azalduko dira.

Emaitzetan aurkeztutako irudiek hidrogenoaren erabilera medio moduan, aukeraketa egokia izan dela adierazten dute, zeren eta etengailuen iraupenean eta funtzionamendu egokian eragina duten aldagai guztiak, hala nola, tentsioa, tenperatura eta presioa, airea erabiltzean baino balio egokiagoak izan dituzten. Horrek beste hainbat onura ekar ditzake; adibidez, etengailuen errendimenduaren handitzea eta kostu ekonomikoaren murrizpena. Erradiazioari dagokionez, esfera isotermoen NEC ereduaren 4 datu desberdinekin eraiki dira ereduak, eta batetik bestera ez da aldaketa nabarmenik ikusi. Dena den erradiazio-ereduaren aukeraketak duen garrantziaz jabetuta, lanean aurkeztzen diren beste bi erradiazio-ereduekin simulazioak jorratzea da helburu.

Nahiz eta lan honen bidez etengailuen funtzionamenduan lagungarria izan daitekeen irtenbide bat lortu den, arlo honetan ikerkuntza handia dago egiteko eta aurrerapen handiak lor daitezke. Atal honetan, aukera batzuk bakarrik nabarmenduko badira ere, aukera mugagabeak daude.

Lehenik aipatuko den aukera kanpoko eremu magnetiko baten erabilera da. Beraren bitartez, arkuaren iraupena nabarmen txikitzea lor daiteke; beraz aukera interesgarria izan daiteke, eta gaur egun existitzen lanetatik aparte, arlo horretan sakontzeko aukerak daude. Kanpo-eremu magnetikoak arkuaren luzatuko du Lorentz-en indarrak direla eta, eta galera termikoen handitzea eragingo du hozketa zurrumbilotsuarengatik. Horrek arkuaren tenperatura jaitsiko du, eta jaitsiera horrek plasmaren konduktibitatea txikitzea eta arkuaren tentsioa handitzea ekarriko du. Nahiz eta eragin negatibo batzuk izan, gasen nahasteak eta kanpo eremu magnetikoaren aplikazio onurak ekartzen dituzte aplikazio honetara, kommutazio-denbora txikitzen dutelako eta kommutazioa gertatzen den bitartean pasatzen den korrantea txikitzen dutelako, ekipoa seguruago eta iraunkorragoak lortuz.

Bigarrenik aipatu behar da lan honetan erabilitako etengailuaren geometria hidrogenoaren aplikaziorako desegokia izatea gerta daitekeela. Erabili den geometria airearen simulaziorako diseinatu zen. Beraz, hidrogenoaren eta airearen arteko desberdintasunak kontuan hartuz, gomendagarria izango litzateke etengailu moduan simulazioetarako erabiliko den geometria hidrogenora egokitzea.

Azkenik, etorkizunean jorra daitekeen beste lan-ildo bat gasen nahasketa da. Lan honetan hidrogenoak airearen aldean abantaila batzuk aurkezten dituela ikus daiteke, baina hidrogenoa bakarrik erabiltzeak ez du zertan aukerarik onena izan. Hidrogenoaren eta nitrogenoaren nahasketarekin simulazioak egitea aukera ona izan daiteke arku elektrikoaren efektu ez desiragarriak murrizteko asmoz.

BIBLIOGRAFIA

- [1] EUROPEAN COMMISSION, 2019, «A European Green Deal».
- [2] EUROPEAN COUNTRIES CALL FOR EUROPEAN GREEN DEAL. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/espa%C3%B1a-hace-un-llamamiento-a-la-comisi%C3%B3n-europea-para-que-el-pacto-verde-sea-la-palanca-para-la-recuperaci%C3%B3n-econ%C3%B3mica-de-europa/tcm:30-508602>.
- [3] D. GONZALEZ S. GORTSCHAKOW, S. FRANKE, R. METHLING eta D. UHRLANDT, 2018, «Investigation on vacuum arc dynamics and discharge transition modes under different conditions» *IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. Albuquerque, NM, USA, pp. 216-221.
- [4] D. GONZALEZ, S. GORTSCHAKOW, S. YU, F. WERNER; 2020«Switching Behavior of a Gas-Filled Model DC-Contactor Under Different Conditions», *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. **48**, No. 7, July.
- [5] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, Inc, 2006 «*IEEE recommended practice for applying low voltage circuit breakers used in industrial and commercial power systems*», New York.
- [6] T. BILLOUX, 2013, «*Élaboration d'une base de données radiatives pour des plasmas de type $CwHxOyNz$ et application au transfert radiatif pour des mélanges air, CO_2 Et CO_2-H_2* », Université de Toulouse.
- [7] L. VAN DER SLUIS, 2001, «*Transient in Power Systems*», Chichester: John Wiley & Sons.
- [8] F. YANG *et al.* «Low-voltage circuit breaker arcs—simulation and measurements.» *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. **46**, (27), 2013.
- [9] ARAITZ ITURREGI AIO, «Modelization and Analysis of the Electric Arc in Low Voltage Circuit Breakers.», Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea, 2013.
- [10] M. MODEST, 2013, «*Radiative Heat Transfer*», Academic Press.
- [11] M. BOULOUS, 2013, «*Thermal Plasmas: Fundamentals and Applications*», Springer.
- [12] A. ITURREGI, B. BARBU, E. TORRES, F. BERGER eta I. ZAMORA, 2017, «*Electric Arc in Low-Voltage Circuit Breakers: Experiments and Simulation*.» *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. **45**, no. 1, pp. 113-120.
- [13] P. GUEYE *et al.* «A simplified model for the determination of current-voltage characteristics of a high pressure hydrogen plasma arc.» *J. Appl. Phys.*, vol. **121**, 2017.

