IV. IKERGAZTE

NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

Kongresuko artikulu-bilduma

INGENIARITZA ETA ARKITEKTURA

2021eko ekainaren 9, 10 eta 11
GASTEIZ, EUSKAL HERRIA

ueu

(c) 2021 Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)
Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU), Nafarroako Unibertsitate Publikoa (NUP), Mondragon Unibertsitatea (MU), Deustuko Unibertsitatea (UD), Nafarroako Unibertsitatea (UNAV), Eusko Jaurlaritza, Udalbiltza, Arabako Foru Aldundia eta Vitoria-Gasteizko Udala laguntzaileak izan dira edizio honetan.
(c) Egileak

Editoreak:
Olatz Arbelaitz, Ainhoa Latatu, Miren Josu Omaetxebarria, Blanca Urgell

Artikuluak *Creative Commons* Aitortu-PartekatuBerdin 3.0 lizentziapean daude

ISBNa: 978-84-8438-785-5 Lan osorako
ISBNa: 978-84-8438-788-6 3. liburukia
DOI: https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.2021.03

Harremanetarako: argitalpenak@ueu.eus
UEU. Erribera 14 1 D. 48005 Bilbo. Tel.: 94 679 05 46

INGENIARITZA ETA ARKITEKTURA

Aurkibidea

Hitzaurrea....5

Batzordeak, laguntzaileak eta hizlariak....7

Potentzia prozesamendu partzialean oinarritutako bihurgailuak, *Jon Anzola, Iosu Aizpuru* eta *Asier Arruti*....11

SiC erdieroaleak energia eolikoan LCoEa hobetzeko, *Antxon Arrizabalaga, Mikel Mazuela, June Urkizu* eta *Jon Aztiria*....17

Bidaiari trenek konforta bermatzeko darabiltzaten baloi pneumatikoen azterketa, *Irati Mendia-Garcia, Nere Gil-Negrete, Elisabeth Viles* eta *Ainara Pradera-Mallabiabarrena*....25

Elementu pasiboen eragina frekuentzia altuko bihurgailuetan, *Asier Arruti, Jon Anzola, Iosu Aizpuru* eta *Mikel Mazuela*....33

Robot-aren itxura estetikoak eta erabiltzaileen preferentziak, *Ainhoa Apraiz Iriarte, Ainhoa Aztiria Mendizabal* eta *Ganix Lasa Erle*....41

Instalazio termiko baten modelatze energetikoa, *Arrate Hernández Arizaga, Ana Picallo-Pérez* eta *José María Pedro Sala-Lizarraga*....49

Gibeleko erradioenbolizazioaren CFD simulazioak: odolaren biskositatearen eragina gibeleko hemodinamikan eta mikroesferen distribuzioan, *Unai Lertxundi, Jorge Aramburu, Raúl Antón, José Ignacio Bilbao, Macarena Rodríguez-Fraile* eta *Bruno Sangro*....57

Instalazio termikoen Termoekonomia-diagnostikoa, *Irati Prol Godoy, Ana Picallo Perez* eta *Jose Mª P. Sala Lizarraga*....65

Interferentzia elektromagnetikoaren azterketa potentzia-elektronikako sistemetan Si-WBG trantsizio teknologikoaren testuinguruan, *Javier Oyarzun* eta *Iosu Aizpuru* 73

Industria eolikoko palen efizientzia aerodinamikoaren azterketa esperimentala baldintza ideal eta errealetan, *Ander Zarketa-Astigarraga, Markel Peñalba-Retes, Alain Martin-Mayor* eta *Manex Martinez-Agirre*....81

Diseinuaren ezagutzaren biltzea software artefaktuetan; Produktu Lerroen Ingeniaritzan oinarritutako proposamena, *Xabier Garmendia, Oscar Díaz* eta *Maider Azanza*....91

Fabrikazio aditibo bidezko sare egituren eredu analitikoa zeharkako isotropiarako, *Markel Alaña Olivares, Sergio Ruiz de Galarreta* eta *Aitziber López de Arancibia*....99

Errealitate areagotuko sistema baten diseinu eta balioztatze esperimentala haririk gabeko integrazioarekin, auditoriumetan desgaitasuna pairatzen duten pertsonen esperientzia hobetzeko, *Imanol Picallo, Aida Vidal, Oscar Blanco, Peio Lopez-Iturri, Paula Fraga, Hicham Klaina, Tiago Fernandez, Leyre Azpilicueta* eta *Francisco Falcone*.....107

Aluminioaren emisibitate neurketa zehatzak termografia infragorriarako, *Mireia Sainz Menchón, Iñigo González de Arrieta, Telmo Echániz* eta *Gabriel A. López*.....115

Saskigintza eta Geometriaren arteko lotura Arkitektura Graduko Irakaskuntzan , *Amaia Casado, Antxon Sánchez* eta *Iñigo León*.....123

Eraginkortasun Energetikoaren Ziurtagiriaren kalitatearen azterketa kanpo kontrolerako sistema hobetzeko, *Eider Iribar, Pablo Hernández, Daniel Pérez, Iván Flores* eta *José Maria Sala*.....129

Twitterreko Euskal Komunitatearen Eduki Azterketa Pandemia Garaian, *Joseba Fernandez de Landa, Iker Garcia, Ander Salaberria* eta *Jon Ander Campos*.....137

Hidrogeno tren baten diseinu eta operazioaren optimizazioa, *Josu Olmos, Andoni Saez-de-Ibarra, Dimas Lopez, Txomin Nieva* eta *Iosu Aizpuru*.....145

Itzulpen Automatikoko Sistemen Analisia: Genero Alborapenaren Kasua, *Ander Salaberria, Jon Ander Campos, Iker Garcia* eta *Joseba Fernandez de Landa*.....153

"Data-intensive" aplikazio baten fitxategi kudeaketa aldatzen memoria mugak gainditzeko, *Mikel Iceta Tena, Iñaki Morlán Santacatalina* eta *Jose Antonio Pascual Saiz*.....161

Partizioen konfigurazioaren eragina denbora errealeko sistemen planifikagarritasunean, *Andoni Amurrio*.....169

Zeharkako ebaketa prozesuaren parametroen eragina erresistentzia handiko altzairuzko xafla lodietan, *David Abedul, Lander Galdos, Eneko Saenz de Argandoña* eta *Elena Silvestre*.....177

Abiadura handiko entseguak egiteko forjaketa-mailu baten garapena, *Julen Agirre, Peio Arrese, Nagore Otegi* eta *Lander Galdos*.....185

Eraikuntzan erabiltzen diren CLT panelen kontraijeztuen karakterizaziorako on-line laser profilometro baten proposamena, *Danel Bargiela Mengod* eta *Gaizka Durana Apaolaza*.....193

IKERGAZTE 2021
Nazioarteko Ikerketa Euskaraz
HITZAURREA

Denbora laburrean UEUk 50 urte beteko ditu eta, sortu zenetik, euskal komunitate zientifiko-intelektuala trinkotzea izan da UEUk izan duen helburu garrantzitsuenetako bat. Elkarren berri izatea eta elkarrekin ekitea ezinbestekoa da ezagutzak aurrera egin dezan, are gehiago gure kasuan, ikerketan dihardugun pertsona euskaldunok, gure lanaren parterik handiena atzerriko hizkuntzetan egitera behartuta egonik, elkarren berri izatea zaila denean. Ildo horretatik, UEUk hainbat arlotako aditu, aritu eta ikertzaileak biltzen ditu zenbait ekimenetan hainbat ezagutza-arloren inguruan: Informatikari Euskaldunen Bilkurak (11 edizio), Historialari Euskaldunen Topaketak (5 edizio), Hizkuntzalari Euskaldunen Topaketak (4 edizio), Matematikari Euskaldunen Bilkura (4 edizio), Osasun Zientzietako topaketak (3 edizio) eta Natur Zientzietako ikertzaileen bilkurak (4 edizio), besteak beste, horren adibide argiak dira.

Bilkura horiei guztiei IkerGazte kongresua gehitu zitzaien 2015eko maiatzean. Ikerketa, euskara, gazteak eta diziplinartekotasuna izan ziren bilgune haren osagai nagusiak. Durangon hasitako bideak jarraipena izan zuen 2017an Iruñean eta 2019an Baionan. Aurtengoan Gasteiz dugu topagune, ekainaren 9, 10 eta 11n, Vitoria/Gasteizko Europa Biltzar Jauregian 180 ikertzailetik gora bilduko gara. Laugarren edizio honek erakusten digu 2015ean ziurgabetasun handiz hasitako bideak ikertzaile euskaldunok biltzeko dugun premiak eta beharrak irauten duela. Beste behin ere, ikergazteen eskutik jasotako ekarpen kopuruak IkerGazte behar-beharrezkoa dela ematen digu aditzera.

“IkerGazte2021: Nazioarteko Ikerketa Euskaraz” goiburu duen kongresuaren artikulu-bilduma dugu hau. Izenburu horretan Ikerketa, Euskara eta Gaztetasuna bildu nahi izan ditugu. Ikusgarri egin nahi dugu Euskal Herriko ikertzaile gazteek egiten duten nazioarte mailako ikerketa. Maiz nazioartean erakutsi eta aurkezten dira lan horiek, Euskal Herrian eta euskaraz aurkezteko aukera izan gabe. Kongresu honen helburua komunitate-zientifiko euskalduneko ikertzaileak bildu eta elkarren berri izatea da, arlo guztiak jorratuz; hasi humanitateetatik eta gizarte-zientzietatik, eta zientzia zehatz, natur zientzia, ingeniaritza, arkitektura eta osasun-arloetako gaietaraino. Nazioartean ingelesez argitaratu ohi diren lanak euskaraz ere argitaratzeko eta zabaltzeko aukeraren aldeko apustua da.

Honelako kongresu bat aurrera ateratzeko ezinbestekoa da bai banakoen lan eskerga, baita erakunde publiko eta pribatu ugariren laguntza ere: UEUko lantaldetik hasita, UEUkideak, eta bereziki Arabako kideak, IkerGazteren Batzorde Zientifikoko ikertzaileak, babesleak, laguntzaileak (unibertsitateak, ikerketa-taldeak zein aldizkari zientifikoak) bai eta komunikabideak ere. Bestalde, Gasteizko Udalak eta Udalbiltzak sariak babestu dituzte. Horrez gain, hainbat pertsonak eta komunikabidek erakutsitako atxikimendua ere aipatu nahi dugu. Esker mila guztiei.

Laugarren edizioa du aurtengoan IkerGaztek, eta COVID-19a dela-eta sortutako osasun-krisiari loturik antolatu behar izan dugu. Osasun-neurri zorrotzek baldintzatuta, egitaraua zertxobait moldatu behar izan dugu, aldibereko ekintza paraleloak murriztuz. Hala ere, egitaraua interesgarria eta erakargarria da, arlo guztietako ekarpenak biltzen dituena. Inoiz baino komunikazio gehiago jaso ditugu, 58 ahozko aurkezpen eta 92 poster moduko aurkezpenetan aurkeztuko direnak. Guztira 150 komunikazio.

Hasieran, 163 komunikazio jaso baziren ere, gainbegiratze-prozesua gainditu eta kongresuan parte hartzeko ikertzaileen baieztapena jaso duten 150 lanak daude bilduma honetan.

Jakintza-arloei dagokienez hauek dira zenbakiak:

Giza Zientziak eta Artea	18
Gizarte Zientziak eta Zuzenbidea	39
Zientzia Zehatzak eta Natur Zientziak	42
Ingeniaritza eta Arkitektura	24
Osasun Zientziak	27

Ikertzaileen filiazioari dagokionez, aurreko edizioetako joera mantentzen da. Horrela, bost liburu hauetan jasotako komunikazioetan Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU) da maizen aipatu dena, 74 ekarpenekin. Ondoren Mondragon Unibertsitatea da ugariena, 11 ekarpenekin, aurreko edizioetako ekarpen kopurua bikoiztuz. Nafarroako Unibertsitate Publikoa eta Nafarroako Unibertsitatetik 4na ekarpen jaso ditugu edizio honetan. Deustuko Unibertsitatetik komunikazio bat jaso da. Beste ekarpen batzuk honako unibertsitate hauetatik jaso dira: Bartzelonako Unibertsitate Autonomoa, Bordeleko Unibertsitatea, University of Illinois at Urbana-Chamapaign, Vic-eko Unibertsitatea eta Granadako Unibertsitatea.

Unibertsitateei atxikitako ikerketa-zentroak eta taldeak aipatzen dira ekarpenetako askotan, beherago aipatzen diren ikertalde laguntzaileez gain, honakoak aurki ditzakegu: PIE, UNAV-Cima, UNAV-Tecnun, BioDonostia, BioAraba eta BioCruces Osasun Ikerketa Institutuak, BCMaterials, Polymat, CSIC, Ikerlan, Achucarro Basque Center for Neuroscience edo CIC-energyGUNE agertzen dira besteak beste.

Beste unibertsitate, eragile eta erakundeei dagokienez, hauek dira lankidetzan aipatzen diren beste batzuk: Athletic Club, Suediako Naturhistoriska Riksmuseet, Burgosko Unibertsitatea, AOTECH, Coruñako Unibertsitatea, Vigoko Unibertsitatea, Monterreyko Teknologia eta Goi-mailako Ikasketen Institutua (Mexiko) edo Kopenhageko Unibertsitatea beste batzuen artean.

Urte zaila izan da elkarrekin egitasmoak abiatzeko eta hala ere lortu dugu. Bi urtean behin errepikatzeari eutsiko diogu. Beraz, adi, Ikergazte2023 etorriko da-eta!

Olatz Arbelaitz, Blanca Urgell, Ainhoa Latatu eta Miren Josu Omaetxebarria

BATZORDEAK, LAGUNTZAILEAK ETA HIZLARIAK

Batzorde Zientifikoa

Batzordeburua:	Olatz Arbelaitz (UPV/EHU, UEU) eta Blanca Urgell (UPV/EHU)
Koordinatzailea:	Miren Josu Omaetxebarria (UPV/EHU, UEU)
Idazkaria:	Ainhoa Latatu (UEU)

Giza Zientziak eta Artea

Itziar Aduriz (Bartzelonako Unibertsitatea, UEU)
Agustin Arrieta (UPV/EHU)
Haizea Barcenilla (UPV/EHU)
K. Josu Bijuesca (UD)
Urtzi Etxeberria (CNRS-IKER Euskara eta Euskal Testuen Ikerketa Zentroa)
Aritz Irurtzun (CNRS-IKER, UEU)
Kepa Korta (UPV/EHU)
Elizabete Manterola (UPV/EHU, UEU)
Ismael Manterola (UPV/EHU, UEU)
Blanca Urgell (UPV/EHU)
Eguzki Urteaga (UPV/EHU)

Gizarte Zientziak eta Zuzenbidea

Josu Amezaga (UPV/EHU, UEU)
Amaia Arroyo (MU, UEU)
Aitor Bengoetxea (UPV/EHU, UEU)
Eneko Bidegain (MU, UEU)
Lore Erriondo (UPV/EHU, UEU)
Elixabete Imaz (UPV/EHU)
Mikel Iruskieta (UPV/EHU, UEU)
Xabier Landabidea (UD, UEU)
Libe Mimenza (UPV/EHU, UEU)
Bea Narbaiza (UPV/EHU)
Ixusko Ordeñana (UPV/EHU)
Eneritz Zabaleta (UPPA)

Zientziak eta Natura Zientziak

Noelia Aldai (UPV/EHU)
Arantza Aldezabal (UPV/EHU, UEU)
Estibaliz Apiñaniz (UPV/EHU, UEU)
Arturo Apraiz (UPV/EHU, UEU)
Itziar Aretxaga (INAOE)
Gorka Elordi (UPV/EHU)
Arturo Elosegi (UPV/EHU, UEU)
Nestor Etxebarria (UPV/EHU, UEU)
Kizkitza Insausti (NUP)
Natxo Irigoien (NUP)
Josu Jugo (UPV/EHU, UEU)
Josu Lopez Gazpio (GOI, UEU)
Ane Sarasola (UPV/EHU)
Jone Uria (BCAM)

Ingeniaritza eta Arkitektura

Olatz Arbelaitz (UPV/EHU, UEU)
Gorka Azkune (UPV/EHU)
Ander Goikoetxea (MU)
Enkarni Gomez (UPV/EHU)
Iñigo Lopez Gazpio (UD, UEU)
Jose Miguel Campillo (UPV/EHU, UEU)
Igor Peñalba (UPV/EHU)
Olatz Perez de Viñaspre (UPV/EHU, UEU)
Maialen Sagarna (UPV/EHU)
Arkaitz Zubiaga (University of Warwick)

Osasun Zientziak

Rafael Aldabe (CIMA, UNAV)
Mikel Azkargorta (CIC Biogune)
Nekane Balluerka (UPV/EHU, UEU)
Jose Ramon Bilbao (UPV/EHU, Gurutzetako Ospitalea)
Koldo Callado (UPV/EHU, UEU)
Izaskun Elezgarai (UPV/EHU, UEU)
Iraia Garcia (UPV/EHU)
Xabier Isasi (UPV/EHU, UEU)
Jone Mitxelena (UPV/EHU)
Miren Josu Omaetxebarria (UPV/EHU, UEU)
Nerea Osinalde (UPV/EHU)
Jose Antonio Rodriguez (UPV/EHU)
Izortze Santin (UPV/EHU)

Beste gainbegirale batzuk

Luismi Agirrezabala (UPV/EHU, UEU)
Iñaki Alegria (UPV/EHU, UEU)
Eneritz Anakabe (UPV/EHU, UEU)
Maialen Araolaza (UD, UEU)
Sonia Arrasate (UPV/EHU, UEU)
Unai Atutxa (UPV/EHU)
Eneko Axpe (UPV/EHU)
Jose Luis Ayastuy (UPV/EHU)
Ane Berro (UD)
Ibon Cancio (UPV/EHU, UEU)
Ane Eizagirre (UPV/EHU)
Mari Luz Esteban (UPV/EHU, UEU)
Unai Fernández de Betoño (UPV/EHU, UEU)
Ane Gabilondo (UPV/EHU)
Rakel Gamito Gomez (UPV/EHU, UEU)
Ugutz Garitaonaindia (UPV/EHU)
Jone Miren Hernandez (UPV/EHU)
Karlos Ibarguren Olalde (Osakidetza, UEU)
Amaia Irazusta (UPV/EHU)
Ander Iturriotz (UPV/EHU, UEU)
Maider Iturrondobeitia (UPV/EHU)
Elena Lazkano (UPV/EHU, UEU)

Jose Francisco Lukas (UPV/EHU)
Iñigo Martinez de Alegria (UPV/EHU)
Amaia Nuñez (UPV/EHU)
Fernando Olabarrieta (UPV/EHU, UEU)
Jose A. Pascual (UPV/EHU)
Guiomar Pérez de Nanclares (UPV/EHU)
Luixa Reizabal (UPV/EHU, UEU)
Iratxe Retolaza (UPV/EHU, UEU)
Irantzu Rico (UPV/EHU)
Guadalupe Rivero (UPV/EHU)
Leire Ruiz (UPV/EHU)
Karmele Salaberria (UPV/EHU)
Kepa Sarasola (UPV/EHU, UEU)
Ander Soraluze (UPV/EHU, UEU)
Koldo Telleria (UPV/EHU)
Ekai Txapartegi (UPV/EHU, UEU)
Itziar Txurruka (UPV/EHU)
Imanol Ulacia (UPV/EHU)
Iraultza Unzueta (UPV/EHU)
Iker Villanueva (UD, UEU)
Idoia Zarrazquin (UPV/EHU)
Izaskun Zorita (AZTI, UEU)
Mario Zubiaga (UPV/EHU, UEU)

Batzorde Teknikoa

Ane Sarasua (UEUko idazkari nagusia)
Idoia Torregarai (komunikazio-arduraduna)
Ainhoa Latatu (koordinatzaile akademikoa)
Emilio Delgado (IKT arduraduna)
Ander Altuna (hizkuntza-zuzentzailea)

Ikerketa-talde laguntzaileak

- Catalysis and sustainable polymers ikerketa-taldea (Polymat-UPV/EHU).
- ELEBILAB (UPV/EHUren Elebitasunaren Laborategia)
- Energia biltegiratzeko sistemei buruzko ikerketa-taldea (Mondragon Unibertsitateko Teknologia eta Ingeniaritza alorreko ikerketa-taldea).
- Gaixotasun immuneen genetika funtzionalaren ikerketa-taldea @FunImmune (UPV/EHUko ikerketa-taldea).
- GEZKI Taldea (UPV/EHUko Gizarte Ekonomia eta Zuzenbide Kooperatiboko Institutua)
- IKER Ikerketa Zentroa (Euskara eta Euskal Testuen Ikerketa Zentroa). Ikerketa Zientifikoaren Erakunde Nazionalaren (CNRS), Bordele Montaigne Unibertsitatearen eta Paueko eta Aturri Herrialdeetako Unibertsitatearen (UPPA) gerizpeko ikerketa-gune mistoa (UMR).
- IXA Ikerketa Taldea (UPV/EHUko hizkuntzaren tratamendu automatikoaren inguruko ikerketa-taldea).
- KoLaborategia Ikerketa Taldea (HUHEZI-MUko Gizarte Digitalerako Hezkuntza eta Komunikazioaren Laborategia).
- Materialen ezaugarri termofisikoen ikerketa-taldea (UPV/EHUko ikerketa taldea)
- Minbiziaren biologia molekularraren ikerketa-taldea (UPV/EHUko Genetika, Antropologia Fisikoa eta Animalien Fisiologia Saileko ikerketa-taldea).

- Neuropsikofarmakologia ikerketa-taldea (UPV/EHUko ikerketa-taldea).
- NOR Ikerketa Taldea (UPV/EHUko Ikus-entzunezko Komunikazio eta Publizitate Saileko ikerketa-taldea).
- Parte Hartuz Ikerketa Taldea (UPV/EHUko Gizarte Zientzien esparruko ikerketa-taldea).
- Sinapsi-neuroanatomiaren ultraegitura eta funtziorako laborategia (UPV/EHUko ikerketa-taldea).

Aldizkari zientifiko laguntzaileak

- BAT. Soziolinguistikan eta glotopolitikan espezializatutako aldizkaria.
- EKAIA. Euskal Herriko Unibertsitateko zientzia- eta teknologia-aldizkaria da.
- ELHUYAR ZIENTZIA ETA TEKNOLOGIA aldizkaria.
- GOGOA Euskal Herriko Unibertsitateko Logika, Kognizio, Hizkuntza eta Informaziorako Institutuak (ILCLIk) egindako aldizkaria.
- JAKIN. Giza eta gizarte zientzien alorreko kultur aldizkaria.
- OSAGAIZ. Osasun-zientzien aldizkaria
- SENEZ. EIZIE elkarteak kudeatzen duen itzulpengintzaren arloko aldizkaria.
- TANTAK. Euskal Herriko Unibertsitateko Hezkuntza eta Pedagogiaren arloko aldizkaria.
- UZTARO. UEUk kudeatzen duen giza eta gizarte-zientziei buruzko aldizkaria.

Hizlari gonbidatuak

- Katy Deepwell, Middlesex Unibertsitateko (London) irakasle eta ikertzailea Arte Garaikidearen Teorian eta Kritikan .
- Arantza Diaz de Ilarraza, Euskal Herriko Unibertsitateko Informatika Fakultateko irakasle osoa eta UEUkidea.
- Nuria Oliver, Inteligentzia Artifizialean doktorea (Massachusetts-eko Institutu Teknologikoa, MIT), ELLIS (European Laboratory for Learning and Intelligent Systems) sortzaileetako bat eta bertako lehendakariordea.
- Eneko Axpe, Marie Curie doktoratu osteko ikertzaile bekaduna Stanford University-n, NASA, UPV/EHU.

Mahai-inguruak

- Solasaldia: “Ezagutzaren dibulgazioa, ahalduntzeko tresna”
    - Lorea Agirre. JAKINeko zuzendaria.
    - Uxune Martinez. Euskampus Fundazioaren Kultura Zientifikoko eta Berrikuntza Unitatean, zabalkunde zientifikorako arduraduna. UEUkidea.
    - Ugo Mayor. Ikerbasque Ikerketa Irakaslea UPV/EHUn.
    - Moderatzailea: Idoia Torregarai. Kazetaria eta UEUko komunikazio-arduraduna
- Mahai-ingurua: “K++: Koronabirus osteari buruz esandakoei atzera begirada”
    - Rakel Gamito. UPV/EHUko ikertzaile eta irakaslea. UEUko Pedagogia sailburua.
    - Maite Luengo. Artearen historian graduatua, UPV/EHUren eta Université Bordeaux Montaigneren arteko tutoretza-doktoretza egiten.
    - Anartz Ormaza. Arkitektoa eta hezitzailea da TEO Arkitekturan. UEUko Arkitektura sailburua.
    - Moderatzailea: Xabier Landabidea. Deustuko Unibertsitateko ikertzaile eta irakaslea. Humanitate Digitalen ikerketa-guneko koordinatzailea eta UEUko zuzendaritzako kidea.

Potentzia prozesamendu partzialean oinarritutako bihurgailuak

Anzola, J., Aizpuru, I., Arruti, A.
Mondragon Unibertsitatea
janzola@mondragon.edu

Laburpena

Azken urteotan, ikerketa-ildo askok potentzia-bihurgailuen errendimendua hobetzeko ahaleginak egin dituzte. Testuinguru horretan, literatura zientifikoan ageri den proposamenetako bat potentziaren prozesamendu partziala da. Estrategia hauen helburua potentziako bihurgailuak prozesatu beharreko potentzia murriztea da. Horrela, bihurgailuak sortutako galerak gutxitzen dira, bere tamaina bezalaxe. Hori kontuan hartuta, ikerketa-lan honen helburu nagusiak potentzia prozesamendu partzialaren egungo egoera deskribatzea, haren funtzionamendua ulertzea eta haren abantailak eta desabantailak zehatz-mehatz aztertzea dira.

Hitz gakoak: Potentzia-elektronika, potentzia-prozesamendu partziala, potentzia partzialeko bihurgailuak

Abstract

In recent years, many research lines have made efforts to improve the performance of power converters. In this context, literature proposes strategies based on partial power processing, in which the power to be processed by the converter is reduced. Thus, the losses produced are reduced, as does its size. Taking this into account, the main objective of this research work is to describe the current state of partial power processing, to understand its functioning, and to study its advantages and disadvantages.

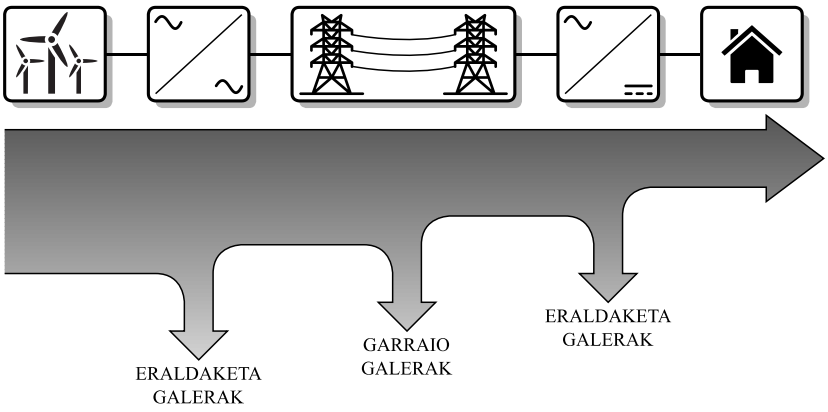
Keywords: Power electronics, Partial power processing, Partial power converters

1. Sarrera

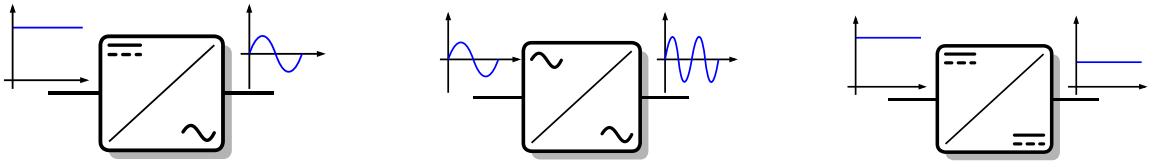
Ekoizpenetik kontsumora, energia hainbat aldiz bihurtzen da, 1. irudia. ikus daitekeen moduan. Ondorioz, kablearen berezko garraio-galerez aparte, energia elektrikoa eraldatzen den bakoitzean, energia galera gehiago sortzen dira. Normalean, energia transformazio hauek transformadore edota potentzia bihurgailuen bidez egiten dira. Sare elektrikoko aplikazioez gain, potentzia bihurgailuak hainbat aplikaziotan erabiltzen dira, hala nola, gailu elektronikoen kargak, ibilgailu elektrikoen karga, etxetresna elektrikoetan… Ondorioz, etorkizun iraunkor bati begira, osagai giltzarri gisa identifikatzen dira.

Potentzia-bihurgailuak sailkatzeko irizpide ezberdin asko daude (osagai kopurua, isolamendu galbanikoa, iturri mota), baina, korrontearen uhin-formari dagokionez, hiru potentzia-bihurgailu mota daude: i) DC-AC edo AC-DC, (ii) AC-AC eta (iii) DC-DC. Lehenengoei dagokionez (2. irudia. A), DC-AC edo AC-DC bihurgailuak (potentzia inbertsoreak edo errektifikadoreak) korronte zuzenetik korronte alternora edo alderantziz aldatzeko beharrezkoa duten aplikazioetan inplementatzen dira. Bigarrenik (2. irudia. B),

1. irudia. Energia elektrikoaren banaketa sistemaren kable bakarreko diagrama sinplifikatua.



2. irudia. A) DC-AC edo AC-DC bihurgailua. B) AC-AC bihurgailua. C) DC-DC bihurgailua.



A) B) C)

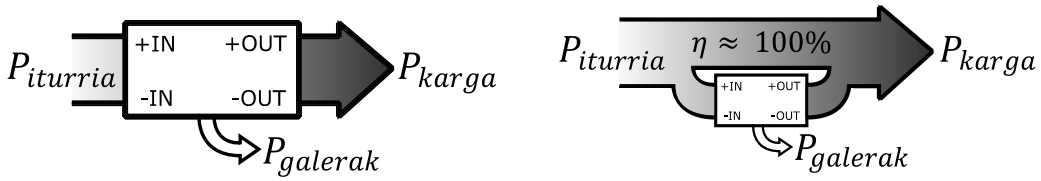
AC-AC bihurgailuak korronte alternoko iturri bat tentsio maila edota frekuentzia batetik bestera bihurtzen dute. Azkenik, DC-DC bihurgailuak daude (2. irudia. C). Honakoek korronte zuzeneko iturria tentsio maila batetik bestera bihurtzen dute.

Lehen aipatu den bezala, potentzia bihurgailuen errendimendua eta tamaina parametro giltzarri bihurtu da. Izan ere, etorkizun energetikoki iraunkorra lortzeko, ikerketa lerro ezberdinak jarraitzen ari dira bihurgailuen potentzia galerak murrizteko, adibidez, semikonduktore teknologia berrien garapena (SiC eta GaN), errendimendu handiko topologiak garatzea (bihurgailu erresonanteak) edo potentzia partzialeko prozesamenduan (PPP) oinarritutako arkitekturak. Azken irtenbide hau da gure ikerketaren aztergai nagusia, DC-DC aplikazioetan zentratuta.

2. Potentzia prozesamendu partzialaren oinarria

Bere izenak adierazten duen bezala, PPP kontzeptuan oinarritutako bihurgailu batek iturri batetik kargara doan potentzia osoaren portzentaje murriztua bakarrik prozesatzen du. Adibide moduan, 3. irudia. -k potentzia prozesamendu totalean (PPT) eta PPP-n oinarritutako bihurgailu baten energia fluxuak erakusten ditu. Alde batetik, 3. irudia. A-n PPT aurkezten den bihurgailua iturritik kargara doan energiaren %100a prozesatzeko diseinatuta dago, galera kopuru jakin bat sortuz. Bestalde, 3. irudia. B-n PPP kontzeptua erakusten da, non bihurgailuak prozesatutako potentzia murrizten den. Hau da, PPP-n oinarritutako bihurgailuak iturritik kargara doan potentziaren zati bat baino ez du prozesatzen. Honela, potentzia bihurgailuak sortutako galerak murriztu egiten dira, baita bere tamaina ere (Zientarski *et al.*, 2018).

3. irudia. Potentzia fluxu diagrama. A) PPT. B) PPP.



A) B)

(1),(2) ekuazioek bihurgailuaren efizientziak sistemaren efizientzian duen eragina deskribatzen dute, PPT eta PPP arkitekturaren arabera. PPP arkitektura batean oso garrantzitsua da bihurgailuaren eta sistemaren arteko tentsio, korronte eta potentzia parametroen arteko ezberdintasuna kontuan hartzea. Horregatik, PPT-ekin ez bezala, PPP arkitektura batean, bihurgailuaren eta sistemaren efizientziak ez dira berdinak.

$$\eta_{sis_{PPT}} = \frac{P_{karga}}{P_{iturria}} = \eta_{bih} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad \textbf{(1)}$$

$$\eta_{sis_{PPP}} = 1 - \frac{P_{in}}{P_{source}} \cdot (1 - \eta_{bih}) = 1 - K_{pr} \cdot (1 - \eta_{bih}) \quad \textbf{(2)}$$

Non, η_{sis} eta η_{bih} sistemaren eta bihurgailuaren efizientziak dira, K_{pr} bihurgailuak prozesatutako potentzia ratioa da (aldagai hau aurrerago sakonduko da) eta P_{in} eta P_{out} bihurgailuaren sarrera eta irteera potentziak dira.

3. Helburuak

Aurrekoa kontuan hartuta, ikerketa honek hurrengo galderari erantzuna ematea hartu du helburutzat:

Posible al da, gaur egungo aplikazio batean PPP-n oinarritutako bihurgailu bat inplementatzea efizientzia, tamaina eta koste emaitzak hobetuz?

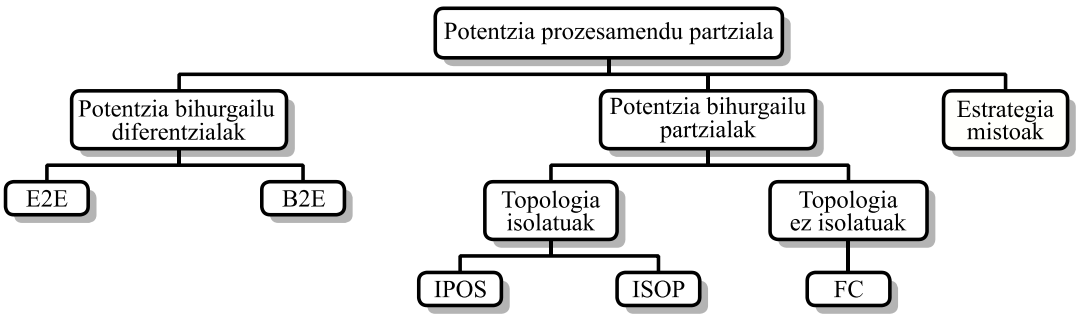
Galdera horri erantzun bat eman ahal izateko, hurrengo pausuak garatuko ditugu. Lehenik eta behin, orain arte PPP-aren inguruan publikatutako ikerketak aztertu eta klasifikatuko dugu. Horrela, PPP estrategia ezberdinak eta hauen aplikazio egokienak zein diren ondorioztatu dezakegu. Bigarrenik, PPP arkitekturek aurkezten dituzten abantailak eta desabantailak aztertuko ditugu. Honen helburua, PPP estrategia bakoitzaren mugak zehaztea eta hobetu beharreko ahulguneak identifikatzea da. Azkenik, eskala txikiko prototipo bat muntatzea proposatzen da. Honen bidez, entsegu ezberdinak garatu daitezke literaturan aurkeztutako emaitzak egiaztatzeko eta ikerketaren lehengo pausuak eman ahal izateko.

4. Ikerketaren muina

Orain arte aurkeztutako literatura aztertu ondoren, hiru PPP estrategia ezberdin identifikatu ditugu (4. irudia.) (Anzola *et al.*, 2020):

1. Potentzia bihurgailu diferentzialak (PBD): seriean konektatuta dauden elementu ezberdinen arteko korronte desorekak zuzendu nahi dituzten potentzia bihurgailuak dira (Shenoy, 2012),(Khan and Xiao, 2017).
2. Potentzia bihurgailu partzialak (PBP): hauen helburu nagusia iturri eta karga baten arteko energia-fluxua, korrontea eta tentsio-maila kontrolatzea da (Zientarski *et al.*, 2015).
3. Estrategia mistoak: errendimendu hobea eskaintzen dute aplikazio zehatzetan, non PBD eta PBP bihurgailuek desabantaila handiak erakusten dituzten (Shousha *et al.*, 2017).

4. irudia. PPP estrategien klasifikazioa.

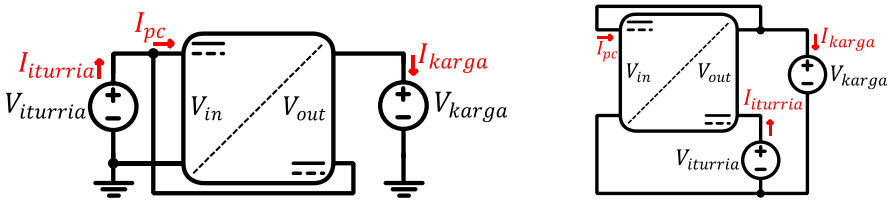


Aurkeztutako PPP estrategien artean, PBP-etan zentratzea erabaki dugu. Izan ere, hauek moldakortasun handiagoa erakusten dute eta ondorioz, beraien aplikazio kopurua nabarmenagoa da (Iyer *et al.*, 2018),(Zientarski *et al.*, 2017): kotxe elektrikoaren karga, energia metatze sistemen inplementazioa, aplikazio fotovoltaikoak, hidrogeno berdearen ekoizpena…

4.1. Potentzia bihurgailu partzialak

Aurretik azaldu dugun bezala, PBP baten helburu nagusia tentsio/korronte maila ezberdineko iturri eta karga baten arteko potentzia fluxua kontrolatzea da. Horretarako, arkitektura ezberdinak proposatu ditugu. 5. irudia. -n aurkezten den bezala, PBP arkitektura baten, bihurgailuaren sarrerako eta irteerako borneak beraien artean konektatzen dira modu ezberdinetan. Alde batetik, 5. irudia. A-n *Input-Parallel-Output-Series* (IPOS) aurkezten da, eta, 5. irudia. B-n berriz, *Input-Series-Output-Parallel* (ISOP).

5. irudia. PBP arkitekturak. A) IPOS. B) ISOP.



A) B)

Bi arkitekturak alderatzeko asmoz, aurretik aurkeztutako aldagaia erabiliko da: bihurgailuak prozesatutako potentzia ratioa, K_{pr}. Horretarako, IPOS arkitektura (5. irudia. A) eredutzat hartuz, Kirchhoffen legeak aplikatu behar dira, (3),(4) ekuazioak lortuz. Bestetik, sistemaren efizientzia eta K_{pr}-a definitzen dira, (5),(6) hurrenez hurren.

$$V_{iturria} + V_{out} = V_{karga} \quad \textbf{(3)}$$

$$I_{iturria} = I_{pc} + I_{karga} \quad \textbf{(4)}$$

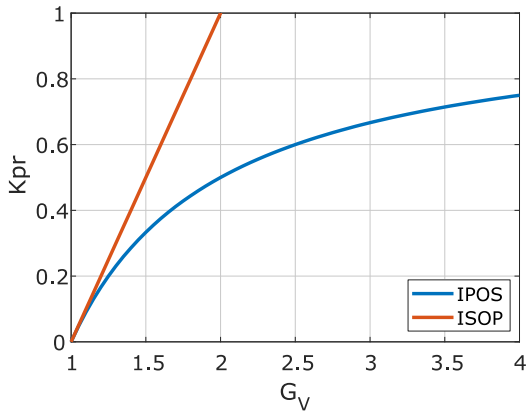
$$\eta_{sis} = \frac{V_{karga} \cdot I_{karga}}{V_{iturria} \cdot I_{iturria}} \quad \textbf{(5)}$$

$$K_{pr} = \frac{P_{bih}}{P_{iturria}} = \frac{V_{out} \cdot I_{karga}}{V_{iturria} \cdot I_{iturria}} \quad \textbf{(6)}$$

Ondoren, (3)-(5) ekuazioak (6)-n aplikatuz, posible da dagokion arkitekturaren K_{pr} kurba tentsio-irabazpenaren $\left(G_V = \frac{V_{karga}}{V_{iturria}}\right)$ eta efizientziaren menpe lortzea (7). Prozedura berdina ISOP-arekin jarraituz, 6. irudia. -n aurkezten ditugun kurbak lortu daitezke.

$$K_{pr} = \eta_{sis} - \frac{\eta_{sis}}{G_V} \quad \textbf{(7)}$$

6. irudia. Bihurgailuak prozesatutako potentzia ratio kurbak.



6. irudia. aztertuz, 2 arkitekturek K_{pr} kurba ezberdinak lortzen dituztela ikusi dezakegu. Izan ere, IPOS-ak edozein tentsio-irabazpen baliorentzako K_{pr} emaitza baxuagoa lortzen du. Ondorioz, IPOS arkitektura bat inplementatuz, bihurgailuak potentzia gutxiago prozesatuko du. Bestetik, $G_V > 1$ denean, ISOP arkitekturak 1 baino handiagoko K_{pr} balioak lortzen ditu. Kasu horretan, PPP eremutik kanpo ari da lanean eta, ondorioz, onura guztiak galtzen dira. Azkenik, esan beharra dago, bai IPOS zein ISOP arkitekturetan, topologia isolatuak behar direla. Bestela, $V_{iturria}$-n zirkuitu laburra sortzeko arriskua dago.

4.2. Desabantailak

Orain arte, PBP-n abantailak baino ez ditugu aurkeztu, baina arkitektura mota hauek ere badituzte kontuan hartu beharreko desabantailak. Lehenik, ez dago PBP-n oinarritutako arkitekturarik iturriaren eta kargaren arteko isolamendu galbanikoa bermatzen duenik. Horregatik, aplikazio zehatz batzuetan soluzio hau onartezina izan daiteke. Bigarrenik,

sistemako parametroekin alderatuta, bihurgailuaren barruko elementuak tentsio-maila baxuetarako diseinatuta daudenez, tentsio-babeseko zirkuitua edo kontrol estrategia bat gehitu behar da hasierako baldintzetarako. Bestetik, PBP baten K_{pr} balioa aplikazioaren tentsio-ganantziarekiko zuzenki proportzionala da. Ondorioz, tentsio salto handiko aplikazioetan PBP arkitekturak desegokiak izan daitezke. Azkenik, PPT batekin alderatuta, PBP arkitektura batean inplementatzen den topologia batek operazio eremu handiago baten egingo du lan (Mahadeva Iyer *et al.*, 2019). Honek, estres handiagoa sor dezake bihurgailuaren osagaietan, bere biziraupena eta errendimendua kaltetuz.

5. Ondorioak

Ikerketa honetan zehar DC-DC aplikazioetarako PPP soluzioen inguruko azterketa garatu da, honako ondorioak lortuz.

Lehenik eta behin, literaturari dagokionez, 3 PPP estrategia ezberdin sailkatu ditugu: PBD, PBP eta mistoak. PBP-etan zentratuta, ekuazio matematikoen bidez, hauek bihurgailuak prozesatu beharreko potentzia kantitatean duten eragina kalkulatu dugu. Horien arten, IPOS arkitektura egokiena dela ondorioztatu dugu . Hala ere, soluzio hauen inplementazioa aplikazio zehatz batzuetara mugatu behar dela ikusi dugu. Zehatzagoa izanda, isolamendu galbanikorik gabeko eta tentsio salto txikiko aplikazioetan.

6. Etorkizunerako ildoak

Honako dokumentuan PBP arkitekturak aurkeztu ditugu baina, hauen barnean inplementatu beharreko topologiak ez ditugu aztertu. Horregatik, autoreek beharrezkoa ikusten dugu topologia ezberdinak arkitektura berean simulatzea eta alderatzea. Horrela, topologia egokiena aurkitzea espero dugu. Bestetik, PBP-en desabantailei dagokionez, erronka desberdinak aurreikusten ditugu, adibidez: hasiera baldintzetarako kontrola eta mutur operazio eremuetarako modulazio berriak. Azkenik, simulazioetan lortutako emaitzak eta ondorioak egiaztatzeko asmoz, eskala txikiko bihurgailu bat montatzeko asmoa dugu.

7. Erreferentziak

Anzola, J. *et al.* (2020) ‘Review of Architectures Based on Partial Power Processing for DC-DC Applications’. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2999062.

Iyer, V. M. *et al.* (2018) ‘Extreme fast charging station architecture for electric vehicles with partial power processing’, *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, 2018-March, pp. 659–665. doi: 10.1109/APEC.2018.8341082.

Khan, O. and Xiao, W. (2017) ‘Review and qualitative analysis of submodule-level distributed power electronic solutions in PV power systems’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, 76(March), pp. 516–528. doi: 10.1016/j.rser.2017.03.073.

Mahadeva Iyer, V. *et al.* (2019) ‘An Approach Towards Extreme Fast Charging Station Power Delivery for Electric Vehicles with Partial Power Processing’, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. IEEE, PP, pp. 1–1. doi: 10.1109/tie.2019.2945264.

Shenoy, P. S. (2012) *Improving Performance , Efficiency , and Reliability of Dc-Dc Conversion Systems By Differential Power Processing*.

Shousha, M. *et al.* (2017) ‘Design and Implementation of Assisting Converter-Based Integrated Battery Management System for Electromobility Applications’, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 6(2), pp. 825–842. doi: 10.1109/JESTPE.2017.2736166.

Zientarski, J. R. R. *et al.* (2015) ‘Understanding the partial power processing concept: A case-study of buck-boost dc/dc series regulator’, in *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference, COBEP/SPEC 2016*. doi: 10.1109/COBEP.2015.7420092.

Zientarski, J. R. R. *et al.* (2017) ‘Series-Connected Partial-Power Converters Applied to PV Systems: A Design Approach Based on Step-Up/Down Voltage Regulation Range’, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(9), pp. 7622–7633. doi: 10.1109/TPEL.2017.2765928.

Zientarski, J. R. R. *et al.* (2018) ‘Evaluation of Power Processing in Series-connected Partial-power Converters’, 6777(c), pp. 1–10. doi: 10.1109/JESTPE.2018.2869370.

SiC erdieroaleak energia eolikoan LCoEa hobetzeko

Arrizabakaga, A., Mazuela, M., Urkizu, J., Aztiria, J.
Mondragon Unibertsitatea
aarrizabalaga@mondragon.edu

Laburpena

Ikerketa honetan energia eolikoa energia berriztagarri nagusi bezala identifikatzen da. Beraren LCoEa (Levelized Cost of Energy ingelesez) hobetzeko, SiC erdieroaleak proposatzen dira, baita tentsio maila eta topologia berriak ere. Konfigurazio ezberdinak aztertzen dira, LCoEa hobetzen duten bi aurkituz. Lehenengoak, gaur egungo SiC-en kostua kontuan izanik bi mailako topologia erabiltzen du, hobekuntza txikia lortuz. Bigarrenean, teknologiaren heldutasunagatik iritsiko den kostu jaitsiera aurre ikusten da, eta hiru mailako NPC (Neutral Point Clamped ingelesez) topologia erabiltzea dela onena ikusten da, LCoE hobekuntza handia lortuz.

Hitz gakoak: SiC, Energia eolikoa, LCoE, NPC.

Abstract

This research identifies the wind energy as the main renewable source. In order to improve its LCoE, SiC semiconductors are proposed, together with different voltage levels and topologies. After analyzing various configurations, two that improve current LCoE are found. The first considers current cost of SiC, and uses a two level topology, achieving little improvement. The second considers the expected cost reduction of SiC due to technological maturity, and it is shown that a three level NPC is the best topology, with higher LCoE improvement.

Keywords: SiC, Wind Energy, LCoE, NPC.

1. Sarrera eta motibazioa

Azken hamarkada hau lurrak bizi izan duen hamarkadarik beroena izan da[1], aldaketa klimatikoaren eraginak agerian utziz. Gainera, mundu mailako energia kontsumoa geroz eta handiagoa da (BP, 2020). Arazo honi aurre egiteko, erakunde ezberdinak plan eta ekintza bereziak aurrera eramaten ari dira[2-3]. Plan hauetan energia berriztagarriak bultzatzen dira, gaur egun beharrezkoa den trantsizio energetikoa bideratuz.

Erakundeen bultzadaren ondorioz, mundu mailan modu berriztagarrian sortzen den energia kopurua handituz joan da azken hamarkada honetan, munduko energia elektrikoaren % 27.3 iturri berriztagarritik datorrena izatera iritsi arte (REN21, 2020). Zehatzago adieraziz, eta energia hidraulikoa alde batera utziz, era berriztagarrian sortu den energiaren % 21.6 energia eolikoa dela ikusi da, eguzkiaren energia fotovoltaikoa % 10.2 delarik. 1. irudian ikusi daitekeen bezala, bi energia mota hauek beste energia berriztagarri guztiak baino energia gehiago sortu dute mundu mailan 2019. urtean. Gainera, beraien hazkundeak dinamika esponentziala adierazten du[4]. Analisi hau burutu ostean, energia eolikoak etorkizuneko gizartean izango duen garrantzia argi ikusten da.

Energia iturrien merkatu lehiakortasuna aztertzen duen metrika Energiaren Kostu Normalizatua da, LCoE ingeleseko siglak erabiliz (Patel *et al.*, 2019). Kalkulu honen estimazioak datu ekonomiko zein teknikoak uztartzen ditu, datu ugariren balioespena egitera behartuz. Erakundeen laguntzei esker, eta baita teknologiak izan duen bilakaera eta hobekuntzen ondorioz, gaur egun energia berriztagarriak ohiko energia iturriekin lehiatzeko moduan aurkitzen dira. Energia eolikoa eta eguzki energia fotovoltaikoa dira gainera gaur egun LCOE hoberena duten energia iturriak (Lazard, 2019). Horrez gain, hobekuntza teknologikoek dakartzaten onurak erabiliz, bi energia

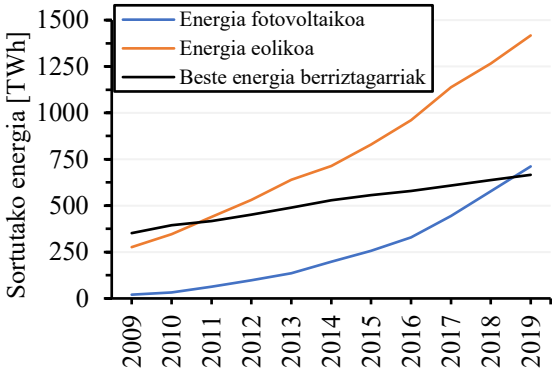
1 The New York Times: 2019 Was the Second-Hottest Year Ever

2 United Nations: the 2030 Agenda for Sustainable Development

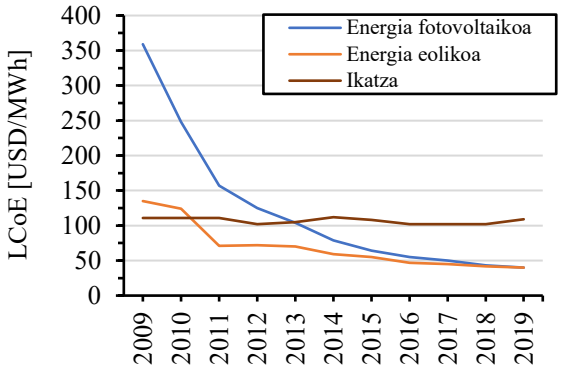
3 European commission: Horizon Europe mission area

4 Our World in Data: Renewable energy

1. irudia: Energia berriztagarrien sorkuntzaren eboluzioa[4].



2. irudia: LCoEaren eboluzioa energia iturri ezberdinentzat (Lazard, 2019).



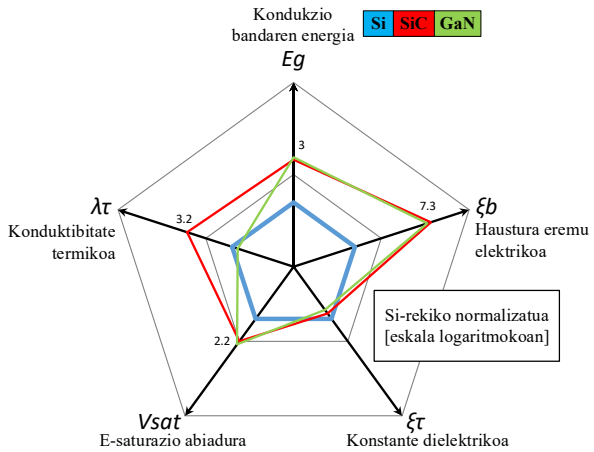
iturri hauek etengabe hobetu dute beraien LCoEa azken hamarkadan, 2. irudian ikusi daitekeen bezala. Ohiko energia iturriek ordea, garapen biderik ezin dute egin, beraz beraien LCoEa hobetu ezinik aurkitzen dira. Fenomeno hau ikatzak adierazten du 2. irudian.

Aurrez aipatutako LCoE hobekuntzaren bila, gaur egun arte energia eoliko fabrikatzaileek beraien produktuaren potentzia handitzearen alde egin dute. Haize turbina komertzialen potentzia laukoiztu egin da 2005 eta 2020 urteen tartean (Yaramasu *et al.*, 2015). Beste bide bat turbinek sorturiko energia sarera bidaltzeko beharrezkoa diren potentzia bihurgailuak hobetzea da. Hori lortzeko orain arte erabili diren siliziozko (Si) erdieroaleak gaur egun garatzen ari diren silizio karburoz (SiC) osaturikoek ordezkatzea proposatu da ikerketa honetan, energia eolikoa bezalako aplikazioentzat egokiak direla ikusi baita, kommutazio frekuentzia baxuetan eta potentzia altuetan (Wilson *et al.*, 2018). Azkenik, tentsio maila berriak, baita topologia eta konfigurazio berriak ikertzea ere proposatzen da, energia eolikorako potentzia bihurgailu lehiakorrena aurkitzeko helburuarekin.

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Ondorengo atalean, SiC teknologian oinarrituriko potentzia altuko erdieroaleen egungo egoera azalduko da, beraien ezaugarri fisikoak eta konponente komertzialak aipatuz. Gainera, beraien erabilera industrial nagusiak errepasatuko dira, energia eolikoa azpimarratuz. Erdieroale hauen erronka nagusiak eta ikerketa honen azken helburuak azalduz amaituko da atala.

3. irudia: Silizioaren (Si), silizio karburoaren (SiC) eta galio nitruroaren (GaN) ezaugarri fisikoak (Williams, 2006).



Ezaugarria	Si	SiC	GaN
E_g [eV]	1.12	3.26	3.45
ξ_b [kV/cm]	300	2200	2000
ξ_τ	11.9	10.1	9.0
V_{sat} [10^7 cm/s]	1	2	2.2
λ_τ [W/cm K]	1.5	4.9	1.3

2.1. SiC-aren ezaugarri fisikoak eta SiC erdieroaleak

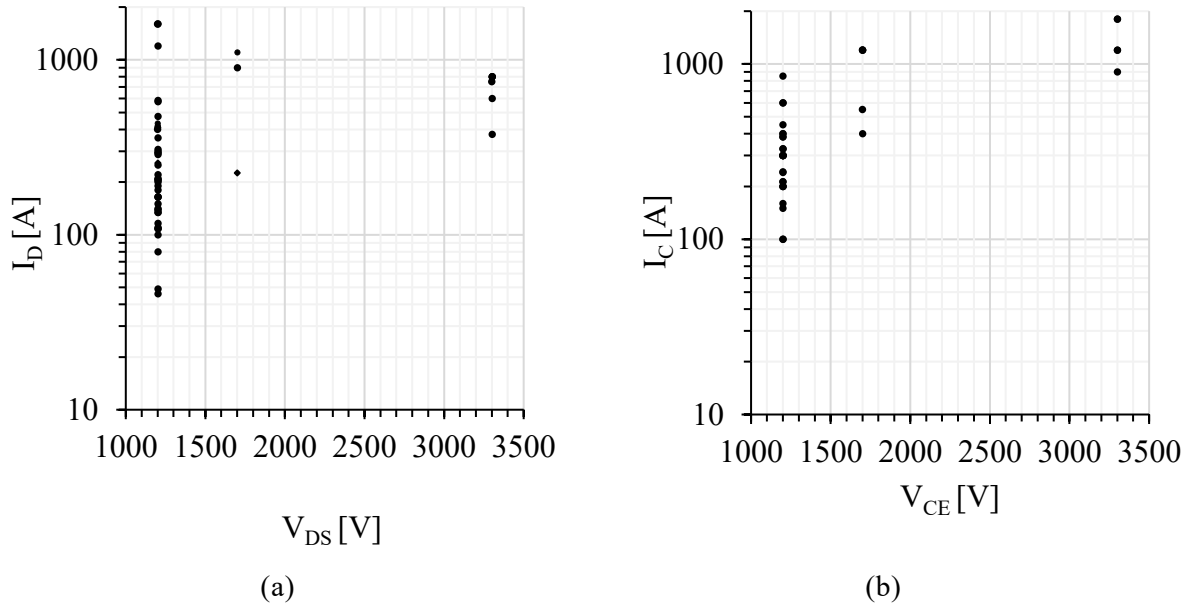
3. irudiak SiC-aren ezaugarri fisikoak Si-arenekin konparatzen ditu. Lehenik, SiC-ak Si-ek baino zazpi aldiz haustura eremu elektriko handiagoa duela ikusi daiteke. Ezaugarri honek erdieroaleen deriba geruza proportzio berean laburtzea ahalbidetzen du, oraindik ere tentsio maila berean lan eginez. Deriba geruza laburragoak kondukzio erresistentzia gutxitzea dakar gainera (Kimoto, 2015).

Bestetik, SiC-ak Si-ek baino hiru aldiz kondukzio bandaren energia gehiago du. Honek, balentzia bandan dagoen elektroi batek elektroi aske bilakatzeko behar duen energia adierazten du (Garrido, 2019). Energia handiagoa izanik, bere ezaugarriak aldatu gabe tenperatura altuagoan lan egin dezake SiC-ak. 3.2 aldiz konduktibitate termiko altuagoa ere badu SiC-ak, nahiz eta oraingoz erdieroaleen kanpo egitura Siliziozkoenaren berdina denez ezaugarri honek ez duen benetako aplikaziorik. Azkenik, SiC-aren elektroien saturazio abiadura Si-arena baino 2.2 aldiz altuagoa da, kondukzio egoera batetik bestera aldatzeko behar duen denbora murriztuz. Azken ezaugarri honek kommutazio galerak gutxitzen laguntzen du.

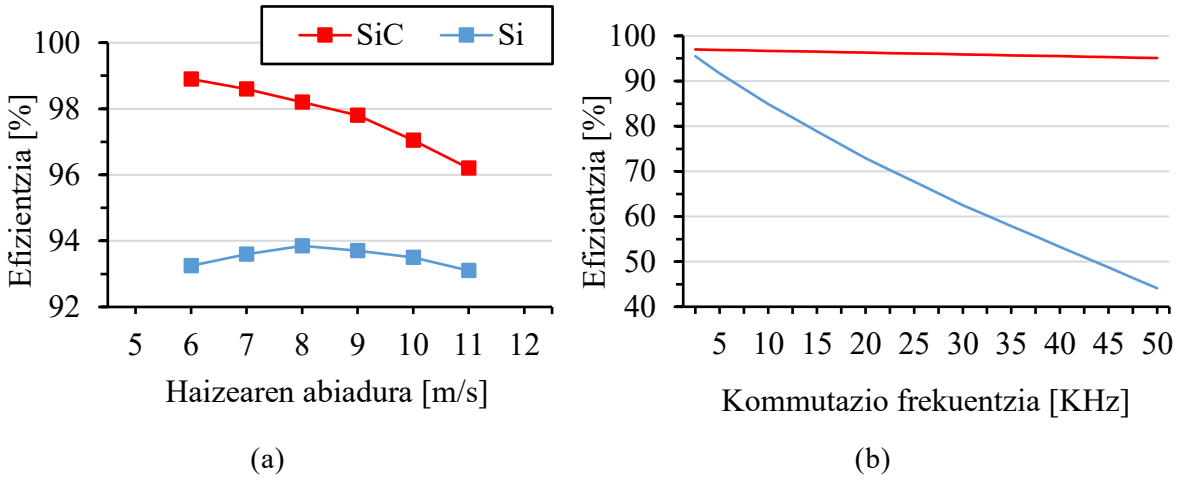
Ezaugarri hauek bi modu ezberdinetan baliatu dira potentzia altuko erdieroaleak sortzeko. Batetik, SiC MOSFETak (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor ingelesez) garatu dira. Bestetik, Siliziozko IGBTei (Insulated Gate Bipolar Transistor ingelesez) SiC diodo bat gehitu zaie paraleloan, kommutazioan dituzten arazoei aurre egiteko. Modulu hauek SiC hibrido bezala ezagutzen dira, eta Si IGBTek baino itzaltze ezaugarri hobeak dituzte, SiC-aren kommutazio ezaugarriak baliatzen dituztelako. 4. irudiak gaur egun merkatuan dauden, edo industria garatzen ari den SiC erdieroaleak erakusten ditu, beraien tentsio maila eta korrontearen arabera.

4. irudian argi ikusten den bezala, merkatuan gehien dagoen produktua 1200 V ko SiC MOSFETa da. Tentsio maila horretako modulu ugari aurki daitezke, hainbat korronte mailarekin, baita fabrikatzaile ezberdinekin ere. SiC hibridoetan ordea, produktuen eskaintza murritzagoa da, eta asko oraindik garapen fasean aurkitzen dira. SiC hibridoa trakzioan soilik erabiltzen den bitartean, 1200 V ko SiC MOSFETak industria askotan erabiltzen hasi dira, hala nola elikadura iturrien potentzia faktore zuzentzailean, ibilgailu elektrikoen karga estazio eta bihurgailuetan, motore elektrikoen elikadura bihurgailuetan, etxe tresna ugaritan, batez ere aire egokituan, eta energia fotovoltaikoan besteak beste. 2020 eta 2022 urteen artean SiC erdieroaleen merkatua % 40 haziko dela estimatzen da, eta merkatu horretako zati handi bat 1200 V ko SiC MOSFETena izango da (Li, 2017).

4. irudia: Merkatuan dauden potentzia altuko SiC erdieroaleak, (a) SiC MOSFETak, (b) SiC hibridoak.



5. irudia: Haize turbinaren potentzia bihurgailuaren efizientzia konparaketa, Si IGBTekin eta SiC MOSFETekin, (a) Haizearen abiadura ezberdinetan eta (b) kommutazio frekuentzia ezberdinetan (Zhang eta Tolbert, 2011).



2.2. SiC-aren erabilera energia eolikoan

Gaur egun, ez da potentzia altuko energia eolikoan SiC-a erabiltzen duen produkturik. Gainera, arlo horretan eginiko ikerketak ere mugatuak dira, denak simulazio bidez eginak izanik. Potentzia osoko bihurgailua erabili ezkero, 5. irudian ikus daitekeen bezala, haizearen abiadura guztietarako efizientzia hobea lortzen da SiC MOSFETak erabiliz, gainera, kommutazio frekuentzia handitzean SiC bihurgailuaren galerak ez dira hainbeste handitzen (Zhang eta Tolbert, 2011). Horrek filtroak txikitzeko aukera zabaltzen du bai potentzia baxuko aplikazioetan (Hussein, 2018; Castellazzi *et al.*, 2019), baita potentzia altuetan ere, % 50 hain zuzen ere, bihurgailu osoaren bolumena % 16 gutxituz (Kortazar *et al.*, 2016), SiC hibridoa erabiliz kasu honetan.

Bihurgailu partzialak erabiltzen dituzten konfigurazioak aztertu ezkero, elikadura bikoitzeko indukzio sorgailua (Doubly Fed Induction Generator, DFIG, ingeleseko siglak erabiliz), gaia hare eta gutxiago tratatu dela ikus daiteke. SiC hibridoarekin efizientzia hobea lor daitekela ikusi da, ikerketa potentzia baxuko aplikaziora mugatu bada ere (He *et al.*, 2014). Azkenik, SiC MOSFETak erabiltzen dituen egoera solidoko transformadorea (Solid State Transformer, SST, ingeleseko siglak erabiliz), garatu da energia eolikorako. Potentzia baxukoa bada ere, hau da aurkitu den SiC teknologia erabiltzen duen, eta energia eolikora bideraturik dagoen prototipo bakarra (She *et al.*, 2013; Gao *et al.*, 2017).

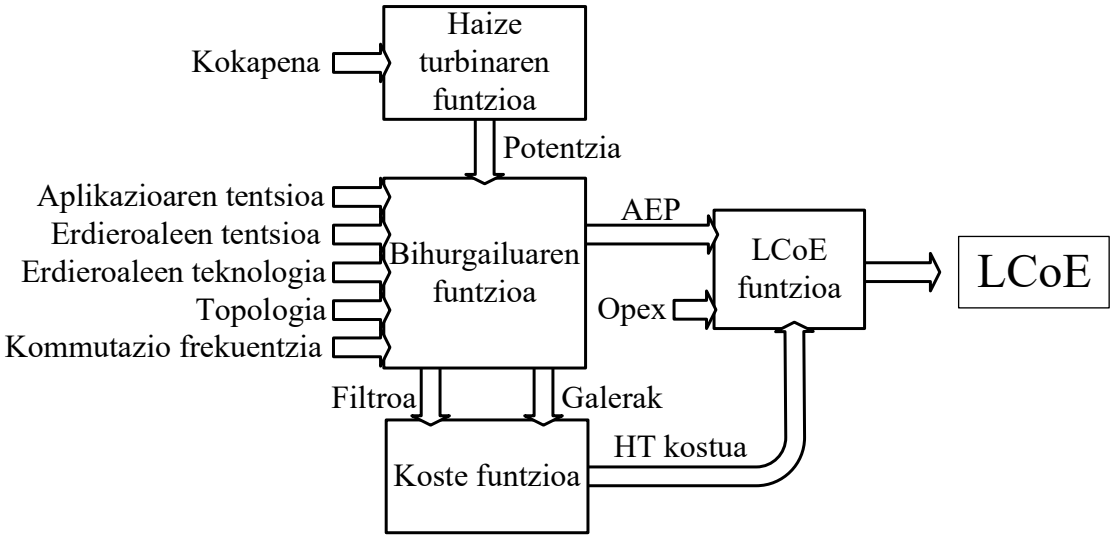
2.3. SiC-aren erronkak

SiC erdieroaleak energia eolikoan erabiliak izateko, erronka nagusi batzuk gainditu behar ditu. Lehena, eta garrantzitsuena, Si erdieroaleekin duen koste diferentzia da. Bihurgailuaren kostuak LCoEan duen inpaktu handia kontsideratuz, SiC erdieroaleen kostua Si-koena baina hiru aldiz handiagoa soilik izan beharko litzateke (Dincan, *et al* , 2020). Gaur egun, erlazio hori 1200 V-ko moduluetan soilik ematen da, 1700 V koa ia seia aldiz handiagoa izanik. Gainera, SiC erdieroaleen dV/dt handiek sor ditzaketen arazoak ere kontuan izan behar dira, sor ditzaketen interferentzia elektromagnetikoengatik (Kim, *et al* , 2018; Bröcker *et al.*, 2020), nahiz eta arazo horiek frekuentzia oso altuetan soilik agertu (Han *et al.*, 2017).

2.4. Ikerketaren helburuak

Ikerketa honen helburu nagusia, energia eolikoaren LCoEa hobetuko duen potentzia bihurgailu baten topologia, erdieroale eta tentsio maila konbinazio egokia aurkitzea da. Horretarako, SiC erdieroaleak erabiltzea proposatzen da, Si-a baina ezaugarri hobeak dituztelako, baita etorkizunean merkaturatze zabala izango dutelako ere. Gainera, etorkizunean konbinazio hori frogatuko duen prototipo bat ere eraikiko da.

6. irudia: LCoE kalkulatzeko programatu den aplikazio berritzailearen eskema.



3. Ikerketaren muina

Aurrez adierazitako helburua lortzeko, energia eolikoaren industria aztertu da, gehien erabiltzen den tentsio maila identifikatzeko. Ondoren, LCoEa kalkulatzen duen aplikazio berritzaile bat programatu da, 6. irudia. Azkenik energia eolikoa hobetzeko aukera gehien dituzten konfigurazioak identifikatu dira, 1. taula.

3.1. SiC-aren beharrezko tentsio maila

Merkatuan dauden produktuak aztertuz, fabrikante gehienek, hala nola GE, Nordex, Senvion, SGRE, Sinovel eta Golwind-ek adibidez, 690 V_{ac} erabiltzen dituztela ikusi da, tentsio altua (12 KV_{ac})erabiltzen duen bakarra Acciona izanik. Tentsio maila horretarako, segurtasun tarte bat mantenduz, eta 0.9 modulazio indizea erabiliz, 1085 V_{dc} behar dira. Bi mailako inbertsorea aukeratu ezkero, 1700 V ko erdieroaleak beharko lirateke. Hiru mailako topologia bat aukeratu ezkero, 1200 V ko moduluekin nahikoa litzateke (Staudt, 2015). Aurkikuntza hau garrantzitsua da, 4. irudian ikus daitekeen bezala, 1200 V SiC MOSFETen merkatua 1700 V koena baina askoz ere zabalagoa baita, beraien kostua murriztuz.

3.2. LCoE kalkulu aplikazioa

LCoEa kalkulatzeko funtzio ezberdinak elkar konektatzen dituen aplikazio berritzaile bat programatu da, 6. irudian ikus daitekeen bezala. Haize turbinaren kokapena finkatu ostean, haizearen abiadura potentzia elektriko bilakatzen du haize turbinaren funtzioak. Aplikazioaren tentsioa, erdieroaleen tentsioa eta teknologia, bihurgailuaren topologia eta kommutazio frekuentzia definitu, eta bihurgailuaren funtzioak, potentzia galerak eta filtroaren ezaugarriak kalkulatzen ditu egun ezagunak diren ekuazio analitikoak erabiliz. Galerak haizeak emandako potentziari kenduz urteko energia produkzioa (AEP) lortzen da. Ondoren, koste funtzioak haize turbinaren kostea kalkulatzen du, operazio gastuei batu eta AEPa kontuan izanik LCoE funtzioak azterturiko konfigurazioaren LCoEa eskuratzen du.

3.3. LCoE kalkulua

1. atalean azaldu da LCoEaren garrantzia eta 2. atalean ikerketa honen helburuak azaldu dira. Energia eolikoaren LCoEa hobetzeko, aztertuko diren konfigurazioena kalkulatu behar da. Horretarako (1) eta (2) ekuazioak erabili dira:

$$LCoE = \frac{HT_{kostua} + Opex}{AEP} \quad (1)$$

$$HT_{kostua} = Mekanika_{kostua} + \cdots + Bihurgailua_{kostua} \quad (2)$$

Ondorengo aldagaiak, $Opex$ funtzionamendu gastu iraunkorrak, AEP urteko energia sorkuntza (Annual Energy Production ingelesezko siglekin), eta HT_{kostua} Haize Turbinaren kostua izanik. HT_{kostua}-ak koste totalak kontsideratzen ditu, baina ikerketa honetan aztertzen diren konfigurazioekin $Bihurgailua_{kostua}$ soilik alda daiteke. Honek, konfigurazio berriek LCoEan duten inpaktua mugatzen du.

3.4. Azterturiko konfigurazioak

Aurrekoa atalean adierazi den bezala, bi eta hiru mailako topologiak kontsideratu dira. Lehengoen abantaila faseko bi modulu soilik behar direla da, baina modulu bakoitzak V_{dc} osoa blokeatu behar du. Hiru mailetakoetan ordea, sei modulu behar dira, baina bakoitzak $V_{dc}/2$ blokeatu behar du, beraz 1200 V koak izan daitezke (Staudt, 2015). Hiru mailan kontsideratu diren bi topologiak NPCa eta ANPCa izan dira (Active Neutral Point Clamped ingelesez). Kommutazio frekuentzia eta tentsio maila igotzearen aukera ere aztertu da, 6. irudian ikusi daitekeen bezala.

Azaldutako aldagaiekin, 3, 5 eta 10 KHz ko kommutazio frekuentziak, 1700 V eta 1200 V ko SiC MOSFETak, 2 maila, 3 maila NPC, 3 maila ANPC topologia, 690 V_{ac} eta 900 V_{ac} tentsio mailen konbinazioak aztertu dira, 6. irudiko aplikazioan programatuz. 900 V_{ac} tentsio maila 1200 V ko moduluak hiru mailako topologian limitera eramanez lorturiko tentsio maila da, bihurgailuaren efizientzia, konponente kopurua eta kableen galera hobetuz (Arrizabalaga *et al.*, 2020).

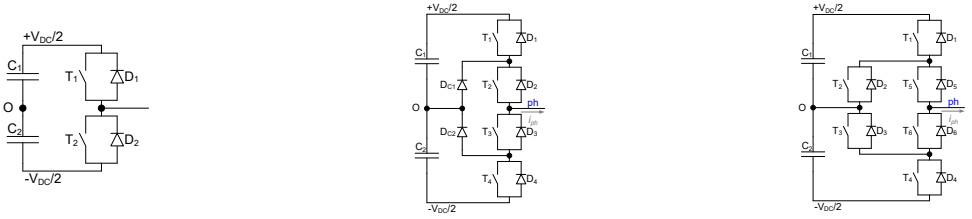
4. Ondorioak

SiC-aren kommutazio ezaugarri hobeek frekuentzia igotzea ahalbidetzen dute. Honek, era berean, irteerako filtroetan eragin positiboa dauka, kostua murriztuz. Hori dela eta azterturiko konbinazio guztiek kommutazio frekuentzia handitzea gomendatzen dute, 10 KHz tara. 1. taulan ikusi daitekeen bezala, gaur egungo SiC MOSFETen kostua handia denez, konponente gutxien erabiltzen dituen konfigurazioa da LCoE hoberena lortzen duena, 690 V_{ac} tentsio mailarekin eta 1700 V ko moduluak erabiliz, egungo turbina eolikoena % 0.07 hobetuz.

SiC MOSFETen kostua % 50 gutxitu zen 2012 eta 2015 urteen tartean eta joera horrek jarraipena izatea espero da (Eden, 2013; Kyriakidis, *et al* , 2018). Hori dela eta, etorkizuneko egoera ere aztertu da, SiC MOSFETen kostua % 50 gutxituz. Kasu honetan, 3 mailako NPC topologia, 1200 V ko moduluekin, 900 V_{ac} tentsio mailan eta 10 kHz ko frekuentzian da LCoE onena lortzen duen konfigurazioa, egungo balioa % 0.51 hobetuz.

Azpimarragarria da koste gutxitze hau arinago gertatuko dela 1200 V ko SiC MOSFETentzat, merkatu zabalagoa bai dute. Gainera, konfigurazio honek izango lukeen LCoE hobekuntza kontuan hartzeko modukoa da, energia eolikoan inpaktu esanguratsua izanez. Ondorioz, etorkizunean SiC teknologiak energia eolikoan izan dezakeen garrantzia ikusi da, batez ere hiru mailako topologiak erabiliz, eta 900 V_{ac} tentsio mailan; erdieroaleen tentsio maila osoa egoki erabili ahal izateko, 1. taulako bigarren aukerak adierazten duen bezala. Gaur egun horrelako produkturik ez dagoenez, sektoreko industriak norabide honetan lan egin behar duela argi geratu da. 1. taulan bi konfigurazio egokienak laburbiltzen dira.

7. irudia: Aztertu diren topologiak, (a) bi maila, (b) 3 maila NPC eta (c) 3 maila ANPC.



(a) (b) (c)

1. taula: LCoE onena lortu duten konfigurazioen laburpena.

SiC-en kostea [%]	Frekuentzia [KHz]	Tentsio maila [V_{ac}]	Topologia	Moduluen tentsioa [V]	Δ LCOE [%]
100	10	690	2 maila	1700	-0.07
50	10	900	3 maila NPC	1200	-0.51

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Ondorioetan azaldu da etorkizunean SiC teknologiak energia eolikoan izan dezakeen eragina. Baina ikerketa honetan ikusi denez, orain arte ez dago aplikazio honetarako teknologia hau erabiltzen duen prototiporik. Gainera, potentzia altuan hiru mailako topologiarik ere ez da orain arte erabiltzen energia eolikoan. Hori dela eta, eta ikerketa honen ondorioak jarraituz, prototipo ezberdinak eraikitzea erabaki da. Prototipo hauek Si eta SiC teknologiak konparatuko dituzte, baita 2 mailako eta hiru mailako topologiak ere, beraien potentzia maximoa 125 kVA koa izanik. Neurketa ezberdinak eginez, galerak bezalako parametroak konparatuko dira 6. irudian erakutsi den programaturiko aplikazioak eman dituen emaitzekin, bertan erabiltzen diren funtzioen zuzentasuna aztertu ahal izateko.

Gainera, prototipo hauekin SiC teknologiak energia eolikoan aplikaturik izan ditzakeen abantailak eta arazoak identifikatzea espero da. Aurreikusitako funtzionamendua izan ezkero, ikerketa hau frogatua geratuko litzateke, etorkizuneko energia eolikorako bihurgailuek jarraitu behar duten bidea erakutsiz.

6. Erreferentziak

Arrizabalaga, A. *et al.* (2020) 'System Level Optimization of 5 MW Wind Converter using 3L-NPC Topology in Medium Voltage with 1 . 7 kV IGBT', in *46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IES), IECON*.

BP (2020) *Statistical Review of World Energy 2020*. Available at: https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf.

Bröcker, F. *et al.* (2020) 'Analysis of power losses within a sic-mosfet-inverter with passive dv=dt-damping network for reduced voltage slopes at inductive loads', *PCIM Europe Conference Proceedings*, 1(July), pp. 1753–1758.

Castellazzi, A. *et al.* (2019) 'Impact of wide-bandgap technology on renewable energy and smart-grid power conversion applications including storage', *Energies*, 12(23), pp. 1–14. doi: 10.3390/en12234462.

Dincan, C., Kjær, P. and Helle, L. (2020) 'Cost of energy assessment of wind turbine configurations', in, pp. 1–8.

Eden, R. (2013) 'Market forecasts for silicon carbide & gallium nitride power semiconductors. The World Market for Silicon Carbide & Gallium Nitride Power Semiconductors'.

Gao, R. *et al.* (2017) 'Solid-State-Transformer-Interfaced Permanent Magnet Wind Turbine Distributed Generation System with Power Management Functions', *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(4), pp. 3849–3861. doi: 10.1109/TIA.2017.2679679.

Garrido, D. (2019) *Impacto de los semiconductores de banda ancha prohibida en el diseño de convertidores de potencia*. Mondragon Unibertsitatea.

Han, D. *et al.* (2017) 'Comparative Analysis on Conducted CM EMI Emission of Motor Drives: WBG Versus Si Devices', *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(10), pp. 8353–8363. doi: 10.1109/TIE.2017.2681968.

He, J. *et al.* (2014) 'Application of wide bandgap devices in renewable energy systems - Benefits and challenges', in *3rd International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2014*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 749–754. doi: 10.1109/ICRERA.2014.7016485.

Hussein, A. S. (2018) *SiC-Based Power Electronics for Wind Energy Applications*. University of Nottingham.

Kim, J., Shin, D. and Sul, S. K. (2018) 'A Damping Scheme for Switching Ringing of Full SiC MOSFET by Air Core PCB Circuit', *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(6), pp. 4605–4615. doi: 10.1109/TPEL.2017.2731861.

Kimoto, T. (2015) 'Material science and device physics in SiC technology for high-voltage power devices', *Japanese Journal of Applied Physics*, 54(4). doi: 10.7567/JJAP.54.040103.

Kortazar, I., Larrazabal, I. and Friedrichs, P. (2016) 'Analysis of hybrid modules with Silicon Carbide diodes, comparison with full silicon devices and the impact in Wind applications', in *2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2016 ECCE Europe*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi: 10.1109/EPE.2016.7695491.

Kyriakidis, A., Miracle, D. M. and Shisha, S. (2018) *Performance Evaluation of SiC Power MOSFETs for Hybrid & Electric Vehicle DC-DC Converters*. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona.

Lazard (2019) 'Lazard'S Levelized Cost of Energy Analysis Version 13.0', *Lazard.com*, 11(November), pp. 1–21.

Li, H. (2017) *SiC technologies adoption is going to accelerate with a tipping point in 2019 - power SiC 2017: materials, Devices, Modules, and Applications report, Tech. rep.*

Patel, M. T. *et al.* (2019) 'LCOE∗: Re-thinking LCOE for Photovoltaic Systems', *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 1711–1713. doi: 10.1109/PVSC40753.2019.8980486.

REN21 (2020) *Renewables 2020 Global status report*. Available at: https://abdn.pure.elsevier.com/en/en/researchoutput/ren21(5d1212f6-d863-45f7-8979-5f68a61e380e).html.

She, X. *et al.* (2013) 'Wind energy system with integrated functions of active power transfer, reactive power compensation, and voltage conversion', *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(10), pp. 4512–4524. doi: 10.1109/TIE.2012.2216245.

Staudt, I. (2015) *3L NPC & TNPC Topology*, *Semikron*. doi: 10.1049/iet-pel.

Williams, B. W. (2006) *Principles of Power electronics*. Glasgow: Barry W. Williams.

Wilson, P. R. *et al.* (2018) *IEEE ITRW: International Technology Roadmap for Wide-Bandgap Power Semiconductors: An Overview*, *IEEE Power Electronics Magazine*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi: 10.1109/MPEL.2018.2821938.

Yaramasu, V. *et al.* (2015) 'High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies', *Proceedings of the IEEE*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 740–788. doi: 10.1109/JPROC.2014.2378692.

Zhang, H. and Tolbert, L. M. (2011) 'Efficiency Impact of Silicon Carbide Power Electronics for Modern Wind Turbine Full Scale Frequency Converter', *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 58(1). doi: 10.1109/TIE.2010.2048292.

Bidaiari trenek konforta bermatzeko darabiltzaten baloi pneumatikoen azterketa

Mendia-Garcia, I.[1], Gil-Negrete, N.[1,3], Viles, E.[2], Pradera-Mallabiabarrena, A.[1]

[1] Tecnun, Mekanika eta Materialen saila, Nafarroako Unibertsitatea, Donostia
[2] Tecnun, Industria Antolakuntza saila, Nafarroako Unibertsitatea, Donostia
[3] CEIT-IK4 Technology Center, Division of Transport and Energy, Donostia

imendia@tecnun.es

Laburpena

Ikerketa lan honek trenetan erabili ohi diren baloi pneumatikoen eraikitze parametroek esekiduraren portaeran duten eragina ebaluatzea eta diseinua errazteko jarraibide batzuk proposatzea du helburu. Horretarako, ordenagailuz bideratutako esperimentazio diseinuan (CADE) oinarrituz esekidura sistemaren eraikitze parametroek zurruntasun estatiko bertikal zein horizontalean izan dezaketen eragin zuzen, koadratiko zein elkarrekintza aztertu da. Esperimentazio diseinua kuboaren aurpegietan zentraturiko metodoan funtsatu da eta datuak elementu finituetan (FEM) oinarrituriko software batean gauzatutako simulazioetatik lortu dira. Ikerketak, baloi pneumatikoen ezagutza areagotzeaz gain diseinu gida interesgarri baten eratorriera bultzatu du, etorkizuneko trenen esekiduren diseinuan eta optimizazioan lagungarri izan daitekeelakoan.

Hitz gakoak: trenen esekidura, baloi pneumatikoa, ordenagailuz lagunduriko esperimentazio diseinua, FEM

Abstract

An assesment and design guideline of the air spring employed in the passenger rail vehicles is performed. Based on a Computer Aided Design of Experiments (CADE) the linear, quadratic and interaction influence of the construction parameters of the bellow in the vertical and lateral static stiffness are analysed in the present reseach project. A faced-centered cube design is used in the experimentation. The data were obtained conducting computer simulations using finite element design techniques. It enables better understanding on how these valiables affect the performance of the air spring and therefore the comfort of the railway vehicle. It will be very useful tool for the suspension design purposes.

Keywords: *railway suspension, air spring, Computer Aided Design of Experiments, FEM*

1. Sarrera eta motibazioa

Duela mende bat arte, zaldiez tiratutako bagoiak garraio baliabide urrienetarikoak ziren, motelak eta deserosoak izateagatik ezagunak. Autoen sorrerarekin bat garraio ibilgailuen betebeharrak aldatu egin ziren, azkartasuna eta erosotasuna ziren helburu. Egun, toki batetik bestera garraiatuak izateaz gain, joan-etorriak irauten duen denboran bestelako ekintzak egin ahal izatea funtsezko ataza izatera heldu da. Bidaiariek autoan jan, irakurri, idatzi edota lan egitea ahalbidetzeko, ibilgailuek, esekidura elementuak daramatzate.

Trenen kasuan adibidez, bogie eta bidaiarien kaxaren artean bi baloi pneumatiko kokatzen dira, hauek kanpo bibrazioen igorpena eteteko jarriak dira (Iwnicki, 2020). Pasa-ez pasa filtro baxu gisa dihardute, maiztasun baxuko uhinak pasaraziz eta altuak leunduz. Gizakiok 4-8 Hz bitarteko bibrazioei sentikortasun handia diegu, azken finean organoek (birikak, bihotza, burmuina eta hesteak esaterako) maiztasun natural balio horiek dauzkate (ISO, 2014).

Baloi pneumatikoa elementu konplexua da, material konposatuz osaturiko elementu mekaniko bat da zeina presio jakin batekin betetzearen ondorioz bibrazioak xurgatzeko gai dena. Esekidura elementu honen material konposatuaren eraikuntzak suspentsioaren eraginkortasunean duen eragina nabarmena dela jakin arren, zerk eta nola eragiten duenaren ezagutza urria da (Mendia-Garcia *et al.*, 2020a). Ondorioz, ikerketa lan honen motibazioa horixe bera da, eragin horri nolabait mugak jartzen ahalegintzea.

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Zurrun bigunaren aurkako adjektiboa da, gorputz batean tentsioa aplikatuz gero honek deformatzeko duen gaitasunari egiten dio erreferentzia: zurruna bada deformaezina da eta biguna bada deformagarria. Esekidura elementuetan oreka bat topatu beharra dago; baloi pneumatikoa zurrunegia bada bibrazio guztiak bidaiarion kaxara pasaraziko lituzke, aldiz bigunegia izanda ibilgailuak gora-behera asko izango lituzke, segurtasuna ere arriskuan jarriaz. Horra hor gakoa.

Baloi pneumatikoaren berezitasun nagusia diafragma osatzen duten materialetan datza. Material konposatu bat da, non aztergai den kasuan kautxu naturalezko matrize bat nylonezko zuntzekin irmotua dagoen. Elastomeroak luzatu ondoren jatorrizko forma berreskuratzeko duten gaitasunarengatik ezagunak dira, nylonezko zuntz sintetikoak berriz malgutasun mugatuagoa duten arren, sendoak dira. Batasunari darraio indarra lelopean, bi materialak elkarlanean arituz gero sortutako material konposatuak aplikaziorako ezaugarri aproposak izango ditu: matrizeak kargak banatuz euskarri gisa dihardu eta zuntzek kargak jasanez baloi forma bermatzen dihardute.

Badira zenbait artikulu, zuntzen aldaera ezberdinek esekidura elementuan izan dezaketen eragina aztertu dutela. Denek elementu finituetan oinarritutako eredu bat dute euskarri (gehiengoek ABAQUS edo ANSYS) eta zuntzen eraikitze parametro bati balio ezberdinak emanez (gehienek zuntzen angeluari), honek emaitzan duen eraginaren joera erakusten dute (fibrak bertikalago kokatuta erradialki baloia bigundu egiten dela). Ez dute metodologia zehatz bat jarraitzen eta gutxi batzuk bakarrik aztertu dute trenetan erabili ohi diren baloiak (Lee *et al*., 2003), eta are gutxiagok portaera bertikal naiz horizontala (Mendia-Garcia *et al.*, 2020b). Aztergai den aplikazioko baloiak errepideko ibilgailuetan edota makina erramintetan erabili ohi diren baloiengandik ezberdinak dira, batez ere kanpo geometrian bereizten dira.

Yan Wei-min *et al.* (2004) eta Wenku *et al.*(2009) ikerlariek errepideko kotxe bateko baloi pneumatikoan zuntzen angeluak, diametroak eta geruza kopuruak indar-desplazamendu erlazio bertikalean duten eragina aztertu dute. Li *et al.* (2009) autoreek ere autoetan erabili ohi diren baloien zuntzen orientazioaren eragin bertikala analizatu dute. Tang *et al.* ikerlariek (2011) baloi laukizuzen baten norantza horizontalean irmotze materialak (angeluak, zuntzen arteko distantziak eta geruza kopuruak) duen eragina aztertu dute.

Ljubljana unibertsitateko ikerlariek pistoidun baloi pneumatikoaren egitura parametroek elementuaren baliobizitzan duten eragina aztertu dute. 2013. urtean (Oman eta Nagode) zuntzen angeluak eta 2019. urtean (Bešter *et al.*) karga aplikatzeko lau era ezberdinek eta baloiaren eraikitze bi parametrok (zuntzen angelua eta baloiaren diametroa) duten garrantzia, hain zuzen ere. Azken honetan, *Taguchi metodo estatistikoa* aplikatu dute.

Gure ikerketa taldeak makina erramintetan erabili ohi diren lobulu bakarreko baloi pneumatikoetan zuntzen angeluak, diametroak eta euren arteko distantziak maiztasun naturaletan eta zurruntasun bertikalean (Gil-Negrete *et al.*, 2018) nahiz horizontalean (Mendia-Garcia *et al*., 2019) duten eragina aztertu zuen. Egun, trenen esekiduran erabiltzen diren elementuak aztertzera salto egin dugu eta angeluak zurruntasun bertikal zein horizontalean eta eredu mekanikoen parametroetan duten eragina aztertu eta azaldu dugu (Mendia-Garcia *et al.*, 2020b).

Parametroen eragina metodologia zehatz bat erabili gabe aztertuz gero, uneko aztergai den elementuaren informazioa lor daiteke, baina estatistikako datuen analisirako erramintaz baliatuta, ezagutza hori are eta gehiago zabal daiteke; parametro bakarrak ez ezik elkarren arteko interakzioak ere aztertu daitezke. Hortaz gain, joerak ikusi eta kuantifikatu daitezke. Horregatik, produktuen diseinu eta optimizazioan geroz eta erabiliagoak dira, baloi pneumatiko (Bešter *et al.*, 2019) edo nylon eta kautxuzko paketatzaileetan (Zhang *et al.*,) esaterako.

Ikerketa lan honetan, baloi pneumatikoaren diafragmako material konposatuaren diseinu eraginkorrenean eragina izan dezaketen faktoreak topatu eta kuantifikatu nahi dira. Horretarako kautxu naturalaren eta nylon sintetikoaren gogortasun ezberdinak nahiz geometria desberdinak (lodiera, zuntzen diametroa, angelua eta kokapenak esate baterako) alderatu dira. Horretarako, ordenagailuz lagunduriko esperimentazio diseinuaz baliaturik eta *estatistikako kuboaren aurpegietan zentraturiko metodoa*-n oinarrituz, metodologia oso bat garatu da.

3. Ikerketaren muina

3.1. Ikerketaren deskribapena

Baloi pneumatikoaren FEM (finite element method) simulazio eredu sinplifikatu bat garatu da. Eredu honek, materialaren parametro eta propietateen arabera, esekidura elementuaren portaeraren analisi azkarra egitea ahalbidetu du. Ereduaren konplexutasun maila material konposatuak (zuntzez irmoturiko elastomeroa) eta fisika ezberdinak (airez beteriko baloia) eredu berean aztertzean datza, honek dakarren karga konputazional handiarekin.

Ordenagailuz lagunduriko diseinuen funtsa, aztergai dauden parametroen konbinaketa ezberdinen emaitzak elkar alderatzean datza. Konbinaketa kopurua hautatutako datuen eta metodoaren araberakoa izango da, gurean 273 guztira. Esperimentalki eginez gero, konbinazio bakoitzerako baloi berri bat fabrikatu eta esperimentatu beharko litzateke. Hori ekiditeko, baloi pneumatiko jakin baten biki birtuala eraikiz eta balioztatuz, konbinaketa bakoitzerako simulazio bana gauzatzea aukera egokia izan ohi da.

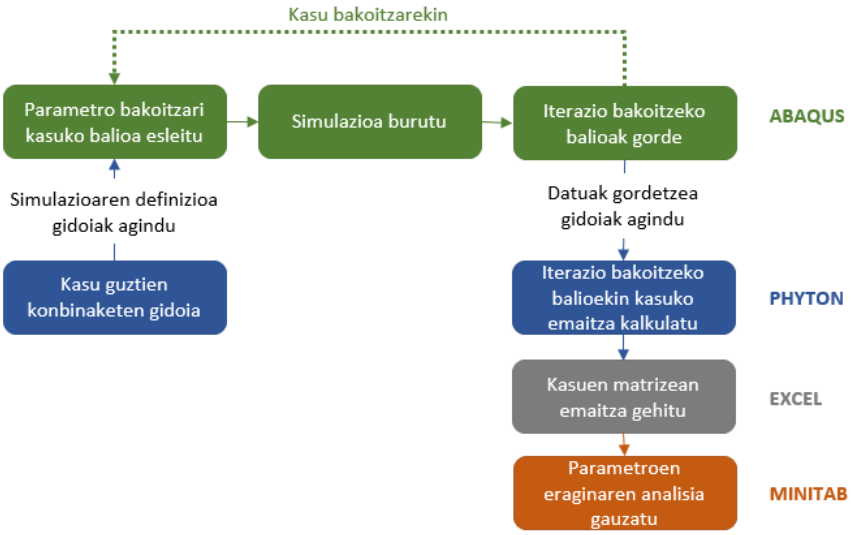
Kasu bakoitzean, parametro bakoitzari balio jakin bat esleitu behar zaionez (parametroen definizioa 3.3 atalean azalduko da) hainbat programa elkar lanean jartzea ezinbestekoa izan da, simulazio katea automatizatzea hain zuzen ere (ikus 1 irudia). Simulazioak ABAQUS elementu finitoen metodoan oinarritzen den softwarean gauzatu dira. Automatizazioa Phyton lengoaiaren bitartez arautu da, bertan parametro bakoitzari distantziakide den balio sorta bat definitu zaio eta kasu bakoitzarentzako *for* begiztaren bitartez balio egokia esleitu zaio, makro antzeko bat sortuaz. ABAQUS-ek Phyton-en arauen gidoia irakurri eta exekutatu egiten du, kasu bat simulatzean emaitzak gorde eta hurrengoa automatikoki hasieratu eta exekutatzen du. ABAQUS-en emaitzak, iterazio bakoitzerako desplazamendu (D) eta indarren (F) balioak dira. Phyton-en bertan, 1 eta 2 ekuazioen bitartez kasu bakoitzaren emaitzak kalkulatzen dira: zurruntasun (K) bertikal (b) eta horizontala (h).

$$K_b = \frac{F_b}{D_b}(kN/m) \tag{1}$$

$$K_h = \frac{F_h}{D_h}(kN/m) \tag{2}$$

Kalkulaturiko emaitzak .csv artxibo batean gordetzen dira. Artxibo hau EXCEL-en zabaldu eta kasuen matrizean (ikus definizioa 3.3 atalean) kopiatzen da. Behin konbinazio guztiak simulatuta eta matrizea beteta, datu guztiak MINITAB programan kopiatzen dira. Bertan, datuak estatistikoki aztertzen dira, eta parametro bakoitzak eta euren interakzioek zurruntasun bertikal eta horizontalean duten eragina kuantizatzen da.

1. Irudia: Ikerketaren fluxuaren eskema



3.2. Baloi pneumatikoaren FE eredua eta balidazioa

Zuntzez irmoturiko materialak modelizatzeko berezko elementu bat duenez eta barneko airearen presioa nolabait alderdi estrukturalarekin konbinatzeko gai denez, baloi pneumatikoaren biki birtuala ABAQUS softwarean gauzatzea erabaki da. Hortaz gain, simulazioak katean exekutatu ahal izateko gaitasuna izatea ere balioetsi da.

Fabrikanteak erraztutako planotik eta baloi bera moztetik ondorioztatu den informazioarekin baloi pneumatikoaren geometria irudikatu da. 2a irudian trenetan erabili ohi diren baloi pneumatikoaren argazki [1] bat ageri da.

[1] `https://www.toolern.com.au/contitech-heavy-vehicle-air-springs/` TOOLERN baloi pneumatiko banatzailearen webgunetik hartutako irudia.

1. Taula: Fabrikatzaile datu, entsegu datu eta simulazio zurruntasunen alderaketa (norabide bertikalean).

Presioa (bar)	Simulazioa (kN/m)	Fabrikatzailea (kN/m)	Katalogoarekiko akatsa (%)	Esperimentala (kN/m)	Esperimentalarekiko akatsa (%)
3,67	633	633	0,0	632	0,13
4,4	707	723	-2,11	703	0,67
5,1	778	774	0,48	787	-1,18

2b irudian, denera sei zuntz kapa bereiz daitezke, bakoitiek horizontalarekiko 75° orientazioa dute eta bikoitiek berriz −75°. Kapa bakoitzeko zuntzen diametroa 0,5mm ingurukoa dela dirudi eta bi geruza albokideren distantzia 1mm. Geruzak lodieraren erdiko planoarekiko simetriko ezarriak daude, elkarren arteko tartea 0.4mm-koa delarik. Diafragmaren lodiera totalak 12mm dauzka.

2. Irudia: Trenen esekidurako baloi pneumatikoen barne egitura.

(a) Baloi pneumatiko baten adibidea.

(b) Diafragmaren barne egitura.

Baloiaren diafragmaren lodiera gainontzeko neurriekin alderatuta (diametroa 740mm eta altuera 215mm, hurrenez hurren) oso txikia da, hortaz, *shell* motatako elementuak erabiltzea erabaki da. Elementu hauek, solido erakoekin alderatuta lodieran elementu bakarra definitzearekin nahikoa dute. Honela ereduko elementu kopurua dezente jaisten da, karga konputazionala murriztuz eta beti ere analisiaren fidagarritasuna konpromezuan jarri gabe.

Lehen aipatu bezala, ABAQUS-ek zuntzak matrizean txertatzeko *rebar* elementuak erabiltzen ditu, elementu uniaxialak dira; non zuntzen nodoek matrizearen nodoekin bat egiten duten (ABAQUS, 2018). *Rebar* geruza bakoitzeko zuntz guztiek propietate berdinak izango dituzte, hau da, materiala, orientazioa, diametroa eta elkarren arteko distantzia berdina izango dute. Baloiaren barneko airea fluidozko barrunbe gisa modelizatu da, airearen propietateak kontuan hartuz fluidozko zatia betetzen duen bolumena nahiz presioa kalkulatzea ahalbidetzen duena.

Bestetik, CAF eta CEIT-en elkarlanean sorturiko Air Spring Test Bench (ASTB) baloi pneumatikoen entsegu makinan baloia testatu da. Makinak baloi pneumatikoa trenean ezarrita dagoenean jasaten dituen indarrak irudikatzeko eragingailu ezberdinak dauzka. Desplazamendu bertikal zein horizontalak ezarriz gero, eta indar zelula baten bidez erreakzio indarra neurtuz gero, baloi beraren zurruntasun bertikal eta horizontala ezagutu daitezke.

Baloi pneumatikoaren FEM modeloa ontzat jotzeko beharrezkoa da ABAQUS-en simulatutako emaitzak entsegu esperimentaletan lortutakoekin bat datozela ikustea. Horretarako, 1 eta 2 taulek hornitze presio maila ezberdinetarako zurruntasun estatiko bertikal zein horizontaleko emaitzak eta euren arteko aldea zenbatekoa den biltzen dituzte. Akatsak errore erlatiboari egiten dio erreferentzia, aldagaia simulaturiko zurruntasuna (S) eta oinarria fabrikantearen katalogoan azaltzen diren zurruntasun balioak (T) edota entsegu esperimentaletatik lortutako datuak(E) direlarik (ikus 3 eta 4 ekuazioak). FEM ereduaren fidagarritasun maila altua da, %6 baino akats gutxiagorekin baloi pneumatikoaren zurruntasun estatikoa aurreikusteko gai delarik.

$$Akatsa_{fabrikantearekiko} = \frac{S-T}{T} * 100(\%) \tag{3}$$

$$Akatsa_{entseguekiko} = \frac{E-T}{T} * 100(\%) \tag{4}$$

2. Taula: Fabrikatzaile datu, entsegu datu eta simulazio zurruntasunen alderaketa (norabide horizontalean).

Presioa (bar)	Simulazioa (kN/m)	Fabrikatzailea (kN/m)	Katalogoarekiko akatsa (%)	Esperimentala (kN/m)	Esperimentalarekiko akatsa (%)
3,67	238	235	1,47	247	-3,47
4,4	248	242	2,45	262	-5,37
5,1	257	252	1,85	266	-3,51

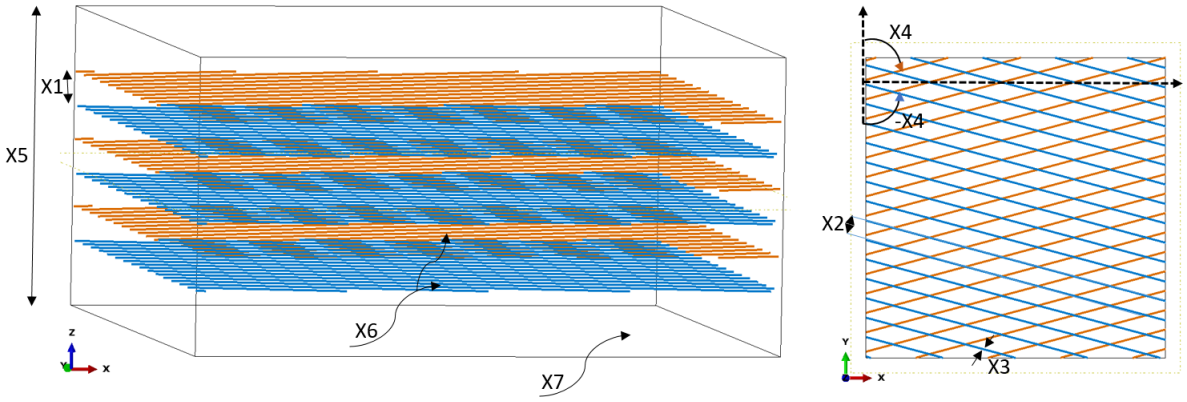
3.3. Ordenagailuz lagunduriko esperimentazio diseinua (CADE)

Ingeniaritzan, ordenagailuz lagunduriko esperimentazio diseinua produktu berrien garapenean edota merkatuan dauden produktuak optimizatu nahi direnean eskuragarri dagoen erraminta da. Produktu baten portaeran faktore ugarik eragin dezakete, baina askotan zaila izaten da faktore bakoitzak duen eragina neurtzea eta are zailagoa faktore ezberdinek euren artean duten erlazioa zehaztea. Hori dela eta, badira zenbait metodo era ordenatu eta zehatz batean entsegu birtualak eginez eta ondoren datuak postprozesatuz, faktoreen erlazio lineal, koadratiko eta intererlazioak neurtzeko gai direnak.

Aztergai den kasuan, baloi pneumatikoaren eraikitze parametroek zurruntasunean duten eragina aztertzeko, *kubo baten aurpegietan zentraturiko diseinu metodoa* (FCD) erabili da. Analisia burutzeko, diafragma osatzen duen material konposatuaren zazpi eraikitze parametro aukeratu dira, X1 eta X7 bitarteko zenbakiekin izendatu direnak. Jarraian, parametro bakoitzaren esanahia eta unitateak azaltzeaz gain 3 irudiak parametro bakoitzaren azalpen grafikoa adierazten du.

- X1: Bi geruza albokideren arteko distantzia (mm)
- X2: Geruza bereko bi zuntz albokideren arteko distantzia (mm)
- X3: Zuntz diametroa (mm)
- X4: Zuntz orientazio angelua (°)
- X5: Diafragmaren lodiera (mm)
- X6: Zuntzen materialaren Young-en modulua (GPa)
- X7: Matrize materialaren Young-en modulua (MPa)

3. Irudia: Ordenagailuz lagunduriko esperimentazio diseinuaren faktoreen definizio grafikoa.



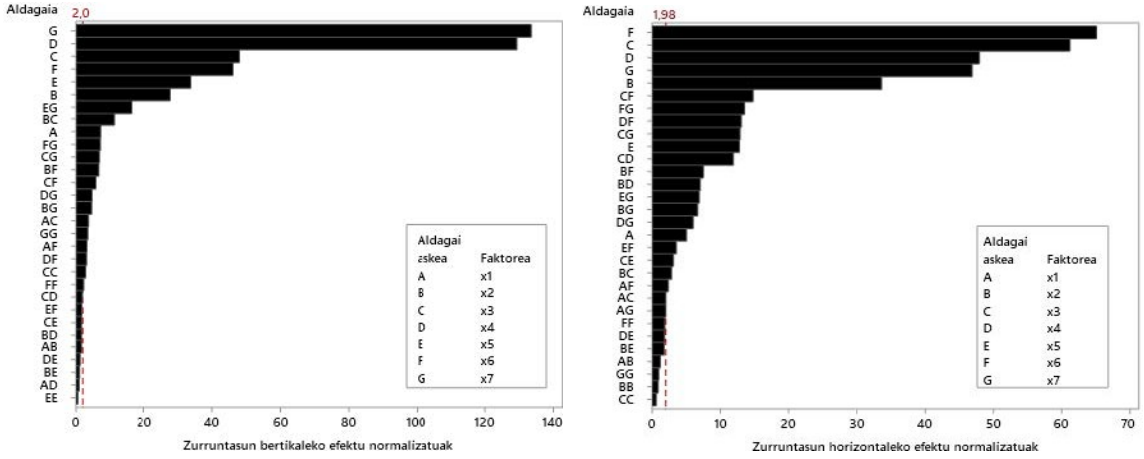
Metodologiak, aldagai bakoitzarentzako hiru balore zehaztea eskatzen du. Balore horiek distantziakideak izan behar dute; hau da, 0 balioak -1 eta 1 artean eta bakoitzetik distantzia berdinera egon behar duela. Denera zazpi aldagai izanik eta konbinazio guztiak kontuan hartuta, 273 kasu ezberdin simulatu behar dira. Ondorengo 3 taulak faktore bakoitzaren hiru mailen datuak biltzen ditu. Datuak merkatuan dauden baloi pneumatikoetatik eta aurrez aipatutako lanetatik ondorioztatu dira. Esate baterako, matrizearen kautxua A-Shore 40 eta A-Shore 80 bitartean definitu da.

3. Taula: Faktoreen mailaketa.

	X1 (mm)	X2 (mm)	X3 (mm)	X4 (°)	X5 (mm)	X6 (GPa)	X7 (MPa)
-1	0	0	0,3	60	8	1,3	1,65
0	0,225	0,2	0,5	67,5	10	2,75	5,325
1	0,45	0,4	0,7	75	12	4,2	9

MINITAB-en analisia egiteko datuen matrizeak 273 errenkada eta 8 ilara dauzka, kasu guztietarako faktore bakoitzak duen balioa eta simulaturiko zurruntasun bertikal zein horizontaleko emaitzak ageri dira. *Erregresio analisia* gauzatu ondoren, Paretoren diagraman (ikus 4. irudia) termino bakoitzak (faktoreen arteko erlazio lineal, koadratiko eta interakzioak) duten eragina azaltzen da.

4. Irudia: Paretoren diagrama.



(a) Zurruntasun bertikalean eragina duten faktoreak.

(b) Zurruntasun horizontalean eragina duten faktoreak.

Paretoren diagramak faktoreen aldagai askeek ez ezik euren arteko iterazioek eragin nabarmena dutela adierazten du. Horizontalean, gakoa zuntzak dira: nylonaren Young-en modulua (X6) eta zuntzen diametroa (X3), hain zuzen ere. Matrizearen zurruntasunak (X7) eta orientazio angeluak (X4) bertikalean ez ezik, horizontalean ere garrantzia dute.

Paretoren diagramak zein faktoreek duten garrantzia jakiteko oso erabilgarriak dira, baina parametro bakoitzaren joera nolakoa den aztertzeko efektu nagusiak deritzon analisia egin behar da, ikus 5 irudia. Bertan, zuntzen orientazioak (X4) zurruntasunen arteko erlazioa aldatzeko giltza dela ageri da; angelu handiagoek norantza bertikalean baloia zurrundu egiten dute, horizontalean berriz bigundu. Paretoren diagraman ageri zen moduan, irmotze geruzen arteko distantziak (X1) ez du aparteko garrantzirik, joerak ez du aldaketarik. Gainontzeko faktoreak balioz handitzean, hau da, materialetan Young-en modulua igotzean edota geometrian zuntzek azalera handiagoa hartzean, baloia zurrundu egiten da.

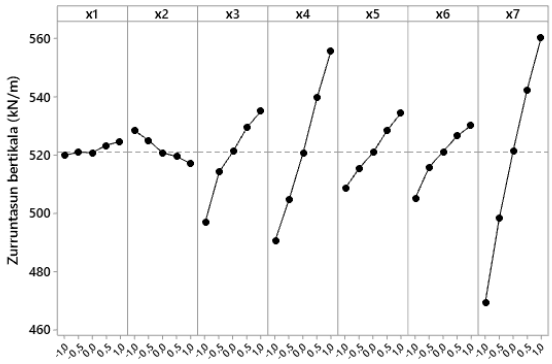
Azkenik, *erantzun azaleraren metodologia*-z (RMS) baliatuz faktore bakoitzak duen pisua era kuantitatiboan aztertzea ahalbidetu da. Honela, erantzuna (aztergai dagoen kasuan zurruntasun bertikal eta horizontala) faktoreen (diafragmaren eraikitze parametroen) ekuazio polinomiko batez adierazi dira:

$$Y = b_0 + \sum(b_i * x_i) + \sum(b_{ii} * x_{ii}^2) + \sum(b_{ij} * x_i * x_j) \tag{5}$$

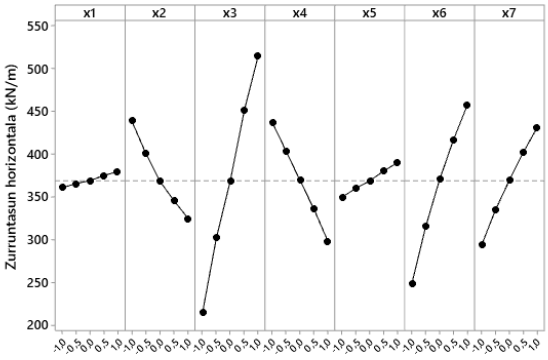
Y emaitza delarik, x_i x_j aldagaiak, b_0 b_i b_{ii} b_{ij} erregresio biderkagaiak direlarik. b_0 funtzioaren aldagai askea da eta b_i efektu linearren, b_{ii} efektu koadratikoen eta b_i interakzioen koefizienteak dira, hurrenez urren. x_i eta x_j aldagaiak X_i eta X_j faktoreekin ondorengo ekuazioaren bidez erlazionaturik daude:

$$x_i = \frac{X_i - X_0}{\Delta X_i} \tag{6}$$

5. Irudia: Efektu nagusien diagrama.



(a) Zurruntasun bertikalean eragina duten faktoreak.



(b) Zurruntasun horizontalean eragina duten faktoreak.

bertan, X_0 aldagaiak X_i faktoreak erdiko mailan (zero) duen balorea da eta X_i urrats aldaketaren balioa.

Baloi pneumatikoaren portaera bertikal eta horizontala eskutik emanak doaz, azken finean faktore bat aldatuz gero bi norantzetan du eragina. Hori dela eta, 5 irudiko bi alderdien faktore esanguratsuenak alderatuz eta *multzo onenaren erregresioa* aplikatuz, baloi pneumatikoaren zurruntasun bertikal (K_b) eta horizontaleko (K_h) azalera ekuazioak honela defini daitezke:

$$K_b = -6,7 + 96,3X_3 + 5,608X_4 + 11,33X_6 + 10,617X_7 - 6,61X_3 * X_6 + 0,437X_6 * X_7 \quad (7)$$

$$K_h = -623,2 + 236,1X_3 - 9,196X_4 + 7,9X_6 + 8,2X_7 + 74,2X_3 * X_6 + 3,69X_6 * X_7 \quad (8)$$

Proposatzen diren zurruntasun ekuazioek sei aldagai biltzen dituzte: lau aldagai aske; zuntzen diametroa (X3), orientazioa (X4), eta bi materialen Young-en modulua (X6 eta X7) eta bi interakzio; zuntzen materialak matrize zein zuntzen diametroaren arteko erlazioa (X6*X3 eta X6*X7). *Multzo onenaren erregresioa*-k bi norantzetan %85 baino zehaztasun handiagoarekin esekidura elementuaren portaera aurreikusteko gai da. Esate baterako, faktoreen mailaketaren erdiko kasua (zero) aztertuz gero, FE ereduko emaitzen (K_b=522kN/m eta K_h=370kN/m) eta 7 eta 8 ekuazioen emaitzen (K_b=619kN/m eta K_h=367kN/m) arteko akats erlatiboa %12 eta %-0,2 da, hurrenez urren.

4. Ondorioak

Ikerketa lan honen ondorio nagusia bidaiari trenek darabiltzaten balio pneumatikoen diafragmaren eraikitze parametroek esekidura elementuaren zurruntasunean duten eraginari mugak jartzea izan da. Orain arte era kualitatiboan parametro gutxiren zenbait joera lineal ikusi izan diren arren, kuantitatiboki eta faktoreen eragin lineala ez ezik, kubikoa eta elkarrekintza aztertu duten lanik ez da aurkeztu. Horren analisi zabala egin ahal izateko ezinbestekoa izan da kasuen automatizazioa, Phyton lengoaian ABAQUS softwarean burutu beharreko simulazio eta emaitzak antolatu izana.

Ondorioztatu diren baloi pneumatikoaren diseinu-gako nagusiak hauek dira:

- Giltza zuntzen orientazioa da, alderantziz proportzionala den faktore bakarra da; angelua handituz gero zuntzak bertikalago izanez zurruntasun bertikala handiagotu egiten da, horizontala berriz murriztu.
- Paretoren diagramak norantza bakoitzean eragin nabarmenenak dituzten faktoreak izendatu ditu:

  Bertikalean: matrizearen materiala > angelua > zuntzen diametroa > zuntzen materiala > lodiera > zuntzen arteko distantzia.

  Horizontalean: zuntzen materiala > zuntzen diametroa > angelua > matrizearen materiala > zuntzen arteko distantzia > zuntzen diametroa eta zuntzen materiala.
- Sei aldagai eta lau faktore bakarrik erabiliz, zurruntasun bertikal eta horizontala %85 baino zehaztasun handiagoarekin aurreikus daiteke. Oinarrizko eraikitze parametroak zuntz eta matrizearen materialak, zuntzen orientazio eta diametroa dira.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Ikerketa lerro berberetik jarraiki, baloiaren diafragmaren eraikitze parametroek esekidura elementuaren maiztasun naturaletan duten eragina aztertzera bultzatzen da. Azken finean, esekidura elementuek bidaiarion kaxa kanpo bibrazioetatik babestea du helburu, filtro pasa-baxu baten moduan lana eginez. Ibilgailuaren funtzionamendu egokia bermatuta izan ondoren, hau da, bihurguneetan zein alboko haizeak zakar jotzen duen egoeretan trenak bere ibilgutik jarrai dezan bermatzen duen baloi pneumatikoaren zurruntasunak finko izanda, maiztasun natural balioak ahalik eta altuen izatea komeni da. Honela, baloiak isolatu beharrean bibrazioak handitzen dituen maiztasun eremua gizakion sentikortasun mailatik ahalik eta gehien urrunduko litzateke.

Bestalde, nahiz eta baloi pneumatikoak ibilgailuan kokatzeko duen lekua mugatua izan, toki hartara egokien egokitzen den baloia zein den zehaztea erronka polita litzateke. Horretarako, baloi beraren geometriarekin ikerketa lan honetan aurkezten den metodologia aplikatzea gomendatzen da. Hortaz gain, ereduan segurtasun malgukia gehitu ahalko litzateke. Baloiari seriean loturik doa, zulatuko balitz ibilgailuaren segurtasuna bermatu dezan.

6. Erreferentziak

ISO 2631-4:2014 Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 4: Guidelines for the evaluation of the effects of vibration and rotational motion on passenger and crew comfort in fixed-guideway transport syste.

ABAQUS. Simulia User Assistance 2018.

Bešter, T., S. Oman, eta M.Ñagode. 2019. Determining influential factors for an air spring fatigue life. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 42.284–294.

Gil-Negrete, N., F. J. Nieto, A. Pradera-Mallabiabarrena, eta J. Gonzalez-Prada. 2018. On the dynamic stiffness of air springs at medium-high frequencies. In *Proceedings of ISMA 2018 - International Conference on Noise and Vibration Engineering and USD 2018 - International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics; 2018 Sep 17-19; 2018 Leuven (Belgium)*, 3567–3579.

H. W. Lee, S. H. Kim, H. Huh, J. Y. Kim, eta S. G. Jeong. 2003. Finite element analysis of diaphragm-type air springs with fiber-reinforced rubber composites. *Journal of Composite Materials* 37.1261–1273.

Iwnicki, Simon. 2020. *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*. Francis, Taylor and.

Li, Feng Xiang, Wei Min Yang, eta Yu Mei Ding. 2009. Simulation of static test of air-spring. *Advanced Materials Research Journal* 11-12.713–716.

Mendia-Garcia, I., N. Gil-Negrete, A. Pradera-Mallabiabarrena, eta M. Berg. 2020a. A survey on the modelling of air springs–secondary suspension in railway vehicles. *Vehicle System Dynamics* .

——, N. Gil-Negrete, A. Pradera-Mallabiabarrena, eta F. J. Nieto. 2019. Baloi pneumatiko baten zurruntasun estatiko bertikal zein horizontalean eragina duten parametroen azterketa. In *III. Ikergazte. Nazioarteko ikerketa euskaraz. Kongresuko artikulu bilduma. Ingeniaritza eta Arkitektura*, 64–71, Baiona.

——, ——, ——, eta ——. 2020b. On the derivation of air spring model parameters of a passenger rail vehicle suspension based on finite element model. In *Proceedings of ISMA 2020 - International Conference on Noise and Vibration Engineering and USD 2020 - International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics; 2020 Sep 7-9; 2020 Leuven (Belgium)*, 1–14, Leuven (Belgium).

No Yang Weimin, Chen Can-hui, Chen Ya-ling, Ren Yan-sha. 2004. Finite element analysis of an air spring for automobile suspension. *Journal of Beijing University of Chemical Technology* vol. 31, N.pp. 105–109 (in english).

Oman, S., eta M.Ñagode. 2013. On the influence of the cord angle on air-spring fatigue life. *Engineering Failure Analysis* 27.61–73.

Tang, Zhao, Shijian Zhu, Xuetao Weng, eta Jingjun Lou. 2011. Analysis of the cord layer's influence on the air spring's lateral stiffness. In *2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering, RSETE; 2011 Jun 24-26; Nanjing (China)*, volume 10, 2908–2911. IEEE.

Wenku, Shi, Jiang Wan, Huang Ying, Yao Weimin, Ya Hao, eta Liu Zubin. 2009. Finite element analysis of an air spring concerning initial pressure and parameters of cord fabric layer. In *2009 2nd Asia-Pacific Conference on Computational Intelligence and Industrial Applications-PACIIA*, volume 1, 496–499, 28-29 Nov 2009; Wuhan (China). IEEE.

Zhang, Yan Wen, Han Xiang Wang, Jia Qi Che, Ming Chao Du, eta Hong Jie Zhang. *Petroleum Science* .

Elementu pasiboen eragina frekuentzia altuko bihurgailuetan

Arruti, A., Anzola, J., Aizpuru, I., Mazuela, M.
Mondragon Unibertsitatea, Elektronika Departamendua. Loramendi Kalea 4, 20500 Arrasate-Mondragón(Gipuzkoa)
aarruti@mondragon.edu

Laburpena

Azkeneko urteetan hainbat aurrerapen nabarmen egin dira potentzia elektronikaren eremuan, adibidez SiC-en eta GaN-en oinarritutako transistoreak. Halere, teknologia berri hauetan oinarritutako potentzia bihurgailuak ezin ditugu beren mugetaraino eraman, frekuentzia altuetan elementu pasiboak sistemaren botila-lepoa bihurtzen direlako. Lan honetan, elementu pasiboek frekuentzia altuko bihurgailuetan duten eragina aztertzen dugu, bereziki elementu magnetikoak. Diseinu klasikoetan kontsideratzen ez diren hainbat efektu azaltzen dira, eta frekuentzia alturako egokitua dagoen diseinu estrategia baten beharra adierazten da. Aldi berean, diseinurako estrategia mota ezberdinak era laburrean azaldu ditugu. Azkenik, bihurgailuen helburu anitzeko diseinu metodologien garrantzia azaldu dugu.

Hitz gakoak: Potentzia elektronika, Frekuentzia altuko induktoreak, Frekuentzia altuko transformadoreak, Ihes induktantzia, Helburu anitzeko optimizazioa

Abstract

Notable technological advancements in power electronics have been made in the last years, such as SiC and GaN based transistors. Still, power converters based on these technologies cannot be fully exploited due to passive elements becoming the design bottlenecks at high frequencies. This work analyses the impact of passive components in high frequency power converters, mostly focused in magnetic elements. The necessity of an adequate high frequency design methodology is proved by demonstrating various high frequency effects that are not considered in classical design methodologies. At the same time, a short explanation of different design strategies is made. Lastly, the authors explain the importance of adopting a multi-objective based design methodology for power converters.

Keywords: Power electronics, High-frequency inductors, High-frequency transformers, Leakage inductance, Multi-objective optimization

1. Sarrera eta motibazioa

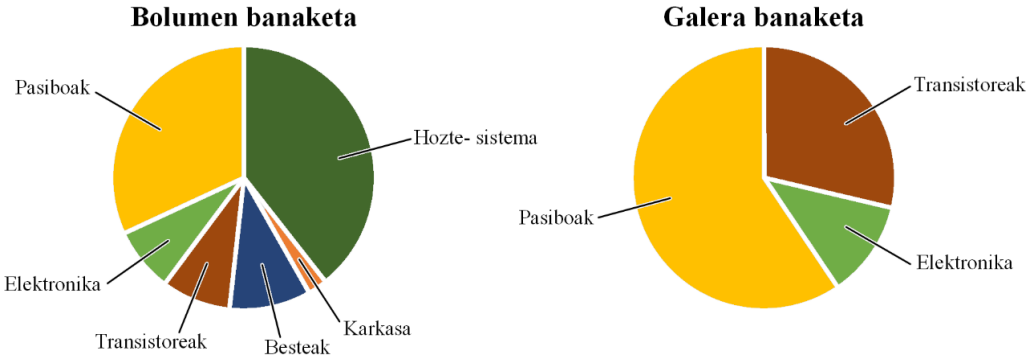
Gaur egungo gizarteak hainbat arazori aurre egin behar dio, eta horietako bat karbono dioxido (CO2) gasek sortutako kutsadura da. Hainbat aurrerapauso egin dira CO2 emisioak murrizteko, adibidez energia iturri berriztagarrien alde apustua egitea, baina horretaz gain energia kontsumoa murriztea beharrezkoa da. Energia elektrikoaren sareak hainbat potentzia galera sortzen ditu, izan ere hainbat potentzia bihurgailu behar dira tentsio maila egokitzeko. Etxetresna elektriko gehienek bihurgailu bat edo gehiagoren beharra dute ondo funtzionatzeko, eta elektrizitatea sortu eta kontsumitu tartean hainbat potentzia bihurgailutik pasa behar du, potentzia galerak sortuz. Honi aurre egiteko bihurgailuen efizientzia hobetu behar da, sortutako potentzia galerak murrizteko.

Horrekin batera, industriak berezko beharrak ditu, hauen artean bihurgailuen efizientzia hobetzea eta tamaina murriztea. Ibilgailu elektrikoa eredu garbi bat da, non argi dagoen efizientzia altua beharrezkoa dela autonomia maila ona izateko, eta aldi berean bihurgailuen tamaina murrizteak hauen produkzio kosteak murrizten ditu. Beste eredu bat ordenagailu eramangarriak dira, non kargagailua geroz eta txikiagoa eta arinagoa izan hobeto (puntu batean ordenagailu barnean integratu ahalko dira, hainbat monitoreekin egiten den bezala).

Aldi berean, azken urteetan elektronika mailan hainbat aurrerapen egin dira. Aurrerapen nagusietako bat potentzia transistoreen arloan etorri da. Silizio karburoan (SiC) eta galio nitruroan (GaN) oinarrituriko transistoreek abantaila handiak ekarri dituzte siliziozko (Si) gailuen aldean. Hauen artean, deigarrienak beraien kommutaziorako propietateak dira; askoz ere bizkorrago eta galera gutxiagorekin aldatu dezaketelako kommutazio egoera.

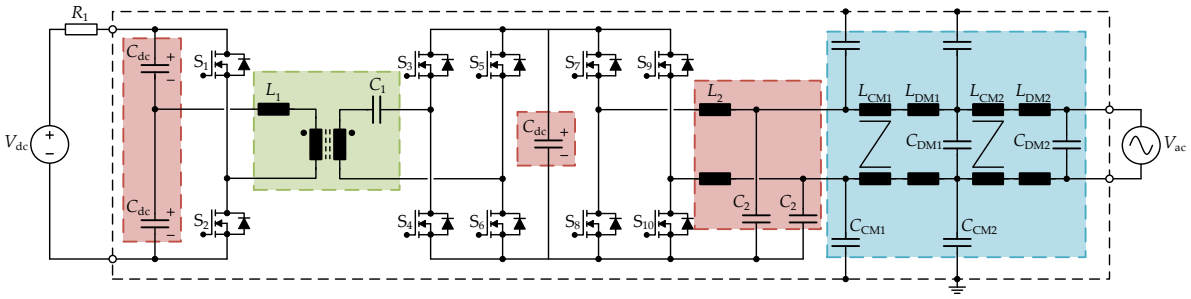
Teknologia berri honen potentziala dagoeneko egiaztatu da. Hainbat bihurgailuren diseinuetan Si-n oinarrituriko bihurgailuak baino efizientzia eta potentzia dentsitate altuagoak lortu baitira. Eredu nabarienen artean, GaN-ean oinarritutako ordenagailuetarako potentzia elikadura sistemak (CORSAIR AX1600i) edota Googlek antolatutako 'Little Box Challenge' txapelketa dira. Lehiaketa honetan ikerketa talde ezberdinek egungo inbertsoreak baino 10 aldiz txikiagoa zen bihurgailu bat diseinatu behar zuten. Kasu guztietan bihurgailuaren hobekuntzak lan frekuentziaren igoera nabarmen baten bitartez eskuratu ziren.

1. irudia. 'Little Box Challenge' inbertsore baten galera eta bolumen banaketa. (Kolar et al., 2016) datuetan oinarritua.



Hala ere, frekuentzia igotzea ez da gauza sinplea, izan ere lehen aipatutako 'Little Box Challenge' txapelketaren diseinu karga handiena elementu pasiboetan (induktoreak, transformadoreak eta kapazitateak) eta hozte-sisteman zeuden. Gainera, 1. irudia ikusita, antzeman daiteke (Kolar et al., 2016) autoreek diseinatutako bihurgailuko elementu pasiboak galeren erdia baino gehiago eta bolumenaren herena direla. Elementu pasiboak transistoreak bezain garrantzitsuak dira edozein potentzia bihurgailuan, 2. irudian ikusi daitekeen bezala bihurgailuaren funtzionamendua ahalbidetzeko elementu magnetiko eta kapazitibo asko behar dira; filtroak, busak, transformadoreak eta abar. Baina transistoreak ez bezala, elementu pasiboek ez dute aurrerapen teknologiko nabarmen handirik izan azkeneko mendean, eta gaur egun frekuentzia altuko bihurgailuen diseinuan oztopo nagusienetako bat dira.

2. irudia. Bihurgailu bateko elementu pasiboak.



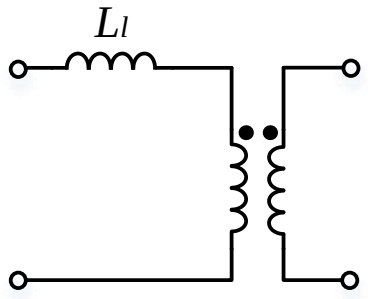
2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Azkeneko urteetan ikerketa asko bultzatu dira gai honen inguruan, batez ere elementu magnetikoen inguruan. Argi dago etorkizuneko bihurgailuek frekuentzia eremu altuetara joko dutela SiC eta GaN transistoreen abantailak aprobetxatzeko, eta ikerlari askok 20 kHz baino gehiagori frekuentzia altua deitzen dioten arren, beste batzuk hasi dira 100 kHz eremua frekuentzia ertaina kontsideratzen (Guillod et al., 2018).

Ikerketa esparru gehiena transformadoreetara zuzenduta dago, bereziki ihes induktantziaren kalkuluan eta diseinuan. Frekuentzia baxuetan, ihes induktantzia (ikusi 3. irudia) transformadorearen elementu parasito bezala kontsideratu da, non honen efektua desegokia da bihurgailuaren funtzionamendu egokirako. Halere, frekuentzia altuetan ihes induktantziak onurak ekarri ditzake, hala nola induktoreak transformadorean integratu ahal izatea. (Ouyang et al., 2019) publikazioan autoreek transformadore planarren ihes induktantzia kalkulatzeko modelo zehatzago bat proposatzen dute, eta

(Schlesinger eta Biela, 2021) publikazioan ihes induktantzia kalkulatzeko metodoen zehaztasunaren eta koste konputazionalaren alderaketa egiten da.

3. irudia. Transformadorearen ihes induktantzia parasitoa (L_l).



Bestalde, ikertutako beste puntu nagusienetako bat elementu magnetikoen diseinua da. Frekuentzia baxuetan elementu hauen diseinua prozesu sinplea da, baina frekuentzia altuetara jotzean beste hainbat fenomenoen eraginak kontuan hartu behar dira, eta lan oso konplexua bilakatzen da. Horregatik, diseinurako estrategia ezberdinak garatzen hasi dira; (Garcia-Bediaga et al., 2017) eta (Zhang et al., 2018) autoreek algoritmo genetikoetan oinarritutako estrategiak garatzen dituzte, (Guillod et al., 2018) publikazioan diseinuko metodologia ezberdinen eragina alderatzen dute, (Zhengzhihong et al., 2018) autoreek isolamenduak diseinuan duen eragina aztertzen dute, (Mogorovic eta Dujic, 2019) publikazioan parametro ezberdinek diseinuan duten eragina aztertzen dute, eta (Langlois et al., 2020) autoreek material berrietan oinarritutako diseinua aurkezten dute.

Testuinguru honetan, frekuentzia altuko elementu pasiboek bihurgailuan duten eraginaren analisi sakon bat egitea proposatzen dugu, azterketa SiC eta GaN transistoreetako frekuentzia altuko bihurgailuetara zuzenduz. Horretaz gain, aplikazio hauentzat helburu anitzeko diseinu estrategia bat proposatzen dugu, sistemaren optimizazio globala eskuratzeko optimo lokaletan oinarritu beharrean.

3. Ikerketaren muina

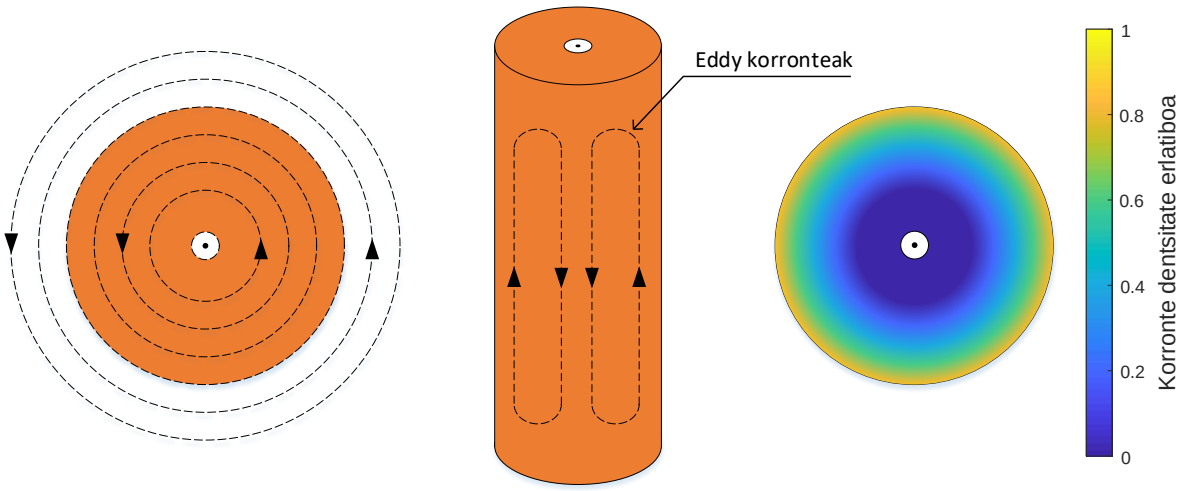
Atal honetan ikerketako ideia nagusiak era laburrean adierazten ditugu. Lehenik, frekuentzia altuak elementu magnetiko pasiboetan duen eragina aztertuko dugu. Ondoren, lehen puntuko kontzeptuetan oinarritutako elementu magnetiko pasiboak diseinatzeko estrategia ezberdinak aurkeztuko ditugu. Azkenik, frekuentzia altuko bihurgailuentzako helburu anitzeko diseinua jorratuko dugu.

3.1. Frekuentzia altuen eragina elementu magnetikoetan

Frekuentzia altuan frekuentzia baxuan nabarmenak ez diren hainbat fenomeno agertzen dira, eta hauek eragin zuzena dute konponente pasibo magnetikoen funtzionamenduan. Artikulu honetan bi fenomeno nabarmen aipatuko ditugu, frekuentzia altuko harilkatuaren galerak eta elementu parasitoetan duen eragina.

Edozein elementu magnetikok harilkatuaren beharra du indar magneto eragilea sortzeko. Harilkatua egiteko eroale bat erabiltzea beharrezkoa da, eta frekuentzia baxuetan eroalearen barneko korronte distribuzioa guztiz erregularra den arren, frekuentzia altuetan Eddy korronteak induzitzen direla eta, korrontearen distribuzioa nabarmenki aldatzen da. 4. irudian ikusi daitekeen bezala, Eddy korronteek eroalearen erdigunea okupatzen dute, eta beraz elektrizitate gehiena ertzetara desplazatzen da, eroalearen azalera erabilgarria txikituz eta potentzia galerak handituz. Distribuzio hau bi fenomenok eragiten dute, gainazal efektuak (eroaleak berak daraman korronteak sortutako eremu magnetikoak eraginda, ‘skin effect’) eta hurbiltasun efektuak (inguruko beste eroaleek daramatzaten korronteek sortutako eremu magnetikoek eraginda, ‘proximity effect’).

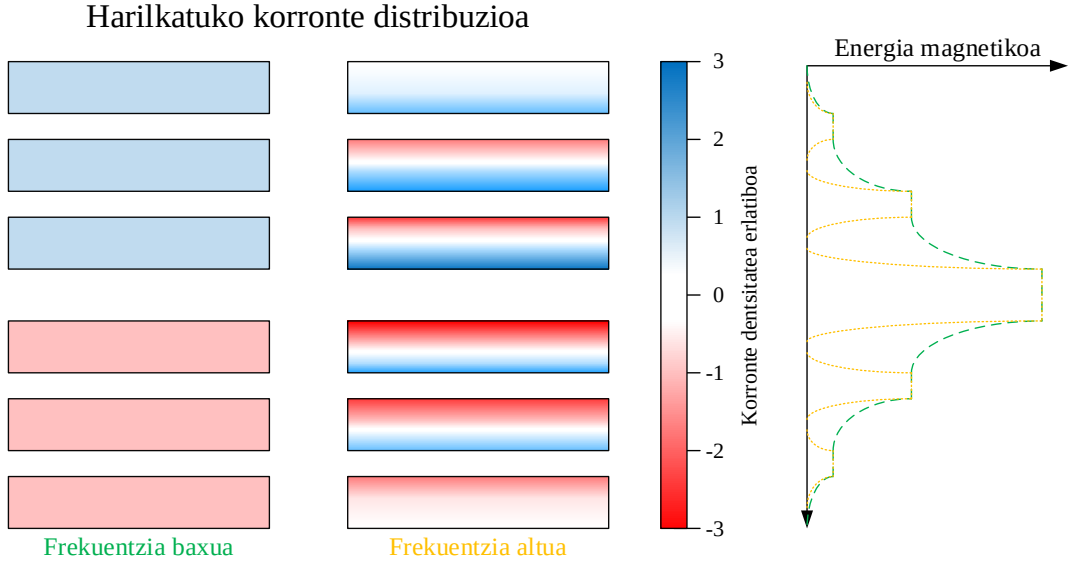
4. irudia. Gainazal efektuaren eragina eroale baten korronte distribuzioan.



(Dowell, 1966) artikuluan korronte distribuzioaren ebazpen analitikoa aurkezten da Maxwellen ekuazioetan oinarrituta, baina ebazpen honetan hainbat hipotesi eta sinplifikazio erabiltzen dira, eta hauek ez dira aplikagarriak hainbat diseinutan; adibidez 'foil' edo 'litz' hariak erabiltzen direnean. Kasu hauetan korrontearen distribuzioa ebazteko modelo analitikoak erabili beharrean elementu finitoetan oinarritutako metodologiak aproposagoak dira. Hala ere, metodologia hauek ez dira erabat aplikagarriak diseinuko faseetan (non modelo sinpleagoak eta kalkulu bizkorragoak nahiago diren), eta balidazio bezala erabiltzen dira gehienetan.

Bestalde, frekuentzia altuak eragin zuzena izan dezake elementu parasitoetan, non eredu garbiena lehen aipaturiko ihes induktantzia den. Induktantzia hau harilkatuan zehar gordetako energia magnetikoan oinarritzen da, eta beraz harilkatuko korrontearekin zuzenki lotua dago. Frekuentzia altuetan, harilkatuko korronte distribuzioa aldatzen denez, metatutako energia magnetikoa murriztu egiten da eta horrek ihes induktantziaren balioa jaisten du, (Ouyang et al., 2019) artikuluak frogatzen duen bezala. Adibide bezala, ikusi 5. irudia, non goiko eta beheko laukizuzenek (urdinak eta gorriak) transformadore baten lehen eta bigarren harilkatuak irudikatzen dituzte. Frekuentzia baxuan eroaleen barneko korrontearen distribuzioa guztiz erregularra da, baina frekuentzia altuan hurbiltasun efektuak korrontearen distribuzioa guztiz aldatzen du, metatutako energia magnetikoa murriztuz.

5. irudia. Frekuentziaren eragina harilkatuko energia magnetikoan.



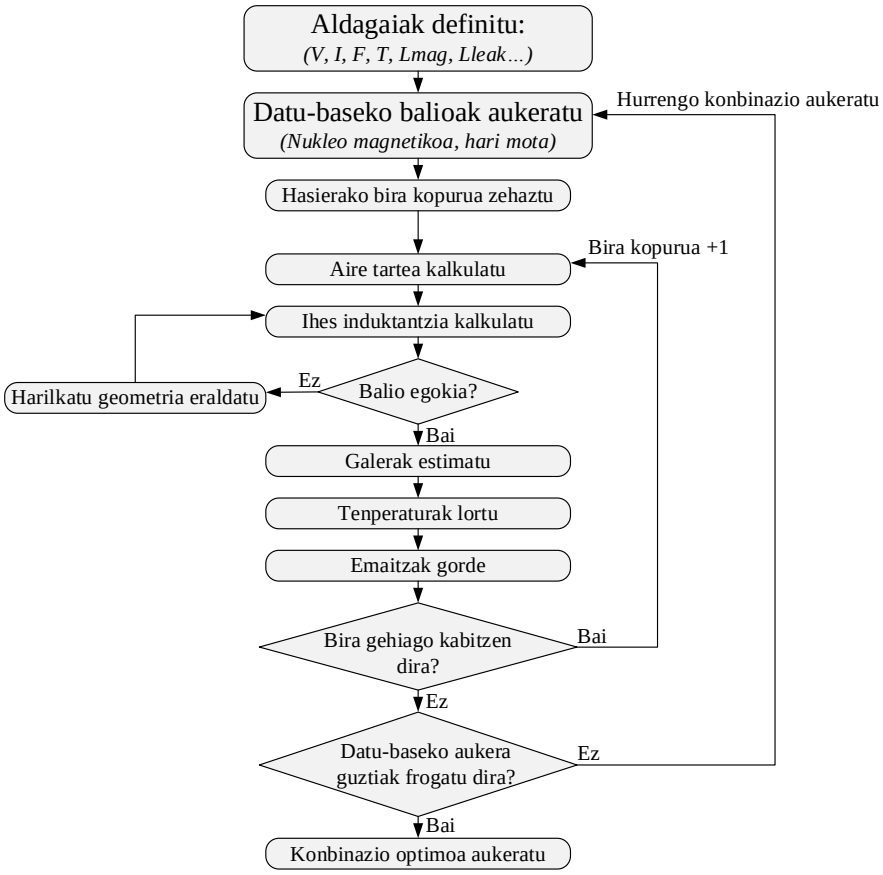
3.2. Frekuentzia altuko elementu magnetikoen diseinua

Elementu magnetiko baten diseinua, lan frekuentziaren igoerarekin konplikatzen da eta sarreran aipatu den bezala, frekuentzia altuetara jotzeak bihurgailuarentzat onura asko ekar ditzake. Horregatik frekuentzia altuetarako aproposak diren elementu magnetikoen diseinuan arreta handia jarri da, 3 estrategia bereiziz:

1) **Optimizazio analitikoan oinarrituak**: minimoen eta maximoen optimizazio metodo klasikoan oinarritzen dira diseinuko parametro aproposak aurkitzeko. Optimizazio hau era analitikoan eta koste konputazional baxuarekin egin daiteke. Sinplea eta bizkorra izan daiteke, baina arazoak izan ditzake arazo konplexuagoak ebazteko.
2) **Ikasketa automatikoan oinarrituak**: algoritmo berezi batzuk entrenatzen dira arazo konplexuak ebazteko. Algoritmoak aldagai ezberdinen arteko erlazio ezberdinak frogatzen ditu, erlazio egokiak aurkitu arte. Sistema hauek hasiera batean aztertzen ez diren efektuak kontsideratu ditzakete, eta automatikoki egokitu daitezke arazo ezberdinetara. Hala ere, algoritmoek aurkitzen dituzten erlazioak ez dira beti baliagarriak hasierako arazoa hobeto ulertzeko, eta horregatik algoritmo hauek kaja beltz bezala kontsideratu behar dira.
3) **Bilaketa sakonean oinarrituak**: ekuazio analitikoetan oinarritzen dira, eta konbinazio asko banaka frogatzen dituzte egokienak aurkitzeko. Horregatik koste konputazional oso altua dute, baina aukera hoberena aurkitzeaz gain, begi-bistaz antzeman ez daitekeen informazio interesgarri gehiago eman dezakete. Aldi berean, baliabide asko xahutzen dituzte soluzio egokiak ez diren konbinazioak aztertzen, eta horregatik soluzio egokia aurkitzeko beste metodoak baino denbora askoz gehiago behar dute.

Artikulu honetan azkeneko taldean zentratuko gara, izan ere 1) estrategia ez da oso egokia aztertu nahi dugun kasuen konplexutasuna eta malgutasuna dela eta, eta 2) estrategiako kaja beltz metodoak jakintza garatzeko aukera murrizten digu.

6. irudia. Bilaketa sakonean oinarritutako diseinu algoritmoa.



Bilaketa sakonean oinarritutako estrategia ezberdinak aurkitu daitezkeen arren, gehiengoan 6. irudian erakusten den algoritmo estruktura jarraitzen da, non datu-base bateko aukera ezberdinentzako harilkatuko bira kopuru ezberdinak frogatzen diren, eta aukera guztien arteko aproposena hautatzen den. Gainera, algoritmo hauek oso flexibleak dira eta era errazean alderatu ditzakegu etorkizunean beste efektu batzuk kontsideratu nahi baditugu.

3.3. Helburu anitzeko diseinua

Azkenik, lan honen helburuetako bat helburu anitzetan oinarritutako SiC edo GaN transistoreko bihurgailuentzako diseinu prozedura bat garatzea da. Bihurgailu bat diseinatzean garrantzia gehiena transistoreei ematen zaie, eta elementu pasiboak diseinuko bigarren fase batean aukeratzen dira. Artikuluaren sarreran aipatu dugun bezala, elementu pasiboak frekuentzia altuko bihurgailuetan transistoreak baino kritikoagoak izan daitezke, eta horregatik transistoreekin batera diseinuko lehenengo fasean kontuan hartu beharko genituzke.

Horregatik, frekuentzia alturako egokiak diren elementu pasiboak diseinatzeaz gain, garrantzitsua da bihurgailuren diseinua helburu anitzetan oinarritzea. Transistoreak eta elementu pasiboen diseinuak fase ezberdinetan eginda, sistemaren optimizazioa elementu ezberdinak banaka optimizatuz egiten da, baina ez dugu zertan sistemaren optimo globala eskuratuko. Helburu anitzen bitartez, diseinu optimo lokalak saihestu daitezke eta sistemaren optimo globala eskuratu.

4. Ondorioak

Artikuluan zehar frekuentzia altuko potentzia bihurgailuetarako elementu pasiboak kritikoak direla azaldu dugu. Argi dago elementu pasiboen frekuentzia altuko funtzionamendu eta diseinu teknikak hobetu behar direla SiC eta GaN transistoreak ahalbidetzen duten aurrerapauso teknologikoa gauzatzeko. Frekuentzia baxuko diseinu teknikak ez dira baliagarriak frekuentzia altuko efektuak direla eta, eta efektu hauek modelatzen dituzten metodo analitikoak aztertu behar ditugu diseinu metodologia apropos bat sortzeko.

Horretaz gain, frekuentzia altuko bihurgailuen diseinuan elementu pasiboei garrantzia gehiago ematea beharrezkoa da, diseinuko lehenengo fasean kontsideratuz transistoreekin batera. Ez bada honela, bihurgailuaren diseinua optimo lokaletan trabatuko da, eta ez dira teknologia berriek aurkezten dituzten abantaila guztiak aprobetxatuko.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Artikulu honetan frekuentzia altuko elementu pasibo magnetikoen gaur egungo arazo nagusiak aurkeztu ditugu eta helburu anitzeko diseinu metodologia bat garatzearen garrantzia zehaztu dugu. Hala ere, oraindik frekuentzia altuko beste hainbat efektu kontsideratu behar ditugu diseinu estrategia sendo bat garatzeko, eta horretaz gain elementu pasibo kapazitiboen analisi sakon bat ere egin behar dugu. Horregatik, etorkizunerako beste efektu hauek aztertuko ditugu eta prototipo ezberdinen bitartez diseinurako erabilgarriak diren modelo analitikoak balioztatuko ditugu. Ondoren, azterketa hauetatik eskuratzen diren aurkipenak helburu anitzeko frekuentzia altuko bihurgailu diseinu estrategia batean integratuko ditugu. Amaitzeko, diseinu estrategiaren bitartez bihurgailu prototipo bat egingo dugu egokia dela ziurtatzeko.

6. Erreferentziak

Dowell, P. L. (1966) ‘Effects of eddy currents in transformer windings’, *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 113(8), p. 1387. doi: 10.1049/piee.1966.0236.

Garcia-Bediaga, A. et al. (2017) ‘Multiobjective optimization of medium-frequency transformers for isolated soft-switching converters using a genetic algorithm’, *IEEE Transactions on Power Electronics*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 2995–3006. doi: 10.1109/TPEL.2016.2574499.

Guillod, T. et al. (2018) ‘Magnetic equivalent circuit of MF transformers: modeling and parameter uncertainties’, *Electrical Engineering*, 100(4). doi: 10.1007/s00202-018-0701-0.

Kolar, J. W. et al. (2016) ‘GOOGLE/IEEE Little-Box Challenge’, Eskuragarri: www.pes.ee.ethz.ch.

Langlois, E. et al. (2020) ‘Design and Evaluation of Nano-Composite Core Inductors for Efficiency Improvement in High- Frequency Power Converters’, *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, 2020-March, pp. 2676–2679. doi: 10.1109/APEC39645.2020.9123995.

Mogorovic, M. eta Dujic, D. (2019) ‘Sensitivity Analysis of Medium-Frequency Transformer Designs for Solid-State Transformers’, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(9), pp. 8356–8367. doi: 10.1109/TPEL.2018.2883390.

Ouyang, Z. et al. (2019) ‘Improved Analysis and Modeling of Leakage Inductance for Planar Transformers’, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 7(4). doi: 10.1109/JESTPE.2018.2871968.

Schlesinger, R. eta Biela, J. (2021) ‘Comparison of Analytical Models of Transformer Leakage Inductance: Accuracy Versus Computational Effort’, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(1), pp. 146–156. doi: 10.1109/TPEL.2020.3001056.

Zhang, K. et al. (2018) ‘Optimization Design of High-Power High-Frequency Transformer Based on Multi-Objective Genetic Algorithm’, *Proceedings - 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition, PEAC 2018*, (1), pp. 1–5. doi: 10.1109/PEAC.2018.8590371.

Zhengzhihong et al. (2018) ‘Study on Insulation Design of High Power High Frequency High Voltage Transformer’, *2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration, EI2 2018 - Proceedings*. doi: 10.1109/EI2.2018.8582317.

Robot-aren itxura estetikoak eta erabiltzaileen preferentziak

Apraiz Iriarte, A., Aztiria Mendizabal, A., Lasa Erle, G.
Mondragon Unibertsitatea, Goi Eskola Politeknikoa, (MU-GEP),
Diseinu Berrikuntza Zentroa (DBZ)

aapraizi@mondragon.edu

Laburpena

Datozen urteetan roboten eta pertsonen arteko bizikidetza handitzea espero da, eta ondorioz, beraien arteko interakzioa optimizatzea beharrezkoa izango da. Robotaren itxura estetikoa bere gaitasunen inguruko informazioa jasotzeko modurik ulergarriena da. Robot askok, pertsonekin hobeto interaktuatzeko itxura humanoidea izaten dute, era honetan pertsonen enpatia handitu egiten baita. Hala ere, robot humanoide hauen artean, estetika aldetik bi tendentzia aurki ditzakegu: itxura teknologikoa izaten dutenak eta pertsona itxura erreala dutenak. Pertsonen preferentzia inplizitua zein den jakiteko helburuarekin Asoziazio Inplizituen Testa (IAT) burutu da. Test honek pertsonen preferentziak ezagutzea ahalbidetu du, bai inplizituki eta baita esplizituki ere. Neurketa inplizituaren emaitzan giza itxurarekiko preferentzia nabarmendu da, eta, neurketa esplizituan, aldiz, itxura teknologikoarekiko preferentzia. Emaitzetan lortu den kontraesan honek etorkizuneko ikerketarako ildo interesgarriak azaleratzen ditu.

Hitz gakoak: Robot Soziala, Asoziazio Inplizituen Testa (IAT), Pertsona-Robot Interakzioa, Uncanny valley

Abstract

In coming years, the coexistence between robots and humans is expected to increase, and therefore, it will be necessary to optimize human-robot interaction. Robot aesthetics is the most understandable way to display information about a robot's capabilities. Many robots that are intended to interact with people often have humanoid aesthetics, because in this way, they increase people's empathy. However, there are two trends within humanoid aesthetics: those with technological aesthetics and those with real-person aesthetics. In order to find out people's implicit preference, an Implicit Association Test (IAT) has been carried out. This test enabled us to find out people's preferences, both implicitly and explicitly. The implicit measure had shown a preference for the real-person aesthetics, and, on the contrary, the explicit measure had shown a preference for the technological aesthetics. This contradiction in the results indicates an interesting future line for further research.

Keywords: Social Robot, Implicit Association Test (IAT), human-robot interaction, Uncanny valley

1. Sarrera

Gaur egun, robotek hainbat aplikazio dituzte testuinguru ezberdinetan; hezkuntzan, osasunean eta industrian batik bat. Datozen urteetan, pertsona eta roboten arteko bizikidetza handitu egingo dela espero da (Lindblom & Alenljung, 2020). Honek pertsonen eta roboten arteko harremanetan aldaketa handia suposatuko du. Ondorioz, beraien arteko interakzioa optimizatzea, garrantzi handikoa izango da, bai gizakion eta baita roboten gaitasunak erabat aprobetxatzeko.

Thrun-en (2004) arabera, robotak hiru multzotan bana daitezke: robotika industriala, zerbitzu profesionaletarako robotak eta zerbitzu pertsonaletarako robotak. Zerbitzu pertsonaletarako roboten multzoan, robot sozialak aurki ditzakegu. Robot sozialak pertsonekin harremana izateko helburua duten robotak dira (Lee et al., 2005) eta beraz, erabiltzaileekin interakzio esanguratsuak sortzen dituzte (Jung et al., 2021). Robot sozialek, robot profesionalek ez bezala, ez dute zertan lan zehatz bat bete behar, baizik eta, emozioak helarazteko, ikasteko, pertsonen keinu naturalak ulertzeko, pertsonalitatea eta konpetentzia sozialak garatzeko helburua dute (Breazeal, 2002; Fong et al., 2003; Jung et al., 2021).

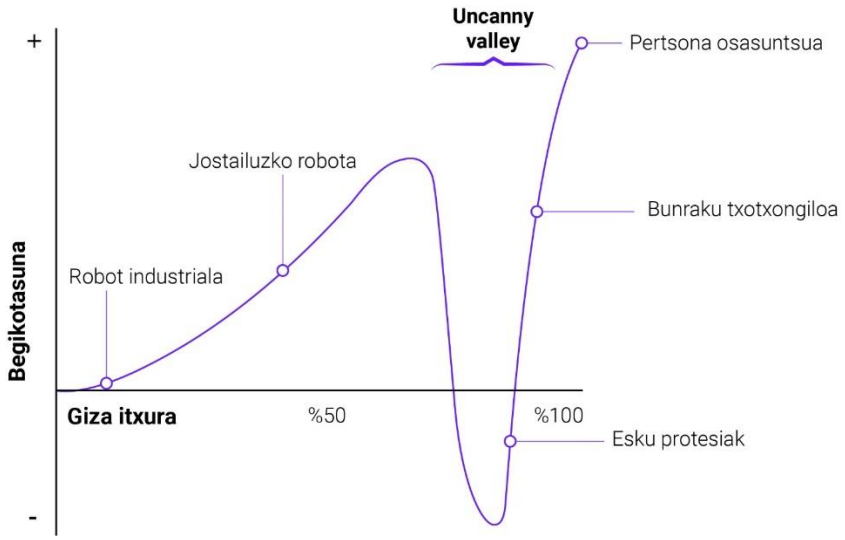
Robotaren itxura estetikoa bere gaitasunen inguruko informazioa jasotzeko modurik ulergarriena da (Hegel, 2012). Ondorioz, robot sozial gehienak antropomorfikoak izaten dira, hau da, giza itxurakoak. Haien helburua pertsonek egiten dituzten hainbat funtzio ordezkatzea baita (Hegel, 2012). Era honetan, giza itxura izateak beren jokaera eta funtzioa erakustea ahalbidetzen die. Horrela, robotaren ulerkortasuna areagotu egiten da beren erabilera intuitiboa bermatzeko.

Izan ere, pertsona itxura duten robotak egokitzat hartzen dira robot-pertsona erlazioa eta interakzioa bermatzeko orduan. Robot hauen itxura estetikoa ezberdina izan arren, beren funtsezko forma antzekoa izaten da, humanoidea. Itxura humanoidearen barnean, ezberdintasunak aurki daitezke haien estetikari dagokionez, baina beren funtsezko itxura, berdina da. Hau da, goiko aldean, burua, begiak, enborra eta esku itxura duten bi gorputz-adar izaten dituzte. Beheko aldean, aldiz, alde batetik bestera aritzeko mekanismo ezberdinak. Hala ere, robot batzuek itxura teknologikoagoa izaten dute, eta beste batzuek, aldiz, giza itxura "errealagoa".

Uncanny valley, Masahiro Mori ikerlariak 1970-eko hamarkadan planteatutako hipotesia da (Mori et al., 2012). Hipotesi honen arabera, robot baten itxura gizatiarragoa den heinean, pertsonon erantzun emozionala geroz eta positiboagoa eta enpatikoagoa izango da, erantzuna gaitzespena bihurtzen den arte. Hala ere, giza itxura handia duenean, erantzun emozionala erabat positiboa bihurtzen da (1. irudia).

Gaur egun industrian aurki ditzakegun robotek, adibidez, ez dute giza itxura izaten (Mori et al., 2012), beren itxura guztiz funtzionala izaten da. Industriako robotek, langileak balira bezala bete behar dute beren lana, baina pertsona itxura duten edo ez, ez dio axola (Mori et al., 2012). Ondorioz, *uncanny valley* hipotesiaren arabera, pertsonek ez dute robotekin kidetasunik sortzen.

1. Irudia: *Uncanny valley* hipotesia. Mori et al. (2012) egokituta.



Bestalde, Hanson et al. (2005) arabera, nahiz eta itxura gizatiarregiak pertsonen onargarritasuna txikitu, itxura estetikoa egokia baldin bada pertsonontzako erakargarria izan daiteke. Horrela izanda, robotaren itxura estetikoak kalitate onekoa izan behar da. Beraz, Hanson-en (2006) arabera, itxura abstraktuagoa edota errealistagoa izateak ez dio axola kalitatea ona baldin bada.

Teoria eta afirmazio ezberdin hauetatik abiatuta, pertsonek inplizituki duten preferentzia zein den jakiteko Asoziazio Inplizituen Testa (IAT, bere ingeleseko siglengatik, *Implicit Association Test*) burutu da. Test honek pertsonek itxura gizatiarra edo teknologikoa ezaugarri positibo edo negatiboekin lotzen duten ezagutzea ahalbidetuko du.

2. Metodologia

Test hau bi atalez osatuta dago: i) lehendabizi, neurketa inplizitua burutu da IAT-aren bitartez, eta ii) galdetegi baten bitartez neurketa esplizitua burutu da.

2.1.Neurketa inplizitua

Informazioa prozesatu ahal izateko, SennsLab giza portaeraren ikerkuntzako softwarea erabili da (Bitbrain Technologies, 2018). IAT-ak pertsonok ditugun errepresentazio mentalen eta kontzeptuen arteko lotura automatikoak aztertzen ditu. Partehartzaileak, softwareak administraturiko estimulu ezberdinak lau kategorietan klasifikatu behar ditu ahalik eta azkarren (Greenwald et al., 1998). Lau kategoria hauek bi multzotan banatzen dira. Partehartzaileak,

estimulua ze multzori dagokion adierazi behar du. Softwareak erabiltzaileak behar izan duen denbora eta akatsak behatzen ditu. IAT-aren logikaren arabera, sailkatze hori errazagoa izango da multzo bateko kategorien arteko lotura handiagoa denean.

Lau kategoria (giza estetika, estetika teknologikoa, positiboa eta negatiboa) eta kategoria horietan eredugarri diren estimuluak erabili dira: giza estetika duten roboten argazkiak, estetika teknologikoa duten roboten argazkiak, konnotazio positiboa duten adjektiboak eta konnotazio negatiboa duten adjektiboak. Ikerketa honek bi elkarketaratzeren arteko kontrastea aztertzea du helburu. Horretarako kategoriak bi multzotan banatzen dira, alde batetik helburuen kontzeptuak (giza estetika eta estetika teknologikoa), eta bestetik atributuen kontzeptuak (positiboa eta negatiboa). Lehenengo, bi multzoak beren artean konparatzen dira (giza estetika positiboarekin eta estetika teknologikoa negatiboarekin), eta ondoren beste konbinazioarekin kontrastatzen dira (giza estetika negatiboarekin eta estetika teknologikoa positiboarekin).

IAT prozedura zazpi multzotan banatzen da (2. irudia). 1, 2 eta 5 multzoak kategoriekin familiarizatzeko balio dute: lehengoan 20 estimulurekin (argazkiak), hau da, giza estetika eta estetika teknologikoen artean kategorizatuz. Bigarrengoan adjektiboekin, positibo eta negatiboren artean klasifikatuz. Eta bostgarrengoan, kategorien arteko posizio aldaketarekin. SennsLab softwarearen bitartez, erantzuteko denbora eta erroreak neurtu dira. Emaitzen analisirako 3, 4, 6 eta 7 dira kontuan hartzen direnak.

2. Irudia: IAT prozedura.

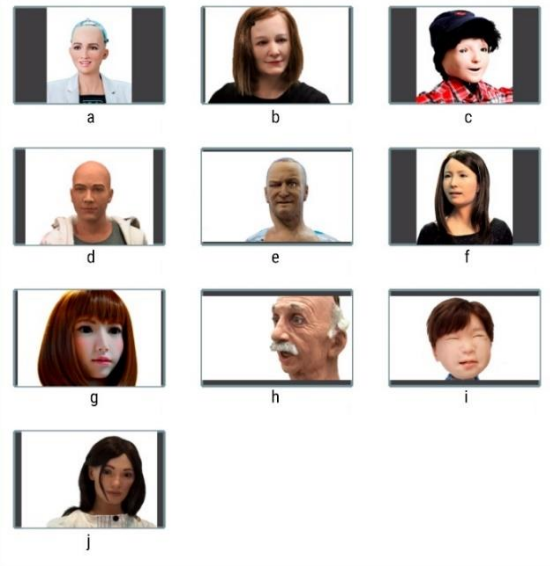
2.1.1. Estimuluak

Robot ezberdinen 20 argazki erabili dira, hamar giza estetikarenak (3. irudia) eta beste hamar estetika teknologikoarenak (4. irudia). Argazki hauetan roboten aurpegiak soilik erabili dira estetika faktorea oinarritzat hartuz, guztiak baldintza berdinetan egoteko.

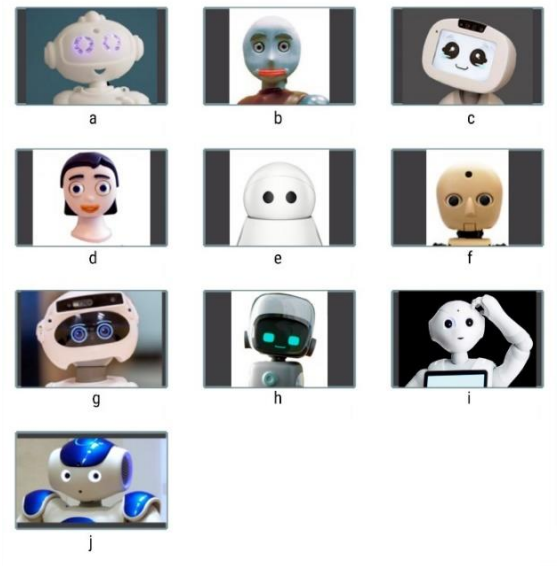
Giza estetika duten robotak honakoak dira (3.1 Irudia): a) Sophia (Hanson Robotics, 2015b), b) Nadine (Institute for Media Innovation (IMI), 2013), c) Kaspar (University of Hertfordshire, 2017), d) Jules (Hanson Robotics, 2006), e) Han (Hanson Robotics, 2015a), f) Geminoid F (Osaka University, 2010), g) Erica (Osaka University & Kyoto University, 2015), h) Albert HUBO (Hanson Robotics, 2005), i) Affetto (Ishihara et al., 2011) eta j)Ai Da (Engineered Arts et al., 2019).

Estetika teknologikoa dutenak aldiz (3.2 Irudia): a) Abii (van Robotics, 2020), b) Bandit (*Interaction Lab*, 2006), c) Buddy (Blue Frog Robotics, 2018), d) Flobi (Hegel et al., 2010), e) Kuri (Mayfield Robotics, 2017), f) M3Synchy (Kumazaki et al., 2017), g) Misty (Misty Robotics, 2018), h) Norby (F6S, n.d.), i) Pepper (SoftBank Robotics, 2014) eta j) Nao (Aldebaran Robotics, 2004).

3. Irudia: Giza itxura eta Estetika teknologikoko kategorietan erabili diren estimuluak.



1) Giza itxura kategorian erabilitako estimuluak.



2) Estetika teknologikoko kategorian erabilitako estimuluak.

Hautatutako atributuak “positibo” eta “negatibo” izan dira. Atributu bakoitzean hamar adjektibo erabili dira:

- **Positiboak:** Profesionala, erakargarria, enpatikoa, mesedegarria, segurua, dibertigarria, ulergarria, atsegina, lagunkoia eta gertukoa.
- **Negatiboak:** Traketsa, zaila, zakarra, iraintsua, ez segurua, ez estimulatzailea, desatsegina, desobedientea, aspergarria eta arriskutsua.

2.2. Neurketa esplizitua

Neurketa inplizituaz gain, partehartzaileek test esplizitu bat bete dute, ebaluazio inplizitua eta esplizituaren artean korrelaziorik dagoen jakiteko asmoz. Neurketa hau burutzeko galdetegi bat erabili da, non jokabidea eta bi kategorienganako (giza estetika eta estetika teknologikoa) jarrera neurtzen duen.

Jokabide intentzioa esplizituki neurtzeko, partehartzaileek Likert-en 7 puntuko eskalaren bidez baieztapenekiko beraien adostasuna adierazi dute, non 1=erabat desados eta 7=erabat ados den. Baieztapen horiek diseinatzeko ondorengo hiru premisak hartu dira kontuan: jokabide intentzioa A1 puntuan, atxikimendua A2 puntuan eta gomendatuko luketen A3 puntuan.

A1: Beharko banu, nahiagoko nuke giza estetika duen robot bat estetika teknologikoa duena baino.

A2: Gehiago gustatzen zait giza estetika robot batentzat.

A3: Hirugarrengo bati giza estetika duen robota gomendatuko nioke.

2.3. Partehartzaileak

IAT esperimentazio honetan Euskal Herriko langile edo ikasle diren 20 pertsonek hartu dute parte, 12 emakumek eta 8 gizonezkok. Bataz besteko adina 23,7-koa izan da (sd=3,16). Partehartzaile guztiek ikusmen normala edo zuzendutakoa dute eta boluntarioki hartu dute parte. Testa era presentzialean burutu da eta partehartzaileak banaka bertaratu dira testa gauzatu ahal izateko.

2.4. Erabilitako gunea eta gailuak

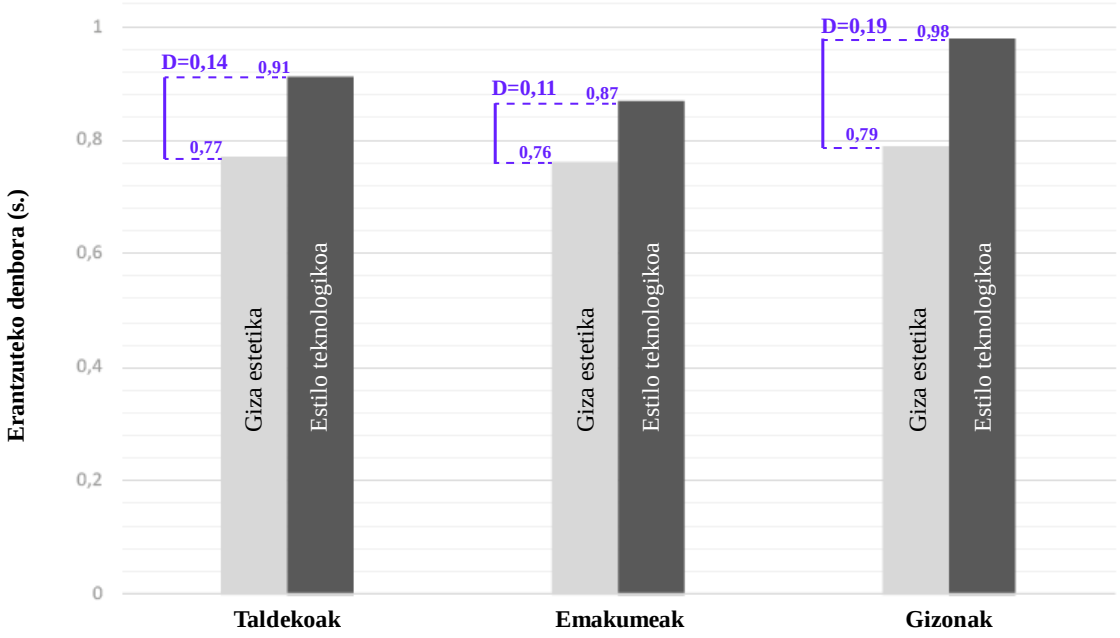
Testa behaketa laborategi batean burutu da, erabiltzaile laborategia deritzona, eta partehartzaile guztiak bertara deitu dira. Laborategian ordenagailu bat ahalbidetu da testa bertan gauzatu ahal izateko. Horretarako, SennsLab softwarea erabili da (Bitbrain Technologies, 2018)

3. Emaitzak

3.1. Ebaluazio inplizituan lortutako emaitzak

Ebaluazio inplizituaren emaitzen arabera, partehartzaileek denbora gehiago behar izan dute itxura teknologikoa eta positiboa asoziatzeko orduan, bai emakumezkoek eta baita gizonezkoek ere. 4. irudian ikus daitekeen bezala, talde moduan 0,77 s behar izan dituzte giza estetikako robotak sailkatzeko, eta, estilo teknologikoa dutenak sailkatzeko aldiz, 0,91 s. Emakumezkoen kasuan, 0,76 s behar izan dituzte giza estetikarako eta 0,87 s estetika teknologikorako. Gizonezkoen kasuan, 0,79 s giza estetikako estimuluak sailkatzeko eta 0,98 s estilo teknologikoko estimuluak sailkatzeko.

4. Irudia: IAT-an lortutako emaitzak.

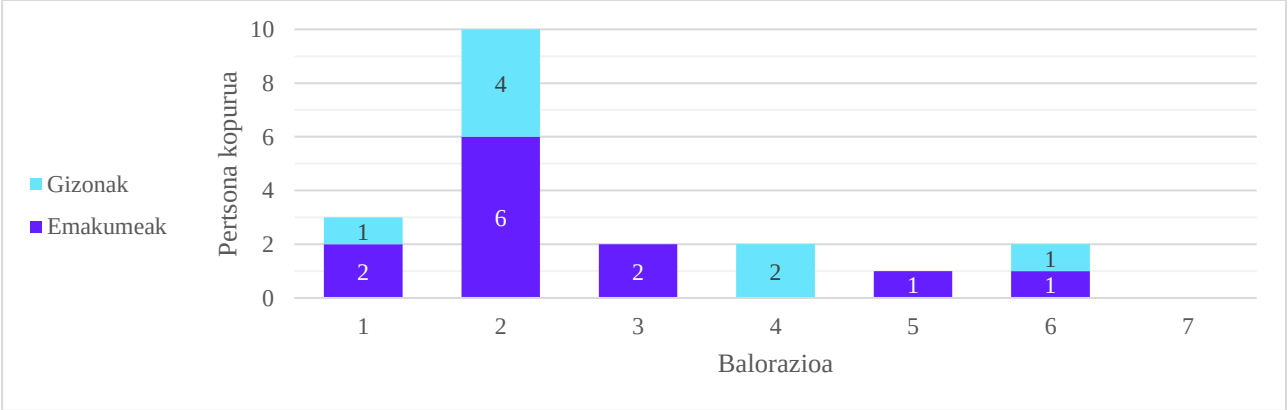


3.2. Ebaluazio esplizituan lortutako emaitzak

Galdetegian lortutako fidagarritasuna 0,88ko Cronbach Alpha balioa dauka, honek esan nahi du galdetegiak fidagarritasun handia duela (George & Mallery, 2003). Balio hau kobariantzen arteko indizea da, eta ondorioz, galdetegiaren barne tinkotasunaren adierazlea.

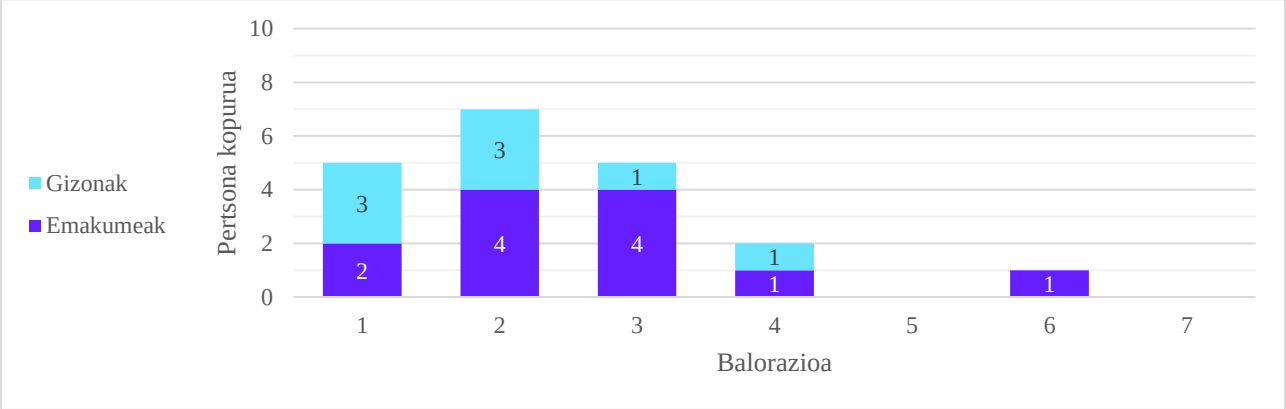
A1 baieztapena partehartzaileen erabilera intentzioan oinarrituta dago. 5. irudian baieztapen honetan lortutako emaitzak ikus daitezke. Hamabost pertsonak (% 75) baieztapenarekiko desadostasuna dutela adierazi dute, hau da, itxura teknologikoa nahiago dutela adierazi dute. Hiru pertsonek (% 15) giza itxura nahiago dutela adierazi dute. Bi pertsonek (% 10) baieztapenarekiko neutraltasuna adierazi dute.

5. Irudia: A1 baieztapenean partehartzaileek bozkatutako emaitzak.



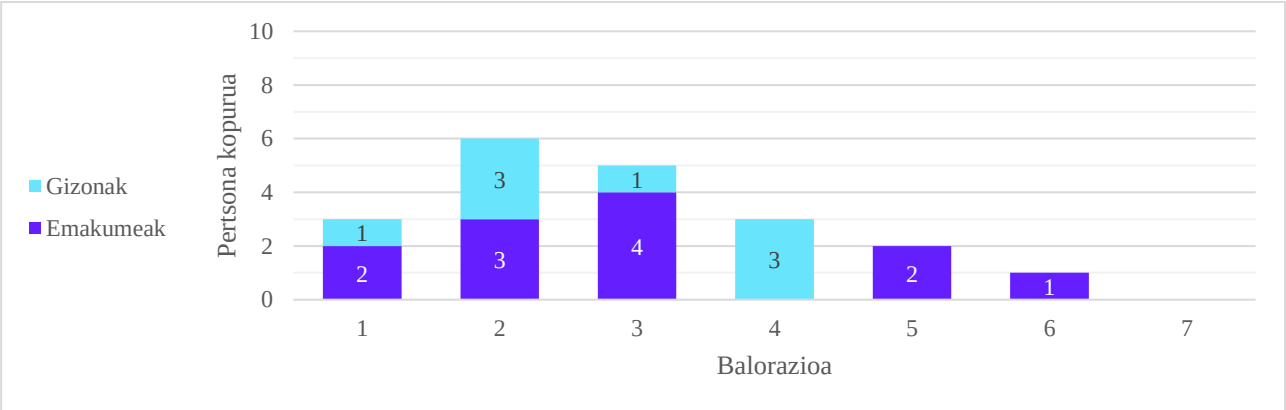
A2 baieztapena atxikimenduan oinarritzen da, hau da, partehartzaileen gustuan. 6. irudian ikus daitekeen bezala, hamazazpi pertsonak (% 85) baieztapenarekiko desadostasuna adierazi dute, hau da, estilo teknologikoa nahiago dutela. Bi pertsonak (% 10) neutraltasuna adierazi dute, eta pertsona bakar batek (% 5) giza itxura nahiago duela.

6. Irudia: A2 baieztapenean partehartzaileek bozkatutako emaitzak.



A3 baieztapenean, partehartzaileek beste pertsona bati zein estetika gomendatuko lioketen adierazten da. 7. irudian ikus daitekeen bezala, hamalau pertsonak (% 70) estetika teknologikoa gomendatuko luketela adierazten dute, hiru pertsonak (% 15) neutraltasuna adierazten dute, eta beste hiruk (% 15) giza itxura.

7. Irudia: A3 baieztapenean partehartzaileek bozkatutako emaitzak.



3.3. Neurketa inplizituaren eta esplizituaren arteko korrelazioa

Pertsonek bai neurketa inplizituan, bai esplizituan dituzten patroiak antzekoak diren ezagutzeko, beren arteko korrelazioa kalkulatu da. Hala ere, ez da beraien arteko korrelaziorik aurkitu. Ikertzaile batzuek diotenaren arabera (de Houwer & Moors, 2007), korrelazio falta hau, neurketa hauek burmuineko prozesu ezberdinetan ematearen ondorio izan daiteke.

4. Eztabaida eta ondorioak

Argi dago teknologia garapena abiadura esponentzialean garatzen doala, eta honek teknologiaren onarpen egokia gertatzea zailago bihurtzen du. Dudarik ez dago, roboten itxura estetikoak teknologia berri hauen onarpenean asko lagun dezakela (Zhang et al., 2015). Ondorioz, garrantzi handikoa da itxura estetikoa pertsonek dituzten lehentasunekin bateratzea eta era honetan, produktu atsegin eta erabilgarriak bermatzea.

Test honen helburua pertsonek roboten estetikarekiko duten preferentzia inplizitua ezagutzea izan da. Horretarako, IAT testa burutu da, erreakzio denboretan oinarritutako testa. IAT-az gain, galdetegi bat ere erabili da partehartzaileek esplizituki beren preferentziak adierazteko.

IAT-aren bitartez lortutako emaitzen arabera, giza estetika eta estetika teknologikoaren artean desberdintasunak daude, izan ere partehartzaileek (bai gizonek eta baita emakumeek ere) denbora gutxiago behar izan dute giza estetika eta ezaugarri positiboak bateratzeko orduan. Honek, giza

estetikarekiko preferentzia inplizitua dutela adierazten du. Hala ere, neurketa esplizituan lortutako emaitzek kontrakoa adierazten dute, partehartzaileek itxura teknologikoa nahiago dutela adierazi baitute.

Baliteke emaitza kontrajarri hauek *Uncanny valley* hipotesiarekin bat egitea. Izan ere, nahiz eta inplizituki giza itxura nahiago izan, esplizituki robot itxura nahiago dutela adierazi dute. Gaur egungo giza itxura duten roboten estetika, ez da guztiz gizatiarra, eta ondorioz horrek gaitzespena sortzen du pertsonengan. Hanson-en (2006) afirmazioarekin bat, giza estiloko roboten itxura estetikoak kalitate ona duten kasuetan, pertsonek erabateko onarpena izaten dute.

Bestalde, neurketa inplizituan lortutako emaitzek multzoetako emaitzak adierazten dituzte. Hala ere, etorkizunerako ildo bezala, interesgarria izango litzateke robot bakoitzak pertsonengan sortutako pertzepzioa aztertzea. Emaitzak bi multzoetan (giza estetika eta estilo teknologikoa) jasotzeak, ez du ahalbidetzen multzo berdineko roboten arteko ezberdintasunak ezagutzea. Hanson-ek (2006) adierazten duen bezala, kalitatearen ondorioz ezberdintasunak handiak izan daitezke.

Emaitzak genero ikuspegitik aztertu diren arren, ez da generoen arteko ezberdintasun esanguratsurik lortu ez neurketa inplizituan ezta neurketa esplizituan ere. Neurketa inplizituan lortutako emaitzak antzekoak dira emakumezkoengan eta gizonezkoengan, eta baita neurketa esplizituan. Dena den, etorkizuneko esperimentazio saioetan genero ikuspegia kontuan hartzea garrantzitsua dela kontsideratzen da, gai konkretu honetan ezagutzen diren ikerketak nahiko urriak baitira.

Azkenik, nahiz eta IAT-aren prozedura eta galdetegiaren barne tinkotasuna egokiak izan diren, emaitza esanguratsuagoak lortzeko lagin handiagoa erabiltzea egokia izango litzateke. Izan ere, 20 pertsonek hartu dute parte, eta emaitzak esanguratsuak diren arren, ildo honetatik ikertzen jarraitzeko lagin zabalagoarekin egitea interesgarria izan daiteke. Horrez gain, bestelako roboten argazkiak erabiltzeak aniztasun handiagoa edukitzea ahalbidetuko luke. Kasu honetan roboten aurpegiaren itxura soilik izan da kontuan, eta, etorkizuneko ildo moduan, robotak bere osotasunean eragiten duen pertzepzioa aztertzea interesgarria izango litzateke, itxuraz haratago, robotaren mugimenduak, hau da, zinematika kontuan izanik.

5. Erreferentziak

Aldebaran Robotics. (2004). *Robot NAO*. https://aliverobots.com/nao/

Bitbrain Technologies. (2018). *Human Behaviour Research | Software de sincronización biométrica | Bitbrain*. https://www.bitbrain.com/es/productos-neurotecnologia/software/sennslab

Blue Frog Robotics. (2018). *BUDDY The Emotional Robot*. https://buddytherobot.com/en/buddy-the-emotional-robot/

Breazeal, C. (2002). Designing sociable machines. In *Socially intelligent agents* (pp. 149–156). Springer.

de Houwer, J., & Moors, A. (2007). How to define and examine the implicitness of implicit measures. *Implicit Measures of Attitudes: Procedures and Controversies*, 179–194.

Engineered Arts, University of Oxford, & Leeds University. (2019). *Ai-Da Robot*. https://www.ai-darobot.com/ai-da-home

F6S. (n.d.). *El robot Norby - GrupoADD*. Retrieved February 24, 2021, from https://www.f6s.com/norbyrobotics

Fong, T., Nourbakhsh, I., & Dautenhahn, K. (2003). A survey of socially interactive robots. *Robotics and Autonomous Systems*, *42*(3–4), 143–166.

George, D., & Mallery, P. (2003). Reliability analysis. *SPSS for Windows, Step by Step: A Simple Guide and Reference, 14th Edn. Boston: Allyn & Bacon*, 222–232.

Greenwald, A. G., McGhee, D. E., & Schwartz, J. L. K. (1998). Measuring individual differences in implicit cognition: the implicit association test. *Journal of Personality and Social Psychology*, *74*(6), 1464.

Hanson Robotics. (2005). *Albert HUBO*. https://www.hansonrobotics.com/albert-hubo/

Hanson Robotics. (2006). *Jules*. https://www.hansonrobotics.com/jules/

Hanson Robotics. (2015a). *Han*. https://www.hansonrobotics.com/han/

Hanson Robotics. (2015b). *Sophia*. https://www.hansonrobotics.com/sophia/

Hegel, F. (2012). Effects of a robot's aesthetic design on the attribution of social capabilities. *2012 IEEE RO-MAN: The 21st IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, 469–475.

Hegel, F., Eyssel, F., & Wrede, B. (2010). The social robot 'flobi': Key concepts of industrial design. *19th International Symposium in Robot and Human Interactive Communication*, 107–112.

Institute for Media Innovation (IMI). (2013). *Nadine Social Robot*. https://imi.ntu.edu.sg/IMIResearch/ResearchAreas/Pages/NadineSocialRobot.aspx

Interaction Lab. (2006). https://uscinteractionlab.web.app/about/robots

Ishihara, H., Yoshikawa, Y., & Asada, M. (2011). Realistic child robot "affetto" for understanding the caregiver-child attachment relationship that guides the child development. *2011 IEEE International Conference on Development and Learning (ICDL)*, *2*, 1–5.

Jung, M., Lazaro, M. J. S., & Yun, M. H. (2021). Evaluation of Methodologies and Measures on the Usability of Social Robots: A Systematic Review. *Applied Sciences*, *11*(4), 1388.

Kumazaki, H., Warren, Z., Muramatsu, T., Yoshikawa, Y., Matsumoto, Y., Miyao, M., Nakano, M., Mizushima, S., Wakita, Y., & Ishiguro, H. (2017). A pilot study for robot appearance preferences among high-functioning individuals with autism spectrum disorder: Implications for therapeutic use. *PloS One*, *12*(10), e0186581.

Lee, K. M., Park, N., & Song, H. (2005). Can a robot be perceived as a developing creature? Effects of a robot's long-term cognitive developments on its social presence and people's social responses toward it. *Human Communication Research*, *31*(4), 538–563.

Lindblom, J., & Alenljung, B. (2020). The ANEMONE: Theoretical Foundations for UX Evaluation of Action and Intention Recognition in Human-Robot Interaction. *Sensors*, *20*(15), 4284.

Mayfield Robotics. (2017). *El robot Kuri - GrupoADD*. https://grupoadd.es/el-robot-kuri

Misty Robotics. (2018). *Say Hello to Your Next Development Platform | Misty Robotics*. https://www.mistyrobotics.com/

Mori, M., MacDorman, K. F., & Kageki, N. (2012). The uncanny valley [from the field]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, *19*(2), 98–100.

Diseinu Berrikuntza Zentroa. (2018). *Nuevo laboratorio de usabilidad en DBZ-MU | DBZ*. https://mukom.mondragon.edu/dbz/2018/11/08/nuevo-laboratorio-de-usabilidad-en-dbz-mu/

Osaka University. (2010). *Geminoid F - ROBOTS:* https://robots.ieee.org/robots/geminoidf/

Osaka University, & Kyoto University. (2015). *Erica - ROBOTS:* https://robots.ieee.org/robots/erica/

SoftBank Robotics. (2014). *Robot Pepper*. https://www.softbankrobotics.com/emea/en/pepper

University of Hertfordshire. (2017). *Kaspar the social robot | Kaspar the social robot*. https://www.herts.ac.uk/kaspar/the-social-robot

van Robotics. (2020). *ABii's World*. https://www.smartrobottutor.com/

Zhang, W., Dai, A., & Rong, Y. (2015). Engineering Design for Robot Aesthetics. *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, *57052*, V01BT02A008.

6. Eskerrak eta oharrak

Lan honetan parte hartu dugun ikertzaileok, Mondragon Unibertsitateko Diseinu Berrikuntza Zentroak (DBZ) eta Mondragon Unibertsitateko Goi Eskola Politeknikoak eskainitako laguntza eskertu nahi dugu.

Instalazio termiko baten modelatze energetikoa

Hernández-Arizaga, A., Picallo-Pérez , A., Sala-Lizarraga, J.M.P.
Euskal Herriko Unibertsitatea. ENEDI ikerketa taldea. Ingeniaritza Energetikoa Saila. Bilboko Ingeniaritza Eskola. Torres Quevedo Ingeniaria Plaza, 1 48013 – Bilbo.
arrate.hernandez@ehu.eus

Laburpena

Eraikinen bizitza erabilgarri luzea dela eta, operazio-unea da kontsumo energetiko gehien daukan aroa. Ondorioz, operazio-portaera analizatu eta optimizatzea da energia aurrezteko erronka nagusia. Lan honetan, funtzionamenduan dagoen instalazio termiko baten energia-modeloa aurkezten da. Instalazioak, Durangoko 26 etxebizitza ur bero sanitarioaz eta berokuntzaz hornitzen ditu. Energia-modeloa definitzeko kutxa grisa eta beltza modelatze teknikak erabili dira, TRNSYS eta Matlab softwareak konbinatuz. Horretarako, gauzatu beharreko modelatze urratsak deskribatzen dira eta modeloak instalazio errealarekin duen lotura zehazten da, ziurgabetasun- parametroak kalkulatuz. Modeloaren ziurgabetasun maila kalkulatzeko, MBE eta C_v(RMSE) indize estatistikoak erabiltzen dira.

Hitz gakoak: Instalazio termikoa, energia-modeloa, TRNSYS, Matlab, ziurgabetasuna.

Abstract

Due to the long useful life of the buildings, the operation time is the period of greatest energy consumption. Consequently, the main challenge for energy savings is to analyze and optimize the mode of operation. This paper presents the energy model of a thermal facility that is in operation. The facility supplies sanitary hot water and heating to 26 homes in Durango. For the definition of the energy model, grey and black box modeling techniques have been used, combining TRNSYS and Matlab software. To do this, the modelling steps to be carried out are described and the relation of the model with the actual installation is determined, calculating the uncertainty parameters. The degree of uncertainty of the model is calculated from the statistical indices MBE and Cv(RMSE).

Keywords: Thermal facility, energy model, TRNSYS, Matlab, uncertainty.

1. Sarrera eta motibazioa

XVIII. mendean, lehen industria iraultzarekin batera, gizakiak erregai fosilen ustiapena areagotu zuen bere energia beharrak asetzeko. XX. mendearen bukaeran, erregai fosilen erabileran oinarritutako energia modeloak mundu mailan klima aldaketa eragiten ari zela onartu zen. Klima aldaketaren eragilea, erregai fosilen errekuntzan atmosferara isurtzen diren eta berotegi efektua sortzen duten gasak dira, karbono dioxidoa besteak beste. Fenomeno honek munduarentzat ekarri ditzakeen ondorio lazgarriak arintzeko, erregai fosiletan oinarritutako energia modeloa aldatzeko ekintzak[1] martxan daude. Energia-modelo berriaren ildo nagusiak, jatorri berriztagarria duten energia iturrien ustiapena modu iraunkorrean egitea eta eraginkortasun energetikoa dira.

Eraikinek bere bizi-ziklo guztian energia kontsumitzen dute. Hauen batezbesteko bizitza erabilgarria 20 urtekoa izanik, operazio-unea da kontsumo gehien daukan aroa. Gaur egun, eraikinek mundu mailako energia-behar guztiaren %40-a kontsumitzen dute[2] eta eraikina ur bero sanitarioz eta konfort termiko baldintzez hornitzen dituzten instalazio termikoei, energia kontsumoaren %50-a leporatzen zaie (Pérez-Lombard et al., 2008) . Gizartearen erosotasun maila handitzen doan heinean, energia-eskaera igotzen da eta hau da hain zuzen ere

[1] https://www.miteco.gob.es/eu/cambio-climatico/temas/default.aspx

[2] www.iea.org/data-and-statistics ?country =WORLD&fuel =Energy% 20consumption&indicato r = TFC Share BySector

etorkizunerako aurreikusten dena (Berardi, 2017). Hortaz, energia aurrezteko ekintzak ezinbestekoak dira. Ondorioz, instalazio termikoen operazio-portaera analizatu eta optimizatzea da eraikinetan energia aurrezteko erronka nagusia. Hala ere, analisi hauek egitea ez da bat-bateko akzioa.

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Eraikinaren energia eskaria baldintzatzen duten faktoreen artean eragin handikoenak tokiko klima- baldintzak eta erabiltzaileen ohiturak dira (Jordan eta Vajen, 2001). Faktore hauek, denboran zehar finkoak ez izatera, energia eskaria aldakorra izatea eragiten dute eta ondorioz, instalazio termikoen portaera, dinamikoa izatera behartzen dute (Sala-Lizarraga eta Picallo-Perez, 2019). Hala, instalazio termiko batean edozein energia-azterketa egiteko beharrezkoa da instalazioan ematen diren masa eta energia trukeak ezagutzea. Horretarako, instalazioak etengabe monitorizatuta egon behar du. Zentzu honetan, instalazioetan sentsoreak jartzeak eta hauek mantentzeak suposatzen duen kostua dela eta, ez dira ugariak (Zhengwei eta Gongsheng, 2013).

Eraikin eta instalazioen energia-portaera dinamikoa ezagutzeko, maiz erabiliak dira energia-simulaziorako softwareekin eraikitako energia-modeloak (Coakley et al., 2014). Energia-modeloek eraikin eta instalazioetan ematen diren fenomeno fisikoak erreproduzitzen dituzte. Energia-simulaziorako softwareak fenomeno fisikoak modelatzen dituzte kutxa zuria, kutxa grisa eta kutxa beltza modelatzeko tekniken bitartez (Afroz et al., 2018). Kutxa zuriaren teknikaren bitartez eraikitako modeloak ezagunak diren lege fisikoak deskribatzen dituzten ekuazioetan oinarritzen dira. Kutxa beltzaren teknikarekin eraikitako modeloak aldiz, datu enpirikoetan. Kutxa grisaren modelatzeko teknika bien artekoa da.

Energia-modeloak eraikitzeko ohikoak diren softwareen artean (Mahmud et al., 2018), TRNSYS eta Matlab aurkitzen dira, besteak beste. Software ezberdinek ematen dituzten aukerak konbinatzen dira energia-modeloaren erantzuna hobetzeko (Picallo-Perez et al., 2020) lanean egiten den bezala. Funtzionamenduan dagoen instalazio batean oinarritutako energia-modelo bat eraikitzen bada eta energia-modelo horretatik ateratzen diren ondorioak aintzat hartzea nahi badira, beharrezkoa da energia-modeloa baliozkotzea. Hau da, energia-modeloaren kalitatea zehaztea ziurgabetasun parametroen kalkuluen bitartez. Energia-modelo baten baliozkotzea, kalibrazio prozesuen bitartez lortzen da.

Kalibrazio prozesu bat aurrera eramateko ez dago prozedura estandarizatu bat. Luze joaten den prozesua da, arlo anitzetako jakintza eskatzen duena eta datu enpiriko asko behar dituena (Hong et al., 2018). Hau dela eta, estandar baten eskakizunen arabera baliozkotuak dauden energia-modeloekin lan egitea ez da ohikoa. Adibide batzuk (Qiu et al., 2018), (Cacabelos et al., 2015), (Cacabelos et al., 2017) eta (Larochelle et al., 2019) lanetan aurkitzen diren energia-modeloak dira.

Lan honetan aurkezten den energia- modeloak, instalazio termiko baten monitorizazio sistemak, urte betez erregistratutako datuak ditu abiapuntutzat. Datuak, SCADA sistema batean biltegiratzen dira. Instalazioaren funtzionamenduaren adierazgarriak diren 8 egunetako erregistroak aukeratu dira eta egun horietan oinarritutako energia-modeloa eraiki da TRNSYS eta Matlab softwareak konbinatuz. Lan honen helburua, energia-modeloaren modelatze-prozesuaren urratsak aurkeztea da eta energia-modeloaren kalitatea zehaztea, modeloaren eta instalazio errealaren arteko energia kontsumoak konparatuz, ziurgabetasun parametrotzat, MBE eta Cv(RMSE) indize estatistikoak erabiliz. Ziurgabetasun parametrotzat MBE eta Cv(RMSE) indize estatistikoen erabilera, beste elkarte aipagarriren artean, ASHRAE elkarteak proposatzen ditu (ASHRAE, 2002). Halaber, modeloa baliozkotzeko indize estatistikoen mugak zeintzuk diren finkatzen ditu.

3. Ikerketaren muina

Atal honetan, lehendabizi, instalazio termikoaren deskribapena egiten da. Ondoren, modelatze-prozesua nola gauzatu den azaltzen da eta azkenik, energia-modeloaren kalitatea zehazten duten ziurgabetasun-parametroen kalkuluak emandako emaitzak adierazten dira.

3.1. Instalazioaren deskribapena

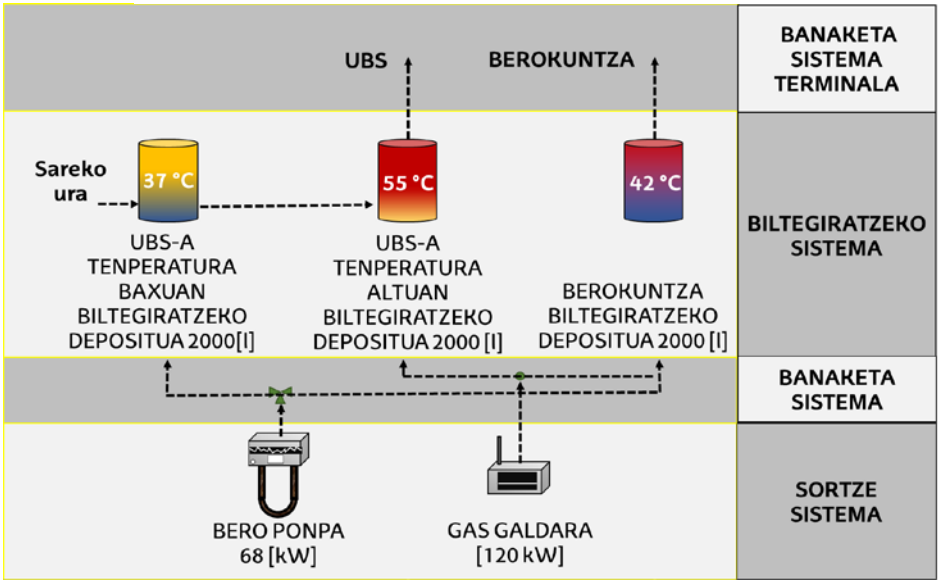
Eraikin batean dagoen instalazio termiko baten helburua, eraikina ur bero sanitarioarekin (UBS) eta konfort termiko baldintzekin hornitzea da. Instalazioa, funtzio ezberdinak dituzten elementuz osatutako multzoa da. Elementuak tutuen bitartez lotzen dira. Tutuak, fluxu bero-eramaileak zeharkatzen dituzte. Ohikoena da, fluxuak osatzen duten sustantzia ura izatea. Hortaz, ur fluxuek beroa eramaten dute instalazio termikoa osatzen duten elementuak zeharkatuz, sortze puntutik, kontsumo punturaino.

1.irudia: Instalazio termikoa kokatzen den eraikina.

Ikerketaren muina osatzen duen instalazioak, Durangoko 26 etxebizitza UBS eta berokuntzaz hornitzen ditu. **1**. irudiak instalazio termikoa kokatzen den eraikina erakusten du.

Zentralizatua den instalazioak eraikin guztia hornitzen du. Energia sorkuntza sistema hibridoa da eta energia metaketarako gaitasuna dauka. Energia sorkuntza sistema 68 kW-ko potentzia izendatuko bero-ponpa geotermiko batez eta 120 kW-ko potentzia izendatuko gas naturala erretzen duen kondentsazio-galdara batez osatua dago. 2000 l-dun 3 depositu dauzka energia metaketarako. 2 UBS-a biltegiratzeko eta 1 berokuntzarako. **2.** irudiak instalazioaren eskema sinplifikatua erakusten du eta ura biltegiratzen den deposituetan agindu tenperaturak adierazten dira.

2. irudia: Instalazio termikoaren eskema sinplifikatua.



Kontrol eta erregulazio sistemak instalazioaren funtzionamendu zuzena ahalbidetzen du eta berokuntzaren ekoizpena urriaren 15-etik maiatzaren 14-ra mugatzen du.

Instalazioa monitorizatuta dago eta sentsoreek egindako erregistroak SCADA sistema baten bidez biltegiratzen dira. Instalazioak dituen sentsoreak, 26 termopare, zirkuitu primarioetan dauden 4 energia kontagailu eta terminaletan UBS eta berokuntza kontsumoa neurtzen duten kontagailuak dira.

3.2. Modelatze-prozesua

Modelatze-prozesuan hiru urrats bereizten dira. Lehenengo urratsaren helburua, oinarrizko energia-modelo bat eraikitzea da. Bigarren eta hirugarren urratsak, energia-modeloaren energia kontsumoa optimizatzean datza.

Modelatze-prozesuaren lehenengo eta bigarren urratsak TRNSYS softwarearekin eman dira. TRNSYS kutxa grisen modelatze teknikan oinarritzen da energia-modeloa sortzeko. TRNSYS-eko liburutegitik hartu dira energia-modeloa osatzen duten elementuak, type deritzenak. Type bakoitza kutxa gris bat da. Honela, type bakoitzak betetzen dituen masa eta energia kontserbapenerako ekuazioak definituta daude eta sarrerako datuak, input-ak, behar ditu ekuazioak bete eta erantzuna, output-a emateko. Type baten input-ak erabiltzaileak definitzen ditu edo beste type baten output-a dira. Modelatzearen hirugarren urratsa, Matlab-en System Identification Tool tresnarekin gauzatu da. Tresna honek, kutxa beltzaren modelatze teknika erabiltzen du ekuazioak sortzeko. Input eta output-ez baliatzen da beraien arteko lotura ezartzeko ekuazio bat sortuz. Exogenous autoregressive (ARX) egituran oinarritutako bi ekuazio sortu dira tresna honen bitartez eta TRNSYS-en eraikitako energia-modeloan sartu da.

Modelatze-prozesuaren lehenengo urratsaren helburua TRNSYS 1 modeloa eraikitzea da. Horretarako type-n aukeraketa, dagokien parametroen definizioa, antolaketa espaziala eta energia-modeloaren kontrola ezarri dira. Pausu hau gauzatzeko, instalazioa osatzen duten elementuen dokumentazio teknikoa, instalazioaren funtzionamendu-printzipioaren eskema eta exekuzio proiektua erabili dira. Lehenengo urratsa osatzeko, energia-modeloaren eskaria zehaztu da. Horretarako, SCADA-n biltegiratutako eta instalazioaren funtzionamenduaren adierazgarritzat hartu diren 8 egunetako energia-kontsumo erregistroak aukeratu dira energia-

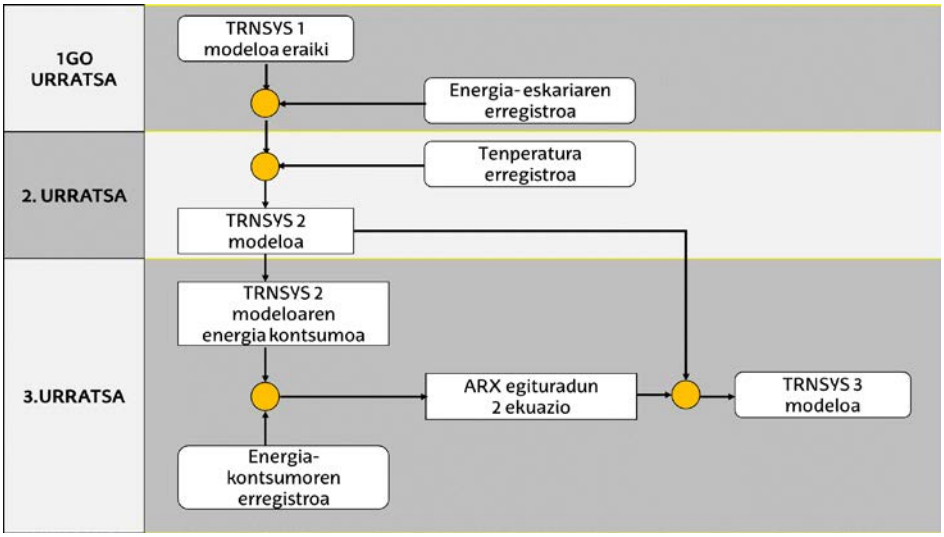
modeloaren eskariaren balio bezala. Eskariaren banaketa eta Durangoko sareko uraren tenperatura (Iturriaga-Hidalgo, 2017) tesian sortutako tresnarekin lortu dira.

Bigarren urratsean, SCADA-n biltegiratutako eta instalazioaren funtzionamenduaren adierazgarritzat hartu diren 8 egunetako, instalazioaren kontrolarekin lotura duten tenperatura balioak hartu dira. Hauek, oinarrizko TRNSYS 1 modeloan input bezala sartu dira energia-modeloaren eta instalazioaren martxa eta geldialdi denbora tarteak parekatzeko. Modelo hau TRNSYS 2 modeloa da.

Hirugarren urratsean TRNSYS 2 modeloak ematen duen energia kontsumoa eta SCADA-n biltegiratutako eta instalazioaren funtzionamenduaren adierazgarritzat hartu diren 8 egunetako energia kontsumoa erlazionatzen dituzten 2 ekuazio energia-modeloan ordezkatu dira, TRNSYS 3 modeloa lortuz.

3. irudiak modelatze-prozesuaren fluxu diagrama erakusten du.

3. irudia: Modelatze-prozesuaren fluxu diagrama.



3.3. Emaitzak

Energia-modeloaren kalitatea zehazten da hurrengo ziurgabetasun parametroak kalkulatuz:

- Batez besteko alborapen-errorea, (mean bias error, MBE).
- Batez besteko balio koadratikoaren aldakuntza-koefizientea (coefficient of variation of the root mean square error, Cv(RSME)).

$$MBE = \frac{\sum_{Denboraldi}(S-M)_{Tarte}}{\sum_{Denboraldi} M_{Tarte}} \times 100 \qquad (1)$$

$$C_v(RMSE_{Denboraldi}) = \frac{RMSE_{Denboraldi}}{A_{Denboraldi}} \times 100 \qquad (2)$$

$$RMSE_{Denboraldi} = \sqrt{\frac{\sum(S-M)^2_{Tarte}}{N_{Tarte}}} \qquad (3)$$

$$A_{Denboraldi} = \frac{\sum_{Denboraldi} M_{Tarte}}{N_{Tarte}} \quad (4)$$

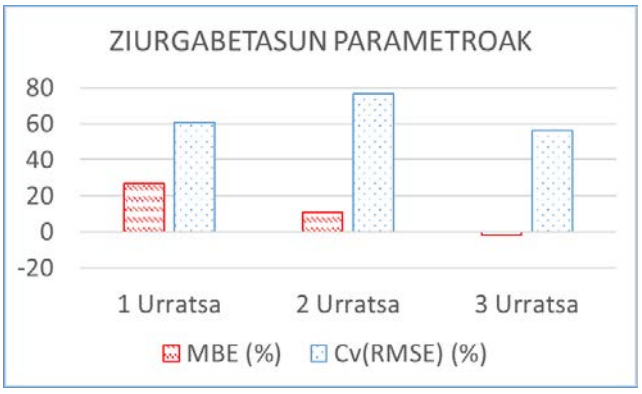
Formuletako ikurrak hauek dira:

- S: energia-modeloaren energia-kontsumoa.
- M: funtzionamenduan dagoen instalazioaren energia-kontsumoa.
- N: denboraldi batean dagoen tarte-kopurua.

Simulazioa instalazioaren funtzionamenduaren adierazgarritzat hartu diren 8 egunetako egin da beraz, 192 ordu simulatu dira. Formuletan, orduero neurtutako energia kontsumoak ordezkatu dira.

Modelatze-prozesuaren urrats bakoitzean ziurgabetasun parametroak kalkulatu dira.Urrats bakoitzean lortutako ziurgabetasun-parametroen emaitzak hurrengo grafikoan erakusten dira:

3. irudia: Modelatze urratsetan kalkulatutako ziurgabetasun parametroak.



Emaitzen arabera, modelizazio prozesuan emandako urratsak energia-modeloaren kalitatea hobetzen dute, MBE eta C_v(RMSE) indize estatistikoen bitartez kalkulatzen den energia-modeloaren ziurgabetasun portzentaia murriztu delako. Lan honetan erakusten den bezalako energia-modelo bat baliozkotuta egon dadin eskatzen zaizkion MBE eta C_v(RMSE) indizeen balioak, ± %10 tartekoak eta %30- etik beherakoak dira hurrenez- hurren ASHRAE elkarteak proposatutakoaren arabera.

4. Ondorioak

Asko dira energia-modeloan neurtzen den ziurgabetasunaren arrazoiak eta jatorria, energia-modeloaren modelatze prozesuan erabiltzen den softwarean aurkitu daiteke, bai instalazio errealean. Ziurgabetasuna murrizteko eta energia-modeloa hobetzeko ezinbestekoa da instalazioaren inguruko informazio zehatza edukitzea.

Lan hau egitearen esperientziatik ateratzen den ondorio garrantzitsu bat da beharrezkoa dela instalazioetan dauden sentsore kopurua handitzea eta sentsoreek jasotzen duten informazioaren bitartez instalazioen portaera dinamikoa deskribatzea.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Lan honek etorkizuneko ikerketetarako bidea irekitzen du. Helburua, eraikinetako instalazio termikoen eraginkortasun energetikoa hobetzearena da.

Horretarako, ekintzetako bat termoekonomia aplikatzea da sistema osoan kostuen banaketaren azterketa zehatza egiteko. Termoekonomiak, termodinamikaren bigarren printzipioaren eta aldagai ekonomikoen bidez, energia kontsumoan eragin handiena duten puntuak zentzuz behatu eta kuantifikatzeko aukera ematen du. Aparteko kontsumo horiek gastu saihesgarri edo saihestezinetan sailkatu daitezke, energiaren, ekonomiaren eta ingurumenaren ikuspuntutik.

Honetaz gain, termoekonomiak ekipoen barne-konexio termodinamikoak direla eta ematen diren efektuak erlazionatzen ditu eta ekipo bakoitzak gainerakoetan zein eragin duen detektatzeko aukera ematen du. Hau funtsezkoa izanik akatsak aztertu eta kontrolatzeko.

6. Erreferentziak

Afroz, Z., Shafiullah, G. M., Urmee, T., & Higgins, G. (2018). Modeling techniques used in building HVAC control systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *83*, 64–84.

ASHRAE. (2002). *ASHRAE Guideline 14–2002, Measurement of Energy and Demand Savings*.

Berardi. (2017). A cross-country comparison of the building energy consumptions and their trends. *Resources, Conservation and Recycling*, *123*, 230–241.

Cacabelos, Eguía, Febrero, & Granada. (2017). Development of a new multi-stage building energy model calibration methodology and validation in a public library. *Energy and Buildings*, *146*, 182–199.

Cacabelos, Eguía, Míguez, Granada, E., & Arce. (2015). Calibrated simulation of a public library HVAC system with a ground-source heat pump and a radiant floor using TRNSYS and GenOpt. *Energy and Buildings*, *108*, 114–126.

Coakley, Raftery, & Keane. (2014). A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *37*, 123–141.

Hong, Langevin, & Sun. (2018). Building simulation: Ten challenges. *Building Simulation*, *11*(5), 871–898.

Iturriaga-Hidalgo,. (2017). *Desarrollo de un método simple para la optimización del diseño de las instalaciones en edificios residenciales de consumo energético casi nulo en el País Vasco.(In Spanish)*. UPV-EHU.

Jordan, & Vajen. (2001). Influence of the DHW load profile on the fractional energy savings: A case study of solar combi-system with TRNSYS simulations. *Solar Energy*, *69*, 197–208.

Larochelle Martin, Monfet, Nouanegue, Lavigne, & Sansregret. (2019). Energy calibration of HVAC sub-system model using sensitivity analysis and meta-heuristic optimization. *Energy and Buildings*, *202*.

Mahmud, Amin, Hossain, & Ravishankar. (2018). Computational tools for design, analysis, and management of residential energy systems. *Applied Energy*, *221*, 535–556.

Pérez-Lombard, Ortiz, & Pout. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, *40*(3), 394–398.

Picallo-Perez, Sala-Lizarraga, Tsatsaronis, & Sayadi. (2020). Advanced exergy analysis in the dynamic framework for assessing building thermal systems. *Entropy*, *22*(1), 32.

Qiu, Li, Pang, Zhang, & Li. (2018). A quick auto-calibration approach based on normative energy models. *Energy and Buildings*, *172*, 35–46. Scopus.

Sala-Lizarraga, & Picallo-Perez,. (2019). *Exergy Analysis and Thermoeconomics of Buildings: Design and Analysis for Sustainable Energy Systems*. Butterworth-Heinemann.

Zhengwei, & Gongsheng. (2013). Preventive approach to determine sensor importance and maintenance requirements. *Automation in Construction*, *31*, 307–312.

7. Eskerrak eta oharrak

Egileek eskertzen dute Eusko Jaurlaritzaren Eraikuntza Kalitatearen Kontrolerako Laborategiak emandako laguntza.

Gibeleko erradioenbolizazioaren CFD simulazioak: odolaren biskositatearen eragina gibeleko hemodinamikan eta mikroesferen distribuzioan

Lertxundi, U.[1], Aramburu, J.[1], Antón, R.[1,2], Bilbao, J.I.[2,3], Rodríguez-Fraile, M.[2,4], Sangro, B.[2,5]

[1]Universidad de Navarra, TECNUN Escuela de Ingeniería, [2]IdiSNA (Instituto de Investigación Sanitaria de Navarra, [3]Departmento de Radiología, Clínica Universidad de Navarra, [4]Departmento de Medicina Nuclear, Clínica Universidad de Navarra, [5]Liver Unit and CIBEREHD, Clínica Universidad de Navarra.
ulertxundi@tecnun.es

Laburpena

Erradioenbolizazioa (RE) gibeleko minbizia tratatzeko metodoetako bat da. Bertan, mikrokateter bidez gibeleko arterian mikroesfera erradioaktiboak injektatzen dira, hauek tumoreak enbolizazio eta erradiazio bidez erasotzeko. Mikroesferen ibilbidea ordenagailu bidezko fluido dinamika simulazioekin (CFD) aztertu daiteke. Kalkulu hauen iraupen luzea arazo bat da medikuntzaren egunerokotasunean simulazioak erabili ahal izateko. Kalkuluak azkartzeko asmoz, odolaren biskositatearen izaera ez-newtondarra izaera newtondarrera sinplifikatu da. Emaitzek erakutsi dute mikroesferen banaketan eta odolaren hemodinamikan biskositate aldakorraren eragina mespretxagarria dela, odola fluido newtondar bezala aztertzearen sinplifikazioa ontzat emanez.

Hitz gakoak: erradioenbolizazioa, gibeleko minbizia, odolaren biskositatea, fluido newtondar eta ez-newtondarrak.

Abstract

Radioembolization (RE) is a treatment for patients with liver cancer. RE consists of the infusion of radioactive microspheres in the hepatic artery using a microcatheter. Microspheres treat tumors by embolization and radiation. The trajectory of the microspheres can be analyzed using computational fluid dynamics simulations (CFD). The long duration of these calculations supposes a problem for their use in the clinical setting. To decrease the simulation time, blood, a non-Newtonian fluid, was considered as a Newtonian fluid. Results show that microsphere distribution and blood flow characteristics barely change when using a Newtonian fluid approach vs. a non-Newtonian fluid approach.

Keywords: radioembolization, liver cancer, blood viscosity, Newtonian and no-Newtonian fluids.

1. Sarrera eta motibazioa

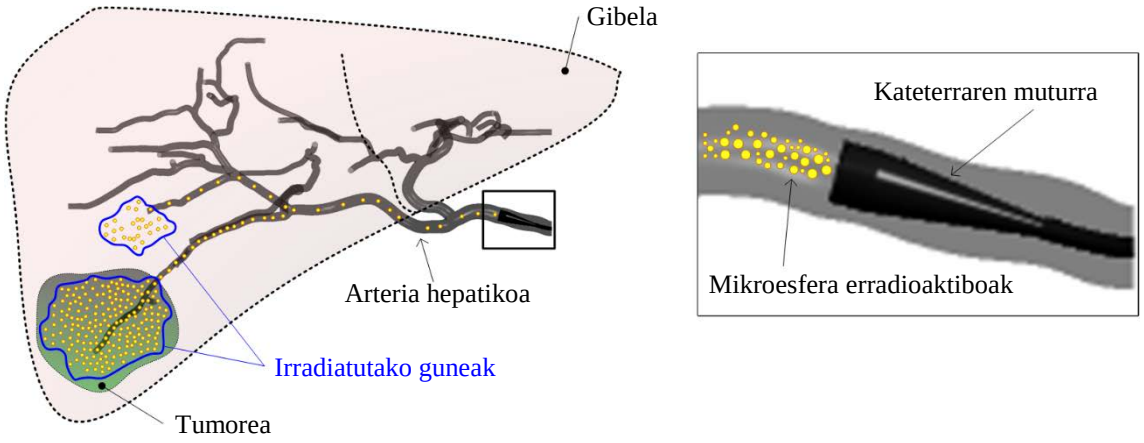
Gaur egungo arazoei aurre egiteko diziplinarteko taldeak sortzeko joera nabaria da, arlo ezberdinetako espezialisten elkarlanaz baliatuz. Gaixotasun larriei aurre egiterako garaian ere ez da gutxiagorik gertatzen. Minbiziaren aurkako tratamenduetan adibidez erradiologo interbentzionistek, erradiologo onkologoek, hepatologoek eta bestelako adituek hartzen dute parte. Tratamendu hauetako bat erradioenbolizazioa da, non mikroesfera erradioaktiboak arteria hepatikoan injektatzen diren tumoreak soilik erasotzeko helburuarekin.

Tratamendua konplexua da oso. Prozedurak izan ditzakeen ika-mikak argitzeko asmoz, ordenagailu bidez, fluidoen dinamika aztertzen da zenbakizko simulazioak gauzatuz (*computational fluid dynamics*, CFD). Era honetan, injektatutako mikroesferek odol-fluxuan zehar jarraitzen duten ibilbidea aztertzen da, azken batean tratamenduaren efizientzia igotzeko asmoarekin.

Lan honen motibazioa, minbiziaren inguruan sortzen diren diziplinarteko taldeetan ingeniariek egin ditzaketen ekarpenak plazaratzea eta ingeniaritzan erabilitako erreminten bidez medikuek izan ohi dituzten galderei erantzunak ematea da.

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Gibeleko minbizia mundu mailan hedatuenetarikoa da bai intzidentzia baita hilkortasun tasari dagokionez ere (Bray et al., 2018). Hainbat tratamendu aurkitu dira minbizi hau sendatzeko, eta, horien artean, erradioenbolizazioa (RE) dago. RE metodo bikoitz bat da. Alde batetik, enbolizazioaren bidez tumoreak elikatzen dituzten odol hodiak ixtea du helburu. Bestetik, energia erradioaktiboa modu selektibo batean aplikatzen da, minbizidun ehunetan soilik aplikatuz, printzipioz. Mikrokateter bidez, itrio-90 (^{90}Y) erradiazio dosi tumorizida handia duten mikroesferak injektatzen dira arteria hepatikoan, gibeleko parenkima osasuntsu mantentzen duten bitartean (ikus 1. irudia).



1. irudia. Gibeleko erradioenbolizazioa, eskematikoki.

Tratamendu honen gakoa, mikroesfera erradioaktiboak minbizi ehunetara soilik iristea da, gibeleko ehun osasuntsua tratamenduarekin ez kaltetzeko. Honetarako, berebiziko garrantzia du mikroesferen ibilbidea aurreikusteak, injekzio-baldintzak ondo finkatu ahal izateko. Horrenbestez, lehen esan bezala, ordenagailu bidezko kalkuluak gauzatzen dira. Hainbat ikerketa garatu dira azken hamarkadan RE bitarteko gibeleko hemodinamika (odolaren dinamika) eta mikroesferen garraioa aztertzen dutenak.

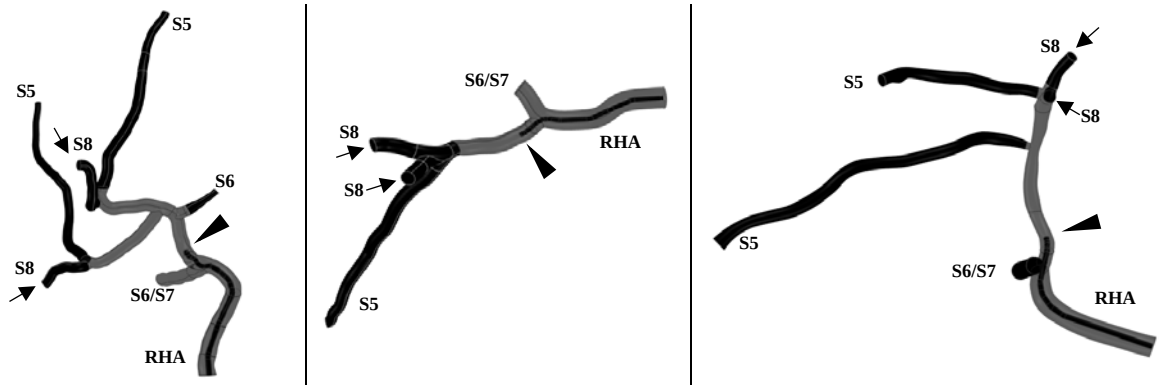
Kalkulu hauek guztiak ordea, denbora asko eskatzen dute gauzatu ahal izateko. Azken funtsa, arlo honetako medikuei, RE planifikatzeko garaian erabakiak hartzen laguntzea izanik, kalkulu hauen iraupena biziki laburtu beharra dago, benetan erabilgarriak izatea nahi bada. Kalkulu-denbora gutxitzen duten hainbat ikerketa gauzatu dira. Beste askoren artean, Childress eta Kleinstreuer-ek arterien malgutasunaren eragina aztertu dute odol hodiak zurrunak balira bezala aztertu zitezkeela ondorioztatuz. Sinplifikazio honek ez du errore handirik gehitzen eta kalkulu-denbora izugarri gutxitzen du (Childress eta Kleinstreuer, 2014). Bestalde, Lertxundi et al.-ek geometrian egindako sinplifikazioak aztertu dituzte emaitzen zehaztasuna mantenduz eta kalkulu-denbora % 60-a inguru gutxituz (Lertxundi et al., 2021).

3. Ikerketaren muina

Artikulu honetan, garatu beharreko kalkulu eta simulazioak sinplifikatzeko asmoz, odolaren biskositatearen eragina aztertuko da. Errealitatean odolak biskositate aldakorra du (hau da, fluido ez-newtondarra) hainbat aldagaiek eraginda: abiadurak, tenperaturak, zizailadura-esfortzuak, eta abar. Hainbat ikerketek jokabide hau kontuan izaten dute simulazioak gauzatzeko unean (Aramburu et al., 2017; Basciano et al., 2010). Bestalde, biskositate baliokide konstante bat ere erabili daiteke fluido newtondarra balitz bezala aztertuz (Roncali et al., 2020). Gure taldearen ordenagailu bidezko kalkuluak gehiago sinplifikatzeko asmoz eta Rocali-ren taldearen hurbilketaz baliatuz, odola fluido ez-newtondar edo newtondar bezala aztertzearen ezberdintasunak ikertu dira.

3.1. Eredu matematikoa eta simulazioak

Couinaud-en arabera (1992), gibela zortzi segmentuz dago osatuta (S1, S2, …, S8). Hiru pazienteren kasuak aztertu dira ikerketa honetan. Hemendik aurrera 1 pazientea, 2 pazientea eta 3 pazientea deituko zaie. Simulazioak gauzatzeko, pazienteen beraien arteria hepatiko sareak erabili dira, MeVis (*MeVis Medical Solutions* AG, Bremen, Alemania) softwarearen bidez lortuak. Hiru kasuetan fikziozko minbizi egoera bera sortu da. Egoera honek 8 segmentuan (S8) dagoen kartzinoma hepatozelular batean (HCC, *hepatocellular carcinoma*) datza. Tumorearen bolumena S8-ko ehun osasuntsuaren % 20a kontsideratu da. Segmentu bakoitzaren bolumenak ere MeVis softwarearen bidez izan dira lortuak. Arteria sare osoa erabili beharrean, Lertxundi et al. (2021) lanean adierazitakoaren baitan moztuko dira geometriak. Ondorengo irudian (ikus 2. irudia) erabilitako hiru pazienteen arteria hepatiko sareak ikus daitezke. Gainera, mikrokateterraren kokapena, tumoreen kokapena eta arteria adar bakoitzak zein segmentura eramaten duen odola daude definituak.



2. irudia. Hiru pazienteen arteria hepatiko sare moztuak. RHA: Eskuin Arteria Hepatikoa (ingelesez: *Right Hepatic Artery*). Gezi-buruek mikrokateterraren kokapena adierazten dute. Geziek tumoredun segmentuetara doazen adarrak adierazten dituzte.

Ikerketa honetan erabilitako eredu matematikoa Aramburu et al. (2017)-ek planteatutakoa da. Laburbilduz, arteria hepatikoko hemodinamika eta injektatutako mikroesferen garraioa kalkulatuko dira. Honetarako, odola fluido isotermo eta konprima ezina dela suposatu da, fluxua erregimen laminarrean aztertuz eta jarrera ez-newtondarra izanik aztergai. Mikroesferen gain eragiten duten indarren inguruan, grabitate-indarra, presio-gradientearen indarra, herrestatze-indarra eta masa birtualaren indarra izan dira kontuan. Odolaren biskositatea ez-newtondar gisa aztertzean, Quemada biskositate eredua erabili da (Buchanan et al., 2000). Newtondar gisa aztertzean ordea, ebakidura-esfortzua handitzean lortzen den biskositate balio konstantea finkatu da, hots, 0,00309 Pa·s.

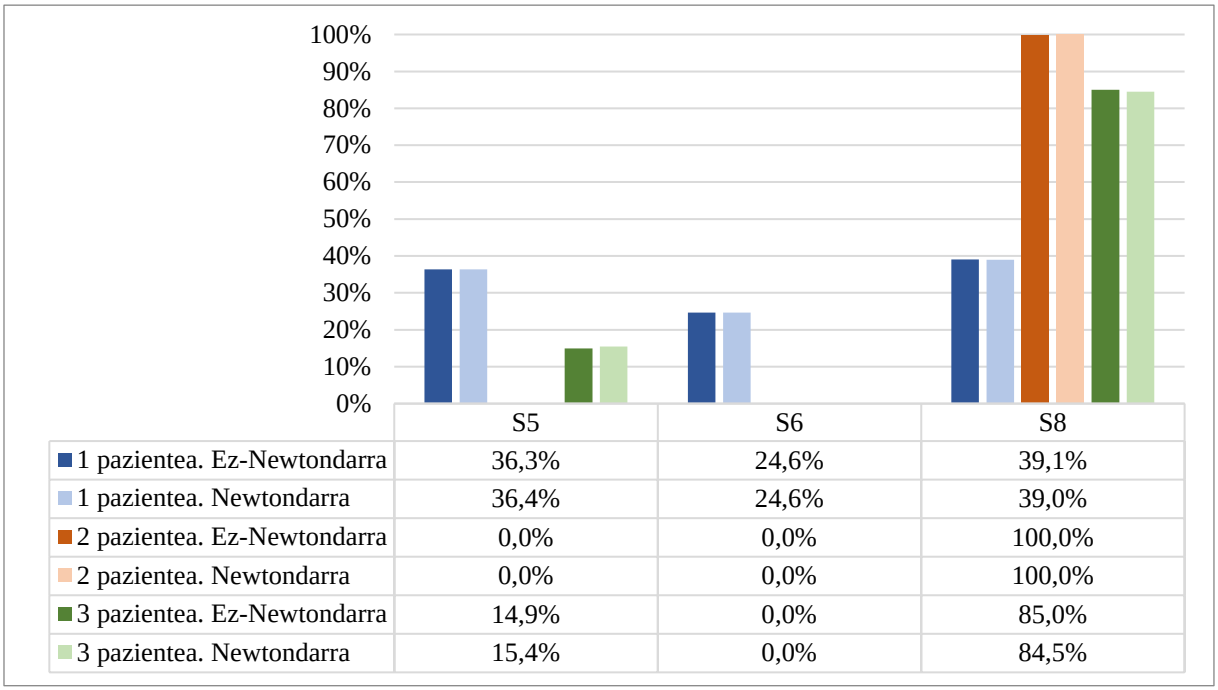
Ordenagailu bidezko kalkuluak burutu ahal izateko, lehenik, geometria tridimentsionala bolumen txikitan zatitu behar da—diskretizazio prozesua. Bolumen txikitan zatitutako geometriari sarea deitzen zaio. Aztertutako geometria guztien sareak, prozedura bera erabiliz garatu dira. Horretarako Fluent Meshing 2020R1 (ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA) softwarea erabili da. Sarea garatzeko erabilitako elementuak poliedro-hexaedro motakoak izan dira, elementu mota honek geometria konplexuetara egokitzeko duen erraztasunagatik eta beste elementu mota batzuekin alderatuz duen elementu kantitate murrizketagatik. Sarearen elementu bakoitzaren, hots, bolumen txiki bakoitzaren, neurri maximoa 0,2 mm-koa eta minimoa 0,02 mm-koa da arterian zehar. Mikrokateterra ordea, 0,05 mm-ko elementuetan zatitu da. Azkenik, pareta inguruko fluxua egoki modelizatu ahal izateko, 4 kapako inflazio geruza sortu da, lehen geruzaren lodiera 0,01 mm-koa izanik, 1,1-eko hazkunde ratioarekin. Geometria bakoitzak, batez beste, 0,8 milioi elementu ditu. Ondoren, muga-baldintzak definitzen dira: sarrera eta irteeretako abiadura edo presioak, eta paretetako baldintzak. Azkenik, injektatuko

diren mikroesferen ezaugarriak finkatzen dira: kopurua, materiala, tamaina, injekzio-abiadura, eta abar. Aldagai hauek guztiak, Aramburu et al. (2017) lanean definituta bezala gauzatu dira.

Odolaren biskositatearen eragina aztertzeko bi aldagai aztertu dira. Alde batetik, modu kuantitatibo batean aztertuz, injektatutako mikroesferak zein segmentutara iritsi diren aztertu da. Era honetara, biskositate aldakorretik konstantera pasatzean gerta daitezkeen mikroesferen ibilbideen aldaketak aztertu dira. Bestalde, modu kualitatibo batean aztertuz, mikrokateter-puntaren zeharkako planoko fluxu-patroiak aztertu dira abiaduraren magnitude eta bektoreak aztertuz. Era honetara, biskositate aldaketaren ondorioz hemodinamikan gerta litezkeen aldaketak ikusi nahi dira.

3.2. Emaitzak

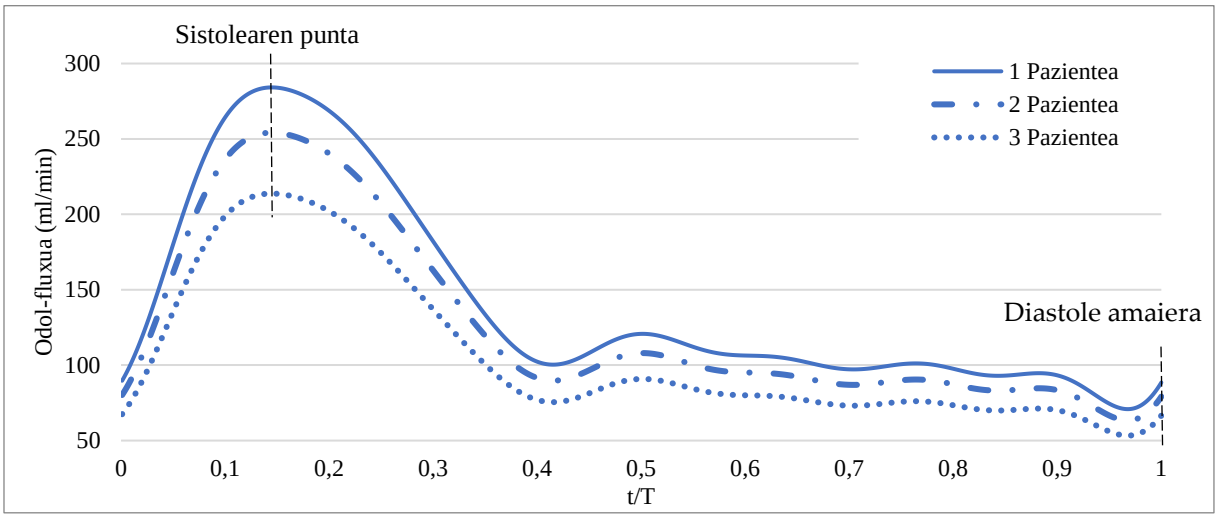
Esan bezala, lortu diren emaitzak bai kuantitatiboki eta bai kualitatiboki aztertuko dira. Emaitza kuantitatiboei dagokienez mikroesferen segmentuz-segmentuzko distribuzioak alderatu dira aztertutako 3 pazienteetan. Hau da, injektatutako mikroesferak zein “irteeretara” iritsi diren ikertu da. 3. irudian ikus daitekeen bezala, eredu newtondarretik, ez-newtondarrerako ezberdintasunak txikiak dira, diferentzia handiena % 0,5-ekoa izanik. Zehatzago aztertuz, 1 pazientean mikroesferak 5, 6 eta 8 segmentuetara iristen dira, eredu batetik besterako aldea % 0,1, % 0 eta % 0,1 izanez hurrenez hurren. 2 pazienteari dagokionez, mikroesfera guztiak 8 segmentura heltzen dira bi kasuetan (% 0ko ezberdintasuna). Eta 3 pazienteari dagokionez, 5 eta 8 segmentuetara iristen dira mikroesferak, % 0,5-eko ezberdintasunarekin bi segmentuetan.



	S5	S6	S8
1 pazientea. Ez-Newtondarra	36,3%	24,6%	39,1%
1 pazientea. Newtondarra	36,4%	24,6%	39,0%
2 pazientea. Ez-Newtondarra	0,0%	0,0%	100,0%
2 pazientea. Newtondarra	0,0%	0,0%	100,0%
3 pazientea. Ez-Newtondarra	14,9%	0,0%	85,0%
3 pazientea. Newtondarra	15,4%	0,0%	84,5%

3. irudia. Segmentuz-segmentuko mikroesfera distribuzioak pazienteka.

Analisi kualitatiboari dagokionez, abiadura-inguruak eta abiadura-bektoreak aztertu dira paziente bakoitzean, eredu newtondarraren emaitzak ez-newtondarrarekin alderatuz. Aldagai hauek mikrokateterraren puntaren zeharkako planoan aztertu dira. Bestalde, abiaduraren balioa denboran zehar aldatzen denez (ikus 4. irudia ziklo kardiako batentzako), emaitzak aztertuko diren denbora unea ere finkatu beharra dago. Emaitzak ziklo kardiakoaren bi denbora une esanguratsutan aztertzea erabaki da: sistolearen puntan, non odolaren abiadura maximoa den, eta diastole amaieran, non abiadurak balio baxuenetarikoa hartzen duen eta zikloaren amaiera den.



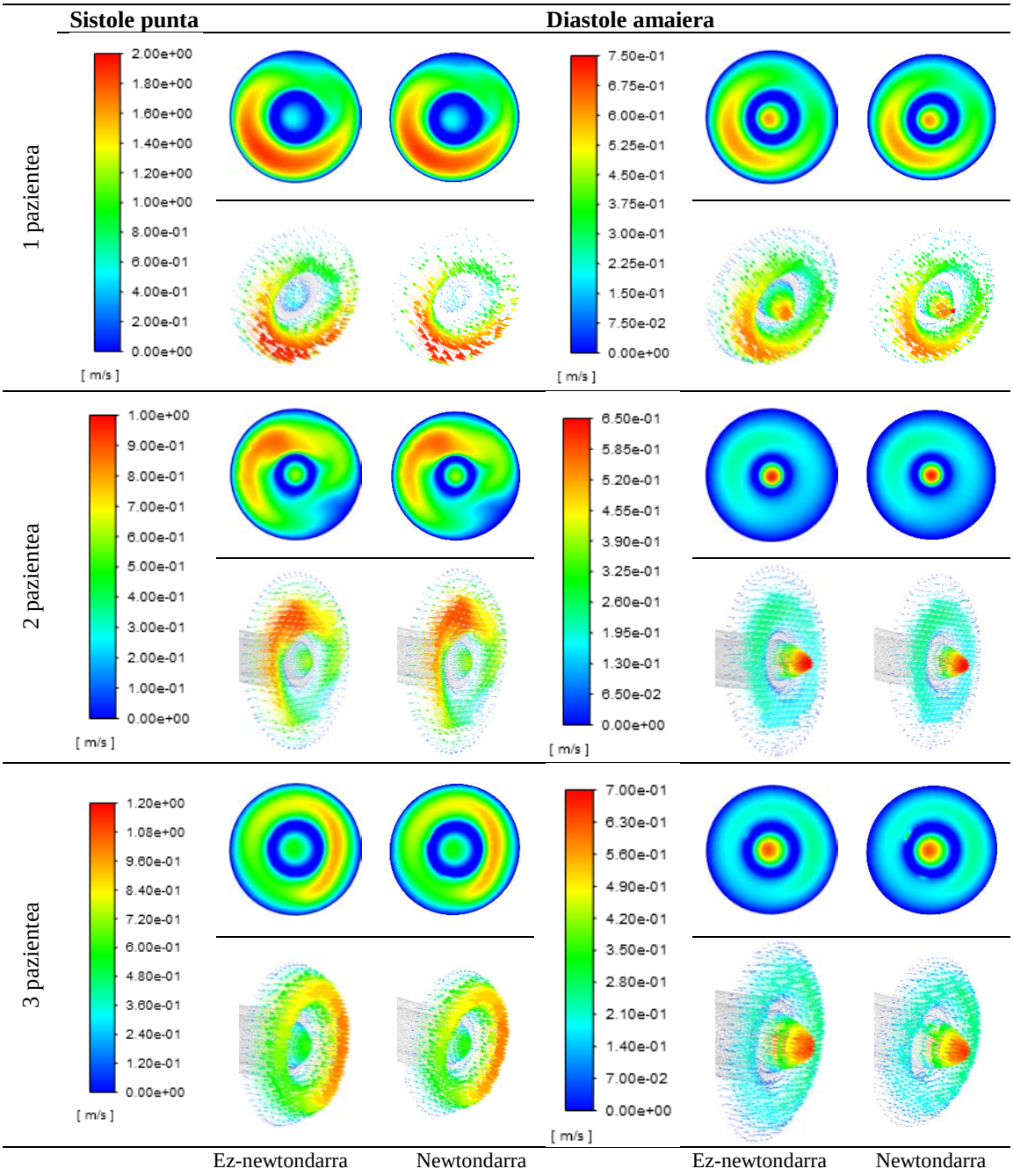
4. irudia. Sarrerako odol-fluxua (inposatutako ziklo kardiakoa). Sistolearen punta (t/T = 0,15, T = 1 s) eta diastole amaiera (t/T = 1, T = 1 s) dira emaitzak aztertuko diren puntuak.

Emaitza kualitatiboei dagokienez, ez da fluxu-patroi aldaketarik nabari eredu batetik bestera (ikus 5. irudia). Hau dela eta, fluidoak jasaten dituen biskositate aldaerak fluxuan duten eragina mespretxagarria dela ondorioztatzen da. Mikrokateterra kokatua dagoen planoan aztertu direnez abiadurak, 5. irudiko kasu bakoitzean azaltzen den abiadura baxuko eraztuna mikrokateterraren muturreko pareta da, hau dela eta, bertako abiaduraren balioa zero da. Eraztun honen barruko gunea mikrokateterretik txertatutako fluxua da. Gainerako guztia, arteriatik datorren odol-fluxua da.

Bai 3. eta bai 5. irudietan aurkeztutako emaitzetan, ezberdintasunak nabari dira paziente batetik bestera. Ezberdintasun hauek geometria ezberdinak izatearen ondorio zuzena dira. Odol-fluxua arterian zehar doan heinean, inertzia hartzen doa arteriak duen formaren baitan (kurbak, adibidez). Esate baterako, gorputz bat txirrista batetik botatzen bada, kurba bat hartzean, alde batera gerturatuko da. Gauza bera gertatzen zaio odolari arterietan zehar. Hau dela eta, geometriak ezberdinak direnez, abiadurak ere ezberdinak dira paziente bakoitzean. Adibidez, abiadura altuagoko puntuak irudiaren beheko aldean azaldu litezke (ikus 5. irudia, 1 pazientea), beste batzuetan goikoan ikusten dira (ikus 5. irudia, 2 pazientea), edo baita alde batean ere (ikus 5. irudia, 3 pazientea).

Emaitza hauetan ez da aztertu tratamenduaren eraginkortasuna—ea mikroesferak tumoreak dituen segmentura bideratu diren ala ez—eta ezin izan da modu alderagarri batean neurtu simulazioek behar izan duten denbora. Dena den, eredu newtondarra erabiltzean ekuazio bat gutxiago ebatzi behar da, Quemadaren ereduaren ekuazioa, hain zuzen ere. Frogatu egin beharko litzatekeen arren, uste dugu eredu newtondarraren erabilerarekin simulazio-denbora murriztu egiten dela eredu ez-newtondarra erabiltzen duen kasuarekin alderatuta.

Azkenik, emaitzak balioztatu beharko lirateke. Izan ere, nahiz eta odolaren portaera newtondarra ala ez-newtondarraren artean ezberdintasunik ia ez dagoen, emaitza hauek errealitatea islatzean dutela ziurtatu beharra dago. Honetarako simulazio bidez lortutako mikroesfera distribuzioak errealitatean gauzatutako ebakuntzarekin alderatu beharko lirateke. Hau Antón et al. (2021)-ek balioztatu dute berriki. Lan honetan aztertutako kasuetako arteria sareak benetako paziente batzuenak badira ere, sortu diren minbizi egoerak fikziozkoak dira, hortaz, kasu zehatz honetan ezin daiteke konparaketa garatu.



5. irudia. Abiaduraren magnitudearen inguruak eta bektoreak. Irudi honetan, ehunekotarako puntua (“.”) erabili da, koma (“,”) beharrean.

4. Ondorioak

Emaitzak aztertzeko garaian, mikroesferen segmentuz-segmentuzko distribuzioan eta odolaren hemodinamikan (mikrokateter puntaren zeharkako planoko fluxu-patroietan) jarri da arreta. Kuantitatiboki aztertuz, mikroesferen distribuzioari dagokionez, ezberdintasun handiena % 0,5-ekoa da. Balio hau guztiz onargarritzat hartzen da. Bestalde, kualitatiboki aztertuz, fluxu-patroien artean ez da inongo ezberdintasunik ikusi. Lortutako emaitzen arabera, mikroesferen distribuzioari eta odolaren hemodinamikari dagokionez jarrera ez-newtondarraren eragina mespretxagarria dela ondorioztatu da, ez baita ezberdintasunik nabari modelo batetik bestera. Hortaz, odola fluido newtondar kontsideratzean egiten den sinplifikazioa ontzat hartzen da. Dena den, erradioenbolizazioaren kasurako eredu newtondarra erabil badaiteke ere, ondorio hau ezin daiteke orokortu. Adibidez, oso arteria txikietan edo odol-fluxua asko murrizten den kasuetan eredu ez-newtondarra erabili beharko da.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Ikerketa-lerro honen helburu nagusia paziente bakoitzari egokitutako erradioenbolizazio tratamendua garatu ahal izatea da. Tratamendu honetan aldagai ezberdin ugari finkatu behar dira, hala nola, erabiliko den mikrokateter eta mikroesferak, mikrokateterraren kokapena, mikroesferen injekzio-abiadura, eta abar. Aldagai hauetako asko ordenagailu bidezko CFD simulazioen bidez finkatu daitezke zuzenean. Gainera, paziente bakoitzari egokitua dela ziurtatzeko, bakoitzaren arteria-sarearen kopia digital batean gauzatzen dira beharrezkoak diren kalkuluak. Metodo hau erabilgarria izan dadin, prozesu osoaren iraupena (gaixoaren gibelaren irudia hartzetik tratamendua planteatu arteko iraupena) ordu gutxi batzuetara murriztu beharra dago, kalkuluetan erabiliko den gibelaren irudia (hau da, arteria-sareak, tumoreen kokapen eta neurriak) aldatu ez daitezen prozesuak irauten duen bitartean.

Gaur gaurkoz, prozesu honen iraupena altuegia da oraindik. Kalkulu-denbora gutxitu ahal izateko eredua sinplifikatu beharra dago. Hau dela eta, azken ikerketak, artikulu hau barne, ildo honetan ari dira lanean. Bestalde, lan ugari geratzen da oraindik. Bide ezberdinak daude helburua lortu ahal izateko, geometrian eginiko sinplifikazioak (Lertxundi et al., 2021), kalkulu matematikoen sinplifikazioa (artikulu hau bera), 3D-tik 1D / 0D-ko ereduetara sinplifikatzea, eta abar. Dena den, sinplifikazio bakoitzak zehaztasuna mantentzen duela ziurtatu beharra dago, adibidez, simulazioen emaitzak benetako pazienteen emaitzekin alderatuz, errealitatea irudikatzen duen erreminta garatzen dela egiaztatzeko.

6. Erreferentziak

Antón, R., Antoñana, J., Aramburu, J., Ezponda, A., Prieto, E., Andonegui, A., Ortega, J., Vivas, I., Sancho, L., Sangro, B. (2021), A proof-of-concept study of the in-vivo validation of a computational fluid dynamics model of personalized radioembolization, *Sci. Rep.*, 11, 1–12.

Aramburu, J., Antón, R., Rivas, A., Ramos, J.C., Sangro, B., Bilbao, J.I. (2017), Computational particle–haemodynamics analysis of liver radioembolization pretreatment as an actual treatment surrogate, *Int. J. Numer. Method. Biomed. Eng.*, 33, e02791.

Basciano, C.A., Kleinstreuer, C., Kennedy, A.S., Dezarn, W.A., Childress, E. (2010), Computer modeling of controlled microsphere release and targeting in a representative hepatic artery system, *Ann. Biomed. Eng.*, 38, 1862–1879.

Bray, F., Ferlay, J., Soerjomataram, I., Siegel, R.L., Torre, L.A., Jemal, A. (2018), Global cancer statistics 2018: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries, *CA. Cancer J. Clin*., 68, 394–424.

Buchanan, J.R., Kleinstreuer, C., and Comer, J.K. (2000), Rheological effects on pulsatile hemodynamics in a stenosed tube, *Comput. Fluids.*, 29, 695–724.

Childress, E.M., Kleinstreuer, C. (2014), Impact of fluid-structure interaction on direct tumor-targeting in a representative hepatic artery system, *Ann. Biomed. Eng.*, 42, 461–474.

Couinaud, C. (1992), The anatomy of the liver, *Ann. Ital. Chir*., 63, 693-697.

Lertxundi, U., Aramburu, J., Ortega, J., Rodríguez-Fraile, M., Sangro, B., Bilbao, J.I., Antón R. (2021), CFD Simulations of Radioembolization: A Proof-of-Concept Study on the Impact of the Hepatic Artery Tree Truncation, *Mathematics*, 9, 839.

Roncali, E., Taebi, A., Foster, C., Vu, C.T. (2020), Personalized Dosimetry for Liver Cancer Y-90 Radioembolization Using Computational Fluid Dynamics and Monte Carlo Simulation, *Ann. Biomed. Eng.*, 48, 1499–1510.

7. Eskerrak eta oharrak

Autoreek Cátedra Fundación Antonio Aranzábal - Universidad de Navarra-ren laguntza eskertu nahi dute. U. Lertxundi-k bere esker ona aitortu nahi dio Eusko Jaurlaritzako Hezkuntza Saila-ri “Doktore ez diren ikertzaileak prestatzeko Doktoratu Aurreko Programako laguntza”-ren bidez emandako laguntza ekonomikoagatik.

Instalazio termikoen Termoekonomia-diagnostikoa

Prol-Godoy, I., Picallo-Perez, A., Sala-Lizarraga, J.M.P.
ENEDI ikerketa taldea, Ingeniaritza Energetikoko saila, Euskal Herriko Unibertsitatea (Bilboko ingeniaritza eskola. Pl. Ingeniero Torres Quevedo, 1 48013-Bilbo)
iratipg@gmail.com

Laburpena

Baliabide fosilak agortzen daudelako edo klima-aldaketa dagoelako, energia aurrezteko hainbat teknika sustatu dira. Instalazio termikoen mantentze-lanak funtsezkoak dira ekipoen eta sistemen funtzionamendu egokia bermatzeko. Horretarako, diagnostiko bat egitea da gakoa, akatsak detektatu eta ebaluatu ahal izateko. Termoekonomia-diagnostikoak identifikatzen du sistemaren anomalia batek eragindako kostuen igoera.

Horrela, lan honetan azaltzen dira Termoekonomia-diagnostikoa eraikinen instalazio-termikoetan aplikatzeko oinarri teorikoak. Termoekonomia-diagnostikoaren nondik-norakoak eta ikerketarako instalazio esperimentala azaltzen dira, alegia.

Hitz gakoak: Instalazio-termikoa, Termoekonomia-diagnostikoa, exergia.

Abstract

Concern for energy saving due to causes such as the depletion of fossil resources or climate change has encouraged the development of different techniques with the aim of energy saving. The maintenance of thermal installations is one of the key tasks to ensure the proper functioning of equipment and systems. For this, the key is to carry out a diagnosis that allows the detection and evaluation of failures. The thermoeconomic diagnosis is a tool capable of identifying the cost increase due to an anomaly in the system.

Thus, this paper presents the theoretical bases of a research whose objective is to apply the thermoeconomic diagnosis in the thermal installations of buildings, that is, the description of the thermoeconomic diagnosis and of the experimental installation where the research is going to be carried out.

Keywords: Thermal installation, Thermoeconomic diagnosis, exergy.

1. Sarrera eta motibazioa

Lan honetan aurkezten da ikerketa luze baterako oinarri teorikoa: ikerketaren beharra eta hori aurrera eramateko motibazioa.

Eraikinek eraiki, erabili eta eraitsi artean, energia-kontsumo eta ingurumen-inpaktu handia eragiten dute, eraikinak beharrezko zerbitzuez hornitzeko eta eraikitzeko behar den energiaren ondorioz. Europan, eraikinek azken energia-kontsumoaren % 40 eta atmosferara egiten diren negutegi-efektuko gasen isurketen % 36 eragiten dute (Europako Batzordea, Energia Saila, 2020). Espainian, berriz, hirugarren sektoreak (etxebizitzak eta zerbitzuak) % 31ko eragina du energia-kontsumoan (IDAE, 2015).

Instalazio termikoek mantenu-ekintzak jasan bat behar dituzte; horrela bermatzen baitira ekipoen funtzionamendu egokiak eta haien arteko interakzioak. Halere, gehienetan, ekipoak diseinatzen eta horien kontrola optimizatzen dihardute ikerlariek. Kontuan hartu behar da ekintza horiek, diseinua eta optimizazioa, alegia, behin bakarrik inplementatzen direla, mantentze-lana ez bezala, instalazioaren balio-bizitza osoan zehar egin behar delako. Horregatik, FDD diagnostikoa (fault detection and diagnosis) funtsezkoa da akatsak detektatzeko eta ebaluatzeko.

Diagnostikoa sistema automatikoen bidez egiteko instalazioan sentsoreak behar dira eta datuak denbora errealean irakurri behar dira. Tamalez, datu horien kalitatea askotan degradatuta dago,

eta horrek nabarmen mugatzen du diagnostiko- eta kudeaketa-sistemen potentziala, bai eta kontrol-sistemarena ere. Gainera, zaila da erregistro dinamikoetan datu akastuak iragaztea.

FDD teknika berritzaile bat dago, exergian oinarritzen dena eta Termoekonomia-diagnostikoa deritzo. (Yoo et al., 2018)

Azal ditzagun banan-bana exergia, Termoekonomia eta Termoekonomia-diagnostikoa:

- Exergiak energia batek lanean bihurtzeko duen gaitasuna adierazten du, alegia, kalitatea. Energia-forma batzuk osorik bilaka daitezke lanean, adibidez energia elektrikoa non energia guztia exergia baita. Baina badira beste energia-forma batzuk, hala nola beroa, zeinentzat zati bat bakarrik lanean bihur daitekeen, eta horrela bero-fluxu baten zati bat bakarrik da exergia-fluxua. (Picallo et al., 2020)
- Termoekonomiak, termodinamika- eta ekonomia-teorien bidez, prozesu batean kontsumitutako baliabide naturalak kuantifikatzen ditu, eta, beraz, kontsumitutako baliabideei dagokienez, produktu jakin baten kostua ematen du. Exergia-analisia eta ekonomia-analisia konbinatzen ditu, eta fluxuei diru-kostuak esleitzen dizkio; fluxuak, oro bat, exergia fluxuak dira zeintzuek energiaren kalitatea adierazten baitituzte. Beraz, ohiko energia-analisiekin lortu ezin daitekeen informazioa ematen du. (Valero eta Torres, 2006)
- Termoekonomia-diagnostikoa erabiliz identifikatzen dira sistemaren anomaliek eragindako kostu igoerak. Sistemaren anomaliak akats txikiak dira, instalazioaren guztizko geldialdia eragiten ez dutenak, baina bai aldiz, kontsumo igoera. Anomalia hauek ekipoen jarreran eta horien arteko interakzioetan eragiten dute eta funtzionamendu-egoera aldatzen dute etekina murriztuz.

Anomalia bat intrintsekoa izan daiteke (osagai baten barruko errore baten ondorioz) edo induzitua (akatsa nahiz eta beste ekipo batean egon, zeharka eragiten du alboko osagai baten funtzionamenduan). Termoekonomia-diagnostikoaren helburua anomalia intrintsekoak eta induzituak aurkitzea da eta horien eragina kuantifikatzea.

Hala ere, nahiz eta interes handikoa izan, eta, Termoekonomia-diagnostikoa eraikinetan aurrerapen handia ekar dezakeen arren, ikerketa-fasean dago, eta eguneroko jardunean oso gutxi erabiltzen da. Industria-munduan Termoekonomiaren adar honetako argitalpenak badaude ere, eraikinen-instalazioen arloan lan gutxi daude. Halere, aipatu beharra dago argitaratu berri den “Exergia-analisia eta Termoekonomia eraikinetan: energia-sistema jasangarrien analisia eta diseinua” liburua. (Sala eta Picallo, 2019)

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Ikerketa honen helburua da eraikinen energia-instalazioetan Termoekonomia-diagnostikoa aplikatzea. Horretarako, instalazio esperimental batean egingo dira saiakuntzak eta emaitzak Termoekonomia-diagnostikoa eraikinetan garatzeko erabiliko dira. Instalazio esperimentala Eusko Jaurlaritzako Eraikuntzaren Kalitatea Kontrolatzeko Laborategian (EKKL) dago. Instalazio esperimental modulagarria da, eta hainbat energia-teknologia aztertzen ahalbidetzen du. Teknologien arteko integrazioa ebaluatzeko erabiltzen da eta baita energia berriztagarri berriak ikertzeko ere. Instalazio honen interesik handiena bere izaera erdi-birtuala da, hau da, edozein etxebizitzatarako berokuntzaren eta ur bero sanitarioaren (UBS) eskaera-profilak kalkulatzen dira TRNSYS (Transient Simulation System) softwarearekin simulazioa eginez eta kontrol-sistemaren bidez, etxebizitzaren eskaera-profil hori leialki erreproduzituko duen bero-kantitate bat barreia daiteke.

TRNSYS sistema iragankorren portaera simulatzeko erabiltzen den softwarea da. Simulazio gehienak energia termiko eta elektrikoko sistemetan oinarritzen diren arren, TRNSYS beste sistema dinamiko

batzuk modelatzeko ere erabil daiteke, hala nola trafiko-fluxua edo prozesu biologikoak. Programak liburutegi zabal bat dauka ekipoak modelatzeko.

Ikerketaren helburua betetzeko, urrats hauek jarraitu beharko dira:

- Instalazio-termikoen diagnostiko-metodologiak aztertu beharko dira; ahalik eta irakurketa bibliografiko zabalena eginez (batez ere, hirugarren sektoreko eraikinen eta egoitzen berokuntzako eta etxeko ur beroko instalazioetan oinarrituz).
- Termoekonomia-diagnostikoaren hastapenak ezagutu beharko dira eta hori aplikatzeko prozedura aztertu beharko da.
- EKKLren instalazio esperimentalaren funtzionamendua aztertu beharko da. Metodologia ikasi eta egingo diren entseguak diseinatu eta eraiki beharko dira.
- Diagnostikoa aplikatzeko saiakuntza esperimentala gauzatuko da eta horretako, ekipo bakoitzaren modelo termikoa lortu beharko da anomaliarik gabeko funtzionamendu-moduan.
- Hautatutako EKKLren ekipoan anomalia bat sartuko da. Hala nola, bero trukagailuari plaka bat kenduko zaio, balbula bat “ito” egingo da, tuturen batean zikinkeria sartuko da, etab. Orduan, berriro egingo da saiakuntza esperimentala anomaliekin eta ondorioak aztertuko dira. Horrela Termoekonomia-diagnostikoa aplikatu eta ebaluatuko da anomaliek eragindako ondorioak aztertzeko eta kuantifikatzeko.
- Ondorio eta eztabaida nagusiak definituko dira Termoekonomia-diagnostikoaren prozedura garatzeko.

3. Ikerketaren muina

Ikerketa hau hasi berria da eta zeregin anitz dauzka helburu guztiak betetzeko. Besteak beste:

- Termokonomia-diagnostikoa aztertzea eta ezagutzea.
- EKKLren saiakuntza-instalazio esperimentala diseinatzea.
- TRNSYSen instalazioa simulatzea.
- Instalazio-termikoaren energia- eta exergia- analisia egitea.
- Instalazioan egon daitezkeen anomaliak aztertzea eta inplementatzea.
- Termoekonomia-diagnostikoaren teoria eraikinetan garatzea.

Orain arte Termoekonomia-diagnostikoaren egoera aztertu egin da eta EKKLen instalazio esperimentalaren funtzionamendua aztertu da. Hori dela eta, azken puntu honetan oinarrituko da ikerketaren muinaren azalpena:

3.1. EKKLko planta esperimentalaren deskribapena

Esan bezala, instalazio modulagarria da eta hainbat sorkuntza-ekipo daude: batzuk erregai fosiletan oinarritzen dira eta beste batzuk energia berriztagarrietan. Ekipo berriak moduluz-modulu txerta daitezke.

Beraz, saiakuntza-banku bat da eta elkartzen da karga termikoak eta elektrikoak simulatzeko sistema batekin; gainera, aldagaiak kontrolatzeko, bistaratzeko eta automatikoki erregistratzeko sistema bat ere badago. Proba-banku honetan beharrezko ekipamendua gaineratuz, saiakera hauek egin daitezke:

- Barne errekuntzako aldizkako motorrak, Stirling motorrak, mikroturbinak, erregai-pilak, etab.

- Biltegiratze termikoko eta elektrikoko sistemak.
- Eguzki-kolektoreak, panel fotovoltaikoak, minigeneradore eolikoak, etab.
- Etab.

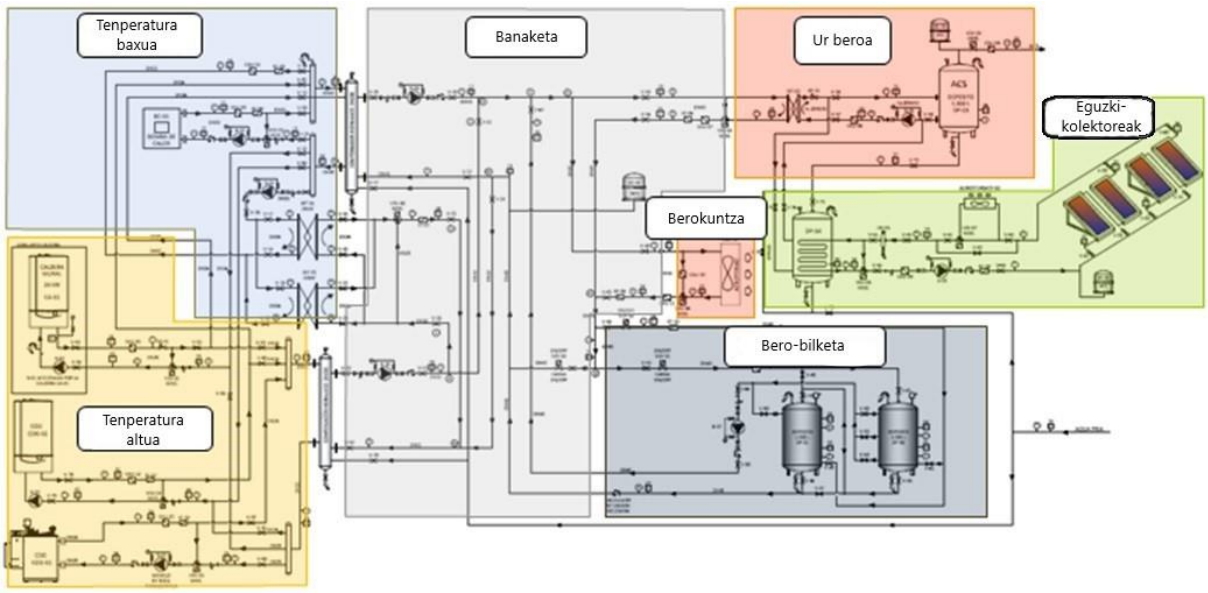
3.2. Egungo ekipoak

EKKLren instalazio esperimentalak gaur egun dituen ekipoak bost modulu nagusitan banatzen dira: (1) tenperatura altua sortzeko modulua, (2) tenperatura baxua sortzeko modulua, (3) biltegiratze termikoa, (4) ur bero sanitarioaren (UBS) ekoizpen modulua (5) berokuntza-kontsumoaren modulua eta (6) eguzki-kolektoreen modulua.

- Tenperatura altua sortzeko, barne-errekuntzako kogenerazio motor bat (5,5 kW elektriko eta 12,5 kW termiko ekoizten ditu), Stirling motor bat (1 kW elektriko eta 5 kW termiko) eta kondentsazio-galdara bat (28 kW termiko UBS eta 20 kW termiko berokuntza, %97ko etekinarekin) daude.
- Tenperatura baxua sortzeko kondentsazio-galdarak ere balio du. Bestalde, aire-ur bero-ponpa bada dago (17.9 kW termiko ekoizten ditu 2.5 balioko COParekin).
- Biltegiratze termikorako 1000 litroko bi tanke daude eta UBSa gordetzen dute. Etorkizunean, fasea aldatzeko materialen biltegiratze-sistema bat sartuko da.
- UBS ekoizteko moduluak 1000 litroko beste tanke bat dauka.
- Beroa disipatzeko modulua aerotermo batek (fan coil ingelesez) osatzen du, gehienez 24,9 kW-ko potentzia termiko nominalarekin.
- Eguzki-kolektoreen moduluak beroa ekoitzen du biltegiratze termikoko UBS tankeetan.

1. irudian planta esperimentalaren printzipio-eskema aurkezten da.

1. irudia. Entsegu-instalazioaren eskema



3.3. Funtzionamendu-modua

Saiakuntza bat martxan jartzeko, instalazio osoaren eragiketa-estrategiak definitu behar dira; alegia, modulu bakoitzaren lehentasunak zehaztu behar dira eta lan-baldintzak ezarri (bai barneko set-pointak eta baita moduluen arteko harreman-baldintzak ere). Funtsezkoa da instalazioak asetu

beharreko eskari-termikoa simulatzea, programatutako eragiketen bidez. Bi eragiketa mota daude: (1) eskaera-kurbak aldez aurretik definitu edo (2) TRNSYS plataforma erdi-birtuala erabili.

- Lehenengo eragiketan etxebizitza kasuari dagokion eskari-kurba diskretizatua programatu behar da. Hau da: berokuntza-eskaria (fan coil edo aerotermoan disipatuko da) eta UBS-eskaria (UBS moduluan disipatuko da).

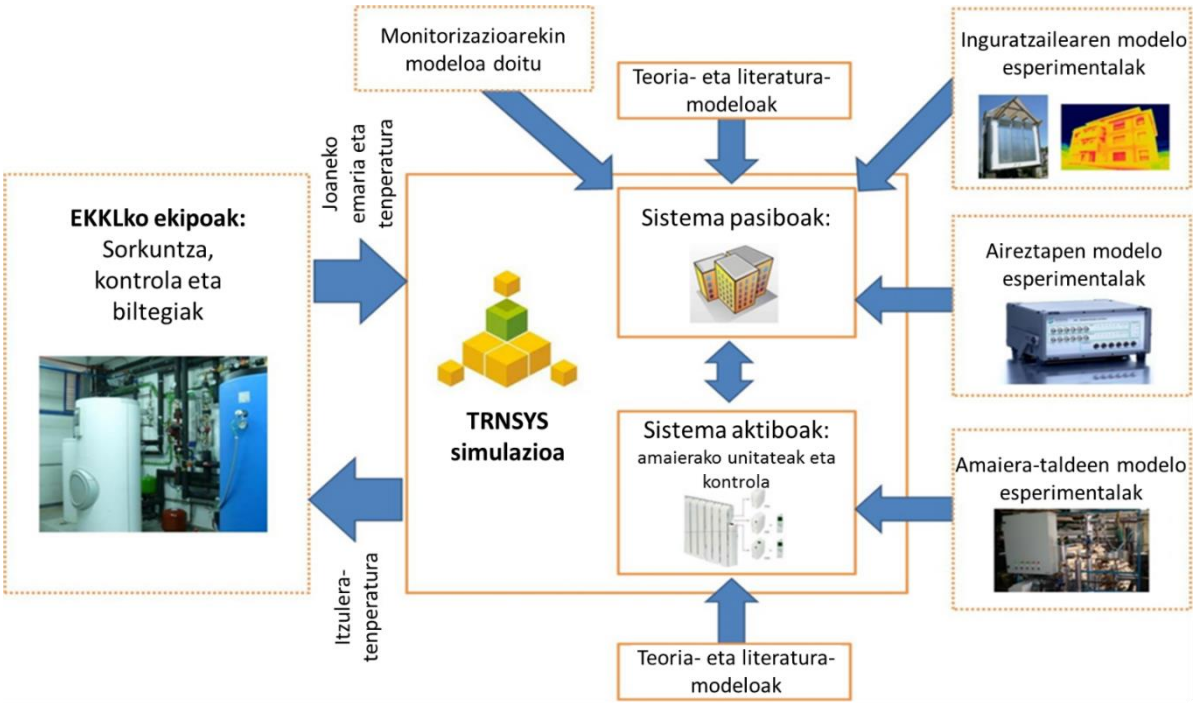
Berokuntza-eskaria emulatzeko aerotermoari ur beroa ematen zaio zirkuitu hidraulikoaren bidez; honek haizagailua modulatuz, aurrez sartutako eskari-kurba disipatuko du. Eskari-kurba potentzia termikoaren balio diskretuetan oinarritzen denez, horiek une oro alderatzen dira lortutako energia-datuekin (ekipoaren tenperatura- eta emari-sentsoreekin) eta horrela modulatzen da.

Ur bero sanitarioaren eskaria ur hotzaren zirkuitu ireki batekin eta ur beroaren zirkuitu ireki batekin zehazten da (biltegian sartzen eta irteten diren emariak, hain zuzen). Aerotermoaren antzera, sistemak erreproduzitzeko UBS eskari-kurba bat programatzen da. Kurba hori diskretizatu egiten da, eta UBS emariaren balioak sartzen dira. Biltegiko irteera-emari erreala kontrolatzen da emari-neurgailu baten bidez eskaera-kurba jarraitzeko.

- Bestalde, instalazioaren ebaluazio esperimentala konbina daiteke TRNSYSeko plataformarekin. Ondorioz, aldez aurretiko eskari-kurbak zehaztu beharrean, eskaria aldiro kalkulatzen da dagokion eraikinarekin eta klima-baldintzekin. Hau da, balio errealak simulazio baten sartzen dira eta instalazioak asetu beharreko eskari berriak kalkulatzen dira; horregatik esaten da plataforma sasi-birtual bat dela.

2. irudian, plataformaren eskema aurkezten da. Eskema horretan bereizten dira prozesu esperimentalak (EKKL ekipoen instalazioa) eta simulatuak (TRNSYS simulazioa). Plataforma honen bidez eraikinaren ezaugarri guztiak integra daitezke (geometria-, arkitektura- eta erabiliera- ezaugarriak, klima, etab.) eta aztertu beharreko ekipoaren edo elementuaren benetako portaera ezagutzen da.

2. irudia. Plataforma sasi-birtualaren azalpena



3.4. Kontrol-sistema eta datuak jasotzea

Instalazioak 120 seinale baino gehiago ditu, aldagaiak kontrolatzeko eta monitorizatzeko, eta horrela bermatzen da informazio zehatza eta funtzionamendu zuzena. Bertan doitasun handiko 46 tenperatura-zunda instalatu dira (Pt 100 1/10 mota), 11 emari-neurgailu elektromagnetiko daude (% 0,1 baino gutxiagoko ziurgabetasunarekin), 2 presostato (bat zirkuitu orokorrean eta bestea barnealdeko tenperaturan), eta hezetasuna neurtzeko sentsoreak.

Instalazioa CPU automata programagarri baten bidez kontrolatzen da eta hedapen-modulu baten bidez kudeatzen da. Horrez gain, seinaleen sarrera- eta irteera-txartelak ere erabiltzen dira, Ethernet bidez PC batera konektatuta. Bertan, interfazea dago eta datuak jasotzen dira.

4. Ondorioak

Ikerketa honen helburua eraikinen instalazio termikoen prebentziozko mantentze-ekintzak indartzea da, Termoekonomia-diagnostikoaren ezagutzak aplikatuz eta sentsoreetatik jasotako datu errealetan oinarrituta. Horretarako, ezinbestekoa da Termoekonomiaren oinarrizko jakintza izatea eta instalazio termikoen jarrera dinamikoa kontuan hartzea. Beraz, ikerketaren nondiko norakoak azaldu ostean, EKKLko instalazio esperimentalaren azalpen sakon bat egin da; hor oinarrituko baitira lanaren garapena eta emaitzak.

"Etxeen hazkunde ekonomikoan, enpleguan, berrikuntzan eta energia-pobrezia murrizten laguntzen du energia-eraginkortasunean inbertitzeak, eta, beraz, ekarpen positiboa egiten dio ekonomia-, gizarte- eta lurralde-kohesioari", (Europar Parlamentua eta Kontseilua. 2012/27/EB Zuzentaraua) eta hori da, hain zuzen ere, ikerketa honen bidez bilatzen dena. Era berean, Europako Helburuen jarduera-ildo bati ekin nahi zaio: energiaren kontsumoa eta karbono-aztarna murriztu erabilera adimendun eta jasangarriaren bidez. Hori guztia, Termoekonomiaren ikuspegitik.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Hasi berria den ikerketa honetan, lortu nahi diren helburu guztiak betetzeko ekintza batzuk egiteke daude. EEKLren instalazioa behin aztertuta, instalazioaren eragiketa-estrategiak definituko dira bai eskaera-kurbak aldez aurretik simulatuz bai eta TRNSYS softwarean instalazioaren ebaluazio esperimentala eginez. Bi funtzionamendu-moduek, ekipoen elkarrekintzaren eta instalazioaren ulermenean bai eta datuen interpretazioan ere lagunduko dute.

Azkenik, ekipoen anomaliak Termoekonomia-diagnostikoaren bitartez aztertuko dira eta anomaliak dakartzan ondorioak kuantifikatuko dira.

Horrela, ikerketan lortutako ondorioen eta emaitzen helburua da eraikinen instalazio-termikoko diagnostikoan aurrerapauso bat egitea, ikerketa mundutik haratago, eguneroko jardunean aplikatzeko nahiarekin.

6. Erreferentziak

Europako Batzordea, Energia Saila (2020): *La eficiencia energética de los edificios,* Brusela, 1 or.

Europar Parlamentua eta Kontseilua. 2012/27/EB Zuzentaraua, 2012ko urriaren 25ekoa, energia-eraginkortasunari buruzkoa, 2019/125/EE eta 2010/30/EB Zuzentarauak aldatzen dituena eta 2004/8/EE eta 2006/32/EE Zuzentarauak indargabetzen dituena. Europar Batasunaren Egunkari Ofiziala L 315, 2012ko azaroak 14, 8. or.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) (2015): *El consumo de energía en España*. [http://guiaenergia.idae.es/el-consumo-energia-en-espana/]

Picallo, A., Sala, J. M., Iribar, E. (2020): Exergia: herramienta para promover la eficiencia energética en los edificios. *Elhuyar*.

Sala, J. M. eta Picallo, A. (2019): *Exergy Analysis and Thermoeconomics of Buildings: Design and Analysis for Sustainable Energy Systems*. Butterworth-Heinemann.

Valero, A., & Torres, C. (2006). Thermoeconomic analysis. Center of Research for Energy Resources and Consumption, Centro Politecnico Superior, Universidad de Zaragoza, Spain.

Yoo, Y., Oh, H. S., Uysal, C., & Kwak, H. Y. (2018). Thermoeconomic diagnosis of an air-cooled air conditioning system. International Journal of Exergy, 26(4), 393-417.

7. Eskerrak eta oharrak

Esker-ona eman nahi zaio Eusko Jaurlaritzaren Etxebizitza Sailari eta azken urteotako Etxebizitza Zuzendariei; bereziki D. Agustin de Lorenzori (Eusko Jaurlaritzako Eraikuntzaren Legediaren eta Kalitate Kontrolaren zuzendaria eta Eraikuntza Kalitatea Kontrolatzeko Laborategiaren zuzendaria (EKKL)).

Gainera, lan hau Eusko Jaurlaritzaren IKASIKER lankidetza-bekak lagunduta egingo da.

Interferentzia elektromagnetikoaren azterketa potentzia-elektronikako sistemetan Si-WBG trantsizio teknologikoaren testuinguruan

Oyarzun, J.[1], Aizpuru, I.[1]

Mondragon Unibertsitatea, Loramendi kalea 4, 20500, Arrasate-Mondragón (Gipuzkoa)
joyarzun@mondragon.edu

Laburpena

Ikerketa honek potentzia-elektronikako sistemetan sortzen den interferentzia elektromagnetikoa (EMI, *Electromagnetic Interference*) aztertu du, baita silizioan oinarritutako gailuetatik banda zabaleko erdieroaleetan (WBG, *Wide Band Gap*) oinarritutako gailuetara igarotzeak duen eragina ere. Helburua EMIaren sorkuntzan eta hedapenean eragiten duten parametroak identifikatzea izan da. Saiakuntza-banku bat diseinatu da parametro hauen aldakortasunak denbora- zein maiztasun-eremuko seinaleetan duen efektua aztertu ahal izateko. Lortutako emaitzekin elektronika-diseinatzaileei potentzia-bihurgailuen diseinurako tresna bat eman nahi zaie; horren bitartez, energia-efizientzia maximoa lortzen saiatzeaz gain, EMI-sorkuntzaren eta bateragarritasun elektromagnetikoko (EMC, *Electromagnetic Compatibility*) araudiaren betekizunei erreparatu ahal izango diete.

Hitz gakoak: potentzia-bihurgailua, banda zabaleko erdieroaleak (WBG), interferentzia elektromagnetikoa (EMI), bateragarritasun elektromagnetikoa (EMC), gidatutako EMIa, erradiatutako EMIa.

Abstract

This research project has analysed the effect of electromagnetic interference (EMI) on power electronics systems, as well as the effect of the transition from silicon-based devices to WBG-based devices. The main goal has been to identify the parameters that have an impact on EMI generation and propagation. A test bench has been designed to analyse the effect of varying these parameters on the main signals (currents and voltages) in the time and frequency domain. The results obtained are intended to provide the electronic designers with a tool to ensure that their designs comply with EMC regulations, as well as maximising energy efficiency.

Keywords: power converter, WBG, electromagnetic interference (EMI), electromagnetic compatibility (EMC), conducted EMI, radiated EMI.

1. Sarrera eta motibazioa

Elektronika gure inguruko enpresentzat giltzarri bihurtu da hainbat arlo estrategikotan, hala nola energia, trenbide-arloa edota mugikortasun elektrikoa. Elektronikaren lan-esparruaren barruan potentzia-elektronikako sistemen erabilera ugaria da etxeetako kontsumo-elektronikan zein industria-aplikazioetan. Sistema hauek kommutazioan lan egiten duten erdieroaleak dituzte, aplikazioaren ezaugarrien arabera aukeratzen direnak. Energia-efizientzia maximizatzea aplikazio hauen guztien helburu komuna da.

Silizioan oinarritutako sistemak nagusi izan dira azken hamarkadetan, baina bere lan-ezaugarrien goi-mugara iristear daude aplikazioen konplexutasuna eta efizientzia-maila handitzearekin batera. Horren ondorioz, behar berriei aurre egin ahal dieten materialen inguruko ikerketa eta garapena etorri da. Behar hauen artean daude, besteak beste, tenperatura, kommutazio-maiztasuna edota tentsio-maila altuagoan lan egiteko aukera. WBG (*Wide Band Gap*) multzoaren barruan dauden konposatuak, karburo-silizioa (SiC) edota galio-nitruroa (GaN) kasu, silizioaren ezaugarriak hobetzen dituzte; erdieroaleen ekoizleek teknologia honen aldeko apustua egin dute (Friedrichs *et al.*, 2016).

Potentzia-elektronikako diseinatzaileek, ordea, aldaketa hauek ekar ditzaketen beste ondorio batzuei ere begiratu behar diete. Hauen artean dago, esaterako, EMIaren eragina. Erradiatutako edo gidatutako seinale moduan azaltzen da, eta inguruko gailu elektronikoen funtzionamenduari edo interferentziaren iturri izan den gailuari berari eragin ahal dio.

Ikertzaileek azken hamarkadetan landutako gaia izan arren, barneratutako eta industria-arlora transferitutako ezagutza mugatua da. Honengatik, potentzia-sistemen diseinuak gutxitan hartzen ditu kontuan aldez aurretik EMIa murrizteko irizpideak eta ohitura onak. Askotan, aldiz, sistemak gauzatu eta eraiki ostean bilatzen eta ezartzen dira interferentzia gutxitzeko neurriak. Arlo honetan enpresek erronka bati aurre egiten diote: bere produktuetako asko saiakuntza eta akats ziklo amaiezinaren ondoren merkaturatzen dira, kasurik onenean, bateragarritasun elektromagnetikoko probak lehen saiakeran gainditzen ez dituztelako.

Beraz, diseinuak era egokian egin ahal izateko ezinbestekoa da ezagutzea EMIaren iturriak zeintzuk diren eta EMIa zirkuitu eta sistemetan barrena nola hedatzen den. Elementu horiek zeintzuk diren jakin besterik ez, funtsezkoa da interferentzia maila kuantifikatzea eta EMIaren eredua egitea, sistemaren portaera simulatzeko eta aurreikusi ahal izateko.

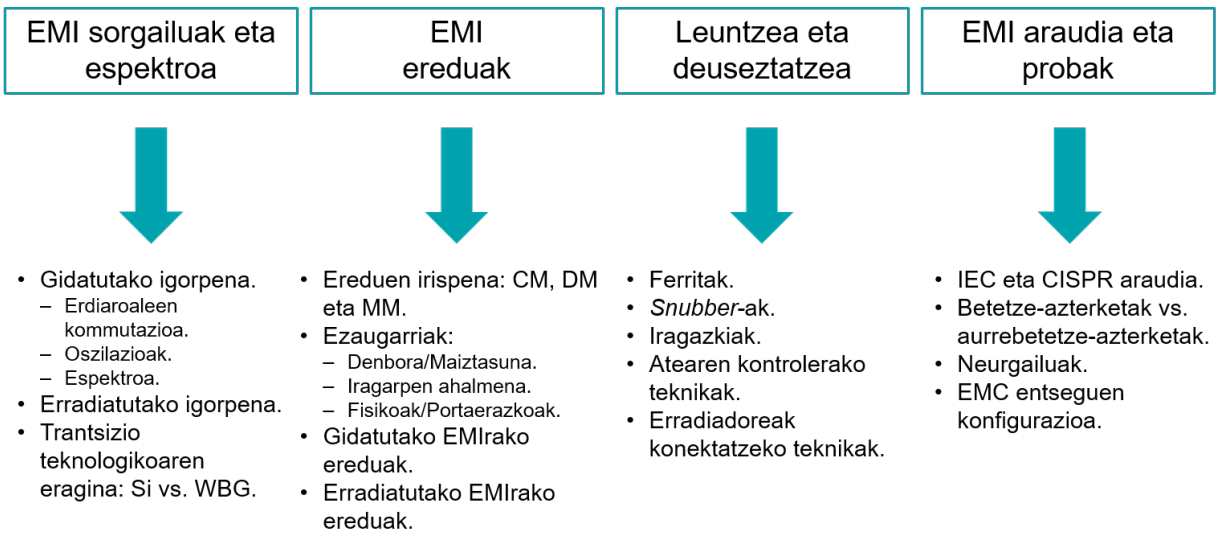
Gainera, siliziozko erdieroaleetatik WBG-etan oinarritutakoetara pasatzeak EMIan duen efektuen inguruko ikerketa abian da oraindik ere (Lemmon *et al.*, 2020). Hortaz, lan hau EMIa kuantifikatzeko beharra eta WBGrako trantsizioak dakartzan ondorioen gaineko lanetan dauden hutsuneak kontuan hartuta planteatzen da, non landu gabe edo gutxi landuta dauden zenbait alderdi jorratu nahi diren, hala nola parametroen sentikortasuna aztertzea eta horien aldakortasuna ereduetara eramatea.

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Gaiaren egungo egoeraren azterketari ekiterakoan arestian aipatutako bi ideia nagusiak hartu dira: batetik, potentzia-elektronikako gailuek sortzen eta hedatzen/igortzen duten interferentzia elektromagnetikoaren karakterizazioa; bestetik, silizioan oinarritutako elektronikatik WBG materialetan oinarritutakora igarotzeak EMIaren ikuspuntutik izan ditzakeen ondorioak.

Azterketa hau hainbat multzotan sailkatu da: EMIaren iturriak, hedapen-bideak, EMI-ereduak egiteko teknikak, EMIa leuntzeko/deusezteko teknikak eta EMI/EMC araudia. 1. irudiak laburbiltzen ditu multzo bakoitzean aztertutako gaiak, zeinetan arreta berezia jarri zaion WBG materialak erabiltzeak dituen efektuei.

1. irudia – Arloko egoeraren analisiaren multzo nagusiak.



2.1. EMI iturriak

Azken urteotako ikerketa-lanei begiratuta argi geratzen da EMIaren iturri nagusitzat jo daitezkeela erdieroaleen kommutazioan (transistoreak piztean zein itzaltzean) tentsioak eta intentsitateak duten aldakuntza azkarra batetik (dv/dt eta di/dt), eta elementu parasitoen kitzikapenak sortutako oszilazioek edo *ringing*-ak bestetik, *RLC* zirkuituen erantzunen parekoak direnak (Wang et *al.*, 2012).

Kommutazioaren eta parasitoen kitzikapenaren eraginez sortzen diren denbora-eremuko tentsio- eta intentsitate-seinaleak maiztasun-eremuan adieraz daitezke, eta maiztasun-tarte desberdinetako potentzia-dentsitatea kalkula daiteke.

Espektroaren maila eta banda-zabalera lerro-lerro lotuta daude kommutazio-seinalearen ezaugarriekin. Trapezio itxurako kommutazio-seinale idealaren kasuan, esaterako, lortutako espektroa (1) ekuazioaren bitartez adieraz daiteke:

$$V(f) = \frac{2A\tau}{T}\left|\frac{\sin(\pi f\tau)}{\pi f\tau}\right|\left|\frac{\sin(\pi f t_r)}{\pi f\tau}\right| \qquad (1)$$

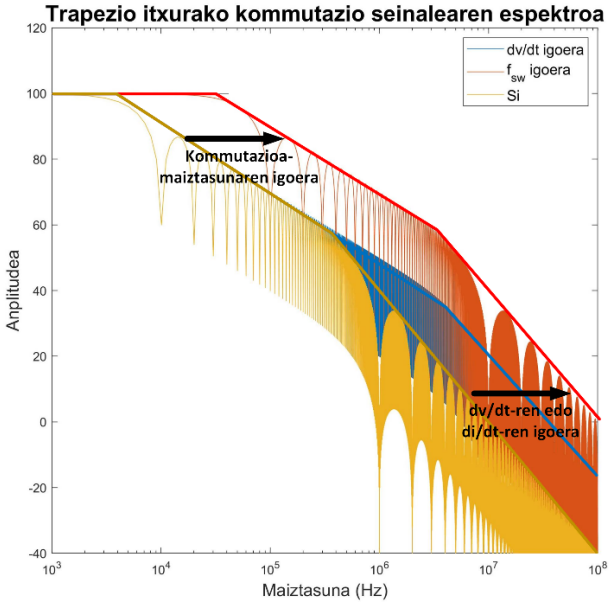
non seinalearen anplitudeak (A), igoera- edo jaitsiera-denborak (t_r), periodoak (T) eta pultsuaren zabalerak (τ) zehazten duten espektroaren magnitudea eta ebaketa-maiztasunen kokapena (inguratzailearen malda aldatzen den puntua).

Silizioan oinarritutako gailuak eta WBG erdieroaleetan oinarritutakoak konparatuz gero ikus daiteke trantsizio teknologikoak alde garbiak ekarri dituela (Zhang eta Wang, 2020), esate baterako:

- Kapazitate parasitoak (sarrerako kapazitatea, irteerako kapazitatea eta ate-drainatzaile kapazitatea) magnitude-ordena batean jaitsi dira.
- Kommutazioko igoera- eta jaitsiera-denborak % 50 baino gehiago jaitsi dira.

Honek espektroaren inguratzailearen erpinak maiztasun altuagoetara mugiarazi ditu (Oswald *et al.*, 2013); beste era batera esanda, EMIaren eraginaren esparrua zabaldu da, 2. irudian ikusten den moduan.

2. irudia – Espektroaren aldakuntza kommutazio-maiztasunaren eta tentsio-aldakuntzaren arabera.



2.2. EMIaren hedapena eta igorpena

Bestalde, kontuan hartu behar da interferentzia-seinaleak zirkuituen puntu zehatzetan sortzen diren arren, sistema osoan zehar hedatzeko aukera izango dutela. Ikerketek jasotzen duten moduan, hedapen hau bi modu nagusitan eman daiteke: modu komunean (CM) eta modu diferentzialean (DM).

Biak ala biak izan daitezke EMC araudia ez pasatzearen arduradun. Izan ere, sarera lotutako gailu elektrikoek/elektronikoek eta erradiazio elektromagnetikoaren iturri izan daitezkeen gailu elektrikoek/elektronikoek bateragarritasun elektromagnetikoko probak gainditu behar dituzte: lineak gidatutako igorpenak, 9 kHz – 30 MHz tartean; erradiatutako igorpenak, 30 MHz – 18 GHz tartean; erradiazio-immunitatea (gailuek erradiazio elektromagnetikoa jasateko duten gaitasuna edo sentikortasuna); lineak gidatutako immunitatea (gailuek elikaduratik edo datu-busetatik datozen perturbazio elektromagnetikoak jasateko duten gaitasuna edo sentikortasuna).

2.3. EMI ereduak

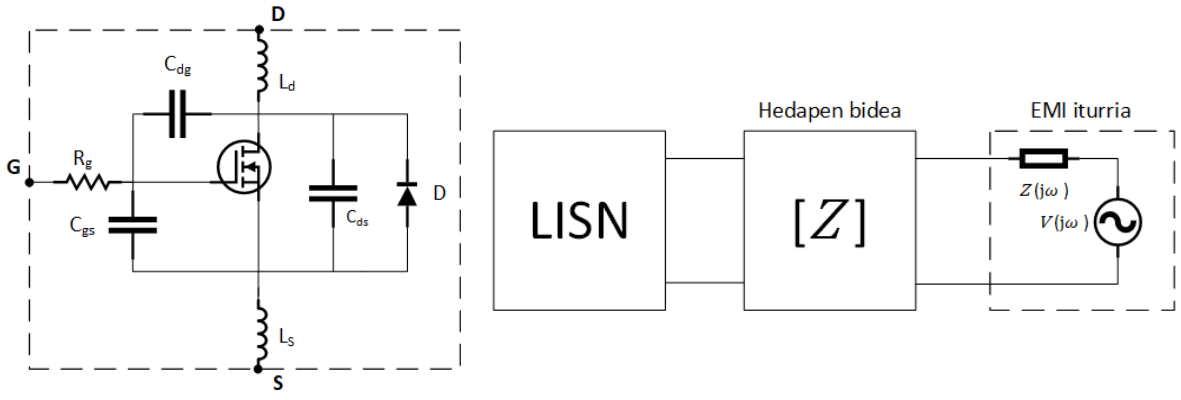
Erdieroaleen kommutazioa aztertu eta gero, sortutako EMI-eredua zein modutan egin ahal den aztertzea da hurrengo urratsa. Ezaugarri desberdinak eta kontrajarriak dituzten ereduak aurki daitezke: denbora-eremukoak / maiztasun-eremukoak, prediktiboak / ez-prediktiboak, fisikoak / portaerazkoak, modu komunekoak / modu diferentzialekoak…

Bi multzo handitan sailka daitezke gaur egun erabiltzen diren ereduak (Liu *et al.*, 2016; Bishnoi, 2013):

- Osagaien fisikan oinarritutako ereduak (*physical models*), metodo analitikoen, numerikoen edo enpirikoen bitartez kommutatzen duten transistoreen eta zirkuituko gainerako elementuen portaera zehatza adierazten dutenak osagai trinkoen bitartez eta beraien ekuazio elektrikoen bitartez.
- Portaerazko ereduak (*behavioral models*), non kommutazio elementuak zarata-iturri eta berari lotutako inpedantzia/admitantzia moduan hartzen diren, eta zarata-seinaleen hedapen-bideak kuadripolo moduan definitzen diren.

Eredu fisikoak errealitatean gertatzen denetik gertuago daude eta, beraz, EMIaren jatorria identifikatzetik gertuago. Portaerazko ereduak, aitzitik, abstrakzio maila handiagoa dute eta sistema konplexuen simulaziorako erabil daitezke.

3. irudia – EMI-eredua egiteko moduak: a) osagaien fisikan oinarrituta; b) portaerazko ereduak.



a) b)

2.4. EMIa leuntzeko teknikak

Aldez aurretik EMIaren sorkuntza ahalik eta txikiena izateko teknikak aplikatu arren, ezinezkoa da *zero-EMI* sistemarik lortzea. Hori dela eta, EMIa leuntzeko eta deuseztatzeko hainbat elementu eta teknika erabiltzen dira, besteak beste:

- Ferritak. Laneko maiztasun-tartean duten erresistentzia lagungarri da kommutazioan sortutako oszilazioak moteltzeko.
- *Snubber*-ak. *RC* serie-zirkuituan edo *RL* paralelo-zirkuituan erabiltzen dira eta elementuen balioa moteltze kritikoa lortzeko helburuarekin aukeratzen da.
- Iragazkiak. Aurreko bi osagaiak ez bezala, iragazkien funtzionamendua inpedantzien desegokipenean oinarritzen da.
- Atearen kontrol aktiboa. Interferentzien iturria intentsitatearen edo tentsioaren aldakuntza azkarrean dagoenez, hauek kontrolatzeko teknikak aplikatzen dira.

2.5. EMI/EMC araudia

Estatu mailako eta nazioarteko arauek EMIaren eragina kontrolatzeko esparru bateratua ematen diete erabiltzaileei eta industriari (Ott, 2011). Arau sorta honek bi helburu nagusi ditu:

- Lineak gidatutako eta erradiatutako igorpenen maila mugatu aplikazioa bakoitzaren kasurako.
- Aplikazio batek hutsik egin gabe izan behar duen immunitate maila minimoa ezarri.

Era honetan, merkaturatzen diren produktuek bateragarritasun elektromagnetikoko estandarrekin bat egin dezaten ziurtatu nahi da. IEC (*International Electrotechnical Commision*) eta CISPR (*Comité international spécial des perturbations radioélectriques*) arduratzen dira EMI arloko arauak jasotzeaz. IEC 61000, CISPR 1X eta CISPR 2X multzoetan bildu dituzte jarraibide horiek, non ondorengoak zehazten diren: xedapen orokorrak (igorpenerako eta immunitareako mugak, neurketa teknikak eta probak, gomendioak eta txosten teknikoak); produktu-familia eta produktuen gainerako estandarrak (audio/bideo gailuak, etxetresnak, argiteria, informatika-aparailuak, lurreko eta itsasoko ibilgailuetako ekipamendua...).

Arloaren egungo egoera aztertu eta gero helburu nagusia finkatu da etorkizunean potentzia-bihurgailu batentzako maiztasun altuko eredua garatu ahal izateko. Lehenik eta behin elementu parasitoek maiztasun-eta denbora-eremuan duten eragina aztertu behar da; horretarako, saiakuntza-banku bat diseinatu non denbora- eta maiztasun eremuko seinaleak neurtu ahal izango diren eta parametroen sentikortasuna kuantifikatu ahal izango den. Horrekin, aurrerago eta simulazio-erreminta bat aukeratu eta gero, potentzia-bihurgailuaren eredua garatu beharko da, ahalik eta parasito kopururik handiena kontuan hartuko duena.

3. Ikerketaren muina

Egindako analisitik zenbait puntu nagusi ondorioztatu ahal dira. Garrantzitsuenetako batek, EMI iturriei dagokionez, argi uzten du elementu parasitoak giltzarri direla. Gainera, WBG erdieroaleen agerpenak beharrezkoa egiten du efektu berriak aztertzea, hala nola kommutazioko seinalean ageri diren oszilazioek edo *ringing*-ak espektroan duten eragina. Hauxe igorpen erradiatuen maiztasun tartean (30 MHz-etik gora) nabarmenagoa dela aurreikusten da, orain arte oso gutxi landu den atala. Beraz, horixe da ikerketa-lan honen muinetako bat, WBG erdieroaleen erabilerak EMIen gainean duen inpaktoa kuantifikatzea.

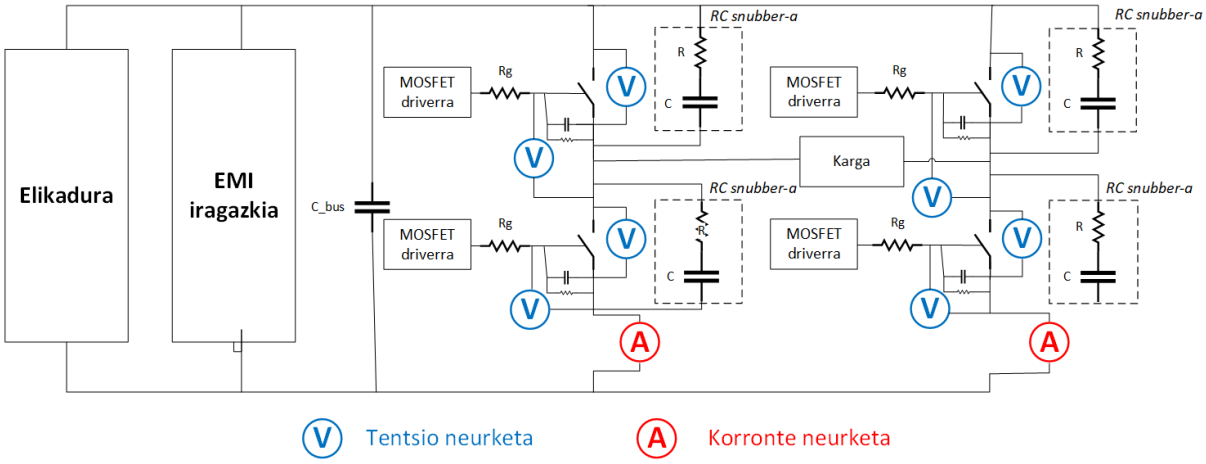
Gauzak horrela, ikasketa horretatik ateratako ezagutzarekin saiakuntza-banku bat diseinatzeari ekin zaio, zeinaren bloke-diagrama sinplifikatua 4. irudian ikus daitekeen eta hiru ezaugarritan arreta jartzen duena: zirkuitu inprimatuaren diseinua, parametroen sentikortasuna eta EMIa neurtzeko behar diren neurgailu eta neurketa-teknikak.

H-zubia osatzen duten hainbat osagairen aldakortasunarekin jokatuz, parametroen sentikortasuna aztertu nahi izan da:

- Drainatzaile-hornitzaile kapazitatea (C_{ds}).
- Ate-hornitzaile kapazitatea (C_{gs}) eta erresistentzia (R_{gs}).
- Buseko kondentsadoreak.
- Kommutazio begiztaren induktantzia parasitoa.
- *RC snubber*-ak.
- EMI iragazkien eragina (modu komunean eta modu diferentzialean).
- Erradiadoreen konexio motak.

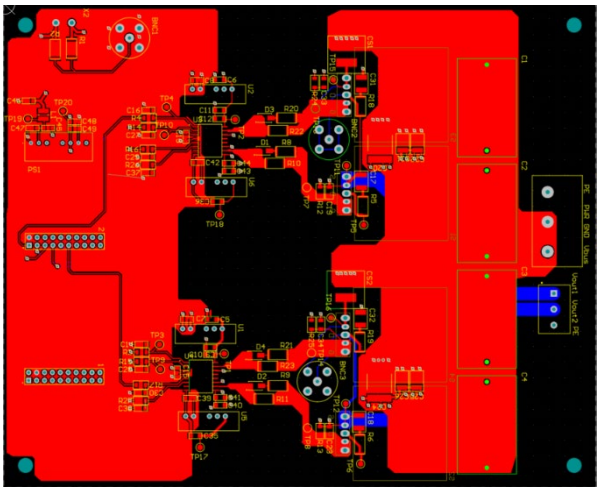
Zirkuituaren zenbait osagaien aukeraketarako EMIa gutxitzeko irizpideak jarraitu dira. Esate baterako, buseko kondentsadoreen kasurako kommutazio-abiadura handietan lan egin dezaketen osagaiak aukeratu dira. Beste elementu batzuen kasuan, hala nola *RC snubber*-ak edo EMI iragazkia, erabili / ez erabili efektua edota balio desberdinetako osagaiak erabiltzearen eragina da aztertu nahi dena, denbora- (oszilazioen anplitudea eta maiztasuna, igoera- eta jaitsiera-denbora…) zein maiztasun-eremuan (erresonantzia pikoen agerpena).

4. irudia – Saiakuntza-bankuaren diagrama sinplifikatua.



Zirkuitu inprimituaren *layout*-a edo diseinua egiteko garaian (ikus 5. irudia), jarraibide orokorrak kontuan hartzeaz gain, EMIaren sorkuntza gutxitzeko irizpideak aplikatu dira: seinale-bideen aukeraketa, korronte-begiztak ahalik eta txikienak izatea, ahalik eta induktantzia txikieneko pistak erabiltzea (kommutazioko nodoetatik gertu batik bat), elikadurako eta lurreko planoak eratzea, zirrikituak eta planoen etendurak saihestea…

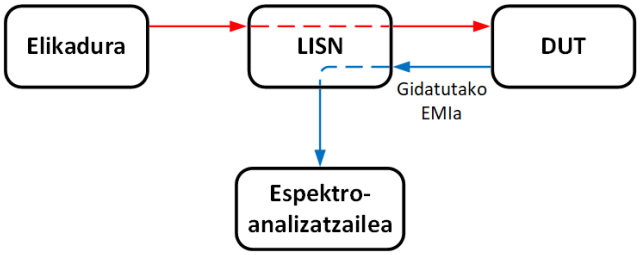
5. irudia – Zirkuitu inprimituaren *layout*-a.



Honekin batera, neurketa-laborategia martxan jarri da, egin beharreko neurketa desberdinen kasurako neurgailuak biltzen dituena:

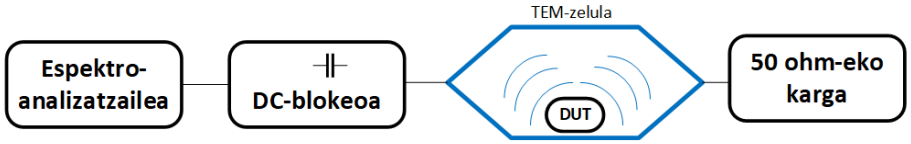
- Zirkuituetan EMI iturriak zehaztasunez lokalizatzeko, **H** eta **E** eremuko gertuko zundak.
- Gidatutako EMIa neurtu ahal izateko, LISN-a (*Line Impedance Stabilization Network*) eta espektro-analizatzailea, 5. irudiak erakusten duen konfigurazioarekin.

6. irudia – Gidatutako EMIaren neurketarako konfigurazioa.



- Erradiatutako EMIa neurtu ahal izateko, TEM-zelula eta espektro-analizatzailea, 6. irudiak erakusten duen konfigurazioarekin.

7. irudia – Erradiatutako EMIaren neurketarako konfigurazioa.



4. Ondorioak

Egindako azterketarekin ondorioztatzen da aplikazio eta produktu askok eta baita horiek diseinatzen eta ekoizten dituzten enpresek ere erronka bera dutela: lehenik, potentzia-elektronikako gailuetan gerta daitezkeen interferentzia fenomenoak identifikatzea eta kuantifikatzea; ondoren, fenomeno horiek kontrolatzeko gai izatea, aldez aurretik (diseinu-fasean) edo gauzatu eta gero (interferentziaren eraginak leunduz edo deuseztatuz). Era honetan gutxituko da bateragarritasun elektromagnetikoko probak gainditu arteko garapeneko eta balidazioko faseetan emandako denbora.

WBG erdieroaleekin lan egiten hasi izanak transistoreen berezko parasitoen eta zirkuituetako loturekin zerikusia dutenen eragina berriro ere aztertzea behartu du; orain arte ikerketetan toki gutxi hartu duten zenbait arlo aintzat hartu behar dira, oszilazioek maiztasun-espektroan duten efektua kasu.

Ikerketa berriek denbora- eta maiztasun-eremuko erantzuna aztertu behar dute, portaera-eredu bat aurkitzeko eta EMIaren sorkuntza eta hedapena murrizteko, era gidatuan zein erradiatuan. Gainera, erradiatutako EMIrako ereduekin lan egin nahi izanez gero, antenekin edo eremu gertuko zundekin egindako neurketak denbora-eremuko seinaleekin erlazionatu behar dira, erradiazioaren jatorria antzeman ahal izateko.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Ikerketa lan hau hasi berri den bidearen abiapuntua besterik ez da, non bi lan-ildo nagusiri heldu nahi zaion:

1) Potentzia-bihurgailu batentzako maiztasun altuko eredua garatzea, ahalik eta elementu parasito gehiagoren efektua barneratzen duena, eta eredua simulazio-erreminta batean txertatzea. Honen bitartez diseinuaren portaera aldez aurretik simulatu ahal izango da.

2) Entseguak eta EMC arauen betetze-saiakuntzak egiteko laborategia definitu eta muntatu. Araudian eta neurketa-tekniketan sakontzeak saiakuntza errepikagarriak egitea ahalbidetuko du, eta horrek EMI-iturria eta hedapen- eta erradiazio-bideak antzemateko jarraibide fidagarriak ezartzea ekarriko du. Era horretan, potentzia-elektronikako diseinatzaileek bateragarritasun elektromagnetikoko probei arrakasta-probabilitate handiagoarekin aurre ahal izango diete.

6. Erreferentziak

Bishnoi, H. (2013). *"Behavioral EMI-Models of Switched Power Converters."* (Doctoral dissertation, Virginia Tech).

Friedrichs, P., Harder, J. M. T., Kaminski, N., Lindemann, A., Lorenz, L., Schindele, L., eta Ward, P. (2016). *"ECPE position paper on next generation power electronics based on wide bandgap devices"*. Jul-2016.

Lemmon, A. N., Brovont, A. D., New, C. D., Nelson, B. W., eta DeBoi, B. T. (2020). *"Modeling and validation of common-mode emissions in wide bandgap-based converter structures."* IEEE Transactions on Power Electronics, 35(8), 8034-8049.

Liu, T., Ning, R., Wong, T. T. eta Shen, Z. J. (2016). *"Modeling and analysis of SiC MOSFET switching oscillations."* IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 4(3), 747-756.

Oswald, N., Anthony, P., McNeill, N. eta Stark, B. H. (2013). *"An experimental investigation of the tradeoff between switching losses and EMI generation with hard-switched all-Si, Si-SiC, and all-SiC device combinations."* IEEE Transactions on Power Electronics, 29(5), 2393-2407.

Ott, H. W. (2011). *"Electromagnetic compatibility engineering. John Wiley & Sons."*

Wang, J., Chung, H. S. H. eta Li, R. T. H. (2012). *"Characterization and experimental assessment of the effects of parasitic elements on the MOSFET switching performance.*" IEEE Transactions on Power Electronics, 28(1), 573-590.

Zhang, B. eta Wang, S. (2019). *"A survey of EMI research in power electronics systems with wide-bandgap semiconductor devices."* IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 8(1), 626-643.

7. Eskerrak eta oharrak

Lan hau Mondragon Unibertsitateko Goi Eskola Politeknikoaren laguntzaz egin da.

Industria eolikoko palen efizientzia aerodinamikoaren azterketa esperimentala baldintza ideal eta errealetan

Zarketa-Astigarraga, A.[1], Peñalba-Retes, M.[1], Martin-Mayor, A.[1], Martinez-Agirre, M.[1]

Mondragon Unibertsitatea, Goi Eskola Politeknikoa, Mekanika eta Produkzio Industriala, Loramendi 4, Mondragon 20500 Gipuzkoa, Espainia

azarketa@mondragon.edu

Laburpena

Energia berriztagarrien paradigmak erronka ugari dakartza berorrekin, epe laburrean erantzun beharrekoak bederen. Energia eolikoaren kasuan, ustiapena ohiko haize-parkeetatik itsasalde edota hiriguneetara mugitzean datza, inpaktu bisuala nahiz ingurumen kalteak murrizteko asmoz. Horrek haizearen fluxu baldintzak nabarmen aldatzea dakar; bereziki, turbulentzia eta ingurumen-eragileek sorturiko gainazal-zimurtasuna hartu behar da kontuan eta, hiriguneetako kasuan, aerosorgailuen eskala aldaketa. Haize-tunel bidezko entseguak burutuz, faktore horiek NACA0021 geometriadun pala baten efizientzia aerodinamikoan duten eragina aztertu da, baldintza idealetatik errealetara igarotzean ematen den efizientzia galera ikusaraziz. Galera hori dela-eta, entsegu esperimentalak harik eta baldintza errealenetan egiteko beharra ondorioztatzen da.

Hitz gakoak: energia eolikoa, aerodinamika esperimentala, efizientzia aerodinamikoa, turbulentzia, gainazal zimurtasuna

Abstract

The paradigm of renewable energies brings a number of challenges to be solved in a short-term period. In the case of wind energy, it turns necessary to relocate onshore wind-farms in both offshore coastal regions and urban environments, so that visual and environmental impacts of current devices are reduced. This modifies the flow regime noticeably; indeed, turbulence and environmentally-induced roughness need to be accounted for, in addition to the scale-effect in case of urban wind turbines. The effects of such factors on the aerodynamic efficiency of a standard NACA0021 airfoil are tested via wind-tunnel measurements, showing the resultant decrease in aerodynamic efficiency when passing from ideal to real flow conditions. Such a decrease leads to concluding that aerodynamic tests should be undertaken with flow configurations that represent real operational conditions.

Keywords: *wind energy, esperimental aerodynamics, aerodynamic efficiency, turbulence, surface roughness*

1. Sarrera eta motibazioa

Energia berriztagarrien gorakada nabarmena da mundu mailan, *International Renewable Energy Agency* (IRENA) erakundearen datuetan ikus daitekeenez[1]. Erregai fosilen paradigmari aurre egiteko, beste energia iturri batzuk kontrajartzen ari gara: bioenergia, energia geotermikoa edo, ezagunagoak direnak, eguzki-energia eta eolikoa. Mundu mailako portaerak aztertzean, erakundeak hazkunde nabarmena azpimarratzen du energia eolikoan. Herrialdeka sailkaturiko estatistiketan, espainiar estatuan ere haize-energia gailentzen dela irakur daiteke, iturri berriztagarrien % 50 hartzen duelarik eta, *Asociación Empresairal Eólica* (AEE) erakundeko datuen arabera, kontsumitutako energiaren %21[2]. Hego Euskal Herriko egoera ere erakundeko datuetan irakur daiteke, 1.5 GW inguruko potentzia metatuarekin, zeinetatik 1.3 (% 87) Nafarroan kokatzen diren[3], nahiz eta *Euskal Energiaren Erakundeak* (EEE) egungo haize-parkeen hedapen bat aurreikusirik duen, 153 MWko potentziatik 730 MWra igarotzeko planarekin[4]. Industria eolikoak berebiziko garrantzia duela ikusten da, beraz.

[1] https://www.irena.org/publications/2019/Oct/Future-of-wind
[2] https://www.aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-espana
[3] https://www.aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-espana/potencia-instalada-y-generacion
[4] https://www.eve.eus/Actuaciones/Actuaciones/Eolica

Halere, iturri berriztagarriek badituzte kontutan hartu beharreko albo-efektuak. Industria eolikoaren kasuan, parkeen kokapen geografikoak eta aerosorgailuen tamainak orografian nahiz ingurumenean dituen inpaktuak agerikoak dira. Bestalde, berriztagarria den ustiapen modu ororen fabrikazioa mineral jakinen menpekoa da eta, *Nature* aldizkariko ikerketa eguneratu baten esanetan (Sonter *et al.*, 2020), mineral horien eskari masiboa biodibertsitatearekiko kaltegarria izan daiteke. Berriztagarrien gorakadak eta beraiekin dakartzaten arazoek, hala, epe motzean erantzun beharreko erronkak mahaigaineratzen dituzte, esparru teknologikoan aurrerapen nabarmenak eskatzen dituzten erronkak, alegia; izan ere, Europar Batzordearen arabera, eolikak 2050. urterako dituen aurreikuspenak bete daitezen, egungo potentzia instalatua 9 aldiz biderkatu beharko da *onshore* eremuetan, eta 35 aldiz itsasaldean, hazkunde horren prestasuna eta eraginak iraultza industrialean eman ziren aldaketekin parekatu daitezkeelarik[5].
Industria eolikoaren kasuan, aipaturiko aurrerapenak bi zentzutan egin daitezke: lehenak parke eolikoen ingurune-inpaktua nahiz bisuala gutxitzea du helburu, eta *offshore* teknologiaren hazkundean islatzen da. Hala, parkeen kokapen geografikoa itsas zabalera mugitzea da helburua, horrek egungo lokalizazioetan ematen diren ekosistema aldaketak nahiz kutsadura bisuala gutxituko dituenaren argudiopean. *Offshoring*-a indarra hartzen ari den teknika bat dela adierazten dute IRENAren datuek, baina bere kidea, orain arte nagusitu den *onshore* teknika alegia, estandarra da mundu mailan oraindik. Honek *offshore* teknologiaren heldugabetasuna nabarmentzen du, eta lurzorua ez den beste ingurune batean aerosorgailuak instalatzeak dituen zailtasunak, fluxuaren baldintza aldaketak direla medio. Bigarren abiapuntua eskala txikiagoko aerosorgailuak sortzean datza, lautada edo mendietan beharrean hiriguneetan kokatuko direnak. Dimentsio ertain nahiz txikiak dituzten gailuak direnez, zuzenean lotu daitezke energia erabiliko den tokiarekin, sare elektrikoaren hedapena nabarmen gutxituz. *Offshore* teknologiarekin gertatzen den moduan, baina, konponbide honen arazoa ustiapen teknikan dago: aerosorgailuen kokalekua eta tamaina moldatzean, fluxu baldintzak ere nabariki aldatzen dira, eta horrek dimentsio handiko *onshore* turbinen diseinu puntutik arras aldentzea dakar.
Bi konponbideen mugak teknikoak izanik, muga horien zergatia azaleratzea ezinbestekoa da. Bai *offshoring*-aren kasuan, bai hirigunetako ustiapen eolikoarenean, fluxu baldintzak dira bereziki aldatzen direnak. Mendi eta lautadetako kasuetan, haizearen abiadura profila homogeneotzat hartu ohi da, turbulentzia edo zurrunbilo gutxirekin eta intsektu, hauts partikula, kresal eta antzerako ingurumen-eragile kaltegarririk gabe. Itsas zabal nahiz hiriguneetan egoera bestelakoa da. Gainazal likidoaren mugimenduak alde batetik, eta tamaina desberdineko eraikinenak bestetik, haizearen abiadura profila dinamikoa izatea eragiten dute eta, orokorrean, turbulentua. Bestalde, kresalaren efektu korrosiboak, eta hiriguneetako airean aurki daitezkeen partikula anitzak, palen gainazal integritatea baldintzatzen dute, erosio nahiz zikinkeria-metaketa bidezko degradazioak sortuz. Gainera, tamaina txikiko aerosorgailuen kasuan fluxuaren erregimena nabarmen aldatzen da; izan ere, erregimen hori fluxuaren abiadurarekiko eta palen dimentsioekiko proportzionala da. Hala, tamaina handiko aerosorgailua hegazkinetako hegoetan ematen den fluxu erregimenaren baliokidea da aerodinamikoki; erregimen horretan, "turbulentu" terminoaz izendatzen dena, ondo ezagutzen diren fenomenoak azaleratzen dira. Erregimen-espektroaren bestaldean, abiadura oso baxuko aplikazioetan alegia, fenomenologia "laminarra" dago, aski ezaguna hau ere, industria askoren gas tutueriatan gertatzen dena baita. Tartean erregimen "trantsizionala" dugu, aurreko bi fluxu egoeren artean kokatzen dena, eta berorren mekanismo fisikoak ez dira guztiz ulertzen oraindik. Zerbait badakigu, ordea: erregimen trantsizionalean, aerosorgailuen energia etekina fluxu baldintzekiko bereziki sentikorra dela (Petricca *et al.*, 2011), eta turbulentzia mailan nahiz palen degradazioan alterazio txikiak egoteak aldaketa handiak ekar ditzakeela sistemaren erantzunean.
Energia eoliko berriztagarriaren sektorean eman beharreko berrikuntzek, beraz, erronka garrantzitsuak dakarte beraiekin. Nola berdiseinatu palen geometria, fluxuaren baldintza eta erregimen aldaketetara moldatzeko? Nola erreproduzitu baldintza eta erregimen horiek ingurune kontrolatu batean, azterketatik ateratako emaitzak baliagarriak direla bermatzeko? Horiexek dira ikerketa ildo honen abiapuntutzat hartzen diren galderak.

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Fisika eta ingeniaritzari loturiko esperimentazioan, baldintza kontrolatu eta egonkorretan eginiko entseguak lortzea da helburua. Baldintza fisikoak kontrolpean badaude, esperimentatzaileak aukera dezake horietako zein aldatu nahi dituen, aztertzen ari den fenomenoaren gainean efektu konkretuak eragiteko. Hori da esperimentazioaren muina. Industria eolikoan erabiltzen diren palen aerodinamika aztertzeko, baldintza kontrolatuen erdiespena haize-tunelen bidez lortzen da.
Haize-tunelak, zentzu honetan, tenperatura, hezetasun eta, batez ere, abiadura konkretuko aire korronteak lortzeko erabiltzen diren gailuak dira. Mota desberdineko tunelak badaude ere, guztien funtsa berdina da: kokaturik dauden inguruneko airea azeleratuz, test-sekzioa deritzaion eremu batean profil homogeneo eta kontrolatuko aire korronte

[5] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:52020DC0741

bat lortzea. Test-sekzioan, bestalde, probatu beharreko gailua jartzen da, aerosorgailu baten pala, kasu honetan. Neurgailu eta zundak ere bertan kokatzen dira, horiek palaren portaera aerodinamikoa ebaluatuko baitute.
Haize-tunel bidezko esperimentazioak muga nabarmenak ditu. Lehenik eta behin, eskala kontua dago: tamaina desberdinetako haize-tunelak badaude ere, ez da ohikoa aerosorgailua bere osotasunean entseatzea, neurketa fidagarriak egiteko beharrezkoa izaten baita gailuak test-sekzioko azaleraren % 10a baino gutxiago oztopatzea. Horretarako aerosorgailuak eskalatu egiten dira, hau da, beraien berezko tamaina baino dimentsio txikiagotan entseatu. Bestalde, aerosorgailua bera karakterizatu beharrean, osagai aerodinamikoa soilik aztertzen da, hots: pala. Galdera zuzena da: maketaren dimentsioak ez badira pala originalaren berdinak, zein punturarte onar daiteke entsegutako emaitzak mundu errealean gertatzen denaren adierazgarri direla? Bada, korrespondentzia hori bermatzeko, Reynolds zenbakiaren kontzeptua dugu. Reynolds zenbakia adimentsionala da, eta eskala efektuak kontutan hartzea ahalbidetzen du: tamaina desberdineko bi konfigurazioen Reynolds zenbakia berdina bada, garatzen dituzten egitura aerodinamikoak ere berdinak izango dira. Fluidoaren propietate fisikoak aldatu ezean, Reynolds zenbakia fluxu abiadurarekiko eta palaren tamainarekiko proportzionala da. Pala txikiagotzen bada, beraz, nahikoa da entsegu abiadura handitzearekin, emaitzak adierazgarriak izan daitezen.
Esan bezala, Reynolds zenbakia bermatzeak eskala efektua deuseztatzea dakar, abiadura handitzearen kostura. Baina lortu ahal diren abiadurak haize-tunelaren potentzia baldintzapenetara mugaturik daude. Reynolds zenbakia mantenduz entseguak egin ahal izateko, aerosorgailuen atal aerodinamikoaren bertsio eskalatua soilik erabiltzea da praktika ohikoena. Hala, tunel txikiagoak erabil daitezke, potentzia beharrak bideragarri mantenduz. Honek ez du esan nahi ez dagoenik eskala originalean edota, palaz gain, bestelako atal batzuekin entseguak egiten dituen inor, badago (Chu eta Chiang, 2014; Latoufis *et al.*, 2019); ikerketa horiek, baina, paletan soilik oinarrituriko lanak baino askoz urriagoak dira izatez, eta tamaina ertain nahiz txikiko gailuetara mugatuak berez.
Eskala efektuak palen ikerketara mugatzen gaitu, baina ez da baldintzapen bakarra. Izan ere, fluxua kontrolatua izan beharraren baldintza modu murriztailean betetzen da orokorrean. Beste era batera esanda: kalitate parametro batzuk definitzen dira, fluxuaren turbulentzia maila nahiz desalineazio maximoak adibidez, edo neurtu beharreko gailuak izan ahal duen gainazal-akabera zabarrena, besteak beste. Noski, guzti honek esperimentazioaren errepikakortasun eta kontrolagarritasuna ditu helburu, baina paradoxa bat suertatzen da hala: horren "garbiak" egitean, fluxu esperimentalek eta mundu errealekoek parekotasuna galtzen dute. Eta palen diseinurako erabakiak fluxu artifizial horietan lorturiko emaitzen arabera hartzeak ezustekoak ekar ditzake. Hala ere, metodologia hau praktika orokortua da, eta palen hobekuntza aerodinamikoa lortzeko moldaketa anitz gehitu izan dira, moldaketa horiek baldintza artifizialetan soilik testeatuz (Vorobiev *et al.*, 2013; Van Treuren, 2015; Meng *et al.*, 2018). Baina Van Treuren ikertzaileak (2015) laneko ondorioetan azaltzen duen moduan, beharrezkoa da baldintza errealak erreproduzitzen hastea diseinu prozedura egoki bat izateko. Eta, esan bezala, horrek bi efektu txertatzera garamatza: turbulentzia, fluxuaren egokitzapen aldetik, eta degradazioa edo ingurumen-eragileek induzituriko gainazal-zimurtasuna, palen geometria moldatze aldera. Bietan ditugu aurrekariak.
Turbulentziari dagokionez, fluxu zurrunbilotsuak ingelesez *grid-generated turbulence* deritzaion teknikaren bidez erreproduzitu dira. Funtsean, haize-tunelaren sarreran burdinsare bat jartzean datza teknika hau. Sare horren parametroak egoki ezarririk badaude, sorturiko fluxu turbulentua parametro bakar batez karakterizatu daiteke, intentsitate (I) izenez ezagutzen dena alegia (Batchelor, 1953). Atmosferako altuera baxuetan ($h < 200$ m) lan egiten duten gailuek $\%2 < I < \%10$ tarteko intentsitateak jasaten dituztela jakina da (Watkins *et al.*, 2010). Baldintza horietan ikerturiko gailuek bi berezitasun agertu dituzte: alde batetik, zurrunbiloen izaera oszilakorra palen jarrera aerodinamikoan islatzea, palak beraien diseinu puntutik aldenduz eta neke kargak eraginez (Schottler *et al.*, 2016; Dimitrov *et al.*, 2017). Bestalde, efizientzia aerodinamikoaren jaitsiera nabarmen bat turbulentzia-intentsitatea handitzean, etekin energetiko txikiagoak lortuz (Tian *et al.*, 2019). Turbulentzia askoko inguruneetan, beraz, ustiapen urriagoak ez ezik palen bizitza operatibo motzago bat aurreikusten da.
Degradazioaren kasuan, gainazal-egoera eta efizientzia hidrodinamikoaren arteko harremana XX. mendeko hasieratik da ezaguna (Nikuradse, 1933). Harreman hori likido-fluxuen aplikazioetara mugatzen zen berez, eta termino aerodinamikoetan interpretatzeak lan nabarmena eskatu du bederen (Coleman *et al.*, 1984). Oraindik ere, gainazal-akaberaren karakterizazio aerodinamikoa guztiz estandarizaturik gabeko prozedura da (Bons, 2010). Hala, ez da harritzekoa degradazio efektuen lehen azterketa sakonak egungo mende hasierakoak izatea. Zentzu horretan, Corten eta Veldkamp autoreek (2001) urtean argitaraturiko artikulua adierazgarria da oso; intsektu bidezko zikinkeria metatuak % 50eko potentzia galera eragin dezakeela azaltzen da bertan. Ikerketa horren gibelean, ingurumen-eragile desberdinen efektuak aztertu dira, kokapen geografiko anitzetan instalatu baitaitezke aerosorgailuak. Desertuko hauts partikulen metaketatik hasi eta euri tantek sor dezaketen erosiorarte hedatzen dira ikerketak, 1. Taulan ikus daitekeen moduan. Ondorio komunak zehatzak dira oso: hasteko, azkarren degradatzen den palen atala *leading-edge* edo aurreko muturra omen da. Ostean, palen bizitza operatiboak aurrera egin ahalaz bat, erasoturiko gainazal tarteak atzeko muturrerantz egiten du. Korrelatiboki, degradazio progresibo horrek potentzia murrizketa

1. Taula: Turbulentzia eta degradazioari buruzko ikerketen berrikuspen bibliografikoaren laburpena.

	Erreferentzia	Ekarpen nagusia
Turbulentzia ikerketak	(Batchelor, 1953)	Burdinsare bidezko turbulentziaren karakterizazioa.
	(Watkins *et al.*, 2010)	Altuera baxutan operatzen duten gailuek jasaten duten turbulentzia.
	(Schottler *et al.*, 2016; Dimitrov *et al.*, 2017)	Turbulentziaren izaera oszilakorra palen kurba aerodinamikotan isladatzen denaren ebidentziak.
	(Tian *et al.*, 2019)	Efizientzia energetikoaren jaitsiera turbulentzia intentsitatearen igoerarekin.
Degradazio ikerketak	(Nikuradse, 1933)	Gainazalaren karakterizazio hidrodinamikoa.
	(Coleman *et al.*, 1984)	Gainazalaren karakterizazio aerodinamikoa.
	(Corten eta Veldkamp, 2001)	Intsektu zikinkeriak eragindako efizientzia galera.
	(Khalfallah eta Koliub, 2007)	Desertuko hautsak eragindako efizientzia galera eta operazio denborak eragindako degradazio metatua.
	(Bons, 2010)	Palen gune zaurgarrienen identifikazioa eta korrosio bidezko degradazioa.
	(Pugh *et al.*, 2021)	Euriak eragindako efizientzia galera.

bat eragiten du, eta bada urteroko energia etekinean % 10-13ko murrizketak daudela baieztatzen duen lanik. Nola lortu, baina, zimurtasun maila horiek esperimentalki erreproduzitzea? Bada, teknika ohizkoena ez da aldentzen aurrez aipaturiko Nikuradsek XX. mende hasieran proposatu zuenetik: palaren gune zaurgarrienetan zimurtasun jakineko banda edo xingola bat itsastean datza, ingurumen-eragileek sortzen duten efektuak simulatzen dituela onartuz.

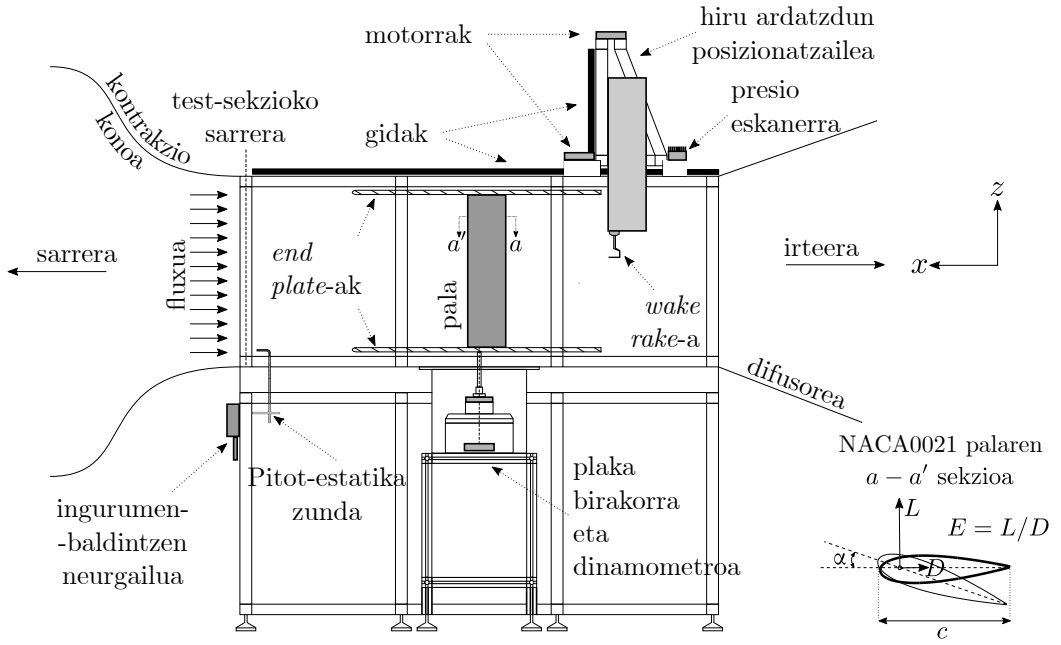
Hala ere, turbulentzia- eta degradazio-efektuak horren nabariak izanik, ez dago bi eragileak uztartzen dituen ikerketarik, ez egileek ezagutzen duten bibliografian behintzat. Baldintza idealetatik aldentzean portaera aerodinamikoa nabarmen aldatzen dela agerikoa da, eta beharrezkotzat jotzen da entseguak harik eta egoera errealenetan burutzea, diseinu prozedura egokiena izan dadin. Izan ere, ez da ezagutzen uztartze hori zein modutan gertatzen den, alegia: turbulentzia- eta degradazio-efektuak batugarriak edo sinergetikoak al dira? Ala, bestalde, batak bestea kontrajartzen du nolabait? Zein punturarte baldintzatzen dute efektu horiek egoera garbietan egindako entseguetatik deribatutako palen diseinua? Horiexek dira ikerketa honek azalarazi nahi dituen puntuak.

3. Ikerketaren muina

Esan bezala, haize-tunel bidezko entseguetan oinarritzen da ikerketa hau. Muntaketa esperimentalaren krokis argigarri bat 1. Irudian dago. Bertan haize-tuneleko test-sekzioa ageri da, aire fluxua ezkerretik eskuinera doalarik. Irudia tunelaren sarrera osteko kontrakzio konoan hasten da, zeinak fluxua azeleratu eta homogeneizatzen duen test-sekziora sartu aurretik. Test-sekziorako sarreran ingurumen baldintzak —presioa, hezetasuna eta tenperatura— neurtzen dituen gailu bat dago, eta fluxuaren abiadura eskuratzen duen Pitot-estatika zunda bat. Lau datu horiekin Reynolds zenbakia kalkulatzen da. Esperimentatzaileak tuneleko haizagailuaren potentzia alda dezake, fluxuaren abiadura eta, beraz, Reynolds zenbakia moldatuz, entsegu-puntua zehaztu arte. Test-sekziotik irtetean, fluxua difusore batean moteltzen da irteerara iritsi aurretik, hala presio jauziari dagokion galerak saihestuta.

Test-sekzioaren erdian pala kokatzen da, bertikalki. Palaren muturretan *end-plate* deritzaien bi ohol jartzen dira; ohol horien funtzioa muturretan agertzen diren efektu tridimentsionalak saihestea da, edo fluxuaren bidimentsionaltasuna bermatzea. Behin bidimentsionaltasuna bermaturik, palaren sekzio orok jarrera aerodinamiko berdina duela onar daiteke. Pala, bestalde, metalezko ardatz baten bidez finkatzen da tunelaren zoru azpian dagoen plaka birakor batean. Plaka birakor horren gainean dinamometro bat ezartzen da, eta ardatz metalikoak dinamometroa eta pala lotzen ditu. Irudiaren behe-ezkerraldean ageri den krokisean palaren sekzio transbertsala ikus daiteke.

1. Irudia: muntaketa esperimentalaren krokisa, jatorrizko konfigurazioan.



NACA0021 geometriadun profila dela adierazten da bertan. NACA profilak patroi gisa erabiltzen diren geometriak dira, aplikazio aerodinamiko jakin baterako baino entsegu estandarizatuak egiteko diseinatuak[6]. Izan ere, ikerketaren helburua ez da aplikazio partikular bat aztertzea, ingurumenak sortzen dituen fluxu eta geometria aldaketak berrestea baizik; horregatik erabaki da profil patroi bat erabiltzea. Bestalde, profilaren luzerari korda, c, deitzen zaio, eta palaren Reynolds zenbakia kalkulatzeko erabiltzen den luzera karakteristikoa da. Azkenik, kordaren eta haizearen norabidearen arteko angeluari eraso-angelua, α, deritzaio. Muntaia honetan, esperimentatzaileak eraso-angelua alda dezake, haize-tunela kontrolatzen duen sistematik plaka birakorra mugituz. Plaka birakorrean ezarririk dagoen dinamometroak, haizeak palaren gainean eragiten duen *lift* indarra, L, neurtzea du helburu; krokisean ikusten den moduan, *lift* indarra kordarekiko perpendikularra da. Hegazkin batean, *lift*-a da hegoak goraka bultzatzen dituen indarra; aerosorgailuetan, berriz, indar honek ahalbidetzen du energia ustiatzea.

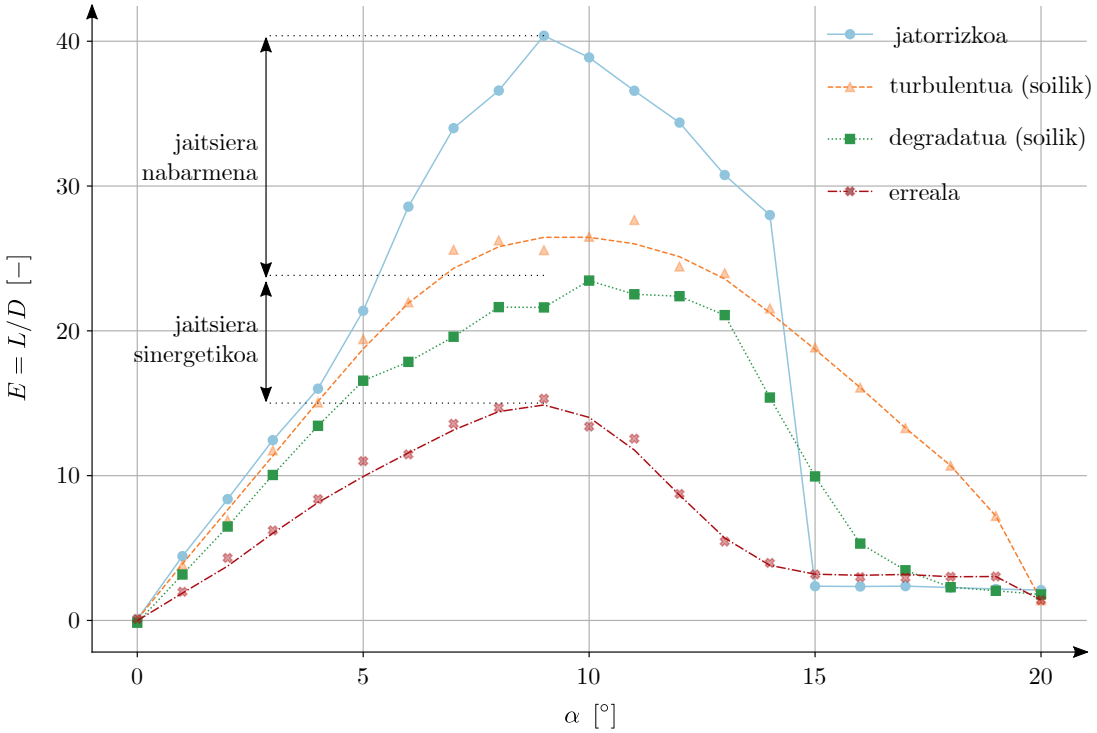
Lift-az aparte, palaren gain marruskadura indar aerodinamiko bat eragiten du haizeak, ingelesez *drag* deritzaiona, D. Indar hau palaren atzean kokatzen den *wake-rake* gailuak neurtzen du. Gailu hau orrazi itxurako tresna bat da. Orraziko zurda bakoitzak, bestalde, Pitot-estatika neurgailu baten tankeran operatzen du, presio total eta estatikoaren diferentziatik fluxuaren abiadura neurtuz. Beraz, zurdak linea pneumatikoak dira izatez, tunelaren sabaian dagoen presio eskaner batera konektaturik daudenak. Orrazia eta eskanerra, era berean, tunelean zehar mugitu daitekeen posizionatzaile bati atxikirik daude. Posizionatzaile, plaka birakorraren moduan, esperimentatzaileak kontrola dezake. Hala, orrazia haize-tunelaren zabaleran zehar mugiarazten da, palak bere atzean uzten duen haize-estela edo buztanaren abiadura profila neurtuz. Profil hori ez da izango palara iritsi aurretik haizeak duen abiadura bezain homogeneoa; izan ere, pala eta haizearen arteko elkarrekintzak energia kantitate bat galarazten dio haizeari eta, ondorioz, fluxuaren abiadura moteldu egiten da palaren atzealdean. Teorikoki, abiadura profil hori marruskadura indarrarekin erlaziona daiteke eta, beraz, *wake-rake* bidezko teknika hau *drag* indarra neurtzeko zeharkako metodo bat da (Meseguer-Ruiz eta Sanz-Andrés, 2012). Teknika horri *momentum-deficit method* deritzaio ingelesez, eta ohikoa da aerodinamika esperimentalean (Takahashi, 1997; Yang eta Spedding, 2013). *Drag* indarra *lift*-arekiko perpendikularra da, eta haizearen norabidean kokatzen da beraz. Hegazkin batean, indar hori motorren bultzadak kontrajarri behar du aurrera egin ahal izateko; aerosorgailuetan tortsio momentu batek kontrajartzen du, palak geratzen ez direla bermatzeko.

Lift eta *drag* indarrek, beraz, sistema aerodinamiko baten energia-etekin eta energia-sarrerak adierazten dituzte, hurrenez hurren. Hala, sistemaren efizientzia aerodinamikoa bi indar horien ratioa definituz zehaztu daiteke, $E = L/D$ moduan ezagutzen den parametroaz alegia. Modu horretan, gero eta efizientzia handiagoek etekin

[6] https://www.nasa.gov/image-feature/langley/100/naca-airfoils

bera lortzeko input txikiagoa adierazten dute. Bi adibideei dagokienez, hegazkinen kasuan efizientzia altuagoak distantzia jakin bat burutzeko erregai kontsumo baxuagoen seinale dira; aerosorgailuenean, aldiz, energia-etekin handiagoen adierazle. Efizientzia terminotan egingo da ikerketa honetako analisia, beraz.
Azkenik, 2. atalean aipaturiko fluxu-baldintza errealen erdiespenari dagokionez: haize-tunelaren jatorrizko turbulentzia maila % 0.2koa da (Torrano, 2016), eta berori handitzeko burdinsare bidezko zurrunbiloak sorrarazi dira. Burdinsarea egoki hautaturik dagoela eta, beraz, produzituriko turbulentziak profil unibertsala jarraitzen duela bermatzeko, Krogstad eta Davidson autoreek (2010) urtean argitaraturiko lanean zehazten duten karakterizazio-metodoa erabili da, $I = \%\ 4$ko turbulentzia intentsitatea delarik burdinsarez doituriko muntaketan lortzen dena. Bestalde, ingurumen-eragileek induzituriko degradazioa zimurtasun-banda baten bidez erreproduzitu da. Khalfallah eta Koliuben (2007) urteko lanean oinarrituz, banda hori palaren azaleraren % 10 estaliz jarri da aurreko muturretik hasiz, degradazioa jasateko gunerik zaurgarriena delako, aurrez aipatu den moduan. NACA0021 profila simetrikoa da, geometrikoki berdinak diren bi kurbez osatua edo, pala tridimentsionalean, berdinak diren bi gainazalez. Bandak gainazal horietako bakoitzaren % 10 estaltzen du, palaren berezko simetria kontserbatuz. Zimurtasunen batazbesteko altuera $\approx 200\ \mu$m da, antzerako entseguak egin dituzten lanetako balioetan oinarritua (Khalfallah eta Koliub, 2007; Soltani *et al.*, 2011).
Hala, lau konfigurazio nagusi bereizten dira: jatorrizko fluxua degradazio gabeko profilean (jatorrizkoa), fluxu turbulentua degradazio gabeko profilean (turbulentua soilik), jatorrizko fluxua degradatutako profilean (degradatua soilik) eta fluxu turbulentua degradatutako profilean (erreala). Konfigurazio bakoitzerako, palaren *lift* eta *drag* indarrak eta, beraz, efizientzia neurtu dira operatiboki erabiltzen diren eraso-angelu ohizkoenetan, $\alpha = [0, 20]^\circ$ tartean alegia, bi neurketen arteko angelu diferentzia $\Delta\alpha = 1^\circ$ delarik. Hala, lau $E - \alpha$ kurba kalkulatu dira, entseguak $\mathrm{Re} = 1.2{\cdot}10^5$ Reynolds zenbakian burutuz. Reynolds hau arestian aipaturiko erregimen trantsizionalari dagokion zenbakia delako aukeratu da, zeinetan fenomeno aerodinamikoak ez diren horren ondo ezagutzen; bestalde, emaitzak alderatzea beharrezkoa izanez gero datu bibliografikoak eskuragarri daude Reynolds zenbaki horretan (Ananda, 2012; Hansen *et al.*, 2014).
Aipaturiko kurbak 2. irudian jarri dira. Irudiak garbi adierazten du eraso-angeluarekiko efizientziaren eboluzioak itxura paraboliko bat hartzen duela. Kurben morfologia antzekoa da lau kasutan: hasierako eremu lineal baten ostean ($\alpha < 6 - 7^\circ$) saturazio bat dator ($6 - 7^\circ < \alpha < 12 - 13^\circ$) eta, azkenik, efizientziaren jaitsiera nabarmen bat ($\alpha > 13^\circ$). Portaera hori, kualitatiboki, erreferentzia bibliografikoetako ikerketekin bat dator (Ananda, 2012; Hansen *et al.*, 2014), kontuan izanik ikerketa horiek jatorrizko konfigurazioetan eginak direla.

2. Irudia: efizientzia kurbak lau konfigurazioetan.



Efizientzia aldetik, palen helburua $\alpha \approx 9 - 10^{\circ}$ inguruan operatzea da, etekinik handiena lortu ahal izateko. Baina, ikusten den moduan, etekin hori konfigurazioaren menpekoa da oso, baita kurben eboluzio kuantitatiboa ere. Izan ere, jatorrizko konfiguraziotik turbulentua nahiz degradatua diren kasu pseudoerrealetara igarotzean, efizientzia maximoaren jaitsiera % 37 eta % 45ekoa delarik, hurrenez hurren. Badira okerrera egiten ez duten ezaugarriak, ordea: hasierako portaera lineala, adibidez, ez da nabarmen aldatzen konfigurazio batetik bestera. Gainera, konfigurazio turbulentuaren kasuan ez dago jatorrizkoan gertatzen den tupusteko jaitsierarik eraso-angelu altuetan, eta degradatutako kasuak ere jaitsiera motelagoa azaltzen du. Dena dela, faktore horiek ezartzeak ageriko kalteak dakartza efizientzia aerodinamikoaren balioan, eta aurretiko ikerketek ondorioztatzen dutenarekin bat datozenak, bai turbulentziaren kasuan (Tian *et al.*, 2019) eta bai degradazioarenean (Khalfallah eta Koliub, 2007; Pugh *et al.*, 2021).
Bestalde, emaitzek bi efektuen sinergiak azaleratzen dituzte. Eraso-angelu baxuetan ematen den eboluzio linealak malda nabarmen txikiagoa erakusten du, beste hiru konfigurazioetan ematen den antzekotasunetik urrun; efizientzia maximoa, bestalde, jatorrizko kasuarenetik % 25era jaisten da ia. Jaitsiera hori turbulentziak eta degradazioak, beren kabuz, sortzen dutena baino handiagoa da eta, hala, bi efektuek elkarrekintza bat dutela bistaratzen da. Eraso-angelu altuetan ematen den jaitsiera ere azkarrago gertatzen da, angelu tarte txikiago batean alegia; turbulentzia eta zimurtasunaren arteko interakzioaren beste adierazle bat da hori. Efektuon sinergia negatiboa da, hala, azterketa honek mahaigaineratzen duen fenomenoa, gutxi aztertua gaur artean.

4. Ondorioak

Orain arte azaldurikoa atzerabegirako batean laburbildu daiteke. Funtsean, ikerketak argi uzten du konfigurazio gero eta errealagoetara pasaraztean ematen diren efizientzia jauziak kontuan hartu beharrekoak direla. Aplikazio generiko batean, lana burutzen duen pala nahiz gorputz aerodinamiko ororen portaera efektu errealekiko sentikorra da oso. Efektu horiek, turbulentzia eta gainazalaren zimurtasuna, alegia, sinergetikoki uztartzen dira, independenteki sortzen dituzten kalteak baino nabarmenagoa den efizientzia jaitsiera bat eraginez. Sinergia negatibo horrek, beraz, diseinu prozedura birdefinitzeko premia azaleratzen du: ez da nahikoa haize-tunelaren jatorrizko egoeran entseguak egitearekin, ezta baldintza pseudoerrealetan ere. Prozedura egoki batek harik eta errealenak diren konfigurazioetan eginiko azterketak barnebildu behar ditu, efektu horiek ezin direlako baldintza errealen kontribuzio partikularrak kontsideratuz aurreikusi, bereziki. Izan ere, baliteke portaera aerodinamikoa hobetzeko orain arte diseinatu eta frogatu diren konponbide anitzek beren baliogarritasuna galtzea baldintza errealetan entseatzean, eta beste kontrol mekanismo batzuen proiekzioa beharrezkoa izatea. Halako prozedura bat definitu ezean, industria eolikoak berorrekin dakartzan erronkei aurrre egiteko esfortzuak oker bideraturikoak izango dira.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Ikerketa honek ondorio garbi batzuk uzten baditu ere, aurrera begirako ate ugari zabaltzen ditu. Lehentasun eta egingarritasun irizpideen bueltan sailkaturik, hauek dira etorkizunerako ikerketa-lerro nabarmenenak:

- Lehenik eta behin, fluxua kontrolatzeko diseinatu diren egungo teknikak berrikusi behar dira, beraien eraginkortasuna baldintza errealetan entseatu eta, kasuan kasuko, teknikoki berretsi edo baztertzeko. Litekeena da, adibidez, jatorrizko kasuetan onura baino kalte gehiago egiten duten kontrol teknikek bestelako portaera bat izatea baldintza errealetan.
- Bigarrenez, ikerketan aintzat hartu daitezkeen parametro aerodinamikoen kopuru eta ezaugarrien zabalpena aztertu beharko litzateke, aldagai lokalak ere kontutan hartuz. Izan ere, efizientzia terminotan egindako analisi bat mugatua da oso. Palaren portaera aerodinamiko globala adierazten du parametro horrek, baina ez du portaera hori eragiten duten mekanismo fisikoen zergatirik azaltzen.
- Azkenik, palen analisi bidimentsional batetik aerosorgailu osoaren azterketa tridimentsional batera igarotzeko beharra dago, ordenagailu bidezko simulazioez baliatuz, ingelesez CFD (*Computational Fluid Dynamics*) moduan ezagutzen dena.

6. Erreferentziak

Ananda, G., 2012. *Aerodynamic performance of low-to-moderate aspect ratio wings at low Reynolds numbers*. University of Illinois at Urbana-Champaign tesia.

Batchelor, G. K. 1953. *The theory of homogeneous turbulence*. Cambridge University Press, 1 edition.

Bons, J. 2010. A Review of Surface Roughness Effects in Gas Turbines. *Journal of Turbomachinery* 132.1–16.

Chu, Chia-ren, eta Pei-hung Chiang. 2014. Turbulence effects on the wake flow and power production of a horizontal-axis wind turbine. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 124.82–89.

Coleman, H., B. Hodge, eta R. Taylor. 1984. A Re-Evaluation of Schlichting's Surface Roughness Experiment. *Journal of Fluids Engineering* 106.60–65.

Corten, G.P., eta H.F. Veldkamp. 2001. Insects Cause Double Stall. *European Wind Energy Conference 2001* 470–474.

Dimitrov, Nikolay, Anand Natarajan, eta Jakob Mann. 2017. Effects of normal and extreme turbulence spectral parameters on wind turbine loads. *Renewable Energy* 101.1180–1193.

Han, Woobeom, Jonghwa Kim, eta Bumsuk Kim. 2018. Effects of contamination and erosion at the leading edge of blade tip airfoils on the annual energy production of wind turbines. *Renewable Energy* 115.817–823.

Hansen, K. L., R. M. Kelso, A. Choudhry, eta M. Arjomandi. 2014. Laminar Separation Bubble Effect on the Lift Curve Slope of an Airfoil. In 19^{th} *Australasian Fluid Mechanics Conference*, 1–4, Melbourne.

Khalfallah, Mohammed G., eta Aboelyazied M. Koliub. 2007. Effect of dust on the performance of wind turbines. *Desalination* 209.

Kok, Mariana, Joseph G. Smith, Christopher J. Wohl, Emilie J. Siochi, eta Trevor M. Young. 2015. Critical considerations in the mitigation of insect residue contamination on aircraft surfaces - A review. *Progress in Aerospace Sciences* 75.1–14.

Krogstad, P. A., eta P. A. Davidson. 2010. Is grid turbulence Saffman turbulence? *Journal of Fluid Mechanics* 642.373–394.

Latoufis, Kostas, Vasilis Riziotis, Spyros Voutsinas, eta Nikos Hatziargyriou. 2019. Effects of Leading Edge Erosion on the Power Performance and Acoustic Noise Emissions of Locally Manufactured Small Wind Turbine Blades. *Journal of Physics: Conference Series* 1222.1–12.

Meng, Xuanshi, Haiyang Hu, Xu Yan, Feng Liu, eta Shijun Luo. 2018. Lift improvements using duty-cycled plasma actuation at low Reynolds numbers. *Aerospace Science and Technology* 72.123–133.

Meseguer-Ruiz, José, eta Ángel Sanz-Andrés. 2012. Ecuaciones generales. In *Aerodinámica Básica*, 18–23. Madril: Garceta Grupo Editorial, 2 edition.

Nikuradse, J. 1933. Laws of Flow in Rough Pipes. Technical report, Washington, WA, U.S.A.

Petricca, Luca, Per Ohlckers, eta Christopher Grinde. 2011. Micro- and nano-air vehicles: State of the art. *International Journal of Aerospace Engineering* 2011.1–17.

Pugh, K., J. W. Nash, G. Reaburn, eta M. M. Stack. 2021. On analytical tools for assessing the raindrop erosion of wind turbine blades. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 137.110611.

Schottler, Jannik, Nico Reinke, Agnieszka Hölling, Jonathan Whale, Joachim Peinke, eta Michael Hölling. 2016. On the impact of non-Gaussian wind statistics on wind turbines — an experimental approach. *Wind Energy Science Discussions* 1–21.

Soltani, M R, A H Birjandi, eta M Seddighi Moorani. 2011. Effect of surface contamination on the performance of a section of a wind turbine blade. *Scientia Iranica* 18.349–357.

Sonter, Laura J., Marie C. Dade, James E.M. Watson, eta Rick K. Valenta. 2020. Renewable energy production will exacerbate mining threats to biodiversity. *Nature Communications* 11.6–11.

Takahashi, Timothy T. 1997. On the decomposition of drag components from wake flow measurements. In 35^{th} *Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, number January, Reno, NV, U.S.A. American Institute for Aeronautics and Astronautics (AIAA).

Tian, Wei, Ahmet Ozbay, eta Hui Hu. 2019. A wind tunnel study of wind loads on a model wind turbine in atmospheric boundary layer winds. *Journal of Fluids and Structures* 85.17–26.

Torrano, Ivan, 2016. *Low speed wind tunnel design, setup, validation and testing of airfoils in turbulent in ow conditions*. Mondragon Goi Eskola Politeknikoa tesia.

Van Treuren, Kenneth W. 2015. Small-Scale Wind Turbine Testing in Wind Tunnels Under Low Reynolds Number Conditions. *Journal of Energy Resources Technology* 137.1–56.

Vorobiev, Alexander, R M Rennie, eta Eric J Jumper. 2013. Lift enhancement by plasma actuators at low reynolds numbers. *Journal of Aircraft* 50.12–19.

Watkins, S., S. Ravi, eta B. Loxton. 2010. The effect of turbulence on the aerodynamics of low Reynolds number wings. *Engineering Letters* 18.

Yang, S. L., eta G. R. Spedding. 2013. Spanwise variation in circulation and drag of wings at moderate reynolds number. *Journal of Aircraft* 50.791–797.

7. Eskerrak eta oharrak

Egileok Eusko Jaurlaritzako Hezkuntza Sailak [PRE_2017_1_0178] kodigopean esleituriko diru-laguntza adeitsuki eskertzen dute, baita [No. IT009-16] izenpedun ikerketa taldeari emandakoa ere. Halaber, Gipuzkoako Aldundiak FETRAFLU [2018-CIEN-000101-01] proiektuari egokituriko beka aipatzen da.

Diseinuaren ezagutzaren biltzea software artefaktuetan; Produktu Lerroen Ingeniaritzan oinarritutako proposamena

Garmendia, X.[1], Diaz, O.[1], Azanza, M.[1]

Donostiako Informatika Fakultatea
Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU)

xabier.garmendiad@ehu.eus

Laburpena

Ikerketa Softwarea (IS) ikerketa-helburu baterako ikertzaileek garatzen duten softwarea da. Tamalez, ikerketa softwarearen aplikazio gutxik irauten dute behin sortu zituen ikerketa-proiektua amaitu eta gero eta, honen ondorioz, softwarea dakarten ikerketak errepikatzea eta berrerabiltzea zaila bihurtzen da. Askotan, ikertzaileek hutsetik antzeko arazoetarako softwarea eraikitzen dute, gurpila aldiro berrasmatuz. Diseinuaren Zientzia Ikerketa delakoaren testuinguruan, arazo honek Diseinuaren Printzipioek, ikerketa guztiek aurrera egin beharko luketen ezagutzak, hainbat artefaktuen artean sakabanatuta egotea dakar, ezagutza orokor bat galaraziz. Arazo honi aurre egiteko, lan honetan software komertziala garatzeko ondo ezarrita dagoen Produktu Lerroen Ingeniaritza (PLI) IS-motako softwareari aplikatzea aztertuko da.

Hitz gakoak: Ikerketa Softwarea, Softwarearen berrerabilpena, Design Science Research, Software Produktu Lerroak (SPL).

Abstract

Scientific Software (SS) is software that is developed by researchers to fulfill a research aim. Unfortunately, one of the problems associated with SS is that it seldom survives after the research work is concluded, and, as a result, research that involves the development of software becomes difficult reproduce. Researchers usually build software for similar problems from scratch, reinventing the wheel every time. In a Design Science Research (DSR) context, this problem causes Design Principles, sets of knowledge that carry all research forward, to be scattered among various artifacts, preventing a holistic knowledge. To fight this back, in this work we will analyze the application of the Software Product Line Engineering (SPLE) approach, which is well settled in the development of commercial software, to scientific software.

Keywords: *Scientific Software, Software reuse, Design Science Research, Software Product Lines (SPL)*

1. Sarrera eta motibazioa

Ikertzaile baten helburua orain arte landu gabeko ezagutza eta ekarpen berriak aurkitzea da. Ikerketa burutu ostean lortzen den ezagutza berri hori normalean argitaratutako lanen bitartez komunikatzen eta zabaltzen da, adibidez, artikuluen, liburuen edota tesien bidez. Argitaratutako lan hauetan ikerketa prozesuan zehar berretsitako ekarpen berriak adierazten dira, beste ikertzaileei ikerketarako bide berriak sortzeko edota erreferentzia-puntu bezala erabiltzeko balio dutenak.

Tamalez, argitaratzen diren lan asko ez dira errepikakorrak. Hau da, bertan argitaratutako emaitzak ezin dira berretsi ikerketa prozesuan zehar erabilitako baliabideak askotan ez direlako partekatzen argitalpenarekin batera (Chen *et al.*, 2019). Argitalpena, erabilitako datuak, eta jasotako emaitzak eskutik joan behar dira ikertzaileek egindako lanak beste ikertzaile batzuen eskuetan ere emaitza berdinak lortzen dituela frogatzeko. Gainera, baliabideen gabeziak, emaitzak egiaztatzeaz gain, erabili eta sortu diren baliabideen berrerabilpena ekiditen du. Ingeniaritzako arlo askotan ikerketa prozesuan arazo honi protagonista berri bat gehitzen zaio. Ingeniaritza ikertzaileek sarri ikerketa prozesuan zehar software berriak garatzen dituzte haien ikerketa esparruko arazoei aurre egiteko eta hauek artikulu batekin batera argitaratuak izan ohi dira haien ikerkuntzaren emaitza gisa (von Krogh eta Haefliger, 2010).

Ikerketa Softwarea (IS), software komertziala izan beharrean, testuinguru akademikoan ikertzaileek ikerketa helburu baterako garatzen duten softwarea da. Ikerketa softwareak mota desberdinekoak izan daitezke, horien artean denbora luzez garatuak izan diren software pakete handiak edota idatzitako kode lerro gutxi dituzten programa txikiak aurkitu daitezkeelarik (Hettrick, 2016).

Ingeniaritzako arloetan ez ezik, beste ikerkuntza-arlo desberdinetan software baten garapenaren beharra ere eman daiteke. Adibide bezala, geografiari buruzko ikerketetan ikertzaileek softwarea garatzen dute aplikazio desberdinetarako. Sistema hauen proposamenen artean ikertzaileak aldaketa geofisikoen jarraipen zehatzagoa egiteko softwareak eta analisi hobeak egiteko algoritmo geometrikoak aurkitzen dira (Steiniger eta Bocher, 2009). Ekonomiaren arloan berriz, ikertzaileek, nahiz eta programazioari buruz jakintza handirik ez izan, askotan software paketeak garatzen dituzte analisi estatistiko eraginkorrak aurrera eraman ahal izateko (Yalta eta Yalta, 2010). Beraz, ingeniaritza arloetaz gain, beste eremu batzuetan ere aurkitu dezakegu ikerketa softwarea.

Ikerketa lanetan sortzen diren softwarearen partekatzeak eta berrerabilpenak ikerketa diziplina bakoitzaren eraginkortasuna bultzatu dezake (von Krogh eta Haefliger, 2010). Zoritxarrez, ikuspegi hori lortzetik urrun dago. Ezagutzaren eta ikerkuntza softwarearen berrerabilpena gutxi landuta dagoen gai bat da. Eta arazo honen ondorioak areagotu egiten dira ikerketa eremua *Software Ingeniaritza (SI)* bada, non garatutako softwarea ikerketaren emaitza funtsezkoa den. Hemen aurkeztutako lan honek software ingeniaritzako testuinguruan ezagutzaren eta ikerkuntza softwarearen gaineko berrerabilpena bultzatzen duen proposamen bat aztertuko du, berrerabilpena buruan duen ikerkuntza bat sustatuz.

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Ikerketa softwarea ikerketa-prozesuen ezaugarri diren irekitasun (*openess*), biziraupen (*survivability*), errepikakortasun (*reproducibility*) eta pertsonalizatzeko ahalmen (*customizability*) printzipioek gidatu beharko lukete (Johannesson eta Perjons, 2014). Zoritxarrez, praktikan zaila da ikuspegi hori aurrera eramatea. Ikerketa softwarearen aplikazio gutxik irauten dute behin sortu zituen ikerketa proiektua amaitu eta gero (adibidez, doktorego-tesi bat). Software Ingeniaritzan, doktorego-denboraren %60 arte softwarearen garapenean aritzeak ahalegin inbertituaren neurriaren parte bat ematen du, eta ez da beti behar bezain errentagarria. Zehazki, zaila da Softwarearen Ingeniaritzako ikerketa errepikatzea, zaila baita ikerketaren emaitza bezala lortzen den ikerketa softwarea autoreak ez diren ikertzaileek abian jartzea.

Izan ere, 2020ko amaieran, Nazioarteko Software Ingeniaritza Kongresuan (*International Conference on Software Engineering - ICSE*) ikerketa prozesuan software bat garatu dutela aipatzen duten 800 lanen gainean burututako azterketa batek erakutsi zuen soilik %58ak publikoki eskuragarri uzten duela, lanaren erreplikazioa, errepikapena, hedadura eta egiaztapena galaraziz (Heumüller *et al.*, 2020). Honen ondorioz, egungo egoeran ISa ez da bakarrik errentagarritasun gutxikoa, gainera, Softwarearen Ingeniaritzako eta Informazio Sistemetako ikerketaren errepikagarritasuna arriskuan jartzen du. Lan honetan, gai hori Diseinuaren Zientzia Ikerketa (*Design Science Research - DSR*) delakoaren testuinguruan landuko dugu, eta gailu terminoa erabiliko dugu ISa aipatzeko.

DSR Informazio Sistemen eta Informazioaren Teknologia alorretan jatorria duen ikerketa metodologia da. Hala ere, gaur egun beste ikerketa arlo desberdinetara ere zabaldu da, adibidez, medikuntzaren ingeniaritzan, bioteknologian eta arkitekturan (von Krogh eta Haefliger, 2010). DSR azterketa zientifikoaz eta gailuak sortzeaz arduratzen da, eta interes orokorreko arazo praktikoak konpontzea du helburu (Johannesson eta Perjons, 2014). Gailu baten garapena ez da, ordea, halabeharrez DSR ikerketa bat. "Ikerketa" izateak esan nahi du gailua orokortu daitekeela hasieran arazoa sortu zuen testuingurutik kanpo. "Ikerketa" bihurtzeko soluzioa orokortzeko behar honek bi faktoreren arteko oreka bilatu beharra dakar. Alde batetik, gailuak ebaluatu ahal izateko adinako xehetasun maila izan behar du. Bestetik, gailua orokortu egin behar da ebaluazioaren konkretutik "ikerketak" eskatzen duen orokortzera pasatzeko (Winter, 2008). Beraz, eta gailu komertzialak ez bezala, DSR gailuak ez dira berez helburu bat, baizik eta *Diseinuaren Printzipioetan (DP)* aurrera egiteko bitarteko bat baizik, hots, arazoen eta konponbide-espazioen arteko erlazioetan aurrera egiteko bitartekoak. DPak irizpide orokorrak dira, gailuen diseinua jatorrian aztertutakoez gain bestelako testuinguruetan erabiltzea baimentzen dutenak, eta, horren bidez, haien proiekzioa (hau da, aplikazio-irismen zabalagoa dutenak) eta konfiantza (hau da, ebaluazio sendoagoak dituztenak) zabaltzen dituztenak (Vom Brocke *et al.*, 2020). Gailuak proiekzio eta konfiantza handiagoko testuinguruen aurrean jartzean, DPak orokorragoak eta sendoagoak bihurtzen dira. Beraz, DPak etengabeko fluxuan dauden ezagutza bat dira hainbat testuingurutan probatzen diren heinean.

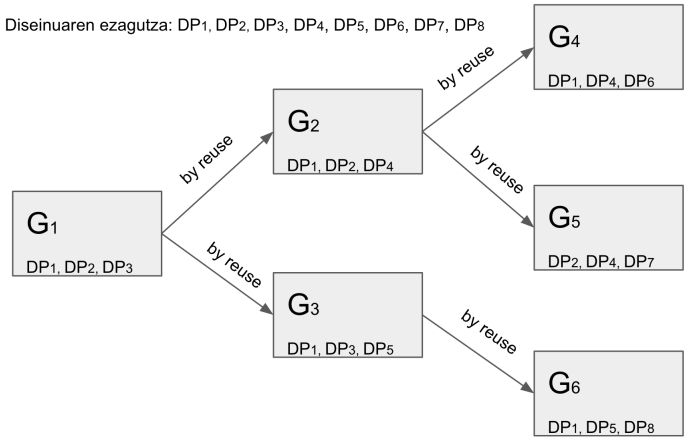
DPak funtsean ebolutiboak badira, azpiko gailuek ere hala izan beharko lukete, DPek aurrera egiteko beharrezko bitartekoa baitira. Vom Brocke *et al.*-ek ikuspegi hori lantzen dute bi egokitzapen mota desberdinduz. Batetik,

erabilerarako egokitzapena (hau da, gailuak bere funtzioa egungo testuinguruan egiteko duen gaitasuna) eta, bestetik, **eboluziorako egokitzapena** (hau da, gailuak denboran zehar problemaren espazioan gertatzen diren aldaketetara egokitzeko duen gaitasuna) (Vom Brocke *et al.*, 2020). Hala ere, autore berek onartzen dute, orain arte, "ikasketa" gehienak DSR proiektu bakar batean oinarritzen direla, proiektu horren barruan DPak lortzeko; aldiz, zenbait proiekturen bidez egindako ezagutza- eta eboluzio-bilketa gutxitan hartzen da proiektuaren aurrekari edo ekarpentzat (Vom Brocke *et al.*, 2020). Horren ondorioz, ikerketa softwarea ez da berrerabiltzen ez egokitzen.

Ikertzaileek softwarearen garapenaren kasuan, sarritan garapen-erabaki suboptimoak hartzen dituzte, ebaluaziora azkar iristeko. Ebaluaziorainoko denbora merkataritza munduko merkaturainoko denboraren baliokidea da. Azken kasuan, garapen-erabaki suboptimoek zor teknikoa (*technical debt*) deritzona eragin lezakete, hau da, garatzaileek irtenbide azkar baten bila hartzen dituzte software-garapenaren erabakiak inplementazio-denbora murrizteko (Lenarduzzi *et al.*, 2019). Laburbilduz, erabilerarako egokitasunari lehentasuna emateak, eboluziorako egokitzapena arriskuan jar lezake. Hau bereziki kaltegarria izan daiteke DSR proiektuetan, eboluziorako egokitzeak beste ikertzaile batzuek gailuak berrerabiltzea eta eskuratzea eragotzi baitezake, eta, beraz, DSR ikerketaren metatze- eta esplorazio-izaera oztopatu. Arazoaren ondorioetaz jabetzen gara, baina galderak bere horretan jarraitzen du, ikerketa softwarean berrerabilpena ezberdina den software komertzialaren berrerabiltzetik. Garapen horietako bakoitzaren helburuetan aurki daiteke erantzuna.

Softwarearen berrerabilpenak dituen onura komertzialen artean daude softwarearen kalitatea, kostua eta produktibitatea hobetzea (Frakes eta Kang, 2005). Onura hauek ikerketa softwarerako ere balio dute. Hala ere, ikerketa softwarearen azken helburua uneko DPetan aurrera egitea izan beharko luke. DSR gailuak ez dira arrakastatsutzat jotzen DPak finkatzen ez badituzte, haien kalitatea, kostua edo produktibitatea kontuan hartu gabe. Zoritxarrez, ikerketa-komunitateak ez du esaten duena egiten: nahiz eta ikerketa asko egin softwarea berrerabilpenari buruz, DSR gailuen artean ez dago berrerabilpenik edo, batez ere, kopiatu-bereganatu (*clone&own*) (Vom Brocke *et al.*, 2020) teknikaren bidez lortu da. Kasu horretan, produktu berri bat lehendik dagoen produktu bat kopiatuz hasten da, eta, ondoren, haren zatiak egokitzen dira baldintza berriak betetzeko. Epe laburrera kostuak aurrezten dituen arren, kopiatu-bereganatzeak gailu desberdinak sortzea dakar testuinguru bakoitzarentzat, hau da, DPen ulermen holistikoa emateko ahalegina atzeratu egiten da. Ondorioz, kopiatu-bereganatu praktikak "arrisku-jardueratzat" har daitezke DSR ikuspegitik, DPak hainbat gailutan sakabanatuta egongo baitira (ikus 1. irudia).

1. Irudia: Kopiatu-bereganatu teknikaren bidez sortutako gailuetan garatutako Diseinu Printzipioen sakabanapenaren irudikapen bat.



DSR munduan, diseinuaren printzipioen zehaztapena eta egingarritasun-proba da gailua. Hori dela eta, gure helburua G_1, G_2, ... G_n gailuak ez bereizi gisa hartzea baizik eta produktu-lerro bereko partaide bezala hartzea da, "ikerketa-eremu" bera partekatzen dutelarik. Ikuspegi honetan, ezagutzaren gordailuzainak ez dira argitalpenak soilik, baizik eta DSR ikuspegiarekin bat etorriz, baita gailu berri bat ere, produktu-lerroa, zeinak biltzen baititu komuna dena eta aldakorra dena, eta, horren ondorioz, ikertzaileek "ikerketa-eremu" bera lantzeko orduan aurkitu dutena testuinguru, interesatu edo helburu desberdinak kontutan izanda. Beste era batera esanda, produktu-lerro bat diseinuaren printzipioekiko da literaturaren berrikuspen bat argitalpenekiko dena: ikerketa-gai jakin batean egindako lanaren laburpena, kasu honetan DSR erabiliz. Literaturaren berrikuspenak sistematikoak badira, gailuen berrerabilpenak ere sistematikoa izan behar du. Horretarako, garapena produktu-lerroen ezagutzan oinarritu daiteke.

Proiektu honen premisa nagusia da diseinu printzipioen bilketari mesede egin dakiokeela gailuak berrerabiltzeak. Zehazki, hau proposatu nahi dugu:

"*Produktuen Lerroko Ingeniaritzaren ikuspegia, DSR gailuak garatzeko ikuspegi berrerabilgarri eta metagarri bezala Diseinu Printzipioetarako*"

Produktu Lerroen Ingeniaritzak (PLI) softwarea berrerabiltzeko estrategia sistematikoa ezartzen du. Estrategia horren helburua domeinu baten barruan zati komunak (funtzionaltasun komuna) eta aplikazioen arteko aldagaiak identifikatzea da, aktibo berrerabilgarriak eraikiz, etorkizuneko garapen ahaleginak errazteko (Apel *et al.*, 2013). Bai zati komunak bai aldakortasuna ezaugarrien (*feature*) nozioaren bidez zehazten dira, hau da, erabiltzaileak ezagutu dezakeen produktuaren portaeren bidez. PLIk produktua konfiguratzeko ezaugarriak abstrakzio nagusi bezala hartzen ditu kontuan, bezero baten betekizunetatik dagozkien funtzionalitatea ematen dituzten software gailuetaraino lotura egiteko erabiltzen baitira. Beraz, softwarearen bizi-zikloan zehar gailuek eta prozesuek duten oinarria ezaugarriak dira (Apel *et al.*, 2013). PLIak garatzeko, elkarrekin lotutako bi prozesu bereizten dira:

- **Domeinuaren Ingeniaritza**, hau da, domeinua aztertzeko eta berrerabiltzeko plataforma garatzeko prozesua. Problemaren espazioan, prozesu horrek softwarearen produktu lerroaren irismena lantzen du, baita kasuan kasuko domeinuaren barruan aldakortasuna eta zati komuna identifikatzea ere. Soluzioaren eremuan, domeinuaren ingeniaritzak berrerabilpenerako (*for reuse*) garapena lantzen du, hau da, berrerabiltzeko diren software-osagai edo -zatiak.
- **Aplikazioaren Ingeniaritza**, hau da, berrerabiltzeko plataformaren aktiboetatik abiatuta produktu bat eraikitzeko prozesua. Arazoaren eremuan, bezero jakin baten beharrak aztertzeko baldintzen azterketa sartzen da. Soluzioaren eremuan, aplikazio-ingeniaritzaren helburua da produktu zehatzak lortzea, ez hutsetik, baizik eta berrerabiltzeko plataforman oinarrituta. Berrerabilpenean oinarritutako garapen gisa laburbiltzen da (*by reuse*).

Testuinguru horretan, hauek dira proiektuaren helburuak:

- **Domeinuaren Ingeniaritza birformulatzea ikerketa gailuetarako.** Zer esan nahi du "ikerketa-eremua" izateak? Zer teknika erabili daitezke "ikerketa irismenetarako"? Zer ikerketa bide egin behar lituzke produktu-lerroak? Nola islatzen da ikerketa helburuen lehenespena produktu lerroaren eremuan?
- **Aplikazioaren Ingeniaritza birformulatzea ikerketa gailuetarako.** Eta produktuak ezin badira lortu aktibo berrerabilgarrietatik? Eta produktua pertsonalizatzea ez bada salbuespena mundu komertzialean ez bezala?
- **Nola motiba daitezke ikertzaileak programatzaile-lanetan berrerabilpenerako garatzeko?** DSRrentzat gailuak ezinbestekoak dira, baina ez dira zertan berrerabilgarriak izan behar. Berrerabil daitezkeen gailuak sortzeak kostu gehigarriak ditu, haien birfaktorizazioa egin beharra adibidez. Irabaziak, ordea, ez dituzte beti lortzen kostuak ordaintzen dituztenek. Ikerketa maiz neurtzen da argitalpenei dagokienez. Oinarrizko gailuaz haratago edozein lan egiteak, ikerketa taldearentzat onuragarria izan arren, beste argitalpen batetik denbora ken lezake. Horretarako, politika egokiak behar dira, artikuluen egileetan edo eskerroneko aipamenetan gailuen berrerabilpena saritzeko.
- **Nola motibatu daitezke ikertzaileak, programatzaile-lanetan, berrerabilpenaren bidez garatzera?** Softwarea eskura izateak ez du esan nahi nahitaez erabili behar denik. Batzuetan, softwarea aldatzea eta egokitzea garestiagoa izan daiteke zerotik behar den funtzionaltasuna programatzea baino. Testuinguru horretan, ikertzaileak beste pertsona baten kodea berrerabiltzeari uko egin diezaiokete, adibidez, kalitatezko dokumentaziorik ez badago. Nola handitu daiteke konfiantza?

3. Ikerketaren muina

Lan honetan proposatutako ideiak, DSR testuinguru batean, Produktu Lerroen Ingeniaritzaren ikuspegia aplikatzea du helburu. Honen bidez lortu nahi duguna zera da: DSR metodologia jarraituz garatu diren gailuen berrerabilpen sistematikoa sustatzea, hauen arteko DP bilketa ahalbidetzeko.

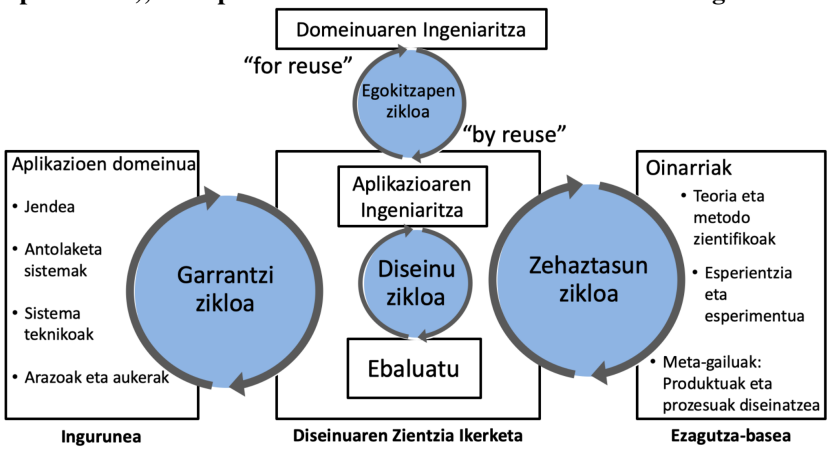
Hau lortzeko ezinbestekoa da DSR eta Produktu Lerroen Ingeniaritza aurrera eramaten duten prozesuak bateratzea. Alde batetik, aurreko atalean aipatu den bezala, PLI bi prozesuk osatzen dute: Domeinuaren Ingeniaritza eta Aplikazioaren Ingeniaritza. DSR metodologia aurrera eramateko ohiko prozesuak, berriz, Hevner autoreak 2007

lanean proposatutako hiru zikloko ikuspegi batek osatzen du, Garrantzi-zikloa (*Relevance Cycle*), Diseinu-zikloa (*Design-Cycle*) eta Zehaztasun zikloa (*Rigor Cycle*) biltzen dituenak.

- *Garrantzi-zikloa (Relevance Cycle)* DSR abiarazten du, eta praktika jakin baten barruan landuko den arazoa identifikatu eta aztertzen du. Arazoak interes orokorrekoa izan behar du, eta arazoaren balizko kausak azpimarratu behar dira. Ziklo honetan, arazoaren pertzepzioa ez ezik, soluzio bat onartzeko irizpideak ere lantzen dira.
- *Diseinu-zikloa (Design Cycle)* aurreko zikloan identifikatutako onarpen-irizpideen arabera arazoa konpontzen duen gailu baten diseinua eta garapena lantzen ditu.
- *Zehaztasun-zikloa (Rigor Cycle)* proiektuaren emaitzak literatura akademikoaren barruan kokatzen ditu, eta hartutako diseinu-erabakiak bermatzen dituzten oinarri zientifikoak ematen ditu. Zehaztasun-zikloak bermatu behar du sortutako diseinuak ikerketa-ekarpenak izatea, eta ez prozesu ezagunen aplikazioan oinarritutako ohiko diseinuak.

Lan honetan proposatutako ikuspegia aurrera eramateko asmoz, DSR metodologiaren hiru zikloko ikuspegia duen prozesuari Domeinuaren Ingeniaritza eta Aplikazioaren Ingeniaritza prozesuek barneratzen dituzten ideiak gehitzea proposatzen dugu, hauek biltzen dituen laugarren ziklo berri bat DSR prozesura txertatuz (Diaz *et al.*, 2021): Egokitzapen zikloa (*Fitness Cycle*) (ikus 2. irudia).

2. Irudia: Hevnerrek proposaturiko hiru zikloko ikerketa prozesuaren hedapena laugarren ziklo baten bitartez (Egokitzapen zikloa), DSR proiektu deberdinen arteko diseinuaren ezagutza sustatzeko.



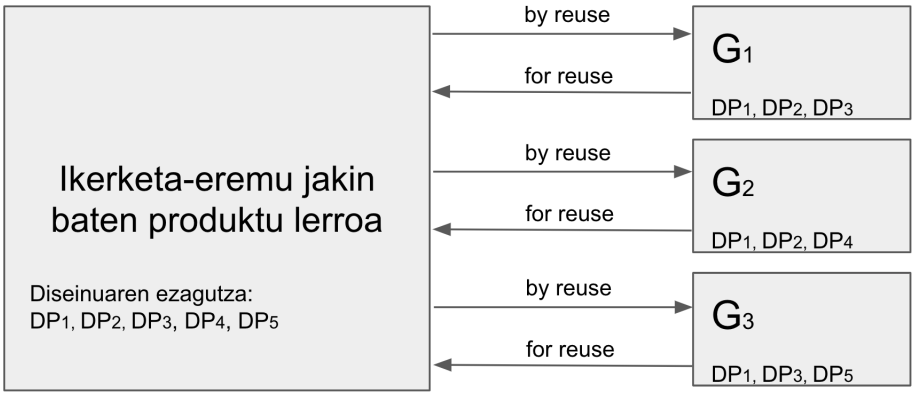
2. irudian ikus daitekeen bezala, Egokitzapen zikloak Diseinu zikloarekin elkar eragiten du. DSR gailuak Diseinu zikloan garatzen jarraitzen dira baina oraingoan produktu-lerroen ikuspegia erabiliz (*by reuse)*. Hau da, prozesu berri honen bitartez gailuen garapena ez da hutsetik hasten, produktu-lerroan aurkitzen diren baliabideen berrerabilpenaz abiatuz baizik (Aplikazioaren Ingeniaritza). Beraz, oraingo honetan inplikazioa bikoitza da. Alde batetik, proiektu berriak bere beharrak aurreko proiektuetan garatutako ezaugarrien (*feature*) bitartez karakterizatzeko ahalegina egin beharko du. Honek aurretik garatutako hainbat proiektutatik eratorritako esperientzien arteko alderaketa zehatzagoa egitea erraztuko du.

Beste alde batetik, proiektu berriak produktu-lerroak eskaintzen dituen baliabidetatik abiatzen bada litekeena da bere behar guztiak bete ezin izatea. Hau horrela baldin bada, gailu berriaren gainean moldaketak eta hedapenak egin beharko ditu bere behar berriak bete ahal izateko. Produktu-lerroaren diziplinak planteatzen duen Domeinuaren Ingeniaritza prozesua kontuan hartzen badugu, egindako aldaketak eta hedapenak ez dira gailu berrian isolatuta geratzen. Planteamendu honek, garapen berriak sortutako esperientzia produktu-lerrora iraultzera eta integratzera behartzen du, etorkizuneko proiektu eta ikertzaileentzat moldaketak berrerabiltzeko prest eskainiz (*for reuse*).

DSR proiektuetako gailuen garapenean "*by reuse*" eta "*for reuse*" urratsak gehitzeak testuinguru bakoitzean gailuen oinarri izango den berrerabilitzeko plataforma inkrementalki haztea ahalbidetzen du, DSR proiektuetan zehar garatutako diseinuaren ezagutza eta gailuen iturburu kodea bertan metatuz (ikus 3. irudia).

Hau da planteatzen dugun ikerketaren muina. Ikuspegi berri hau hasierako faseetan dago eta oraindik ikerkuntza bide luzea dugu aurretik. Lan honetan proposatzen dugun abiapuntuari jarraipena emateko, ezin bestela izan,

3. Irudia: Produktu-lerroen teknikaren bitartez bideratutako gailu garapenaren irudikapen bat, non gailuen artean sakabanatutako Diseinu Printzipioak berrerabilitzeko plataforman biltzen diren.



hurrengo urratsetan DSR erabiliko dugu ikerketa-metodologia gisa. DSR ikerketak biltzen dituen hiru ziklo nagusi horien barruan, planteatzen ditugun hurrengo pausuak hauek dira:

Garrantzi-zikloa (Relevance Cycle). Ziklo honetan gure helburua da arazoa, hau da, diseinu printzipioen bilketa erraztuko duten mekanismo egoki eza, eta haren garrantzia ulertzea. Hori lortzeko zereginak hauek dira:

- Ikerketa softwarearen testuinguruan berrerabilpena karakterizatzea. Ikerketa softwarerako berrerabilpenaren berezitasunak identifikatzea du helburu ataza honek.
- Arazoaren azterketa kausala egin: zein dira arazoaren kausak? Motibazioa falta da software berrerabilgarria egiteko? Berrerabiltzaileen konfiantza falta? Eta zer ondorio ditu? Ondorioak, bai ikertzaileek inbertitutako denboran, bai gurpila berrasmatzean edo lanak konparatzeko zailtasunak izan daitezke.
- Metrikak ezartzea, interesatuen helburuetan oinarritutako proiektuaren arrakasta neurtzeko. Interesatuak hauek dira: domeinu ingeniariak, produktu ingeniariak eta kudeatzaileak. Edo ikerketa-talde baten testuingurura itzulita: berrerabil daitekeen softwarea birfaktorizatzen duten doktoregaiak, hauek bere ikerketarako egindako softwarea berrerabiltzen (egokitzen) duten beste doktoregaiak, eta tesi-zuzendariak, batzuen eta besteen arteko transmisio-uhala direnak.

- Aurreikusitako ekarpenak:
  1. Kausa nagusiaren azterketa eta bibliografiatik lortutako euskarri osoa.
  2. Hirugarrenen softwarea eskuratzean gaur egun egiten diren jarduerei buruzko galdetegien emaitzak.
  3. Proiektuaren arrakasta ebaluatzeko metriken zerrenda.

Diseinu-zikloa (Design Cycle). Ziklo honen helburua betekizunak eta tresna proposatzea da. Gure gailua produktu-lerroen informatika ingeniaritzaren ikerketaren testuingurura egokitzea izango da. Produktu lerroen ingeniaritzak hiru ziklo ditu: Domeinuaren Ingeniaritza, Aplikazioaren Ingeniaritza eta Kudeaketa Zikloa.

- Domeinuaren Ingeniaritza birformulatzea ikerketa softwarerako.
- Aplikazioaren Ingeniaritza birformulatzea ikerketa softwarerako.
- Ikertzaileek berrerabilpenerako garatzeko motibazioak bilatzea.
- Ikertzaileek berrerabilpenaren bidez garatzeko motibazioak bilatzea.

- Aurreikusitako ekarpenak:
  1. Produktu lerroen praktikak ikerketa-ingurunera egokitzea.
  2. ERRONKALine. Ministeritzak I+D RETOS programaren barruan finantzatutako OpenLine proiektua erabiliko da proba kasu gisa. OpenLine-n egindako gailuak berrerabiltzeko garatuko dira, baina, era

berean, hasieran garatzaileak izan ez diren ikertzaileek berrerabiliko dituzte ikerketa-talde berean. Helburua izango litzateke OpenLinek ez gailu bat sortzea, ONEKIN talde berari baina beste talde batzuei OpenLine-n garatutakoa berrerabiltzea ahalbidetuko liokeen ERRONKAline produktu lerro bat baizik. Horretarako, OpenLine proiektuak hedapen ekintzak aurreikusten ditu. Kasu honetan, ekintza horiek are zentzu handiagoa izango lukete; izan ere, zabalkundea ez litzateke ideien bidez soilik egingo, baizik eta, batez ere, hirugarrenek berrerabiltzeko sortutako gailuen bidez.

Zehaztasun-zikloa (Rigor Cycle). Ziklo honen helburua bikoitza da. Alde batetik, oinarrizko teoriak bilatzea, gailuen diseinuaren oinarrien euskarri. Eta bigarrenik, ERRONKAline gailua ebaluatzea, teoriari zer neurritan eusten dioten ikusteko.

- "Ezagutza biltzeari" buruzko lanak bilatzea.
- ERRONKAline ebaluatzea ONEKIN taldearen barruan
- ERRONKAline ebaluatzea produktu lerroen ezagutza duten beste ikerketa-taldeekin.
- ERRONKAline ebaluatzea produktu lerroen ezagutza EZ duten beste ikerketa-taldeekin.

- Aurreikusitako ekarpenak:
  1. Praktikei buruzko literatura berrikustea, ezagutza biltzeko (adibidez, literaturaren berrikuspen sistematikoak).
  2. ERRONKAlinen ebaluazio-txostenak, berrerabilpenerako garatuz ikuspegitik.
  3. ERRONKAlinen ebaluazio-txostenak, berrerabilpena erabiliz garatuz ikuspegitik.

4. Ondorioak

ISa oinarritutako lanen errepikatzea eta berrerabilpena ikerkuntza-komunitatean dagoen arazo erreala da, Software Ingeniaritzan batez ere. Ikerketa softwarearen aplikazio gutxik irauten dute behin sortu zituen ikerketa-proiektua amaitu eta gero, honen ondorioz, ikerketa errepikatzea zaila bihurtzen da. Askotan, ikertzaileek hutsetik antzeko arazoetarako softwarea eraiki behar izaten dute, gurpila aldiro berrasmatuz. Nahiz eta auzi nabarmena izan, oraindik gutxi landutako arazoa da. Honek, aurreko ikertzaile batek egindako lanei jarraipena ematea eta hedapenaren bidez bide berriak irekitzera ekiditen du. DSRren kasuan, arazo honek Diseinuaren Printzipioak hainbat gailuen artean sakabanatuta egotea dakar, ezagutza orokor bat galaraziz.

Lan honen helburu nagusia Diseinuaren Zientzia Ikerketa metodologia jarraitzen duten ikertzailek egindako lanen berrerabilpena sustatzea da. Horretarako, lan honetan software komertziala garatzeko ondo ezarrita dagoen Produktu Lerroen Ingeniaritza (PLI) IS-motako softwareari eta Diseinuaren Printzipioei aplikatzea aztertzen da. Hemen proposatzen den soluzioa ez da berrerabilpenaren behin betiko soluzio bat, software gailuen berrerabilpena errazteko eta modu sistematiko batean aurrera eramateko bide bat eskaintzea baizik. Etorkizunera begira espero da "ikerketa-eremu" desberdinek proposatutako berrerabilpen metodologia adoptatzea eremu horietan sortzen den ezagutzaren hedapena eta berrerabilpena hazi dadin.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Lanaren hedapenari dagokionez hiru norabide bereizi daitezke proposatutako lanetik aurrera.

Batetik, artikuluan komentatu den moduan, DSR software gailuak eta ezagutza sortzeko erabiltzen den metodologia da. Hala ere, DSRren gaitasuna handiagoa da, eta arazo praktikoei soluzioa emateko ez da zertan bakarrik softwarean oinarritu behar. DSR softwarea ez den beste gailu batzuk ere sortzeko erabili egiten da hala nola, irudikapen eraikuntzak, ereduak eta metodoak (Johannesson eta Perjons, 2014). Izan ere, software produktu-lerroak ez dira soilik softwarearen kodea berrerabiltzera mugatzen. Software produktu lerroek kodeaz gain, softwarearen betekizunak, diagramak eta dokumentazio anitzak biltzeko eta sistematikoki berrerabiltzeko ere erabiltzen dira. Gure lanean gailuak software gisa kontuan hartu ditugu, ezagutzaren eramaile bezala, software produktu-lerroen bidez berrerabiltzeko. Beraz, aipatutako gailu hauen gainean software produktu-lerroetan oinarritutako berrerabilpena nola moldatuko litzatekeen ikerkuntzarako bide berri bat ireki dezake.

Bestetik, gure lana DSR metodologian oinarritzen den moduan, beste norabide bat beste metodologia berri batean oinarritutako ikerkuntza-softwarearen berrerabilpena aztertzea izan daiteke. Gure lanak DSRren ezaugarriak

kontuan hartzen ditu (diseinuaren printzipioak, ezagutza, ziklo prozesuak...) eta honen berrerabilpena gailuetan islatutako ezagutzaren berrerabilpena eta hedapena bultzatzen du. Adibidez, DSRek bezala gailuak kontuan hartzen dituen beste metodologia bat *Action Research* (Sein *et al.*, 2011) da eta aztertu daiteke hemen planteatutakoa bertan nola aplikatu.

Azkenik, Software Ingeniaritzakoa ez den beste ikerketa-eremuetan garatutako softwarea kontuan hartu daiteke etorkizuneko ikerketa gisa. Arlo hauetan jarduten duten ikertzaileek ez dute ezagutzarik software ingeniaritzari buruz, honek erronka bat suposatu dezake haien softwarearen berrerabilpen sistematikorako.

6. Erreferentziak

Apel, Sven, Don Batory, Christian Kästner, eta Gunter Saake. 2013. A development process for feature-oriented product lines. In *Feature-Oriented Software Product Lines*, 17–44. Springer.

Chen, Xiaoli, Sünje Dallmeier-Tiessen, Robin Dasler, Sebastian Feger, Pamfilos Fokianos, Jose Benito Gonzalez, Harri Hirvonsalo, Dinos Kousidis, Artemis Lavasa, Salvatore Mele, eta others. 2019. Open is not enough. *Nature Physics* 15.113–119.

Diaz, Oscar, Haritz Medina, eta Jeremias Perez Contell. 2021. Promoting design knowledge accumulation through systematic reuse: The case for product line engineering. In *Proceedings of the 54th Hawaii International Conference on System Sciences*, p. 5429.

Frakes, William B, eta Kyo Kang. 2005. Software reuse research: Status and future. *IEEE transactions on Software Engineering* 31.529–536.

Hettrick, Simon. 2016. Research software sustainability: Report on a knowledge exchange workshop.

Heumüller, Robert, Sebastian Nielebock, Jacob Krüger, eta Frank Ortmeier. 2020. Publish or perish, but do not forget your software artifacts. *Empirical Software Engineering* 25.4585–4616.

Hevner, Alan R. 2007. A three cycle view of design science research. *Scandinavian journal of information systems* 19.4.

Johannesson, Paul, eta Erik Perjons. 2014. *An introduction to design science*. Springer.

Lenarduzzi, Valentina, Terese Besker, Davide Taibi, Antonio Martini, eta Francesca Arcelli Fontana. 2019. Technical debt prioritization: State of the art. a systematic literature review. *arXiv preprint arXiv:1904.12538* .

Sein, Maung K, Ola Henfridsson, Sandeep Purao, Matti Rossi, eta Rikard Lindgren. 2011. Action design research. *MIS quarterly* 37–56.

Steiniger, Stefan, eta Erwan Bocher. 2009. An overview on current free and open source desktop gis developments. *International Journal of Geographical Information Science* 23.1345–1370.

Vom Brocke, Jan, Robert Winter, Alan Hevner, eta Alexander Maedche. 2020. Special issue editorial–accumulation and evolution of design knowledge in design science research: A journey through time and space. *Journal of the Association for Information Systems* 21.9.

von Krogh, Georg, eta Stefan Haefliger. 2010. Opening up design science: The challenge of designing for reuse and joint development. *The Journal of Strategic Information Systems* 19.232–241.

Winter, Robert. 2008. Design science research in europe. *European Journal of Information Systems* 17.470–475.

Yalta, A Talha, eta A Yasemin Yalta. 2010. Should economists use open source software for doing research? *Computational Economics* 35.371–394.

7. Eskerrak eta oharrak

Aurkeztutako ikerkuntza-lerroa *Hawaii International Conference on System Science* izena duen nazioarteko kongresuan artikulu hoberenera proposatua izan den (Diaz *et al.*, 2021) artikuluaren eratorria da. Oraingo ikerketaren helburuak bertan planteatutako ideiari jarraipena ematea eta ekarpen berriak lortzea izango dira.

Lan hau UPV/EHUko ONEKIN ikerketa-taldean burutuko da eta Xabier Garmendiak EHUko Ikertzaileak prestatzeko helburua duen kontratu bat jaso du tesia egiteko.

Fabrikazio aditibo bidezko sare egituren eredu analitikoa zeharkako isotropiarako

Alaña Olivares, M., Ruiz de Galarreta, S., López de Arancibia, A.

TECNUN Ingeniaritza Eskola, Manuel de Lardizabal Ibilbidea, 13, 20018 Donostia

malana@tecnun.es

Laburpena

Ekoizpen aditiboaren azken urteetako garapenak egitura konplexuak eskala txikietan sintetizatzea ahalbideratu du, egitura hauen geometriaren kontrol oso altuarekin. Sare egiturak egitura mesoskopikoak dira, habez osatuak, eta hauek moldatu egin daitezke egitura osoak ezaugarri mekaniko jakin batzuk izan ditzan. Hau bereziki erabilgarria da inplante ortopedikoen diseinuan, izan ere, inplantearen eta hezurren arteko zurruntasun ezberdintasunak arazoak sor ditzake inplantea ondo finkatzeko, eta posible da kirurgia gehiagoren beharra izatea. Lan honetan eredu analitiko bat garatu da zeharka isotropikoak diren egiturak diseinatzeko, era honetan dentsitate altuko hezurren (hezur kortikalak) propietate mekanikoak imitatuz.

Hitz gakoak: Fabrikazio aditiboa, sare egiturak, inplante ortopedikoak, eredu analitikoa

Abstract

The development of additive manufacturing in recent years has enabled the production of complex structures at small scales with a very high control of the resulting geometry. Lattice structures are mesoscopic structures formed by beams that can be tailored to obey predefined mechanical properties. This can be particularly useful in the design of orthopaedic implants, since the stiffness difference between the bone and implant causes problems that affect implant fixation and can lead to surgery revision. In this work an analytical model was developed to design transversely isotropic structures, thus mimicking the mechanical properties of the denser bones, e.g. cortical bones.

Keywords: *Additive manufacturing, lattice structures, orthopaedic implants, analytical model*

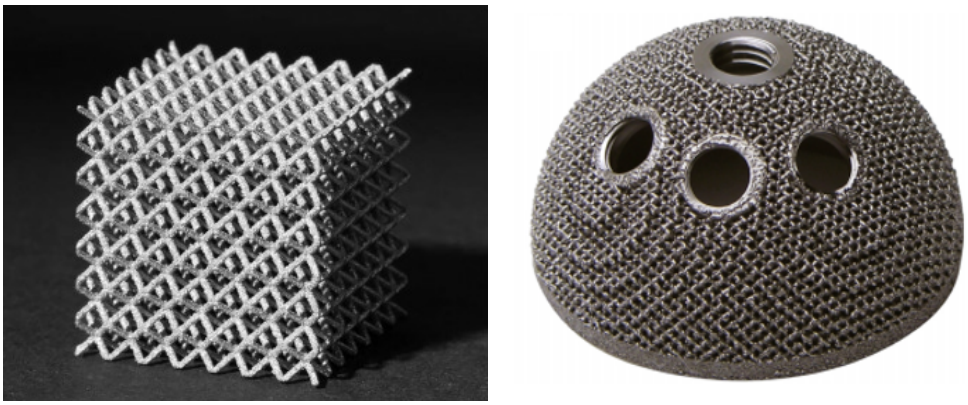
1. Sarrera eta motibazioa

Sare egiturak habez osaturiko egiturak dira, oinarrizko unitate-gelaxka bat erabiliz espazio bat betetzen dutelarik (ikusi 1a Irudia) (Gibson eta Ashby, 1997). Oinarrizko unitate-gelaxka hauek egitura osoaren ezaugarri mekanikoak baldintzatzen dituzte: unitate-gelaxkek habe kopuru ezberdinak, kargarekiko hainbat angelu, eta diametro ezberdinak izan ditzakete (Deshpande *et al.*, 2001).

Ekoizpen aditiboari, eta bereziki *Selective Laser Melting* (SLM) teknologiari esker, konplexutasun handiko metalezko sare egiturak fabrika daitezke gaur egun, eta sektore askotarako prezio lehiakorrean, hala nola aeronautika, industria espaziala eta osasungintzaren alorrean (Maconachie *et al.*, 2019). Honela, posible da eskala mesoskopikoko egiturak era fidagarrian ekoiztea. Eskala mesoskopikoa eskala mikroskopiko eta makroskopikoaren artekoa da. Honela, egiturak begi hutsez ikus badaitezke ere, posible da euren portaera mekanikoa solido homogeneo trinko bakar batena bezala aztertzea. Eskala mesoskopikoan ekoiztearen abantaila sare egitura meta-material gisa aztertu daitekeela da. Era honetan sare egiturak beren-beregi diseinatutako propietate mekanikoak dituen material baten gisa jardungo du.

Egitura mota hau bereziki baliagarria da inplante ortopediko berrien garapenean (1b Irudia), egungo inplanteen diseinuan hainbat erronkei aurre egin behar zaielako. Erronka hauetako bat inplantearean eta hezurraren arteko zurruntasun ezberdinak epe erdi eta luzera eragin ditzaken arazoei aurre egitea da. Gorputzeko hezur-ehunak etengabe sortzen eta desegiten dira, osteogenesi eta hezur-erresortzio izeneko prozesuen bitartez, eta bi prozesu hauen arteko orekak berebiziko garrantzia du hezurren funtzionamendu egokia bermatzeko. Osteogenesia hezurrak jasaten duen kargaren arabera erregulatzen da, beraz, hezurrak ez badu esfortzurik bere gain hartzen, osteogenesi

1. Irudia: a) Sare egitura bidez osatutako kuboa (Tancogne-Dejean eta Mohr, 2018b) eta b) sare egitura bidez egindako inplanterako pieza (Perticarini *et al.*, 2015).

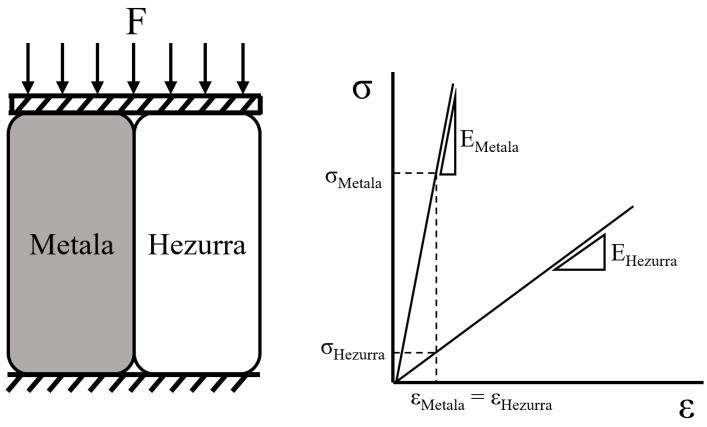


(a) (b)

prozesua moteldu egiten da, eta hezur-erresortzioak ehunaren desagertzea eta hezurraren dentsitate jaitsiera eragingo du (Barba *et al.*, 2019; Murr, 2018).

Ohiko inplante ortopedikoak material trinkoz eginak daude. Material erabilienak Ti-6Al-4V eta Co-Cr aleazioak dira eta euren Young-en moduluak 110 GPa eta 210 GPa dira, hurrenez hurren. Hezurraren Young-en modulua, ordea, gehienez 30 GPa ingurukoa da. Gainera, hezurraren zurruntasuna oso aldakorra da, gutxi gora behera 20 MPa eta 30 GPa arteko hainbat balio har ditzake (Currey, 2013) hezurraren kokapenaren arabera, besteak beste. Honek ondorio nabariak ditu hezurrak jasaten dituen esfortzuetan hezur eta inplanteak elkarrekin diharduten ean, 2 Irudian azaltzen den bezala: Hezurrak eta inplante zurrunago batek karga jasatean, inplanteak kargaren zati askoz handiago bat jasoko du, hezurrari zati txiki bat utziz. Lehen azaldu bezala, hau gertatzean, hezur-erresortzioa emango da, eta hezurrak dentsitatea galduko du. Honek pazienteengan minak sor ditzake, eta inplantea askatzera hel daiteke hezur asko galduz gero (Zhang *et al.*, 2020). Sare egiturek hauen oinarrizko materiala baino malguagoak diren piezak sortzea ahalbidetzen dute. Hortaz, biobateragarriak diren Ti-6Al-4V eta Co-Cr aleazioak erabilita inplante malguagoak diseina daitezke. Honetaz gain, pieza porotsuak izanik, hezurra sare egituraren barnerantz hedatu daiteke, hezur-ehun berriak sortuz eta inplante eta hezurraren arteko lotura hobetuz.

2. Irudia: Hezur eta metal arteko interakzioa, eta material bakoitzean sortzen den tentsio eta deformazioa F karga baten eraginpean.



Are gehiago, inplantearen zurruntasunaz gain, bere anisotropia ere kontrolatzea posible da, inplantearen eta hezurraren ezaugarri mekanikoak ahalik eta antzekoenak izan daitezen. Lan honen helburua sare egitura zeharka isotropikoak diseinatzea da. Zeharka isotropikoak diren materialek Young-en modulu bera dute plano bakar bateko norabide guztietan, planoarekiko perpendikularra den norabidean zurruntasun ezberdina dutelarik.

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

2.1. Dentsitate erlatiboa

Sare egituren ezaugarri mekanikoak euren dentsitate erlatiboaren araberakoak dira. Dentsitate erlatiboa ρ/ρ_s edo ρ^* bezala adierazten da:

$$\rho^* = \frac{\rho}{\rho_s} = \frac{V_{lattice}}{V_{total}} \tag{1}$$

Ekuazio honetan $V_{lattice}$ aldagaiak sare egituraren materialak hartzen duen bolumena adierazten du. Bestalde, V_{total} aldagaia egitura osoak hartzen duen bolumena da. Beste era batera, dentsitate erlatiboa, materialaren eta egitura osoaren arteko frakzioa da.

2.2. Homogeneizazioa

Ikertutako sare egiturak eskala mesoskopikoan ekoizten dira eta pieza bakar batean milaka habe egon daitezke. Hori dela eta, habe bakoitza kontuan hartu beharrean, egitura mesoskopikoa meta-material gisa kontsidera daiteke eskala makroskopikoan lan egitean. Honetarako sare egiturari zurruntasun matrize bat esleitzen zaio, egituraren portaera baliokidea duena. Honi homogeneizazio deitzen zaio, egitura bat meta-material homogeneo gisa eredutzen baita.

Gibson eta Ashby (1997)en ereduaren arabera, sare egitura mota bakoitzaren zurruntasun eta erresistentzia hauen dentsitate erlatiboaren berreketa gisa defini daitezke 2 eta 3 ekuazioetan adierazi bezala. Hauetan E_s eta $\sigma_{y,s}$ material solidoaren propietateak dira, E eta σ sare egituraren ezaugarriak direlarik. Honek adierazten du dentsitate erlatiboak sare egituraren eta hau osatzen duen material solidoaren zurruntasun eta erresistentziaren arteko erlazioa definituko duela.

$$\frac{E}{E_s} = C_1 \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{n_1} \tag{2}$$

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_{y,s}} = C_2 \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{n_2} \tag{3}$$

Era honetan, unitate-gelaxka bakarra erabiliz ezaugarri mekanikoen tarte zabalak lortu daitezke habeen konfigurazio berdinerako, euren diametroaren bidez dentsitate erlatibo ezberdinak diseinatuz. Lan honen helburua hezurraren zurruntasun baliokidea duten metalezko sare egiturak diseinatzea da. Zurruntasun maila baliokideaz gain, garatutako eredu analitikoak sare egitura zeharka isotropikoak diseinatzeko ere balio du, hezurraren anisotropia baliokidea lortzeko.

3. Ikerketaren muina

3.1. Zurruntasun-matrizea

Erreferentzia sistema gisa 1, 2 eta 3 norabide ortogonalak erabiliko dira. Honela, diseinatutako egitura zeharka isotropikoa izango da 1-2 planoan. Bestalde, 3 norabidean zurruntasun ezberdina edukiko du, 1-2 planokoarena baino handiagoa. Bi zurruntasun hauen arteko erlazioa diseinuan E_3/E_1 bezala definituriko aldagaia izango da, kontuan izanik 1-2 planoan zurruntasuna E_1 dela edozein norabidetan.

Hasteko zeharka isotropikoa den zurruntasun-matrize orokor bat ($\boldsymbol{C}$) definitu da 4 Ekuazioan (Tan, 1994). Aldagaiak argiago erakusteko, zurruntasun matrizea malgutasun matrizearen ($\boldsymbol{S}$) alderantzizko gisa adierazten da:

$$\boldsymbol{C} = \boldsymbol{S^{-1}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{-\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{G_{13}} & 0 & 0 \\ & sym & & & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ & & & & & \frac{E_1}{2(1+\nu_{12})} \end{bmatrix}^{-1} \tag{4}$$

Sare egituraren zurruntasun-matrizea lortzeko lehenik eta behin sare egituraren energia kalkulatu beharra dago, deformazioaren menpe. Ezaugarri mekanikoen diseinua ahalbidetuko duen eredu matematiko sinplea lortzeko habeen makurdura eta tortsioa mespretxatu egin dira, esfortzu axialak soilik kontuan hartuz. Honela, egituraren deformazio energia elastikoa (ψ) habe bakoitzaren energiaren batura izango da, 5 Ekuazioak definitzen duen bezala (Tancogne-Dejean eta Mohr, 2018a). E_s material solidoaren Young-en modulua da, V_0 egituraren bolumena, eta $A^{(i)}$, $l^{(i)}$ eta $\varepsilon^{(i)}$ habe bakoitzaren sekzioa, luzera eta deformazio axiala dira, hurrenez hurren. $\underline{\underline{\boldsymbol{\varepsilon}}}$ deformazio tentsore makroskopikoa da, eta $\underline{\boldsymbol{n}}^{(i)}$ bektorea i habearen norabidea adierazten duen bektore unitarioa da.

$$\psi(\underline{\underline{\boldsymbol{\varepsilon}}}) = \frac{1}{2}\frac{E_s}{V_0}\sum_{i=1}^{N_{habe}} A^{(i)} l^{(i)} \varepsilon^{(i)^2}, \quad \text{non } \varepsilon^{(i)} = \underline{\underline{\boldsymbol{\varepsilon}}} : (\underline{\boldsymbol{n}}^{(i)} \otimes \underline{\boldsymbol{n}}^{(i)}) \tag{5}$$

5 Ekuazioan definituriko energia deformazio makroskopikoarekiko ($\underline{\underline{\boldsymbol{\varepsilon}}}$) birritan diferentziatuz, zurruntasun matrizearen adierazpen analitikoa lortzen da edozein egitura motarako:

$$C_{jklm} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial \underline{\underline{\boldsymbol{\varepsilon}}}^2} = E_s \sum_{i=1}^{N_{habe}} \frac{A^{(i)} l^{(i)}}{V_0} n_j^{(i)} n_k^{(i)} n_l^{(i)} n_m^{(i)} \tag{6}$$

6 Ekuazioak edozein sare egituraren zurruntasun-matrizea definitzen du, honen habeen morfologiaren eta norabidearen arabera. $n_x^{(i)}$ aldagai bakoitzak $\boldsymbol{n}^{(i)}$ bektorearen proiekzioa adierazten du x norabidean (1, 2 edo 3 norabideak). Bestalde, 6 Ekuaziotik sare egiturarekiko independenteak diren bi murrizketa gara daitezke:

$$C_{jjkk} = C_{jkjk} \tag{7}$$

$$C_{1111} + C_{2222} + C_{3333} + 2C_{1122} + 2C_{1133} + 2C_{2233} = \rho^* E_s \tag{8}$$

7 eta 8 Ekuazioak 4 Ekuazioko zurruntasun matrizean aplikatuz, eta aldagaiak ordenatuz, zeharka isotropikoa den edozein sare egituraren zurruntasun matrizea defini daiteke, betiere makurdura eta tortsioa mespretxagarriak izatekotan. Honela, lortzen den zurruntasun-matrizea lau aldagai independenteren menpe egongo da: dentsitate erlatiboa (ρ^*), zurruntasunen arteko erlazioa (E_3/E_1), material solidoaren Young-en modulua (E_s) eta Poisson-en koefizienteak (ν_{12}):

$$\boldsymbol{C} = \frac{3\rho^* E_s}{4[2 + \frac{E_3}{E_1}(1 - \nu_{12} + 4\nu_{13})]} \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & \frac{4}{3}\frac{E_3}{E_1}\nu_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & 1/3 & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{4}{3}\frac{E_3}{E_1}(1-\nu_{12}) & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{4}{3}\frac{E_3}{E_1}\nu_{13} & 0 & 0 \\ & sim. & & & \frac{4}{3}\frac{E_3}{E_1}\nu_{13} & 0 \\ & & & & & 1/3 \end{bmatrix} \tag{9}$$

Zurruntasun-matrize honek zeharka isotropikoak diren sare egituren portaera elastikoa definitzen du, eta honetatik Young-en moduluak atera daitezke 1 eta 3 norabideetan, baita G_{12} eta G_{13} ebakidura moduluak:

$$E_1 = \rho^* E_s \frac{(1+\nu_{12})}{4 + \frac{E_3}{E_1}[2(1-\nu_{12}) + 8\nu_{13}]} \tag{10}$$

$$E_3 = \rho^* E_s \frac{\frac{E_3}{E_1}(1+\nu_{12})}{4 + \frac{E_3}{E_1}[2(1-\nu_{12}) + 8\nu_{13}]} \tag{11}$$

$$G_{12} = \rho^* E_s \frac{1}{4\left[2 + \frac{E_3}{E_1}[(1-\nu_{12}) + 4\nu_{13}]\right]} \tag{12}$$

$$G_{13} = \rho^* E_s \frac{\frac{E_3}{E_1}\nu_{13}}{2 + \frac{E_3}{E_1}[(1-\nu_{12}) + 4\nu_{13}]} \tag{13}$$

Sare egituraren Young-en moduluak eta ebakidura moduluak dentsitate erlatiboarekiko (ρ^*) eta material trinkoaren Young-en moduluarekiko (E_s) proportzionalak dira eredu honen arabera. Hala ere, ρ^* aldagaia sare egituraren habe bakoitzaren bolumenaren batura soila da, euren arteko intersekzioak kontuan izan gabe. Ereduaren zehaztasuna hobetzeko dentsitate erlatiboaren aldagaia doitu egin da, materialaren intersekziok kontuan har ditzan. Eraldaketa honek modulu elastikoen eta dentsitate erlatiboaren arteko linealtasuna desegiten du, 4 Irudian azaltzen diren eredu analitikoetan ikus daitekeen bezala.

Hala ere, eredu analitikoa E_s-rekiko lineala da, eta hortaz 10-13 Ekuazioko moduluak baino zentzu gehiago du eredu analitikoa materialaren modulu elastikoarekiko normalizatuta adieraztea, hau da, E_1/E_s, E_3/E_s, G_{12}/E_s eta G_{13}/E_s; hala adierazten da 4 Irudian. Era honetara, eredu analitikoa materialarekiko independentea egiten da, eta sare egituraren portaera elastikoa lortzeko nahikoa da materialaren Young-en moduluarekin biderkatzea.

Bestalde, nahiz eta 9-13 Ekuazioetan ν_{13} aldagaia agertzen den, hau ez da independentea. Zeharkako isotropia bermatzeko 14 Ekuazioan adierazten den ν_{12} eta ν_{13} aldagaien arteko erlazioa ere bermatu beharra dago:

$$4\frac{E_3}{E_1}\nu_{13}^2 + 3\nu_{12} - 1 = 0 \tag{14}$$

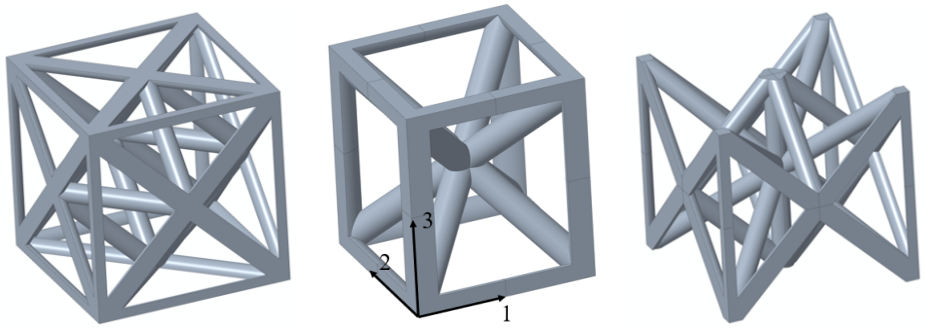
Azkenik, zurruntasun aldaketa ahalik eta mailakatua izan dadin, zurruntasun direkzionala elipsoide bat izan dadin kalkulatu da (ikusi 4d Irudia). Hau ν_{12} jakin bat inposatuz lortzen da.

Zurruntasun-matrizea definitzen duten gainerako aldagaiak (E_s, E_3/E_1 eta ρ^*) egiturak diseinatu aurretik aukera daitezke, eta hortik habiatuz egituraren konfigurazioa eta habeen diametroak kalkulatu ahalko dira. Hortaz, zeharka isotropikoak diren sare egituren eredu analitikoa komuna da edozein egiturarako, eta portaera elastiko bera lortzeko hainbat aukera ezberdin egon daitezke.

3.2. Egituren diseinua

Sare egitura diseinatzeko lehenik eta behin zurruntasun-matrizea definitu beharra dago, 9 Ekuazioan adierazitako diseinu-parametroen menpe. Behin zurruntasun matrizea ezagututa, sare egitura osatuko duen unitate-gelaxka aukeratzen da, hots, egitura osatuko duten habe kopurua eta hauen posizioa. Kontuan hartu behar da habe eta lotura asko dituzten unitate-gelaxka hiperestatikoek hobeto beteko dutela makurdura eta tortsio mespretxagarrien hipotesia. 3 Irudiak hiru unitate-gelaxka posible irudikatzen ditu.

3. Irudia: Zeharka isotropikoak diren sare egitura posibleen unitate-gelaxkak: a) SC2FCC2, b) SC2BCC eta portaera mekanikorako erabilitako erreferentzia sistema, eta c) VFCCBCC.



(a) (b) (c)

Unitate gelaxka eta zurruntasun-matrizea definiturik daudela, 6 Ekuazioan parametro ezezagun bakarrak habeen sekzioak izango dira ($A^{(i)}$). Hauek, 6 eta 9 ekuazioak berdinduz lortu ahalko dira. Honela, egiturak guztiz definiturik geratuko dira, eta euren portaera elastiko ideala 9 Ekuazioko zurruntasun matrizeak deskribatuko du.

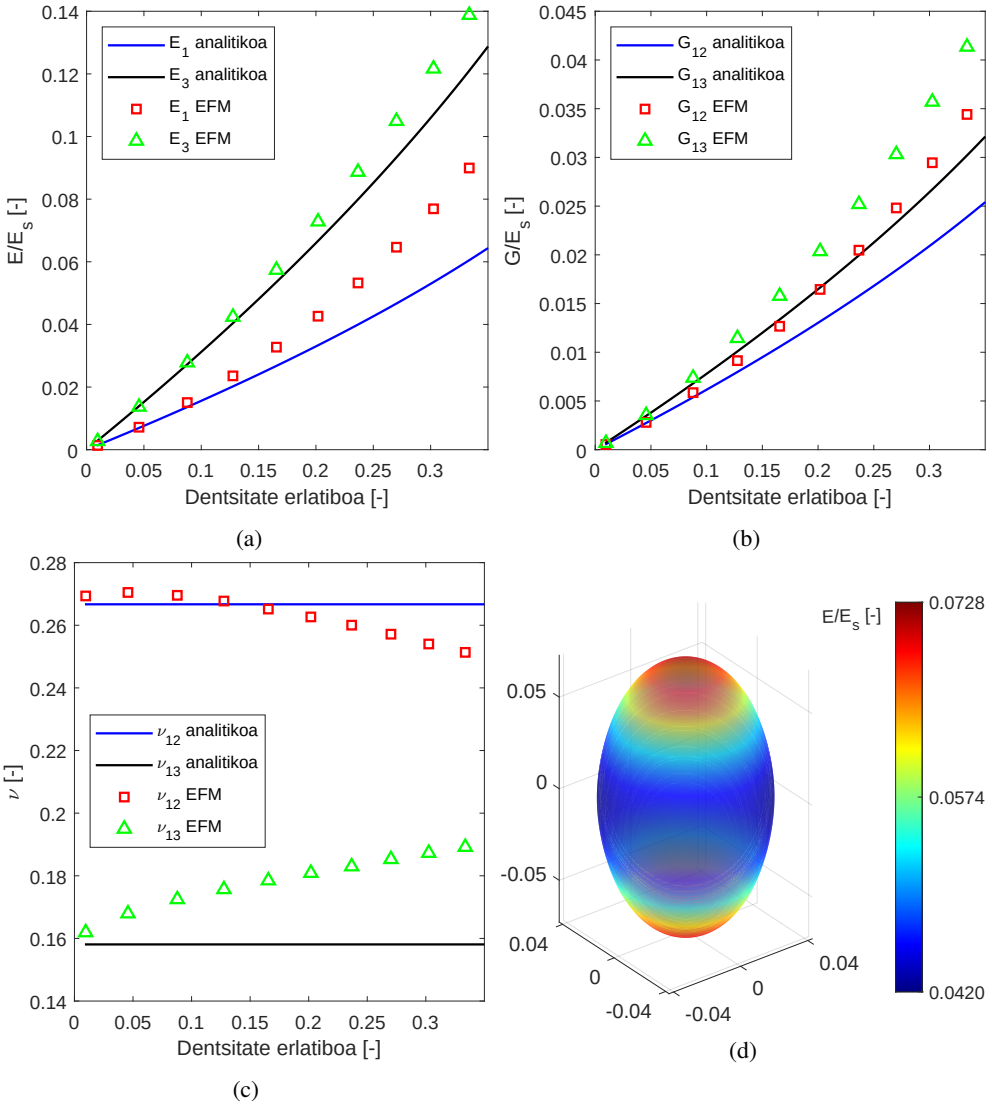
3.3. Zenbakizko baliozkotzea

Eredu analitikoaren baliozkotzea Elementu Finituen Metodoaren bitartez (EFM) egin da, Abaqus 2020 softwarea erabiliz. Honetarako, SC2FCC2 deituriko unitate-gelaxka bakarra aukeratu da, eta muga baldintza periodikoak

ezarri zaizkio Omairey *et al.* (2018)-ek garatutako pluginarekin. Muga-baldintza periodikoek kubo baten aurrez aurreko aldeetan ematen diren desplazamenduen arteko erlazioak definitzen dituzte, eta era honetara unitate-gelaxka soil batekin inguru infinitu bat simula daiteke, honek dakarren denbora aurrezpenarekin.

Behin muga-baldintza periodikoak ezarrita, 6 desplazamendu independente inposatu zaizkio SC2FCC2 unitate-gelaxkari, eta hortik ateratako indar eta desplazamenduetatik egituraren zurruntasun matrizea ebatzi da. Honela, eredu analitikoaren eta zenbakizko ereduaren arteko ezberdintasunak azter daitezke.

4. Irudia: Diseinuz $E_3/E_1 = 2$ erlazioa duen SC2FCC2 egituraren portaera elastikoa dentsitate erlatiboaren arabera: a) Young-en modulua 1 eta 3 norabideetan, b) G ebakidura moduluak, c) Poisson-en koefizienteak, d) EFM bidezko zurruntasuna norabide guztietan 0.2 dentsitate erlatiborako.



4 Irudian analitikoki lortutako balioen eta zenbakizko emaitzen arteko konparaketa ikus daiteke. Irudiak adierazten duenez, eredu analitikoa oso zehatza da dentsitate erlatibo baxuetarako, eta dentsitatea handitu ahala zehaztasuna galtzen doa. 4a Irudian antzeman daitekeenez plano isotropikoan Young-en modulua nabarmenki aldentzen da eredu analitikotik dentsitate erlatiboa igo ahala. Ezberdintasun hau eredu matematikoan mespretxatutako makurduraren ondorioa da. Aldiz, E_3-k zehaztasun altuagoa du dentsitate erlatibo guztietan. Ebakidura moduluei dagokienez, makurdurak era uniformeagoan eragiten die G_{12} eta G_{13} moduluei, eta zenbakizko ereduak zehaztasun antzekoa du bi kasuetan. Poisson-en koefizienteen kasuan ν_{12}-k %-6ko errore maximoa du, aldiz ν_{13}-ren kasuan errorea %16-ra heltzen da. 4d Irudiak zurruntasun direkzionala irudikatzen du, eta diseinuan inposatutako

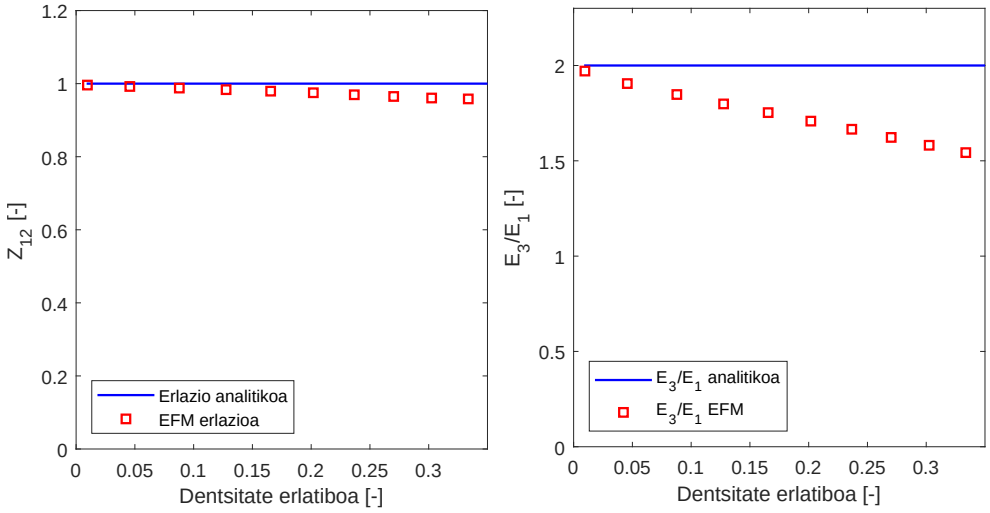
elipsoide forma duela antzeman daiteke.

Zurruntasun matrize baten isotropia maila Zener erlazioaren bitartez neur daiteke. 15 ekuazioan 1-2 planorako Zener erlazioa adierazten da, $Z_{12} = 1$-ek isotropia perfektua adierazten duelarik. C_{66}, C_{11} eta C_{12} parametroek zurruntasun matrizearen osagaiak adierazten dituzte.

$$Z_{12} = \frac{2C_{66}}{C_{11} - C_{12}} \tag{15}$$

5a Irudian Zener erlazioa irudikatzen da. Nahiz eta eredu analitikoak zehaztasuna galtzen duen dentsitate erlatiboa handitu ahala, 1-2 planoko zeharkako isotropia oso egonkor mantentzen da zenbakizko eredu ezberdinetarako, gehiengo errore erlatiboa %5 baino txikiagoa delarik. 4 Irudian agerikoa den balio absolutuen desbideraketa konpentsatu egiten da 1-2 planoan, eta horri esker zeharkako isotropia mantendu egiten da dentsitate erlatibo ezberdinetarako. Bestalde, E_3/E_1 erlazioa txikitzen doa dentsitate erlatiboa handitzean, eta hau kontuan hartu beharko da egiturak diseinatzerakoan.

5. Irudia: a) Zener erlazioa eta b) E_3/E_1 proportzioa dentsitate erlatiboarekiko.



(a) (b)

4. Ondorioak

Proposatutako eredu analitikoa gai da zeharka isotropikoak diren sare egituren portaera elastikoa deskribatzeko, hasierako diseinu-parametro gutxi batzuetatik abiatuta: ρ^*, E_s eta E_3/E_1. Eredu analitikoaren zehaztasuna jaitsi egiten da dentsitate erlatiboa handitzen den heinean, arbuiatutako makurduraren eragina dela eta. Bestalde, energiaren adierazpena erabiliz, ezarritako murrizketak betetzen dituzten hainbat sare egitura ezberdin diseina daitezke.

SC2FCC2 egiturak zurruntasun tarte zabal bat har dezake dentsitate erlatiboaren arabera, hezurraren propietate mekanikoaren antzeko balioak lortuz. 4a Irudiko EFM E_3/E_s moduluak 0.0027 eta 0.139 balioen artean daude. Co-Cr aleaziozko egitura izatekotan (E_s=210 GPa) SC2FCC2 metamaterialak 0.57 GPa eta 29.2 GPa arteko edozein E_3 modulu izan dezake aztertutako ρ^* balioetarako. Aldiz, Ti-6Al-4V aleazioa aukeratuz gero (E_s=110 GPa), E_3 modulua 0.3 eta 15.3 GPa artean egongo da. Era honetara, posible da hezur kortikalari dagozkion zurruntasun maila ugari ekoiztea, baita kokapenaren araberako zurruntasun aldakorreko inplanteak diseinatzea ere.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Lan honen ildotik jarraituz, hurrengo pausoa egitura honen erresistentzia ikertzea eta egituraren kolapsorako formulazio analitikoa garatzea da. Ondoren, egitura hauek fabrikatu eta entseguak egin beharko lirateke, eredu analitiko, zenbakizko eredu eta esperimentuen arteko ezberdintasuna aztertzeko. Honetaz gain, aipatutako hiru

unitate-gelaxken fabrikazioa bideragarria den aztertu beharko litzateke, zein materialekin eta zein eskalan. Azkenik, konpresio hutsaz gain beste karga mota batzuekiko erantzuna ere aztertzeke dago, hala nola, ebakidura edo konpresio ebakidura konbinaketa.

6. Erreferentziak

Barba, Daniel, Enrique Alabort, eta Roger C. Reed. 2019. Synthetic bone: Design by additive manufacturing. *Acta Biomaterialia* 97.637–656.

Currey, John D. 2013. *Bones: structure and mechanics*. Princeton University Press.

Deshpande, Vikram S., Michael F. Ashby, eta Norman A. Fleck. 2001. Foam topology: Bending versus stretching dominated architectures. Technical report.

Gibson, Lorna J., eta Michael F. Ashby. 1997. *Cellular solids structure and properties*. Pergamon Press.

Maconachie, Tobias, Martin Leary, Bill Lozanovski, Xuezhe Zhang, Ma Qian, Omar Faruque, eta Milan Brandt, 2019. SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges.

Murr, Lawrence E. 2018. Additive manufacturing of biomedical devices: an overview. *Materials Technology* 33.57–70.

Omairey, Sadik L., Peter D. Dunning, eta Srinivas Sriramula. 2018. Development of an ABAQUS plugin tool for periodic RVE homogenisation. *Engineering with Computers* 35.567–577.

Perticarini, Loris, Giacomo Zanon, Stefano Marco Paolo Rossi, eta Francesco M. Benazzo. 2015. Clinical and radiographic outcomes of a trabecular titanium™ acetabular component in hip arthroplasty: Results at minimum 5 years follow-up. *BMC Musculoskeletal Disorders* 16.1–6.

Tan, Seng C. 1994. *Stress Concentrations in Laminated Composites*. Lancaster, PA: Technomic Publishing Company.

Tancogne-Dejean, Thomas, eta Dirk Mohr. 2018a. Elastically-isotropic truss lattice materials of reduced plastic anisotropy. *International Journal of Solids and Structures* 138.24–39.

——, eta ——. 2018b. Stiffness and specific energy absorption of additively-manufactured metallic BCC metamaterials composed of tapered beams. *International Journal of Mechanical Sciences* 141.101–116.

Zhang, Min, Thomas Gregory, Ulrich Hansen, eta Cheng-Kung Cheng. 2020. Effect of stress-shielding-induced bone resorption on glenoid loosening in reverse total shoulder arthroplasty. *Journal of Orthopaedic Research* 38.1566–1574.

Errealitate areagotuko sistema baten diseinu eta balioztatze esperimentala haririk gabeko integrazioarekin, auditoriumetan desgaitasuna pairatzen duten pertsonen esperientzia hobetzeko

Picallo, I.[1]; Vidal, A.[2]; Blanco, O.[2]; Lopez-Iturri, P.[1]; Fraga, P.[2]; Klaina, H.[3]; Fernández, T.[2]; Azpilicueta, L.[4]; Falcone, F.[1]

[1] Ingeniaritza Elektriko eta Elektronikako departamentua, Nafarroako Unibertsitate Publikoa
[2] Department of Computer Engineering, Faculty of Computer Science, Universidade da Coruña
[3] Department of Signal theory and Communications, University of Vigo
[4] School of Engineering and Sciences, Tecnologico de Monterrey, Mexico
imanol.picallo@unavarra.es

Laburpena

Egoera batzuetan, kultur jardueretan adibidez, erabiltzailearen esperientzia ingurunera ez egokitzeagatik mugatzen da, desgaitasuna pairatzen duten pertsonetan bereziki. Ildo horretatik, auditorioetan Context-Aware paradigma erabiltzeak funtzionalitate egokiak eman ditzake. Lan honen helburua erabiltzailearen esperientzia hobetzea bideragarria dela frogatzea da (adibidez, desgaitasuna pairatzen duten pertsonen autonomia hobetuz), haririk gabeko errealitate areagotuko (AR) sistema baten bidez (HoloLens smart glasses). Horretarako, neurketa-kanpaina benetako auditorio batean egin zen (Baluarte Batzar Jauregia eta Nafarroako Auditoriuma). Haririk gabeko komunikazioaren estimazioak aurkezten dira, 3D Ray Launching softwarean oinarrituta, zerbitzuko kalitatea balioztatzeko. Azkenik, entzumen-arazoak dituzten pertsonei laguntzeko aplikazio bat garatu zen, eta haren ezaugarri nagusiak auditorioan frogatu ziren.

Hitz gakoak: Auditoriuma, haririk gabeko kanala, errealitate areagotua, desgaitasuna pairatzen duten pertsonak, esperientzia hobetzea, 3D ray launching.

Abstract

There are situations in which user experience is limited owing to the lack of environment adaption in cultural activities, such as people with disabilities. In this sense, the adoption of Context Aware paradigms within auditoriums can provide adequate functionalities. This work is aimed at demonstrating the feasibility in enhancing user experience (e.g., improving the autonomy of disabled people) by means of an Augmented Reality (AR) device (HoloLens smart glasses) with wireless system integration. To carry out the demonstration, an intensive measurement campaign was performed in a real auditorium (Baluarte Congress Center) to evaluate the feasibility AR devices in a complex wireless propagation scenario. Deterministic wireless channel estimation based in volumetric 3D Ray Launching have been obtained to assess quality of service metrics. Finally, a user-friendly application to help hearing impaired people was developed and its main features were tested in the auditorium.

Keywords: Auditorium, wireless channel, augmented reality, impaired persons, enhanced show experience, 3D ray launching.

1. Sarrera eta motibazioa

Munduko Osasun Erakundearen 2020ko txostenaren arabera (World Health Organization, 2020), munduko populazioaren %15 inguruk pairatzen du desgaitasunen bat. Desgaitasun horien artean, gutxienez 2.2 mila milioi pertsonak pairatzen dute ikusmen desgaitasun edo itsutasunik, eta horietatik, mila milioi pertsona neurrizko edo desgaitasun larria pairatzen dute (besteak beste, zuzendu gabeko arazo errefraktarioak, makularen endekapena, katarata, erretinopatia diabetikoa edo glaukoma). Entzumen-galera, munduan 466 milioi pertsonak baino gehiagok pairatzen duten beste desgaitasunen artean dago. Galera hori genetikoa edo eskuratua izan daiteke, eta entzumen-galeraren maila aldatu egiten da, gortasuna larriena izanik.

Ikusmen desgaitasunei dagokienez, ikusmena gizakiaren zentzumen garatuena da, izan ere, eguneroko bizitzan behar dugun informazioaren %80 gure begietatik jasotzen baita. Ikusmen-urritasun larriak direla eta, bizitza autonomoa izateko zailtasunak daude (adibidez, eguneroko irteeretan edo jardueretan). Bestalde, Espainiako Estatistika Institutu Nazionalaren (INE) azken datuen arabera, eskuragarri ez diren arloetan parte-hartzea murriztu da, hala nola hezkuntzan, lanean, aisian edo kulturan. Jarduera kulturalaren adibide bat antzokietara edo auditoriumetara joatea da, eta hori, zenbait kultur jardueratan interesa duen edonorentzat funtsezkoa da. Zoritxarrez, ingurune horiek gutxi egokituta egon ohi dira desgaitasuna pairatzen duten pertsonentzat, bai eraikinaren barruan askatasunez mugitzeko gaitasunari dagokionez (ikusmen desgaitasuna pairatzen duten pertsonentzat ezinbestekoa da), baita ikuskizunari dagokienez (ikusmen eta entzumen desgaitasuna pairatzen duten pertsonentzat).

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Lan honetan, Baluarte Batzar Jauregia eta Nafarroako Auditoriumean (Iruñea) ezarritako errealitate areagotuko (AR) sistema bat aurkezten da. Baluarte jauregian hitzaldiak, erakusketak, ikuskizunak eta hainbat arloetako biltzarrak antolatzen dira. Ekitaldi horietan hainbat giza-zerbitzu (ikuskizunetara datozen pertsonei laguntzeko) eta teknologia-zerbitzu (inplante koklearra eramaten duten pertsonentzako maiztasun-modulazioko gailuak) eskaintzen dira. Hala ere, desgaitasuna pairatzen duten pertsonentzako ez da erabiltzen beste tresneria teknologikorik esperientziaren kalitatea (QoE) hobetzen duenik. Smartphoneak edo tabletak, desgaitasuna pairatzen duten pertsonen esperientzia hobetzen lagundu dezakete baina ez dira oso egokiak auditorium bezalako tokietan erabiltzeko beste ikusle batzuen esperientzia oztopa dezaketelako. Azken AR gailuek aldiz, potentzia informatikoari, pantaila integragarri eta audio-irteerei esker, distantzia ertain eta luzeko irakurketa/behaketa errazteko tresna erabilgarriak eskaintzen dituzte, giza pertzepzioa eta elkarreragina hobetzen (Bach et al., 2018). Onura horiek direla eta, lan honek Microsoft HoloLens smart glasses AR aplikazio baten diseinua eta garapena deskribatzen ditu.

AR-n oinarritutako soluzioak ingurune konplexuetan bideragarriak direla egiaztatzeko uhin elektromagnetikoen hedapenari dagokionez, lan honek Wi-Fi-rekin bideratutako AR soluzio baten errendimendua balioztatzen du ingurune errealista batean. Zehazki, hauek dira lan zientifiko honen ekarpen berri nagusiak (Picallo et al., 2021):

- Baluarte jauregian egindako 2.4GHz eta 5.5GHz-ko maiztasun-banden neurketak erakusten dira (auditoriumeko interferentzia maila zela eta), non komunikazio-teknologia desberdinek (adibidez, Wi-Fi, Bluetooth edo ZigBee) funtziona baititzakete, Microsoft HoloLens smart glasses erabiltzen diren bitartean (Hübner et al., 2020).
- 3D Ray Launching (3D-RL) simulazio-software deterministaren bidez (Nafarroako Unibertsitate publikoan garatutakoa), Baluarte areto nagusiaren radio-karakterizazioa gauzatzen da balioztatzeko helburuarekin. Simulazio hauek auditoriumeko dimentsioak eta barruan dauden altzarien eta elementuen ezaugarri elektrikoak (konstante dielektrikoa edo konduktibitatea eta permitibitate erlatiboa) kontutan hartzen dituzte (Azpilicueta et al., 2014).
- Balioztatu ondoren, radio-plangintza sakona burutzen da auditorioaren morfologiaren eragina eta pertsonen presentziaren eragina erakusteko.
- Azkenik, Microsoft HoloLens smart glasses AR aplikazio baten diseinua eta garapena deskribatzen dira, desgaitasuna pairatzen duten pertsonak laguntzeko eta Baluarte Auditoriumeko ikuskizunetan esperientzia hobetzen duena, informazio birtual gehigarria eta multimedia-edukia hornituz.

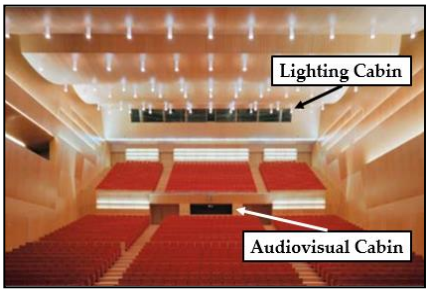
3. Ikerketaren muina

3.1. Baluarte Auditoriumaren azterketa eta haririk gabeko komunikazioen analisia

Atal honetan, Baluarte Jauregi eraikina aurkezten da, radio-karakterizazio azterketarekin batera. Radio-maiztasun (RF, Radio Frequency) neurketak egin dira, bai radio kanalaren karakterizaziorako (lehen aipatutako bi maiztasun-bandetan), baita interferentzia-maila balioztatzeko, haririk gabeko komunikazioaren errendimendu ona ziurtatzeko. Lehen esan bezala, Baluarte Batzar Jauregia eta Nafarroako Auditoriumean sistemaren garapena gauzatu da. Hainbat areto ditu, non areto nagusia edo auditoriuma bereizten da bere tamainagatik (65.26m-ko luzera, 30.58m-ko zabalera, 16m-ko altuera). Auditoriuma bi zatitan banatzen da: 1036 eserleku aretoan eta 532 eserleku palko gunean. Areto nagusia badu ikus-entzunezko kabina soinu mahaiarekin eta argiztapen kabina, 1.(b) irudian adierazita ikusten den bezala (Picallo et al., 2021).

1. irudia. Baluarte Batzar Jauregia eta Nafarroako Auditoriuma: (a) Bista orokorra (b) Areto nagusiaren atzeko bista (c) Areto nagusiaren aurreko bista

(a)

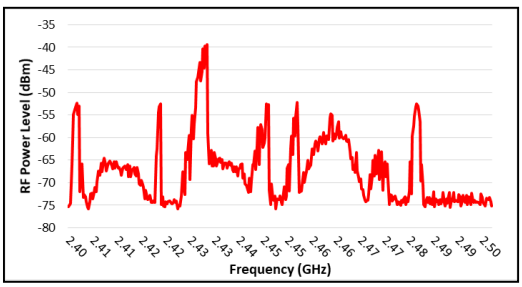


(b)

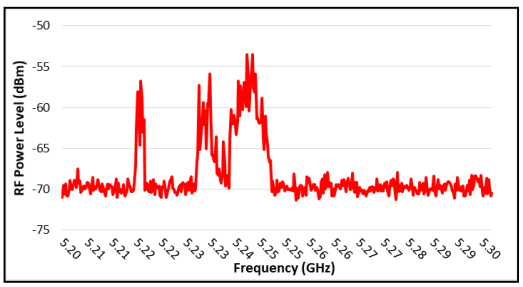
(c)

Haririk gabeko edozein gailu ezarri aurretik, auditorioan zenbait espektrograma neurtu ziren, egon zitezkeen interferentziak aurkitzeko eta HoloLens-en Wi-Fi maiztasun-bandaren hautaketa zuzena ziurtatzeko. Microsoft HoloLens smart glasses-ak 2.4GHz eta 5GHz-ko maiztasun-bandetan lan egin dezakete, IEEE 802.11ac estandarra erabiliz. 2. irudian bi bandetarako neurtutako espektrogramak azaltzen dira, non 2.4GHz-ko maiztasun-banda ia beteta dagoen batez ere eraikinean dauden Wi-Fi seinaleekin (Picallo et al., 2021). Bestalde, 5GHz-ko maiztasun-bandak interferentzia seinale gutxiago dauzka eta horregatik, banda hau aukeratzera eraman gaitu garatutako aplikaziorako.

2. irudia. Espektrogramen neurketa bi maiztasun-bandetan: (a) 2.4GHz (b) 5GHz



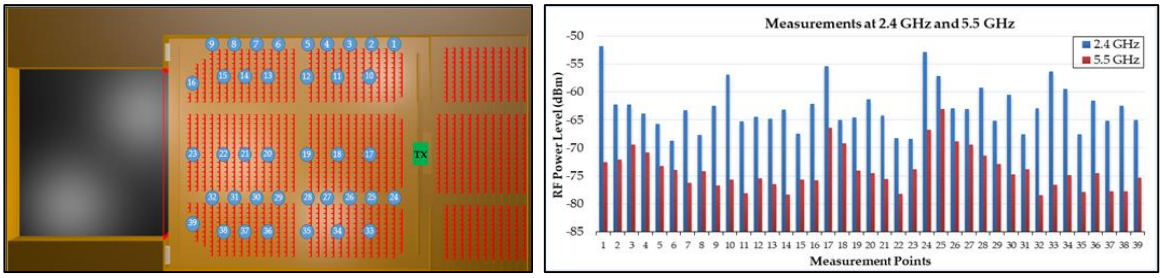
(a)



(b)

3. irudian haririk gabeko kanala karakterizatzeko egindako neurketa espezifikoak ikusten dira (Picallo et al., 2021). Horretarako, tentsioz kontrolatutako osziladore gailuak (ZX95-2500 eta ZX-95-5400) igorle bezala eta Agilent N9912A espektro analizatzailea jasotako potentzia-maila neurtzeko erabili dira. Igorlea ikus-entzunezko kabinan kokatu dugu, ikuskizunen erabaki tekniko guztiak hemendik kontrolatzen direlako eta etorkizunean, HoloLens gailuetarako Wi-Fi sarbide-puntu moduan. 3.(a) irudian, 39 neurketa puntuen banaketa eserleku eta korridoreen artean ikusten dira (zenbatutako borobil urdinekin irudikatuak), auditorium osoa karakterizatzeko asmoz. Lortutako neurketetan ikus daitekeenez, hedapen-galera handiagoak daude maiztasun handiagotan, nahiz eta 5GHz-ko maiztasun kasuan igorlearen potentzia txikiagoak eragina izan. Orokorrean, espero zitekeen bezala, igorletik hurbilen dauden neurketa-puntuak (1, 10, 17, 24 eta 33) RF seinale-maila handiagoak jasotzen dituzte. Detektatutako RF potentzia-mailaren joera distantziarekin gainbeheratzen da, baina 'multipath propagation' eragindako aldaketak ere ikus daitezke, hau da, jasotako potentzia-maila altzarien eta elementuen eraginarengatik ere aldatu egiten da. Adibidez, 9. puntuak, 8. puntuak baino potentzia-maila handiagoa jasotzen du. Hortaz, honek radio-plangintza lanak zailtzen ditu, ez baita igorlearen eta hartzailearen arteko distantziaren araberako arazoa bakarrik.

3. irudia. (a) Neurketa puntuen banaketa auditoriumeko goiko bistatik (zenbatutako borobil urdinekin irudikatuak) eta igorlearen kokapena ikus-entzunezko kabinaren apalean (karratu berde batekin irudikatua) (b) Neurketen emaitzak 2.4GHz eta 5GHz-ko maiztasun-bandetan



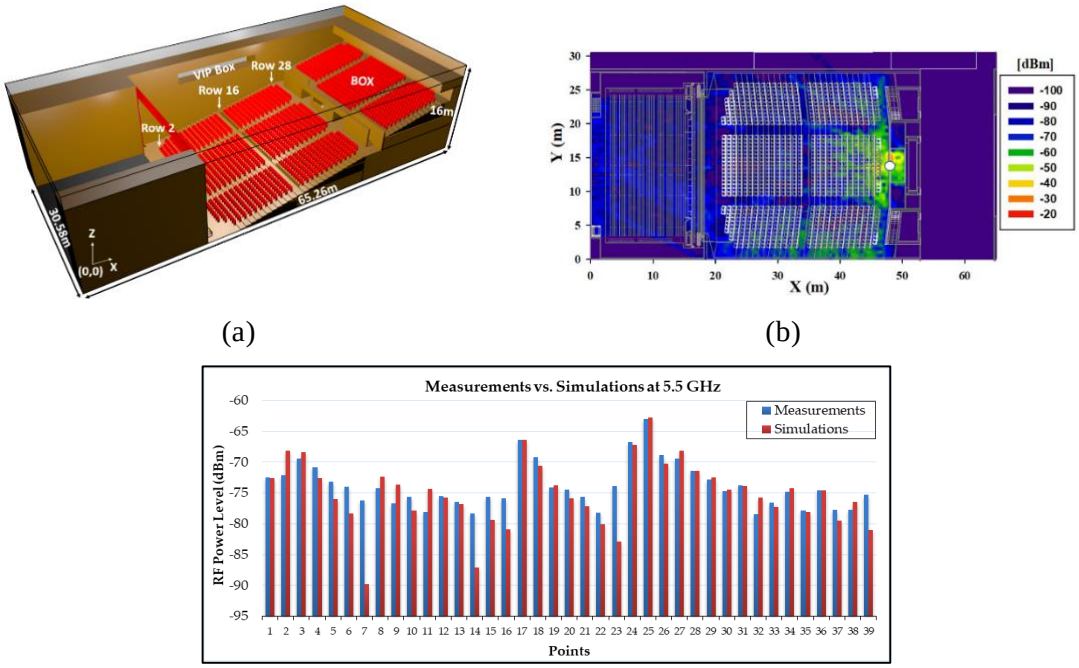
(a) (b)

3.2. Radio-hedapen deterministaren balioespena 3D-RL softwarearekin

Neurketen arabera HoloLens-en maiztasun-banda hautatu ondoren, Nafarroako Unibertsitate publikoan garatutako 3D-RL softwarearen bitartez simulazio deterministak egin dira, lortutako emaitzak balioztatzeko lehen aurkeztutako neurketekin alderatuz. Simulazio tresna hau Geometrical Optics (GO), Geometrical Theory of Diffraction (GTD) and Uniform Theory of Diffraction-ean (UTD) oinarrituta dago, eta haren funtzionamendua literaturan zabalki deskribatuta dago (Azpilicueta et al., 2014).

4. irudian radio-hedapen deterministaren balioespena 3D-RL softwarearekin erakusten da (Picallo et al., 2021). Simulazio emaitza zehatzak lortzeko lehen pausoa errealitatetik ahalik eta gertuen dagoen eszenario bat sortzea da tamainari, objektuei eta haien ezaugarri elektrikoen materialei dagokienez (konduktibitatea eta permitibitate erlatiboa). 4.(a) irudian pareko Baluarte Auditoriumaren eszenarioa erakusten da benetako ezaugarri horiek kontutan hartuta, 1568 eserlekuekin eta lehen aipatutako bi kabina teknikoekin. 4.(b) irudian 5.5GHz-erako RF potentzia-mailaren banaketa bi dimentsioko plano batean erakusten da (28. ilararen altueran) non igorlea ikus-entzunezko kabinaren apalean kokatuta dagoelarik (borobil txuri batekin irudikatua). Emaitzek erakusten dutenez, jasotako potentzia-maila txikiagotu egiten da distantziaren arabera, baina, berriro ere, neurketetan ikusten zenez, "multipath propagation" eragindako aldaketa azkarra ikus daitezke, eta horrek potentzia-maila handiagoa eragiten du puntu urrunago batzuetan. 4.(c) irudian, neurketen eta simulazioen arteko konparaketa 5.5GHz-ko maiztasunean erakusten da (3.(a) irudiko puntuei dagozkie), non zehaztasun handia ikusten da. Zehazki, 2.29 dB-ko bataz besteko errorea eta 2.87 dB-ko desbideratze estandarra lortzen dira. Hori dela eta, 3D-RL tresna radio-plangintza lanetarako balioztatuta dago.

4. irudia. (a) Baluarte Auditoriumaren modeloa sortua 3D-RL tresnaren bidez (b) 5GHz-erako RF potentzia-mailaren banaketa bi dimentsioko plano batean, 28. ilararen parean (c) Neurketen eta simulazioen arteko konparaketa 5.5GHz-ko maiztasunean.



(a) (b)

(c)

3.3. Radio-plangintzaren emaitzak

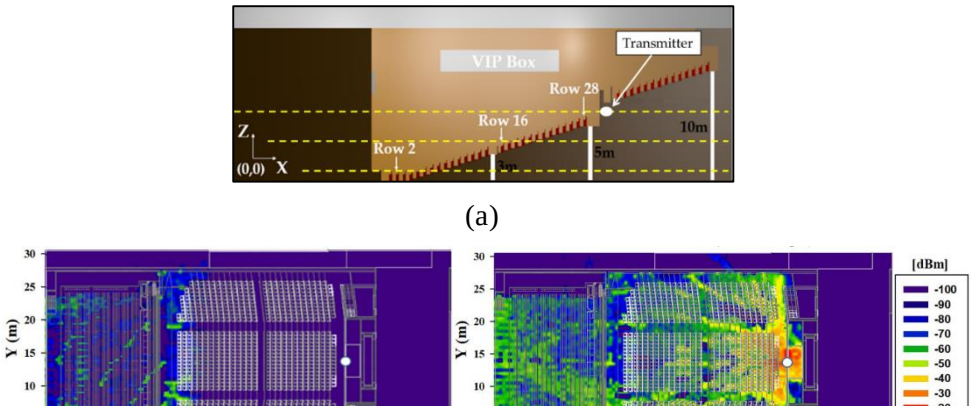
3D-RL softwarea balioztatu ondoren, atal honetan, radio-plangintza sakona burutzen da auditoriumean haririk gabeko kanalarekin lotutako arazoak egiaztatzeko eta aurkitzeko. Horretarako, simulazio tresnaren bitartez radio-hedapenarekin lotutako bi gai aztertzen dira: auditorioaren morfologiaren eragina eta pertsonen presentziaren eragina.

Auditorioaren morfologiaren eragina

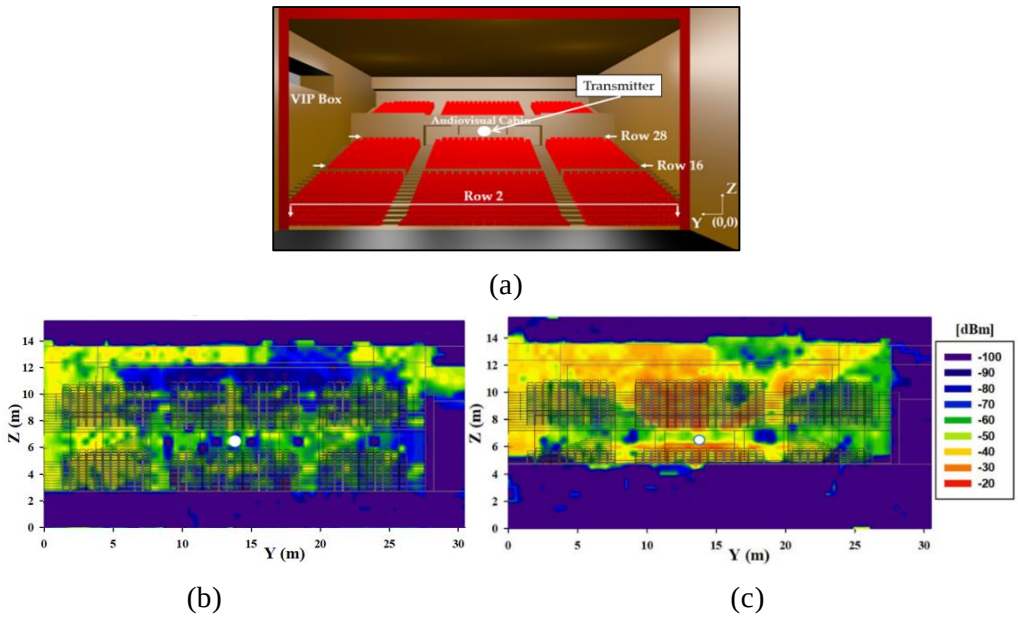
Lehen esan bezala, auditoriumek oso morfologia konplexua dute radio-hedapenari dagokionez. Oztopo ugari izateaz gain, altuera-maila desberdinak dituzte. Azken hau oso gai garrantzitsua da; izan ere, radio-kanal ereduek puntu zehatzetan balioetsitako balioak, dimentsio bateko bide batean (distantziaren arabera) edo bi dimentsioko plano batean ematen dituzte. Aurkeztutako 3D-RL tresna, simulazio bakar batekin, eszenario bolumen osoaren RF potentzia-banaketa eskaintzen du. 5. irudian RF potentzia-mailaren banaketa altuera desberdinetarako bi dimentsioko planoetan erakusten da (Picallo et al., 2021). 5.(a) irudian auditoriumeko alboko ikuspegia erakusten da, non lerro horiak 5.(b) eta 5.(c) irudietako planoak adierazten dituzte. Eszenarioaren morfologiaren eragina argi ikus daiteke, eta haren forma aldapatsua zuzeneko eragina dauka radio-seinaleen hedapenean.

Era berean, 6. Irudian RF potentzia-mailaren banaketa bi dimentsioko planoetan erakusten da, baina YZ koordenatu-ardatzerako (Picallo et al., 2021). Beste kasuetan bezala, banaketa ez da konstantea potentzia-mailaren aldakuntza azkarra dela eta. Nabarmentzekoa da VIP palkoaren barneko potentziaren banaketa 6.(b) irudian agertzen dela, berriz, 6.(c) irudian hori ezin da ikusi x-distantzietan VIP palkorik ez dagoelako (28. ilararen parean). Emaitza horiek guztiek erakusten dute puntu bakoitzean jasotako potentzia-maila, eszenario morfologiaren eta igorle gailuari aukeratutako kokapenaren araberakoa dela. Hori dela eta, tresna zehatz bat erabili behar da horrelako ingurune konplexuetan radio-plangintza fidagarria lortu nahi bada.

5. irudia. (a) Auditoriumeko alboko bista (b, c) RF potentzia-mailaren banaketa altuera desberdinetarako (2. eta 28. ilaren pareetan) bi dimentsioko planoetan



6. irudia. Auditoriumeko zuzeneko bista (b, c) RF potentzia-mailaren banaketa altuera desberdinetarako (16. eta 28. ilaren pareetan) bi dimentsioko YZ planoetan

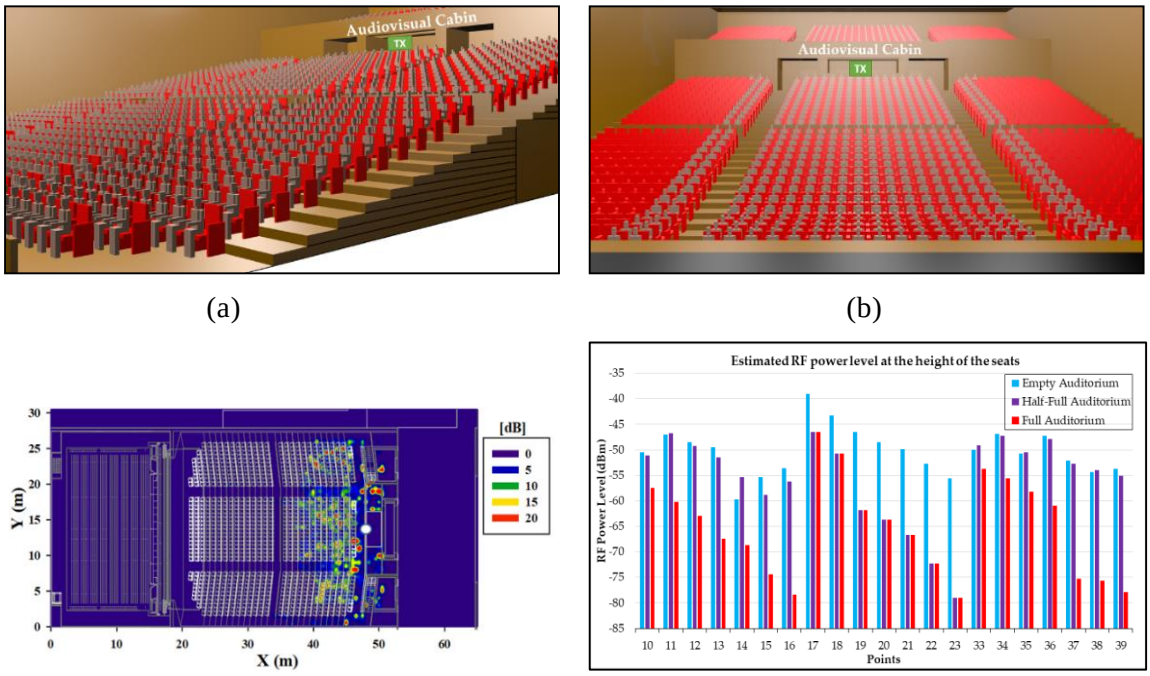


Pertsonen presentziaren eragina

Ingurune mota horietan radio-planifikatzeko beste faktore garrantzitsu bat pertsonen presentzia da. 7. irudian ikusiko den bezala (Picallo et al., 2021), giza gorputzak uhin-elektromagnetikoen hedapena kaltetzen du, eta horrek itzal-efektu ezaguna eragiten du. Horrelako inguruneetan, jende asko egon daiteke bertan. Beraz, radio-hedapenean duen eragina oso garrantzitsua izan liteke. Orain arte, lan honetan, simulazio guztiak auditorium hutsean burutu dira. Giza gorputzaren presentzia balioztatzeko bi eszenario berri sortu dira: Auditoriuma jendez beterik (7.(a) irudia ikusi) eta auditoriuma erdi-edukierarekin (7.(b) irudia ikusi). Simulazio hauek, auditorium hutsaren potentzia-konfigurazio berdina daukate. 7.(c) irudian auditorium hutsaren eta betearen arteko potentzia-mailaren diferentzia erakusten da (28. ilararen parean). Ikus daitekeen moduan, eremu batzuetan 20dB arteko aldeak egon daitezke. Jasotako potentzia-mailaren desberdintasun horiek oso garrantzitsuak dira, eta haririk gabeko komunikazio errendimendu onaren edo sistemaren hutsegitearen arteko aldea izan liteke. Pertsonen presentzia efektuaren ikuspegi zabalagoa izateko, 7.(d) irudian jasotako potentzia-maila erakusten da auditoriuma huts, erdi-

betea eta betea dagoenean 3.(a) irudiko puntuei dagokienez. Espero bezala, oro har, eszenario hutsak RF potentzia-maila altuena dauka, baina zenbait eremuetan, auditorium hutsa eta erdi betea antzeko emaitzak aurkezten ditu, pertsonen banaketaren ondorioz. Era berean, erdiko eserleku multzoko puntuek RF potentzia-maila antzekoak erakusten dituzte, auditorium erdi-betearen eta betearen kasuetan.

7. irudia. (a) Beteriko auditorium eszenarioa (b) Erdi-beteriko auditorium eszenarioa (c) Auditorium hutsaren eta betearen arteko potentzia-mailaren diferentzia 28. ilararen parean (d) Jasotako potentzia-mailaren konparaketa auditoriuma huts, erdi-betea eta betearekin



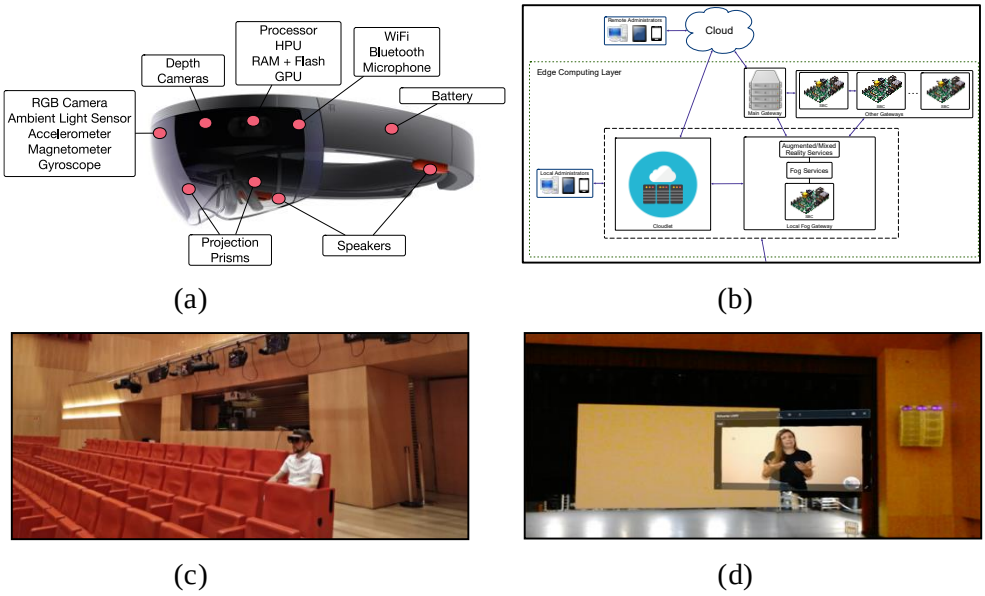
3.4. Errealitate areagotuko sistemaren garapena

Aurreko hedapen-analisi sakonari esker, garatutako AR aplikazioa ezar daiteke Wi-Fi-a erabiliz. 8. irudian ikusiko den bezala (Picallo et al., 2021), lan honetan garatu den AR sistema, Microsoft HoloLens smart glasses-etan oinarritzen da. Betaurreko horiek, gaur egun, AR gailu komertzial aurreratuenak dira, eta hainbat ingurunetan erabili dira (Hübner et al., 2020). Garatutako aplikazioaren helburu nagusia ikuskizunetan entzumen-arazoak dituzten pertsonei laguntzea da eta, horrela, haien esperientzia hobetzea. 8.(a) irudian HoloLens-en ezaugarriak ikusi daitezke. 8.(b) irudian garatutako sistemaren komunikazio-arkitektura azaltzen da, 3 geruzaz osatua dago:

- AR nodo-geruza: AR gailuek osatzen dute eta beste geruzekin komunikatzen dira haririk gabeko sarbide-puntu baten bidez.
- Edge Computing geruza: Prozesamendu lokala eta AR gailuei erantzun azkarra emateko (Fog-Computing eta cloudlets).
- Cloud: Interneten dagoen zerbitzari edo zerbitzari-granja bat da, eta Edge Computing geruzak erabili ezin dituen eskaerak prozesatzeko diseinatuta dago.

Garatutako AR sistema Baluarteko Auditorioan probatu zen, eta erabiltzailea hainbat tokitan kokatu zen (besteak beste, 2. eta 28. ilaretan), HoloLens aplikazioak hainbat ikuspuntutatik nola funtzionatzen zuen egiaztatzeko (ikusi 8.(c) irudia). Aplikazioak 3D espazio birtuala eskaintzen die erabiltzaileei, multimedia-eduki erabilgarria bistaratu ahal izateko. Adibidez, 8.(d) irudia zeinu-mintzairako interprete baten bideo-sekuentzia bat ikusi daiteke, non pantaila eszenatokiaren eskuinean jartzen baita.

8. irudia. (a) Microsoft HoloLens smart glasses (b) Garatutako sistemaren komunikazio-arkitektura (c) Frogaren uneetako bat HoloLens-ekin (d) Aldi bereko zeinu-mintzairako interprete bideoa-sekuentzia



(a) (b)

(c) (d)

4. Ondorioak

Lan honek AR sistema baten diseinua eta inplementazioa aurkezten ditu, desgaitasuna pairatzen duten pertsonen esperientzia auditoriumetan hobetzeko asmoz. Aurkeztutako sistemaren gaitasunen adibide gisa, AR aplikazio bat garatu da Microsoft HoloLens gailuekin, Baluarte Auditorioko ikuskizunetan entzumen-arazoak dituzten pertsonak laguntzeko. Auditorioan egindako neurketek inguruneak interferentzia-maila handia dutela erakusten dute. Simulazioak 3D-RL softwarearekin egin dira, eszenarioaren morfologia eta gizakiaren presentziaren eragina aztertzeko. Simulazio emaitzak gailu-kopurua eta auditorioan duten kokapena erabakitzeko lagungarriak dira, hala nola, hainbat gailuren ezarpena optimizatzeko. Ondorioz, jarraibide erabilgarriak ematen dituzte AR sistema berriak hain konplexuak diren ingurunetan ezarri ahal izateko.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Etorkizunean, sistemaren errendimenduaren azterketa egin beharko da, aldi berean jarduten duten HoloLens gailu batzuekin, haririk gabeko datuen trafikoa handitzeko asmoz. Bestalde, sistema benetako erabilera-kasu batean ezartzeko, AR aplikazioa desgaitasuna pairatzen duten pertsonetan frogatu beharko da, izan ere, Covid-19-aren ondorioz ez da horretarako aukerarik egon.

6. Erreferentziak

Azpilicueta, L. et al. (2014): "Convergence analysis in deterministic 3D ray launching radio channel estimation in complex environments" *Appl. Comput. Electromagn. Soc. J.*, 29, 4, 256-271.

Bach, B. et al. (2018): "The hologram in my hand: How effective is interactive exploration of 3D visualizations in immersive tangible augmented reality?" *IEEE Trans. Vis. Comput. Graphics*, 24, 1, 457-467.

Hübner, P. et al. (2020): "Evaluation of HoloLens tracking and depth sensing for indoor mappingapplications" *Sensors*, 20, 4, 1021.

Picallo, I. et al. (2021): "Design and Experimental Validation of an Augmented Reality System With Wireless Integration for Context Aware Enhanced Show Experience in Auditoriums" *IEEE Access*, 9, 5466-5484.

World Health Organization (2020): "Disability and Health" *World Health Organization*. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/disability-and-health]

Aluminioaren emisibitate neurketa zehatzak termografia infragorriarako

Sainz-Menchón, M.; González de Arrieta, I.[1,2]; Echániz, T.[3] eta López, G.A.[1]

[1] Fisika Saila. UPV/EHU. Sarriena auzoa z/g, 48940 Leioa.
[2] CNRS, CEMHTI UPR3079, Univ. Orléans, F-45071 Orléans, Frantzia.
[3] Matematika Aplikatua Saila. UPV/EHU. Torres Quevedo Ingeniariaren Plaza 1, 48013, Bilbo.

msainz015@ikasle.ehu.eus

Laburpena

Aluminioaren propietate optikoen inguruko ezagutza garatzea beharrezkoa da termografia eta pirometria teknikatan, zeinak aluminioaren ekoizpena eta saiakuntzak optimizatzeko funtsezkoak diren. Hori dela eta, aluminioaren emisibitatearen neurketa direkzionalak egin dira espektro infragorrian, hainbat tenperaturatarako. Metalen erradiazio teoriarekin bateragarriak diren emaitzak lortu eta literaturan aurki daitezken datuekin alderatu dira. Parekatze horretan ageri diren ezberdintasunak azaltzeko, aztertutako laginaren zenbait parametro (zimurtasuna edota oxido geruza, esaterako) kontuan hartzea beharrezkoa dela ondorioztatu da. Aurretiazko ezaugarritze horren bitartez, neurketa zehatzagoak egiteko eta aluminioaren propietate optikoen inguruko informazioa osatzeko bidea zabaltzen da.

Hitz gakoak: aluminio, emisibitatea, termografia, erradiazio termikoa, termometria

Abstract

Knowledge about the optical properties of aluminium is critical for the development of thermography and pyrometry techniques, which are essential for optimizing aluminium production and testing. Therefore, directional measurements of aluminium emissivity have been made in the infrared range as a function of temperature. The obtained results, which are compatible with theoretical predictions for the emissivity of metals, have been compared with the data found in the literature. It was concluded that it is necessary to take into account certain parameters (such as roughness or oxide layer) of the sample analyzed to explain the differences in this comparison. This preliminary characterization paves the way for a more comprehensive and accurate dataset on the emissivity and optical properties of aluminium.

Keywords: *aluminium, emissivity, thermography, thermal radiation, thermometry*

1. Sarrera eta motibazioa

Aluminioa gehien erabiltzen den metal arina da, batez ere aeronautika eta biomedikuntza arloetan. Bere kostu, arintasun eta erresistentzia mekanikoari esker, metal hau oso moldaerraza da hainbat aplikaziotarako. Hala ere, bere ekoizpenak elektrizitate kopuru izugarria erabiltzen du eta bere kostua gorabeheratsua da; beraz, egokia da ekoizpen-prozesuak optimizatzea eta indartzea. Helburu horiek lortzeko moduetako bat prozesu industrialen kontrol termikoa hobetzea da, tenperaturaren menpe dauden aldagaiak tarte zorrotzagoan jarrita. Halaber, *in situ* analisi termikoak aluminiozko produktuak aplikazioetan monitorizatzeko aukera ematen du, bai tenperaturen banaketa aztertzeko, bai egituran akatsik ote dagoen aztertzeko. Aplikazio horiek guztietarako erabil daitezkeen teknika ez-suntsitzaileak dira pirometria eta termografia, non materialen tenperatura jakiteko igorritako erradiazioa neurtzen den (Usamentiaga *et al.*, 2014).

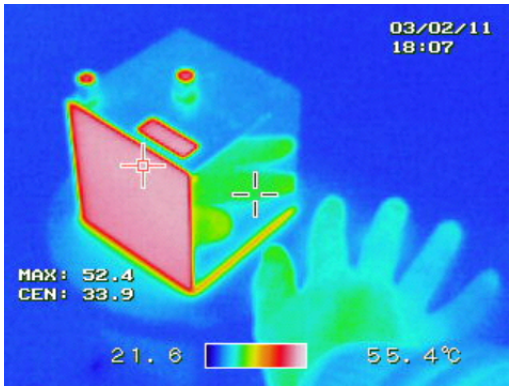
Aplikazio horretan tenperatura-neurketa fidagarriak eta moldakorrak edukitzeko parametrorik garrantzitsuena emisibitatea da. Emisibitatea propietate termofisiko bat da, [0,1] zuzen errealaren tartean definitua, gorputz baten igorpen termikoa zenbatzen duena. Gehien igortzen duen gorputzari gorputz beltza deritzo, eta bere erradiantzia (Planck-en legeak aurresandakoa) erabiltzen da emisibitatea definitzeko zatidura bezala (Howell *et al.*, 2010):

$$\varepsilon(\lambda, \theta, T) = \frac{L(\lambda, \theta, T)}{L_{bb}(\lambda, T)}, \tag{1}$$

non ε emisibitatea den, L gorputzaren erradiantzia espektrala (W m^{-3} sr^{-1}), L_{bb} gorputz beltzaren erradiantzia espektrala (hau da, Planck-en legea), λ uhin-luzera, θ gainazalarekiko angelu polarra eta T tenperatura.

Argi geratzen da definizioan emisibitatea uhin-luzera, tenperatura eta angeluarekin alda daitekela. Gainera, aldaketa nabarmenak ikus daitezke gainazalen parametroak ere aldatzen badira (oxido geruzak eta zimurtasuna, batik bat). Hau garrantzitsua da; izan ere, emisibitate ezberdineko azalerak dituzten industria-inguruneetan, beharrezkoa da horiek ezagutzea tenperatura zehaztasunez neurtu ahal izateko. 1. irudian argi ikusten da nolakoak diren tenperatura-neurketen erroreak emisibitatearen balio desberdinak kontuan hartzen ez badira. Izan ere, termografia erabiltzeko erronka nabarmenetako bat emisibitatearen balio zehatzak eta fidagarriak edukitzea da (Apiñaniz *et al.*, 2014). Arazo honi aurre egiteko, emisibitate altuko estaldurak erabiltzen dira askotan, baina konponketa hori ezin da kasu guztietan erabili. Horregatik, industria metalurgikoaren beharrak erantzuteko diseinatu eta eraiki zen EHUn zehaztasun handiko emisometro infragorri bat (Echániz *et al.*, 2018; González de Arrieta *et al.*, 2020).

1. Irudia: *Leslie's cube*: tenperatura homogeneoa duen kuboaren argazki termografikoan tenperatura-balio desberdinak agertzen dira, kamerak kubo osoak emisibitate berbera duela suposatzen baitu. Alde metalikoek (urdinez) margotutako zatiek (gorriz) baino askoz gutxiago igortzen dute. Gainera gainazal metalikoek inguruko gorputz beroek igorritako erradiazioa gehiago islatzen dute. Irudia: Pieter Kuiper (jabari publikoan).



Termografia oso hedatuta dago aluminiogintzan, bai aplikazioetan bai prozesaketan (Imatz *et al.*, 2005; Haugh, 1988). Termografia erabilgarria da aluminioaren industrian eta aluminio likido eta solidoaren emisibitatea parametro garrantzitsua da horretarako (Haugh, 1988; Leitner *et al.*, 2017). Gainera, aluminioaren emisibitatearen ezjakintasuna arazo handi bat da beste propietate termofisikoak neurtzerakoan, material honen kudeaketa termikoa zailtzen baita (Leitner *et al.*, 2017). Tenperatura metodo pirometrikoen bidez neurtzeko orduan, bi teknika mota daude: espektralak eta multiespektralak, instrumentuak neur ditzakeen uhin-luzeren arabera. Zoritxarrez, aluminioaren emisibitate baxuak intentsitate ahuleko seinaleak sortzen ditu sentsoreetan. Hortaz, termografiaren zehaztasuna hobetzeko uhin-luzera eta tenperaturaren menpeko eredu matematiko bat erabiltzen da erradiantzia neurketak tenperatura bihurtzeko, emisibitate uhin-luzera bakarrean neurtu beharrean (Usamentiaga *et al.*, 2014; Wen eta Mudawar, 2005, 2006). Eredu horiek balioztatzeko, beraz, beharrezkoa da datu zehatzak izatea eta material horren emisibitatearen menpekotasunak ondo ezagutzea.

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Aluminioaren emisibitate datuak hainbat erreferentziatan aurki daitezke (Ujihara, 1972; Yilbas *et al.*, 1991; Wen eta Mudawar, 2005, 2006; Zhang *et al.*, 2017, 2018), baina sakabanatze handia dago haien artean eta, beste metaleekin erkatuz, ez dago azterketa sakon asko (Howell *et al.*, 2010). Metal hain hedatua denez, egoera hau kontraesan handia da. Arazo horren arrazoietako bat aluminioaren urtze-puntu baxua da (660 °C). Honek neurketa esperimentalak zailtzen ditu, aluminio solidoaren aplikazioekin bateragarria den tenperatura tartean erradiazio termikoaren seinale indartsurik ez baitago. Hortaz, ikerketa honek bi helburu nagusi ditu. Lehenik, aluminio puru

eta leunduaren emisibitatea zehaztasunez neurtzea. Ondoren, bibliografian aurkitzen diren datuekin konparatzea, desadostasunak azaltzea eta emisibitatearen menpekotasunak adieraztea.

3. Ikerketaren muina

3.1. Materialak eta metodoak

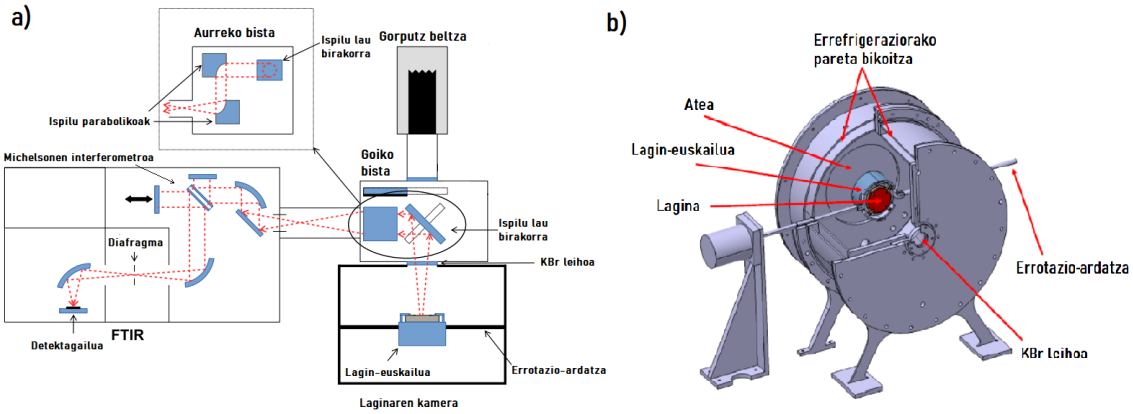
Lan honetan 50 mm x 50 mm-ko aluminio lagin karratua erabili da, 3 mm-ko lodiera eta %99.999 purutasuna duena. Laginean Fe 2 ppm, Si 2 ppm eta Mg 1 ppm-ko ezpurutasunak baino ez aurki daitezke. Laginaren tenperatura monotorizatzeko zentrotik 5 mm-ra K motako bi termopare kokatu dira. Termopareak egokitzeko 0.5 mm-ko diametrodun lau zulo egin dira laginaren gainazalean, bina termopare bakoitzeko. Termoparea osatzen duten bi hariak aipaturiko zuloetan sartuz, sentsorearen eta laginaren arteko kontaktu mekanikoa bermatzen da. Laginaren zimurtasuna ezaugarritzeko, zimurtasun-neurgailu mekaniko bat erabili da, zimurtasunaren profila ulertzeko parametro hauek ematen dituena: R_a, batezbesteko balioa; R_q, batezbesteko balio koadratikoa; R_z, muturren batezbesteko balioa; eta RSm, profilaren elementuen arteko batezbesteko tartea. Laginaren ezaugarriak 1. taulan aurkitzen dira.

1. Taula: Laginaren ezaugarriak. Zimurtasunaren parametroak testuan azaltzen dira.

Purutasuna (% m/m)	R_a (μm)	R_q (μm)	R_z (μm)	RSm (μm)
99.999	0.30	0.34	0.94	415

Emisibitatea neurtzeko EHUn garatutako HAIRL emisometroa (High Accuracy InfraRed, Leioa) erabili da. Tresna honek leku pribilegiatua du emisibitateari buruzko literatura zientifikoan, eta bi hamarkada inguruko ibilbidea du. Hala ere, duela gutxi handitu eta hobetu egin da, besteak beste, emisio txikiko materialetan (metal puruetan, adibidez) neurtzeko gaitasuna hobetzeko (González de Arrieta *et al.*, 2020). Emisometroaren irudi eskematikoa 2.a irudian erakusten da. Tresnak hiru zati nagusi ditu: Fourier-en transformatuaren infragorriko (FTIR) emisometroa, gorputz beltza eta laginaren ganbera, azken hori 2.b irudian erakusten dena.

2. Irudia: HAIRL emisometroa (a) eta huts-ganberaren eskema (b).



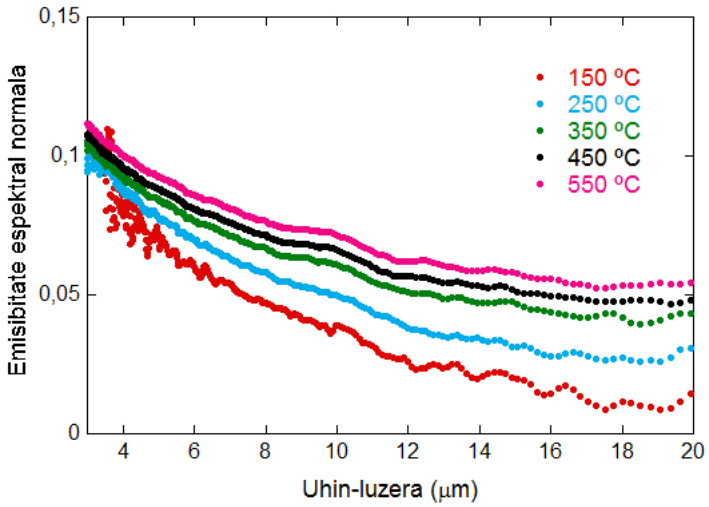
Laginaren ganbera altzairu herdoilgaitzez eginiko horma bikoitzeko egitura batek osatzen du. Lagin-euskailua ganbera barruan kokatzen da, eta errotazio-ardatz bati akoplaturik dago. Errotazio mugimenduari esker laginaren gainazalarekiko angelu polarra aldatu daiteke neurketa direkzionalak egin ahal izateko. Lagin-euskailuan egokituriko hari eroale batek lagina berotzea ahalbidetzen du, modu horretan lagina 1000 °C-raino berotu daiteke. Ganberaren tenperatura monitorizatu eta kontrolatzeko ganberaren barnealdeko paretan soldaturiko K motako bi termopare erabiltzen dira. Horretaz gain, errotaziozko huts-ponpa eta ponpa turbomolekularraren laguntzaz ganberaren barnean presioa egokitzen da, 10^{-5} mbar-eko presioa lor daitekelarik. Sistemaren errefrigerazioa bermatzeko, ganberaren pareta bikoitzaren artean ura zirkularazten da, horren bitartez ganberaren kanpo egitura hozten baita. Ganberaren barnealdeko pareta absortibitate altuko (97%) margoz estalirik dago neurketetan eragin dezaketen erradiazio-erreflexioak ekiditzeko.

Aztertuko den erradiantzia aukeratzeko ispilu lau birakari bat erabiltzen da: ispilua 90° biratzeak laginetik datorren igorpena edo gorputz beltzetik datorrena bideratzeko aukera ematen du. Ispilu parabolikoetatik igaro eta gero, Michelsonen interferometroa erabiliz erradiazioa modulatzen da, eta, ondoren, detektagailu batera heltzen da. 1. atalean azaldu den moduan, laginaren emisibitatea laginetik jasotako erradiantziaren eta gorputz beltzetik jasotako erradiantziaren arteko zatiketa izango da.

3.2. Emisibitate-neurketak

3. irudiak aluminioaren emisibitate espektroak erakusten ditu bost tenperaturatan. Metalen kasuan ohikoa den bezala, emisibitate balio baxuak aurkitzen dira. Teoria elektromagnetikoak erakusten duen moduan, metalaren emisibitateak behera egiten du uhin-luzeraren balio handiagoetan, eta, gainera, tenperatura handituz emisibitateak balio altuagoak lortzen ditu (Howell *et al.*, 2010). Horretaz gain, aluminioak beste purutasun altuko eta gainazal leuneko metal gehienek bezala emisibitate balio baxuak erakusten ditu (Howell *et al.*, 2010; Setién-Fernández *et al.*, 2014). Zenbat eta laginaren tenperatura baxuagoa izan, orduan eta seinale zaratatsuagoa jasotzen da, batez ere uhin luzera laburrenetarako. Hori dela eta, $T = 150$ °C-ko kurbaren uhin-luzera laburren datuak alde batera uztea erabaki da, ez baitzuten informazio garbirik eskaintzen.

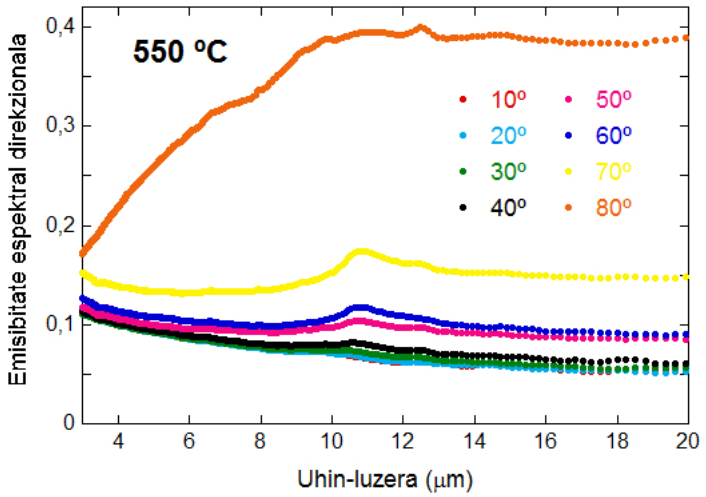
3. Irudia: Aluminioaren emisibitate espektrala bost tenperaturatan, $\theta = 10°$ izanik.



4. irudiak 550 °C-tako aluminioaren emisibitate espektralaren kurbak erakusten ditu angelu polarraren hainbat baliotarako. Metalen kasuan, emisibitateak gora egiten du θ angelua handitzearekin batera, $\theta = 90°$ angeluaren inguruan izan ezik, non balio maximo batera heldu ostean, emisibitatearen balioa zero bihurtzen den (Howell *et al.*, 2010). Metalen emisibitatea, izatez, nahiko konstante mantendu ohi da $\theta = 50°$ den arte, eta gero nabarmen handitzen da θ handitzearekin batera. Joera horiek argi agertzen ditu 4. irudiko grafikoak: $\theta = 10°$ eta $\theta = 40°$ bitarteko emisibitate kurbek joera antzekoa erakusten dute, $\theta = 50°$-tik gorako balioentzat, ordea, joera hori nabarmen aldatzen da eta emisibitatea balio altuagoetara iristen da.

Neurketa guztiak huts-ganberan egin arren, ezinezkoa da oxido geruza mehe bat ez agertzea. Geruza horien presentzia da bibliografian emandako balioen arteko desadostasunen faktore nagusietako bat. Kasu honetan, aluminio oxidoaren (Al_2O_3) presentzia nabarmentzen da $\lambda = 11$ μm inguruko balio direkzionaletan tontor baten agerpenagatik, konposatu honen bibrazio-modu normal bati dagokion uhin-luzera dela eta. Geruza hau aluminioak oxigenoarekin tenperatura altuetan duen erreaktibitate handiagatik sortzen da. Honek oxidazioaren progresioa inhibitzen duen geruza babesle baten haztea dakar. Oxido geruza hori ezaugarritzeko, aurretiko azterketak egin dira mikroskopia elektronikoan, energietan sakabanaturiko X-izpien espektroskopiarekin (SEM-EDS). Hauek materialaren sakonerako lehen mikran dagoen oxigeno kantitate txikia, baina detektagarria, dagoela adierazten dute. Geruzaren sakoneraren analisi sofistikatuagoa egiteko X-izpien bidezko fotoelektroien espektroskopiaren (XPS) azterketak proposatu dira, propietate optikoetan duen eragina kalkulatzeko beharrezkoa den datu bat baita.

4. Irudia: Aluminioaren emisibitate espektrala angelu polarraren hainbat baliotarako, T = 550 °C izanik.



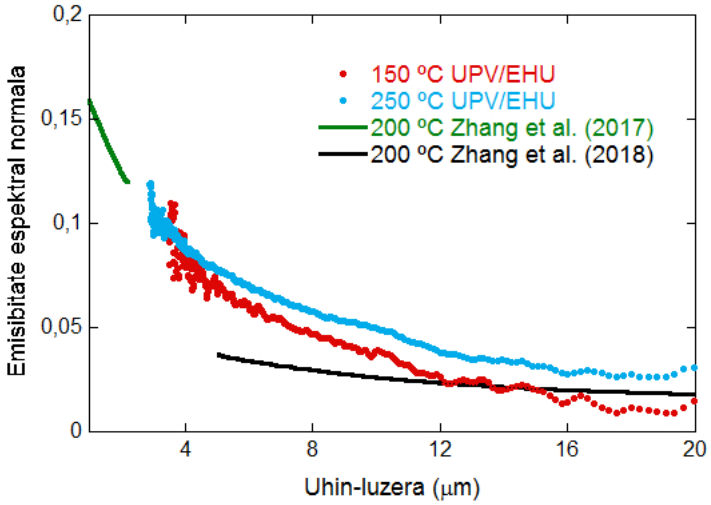
3.3. Datuen konparaketa

Emisibitate espektralaren emaitzak literaturan lortutako balioekin alderatzean, uhin-luzera bateko bi datu-multzo (Ujihara, 1972; Yilbas *et al.*, 1991) eta UPV/EHUn erabiltzen denaren antzeko tresna multiespektral batekin 100 eta 400 °C artean egindako neurketak (Zhang *et al.*, 2017, 2018) aurkitzen dira. 5. irudian, lan honetan 150 eta 250 °C-tan eta Zhangen lanetan 200 °C-tan lortutako emaitzak alderatzen dira. Zhangen neurketak 0.8-2.2 μm eta 5-20 μm tarteetan eginda daude. Bi neurketa-multzoetan erabilitako laginek %99.6ko purutasuna eta $R_a = 0.08$ μm-ko batazbesteko zimurtasuna dute. 5. irudira begira, ikusten da kasu guztietan emisibitatea gutxitu egiten dela uhin-luzera handitzearekin batera. Zhangen uhin-luzera laburren emaitzak (berdez) gure emaitzekin bat datoz. Zhangek uhin-luzera luzeetan (beltzez) dituen emisibitateak, ordea, antzeko portaera kualitatiboa izan arren, txikiagoak dira 5-12 μm tartean. Emisio-balioetan dagoen alde horren arrazoi nagusiena aluminio-laginen gainazaleko egoera ezberdinei zor zaio. UPV/EHUko laginarekin konparatuz, batazbesteko zimurtasuna txikiagoa dute eta zenbat eta zimurtasun txikiagoa izan, orduan eta gutxiago emitituko du laginak. Hala ere, garrantzitsua da aipatzea emisibitate oso txikiak zailtasunez neurtzen direla tarte espektral honetan; beraz, aluminioaren emisio-ahalmena azaltzeko ahalik eta datu gehien eduki behar dira.

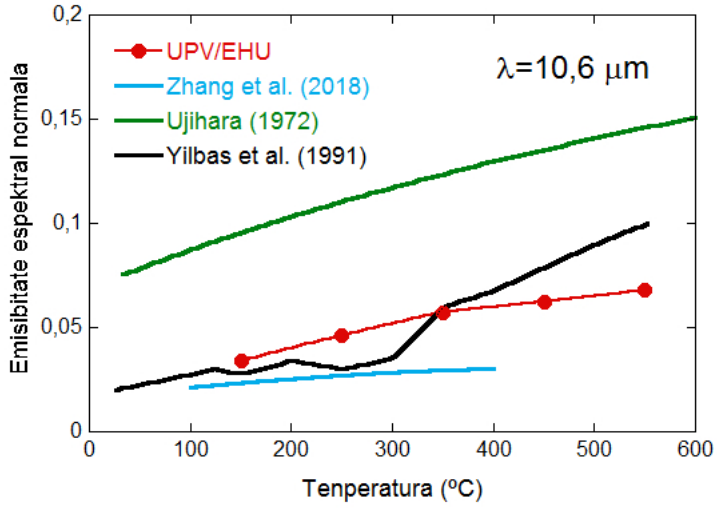
Beste konparaketa posible bat uhin-luzera bakarreko tekniken bidez lortutako datuekin eginikoa da (Ujihara, 1972; Yilbas *et al.*, 1991). 6. irudian, 10.6 μm-tako emisibitate-datuak literaturan aurkitutakoekin alderatzen dira. Emaitza guztietan emisibitatea tenperaturarekin batera handitzen bada ere, emandako balioetan sakabanatze handia dago. Irudi honek argiago erakusten du emisibitate-neurketen problematika. Yilbasek eta laguntzaileek egindako neurketen kasuan, artikulu honetan aurkeztutako datuen antzeko joera dutela egiaztatu da. Hala ere, emaitzen ziurgabetasun handia nabarmentzen da, aluminioak uhin-luzera luzeetan duen emisibitatearen balio txikia dela eta. Gainera, ezadostasun metodologikoak daude. Zhangek eta laguntzaileek metodo multiespektrala (FTIR) erabiltzen duten arren, Yilbasek eta laguntzaileek erreflektantzia-esperimentuetan oinarritutako zeharkako metodo bat erabiltzen dute; Ujiharak eta laguntzaileek, ordea, materialaren parametroetan oinarritutako eredu teoriko bat erabiltzen dute. Esanguratsua da nabarmentzea eredu teorikoak edozein esperimentutan neurtutakoak baino askoz balio handiagoak aurresaten dituela. Hori interesgarria da etorkizuneko azterketei begira, horietan garrantzi handiagoa emango baitzaio emaitzen ulermen teorikoari. Azkenik, aztertutako laginen gainazaleko egoerak emaitzak baldintzatzen ditu, zalantzarik gabe; adibidez, Yilbasek eta laguntzaileek ez dute ematen erabilitako materialen zimurtasun-baliorik.

Laburbilduz, bibliografian dauden emaitzekin egindako alderaketaren arabera, argi dago emisibitate-neurketekin batera gainazalaren karakterizazio xehatua egin behar dela. Zimurtasunaren aldaketek, oxidazioak eta mekanizazio-prozesuak sortutako gainazaleko tentsioek neurtutako balioetan aldaketa handiak eragin ditzakete (Wen eta Mudawar, 2005; Howell *et al.*, 2010). Bestalde, Ujihararen eta laguntzaileen eredu teorikoa hobetzea etorkizunerako erronka da, emaitzak kuantitatiboki interpretatzeko eta sakabanatzea modurik onenean aztertzeko.

5. Irudia: Aluminioaren emisibitatea uhin-luzeraren arabera bibliografiaren datuekin konparatuz.



6. Irudia: Aluminioaren emisibitatea tenperaturaren arabera bibliografiaren datarekin konparatuz.



4. Ondorioak

Purutasun altuko aluminio-lagin baten emisibitate espektral direkzionalaren azterketa egin da espektro infragorrian, 550 °C-ra arte. Neurketa horiek baliagarriak dira aluminiozko produktuak ekoizteko eta teknika termografikoak erabiliz ezaugarritzeko. Metal horren emisibitatearen inguruko datu gutxi daude bibliografian. Nahiz eta literaturan eskuragarri dauden datu eta eredu teorikoen adostasuna kualitatiboa izan, argi dago sakabanatze handia dagoela maila kuantitatiboan. Desadostasun horiek metalen emisibitate-neurketen zehaztasun gutxiegiaren ondorio izan daitezke, baita metodologiaren ondorio ere. Hala ere, faktore garrantzitsuenak zimurtasuna eta oxido geruza mehen presentzia dira. Faktore horiek guztiak etorkizuneko lan batean interpretatzeak aukera emango du aplikazio termografikoetan balio fidagarriak izateko.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Aluminiogintzan termografia garatzeko orduan, eredu matematiko fidagarriak eta erreproduzigarriak edukitzea da erronka nagusietako bat, neurketen zehaztasuna ziurtatzeko. Horregatik, lan hau etorkizunean osatuko da emisibitatean eragin handia duten parametroak kontuan hartuta, hala nola zimurtasuna edo oxido geruzak. Aldi berean, literaturan aurkitzen diren datuen azterketa sakona egingo da eta teoria elektromagnetikoa erabiliko da desadostasunak interpretatzeko.

6. Erreferentziak

Apiñaniz, Estibaliz, Arantza Mendioroz, Alberto Oleaga, eta Agustín Salazar. 2014. Termografia infragorri aktiboa materialen azterketarako. *EKAIA. EHUko Zientzia eta Teknologia aldizkaria* 27.193–208.

Echániz, Telmo, Iñigo González de Arrieta, Raquel Fuente, Irene Urcelay-Olabarria, Gabriel A. López, eta Josu M. Igartua. 2018. Eguzki-energia termikoa metatzeko materialetako emisibitate-esperimentuak. *EKAIA. EHUko Zientzia eta Teknologia aldizkaria* 34.199–210.

González de Arrieta, Iñigo, Telmo Echániz, Raquel Fuente, Jose M. Campillo-Robles, Josu M. Igartua, eta Gabriel A. López. 2020. Updated measurement method and uncertainty budget for direct emissivity measurements at the University of the Basque Country. *Metrologia* 57.045002.

Haugh, Michael J. 1988. Radiation thermometry in the aluminum industry. In *Theory and Practice of Radiation Thermometry*, ed. by David P. DeWitt eta Gene D. Nutter, chapter 17, 905–971. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.

Howell, John R., M. Pınar Mengüç, eta Robert Siegel. 2010. *Thermal Radiation Heat Transfer*. Boca Raton: CRC Press, 5th edition.

Imatz, Idurre Apraiz, Fernando José Alonso Orcajo, eta Borja Gambin. 2005. Diferentes técnicas END mediante termografía infrarroja. Aplicaciones en la industria aeroespacial. *DYNA* 80.35–38.

Leitner, Matthias, Thomas Leitner, Alexander Schmon, Kirmanj Aziz, eta Gernot Pottlacher. 2017. Thermophysical properties of liquid aluminum. *Metallurgical and Materials Transactions A* 48.3036–3045.

Setién-Fernández, Iñigo, Telmo Echániz, Luis González-Fernández, Raúl B. Pérez-Sáez, eta Manuel J. Tello. 2014. Spectral emissivity of copper and nickel in the mid-infrared range between 250 and 900 °C. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 71.549–554.

Ujihara, Kikuo. 1972. Reflectivity of metals at high temperatures. *Journal of Applied Physics* 43.2376.

Usamentiaga, Rubén, Pablo Venegas, Jon Guerediaga, Laura Vega, Julio Molleda, eta Francisco G. Bulnes. 2014. Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. *Sensors* 14.12305–12348.

Wen, Chang-Da, eta Issam Mudawar. 2005. Emissivity characteristics of polished aluminum alloy surfaces and assessment of multispectral radiation thermometry (MRT) emissivity models. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48.1316–1329.

——, eta ——. 2006. Modeling the effects of surface roughness on the emissivity of aluminum alloys. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49.4279–4289.

Yilbas, Bekir Sami, Kenan Danisman, eta Yilbas Zahide. 1991. Measurement of temperature-dependent reflectivity of Cu and Al in the range 30-1000 °C. *Measurement of Science and Technology* 2.668–674.

Zhang, Kaihua, Kun Yu, Yufang Liu, eta Yuejin Zhao. 2017. Effect of surface oxidation on emissivity properties of pure aluminum in the near infrared region. *Materials Reseach Express* 4.086501.

——, Yuejin Zhao, Kun Yu, eta Yufang Liu. 2018. Development of experimental apparatus for precise emissivity determination based on the improved method compensating disturbances by background radiation. *Infrared Physics & Technology* 92.350–357.

7. Eskerrak eta oharrak

Lan honek Mireia Sainz Menchónen GrALaren zati bat osatuko du. Iñigo González de Arrietak eskerrak ematen dizkio Eusko Jaurlaritzari, *Ikertzaile Doktoreentzako Hobekuntzarako* doktoretza-ondoko laguntzagatik (POS-2020-1-0045). Euskal Herriko Unibertistateko Ikertaldeei Laguntza (GIU19/019) ere eskertzen da.

Saskigintza eta Geometriaren arteko lotura Arkitektura Graduko Irakaskuntzan

Casado, A.., Sánchez, A.., Iñigo, L.
Arkitektura, Adierazpen Grafikoa. Arkitektura Saila, Arkitektura Goi Eskola Teknikoa, Euskal Herriko Unibertsitatea UPV/EHU.
amaia.casado@ehu.eus

Laburpena

Euskal Herriko Unibertsitateko Arkitektura Goi Eskola Teknikoan, Geometria irakasgaien barruan, arkitekturari lotutako forma geometrikoak aztertzen dira. Gaur egun, forma geometrikoen azterketa hau saskigintza tradizionalean inspiratutako ereduen garapenarekin lotuz ematen ari da. Rhinoceros bezalako 3D modelatze-softwareak erabiltzeak eta Grasshopper programazio bisualeko lengoaiak, ikasleei aurretik inoiz egin ez diren ereduak eta formak esploratzea ahalbidetzen diete. Eredu digitalak lortu ondoren, eredu fisiko errealak sortzen dira material naturalekin, hala nola bertakoak diren gaztainondo-zumitzekin.

Hitz gakoak: Saskigintza, Arkitektura, Geometria.

Abstract

In the Higher Technical School of Architecture of the University of the Basque Country, within the subjects of Geometry, geometric forms linked to architecture are studied. At present, this study of geometric shapes is being related to the development of models inspired by traditional basketry. Using 3D modeling software such as Rhinoceros and the Grasshopper visual programming language allow students to explore models and shapes that have never been made before. Once the digital models have been obtained, real physical models are created with natural materials such as native chestnut flat strips.

Keywords: Basketry, Architecture, Geometry.

1. Sarrera eta motibazioa

Forma geometriko tridimentsionalen menperatzea funtsezko baldintza da mota guztietako arkitekturak proiektatu eta eraiki ahal izateko. Forma geometrikoak irudikatzeko sistema ugari daude, eta gehienak aro aurre digitalean sortuak dira

Aro digitalak geometria horiek irudikatzeko modua aldatu zuen (Harnomo eta Indraprastha, 2016). Gertakari honek eta potentzia handiko hardwareko ekipoen existentziak, gaur egun, edozein formako 3Dko eraikuntza birtuala zehaztasun milimetriko batekin diseinatzea ahalbidetzen dute. Material eta teknika ezberdinekin eskala ezberdineko maketa fisikoak sortzeko aukera ematen duten hainbat teknologia digital erabiltzen dira ikasleekin. Horretarako, 3Dn modelatzeko hainbat software erabiltzen dira eta 3D inprimaketa ahalbidetzen duen fabrikazio digitaleko laborategi bat dago. Baina 3D inprimaketaren bitartez, kasu askotan, elementu arkitektonikoen fabrikazioari loturiko alderdiei dagokionez, ikasleek ez dute hausnarketa nahikoa egiten.

Azaldutako guztiagatik, diseinu digitalaren abantaila guztiak erabiliz, eta saskigintza tradizionalaren teknikak aplikatuz, eskuz egindako modeloaren maketa fisikoarekin prozesuarekin amaitzen den berrikuntza proposatzen da. (Muslimin, 2010). Saskigintza, luzetarako forma duten material natural edo artifizialak ehuntzen dituen prozesu bat da. Saskigintzaren ezaugarriak diren, material, ehuntze teknika eta trama ezberdinak aztertu eta funtsezko forma geometrikoekin erlazionatzen dira (Mallow, 1996) (Zoran, 2013). Forma geometrikoak kontrolatzeaz gain, fabrikazio-prozesu tradizionalak ikasten dira, ikasketa gaitasunen garapen handiago bat ahalbidetuz.

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Ikerketaren helburuak bi alderdi ditu: Batetik, ikasleek forma geometrikoen ikaskuntza beraien eskuekin eraikitako maketa bidez lantzea. Bestetik saskigintza tradizionalak milaka urtetan erabili dituen teknikak ikastea geometria ezberdinen formaren analisiarekin erlazionatuta.

Arkitektura eta Ingeniaritza eskoletan geometriaren irakaskuntza-ikaskuntza lehen mailetan garatzen diren modulu propedeutikoen barruan sartzen da. Garai digitalaren aurretik, forma tridimentsionalak ulertu ahal izateko, 2 dimentsiotan (2D) lan egiten ikasten zen, forma horiek 3 dimentsiotan (3D) eraiki ahal izateko. Baina 2D ikuspegi hauek, forma ugari gauzatzerakoan muga asko izateaz gain, akats ugari ekar zitzaketen loturarik gabeko plano ezberdinak sortzen zituzten. Guzti honek formaren eraikuntzan arazo handiak sortzeko aukera areagotzen zuen.

Aurkezten den irakaskuntza berrikuntza proposamen honetan, prozesua 2Dko irudikapen-sistema tradizionalen ezagutzatik 3D softwareen bidezko formen irudikapenera igarotzen da. Erabilitako erreferentziazko softwarea Rhinoceros 3D da, Grasshopper delako pluginarekin osatzen dena, lehenengoaren barruan jarduten duen ikus-programazioko lengoaia. Konbinazio horri esker, parametrizazioaren bidez, inoiz egin ez diren ereduak tramak eta formak esploratzen dira.

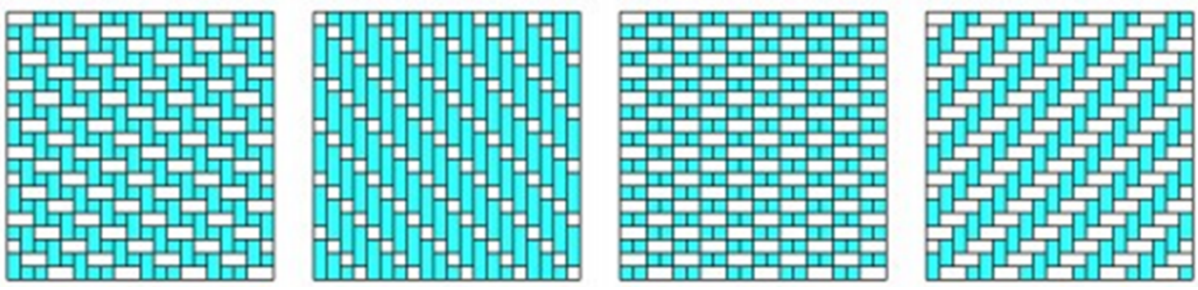
Lan-metodologia hau aurretik ezarritako ikasgairen helburuetatik abiatzen da, baina berrikuntza hori saskigintza tradizionalean oinarritzen da. Metodoak fabrikazio-prozesua hainbat esparrutan ulertzeko aukera ematen du. Metodologiak saskigintzaren barruko 2 alderdi garrantzitsu ditu ardatz: alde batetik, forma ehuntzeko erabiltzen diren jantzigintza-teknikak eta tramak. Gainera, geometria ezberdinen modelatzea parametrizazioaren potentzial erabiliaz sakontzen da, eta honek, sortutako soluzioak biderkatzea ahalbidetzen du, eskuz maketa fisikoak fabrikatuz amaitzeko.

2.1. Saskigintza lantzeko teknikak , tramak eta sargak

Aurkezten den ikerketak, saskigintza ehunduaren bidez landutako forma geometrikoak garatzen ditu (Sudduth, 1999). Metodoa, aukeratutako material lineala bi edo hiru norabidetan ehuntzean datza. Ehundura-norabidearen arabera, batzuetan material ezberdinak erabili daitezke; bata, egiturarena izaten da, eta bestea, itxiturarena.

Teknika ezberdinak hainbat ehundura-tramekin erlazionatu daitezke (Martin, 2015). Formari dagokionez, trama baten bidez sortu daitekeena, hainbat teknikarekin eraiki daiteke. Forma desberdinak ehuntzeko, trama eta patroi desberdinak erabili daitezke. Ikerketa honetan bi eta hiru serieko tramekin lan egin da. Trametan kolore desberdinak konbinatu daitezke. Zintak koloreztatzean, interesgarriak diren eta aldagarritasun handia ematen duten patroiak lortzen dira. Bi koloretako patroien konbinazio batzuk ikertu dira batez ere. Erritmoak bilatuz, aurreikusteko zailak diren marrazkiak lortzen dira, eta Grasshopper antzeko programa batean oinarrituta, nahi adina irudi sortu daitezke. Parametro gisa sargak eta bere koloreztatzea sartuz, ustekabeko emaitzak lortzen dira.

1. irudia. Sargen parametrizazio bidez lortutako trama ezberdinak



Trama hauek oinarri hartuta, forma geometrikoak trama konkretu hauek erabilita sortzea konplexua izan daiteke. Horretarako, aurretik trama hauek Rhinoceros softwarea erabilita ezagunak diren forma sinple batzuetan entseiatu behar dira. Trama eta formaren arabera zailtasun handiagoak sor daitezke, batez ere geometriaren azken lotura burutzean. Normalean, trama plano lau batean muntatzen hasten da, eta ondoren forma geometrikoa sortzeko lotutako hau bihurritu egin behar da azken forma lortu eta lotu arte. Honetarako, saskigintzan erabilitako materiala kontutan hartu behar da.

Erabilitako materialen propietate mekanikoek ereduen eraikuntza oztopa dezakete. Material horiek geometriaren eta propietate mekanikoen arabera sailkatzen dira. Funtsean, 5 mota erabil daitezke. Ikerketa honetan aurkezten diren emaitzetan gaztainondo-zumitza erabiliko da material gisa, hau da, tira lau naturala.

3. Ikerketaren muina

Ikerketa, gaztainondo-zumitzezko saskigintza, kuboa, zilindroa eta konoa bezalako oinarrizko forma geometrikoei aplikatuz, 3D eredu eta maketa fisikoen garapenean zentratzen da; nahiz eta konplexutasun formal handiagoa edo txikiagoa duten hainbat forma ere garatzen diren (Gailiunas 2011). Tira lauekin ehundutako saskigintzaren oinarrizko forma konoa da, nahiz eta kono formako saski gutxi ikusi. Tramak, espazioan ehuntzen badira, hauek zilindro, kono edo beste gainazal garagarri batzuen forma har dezakete. Rhinoceros softwarearekin sortutako eredu digitalak eta gaztainondo-zumitz lauekin eraikitako eredu fisikoak erakusten dira.

3.1. Modelatzea, parametrizazioa eta eskuzko maketa fisikoak

Eredu digital tridimentsionalak lantzerako orduan, tramaren garapenean zenbait baliabide metodologiko kontutan hartu dira. Emaitza ezberdinak ikertzeko helburuarekin, serie bat, bi edo hiru serieko tramak ehuntzea frogatu da. Gainera, Grasshopper-en bidezko parametrizaziora jo da. Parametrizazioak ustekabeko emaitzak lortzea ahalbidetzen du, alderdi asko parametrizatu daitezke, baina ikerketa honetan batez ere bi alderdi parametrizatu dira: batetik, zumezko ehundura bat, eta, bestetik, kolore desberdinen bidezko sargen konbinazio bat.

Esan bezala, parametrizazio bidez ikertu eta ontzat eman diren trama ezberdinak forma geometriko sinpleetan entseiatu dira. Saskigintza teknika tradizionalak eta gaztainondo-zumitzezko xafla lauak erabilita, trama berri hauek aztertu dira. Lehenik 3D modelatuak egin dira, eta ondoren maketa fisikoak eskuz sortu dira, aurreko eredu digitalak ontzat emateko. Maketa fisikoen eraikitzean arazoren bat antzematen denean, hau konpondu ahal izateko berriro eredu digitalera egiten da buelta, azkenean eredu fisikoa arazorik gabe bere osotasunean eraiki arte.

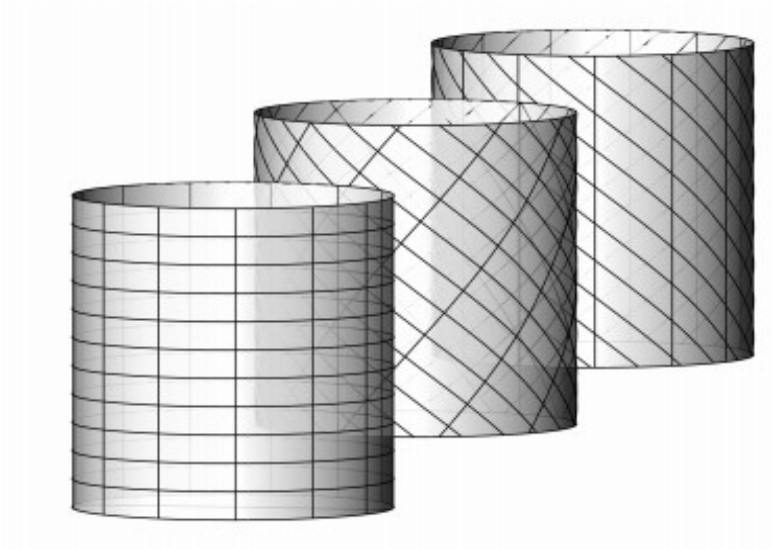
Ikerkuntza honetan trama berrien garapena egiteko forma sinple hauek erabili dira: Zilindroa, konoa eta kuboa. Nahiz eta forma sinpleak izan, hauek saskigintza bidez sortzeko, trama bakoitzaren garapena kontutan hartu behar da. Forma hauetan tramaren ardatz ezberdinen kokapen zuzena kokatzeko ikerketa proba ezberdinak egin behar dira, egokiena bilatzeko.

3.2. Zilindroa

Trama ezberdin ugari probatzeko balio duen forma geometrikoa da. Zilindroak sortzaile bertikalak ditu, eta oso erraza da beraz trama lauki bertikal lau bat okertuz zilindroaren forma sortzea. Plano horizontal batean sortu den laukizuzen ehunduaren bi ertzek, beren tramak, sargak eta koloreztatze-patroiak konektatzea eskatzen dute. Honek arreta eskatzen du, baina ez da oso lan konplexua. Trama osatzen duten serieak material desberdinak badira ere, ez du axola, material bakoitzak bere buruarekin konektatzen baitu zilindroaren forma sortzerakoan. Trama forma logikoena eta errazena ardatzak bertikal eta horizontalean daudenean sortzen da. Beste trama konplexuago batzuk entseiatu dira, horizontala okertuz bertikala mantenduta; eta biak okertuz zilindroan konplexutasun maximoa lortuz. Beste forma geometrikoetan tramen egokitzeak arazo gehiago sortzen ditu, hala nola konoen kasuan, tramaren sorrera planotik abiatzen bada ere,

ondoren konoaren forma lortzeko, tramak ezaugarri geometriko konkretu eta mugatuagoak bete behar baititu

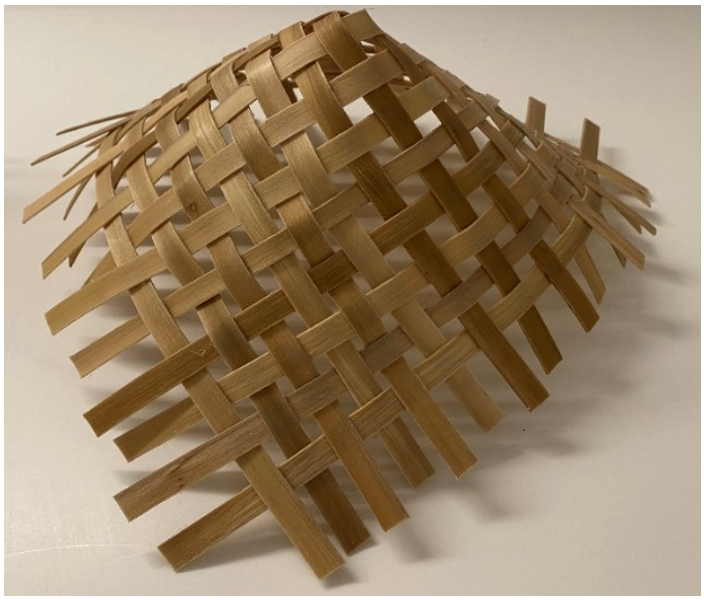
2. irudia. Zilindroaren 3D eredu digitalak



3.3. Konoa

Trama planoan lantzen bada ere, ez da laukizuzen batetik abiatzen; sektore zirkular batekin sortzen da, serieak, sargak eta patroiak elkarrekin ondo konektatuz. Forma geometrikoaren sorrera konplikatzen denez, trama ezberdinen erabilera mugatzen da. Behean 3. irudian ikus daitekeen moduan, konoaren sorrera trama ortogonal lau batetik abiatuz sortu da adibidez. Konoa, oso erabilia da saskigintzan. Bestalde, forma geometrikoen modelatzean, konoaren eta zilindroaren arteko konbinazioa probatu da. Saskigintzan zilindroak gaizki konbinatzen du beste zilindro batzuekin, baina konoak ondo konbinatzen du beste kono eta zilindroekin. Formak sortzeko orduan gainazal erabilgarriagoa da konoa.

3. irudia. Gaztainondoko tira lauekin eskuz egindako eredua

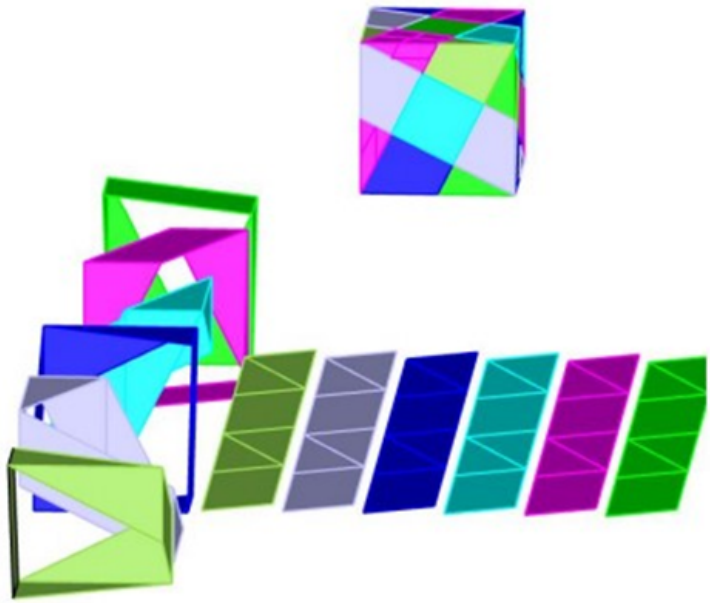


3.4. Kuboa

Poliedroak konoen bidez eraiki dira, baina guztiek dute aurpegi lauekin landu den beste bertsio bat. Poliedroen barruan, ikerketa honetan kuboa lantzen da. Saskigintza ehunduan oinarrizko

forma arruntena da. Kuboak eta prismak sorrera berberak dituzte. Bi serieko trama lauak kubo tridimentsionalaren hiru serieetako batean bihurtzen dira (Tarnai et al., 2012). Sarga eta kolore-patroiei dagokienez, aukerak amaigabeak dira trama karratuan, kuboari aplika daitezke, baina muga gehiago izango ditu tramak, sargak eta patroiak berdintzeko.

4. irudia. Kuboaren garapena koloretako probak erabilita



4. Ondorioak

UPV/EHUko Arkitektura Goi Eskola Teknikoko Geometria irakasgaietan lortutako emaitzak oso onak dira. Agerian geratu da ikasleek forma geometrikoak kontrolatzen ikasten dutela, ikasgaiaren oinarrizko gaitasuna eskuratuaz. Gainera, berrikuntza horri esker, ikasleek bere gaitasunak handitzeko beste trebetasun batzuk garatzen ari dira. Baliabide sorta zabala biltzen da, teknika tradizionalak ezagutu eta norberak bere eskuekin fabrikazio prozesutik hasita, azken teknologiak ezarriaz, bertakoak eta naturalak diren gaztainondo-zumitzekin forma geometriko berrien sorkuntza eta garapenenera iritsi arte.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Gaur egun saskigintzak oso forma mugatuak garatzen ditu. Gehienetan forma sinple zehatz batzuetan oinarritzen da eta ez da ia eboluziorik egon urte askotan zehar. Arkitektura Graduan lehen urteak forma sinpleen ikaskuntzarekin lotuta egonik forma sinple hauek 3D modelatze software bidez egokitzea eta trama berrien aplikazioa aztertzea da bideetako bat.

Bestetik, Graduan, goragoko mailetan, saskigintzari lotutako forma geometriko berrien eboluzioa aztertzea eta software digitalen bidez simulatzea planteatzen da. Hauek gero maketa fisikoen bidez ontzat eman ahal izango dira. Hortaz eta laburbilduz, lehen kurtsotan aztertutako forma geometriko sinpleetatik abiatuta forma konplexuak sortzeko prozesuak garatu nahi dira. Honela milaka urteetan saskigintzak erabili izan dituen forma eta tramak gainditzuz, arkitekturan zein beste esparru batzuetan erabiltzeko gai izan daitezkeen forma geometriko berriak sortzeko helburua bilatzen da.

6. Erreferentziak

-Gailiunas, P. (2011): “A Mad Weave Tetrahedron”. Bridges Coimbra Proc., Tessellations Publishing, Phoenix, 39-44.
-Harnomo, F. I. eta Indraprastha, A. (2016): Computational Weaving Grammar of Traditional Woven Pattern. In Parametricism Vs. Materialism: Evolution of Digital Technologies for Development, in 8th ASCAAD Conference Proceedings, London, 75-84.
-Mallow, J. M. (1996): *Pine Needle Basketry: From Forest Floor to Finished Project*, Lark Books, N.C.
-Martin, A. G. (2015): “A basketmaker’s approach to structural morphology”. In Proceedings of IASS Annual Symposia, International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), 29, 1-8.
-Muslimin, R. (2010), Learning from weaving for digital fabrication in architecture. *Leonardo*, 43(4), 340-349.
-Sudduth, B. R. (1999): *Baskets: a book for makers and collectors*. Hand Books Press, Gloucester.
-Tarnai, T., Kovács, F., Fowler, P. W., & Guest, S. D. (2012): “Wrapping the cube and other polyhedra. In Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 468(2145), 2652-2666.
-Zoran, A. (2013): “Hybrid basketry: interweaving digital practice within contemporary craft”. In ACM SIGGRAPH 2013 Art Gallery, 324-331.

Eraginkortasun Energetikoaren Ziurtagiriaren kalitatearen azterketa kanpo kontrolerako sistema hobetzeko

Iribar-Solaberrieta, E.[1,2], Hernández-Cruz, P.[1,2], Pérez-González, D.[1],
[1]Flores-Abascal, Iván; Sala-Lizarraga, J.M.[1]
[1]ENEDI ikerketa taldea, Ingeniaritza Energetikoa Saila, Bilboko Ingeniaritza Eskola, Euskal Herriko Unibertsitatea, Bilbo (UPV-EHU)
[2] Eusko Jaurlaritzako Eraikinen Kalitate Kontrolerako Laborategia, Gasteiz.
eider.iribar@ehu.eus

Laburpena

Eraikinen Energia Eraginkortasun Energetikoaren Ziurtagiria (EEZ) Europar Batasunak duen tresna garrantzitsuenetako bat da Eraikinen Energia Eraginkortasunaren arloan. Hala ere, mesfidantza handia dago horien kalitatearen inguruan. Kalitatea ziurtatu nahi bada, kalitate kontrolerako sistemek eraginkorrak izan behar dute. Baina, gaur egun, hainbat sistema ezberdin aplikatu badira ere Europar Batasunean zehar, ez dira horiek emandako emaitzak ezagutzen. Lan honek EAEn aplikatu den sistema bidez lortutako emaitzak ebaluatzea du helburu, EEZen kalitatea aztertu eta hutsune eta potentzialak identifikatuz.

Hitz gakoak: Eraginkortasun Energetikoaren Ziurtagiria; Eraginkortasun Energetikoaren Ziurtagiriaren kanpo kontrola; datuen kalitatea; Eraginkortasun Energetikoaren Ziurtagirien araudia

Abstract

Energy Performance Certificate is the main instrument of the EU in the field of energy efficiency in buildings. However, there is a lack of confidence in the quality of them. If quality assurance is to be assured, quality control systems should be effective and efficient. However, today, the results of the different systems implemented throughout Europe are not known. The aim of this study was to evaluate the results of the system implemented in Basque Country, based on the analysis of the quality of the certificates and identifying the potentials and gaps of the system.

Keywords: Energy Performance Certificate (EPC); EPC Control; data quality; EPC regulation

1. Sarrera eta motibazioa

Gizarte honen funtzionamenduaren motorra da energia. Erabat lotuta doa gure ongizatea energia kontsumoarekin. Eta horrek bi ondorio nagusi dakartza: erregai fosilen agortzea eta klima-aldaketa. Gure energia-sistema erregai fosilekiko menpekoa da, kontsumoaren %80a horietatik baitator. Energia eredu hori da, gainera, CO_2 emisioen erantzulea, eta ondorioz, aldaketa- klimatikoarena. Horregatik beharrezkoa bihurtu da funtsezko aldaketa egotea energia politikan, CO_2 emisioen murriztean eta energia berriztagarrien erabileran oinarritu behar dena. Sektore guztien artean, eraikuntzaren sektorea da potentzial handienetako duena gizartearen deskarbonizazio prozesuan aurrera egiteko. Arrazoi hori medio, Europar Batasunak (aurrerantzean EB) hainbat zuzentarau argitara eman ditu azken urteetan Eraikinen Energia Eraginkortasuna hobetzeko bidea gidatzen ari direnak (European Commission, 2018, 2010).

Eraikinen Eraginkortasun Energetikoaren Ziurtagiria (aurrerantzean EEZ) zuzentarau horien ondorioz ezarri da Europako estatu guztietan. Tresna horren helburua da oinarri objektibo bat ezartzea eraikinek duten energia efizientzia gradua definitu eta euren artean alderatu ahal izateko. Europar Batasunean oso zabalduta dagoen tresna da, erabilera asko dituena. Eraikin berri eta zaharren birgaitze- energetikoetan gutxieneko baldintzak betetzen direla egiaztatzeko tresna da Europar estatu gehienetan (Rey Martínez et al., 2018). Bestalde, birgaitze laguntzak jasotzeko programetan erabiltzen da, programa horien eskaerak betetzen direla justifikatzeko (Environment

Territorial Planning and Housing Department, 2020; Ministry of Energy, 2017). Gainera, EEZen beste funtzio bat da jabeak, erosleak eta erabiltzaileak beraien higiezinen energia eraginkortasun graduaz informatzea. Eta azkenik, 79 artikulu zientifikotan oinarritutako ikerketa lan batek azaldu duenez (Pasichnyi et al., 2019), EEZen datu baseak ikerketarako ere informazio iturri garrantzitsuak dira.

EBren apustua serioa da, hala ere hainbat ikerketek azaldu dute (Arcipowska et al., 2014; Hårsman et al., 2016; Li et al., 2019) EEEZen datuen kalitatearen inguruan konfiantza falta handia dagoela eta datuak ez direla zehatzak, ziurgabetasuna dagoela (Durier et al., 2017; Fabbri and Marinosci, 2018; Hardy and Glew, 2019; Las-Heras-Casas et al., 2018; López-González et al., 2016; Molina et al., 2017). Hori gertatzearen arrazoietako bat EEZen inspekzioak ez egitean datza (Molina et al., 2017). Testuinguru horretan, beraz, EEZen kalitatea ziurtatzeko neurriak ez badira hartzen, hazi egin daiteke hiritarren mesfidantza eta zalantzan jarri dezake EEZen jarraipena.

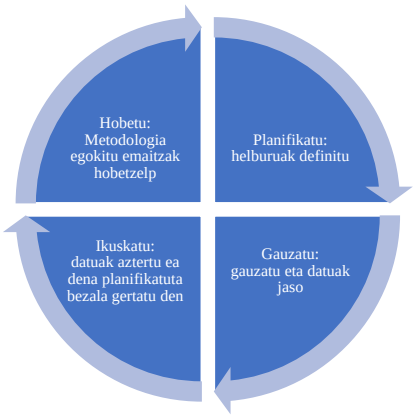
EEZen kalitatea ziurtatzeko EBk duen baliabide bakarra da horien kontrolerako sistema independentea. 2010/31/EB zuzentarauko 18. artikuluak (European Commission, 2010) estatu bakoitza EEZen kontrolerako sistema independente bat ezartzea derrigortzen du. Hori horrela, estatu bakoitzak, edo kasu askotan, Espainian bezala, autonomia bakoitzak, bere sistema propioa dauka. Hala ere, sistema ezberdin horiek eman dituzten emaitzak ia ez dira ezagutzen, ez eta jarraitzen diren prozeduren xehetasunik ere. Hala eta guztiz ere, hainbat artikuluk berresten dutenez, bada behar orokor bat kontrol sistema horien eraginkortasuna eta efikazia hobetu eta, eragin handiago bat lortzeko (Li et al., 2019).

Euskadin 25/2019 dekretuak (Departamento de Desarrolo Económico e Infraestructuras, 2019) arautzen du EEZen kalitatearen kontrolaren jarduera. Kontrol hori egiteko onetsita dauden agenteen ardura da kalitatearen ebaluazioa egitea. Horietako agente bat da *Eraikinen Kalitate Kontrolerako Laborategia*. Bertan, dekretuak ezartzen dituen prozedurarako gidalerroak jarraiki protokolo propioa ezarri dugu eta azken 6 urteetan 200 EEEZ baino gehiago kontrolatu ditugu, Euskadin erregistratutako EEZen %10a gutxi gorabehera.

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak (Azpiatalak eta zerrendak)

Prozesu jarrai bat izan behar du EEZen kontrolerako sistemak hobetzeko bideak (Loncour and Roelens, 2015). Etengabeko hobekuntzan oinarritutako edozein prozesuk hainbat prozesuren kalitatearen monitorizazioa eskatzen du. Hau da, sistemaren eraginkortasuna neurtzea beharrezkoa da, hutsuneak non dauden identifikatu eta hobekuntzak aplikatzeko.

1. irudia. Kontrol sistemen hobekuntza jarraia egiteko eskema.



Hala ere, EBko oso estatu edo lurralde gutxik monitorizatzen dute beraien sistema edota ez du informazio hori hedatzen. EAE ez da salbuespen bat. Bi artikulu zientifiko bakarrik aurkitu dira kontrol kanpainetan jasotako *feedback*-ak bildu dituztenak (Fabbri and Marinosci, 2018; Hardy

and Glew, 2019). Emilia Romagna Italiako lurraldean EEZen %80ean gutxienez akats bat agertzen da (Fabbri and Marinosci, 2018); Erresuma Batuan, aldiz, %27tan (Hardy and Glew, 2019). Beste bi lurralde horietako datu kontrajarriak ikusita eta EEZen kalitateari buruz dauden zalantzak direla eta (ikus 1 atala), EAEn izandako esperientzia frogatu nahi da, horretarako neurtuko den EEZen kalitate maila oinarri hartuta.

Artikulu honetan, 146 EZZz osatutako laginean identifikatutako errorearen analisi estatistikoaren emaitzak azalduko dira. Lanean dihardugun tesiaren parte da ikerketa hau. Tesiaren helburua da EEZen kalitatea neurtu, ematen diren akatsen analisi kuantitatibo eta kualitatiboa aurrera eraman, prozeduraren hutsuneak ezagutu eta metodologian hobekuntzak proposatzea. Proposatuko den metodologia errepikatu ahal izango da beste sistemetan. Hala ere, artikulu honetan lehenengo atalean lortutako ondorio batzuetan zentratuko gara.

3. Ikerketaren muina eta ondorioak

Ikerketa honetarako lagina 146 EEZz osatzen da. Lagina anitza da: erabilera ezberdinetakoak, eraikin berri nahiz lehendik eraikita zeudenak, programa informatiko ezberdinekin kalkulatutako, etab. Bakoitzari kontrol prozedura aplikatu zaio dagozkion arau (Economic Development and Infrastructure Department, 2019) eta protokoloak jarraituz (de Lorenzo Urien et al., 2015).

Kontrolen helburua da egiaztatzea EEZetan sartutako datuen egiazkotasuna, prozedura estandarren konplimendua eta kalkulatutako energia kalifikazioaren zuzentasuna. Egiaztatze prozedura horretan akatsen bat edo gehiago aurkitzen badira, desadostasun txosten bat igortzen zaio EEZaren egileari. Horrelako kasuetan ziurtagiriaren egileak zuzendu egin behar du dagokion EEEZ kalkulua. Eta ondorioz, desbideratze bat gertatzen da hasierako eta amaierako EEZen emaitzen artean energia primario ez berriztagarriaren kontsumoan (EPEBK), CO_2 igorpenen balioan eta kalifikazioan.

Hori horrela, ondorengo datuak bildu dira lagineko EEZn behaketa bakoitzean (taula 1) eta ondorengo desbiderapenak kalkulatu:

1. taula. Bildu eta kalkulatutako aldagaiak EEEZ bakoitzean.

EEZ bertsioa	Bildutako datuak EEZ bakoitzean	Kalkulatutako desbiderapen indizeak EEZ bakoitzean
EEZaren zirriborroa	Igorritako desadostasunak	• Desadostasun kopurua • Kalifikazioaren eskalan (Atik Gra) desbiderapena hizki salto kopuruan neurtuta. • Desbiderapena errore absolutuan neurtuta EPEBK eta CO2 igorpenen balioetarako. • Desbiderapena errore erlatiboan neurtuta EPEBK eta CO2 igorpenen balioetarako.
	EPEBK	
	CO_2 igorpenak	
	EPEBKn oinarritutako kalifikazioa (hizkia)	
Azken EEZ	EPEBK	
	CO_2 igorpenak	
	EPEBKn oinarritutako kalifikazioa (hizkia)	

Datu horietan oinarrituta EEZen kalitatearen eta azken urteetako emaitzen azterketa egin da eta ondorengoak dira aurkikuntza batzuk.

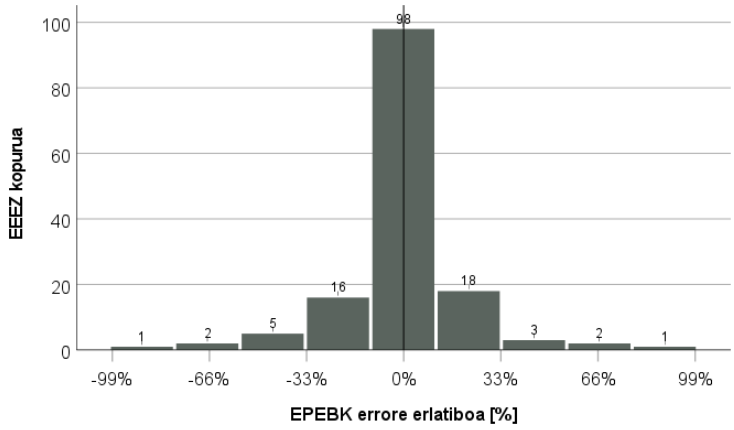
3.1. Desbiderapen positiboak negatiboak adina dira.

Hainbat emaitzek adierazten dute desbiderapena ez dela beti norabide batean ematen. Hau da, batzuetan kontrola pasa ondoren egindako zuzenketen ondorioz emaitzak hobetu egiten dira eta beste

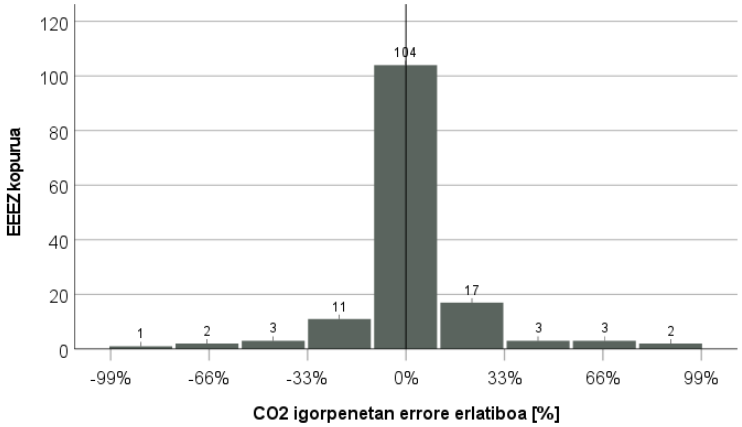
batzuetan okerragotu. Gutxi gorabehera okerrera egiten duten kopuru adinakoa da, onera egiten duten EEZena ondorengo emaitzek azaltzen duten bezala:

- Kalifikazio aldaketak (hizkitan) EEZen %20etan gertatzen dira eta horietatik %54k, aldiz, %46k behera egiten du eskalan.
- EPEBK balioen desbiderapenari erreparatuta %32.2ak hobetu egiten ditu emaitzak; %37ak, ordea, okertu.
- CO_2 isuriei dagokionean EEZen %29.5k hobera egiten du; %38.4ak, berriz, okerrera.
- 2. eta 3. irudiek EPEBK eta CO2 igorpenetan identifikatutako desbiderapenen distribuzioa erakusten dute, hau da, zenbat EEZ dauden errore erlatibo tarte bakoitzean. %0 errore erlatiboko ardatzaren bi aldeetara grafikoa simetrikoa da. Honek erakusten duena da, errore positibo eta negatiboen distribuzioa antzekoa dela, bai EEZ kopuruan, baita errore kantitatean ere.

2. irudia. EPEBKan errore erlatiboaren frekuentzia distribuzioa.



3. irudia. CO_2 igorpenetan errore erlatiboaren frekuentzia distribuzioa.



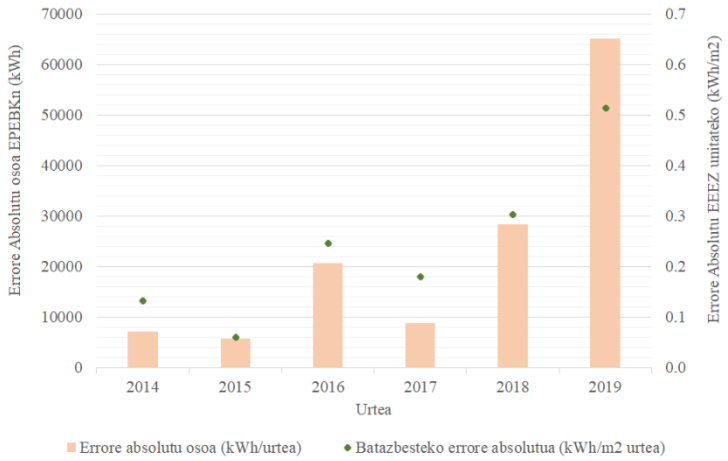
Emaitza horiek esan nahi dutena da EEZ egileek, kasuen erditan behintzat —errore positiboak dituztenean— ez dituztela egiten akatsak nahita edo tranpa egiteko asmo txarrez. Akats horien arrazoiak bestelakoak dira: ezagutza teknikoaren falta edo emaitzetan kontserbadore izatea, EEZa horietan kalifikazio hobeagoak aurkeztu baititzakete.

Hori dela eta, esan genezake, kontrolaren helburua ez lukeela izan behar akatsak dituzten EEZen egileak zigortzea, teknikoen ezagutza hobetzen lagunduko duen prozedura bat izatea baizik. Aipatzekoa da, baita ere, kontrola pasatzearen ondorioz, ziurtagiria lortu duen higiezinaren jabeak emaitza onuragarriak ere eskura ditzakeela.

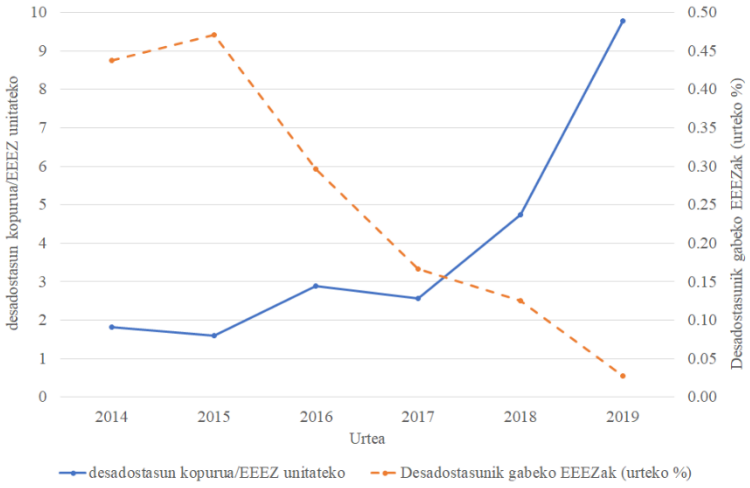
3.2. Desbiderapenaren joera gorakorra

Hurrengo bi irudiei erreparatuz gero, nabarmentzekoa da, desbiderapenaren azken urteetako joera gorakorra. Igoera nabariena azken hiru urteetakoa izan bada ere, 2015ean azaltzen dira daturik hoberenak eta azken urtean okerrenak. Batezbesteko errore absolutuak (4. irudia), errore absolutu osoak (4. irudia) eta batezbesteko desadostasun kopuruak EEZ bakoitzeko (5.irudia) gorako joera izan duten bitartean, behera egiten duen datu bakarra desadostasunik aurkitu ez den EEZen ehunekoarena da.

4. irudia. Errore absolutuaren joera urtez urte.



5. irudia. Desadostasunen joera urtez urte.



Hasiera batean, EEZa egileek urteekin esperientzia gehiago dutela eta gero eta akats gutxiago azaldu beharko luketela pentsa badaiteke ere, beste hainbat arrazoi egon daitezke joera honen atzean.

2017tik aurrerako igoera, urte honetan ematen diren 3 aldaketa garrantzitsurekin bat dator:

- Eraikuntza kodean (CTE DBHE) aldaketa. Momentu honetatik aurrera instalakuntza mota gehiago azaltzen dira eraikuntza berrietan; fluxu bikoitzeko aireztapen sistemak eta ur-bero sistemetan estaldura berriztagarri minimoa lortzeko eguzki panel termikoen sistema alternatiboak ugariagoak dira.
- EEZen kalkulurako softwareen eguneraketa eta berritzeak.

- Beharrezkoa jotzen den kasuetan, eraikinen itxituren prestazio termikoak egiaztatzeko 2017 arte erabili ez den entsegua ((International Organisation for Standardization, 2014) egiten hasi ginen.

Azkenik, beste arrazoi bat egon daiteke. Kontrola gauzatzen duten *Eraikinen Kalitate Kontrolerako Laborategiko* teknikoen ezagutza eta esperientzia zabalduz joan da urte horietan zehar eta horrekin batera, baita akatsak identifikatzeko gaitasuna ere. Horregatik, exijentzia maila hazi egin ahal izan da. Hori, hein batean, kalkuluetan erabilitako datuak, zein kalkulu horien irteera datuak ebaluatzeko irizpide objektiboak ez daudelako da. Europar Batasunak gomendatzen badu ere, Portugaleko (MINISTRY OF ENVIRONMENT, 2015) sisteman bakarrik aurkitu dira sarrera datuak ebaluatzeko irizpideak. Eta estatu edo lurralde gutxi batzuk ezarri dituzte tolerantzia irizpideak EEZa emaitzak ontzat eman ala ez erabaki ahal izateko (Moseley and Lacourt, 2019; Sutherland et al., 2015).

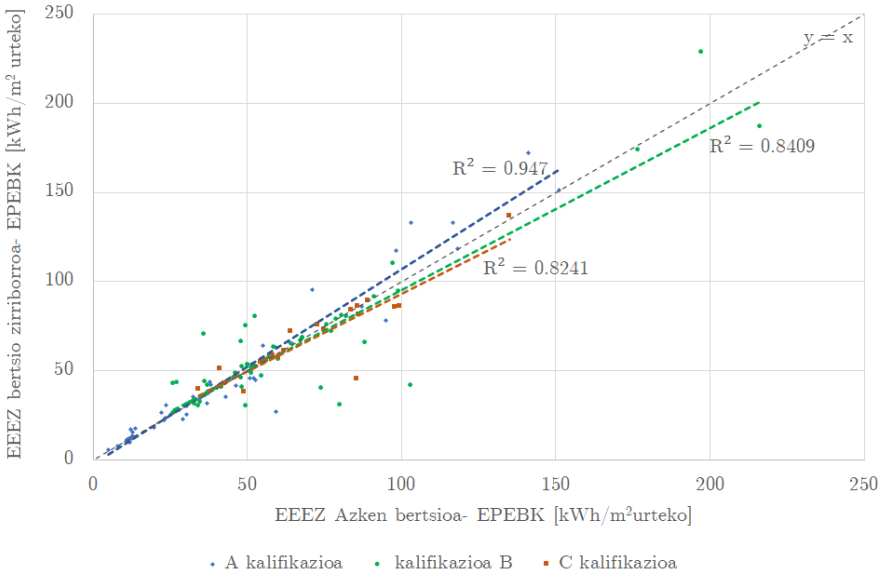
3.3. Zenbat eta eraginkortasun energetiko handiagoa, orduan eta desbiderapen txikiagoa eta kontserbadoreagoa.

EAEn kontrola pasatzeko derrigortasuna EEZaren kalifikazioaren araberakoa da; EPEBKn oinarrituta A, B edo C kalifikazioa duen edozein EEZak kanpo kontrola gainditu behar du. Publikatu diren datuen arabera (EEE- Energiaren Euskal Erakundea, 2019, 2018, 2017, 2016, 2015, 2014) kalifikazio horiekin erregistratutako EEZak %1.3 dira 2014-2019 artean, beraz, ehuneko hori kontrolatu dela estimatzen da.

Irizpide hori dela eta, gure lagineko EEZ guztiak, zirriborro bertsioan, A, B edo C kalifikaziokoak dira: 53 (A); 72 (B); 21 (C). Atal honetan kalifikazio bakoitzeko azpi- laginaren desbiderapena aztertu da, eraikinaren efizientzia maila eta desbiderapenaren artean erlaziorik badagoen aztertu ahal izateko.

Azpi- lagin bakoitzaren EPEBKn errore erlatiboaren batezbesteko koadratikoa kontuan hartzen badugu, A kalifikazioan (%15.7) 6-7 puntu txikiagoa da B (%22.8) eta C (%21.7) kalifikazioetan baino. Horretaz gainera, 6.irudian ikus daitekeen bezala, A kalifikazioan egiten diren akatsak kontserbadoreak edo positiboak izateko joera dute. Hau da, zirriborroan aurkeztutako EPEBK datuak okerragoak dira, EEZ zuzendu ondoren lortutakoak baino. B eta C kalifikazioen azpi- laginetan aurkakoa gertatzen da.

6 irudia. EEZaren zirriborro bertsioa eta azken bertsioaren EPEBK datuen korrelazioa.



Beraz, esan daiteke efizientzia maila altuena duten eraikinetan akatsak gutxiagoak edo eragin txikiagoa dutenak egoteaz gain, akats horiek ez direla aurrez pentsatuta tranpa egiteko asmoz egin, hau da, emaitza kontserbadoreenak aurkezten dituztela.

Emaitza guztiak aztertu ondoren, ondorio nagusi bezala esan genezake, beharrezkoa dela EEZen kalitatea kontrolatzen jarraitzea; desbiderapen positiboak negatiboekin konpentsatzen diren arren, akats absolutua handia da. Horri azken urteetako goranzko joera gehitzen badiogu, ez dago zalantzarik ezin dela eten EEZen kontrola, egoerak okerrera egin baitu eta gainera aldakorra baita. Ez hori bakarrik, EEZen datu base osoaren akatsa gutxitu nahi bada, aldaketak egin beharko dira, adibidez kontrolatzen diren EEZen aukeraketa kriterioan, gaur egun desbiderapen txikiena dutenak kontrolatu eta zuzentzen baitira.

4. Etorkizunerako planteatutako norabidea

Lan honetan azaldu diren ondorioak laginaren azterketaren emaitza eta ondorio batzuk bakarrik dira. Etorkizunean, azterketa hau zabaldu egingo da desbiderapena azpi- laginetan ikertuz eta eskatzen diren zuzenketak ikertuz; zergatik, noiz, zenbateko eragina duten,… sistemaren hutsuneak eta potentzialak identifikatzen jarraitzeko helburuarekin. Behin hori amaituta, aurkitutako hutsuneei irtenbidea emateko proposamenak aztertuko dira.

5. Erreferentziak

Arcipowska, A., Anagnostopoulos, F., Mariottini, F., Kunkel, S., 2014. Energy Performance Certificates Across the EU. A mapping of National Approaches.

de Lorenzo Urien, A., Flores, I., Hidalgo, J.M., 2015. PROTOCOLO PARA LA REALIZACIÓN DEL CONTROL DE LA CERTIFICACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS EN LA COMUNIDAD AUTONOMA DEL PAIS VASCO [WWW Document]. URL https://www.euskadi.eus/contenidos/informacion/area_termica_public/es_def/adjuntos/protocolo_externo.pdf (accessed 3.12.21).

Departamento de Desarrollo Económico e Infraestructuras, G.V., 2019. Decreto 25/2019, Boletín Oficial del País Vasco. https://doi.org/10.2307/j.ctvr33c04.3

Durier, F., Geissler, S., Wouters, P., 2017. Source book for improved compliance of Energy Performance Certificates (EPCs) of buildings, QUALICHeCK.

EEE- Energiaren Euskal Erakundea, 2019. Urteko txostena 2019 1–52.

EEE- Energiaren Euskal Erakundea, 2018. Urteko txostena 2018.

EEE- Energiaren Euskal Erakundea, 2017. Urteko txostena 2017 1–44.

EEE- Energiaren Euskal Erakundea, 2016. Urteko txostena 2016.

EEE- Energiaren Euskal Erakundea, 2015. Urteko txostena 2015.

EEE- Energiaren Euskal Erakundea, 2014. Urteko txostena 2014. Bilbo.

Environment Territorial Planning and Housing Department, B.C., 2020. Order of July 8, 2020: Aid program for the efficient rehabilitation of dwellings and buildings (Integral Renove program), Call 2020, Boletín Oficial del País Vasco.

European Commission, 2018. DIRECTIVE (EU) 2018/844 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 30 May 2018, Official Journal of the European Union. Official Journal of the Eiuropean Union. https://doi.org/10.1007/3-540-47891-4_10

European Commission, 2010. Directive 2010/31/EU of the european parliament and of the council of 19 may 2010 on the energy performance of buildings, Official Journal of the European Union. https://doi.org/doi:10.3000/17252555.L_2010.153.eng

Fabbri, K., Marinosci, C., 2018. EPBD independent control system for energy performance certification: The Emilia-Romagna Region (Italy) pioneering experience. Energy 165, 563–576. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.009

Hardy, A., Glew, D., 2019. An analysis of errors in the Energy Performance certificate database. Energy Policy 129, 1168–1178. https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2019.03.022

Hårsman, B., Daghbashyan, Z., Chaudhary, P., 2016. On the quality and impact of residential energy performance certificates. Energy and Buildings 133, 711–723. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2016.10.033

International Organisation for Standardization, 2014. ISO 9869-1:2014. Thermal insulation — Building elements — In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance- Thermal insulation — Building elements — In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance — Part 1: Heat flow. Switzerland.

Las-Heras-Casas, J., López-Ochoa, L.M., López-González, L.M., Paredes-Sánchez, J.P., 2018. A tool for verifying energy performance certificates and improving the knowledge of the residential sector: A case study of the Autonomous Community of Aragón (Spain). Sustainable Cities and Society 41, 62–72. https://doi.org/10.1016/J.SCS.2018.05.016

Li, Y., Kubicki, S., Guerriero, A., Rezgui, Y., 2019. Review of building energy performance certification schemes towards future improvement. Renewable and Sustainable Energy Reviews 113. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109244

Loncour, X., Roelens, W., 2015. Quality control schemes make the EPCs more reliable.

López-González, L.M., López-Ochoa, L.M., Las-Heras-Casas, J., García-Lozano, C., 2016. Update of energy performance certificates in the residential sector and scenarios that consider the impact of automation, control and management systems: A case study of La Rioja. Applied Energy 178, 308–322. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.028

Ministry of Energy, 2017. PAREER II. Announcement of the aid program for energy rehabilitation actions of existing buildings, State Official Bulletín. Boletín Oficial del Estado, España.

MINISTRY OF ENVIRONMENT, L.P.A.E., 2015. Order num7113/2015. Selection criteria for verification of the quality of processes and methodologies for verification of the quality of certification processes carried out by the technicians of the System for Energy Certification of Buildings (SCE), in particular the Qualified Experts, Nº124. Official Gazette, Portugal.

Molina, J.L., Álvarez, S., Salmerón, J.M., 2017. " Status on the ground " Spain, Different data/tools for getting EPC. New field study, 2016.

Moseley, P., Lacourt, A., 2019. Implementing the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD). Country Reports. Copenhagen.

Pasichnyi, O., Wallin, J., Levihn, F., Shahrokni, H., Kordas, O., 2019. Energy performance certificates — New opportunities for data-enabled urban energy policy instruments? Energy Policy 127, 486–499. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.11.051

Rey Martínez, F.J., Velasco Gómez, E., Rey Hernández, J.M., 2018. Energy Efficiency of Buildings - Energy Certification, 1ª. ed. Ediciones Paraninfo, SA, Madrid.

Sutherland, G., Garcia Audi, P., Lacourt, A., Poseidon, K., McElmuray, P., Skrivanou, M., Koutsou, S., Frances Davis, M., Fytrou, A., Tsagkla, M., 2015. Implementing the Energy Performance of Building Directive (EPBD), ADENE 2015. ed. Lisbon.

6. Eskerrak eta oharrak

Lan hau posible izan da Eraikinen Kalitate Kontrolerako Laborategiko Termika Arloa kudeatu eta garatzeko Eusko Jaurlaritzak eta ENEDI ikerketa taldeak duten hitzarmenari esker.

Twitterreko Euskal Komunitatearen Eduki Azterketa Pandemia Garaian

Fernandez de Landa, J., García, I., Salaberria, A., Campos, J.A.

HiTZ Zentroa - Ixa, Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU). 20018 Donostia, Euskal Herria.

joseba.fernandezdelanda@ehu.eus

Laburpena

Hizkuntzaren Prozesamenduak eskaintzen dituen teknika ez-gainbegiratuak erabiliz Twittereko euskal komunitatean COVID-19aren pandemiak izan duen eragina aztertzea da lan honen asmoa. Azterketa hau aurrera eramateko sare sozial horretako erabiltzaileen euskarazko txioak masiboki bildu eta denboraren arabera ordenatu dira. Pandemiaren eragina neurtzeko, denboraren arabera edukia nola aldatu den aztertu da, horretarako testuetan azaltzen diren hitz zein emojien aldaketa kuantitatibo zein kualitatiboak baliatu dira. Azterketa kuantitatiboan, terminoek garai desberdinetan izan duten maiztasunaren aldaketari erreparatu zaio, maiztasunen erregresio lineala erabiliz. Azterketa kualitatiboan, hitzen bektore trinkoak baliatu dira, pandemiaren garai desberdinetan hitz eta emoji adierazgarrienek esanahian izan duten bilakaera aztertzeko.

Hitz gakoak: Twitter, euskara, Covid-19

Abstract

The aim of this work is to study the impact of the COVID-19 pandemic on the Basque Twitter community using unsupervised techniques based on Natural Language Processing. In order to carry out this study, large quantities of tweets were gathered and sorted by time from Basque Twitter users. To analyze the impact of the pandemic, the variability of the content over time has been studied, through quantitative and qualitative changes in the words and emojis that appear in the texts. In the quantitative analysis, the shift at the frequency of the terms was calculated using linear regression over frequencies. In the qualitative analysis, Word Embeddings were used to study the changes in the meaning of the most significant words and emojis at different times during the pandemic.

Keywords: *Twitter, Basque language, Covid-19*

1. Sarrera eta motibazioa

COVID-19aren ondorioz eman den osasun krisialdi globalak eragin handia izan du gizartearen arlo guztietan. Eragin hau aztertzeko metodologia desberdinak aurkeztu dira pandemia garaian, birusaren kutsakortasun mailaren analisi estatistikoa izan delarik usuena. Azterketa guzti hauek birusaren joera ulertzeko oso baliagarriak diren arren, ez dira eraginkorrak COVID-19ak suposatu duen aldaketa soziala ulertzeko.

Azken urteotan sare sozialak gizartearen ispilu bilakatu dira hauen erabilera asko handitu delarik birusari aurre egiteko proposatu diren osasun neurrien ondorioz (Chakraborty *et al.*, 2020). Honetaz gain, datu masiboak prozesatzeko gaitasuna inoiz baina handiago da gaur egun. Orain dela urte gutxi batzuk egingaitzak ziren gauza asko egingarri bilakatu dira *hardware* atalean eman diren aurrerapen teknologikoen ondorioz (Micikevicius *et al.*, 2018). Honekin batera, sare neuronaletan oinarritutako teknikei esker *word embedding* bezala ezagutzen diren hitzen errepresentazio aberatsak lortzeko gaitasuna asko garatu da (Mikolov *et al.*, 2013; Devlin *et al.*, 2019). Hortaz, *Twitter* bezalako sare sozial batean ematen diren elkarrizketa publikoak monitorizatzeak gizarteak gertaera desberdinen aurrean dituen iritziak neurtzeko aukera ezin hobea eskaintzen du. Honetaz gain, aldaketa ugariko garaitan sare sozialen esangura oraindik gehiago nabarmentzen da eta oso erabilgarriak direla erakutsi dute aurretik eman diren beste fenomeno eta ekintza batzuk izan dituzten eragin sozialak aztertzeko (Buntain *et al.*, 2016; Wang eta Zhuang, 2017).

Artikulu honetan, Twitter sare sozialak eskaintzen duen informazioaren bitartez euskal komunitateak COVID-19aren pandemiaren aurrean izan duen erantzuna aztertu nahi dugu, honela pandemiak euskal gizartean izan duen

eragina hobeto ulertu ahal izateko. Azterketa hau aurrera eramateko, 2019ko irailetik 2021eko otsaila arte, Twittereko euskal komunitateak egindako txioak jaso eta aztertu ditugu Hizkuntzaren Prozesamenduko teknika desberdinak erabiliz. Pandemiak garai desberdin ugari izan dituenez: konfinamendua, alarma egoera, normalitate berria... jasotako txioak multzo desberdinetan banatu ditugu gertaera desberdinek izan duten eragina zehatzago aztertu ahal izateko. Analisi honetan, termino adierazgarriek pandemian zehar izan duten aldakortasuna aztertzen dugu hauen testuinguruekin batera.

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

COVID-19aren pandemia hasi zenetik artikulu asko argitaratu dira *Twitter* sare sozialeko jarduera monitorizatzen dutenak. Orokorrean monitorizazio hau komunitate edo herrialde zehatzetan finkatu da (Ordun *et al.*, 2020; Lyu *et al.*, 2020), nahiz eta gaiari buruzko desinformazioa modu globalean aztertu dutenak ere egon diren (Chen *et al.*, 2020; Shahi *et al.*, 2021). Sare sozialetan dagoen testu ez egituratua prozesatzeko Hizkuntzaren Prozesamenduko teknika desberdinak erabiltzen dira. Ordun *et al.* (2020) lanean teknika ez gainbegiratuak erabiltzeko proposamena egiten dute. COVIDaren inguruan tratatu diren gai desberdinak nabarmentzeko *Topic-Modeling* teknika erabiltzen dute LDA algoritmoa aplikatuz (Blei *et al.*, 2003). Ondoren antzeman dituzten gai hauek modu bisualean errepresentatzeko UMAP (McInnes *et al.*, 2018) dimentsio txikiagotze teknika erabiltzen dute. Horrez gain, euskarazko Twitter komunitatearen gaineko eduki analisiak burutu dira ere, *Topic-Modeling* bitarteko eduki analisia zein interakzioen analisia eginez (Fernandez de Landa *et al.*, 2019).

Badaude beste lan batzuk teknika gainbegiratuak erabiltzen dituztenak sare sozialetako edukia aztertzeko (Chen *et al.*, 2020; Shahi *et al.*, 2021; Müller *et al.*, 2020). Sailkapen algoritmo gainbegiratuak entrenatu ahal izateko aurretiko eskuzko lana beharrezkoa da, hau da, pertsona aditu batek adibide desberdinak etiketatu beharko ditu, ondoren ikasketa automatikoko algoritmoak hauen gainean aplikatu ahal izateko. Algoritmo ugari daude modu gainbegiratuan lan egiten dutenak baina azkenaldian erabilienak aurretik entrenatuak izan diren hizkuntza eredu erraldoien berfintzean oinarritzen dira. Hau da hain zuzen ere Müller *et al.* (2020) lanean proposatzen dutena, bertan, COVIDaren inguruko txioetara BERT (Devlin *et al.*, 2019) hizkuntza eredua egokitzen dute, 5 sailkapen ataza desberdinetan hobekuntza nabarmena erakutsiz.

Hortaz, lan honen helburua, Hizkuntzaren Prozesamenduak eskaintzen dituen teknika ez-gainbegiratuak erabiliz Twittereko euskal komunitatean COVID-19aren pandemiak izan duen eragina aztertzea da. Azterketa hau aurrera eramateko sare sozial horretako erabiltzaileen euskarazko txioak masiboki bildu eta denboraren arabera ordenatu dira. Pandemiaren eragina aztertzeko, denboraren arabera edukia nola aldatu den aztertu da, horretarako testuetan azaltzen diren hitz eta emojien aldaketa kuantitatibo zein kualitatiboak baliatuz. Azterketa kuantitatiboan, aldakortasunaren erakusletzat terminoek garai desberdinetan izan duten maiztasunaren aldaketa erabili da, maiztasunen erregresio linealaren malden balioak erabiliz. Azterketa kualitatiboan, hitzen esanahia hauen testuinguruak zehazten duela premisa bezala hartuz, pandemiaren garai desberdinetan hitz eta emoji adierazgarrienek esanahian izan duten bilakaera aztertu da hitz bektore trinkoak erabiliz.

3. Ikerketaren muina

Twitter sare sozialean aritzen den euskal komunitatea ikertzeko, bertatik datuak erauzi dira. Sare sozial honek euskarazko komunitate aktiboa dauka eta bertatik testuan oinarritutako datu kantitate erraldoiak lortu daitezke. Era honetan datuen bilketa eta analisia nola egin den azalduko da. Lehenengo zatian datuen bilketaren nondik norakoak azalduko dira, bilketa denboraren arabera nola antolatu den eta zenbat txio lortu diren. Datuak lortuta, hauen gaineko analisia nola egin den azalduko da, informaziotik jakintza nola atera dugun azalduz. Horretarako bi teknika erabili dira, bata kuantitatiboa edo hitzen maiztasunean oinarritua eta, bestea, kualitatiboa edo hitzen esanahian oinarritua.

3.1. Datuen erauzketa

Gizartea aztertu eta bertan ematen diren dinamika latenteak identifikatzeko asmoarekin datu iturri oparotzat jotzen dugu Twitter sare soziala. Euskal komunitatea bezalako komunitate txikien azterketarako ere datu kopuru masiboak eskaintzen baitigu sare sozial honek. Gizartearen isla zehatza izateko definitzen den lagin orok bere errore tartea daukan moduan, datuak biltzeko modu honek ere mugak edukiko ditu, datu bilketa Twitterreko erabiltzaileak diren pertsonetara mugatzen baita. Hala ere, bertan identifikatzen diren erabiltzaile guztietatik datuak denbora errealean masiboki erauzteko aukera ematen du, datu kantitate erraldoiak batuz. Era honetan, 10,000 euskal erabiltzaile

baino gehiago identifikatu dira, hauetatik 4M txio pertsonal eta 4M birtxio lortuz. Datuak 2021. urteko otsailean lortu ziren Twitterreko API publikoa baliatuz.

Bildutako datuak 5 garai ezberdinen arabera zatitu dira, denboraren araberako eduki azterketa bat ahalbidetzeko asmoz. 1. taulan ikusi daitekeen moduan zatiketa bakoitza momentu deigarri batzuekin identifikatu da, garai tematiko horien edukia aztertzea helburu izanik. Gainera, momentu tematiko bakoitzaren hasiera eta bukaera datak zein txio eta birtxio kopuruak ikusi daitezke. Lehenik eta behin, 0. momentu bat finkatu da, pandemiaren aurreko garaiaren datuak edukitzera bidean, 2020 baino lehenagoko datuak hartuz. 1. momentuan 2020 urtea hasi eta konfinamendua arteko garaiak hartuko du. 2. momentua etxean konfinatuta egoteko aginduak iraun bitarteko garaiak hartuko du, momentu zentral hau garrantzitsuena kontsideratuko da. 3. momentuak konfinamendua amaitu eta bigarren alarma egoera arteko garaiak hartuko du, normalitate berri bezala definitu da momentu hau. Azkenik, 4. momentuak bigarren alarma egoeratik datuen erauzketa arteko momentua hartu du, 2021eko Otsailean.

Momentua	Hasiera data	Bukaera data	Txio pertsonalak	Birtxioak (RT)
0. 2020 aurretik	2019/09/01	2019/12/31	224.169	275.042
1. Konfinamendu aurretik	2020/01/01	2020/03/14	155.302	196.500
2. Konfinamendua	2020/03/15	2020/06/21	296.627	349.368
3. Normalitate berria	2020/06/22	2020/10/24	343.372	362.279
4. Bigarren alarma egoera	2020/10/25	2021/01/31	415.388	347.533

1. Taula: Erauzitako euskarazko txioen antolaketa denboraren arabera.

3.2. Datuen analisia

Datuen analisirako txio pertsonal eta birtxioak kontutan hartzea erabaki da, erabiltzaile bakoitzak denbora lerroan publiko egiten duen edukiaren parte baitira bi elementu hauek. Era honetan, norberaren txioen zein konpartitzen diren txioen (birtxioak) testuetan oinarritu da ikerketa hau. Testuaren osagarri nagusia diren hitzez gain emojiak ere kontutan hartu dira, bestelako hitzen antzera esanahia duten karaktere edota karaktere multzoak baitira. Geroz eta ohikoagoak bilakatzen ari diren emoji hauek ez dira hiztegiko definizio zehatza duten hitzak, baina agertzen diren testuinguruari esker beren esanahia ezagutu daiteke. Horregatik, Twitterreko euskal komunitatearen baitan pandemiak eragindako eraginak aztertzeko terminoei so egin zaie, hauen erabileran zentratuz. Denboraren arabera terminoen erabilera nola aldatu den erakutsiko da, aldaketa hauetan pandemiaren eraginera aztertuz aldi berean.

Erabiltzaileen adierazpenetan gertatutako aldaketak neurtzeko, terminoen erabilera maiztasun zein esanahian izan diren aldaketak kontutan hartu dira. Fokua bi aspektu horietan jarriz, analisi kuantitatibo eta kualitatiboa jorratu dira, erabilera kantitateak eta erabilera moduak aztertzeko teknika bezala aurkeztuz. Alde batetik, terminoen maiztasunak momentuen arabera nola aldatu diren aztertu da, pandemia garaian aurrera joan ahala garrantzi gehien hartu duten terminoak zein garrantzi gehien galdu dutenak jasoz. Beste alde batetik, termino zehatzek denboraren arabera izan dituzten aldaketa semantikoak ere aztertu dira, pandemiak esanahietan eduki duen eragina erakutsiz.

3.2.1. Metodo kuantitatiboa: terminoen maiztasunaren aldaketa denboran zehar

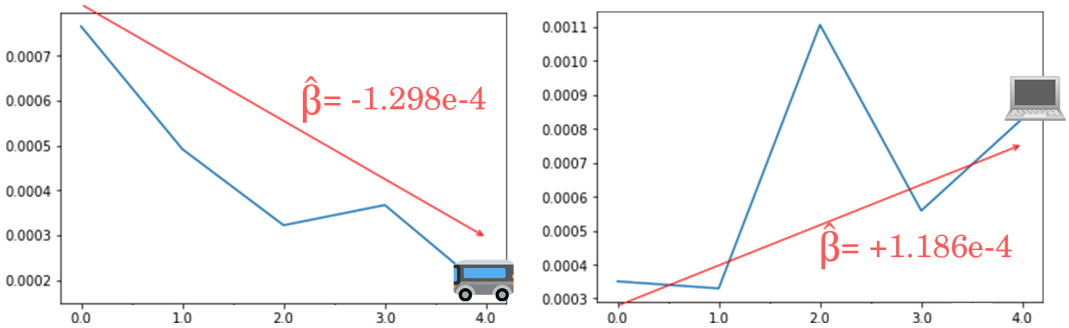
Terminoen erabilera maiztasunaren aldakortasunean oinarritutako metodo kuantitatibo honekin, Twitterreko euskal komunitateak adierazteko erabili dituen terminoen azterketa egin nahi da: pandemiaren eraginez zein termino hasi den gehiago erabiltzen eta zein termino gutxiago. Horrela, denboran zehar terminoen erabilera maiztasuna nola aldatu den ezagutzeko asmoarekin, termino guztien maiztasunen erregresio linealeak kalkulatu dira. Horrekin batera, erregresio linealeko balio horiek ordenatu eta balio altuenak zein baxuenak hartuko dira, erabileran igoera eta jaitsiera identifikatzeko modu bezala.

Lehen pausu modura, termino guztiak lematizatu dira IXA pipes (Agerri *et al.*, 2014) erabilita, euskararen aberastasun morfologikoa sinplifikatzeko asmoarekin. Terminoen lematizazioa burutu ostean, 1. ekuazioan ikus daitekeen bezala, termino bakoitzaren maiztasuna kalkulatzen da zehaztu dugun pandemiaren momentu bakoitzerako. Termino bakoitzeko 5 maiztasun ezberdin edukiko genituzke, maiztasun balio bat momentu bakoitzeko. Terminoaren joera kalkulatzeko, 2. ekuazioko erregresio linealeko sistema ebatzi da, termino bakoitzaren momentu ezberdinetako maiztasunen balioetan oinarrituz. Ekuazio honetan, $x_0..x_N$ balioek denbora errepresentatzen dute, $y_0..y_N$ balioek tarte bakoitzean termino bakoitzak duen maiztasuna eta N tarte kopuru totala da. Horrela, termino bakoitzaren erregresio lineal maldaren balioa ($\widehat{\beta}$) izango da termino horren joeraren erakuslea.

$$y = \frac{\textit{Zenbat txioetan azaltzen da terminoa}}{\textit{Txio kopuru totala}} \quad (1)$$

$$\widehat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

Malda edo joeran ($\widehat{\beta}$) balio positiboak erabileran gora egin duela adieraziko du, balio negatiboak erabileran behera egin duela adieraziko duen bitartean. 1. irudian adibide gisa ikusi daitezke ordenagailu (💻) eta autobusaren (🚌) emojien joera. Momentu bakoitzean (ardatz horizontala) duten maiztasun balioen (ardatz bertikala) erregresio linealaren maldaren balioari esker ($\widehat{\beta}$), ordenagailua (💻) emojiaren erabilera handitu eta autubusaren (🚌) emojiaren erabilera txikitu dela erakutsi daiteke.



1. Irudia: Ordenagailu (💻) eta autobusaren (🚌) emojien joeraren kalkulua

Hortaz, corpusean azaldu diren termino guztiak beren joeraren arabera ordenatu dira ranking batean. Ranking honetatik, goranzko joera altuena duten 10 terminoak, zein, beranzko joera altuena duten 10 terminoak hartu dira, gehien hazi eta murriztu diren terminoak lortuz hurrenez hurren. Terminoen joeren aldakortasunaren emaitzak 2. taulan ikusi daitezke, gehien hasi direnak eta gehien murriztu direnak jasoz.

Terminoa	Joera
covid	7,31
neurri	6,82
osasun	6,17
pandemia	6,13
txerto	5,02
positibo	3,77
online	3,44
kasu	3,20
zaindu	3,07
konfinamendu	2,80
birus	2,79
krisi	2,78
ostalaritza	2,75
#covid19	2,70
maskara	2,60

(a) Aldakortasun positibo handiena.

Terminoa	Joera
aurkezpen	-4,60
greba	-4,43
feminista	-4,42
jardunaldi	-4,23
altsasu	-4,14
antolatu	-3,83
pentsio	-3,80
hitzaldi	-3,48
emakume	-3,22
elkartasun	-3,20
katalunia	-3,16
areto	-3,11
aurkeztu	-3,11
egitarau	-3,09
manifestazio	-2,79

(b) Aldakortasun negatibo handiena.

2. Taula: Hitzen erabileraren aldakortasuna denboraren arabera.

Erabileran gora egin duten terminoak 2a taulan ikusi daitezke, hauetako batzuk pandemiarekin zuzenean erlazionatuta egonik (covid, neurri, osasun, pandemia, txerto, positibo, kasu, zaindu, birus, #covid19) edo honen albo-eraginekin (online, konfinamendu, krisi, ostalaritza, maskara). Azpimarratu beharra dago, hitzen maiztasunaren aldakortasunean joera positibo handiena izan duten termino gehienak zuzeneko erlazioa dutela pandemiaren

gaiekin. Horrek argi erakusten du pandemiaren eragina handia izan dela euskarazko Twitter komunitatean. Gainera, osasunarekin erlazionatutako terminoez gain, albo eraginekin erlazionatutako terminoak dauzkagu: online, konfinamendu, krisi, ostalaritza, maskara. Albo eragin hauek gizartearen iruditeri kolektiboan utzitako arrastoak ikusi daitezke hitz hauetan: online moduen areagotzea komunikazioan, ostalaritzan murrizketa modu eta ordutegietan, maskararen erabilera egunerokotasunean... Krisi hitzaren maiztasunaren gorakada ere adierazgarritzat jo daiteke, egoera bera definitzeko baliatu baitute hitza.

Bestalde, erabilera maiztasunean jaitsiera nabarmenena izan duten terminoak 2b taulan ikusi daitezke, honakoan terminoek gai politikoekin (greba, feminista, Altsasu, pentsio, emakume, elkartasun, Katalunia, manifestazio) zein ekimen kolektiboekin (aurkezpen, jardunaldi, antolatu, hitzaldi) erlazionatuta daudelarik. Hortaz, Twitter sare sozialean ohikoak ziren gai politikoen beherakada nabarmena izan dela baiezta daiteke. Feminismoa (feminista, emakume), ekonomia (greba, pentsio) eta bestelako gaiek (Katalunia, Altsasu) euskal komunitatearen baitan garrantzia galdu dutela ikusi daiteke, fokoa tokiz aldatu dela erakutsiz. Era berean, ekintza politikoarekin edo aldarrikapenarekin zerikusia daukaten praktikek ere zeresana galdu dutela ematen du. Teoria zein praktika politikoaren garrantzi galera nabarmena erakusten du honek, batez ere aldarrikapen politikoarekin guztiz loturiko sare sozial batean.

Laburbilduz, deigarria da plano ideologikoan indartsuak diren zenbait kontzeptuen erabilera txikitu dela, osasuna bezalako kontzeptuek zentraltasuna lortu duten bitartean. Era berean, maiztasuna handitu duten zenbait hitz egunerokotasunean zehar ematen diren praktikekin erlazionatuta daude, abstrakziotik errealitate hurbilera igaroz. Are gehiago, eguneroko bizitzaren arauketarekin erlazionatuta dauden hainbat terminoen maiztasuna areagotu da: maskarila eramateko beharra, tabernetan egoteko baimen edo harremantzeko moduak, distantziara komunikatzeko era edota etxean itxita egotearen agindua. Esan daiteke biopolitikarekin (Foucault, 2009) edo gizakiaren egunerokotasuneko ekintzen gaineko arautzearekin erlazionatutako gaietara igaro dela fokua. Hots, gai orokorretan zentratzetik, egunerokotasunean eragina daukaten ekintzetan gehiago zentratzera igaro da euskarazko Twitterreko komunitatea.

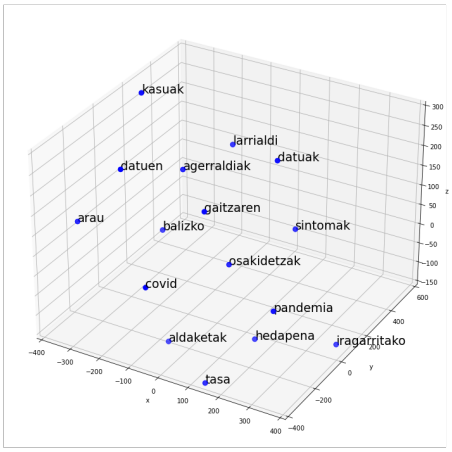
3.2.2. Metodo kualitatiboa: terminoen esanahiaren aldakortasuna denboran zehar

Azterketa kualitatiboaren asmoa, terminoen esanahiaren aldaketa denboran zehar nola eman den aztertzea da. Hitzek esanahia aldatzen dute gizartearen beharren arabera, hizkuntza egoera zehatzetara moldatuz. Pandemiaren garaietan aldaketak, egon badira, nola eman diren ezagutzeko, hitzen testuinguruan oinarritutako mapaketa bektorialak erabiliko dira. Testuinguruan oinarritutako mapaketa hauek, terminoen esanahi semantikoa mantentzeko kapazak dira, hitz baten ezaugarriak beren ingurukoek definitzen dituelako (Firth, 1957). Honi esker, emojiek daukaten esanahi atxikia ezagutzeko parada edukiko da ere, hauek ere testuingurua baitaukate. Asmoa, momentu bakoitzeko eredu bat sortzea da, terminoen ezaugarriak denboraren arabera moldatu diren edo ez ikusi eta aztertzeko.

Hitzen zein emojien esanahia ezagutzeko, word2vec (Mikolov *et al.*, 2013) teknika erabili da, hitz eta emojien erlazioak erakutsiko dituen mapaketa bektorial bat osatzeko. Teknika honekin, terminoen irudikapen bektorial trinkoak lortzen dira, terminoak espazio bektorial berdinean kokatuz testuinguruaren arabera. Irudikapen bektorialari esker semantikoki antzekoak diren terminoak lortu daitezke, antzeko terminoek antzeko irudikapen bektoriala baitute (Harris, 1954). Era horretan, termino bakoitzaren antzeko bektoreak ezagututa antzekoak diren hitzak ezagutu daitezke, hots, antzeko esanahia duten hitzak lortuko dira. Termino bakoitzaren inguruko hitzek honen esanahia zein den erakutsiko dutenez, hitzen esanahia definitzeari ekingo zaio momentu bakoitzeko. Momentu bakoitzean termino baten antzeko hitzak zeintzuk diren jasoko dira, horrek aldaketak egon diren edo ez aztertzeko aukera emango du.

Hitzen esanahia denboraren arabera nola moldatu den ezagutzeko asmoarekin, 5 momentu ezberdinetarako hitzen bektore irudikapen bana lortu da. Hauetako bakoitzak, momentuaren araberako ezaugarri semantikoak batuko ditu, irudikapen independienteak sortuz. Irudikapen dentso bakoitza sortzeko, 5 token edo hitzeko leihoa erabili da hitzen ezaugarriak 100 dimentsiotan kontzentratuz (window_size=5, 100 dimentsio). Horrela, terminoen irudikapen bektorial trinkoen 5 eredu ezberdin lortu dira, momentu bakoitzeko terminoak dagozkien esparru bektorialean kokatuz testuinguruaren arabera. Teknika honekin lortutako emaitzen adibide bat 2. irudian ikusi daiteke, bertan *Covid* hitzaren eta semantikoki gertuen dauden 16 hitzen irudikapena erakusten da. Horrela, aukeratutako hitzarekin erlazionatutako hitzak lortzen dira, hauek 3. momentuan *Covid* hitzak hartzen duen esanahia definitzen lagunduko dute.

Azterketa kualitatibo hau egiteko, erabilera maiztasunean gorakada nabarmena eduki duten terminoen artean, esanahian aldaketa argiena izan dutenak aukeratu dira: positibo, kasu eta segurtasun. Maskaradun emojia (😷)



2. Irudia: *Covid* hitzetik gertuen dauden hitzak 3. momentuko bektore espazioan.

ere aukeratua izan da azterketa kualitatiborako, erabilera maiztasun aldaketa handienetakoa duten emojien artean kokatzen baita. Era honetan, aukeratutako terminoen gertuko hitzak lortu dira momentu bakoitzerako, horretarako terminoen irudikapen bektorial trinkoak erabiliz. Terminoaren aldaketak nola eman diren irudikatzeko, termino bakoitzaren momentu bakoitzeko termino antzekoak 3. taulan ikusi daitezke.

Terminoa		Erlazionatutako hitzak - Denboraren araberako esanahia
positibo	0.	teknika, zailtasun, kontzeptu, ikusmen, gertakizun
	1.	h5n8, arrazoia, egoiliarri, aktiboko, ontzat
	2.	kutsatu, koronabirus, kasu, pcr, infektatu
	3.	koronabirus, negatibo, kutsatu, positiboen, pcr
	4.	kutsatu, koronabirus, ospitaleratze, biztanleko, atzemandako
kasu	0.	afera, galdera, une, kontu, zentzu
	1.	oraingo, garai, mota, legegintzaldi, afera
	2.	positibo, koronabirus, kasuak, pcr, kutsatu
	3.	positibo, koronabirus, proba, kutsatu, test
	4.	positibo, kasuak, test, hildako, kutsatu
segurtasun	0.	sistemak, hondakinen, murrizteko, administrazio, legearen
	1.	prebentzio, kontrol, murrizteko, koronabirusak, kontrolatzeko
	2.	prebentzio, distantzia, higiene, errespetatu, beharrezko
	3.	prebentzio, higiene, zorrotz, neurriekin, protokolo
	4.	prebentzio, higiene, malgutu, ezarritako, mugikortasun
😷	0.	#kutsadura, albistegitan, #nipenanigloria, #bizitzaerdigunera, margaret
	1.	isurketa, filtro, argindar, tximinia, laino
	2.	saihesteko, besteekiko, musukoa, maskara, derrigorrezkoa
	3.	#maskarabeti, aforo, #euskotrenmetrobilbao, edukiera, hidroalkoholikoa
	4.	bidalketa, #htxonline, #getxo, #udalsarea2030, #amasavillabona

3. Taula: Terminoak eta euren esanahien azterketa denboraren arabera.

Positibo terminoa hitz desberdin askorekin erlazionatuta dago (*teknika, zailtasun, kontzeptu, h5n8, arrazoia...*) 0 eta 1 momentuetan. Bestalde, 2, 3 eta 4 momentuen artean *kutsatu* eta *koronabirus* terminoekin erlazio zuzena eta iraunkorra izatera igaro da, pandemiaren eragina agerian utziz. Termino honek erlazio zuzena du pandemiaren gaiekin, gaitzarekin kutsatu diren pertsonak definitzeko baliatua izan baita, pandemia aurreko esanahia guztiz irauliz.

Kasu terminoak, 0 eta 1 momentueatan *afera* zein *kontu* bezalako, hitzekin erlazioa dauka, horrez gain ere, denborarekin ere zerikusia duela ikusi da (*garai, une, oraingo*). Ostera, 2, 3 eta 4 momentuetan pandemiarekin

erlazionatutako hitzek hartzen dute tokia (*koronabirus, kasu, kutsatu*). Horrez gain, azpimarratzekoa da *positibo* hitza dela gertuen daukana, kasu positibo bigramaren agerpenaren eraginez ziurrenik. Gainera, *positibo* hitzarekin gertatu bezala, erlazio zuzena izan du pandemiaren gaiekin, honako honetan ere esanahia iraulia izan delarik.

Segurtasun hitza *legea*, *adminiztrazioa* edo *sistema* bezalako hitzekin batera kokatzen da 0. momentuan, estatuaren gestioarekin erlazionatutako terminoak. Aurrera egin ahala, 1. momentuan kontrolarekin erlazionatutako esanahia izatera igaro da (*kontrola, kontrolatzeko, murrizteko*), beti ere pandemiarekin erlazionatuta (*koronabirus*). Esan beharra dago, 2, 3 eta 4 momentuen artean terminoa oso lotuta egon dela *prebentzio* zein *higiene* terminoekin, norberaren gaineko kontrolarekin erlazionatuta, biopolitikarekin erlazio estua erakutsiz berriz ere.

⛑ emojiari erreparatuz, 0 eta 1 momentuetan emojia ingurumenaren kutsadurarekin erlazionatutako terminoekin batera azaltzen da (*#kutsadura, filtro, tximinia, isurketa, laino*...). Denboran aurrera egin ahala esanahia aldatzen doa 2 eta 3 momentuetan pandemiarekin zerikusi zuzena daukaten terminoen alboan azaltzen da (*aforo, edukiera, hidroalkoholiko*...) eta baita gaitzaren kutsadura ekiditeko musukoa eramateko beharrarekin (*sahiesteko, derrigorrezkoa, #maskarabeti*...) ere. Horrela, ikusi daiteke emojiaren ezaugarri semantikoak aldatu egin direla pandemian aurrera egin ahala, ingurumenaren kutsadura gaiekin erlazioa edukitzetik pandemiaren kutsatu eta gaiekin erlazioa izatera igarotzen baita.

Terminoen esanahien aldakortasunari begiratuz, aukeratutako terminoetan pandemiaren lorratza argia dela erakutsi da. *Positibo*, *kasu* eta ⛑ terminoak egoeraren adierazle ezin hobeak dira, pandemiaren inguruko kontakizunekin zuzenean erlazionatutako terminoak diren heinean, esanahian emandako aldaketa nabaria da. Bestalde, *segurtasun* bezalako terminoari so eginda, osasun egoerarekin baino egunerokotasuneko ekintzen arauketarekin zerikusi gehiago dauka, bizimoduan pandemiak duen eraginarekin erlazio zuzena erakutsiz. Termino hauek maiztasunean gora egiteaz gain, esanahien azterketari esker ikusi da terminoaren adiera ere pandemiari guztiz lotua dagoela, maiztasunaren gorakada pandemiarekin guztiz erlazionatuta dagoela frogatuz. Honekin, gizartearen imajinario kolektiboan pandemiak eragindako aldaketak erakutsi dira. Euskal erabiltzaileen idazteko moduan emandako aldaketa hauek, aldaketa sakonen erakusle izan daitezke, hitzei konnotazio berria emateraino ailegatuz.

4. Ondorioak

Hizkuntzaren Prozesamenduak eskaintzen dituen teknika ez-gainbegiratuak erabiliz Twittereko euskal komunitatean COVID-19aren pandemiak izan duen eragina aztertzea lortu da lan honetan. Azterketa hau aurrera eramateko sare sozial horretako erabiltzaileen euskarazko txioak masiboki bildu eta denboraren arabera ordenatu dira, hizkuntza gutxituen ingurune batean ere datu kantitate handiak lortuz. Pandemiaren eragina neurtzeko denboraren araberako edukien aldakortasunean zentratzea baliagarria dela frogatu da, testuetan azaltzen diren hitz zein emojien aldaketa kuantitatibo zein kualitatiboak horretan lagungarri direla erakutsiz. Azterketa kuantitatiboan, terminoek garai desberdinetan izan duten maiztasunaren aldaketa kontutan hartuz, pandemia garaiko termino nabarmenenak lortzeko teknika egokia izan dela ikusi da. Azterketa kualitatiboan, pandemiaren garai desberdinetan hitz eta emoji adierazgarrienen esanahiak hitzen bektore trinkoen bidez lortzea ahalbietu da, gizarte aldaketen nolakotasuna hitzen bidez erakustea lortuz.

Gizakion bizitzetan pandemiak hartu duen zentraltasunak, gizarte garaikidean inflexio puntu argi bat zehaztu du, iragana eta etorkizuna desberdinduz. Euskarazko Twitter komunitatean ere hala gertatu dela nabarmena da, hitzen maiztasunean emandako aldaketek zein esanahien aldakortasunak hala frogatu baitu. Horrela, gai politiko orokorretan zentratzetik, egunerokotasuneko ekintzen gaineko arautzearekin erlazionatutako gaietara igaro du fokua euskarazko Twitterreko komunitateak. Bestalde, hitzen esanahien aldakortasunak ere pandemiaren eragina islatu du, egoera honek hitzen esanahia aldatzeko adina indar izan duela erakutsiz.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Lehenik eta behin, datu bilketari esker lortu diren datu kopuru erraldoiekin eduki azterketa desberdinak egin daitezke, hala nola *Topic-Modeling*, interakzioetan oinarritutako azterketak... Horrez gain, lan honetan garatu den metodologiak, bestelako hizkuntza gutxituetan aplikatu daitezke. Datu bilketa zein analisiak hizkuntzarekiko independenteak izanda, aplikagarritasun erraza dauka aldaketa askorik egin gabe. Epe luzera begira, Twitterreko komunitatea eta euskal komunitatearen arteko loturak aztertzea izango da helburu garrantzitsuena, datu iturri kantitate handien laguntzaz, ikerketa soziala egiteko modu berri eta zehatzagoak proposatzeko.

6. Erreferentziak

Agerri, Rodrigo, Josu Bermudez, eta German Rigau. 2014. IXA pipeline: Efficient and Ready to Use Multilingual NLP tools. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Language Resources and Evaluation*, volume 2014, 3823–3828.

Blei, David M, Andrew Y Ng, eta Michael I Jordan. 2003. Latent dirichlet allocation. *the Journal of machine Learning research* 3.993–1022.

Buntain, Cody, Jennifer Golbeck, Brooke Liu, eta Gary LaFree. 2016. Evaluating public response to the Boston Marathon bombing and other acts of terrorism through Twitter. In *Proceedings of the International AAAI Conference on Web and Social Media*, volume 10.

Chakraborty, Tanusree, Anup Kumar, Parijat Upadhyay, eta Yogesh K Dwivedi. 2020. Link between social distancing, cognitive dissonance, and social networking site usage intensity: a country-level study during the COVID-19 outbreak. *Internet Research* .

Chen, Emily, Kristina Lerman, eta Emilio Ferrara. 2020. Tracking social media discourse about the COVID-19 pandemic: Development of a public coronavirus twitter data set. *JMIR Public Health and Surveillance* 6.e19273.

Devlin, Jacob, Ming-Wei Chang, Kenton Lee, eta Kristina Toutanova. 2019. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. In *Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, Volume 1 (Long and Short Papers)*, 4171–4186.

Fernandez de Landa, Joseba, Rodrigo Agerri, eta Iñaki Alegria. 2019. Large Scale Linguistic Processing of Tweets to Understand Social Interactions among Speakers of Less Resourced Languages: The Basque Case. *Information* 10.212.

Firth, John Rupert, 1957. A synopsis of linguistic theory 1930-1955 in studies in linguistic analysis, philological society.

Foucault, Michel. 2009. *Nacimiento de la biopolítica: curso del Collège de France (1978-1979)*, volume 283. Ediciones Akal.

Harris, Z. 1954. Distributional structure. *Word, 10(23): 146-162.* .

Lyu, Hanjia, Wei Wu, Junda Wang, Viet Duong, Xiyang Zhang, eta Jiebo Luo. 2020. Social Media Study of Public Opinions on Potential COVID-19 Vaccines: Informing Dissent, Disparities, and Dissemination. *arXiv preprint arXiv:2012.02165* .

McInnes, Leland, John Healy, Nathaniel Saul, eta Lukas Großberger. 2018. UMAP: Uniform Manifold Approximation and Projection. *Journal of Open Source Software* 3.861.

Micikevicius, Paulius, Sharan Narang, Jonah Alben, Gregory Diamos, Erich Elsen, David Garcia, Boris Ginsburg, Michael Houston, Oleksii Kuchaiev, Ganesh Venkatesh, eta others. 2018. Mixed Precision Training. In *International Conference on Learning Representations*.

Mikolov, Tomas, Ilya Sutskever, Kai Chen, Greg S Corrado, eta Jeff Dean. 2013. Distributed Representations of Words and Phrases and their Compositionality. In *Advances in Neural Information Processing Systems*, ed. by C. J. C. Burges, L. Bottou, M. Welling, Z. Ghahramani, eta K. Q. Weinberger, volume 26. Curran Associates, Inc.

Müller, Martin, Marcel Salathé, eta Per E Kummervold. 2020. COVID-Twitter-BERT: A natural language processing model to analyse COVID-19 content on twitter. *arXiv preprint arXiv:2005.07503* .

Ordun, Catherine, Sanjay Purushotham, eta Edward Raff. 2020. Exploratory analysis of COVID-19 tweets using Topic Modeling, UMAP, and Digraphs. *arXiv preprint arXiv:2005.03082* .

Shahi, Gautam Kishore, Anne Dirkson, eta Tim A Majchrzak. 2021. An exploratory study of COVID-19 misinformation on Twitter. *Online social networks and media* p. 100104.

Wang, Bairong, eta Jun Zhuang. 2017. Crisis information distribution on Twitter: a content analysis of tweets during Hurricane Sandy. *Natural hazards* 89.161–181.

Hidrogeno tren baten diseinu eta operazioaren optimizazioa

Olmos, J.[1,3], Saez-de-Ibarra, A.[1], Lopez, D.[2], Nieva, Tx.[2], Aizpuru, I.[3]

[1] Ikerlan Technology Research Centre, BRTA. J.M. Arizmendiarrieta Pasalekua 2, 200500 Arrasate-Mondragón
[2] CAF Power and Automation. Mikeletegi Pasalekua 58-2º, 20009 Donostia-San Sebastian.
[3] 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 itzulitako emaitza oinarrizko 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*

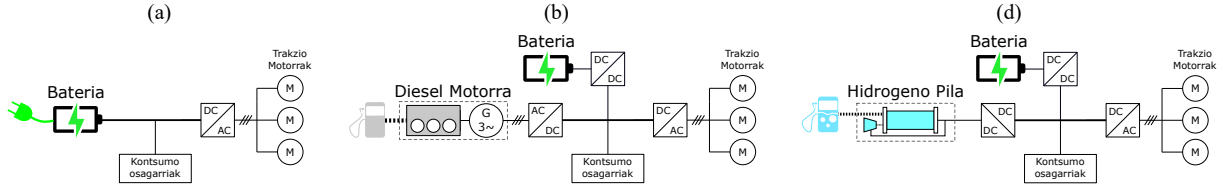
1. Sarrera eta motibazioa

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[1]), ez da lortu dieselaren bidez mugitzen diren tren guztiak ordezkatzea. 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 elektrikoen 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 azelerazioan 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.

[1] 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 trenek 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 logistiko zein tekniko gehigarririk 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 iturriz 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 gutxiek 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 oinarrizko kasu batekin alderatuko dira lortutako operazio eta diseinuaren eraginkortasuna ebaluatzeko.

3. Ikerketaren muina

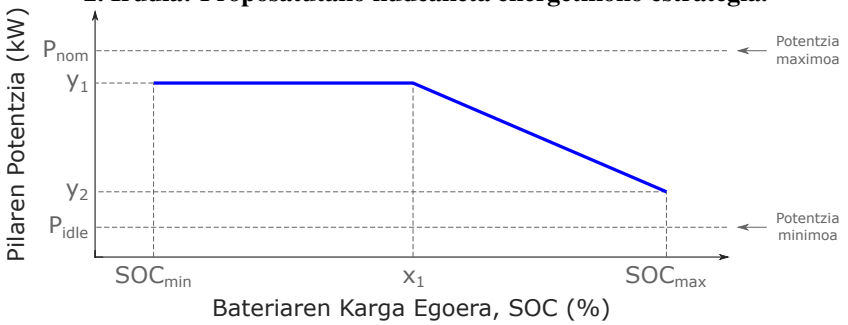
Atal honetan, lehenik optimizatuko den kudeaketa energetikoko estrategiaren oinarri teorikoak aurkeztuko dira (3.1 atala). Ondoren, estrategia eta energia iturrien tamaina batera optimizatuko dituen metodologia azalduko da (3.2 atala). Azkenik, ikerketa kasua aurkeztu ondoren (3.3 atala), lortutako emaitzak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

2. Irudia: Proposatutako kudeaketa energetikoko estrategia.



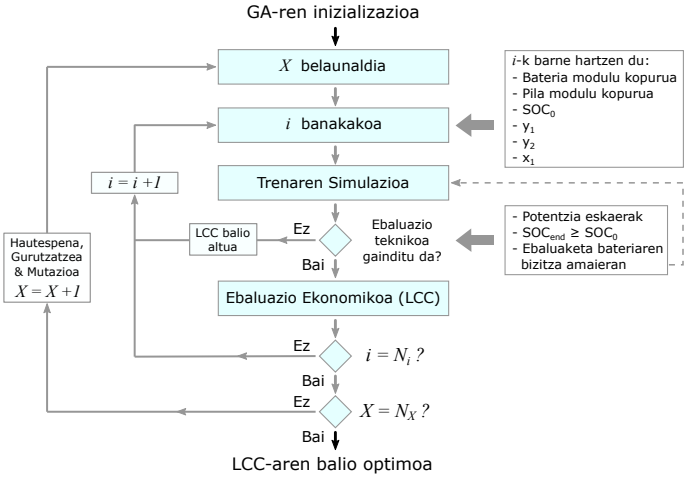
3.2. Proposatutako optimizazio metodologia

Lan honetan hidrogeno trenaren operazio eta diseinua optimizatzeko 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 (banakakoen ezaugarriak trukatzea) eta mutazioaren (banakako berrien ezaugarriak 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. Banakakoen parametrizazioa

1 taulak banakako bakoitza osatzen duten aldagaien mugak definitzen ditu. N_{BT} eta N_{FC} balioek paraleloan konektatu daitezkeen bateria eta pilen 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
$n_{BT}(i)$	$\in$	$\{1, 2, ... N_{BT}\}$	[-]	$y_1(i)$	$\in$	$\{P_{idle} - P_{nom}\}$	[kW]
$n_{FC}(i)$	$\in$	$\{1, 2, ... N_{FC}\}$	[-]	$y_2(i)$	$\in$	$\{P_{idle} - P_{nom}\}$	[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 kalkulatzen 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 (η) eta potentzia (P_{FC}) erlazionatzen 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 bateria bizitza amaieran dagoenean ere. Azken punturako, bigarren simulazio bat egiten da bateriaren kapazitatea % 20 murriztuz. Ebaluazio teknikoa gainditzen ez bada, algoritmoak LCC balio altu bat ezartzen dio banakakoari. Gainditzekotan, ebaluazio ekonomikoaren pausura igarotzen da.

3.2.4. Ebaluazio Ekonomikoa

Modelo ekonomiko baten bidez ebaluazio teknikoa gainditu duten banakakoen LCC balioa kalkulatzen da, hau da, optimizazio funtzioaren balioa. Funtsean, modeloak hidrogeno trenaren bizitza osoan zehar sortutako kostuak kalkulatzen 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} bateria eta pilarik gabeko trenaren kostua da, c_{BT} eta c_{FC} bateria eta hidrogeno pilaren kostu erreferentzialak, C_{h2} hidrogeno kontsumoaren kostua, C_{BTrepl} eta C_{FCrepl} bateria 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 enpirikoa 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.

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

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

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

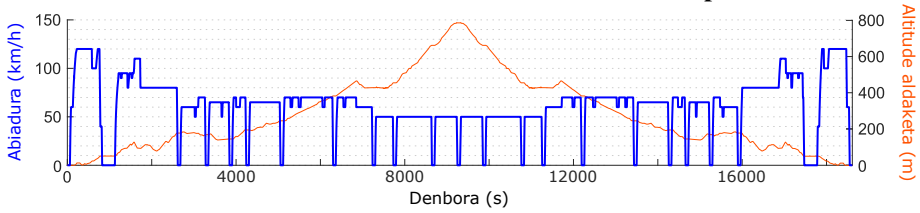
3.3. Ikerketa kasua

Optimizazio metodologia balioztatzeko, atal honetan ikerketa kasu bat aurkezten da. Horretarako, CAF tren fabrikatzailearen Civia trena 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 bateria LTO (Lithium Titanate Oxide) kimikakoa da, n_{BT} modulu bakoitzaren energia nominala 20 kWh izanik. Aldiz, hidrogeno pila PEM (Proton Exchange Membrane) motatakoa 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, oinarrizko kasu bat definitu da. Oinarrizko kasuan optimizazio aldagaientzako 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 bataz 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).

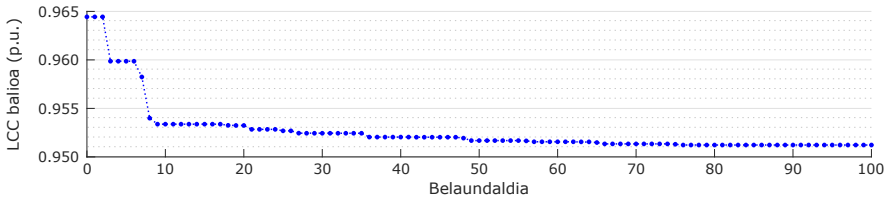
Optimizazioa martxan egon da 100 belaunaldi ebaluatu arte, 5 irudiak erakusten duen moduan. Irudian LCC balioa oinarrizko kasuarekiko adierazten da, p.u. unitateetan. Ikusten da optimizazioak % 4,9-eko hobekuntza lortu duela kasu horrekiko. Ondorioz, egiaztatu da proposatutako metodologia egokia dela hidrogeno trenaren kostua murrizteko. Irudian ikusi daiteke eboluzio handiena lehen belaunaldietan lortu dela, izan ere, 10. belaunaldidik 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 teknoekonomiko bat garatzea ahalbidetzen dute. Horretarako, 5 taulak optimizazioak itzulitako emaitzak laburtzen ditu, oinarrizko 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 oinarrizko kasuaren eta optimizazioak itzulitako kasuaren simulazioen emaitza esanguratsuak erakusten ditu.

Optimizazioak aldaketa esanguratsuak proposatu ditu trenaren diseinu eta operazioan. Alde batetik, oinarrizko 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 aurreztea 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.

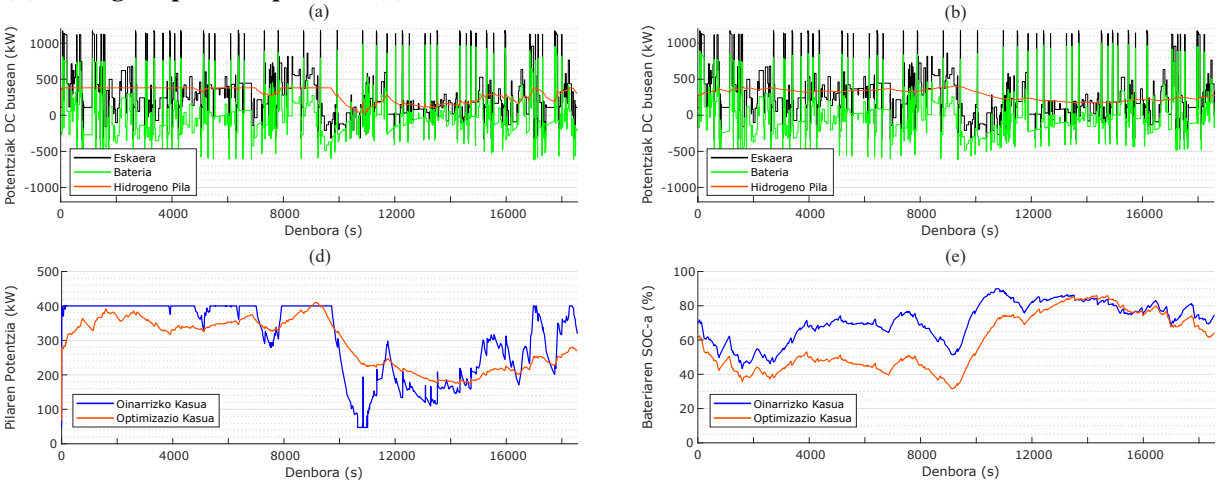
5. Irudia: GA algoritmoaren eboluzioa.



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} [-]
Oinarrizkoa	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, oinarrizko 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 oinarrizko kasu batekin alderatu da, ondorioztatuz trenaren kostu totala % 4,9 gutxitu daitekeela. Beraz, metodologiaren eraginkortasuna egiaztatu 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 lausoan edo dynamic programming optimizazioan oinarritutakoa).

6. Eskerrak eta oharrak

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.

Itzulpen Automatikoko Sistemen Analisia: Genero Alborapenaren Kasua

Salaberria, A., Campos, J.A., García, I., Fernandez de Landa, J.

HiTZ Zentroa - Ixa, Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU). 20018 Donostia, Euskal Herria

ander.salaberria@ehu.eus

Laburpena

Lan honen helburua euskal komunitatean oso erabiliak diren hiru itzultzaile automatikoek generoa nola tratatzen duten aztertzea da. Tresna komertzial hauek geroz eta erabiliagoak direnez, ezinbestekoa da ikustea zein den gizartean dauden estereotipoen birsorkuntzan duten rola. Analisi honetan ogibide ezberdinetan aurki daitezkeen genero alborapenak aztertu dira, genero marka modu ezberdinetan erabiltzen duten bi hizkuntza erabiliz: euskara (genero marka neutroa duena) eta gaztelera (generoa ezberdintzen dituen markak erabiltzen dituena). Itzulpen norabideak eta jatorrizko esaldiaren testuinguruak itzulpenetan zein eragin duten aztertu da. Esperimentu hauei esker, nabarian gelditu da nola generoa esplizitua egitea ez den nahikoa alborapenak ebazteko. Alborapen hauen nabarmentzea kalitate handiagoko eta bidezkoagoa den agertoki baterako lehen pauso bezala ikusten da.

Hitz gakoak: Itzulpen automatiko neuronala, genero alborapena, euskara

Abstract

The aim of this work is to analyze the gender bias in three automatic translation systems widely used by the Basque community. As these commercial tools have become more popular, it is essential to see what role they play in the recreation of stereotypes defined in society. In this analysis, the gender bias found in different professions has been studied using two languages that treat gender differently: basque (which has a neutral gender mark) and spanish (which uses marks that differentiate gender). The impact of the contextual information in the original sentence and the effect of the translation directions have been analyzed. These experiments have shown how using contextual information for making gender explicit is not enough for resolving gender bias. Highlighting these biases is seen as a priority towards higher quality translations and a fairer scenario.

Keywords: *Neural Machine Translation, gender bias, Basque language*

1. Sarrera eta motibazioa

Azken urteotan Hizkuntzaren Prozesamenduko eta Ikasketa Automatikoko teknikek ospe handia lortu dute eta gure egunerokotasunaren parte bilakatu dira hein handi batean. Fenomeno honen adibide gisa ikus ditzakegu sareko bilatzaileak, ahots errekonozimendu sistemak, asistente birtualak, itzulpen automatikoa... Argi dago tresna guzti hauek egunerokotasuneko atazak errazten dizkigutela baina gure artean ohikoak bilakatu direnez gizartean dauden joera eta estereotipoen gainean duten rola aztertzea ezinbestekoa dugu.

Sistema automatikoek alborapen mota desberdin ugari erakutsi dituzte urteetan zehar eta tradizio handia dago ikerkuntza komunitatean hauek aztertu eta arintzen saiatzeko (Cordeiro eta McCullagh, 1991; Dietterich eta Kong, 1995; Mehrabi *et al.*, 2019). Hala ere, Hizkuntzaren Prozesamenduko algoritmoek testu multzo handietan topatzen dituzten alborapenak hedatzeko dituzten joerak eta hauek egunerokotasunean erabiltzen ditugun aplikazioetan dituzten ondorioak ez dira behar bezain beste aztertu. Alborapen mota desberdinen artean generoarena da artikulu honetan aztergai. Moss-Racusin *et al.* (2012) lanaren arabera, genero alborapena genero batekiko lehentasuna azaltzean datza.

Genero alborapena maila desberdinetan topatu daiteke Hizkuntzaren Prozesamenduan: entrenamendu datuetan, aurretik entrenatutako hizkuntza ereduetan, *word embedding*etan, algoritmoetan...(Bolukbasi *et al.*, 2016; Garg *et al.*, 2018; Caliskan *et al.*, 2017). Hortaz, genero alborapena duten sistemek emaitza desegokiak sor ditzakete ondorio larriak eraginez hauek inplementatzen dituzten aplikazio komertzialetan.

Hau guztia dela eta, artikulu honetan euskal komunitatean oso erabiliak bilakatu diren hiru itzulpen automatiko neuronaleko sistema aztertzen ditugu genero alborapen mailan: Google Translate [1], Itzultzailea [2] eta Itzuli [3]. Analisi hau aurrera eramateko ogibideetan zentratzen gara hauek historikoki estereotipatuak egon baitira (Nadler eta Stockdale, 2012; Heilman, 2012). Itzulpen norabide posible guztien artean euskara-gaztelera eta gaztelera-euskara hautatu ditugu, gaztelerak genero marka esplizitua baitu euskarak ez bezala.

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Crawford (2017) lanean genero alborapena Hizkuntzaren Prozesamenduko ataza desberdinetan sailkatzeko esfortzuak egin dituzte. Beste ataza batzuen artean hizkuntza ereduetan eta itzulpen automatikoan estereotipoak eta azpi errepresentatuak dauden taldeekiko alborapena nabarmenduak izan dira. Hizkuntza ereduen kasuan adibidez, Lu *et al.* (2020) lanean erakutsi zuten nola *He is a doctor* (gizona medikua da) esaldiak *She is a doctor* (emakumea medikua da) esaldiak baina probabilitate altuagoa zuen. Honetaz gain, erakutsi da ere BERT (Devlin *et al.*, 2019) bezalako hizkuntza ereduek gizakiek dituzten genero joerekin korrelazioa erakusten duten (Kurita *et al.*, 2019).

Bestalde, itzulpen automatikora mugitzen bagara, sistema komertzialen alborapen estilistikoa aztertu da (Hovy *et al.*, 2020). Azterketa honek erakutsi du nola 5 hizkuntza desberdinetara itzuli ostean lortutako testuak gizon heldu baten estilotik gertuago zeuden jatorrizkoak baino. Sistemen analisiaz gain, arazoari aurre egiteko lanak ere garatu dira (Basta *et al.*, 2020; Stafanovičs *et al.*, 2020). Lan hauetan, jatorrizko testua informazio gehigarriarekin aberasteko bidea jarraitu dute, honela itzulpen anbiguoen kasuan sistemak itzulpen estereotipoduna itzuli ez dezan.

Orain arteko azterketa gehienak ingelesarentzat garatu direnez, ikerketa honen helburua euskal komunitatean oso erabiliak diren hiru itzultzaileek erakusten dituzten genero alborapenak aztertzea da. Honetarako, ogibide zerrenda bat aukeratu da eta euskara-gaztelera eta gaztelera-euskara itzulpen norabideekin proba desberdinak garatu dira. Euskarak genero marka esplizitua ez duenez jatorrizko esaldian testuinguruari esker esplizitu egiten diren kasuetan itzulpenean dituen ondorioak aztertzen dira. Honetaz gain, generoa esplizitua egiten ez denean anbiguotasunak bi genero desberdinei nola eragiten dien aztertu da. Hau guztiari esker, lan honekin azkenaldian oso erabiliak diren itzultzaile automatiko neuronalek gizartean dauden estereotipo eta joerak indartzen ari ote direnaren eztabaida sortu eta honen inguruko gogoeta bultzatu nahi da.

3. Ikerketaren muina

Atal honetan euskal komunitatean oso erabiliak diren hiru itzulpen automatikoko sistemen genero alborapena aztertzeko jarraitu den prozedura azalduko da. Lehenik eta behin ogibide zerrenda sortzeko eta itzulpen txantiloiak osatzeko jarraitutako pausoak deskribatzen dira. Txantiloi hauei esker, testuinguruko informazioa itzultzaileek nola baliatzen duten aztertzen da. Ondoren bi itzulpen norabideetan (euskara-gaztelera eta gaztelera-euskara) egindako probak eta hauetan ikusitako joerak eztabaidatzen dira.

3.1. Esperimentuen diseinua

Itzulpen automatikoan genero alborapena ikertzeko asmoarekin, euskara hizkuntza barneratzen duten eta euskal komunitatean oso erabiliak diren 3 itzultzaile neuronal aukeratu dira:

- *Google translate*: Google enpresak garatutako itzultzaile neuronala, 103 hizkuntza baino gehiago itzultzeko ahalmenarekin, tartean euskara.
- *Itzultzailea.eus*: Elhuyarrek garatutako itzultzaile neuronala, euskara, gaztelera, frantsesa, ingelesa, galegoa, eta katalana itzultzeko ahalmena duena.
- *Itzuli*: Eusko Jaurlaritzak garatutako itzultzaile neuronala, euskara, gaztelera, frantsesa eta ingelesaren artean itzultzeko kapazitatearekin.

Behin hiru itzultzaileak zehaztu ostean, esperimentuak definitzeari ekin zaio. Esperimentu hauetan, itzulpenaren norabideak eta testuinguruaren informazioak itzulpenetan dituzten eraginak aztertu nahi dira. Hizkuntza pare guztien artean euskara eta gaztelera aukeratu dira, hauek baitira hizkuntza erabilienak euskal komunitatean eta

[1] https://translate.google.es/
[2] https://itzultzailea.eus
[3] https://www.euskadi.eus/itzuli/

genero markaren erabilera desberdina baitute. Gaztelerak genero marka esplizitua du euskarak ez bezala, beraz, bi hizkuntza hauen arteko itzulpenak egitean itzultzaileen genero alborapena bistaratu nahi da. Bestalde, jatorrizko testuan testuinguruak ematen duen informazioa itzultzaileek genero alborapenari aurre egiteko erabiltzen dutenetz ikusteko txantiloi ezberdinak diseinatu dira. Txantiloi hauek bi multzotan banatu dira: genero marka esplizituki zehazten dituztenak (ama eta aita hitz gakoei esker) eta genero marka esplizituki zehazten ez dituztenak. Bigarren kasu honetan, euskararaz jatorrizko testua beti anbiguoa izango da ez baitago modurik langilearen generoa jakiteko. Itzulpen norabideak eta testuinguruko informazioak kontuan harturik 1. Taulan dauden esperimentuak definitu dira.

Itzulpen norabidea	**Erabili den testuinguruko informazioa**
Euskara-Gaztelera	Esplizitua eta ez esplizitua.
Gaztelera-Euskara	Ez esplizitua.

1. Taula: Azterketarako zehaztu diren esperimentu konbinazio guztien taula.

3.1.1. Ogibide zerrenda osatzen

Ogibide zerrenda eleanitza sortzeko Elhuyar hiztegiak emandako itzulpenak erabili dira. Guztira 86 ogibidez osatutako zerrenda bat eraiki da, denek gazteleraz genero marka dutelarik. INE eta EUSTAT erakundeek definitzen dituzten aktibitate adar ia guztiak barnebildu dira zerrenda honetan, kanpo gelditu diren adarrek euskal langileen %0,8a bakarrik adierazten dutelarik [4].

3.1.2. Esaldiak eraikitzeko txantiloiak osatzen

Jatorrizko hizkuntzan esaldiak eraikitzeko bi txantiloi mota erabili dira, 3.1 atalean azaldu den bezala: esplizitua eta ez esplizitua. Esplizituaren kasuan, jatorrizko hizkuntzan esaldiak testuinguru nahikoa izango du anbiguoa ez izateko. Ez esplizituaren kasuan, ordea, desberdintasun bat egongo da hizkuntzen araberakoa dena. Gazteleraz generoa ogibidearen markak bakarrik zehaztuko du. Euskararen kasuan, ordea, beti izango da anbiguoa jatorrizko esaldia.

Gazteleraz		**Euskaraz**	
Esplizituak	Ez esplizitua	Esplizituak	Ez esplizitua
Mi madre es ... Mi padre es ...	Trabaja como ...	Nire ama ... da Nire aita ... da	Pertsona hori ... da

2. Taula: Esperimentuetan zehar erabilitako txantiloiak.

2. Taulan erabili diren sei txantiloiak azaltzen dira. Ahalik eta esaldi sinpleenak eraiki nahi izan dira, generoaren azterketan eragin ditzaketen hainbat faktore minimizatzeko intentzioarekin.

3.2. Esperimentuak

Hautatutako itzultzaile automatikoen errendimenduan genero alborapena aztertzeko asmoarekin, bi itzulpen norabide definitu dira: euskaratik gaztelerara eta gazteleratik euskarara. Euskaratik gaztelerara itzulpena egiterakoan, itzultzaileak generoa aukeratu beharko du helburuko esaldian. Itzulpen noranzko honetan, generoa modu esplizituan zein ez esplizituan adierazia izango da hasierako esaldian. Esplizitu ez-esplizitu ezberdintze honekin, itzultzailearen errendimendua aztertu nahi da testuingurua lagungarri duenean zein testuingururik ez duenean. Bestalde, gazteleratik euskarara itzulpena egiterakoan, hasierako hizkuntzan genero marka adierazita egongo da. Egoera honetan, itzultzaileak genero bakoitzari ematen dion trataera ikusi ahal izango da. Itzulpenaren noranzko honetan, kasu ez esplizituekin lan egingo da soilik, gaztelerak genero marka argia baitauka eta testuinguru gehiago zehazteko beharrik ez dago. Itzulpenaren bi noranzkoetan, kasu esplizitu zein ez esplizituetan ere, itzultzaileen genero hautaketen ehunekoak lortzeaz gain, emaitzen analisia egin da ere. Hau da, itzultzaile bakoitzaren genero alborapena modu kuantitatiboan zein kualitatiboan aztertu da.

3.2.1. Euskara-gaztelera itzulpena

Esperimentu hauetan, euskaratik gaztelerara egingo dira itzulpenak. Genero markarik gabeko hizkuntza batetik, genero marka duen hizkuntza batera itzulpena egiterakoan, helburuko hizkuntzak generoaren hautaketa nola egiten

[4] 2020ko abenduko datuak: `https://eu.eustat.eus/`

duen aztertzea izango da asmoa. Esperimentu hauek egiteko, hasierako hizkuntzan (euskara) definitu diren esaldiak 3. Taulan ikusi daitezke. Esaldi hauek itzultzerakoan itzultzaileak zerrendako ogibideen generoa aukeratu beharko du gaztelerazko helburu esaldian, euskaraz ez bezala, gaztelerak ogibideetan genero marka esplizitua baitu. Euskarak genero marka ez duenez kontutan hartzen ogibideak adierazteko orduan, bi esaldi mota erabiliko dira: generoa agerian duten esaldiak (esplizituak) eta generoa ezkutuan daramaten esaldiak (ez esplizitu). Esaldi esplizituetan, agerian utzi nahi da genero marka, itzulpena egiterako orduan itzultzaileak testuingurua daukanean zer gertatzen den ikertzeko asmoz. Esaldi ez esplizituetan, itzultzaileak testuingururik gabe erabaki beharko du itzulpenaren generoa. Bi ereduekin, itzulpenaren alborapena aztertzea da asmoa, genero marka ezkutuan edo agerian egoteari eragina kenduz, bi kasuak tratatuko baitira.

	euskara	$--> $	**gaztelera**
Esplizitu	Nire aita *medikua* da	$--> $	Mi padre es *médico*
	Nire ama *medikua* da	$--> $	Mi madre es *médica*
Ez esplizitu	Pertsona hori *medikua* da	$--> $	Esa persona es *médica/o*

3. Taula: Euskara-gaztelera itzulpenerako esaldien adibidea.

Esplizitua: Esperimentu honetan generoa esplizituki adierazten duten euskarazko esaldiak itzuli dira gaztelerara. Euskarazko esaldietan, generoa testuinguruan txertatu da aita edo ama aipatuz, itzulpena egiterako orduan itzultzaileak generoa desanbiguatu behar ez izateko. Era honetan, itzultzailearen genero alborapena neurtuko da, generoa testuinguruan bertan argi dagoenean. Itzulpenaren kalitatearen emaitzak 4. Taulan ikusi daitezke, esaldia femeninoan zein maskulinoan planteatzerakoan itzultzaileak duen egokitasuna erakutsiz.

	Jatorrian femeninoan			Jatorrian maskulinoan		
	Zuzena	Aldaketa	Beste	Zuzena	Aldaketa	Beste
Google	% 62,8	% 12,8	% 24,4	% 75,6	% 1,2	% 23,3
Itzultzailea	% 58,1	% 16,3	% 25,6	% 72,1	% 1,2	% 26,7
Itzuli	% 69,8	% 7,0	% 23,3	% 75,6	% 0,0	% 24,4

4. Taula: Testuinguruarekin itzulitako ogibideen asmatze tasa generoarekiko.

Itzulpena zuzen (*Zuzena*), alderantzizko generora (*Aldaketa*) edo okerreko hitz batera (*Beste*) egin den antzeman daiteke 4. Taulan. Esan bezala, 4. Taulan itzultzaile bakoitzak genero bakoitzean lortu dituen emaitzak ikusi daitezke. Esaterako, jatorrizko generoa femeninoa denean, aldaketa adierazgarria gertatzen da maskulinora, *Itzuli*k aldien % 7an aldaketa egiten duen bitartean, Googlek eta Itzultzaileak aldien % 12,8 eta % 16,3an egiten dute hurrenez hurren. Ostera, jatorrizko esaldiaren genero maskulinoa denean, *Itzuli*k ez du ogibide bat bera ere generoz aldatu. Google eta Itzultzaileak ere aldaketa gutxi egin dituzte, kasuen % 1,2 besterik ez dute aldatu bakoitzak.

Datu hauei erreparatuta, esan beharra dago genero alborapena gertatzen dela generoa esplizituki definitzen denean ere. Analisian, itzultzaile guztiek genero femeninoa maskulinora bihurtzeko tendentzia dutela antzeman da. Genero alborapen honek ogibideetan maskulinoaren marka jartzeko tendentzia nabarmen handiagoa dauka, femeninoa jartzeko tendentziarekin alderatuta, azkeneko honen tendentzia ia nulua izanik. Alborapenaren nondik norakoak ezagutzeko errore analisia burutu da, genero aldaketa gertatu diren kasuak 5. Taulan jasoz. Taula horretan, alderantzizko generoa estimatu dituzten ogibideen zerrenda ikusi daiteke itzultzaile bakoitzeko.

Itzultzailea	Jatorrian femeninoan	Jatorrian maskulinoan
Google	fontanero, cerrajero, médico, carnicero, cajero, cartero, bombero, soldado, marinero, músico, camarógrafo	costurera
Itzultzailea	carpintero, médico, ingeniero, carnicero, jardinero, camionero, cartero, bombero, soldado, músico, pastor, empresario, gerente, torero	enfermera
Itzuli	zapatero, jardinero, bombero, soldado, músico, gerente	

5. Taula: Modu okerrean itzulitako ogibideak.

Errore analisiari errepartuz, 5. Taulan ikusi daiteke maskulinora igaro diren ogibideak hainbat eta anitzak direla. Horietako asko tradizioz gizonekin erlazionatu izan diren ogibidetzat jo daitezke, zentzu komunaren araberako

katalogazioa ez zientifiko batean. Bestalde, femeninora igarotako ogibideak soilik bi direla ikusi daiteke, bakoitza itzultzaile ezberdin batek egindako akatsa izanik. Femeninora itzulitako bi ogibide hauek, *jostuna* eta *erizaina*, lanbide feminizatuekin erlazionatu daitezke. Guzti honek erakusten du itzultzaileek ere joera daukatela genero estereotipoak birproduzitzeko.

Ez esplizitua: Esperimentu honetan generoa ez da esplizituki adieraziko gaztelerara itzuli behar diren euskarazko esaldietan. Euskarazko esaldietan generoa ez denez adierazi, itzultzaileak generoa ausaz aukeratu beharko luke. Era honetan, itzultzaileak generoaren arabera zein hautaketa egin dituen aztertu da. Azterketa burutzeko, euskarazko esaldi ez esplizituak itzuli dira eta ogibideek gazteleraz duten generoen proportzioa kalkulatu da itzultzaile bakoitzeko. Azterketaren emaitzak 6. Taulan azaltzen dira, bertan itzultzaile bakoitzaren genero hautaketa azaltzen delarik.

	Femeninoan	Maskulinoan	Beste
Google	% 24,4	% 51,2	% 24,4
Itzultzailea	% 48,8	% 23,3	% 23,3
Itzuli	% 36,0	% 40,7	% 23,3

6. Taula: Testuinguru gabe itzulitako ogibideen genero hautaketa.

Horrela, 6. Taulan itzultzaileen helburuko esaldiaren genero aukeraketaren portzentaiak ikusi daitezke. Emaitzei so eginda, patroi komun bat ateratzea zaila da, artean desadostasun bat dagoela ikus daiteke generoa ezberdintzen duten ogibideetan. Emaitzetara joz, *Itzultzailea*ren kasuan genero femeninoaren aukeraketa maskulinoa baino bi aldiz maizago ematen da, baina *Google*n kasuan, berriz, alderantzizkoa gertatzen da. *Itzuli* itzultzaileak antzeko proportzioak itzultzen ditu bi generoentzat. Emaitzak ikusita, orokorrean esan daiteke tendentzia dagoela ogibideen maskulinizaziorako. Hala ere, baieztapen horrek ez luke egoeraren errealitatea zintzoki ordezkatuko, ezberdintasun handiak baitaude itzultzaileen artean.

Generoaren aukeraketaren nondik norakoak aztertzeko, emaitzen analisi sakonagoa beharrezkoa da. Hau da, femeninoan edo maskulinoan itzulitako ogibideen zenbaketatik haratago, hauen itzulpenenak nola egin diren aztertuko da. Era honetan, itzultzaile guztiek genero berdina hautatu duten ogibideak aztertuko dira. Honen asmoa, ogibideen generoaren aukeraketaren atzean patroiak antzematea izango da. Horrela, 7. Taulan itzultzaileek generoa aukeratzean adostasuna izan duten adibideak ikusiko dira. Honek, emaitzen kantitateak neurtzetik haratago, emaitza hauen kalitate azterketa ahalbidetuko du. Azterketa kualitatibo honen bidez, emaitzetan genero estereotipazioa dagoen edo ez ikertuko da.

Helburuan maskulinoan	Helburuan femeninoan
ingeniero, banquero, filosofo, médico, cirujano, conductor, jardinero, camionero, cartero, bombero, mayordomo, empresario, gerente, pastor, carpintero, fontanero, cerrajero	profesora, ama de casa, arqueóloga, bióloga, diseñadora, historiadora, enfermera, traductora, veterinaria, escritora, bibliotecaria, peluquera

7. Taula: Testuinguru gabe itzultzaile guztiek berdin itzulitako ogibideak.

Itzultzaileen kalitatea aztertzeko asmoarekin, ogibideen itzulpenean generoa berdin hauteman duten adibideak erabiliko dira. 7. Taulan itzultzaileen adostasunen adibideak ikusiko dira. Itzultzaileek ogibideen hautaketa maskulinoan egin dutenean, indarrarekin zerikusia (*pastor, carpintero, fontanero, cerrajero, jardinero, camionero, bombero...*) edo erantzukizun handiko lanpostuekin (*ingeniero, banquero, médico, cirujano, empresario, gerente...*) erlazionatzen da. Beste aldean, itzultzaileek hautaketa femeninoan egin dutenean, zaintzarekin (*profesora, ama de casa, enfermera, veterinaria...*) zein humanitateekin (*arqueóloga, diseñadora, historiadora, traductora, escritora, bibliotecaria...*) lotutako ogibideetan izan da gehienbat. Itzultzaileari inolako testuingururik ematen ez zaionean ogibidearen generoa hautatzeko, ausaz egin beharrean, estereotipoetara jotzen duela argi ikusi da.

3.2.2. Gaztelera-euskara itzulpena

Gaztelera-euskara itzulpen norabidean kasu ez esplizitua bakarrik aztertu dugu gaztelerak jada genero marka esplizitua baitu ogibideetan, 8. Taulan ikusi daitekeen moduan. Hasiera batean itzultzaileek ez lukete arazorik topatu beharko itzulpen norabide honetan genero marka esplizitua duen hizkuntza batetik ez duen batera itzultzen ari baitira. Hala ere, genero femeninoa duten *química* bezalako kasu anbiguoak, adibidez, arazotsuak izan daitezke

ogibideaz gain alorrari ere izena ematen baitiote. Zehaztu dugun txantiloiak anbiguotasun hau ebatzi egiten du baina ikusi nahi da ea hau nahikoa den genero alborapena ebazteko.

	gaztelera	$--> $	**euskara**
Ez esplizitu	Esa persona es *médic**o***	$--> $	Pertsona hori *medikua* da
	Esa persona es *médic**a***	$--> $	Pertsona hori *medikua* da

8. Taula: Gaztelera-euskara itzulpenerako esaldien adibidea.

Hortaz, gaztelerako txantiloi ez esplizitua hartuz bi esaldi eraiki dira, bata femeninoa eta bestea maskulinoa izanik. Ondoren, bi esaldiak euskarara itzuli eta konparatu egin dira. Euskarak genero neutroa erabiltzen duenez eta txantiloiak berdinak direnez, teorikoki bi itzulpenak berdinak izan beharko lirateke. 9. Taulan itzulpen berdinen proportzioa azaltzen da itzultzaile bakoitzeko. Taula honi erreparatuz, ikus daiteke nola jatorrizko esaldiko generoak eragina duen itzulpenean, itzultzaileek itzulpenen %70 batean gehienez lortzen baitute euskarazko helburu testu bera.

Google	*Itzultzailea*	*Itzuli*
% 65,1	% 62,8	% 70,9

9. Taula: Gazteleratik euskarara itzultzean, jatorrizko esaldian ogibidearen generoa desberdina denean, helburu hizkuntzan esaldia berdina den portzentajea itzulpen sistema bakoitzarekiko.

Errore analisi txiki bat egiten badugu itzulpen desberdinei erreparatuz, sortzen diren aldaketa gehienak esaldiaren egituran antzematen dira: "Ile-apaintzaile gisa lan egiten du."edota "Ile-apaintzailea da.". Hala ere, badaude salbuespenak 10. Taulan ikus daitezkeen bezala. Batzuetan, genero femeninoko kasuetan itzulpena egitean, ogibidea objektu edo gai batean bihurtzen da: *Jardinera* → Lorontzi, *Química* → Kimika, *Vaquera* → Behitegi etab. Honetaz gain, oso estereotipatuak dauden ogibideen kasuan, ogibidea bera ere aldatzen du itzulpen sistemak *soldado* eta *azafata*rekin gertatzen den bezala. Hortaz, ikus daiteke nola genero alborapenak gaztelera-euskara norabidean ere eraginak dituen, nahiz eta hasiera batean ez dirudien genero marka esplizitua ez duen hizkuntza batera itzultzeko garaian arazoak egon beharko liratekeenik.

	Google	*Itzultzailea*	*Itzuli*
Ogibidea	*Barrendera/Barrendero*	*Vaquera/Vaquero*	*Zapatera/Zapatero*
F.	Miaketa lanetan dabil.	Behitegi gisa lan egiten du.	Zapata gisa egiten du lan.
M.	Kale garbitzaile gisa lan egiten du.	Behizain gisa lan egiten du.	Zapatari gisa egiten du lan.
Ogibidea	*Lechera/Lechero*	*Química/Químico*	*Jardinera/Jardinero*
F.	Esne neskato gisa lan egiten du.	Kimika gisa lan egiten du.	Lorontzi gisa lan egiten du.
M.	Esne saltzaile gisa lan egiten du.	Kimikari gisa lan egiten du.	Lorezain gisa egiten du lan.
Ogibidea	*Soldada/Soldado*	*Adivina/Adivino*	*Cartera/Cartero*
F.	Soldatzaile gisa lan egiten du.	Asmatu egiten du.	Diru-zorro gisa lan egiten du.
M.	Soldadu lana.	Igarle gisa lan egiten du.	Postari gisa lan egiten du.
Ogibidea	*Azafata/Azafato*	*Impresora/Impresor*	*Gerenta/Gerente*
F.	Azafata gisa lan egiten du.	Inprimagailu gisa lan egiten du.	Gerentea da.
M.	Zerbitzari gisa lan egiten du.	Inprimatzaile gisa lan egiten du.	Kudeatzaile gisa lan egiten du.

10. Taula: Itzulpenean generoa ogibidean bakarrik aldatzeak dakarren aldaketen hainbat adibide.

4. Ondorioak

Gaur egun eskura dauden eta euskara barnebiltzen duten itzultzaile automatikoek generoa nola tratatzen duten aztertzea lortu da lan honetan. Itzulpen automatikoen kalitatea hobetze aldera, alborapenik gabeko agertoki batera jotzeko lehenengo pausotzat jotzen da lan honetan aurkeztutakoa. Kalitate handiagokoa eta bidezkoagoa den agertoki horren sorrerarako beharrezkoa da arazoaren nondik norakoetaz jabetzea, kasu honetan, itzulpenetan genero alborapena dagoen edo ez aztertzea. Era honetan, genero alborapenaren azterketa egiteko metodologia bat zehaztu da, itzultzaile automatikoak modu ezberdinetan ebaluatu dituena. Euskara-gaztelera eta gaztelera-euskara

noranzkoak jorratu dira, horietako bakoitzean gerta daitezkeen alborapenak aztertzeko. Horrekin batera, ebaluaketa kuantitatibo zein kualitatiboa egin da, generoaren alborapenaren tamaina zein nolakotasuna ezagutzeko asmo irmoarekin.

Euskara-gaztelera noranzkoko itzulpenetan genero alborapena antzeman da esaldi esplizituetan. Esaldi hauen testuinguruak generoaren inguruko informazio nahikoa ematen badu ere, itzultzaileek hainbat ogibideen genero marka gaizki esleitu dute. Genero marka oker horiek, historikoki ogibide horiek izan dituzten rol edo estereotipoarekin bat datoz (adibide gisa, genero maskulinoaren kasuan *zapatero*, *fontanero* eta *bombero*; eta femeninoan, berriz, *costurera*, *enfermera* etab.). Era berean, esaldi ez esplizituetan ere genero alborapena antzeman daiteke, generoaren hautaketa egin denean, ogibideen genero marka maskulinizatzeko joera baitago. Hauen adibideen analisia burutzerakoan, argi geratzen da alborapen nabaria dagoela, maskulinizatutako ogibideak indarrarekin edo erantzukizun handiko lanpostuekin zerikusia daukaten bitartean, femenino bezala markatutakoek zaintza zein humanitateekin lotu daitezke.

Gaztelera-euskara noranzkoan ogibideetako genero markak itzulpenetan duen eragina aztertu da. Euskarak genero marka neutroa duenez, gazteleratik euskarara informazio hori galdu egin beharko litzateke, genero marka ezberdinekin itzulpen bera lortuz. Errealitatea ezberdina da ordea, kasu batzuetan genero markak ogibidea edota esaldiaren egitura aldatzen baitu. Gainera, genero femeninoa duten ogibide batzuk anbiguoak dira itzultzailearentzat, hitz berdina ogibidea, objektua edota alorra definitzeko erabiltzen baita gazteleraz (*química*, *cartera*, *impresora* etab.). Itzulitako esaldiaren testuinguruak nahikoa izan beharko luke itzulpena ondo burutzeko, baina itzultzaile horiek ez dira informazio horretaz baliatzen itzulpena egiterakoan.

Gaur egungo ereduen ikasketa metodologia jarraitzen bada Vaswani *et al.* (2017), generoa zehazten ez den esaldietan itzultzaileak falta duen testuingurua ikasketako *corpus*ean azaltzen diren genero alborapenek definituko dituzte, hau da, testu horretan gizarteak ezartzen dituen estereotipoak mantenduko dira. Itzultzaile hauek deterministak direnez, ogibide bakoitzeko genero marka bat aukeratuko du beti, eta kasu horretan *corpus*ean agertzen diren hitzen maiztasunen arabera egingo du aukeraketa. Adierazpen hauek, euskara barnebiltzen duten itzultzaile automatikoetan ere gertatzen direla enpirikoki frogatu da lan honetan. *Google Translate*, *Itzultzailea.eus* eta *Itzuli* itzultzaileen errendimenduan ezberdintasunak dauden arren, guztiek genero alborapen argi bat daukatela antzeman da. Horrela, arazoaren konponketarako hain beharrezkoa den jabekuntzaren lehen pausoa betetzat ematen da lan honekin.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Lan ugari egin dira azkenaldian genero, arraza eta abarrek adimen artifizialean duten alborapenaren inguruan (Basta *et al.*, 2020; Lu *et al.*, 2020; Abid *et al.*, 2021). Azterketa hauetan, alborapenaren erantzukizuna entrenamenduan erabili den *corpus*ari atxikitu zaio. Hala ere, alborapen honetan algoritmoak eta corpusak duten eragina aztertzea berebizikotzat jotzen da, alborapen honekin amaitzeko arazoaren iturria antzematea baita lehenengo pausoa. Hortaz, etorkizuneko lan bezala bi balizko egoera planteatzen dira, batean erantzukizuna entrenamendu corpusari emango zaio eta bestean entrenamendu algoritmoari. Lehenengo balizko egoeran, itzulpen automatikoko sistema entrenatzeko corpus orekatu bat erabiliko da, horretarako corpus orekatu bat sortuko delarik. Bigarren balizko egoeran, algoritmoaren erantzukizuna aztertuko da, corpus desorekatu bat erabiliz itzulpen automatikoko sistema entrenatzeko. Kasu honetan, sistemak berak kontutan hartu beharko du corpusa desorekatuta dagoela eta sistema entrenatzerako orduan datuak ezberdin tratatu beharko ditu desoreka horiek arintzeko. Gerora, bi balizko egoerak beraien artean konparatu nahi dira, bakoitzaren alborapena aztertzeko asmoarekin.

6. Erreferentziak

Abid, Abubakar, Maheen Farooqi, eta James Zou. 2021. Persistent anti-muslim bias in large language models. *arXiv preprint arXiv:2101.05783* .

Basta, Christine, Marta R. Costa-jussà, eta José A. R. Fonollosa. 2020. Towards mitigating gender bias in a decoder-based neural machine translation model by adding contextual information. In *Proceedings of the The Fourth Widening Natural Language Processing Workshop*, 99–102, Seattle, USA. Association for Computational Linguistics.

Bolukbasi, Tolga, Kai-Wei Chang, James Y Zou, Venkatesh Saligrama, eta Adam T Kalai. 2016. Man is to computer programmer as woman is to homemaker? debiasing word embeddings. *Advances in Neural Information Processing Systems* .

Caliskan, Aylin, Joanna J Bryson, eta Arvind Narayanan. 2017. Semantics derived automatically from language corpora contain human-like biases. *Science* 356.183–186.

Cordeiro, Gauss M, eta Peter McCullagh. 1991. Bias correction in generalized linear models. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)* 53.629–643.

Crawford, Kate, 2017. The Trouble with Bias. Keynote at Neural Information Processing Systems (NIPS 2017).

Devlin, Jacob, Ming-Wei Chang, Kenton Lee, eta Kristina Toutanova. 2019. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. In *Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, Volume 1 (Long and Short Papers)*, 4171–4186.

Dietterich, Thomas G, eta Eun Bae Kong. 1995. Machine learning bias, statistical bias, and statistical variance of decision tree algorithms. Technical report, Citeseer.

Garg, Nikhil, Londa Schiebinger, Dan Jurafsky, eta James Zou. 2018. Word embeddings quantify 100 years of gender and ethnic stereotypes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115.E3635–E3644.

Heilman, Madeline E. 2012. Gender stereotypes and workplace bias. *Research in organizational Behavior* 32.113–135.

Hovy, Dirk, Federico Bianchi, eta Tommaso Fornaciari. 2020. "you sound just like your father" commercial machine translation systems include stylistic biases. In *Proceedings of the 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, 1686–1690, Online. Association for Computational Linguistics.

Kurita, Keita, Nidhi Vyas, Ayush Pareek, Alan W Black, eta Yulia Tsvetkov. 2019. Measuring bias in contextualized word representations. In *Proceedings of the First Workshop on Gender Bias in Natural Language Processing*, 166–172.

Lu, Kaiji, Piotr Mardziel, Fangjing Wu, Preetam Amancharla, eta Anupam Datta. 2020. Gender bias in neural natural language processing. In *Logic, Language, and Security*, 189–202. Springer.

Mehrabi, Ninareh, Fred Morstatter, Nripsuta Saxena, Kristina Lerman, eta Aram Galstyan. 2019. A survey on bias and fairness in machine learning. *arXiv preprint arXiv:1908.09635* .

Moss-Racusin, Corinne A, John F Dovidio, Victoria L Brescoll, Mark J Graham, eta Jo Handelsman. 2012. Science faculty's subtle gender biases favor male students. *Proceedings of the national academy of sciences* 109.16474–16479.

Nadler, Joel T, eta Margaret S Stockdale. 2012. Workplace gender bias: Not just between strangers. *North American Journal of Psychology* 14.

Stafanovičs, Artūrs, Mārcis Pinnis, eta Toms Bergmanis. 2020. Mitigating gender bias in machine translation with target gender annotations. In *Proceedings of the Fifth Conference on Machine Translation*, 629–638.

Vaswani, Ashish, Noam Shazeer, Niki Parmar, Jakob Uszkoreit, Llion Jones, AidanÑ Gomez, Ł ukasz Kaiser, eta Illia Polosukhin. 2017. Attention is all you need. In *Advances in Neural Information Processing Systems*, ed. by I. Guyon, U. V. Luxburg, S. Bengio, H. Wallach, R. Fergus, S. Vishwanathan, eta R. Garnett, volume 30. Curran Associates, Inc.

"Data-intensive" aplikazio baten fitxategi kudeaketa aldatzen memoria mugak gainditzeko

Iceta, M.[1], Morlan, I.[2], Pascual, J.A.[2]

[1] Centro Nacional de Biotecnología (CNB-CSIC). Darwin kalea 3, 28049 Madrid.
[2] Donostiako Informatika Fakultatea (UPV/EHU). Manuel Lardizabal Pasealekua 1, 20018 Donostia.

miceta@cnb.csic.es

Laburpena

Aplikazio zientifikoek RAM memoria izugarria behar izaten dute sarrerako datuak handiak direnean hauek prozesatu ahal izateko. Biologiaren arloan -eta genetikaren atalean zehazki- datu tamaina sorta handia dago: kilobyte gutxi batzuetatik ehunaka gigabyte-ko datu-sekuentziak aurki daitezke. Burrows-Wheeler Alligner (BWA) aplikazioak DNA irakurketak lerrokatzen ditu, gene zehatzak eta genoma baten barne hauen kokapena/k aurkitzeko. Horretarako, memorian kargatzen ditu bai bilatu nahi diren irakurketak eta bai konparatzeke dagoen genoma. Tamaina handiekin lan egiterakoan gerta daiteke ordenagailuak behar adina memoria ez izatea. Lan honetan BWA aplikazioaren memoria kudeaketa aztertu eta aldatu egingo da sarrera handiagoak prozesatu ahal izateko baliabide mugatuak dituzten konputagailuetan.

Hitz gakoak: BWA, C programazio lengoaia, Linux, memoria kudeaketa, mmap

Abstract

Scientific applications tend to be hard on system memory as to process big input data. In the field of biology -concretely on the genomics field- there is a high variety of input data sizes: readings can be found with a size range from a few kilobytes to hundreds of gigabytes. Burrows-Wheeler Aligner (BWA) is an application that aligns DNA readings in order to find specific genes and their exact location in a genome. The application loads both the readings that are to be looked for and the big genome into memory. The computer might not have the sufficient amount of memory to process big input genomes. In this work, the memory management found in BWA will be analyzed and modified in order to allow processing bigger readings in computers with limited resources.

Keywords: *BWA, C programming language, Linux, memory management, mmap*

1. Sarrera eta motibazioa

Izaki bizidunen zelulen osaera aspalditik da ikerketa gai interesgarria. Zelulen barruan dauden DNA sekuentziek gure gorputzen izaera eta bere erakuntza prozesuak bideratzen dituzte. Gene zehatzen kokapena eta bere arteko konbinaketek ezaugarri desberdinak (ezaugarri fisikoak, psikologikoak, mota bateko gaixotasunak izateko aukerak...) markatzen dituzte. Horregatik da genomika ikasketa helburu ohia biologiaren arloan. Konputagailuen agerpena eta hauen hobekuntzek ahalbideratu izan dute genetikaren ikerkuntza hedakorra azken hamarkadetan. DNA sekuentziak kodetu egin daitezke informatikoki, bai karaktere gisa (*A, T, C, G*) edota zenbaki gisa (*0, 1, 2, 3*) osterantzean era anitzetan prozesatu ahal izateko konputagailu batean.

Burrows-Wheeler Alligner (Li eta Durbin, 2009) (Li eta Durbin, 2010) genetikaren arloan erabiltzen den aplikazio ezagun bat da. Sarrera gisa hartzen ditu makina sekuentziadore batek lortutako DNA irakurketa "motz" bat edo bi eta beste "luze" bat, eta irakurketa motza luzean osterantzean bilatzeko. Honela, jakin daiteke gene zehatz bat zelula batetik erauzitako DNA-n bertan dagoen ala ez, zenbat aldiz agertzen den eta bere kokapena. Horretarako, aplikazioak datu guztiak RAM memorian kargatu egiten ditu eta gero memorian bertan egiten ditu bilaketa-eragiketa guztiak.

Sistema batean sartu daitekeen RAM memoria kantitatea mugatua da memoria iraunkorrarekin (HDD, SSD) aldez alde jartzerakoan. Genomen tamainak oso ezberdinak dira: kilobyte gutxi batzuetatik hainbat gigabyte-ko

tarteetan mugitzen dira fitxategi mota hauen tamainak. Kontuan izanda BWA aplikazioak datu guztiak memorian kargatu egiten dituela, gerta daiteke sarrerako datuen tamainen gehiketa RAM memoria baino handiagoa izatea, prozesamendua eragotziz. Memoria nagusiaren (RAM) gehiegizko erabileraren arazoa orokorra da sarrerako datu handiekin lan egiten duten aplikazioekin ("data-intensive applications" ingelesez) (Makrani *et al.*, 2018), eta era askotan saihestu daiteke.

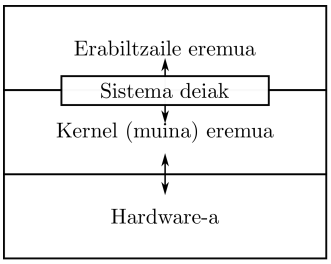
GNU/Linux sistema eragilearen barne aurkitzen da Linux muina. Sistema eragilearen muinak RAM memoria, honen erabilera eta honen gainean egindako eragiketak (besteen artean) kontrolatzen ditu. Erabilgarri dagoen memoria kantitatea bukatzen den heinean, Linux muinak RAM memoriatik diskora mugitzen ditu martxan dabilen programen memoria zati "biziak" *swap out* deitutako prozesuan. Berriro beharrezkoak suertatzen badira exekuzioan zehar, diskotik memoriara bueltan ekartzen ditu *swap in* deitutako prozesuan. Teknika hau baliagarria da memoriatik diskora mugitzen den informazio hori sarritan beharrezkoa ez denean. Horrela ez bada, denbora guztian aurrera-atzera ibiliko da muina beharrezkoak diren memoria zatiekin, sistema osoaren errendimendua andeatuz edota aplikazioaren exekuzioa geldituz[1]. Memoria gabezia arazo larria den egoeretan, aplikazio programatzaileek *malabarismoak* egin behar izaten dituzte kargatutako zatiekin edota aplikatzeko zailak diren teknikak erabiliz.

Agian *ezkutuan* badago memoriarekin elkarri eragiteko beste era bat, sarrerako datu handien prozesamendua ahalbideratu dezakeena?

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Linux muinak aukera anitz ematen ditu fitxategiekin memorian lan egiteko. Diskoan dagoen informazioarekin lan egiteko erarik arruntena eta erabiliena *read()* eta *write()* sistema-deiak erabiltzea da. Bere aldetik, datuekin tratatzeko bi aukera nabarmen ematen ditu paradigma honek: dena RAM memorian kargatzea edo zatizka kargatzea. Fitxategi osoa memorian kolpe bakarrean kargatzeak prozesamenduaren errendimendua igo dezake, baina memoria erabilera ere igotzen du behar adina memoria ez edukitzeko arriskuarekin. Zatizkako karga burutzerakoan, bestalde, programatzaileak aldez aurreko ikerketa bat egin behar du zatien tamaina eta zein zati zein momentutan kargatu behar den erabakitzeko. Horrez gain, kontuan izan behar da *read()* eta *write()* funtzioak sistema-deiak direla. 1. irudian ikusten den bezala, sistema deiek exekuzio eremua aldatzen dute. Hau da, funtzio hauek erabil-

1. Irudia: Sistema Eragilearen exekuzio eremuen sinplifikazioa



tzen dituen aplikazioa erabiltzaile eremuan (pribilegio gutxiko exekuzio eremua) exekutatzen bada, kernel eremura (pribilegio handiko exekuzio eremua) era zuzenean mugitu behar izango da diskoko informazioa irakurri ahal izateko. Aldaketa hauek exekuzio testuinguruaren gordeketa eta denbora nabarmena behar duten bestelako eragiketak dakarte. Beraz, sistema-dei hauek sarritan erabiltzeak errendimendua andeatu egiten du.

Hain ezaguna ez den beste modu bat gordetzen du Linuxek bere barruan: mmap (Gorman, 2004). Interfaze hau ere aurki daiteke Unix-moduko beste sistema eragile batzuetan (BSD, macOS) eta bere oinarrian hiru sistema-dei daude: eratzailea (*mmap()*), aldatzailea (*mremap()*) eta ezabatzailea (*munmap()*). Mmap interfazea erabiltzerakoan diskoan dagoen fitxategi bat proiektatu daiteke prozesu baten memoria espazio birtualean, interfazeak eragiketa guztiak era gardenean burutuz. Honek esan nahi du prozesu batek fitxategi bat atzi dezakeela makinaren RAM memorian fisikoki guztiz kargatuta egongo balitz bezala, benetan egon ez badago ere. Memoria gutxiko egoeretan ez da lehen aipatutako aurrera-atzerako arazoa agertzen, mmap ez baitu diskoko *swap* memoriarekin lan egiten, *orri cache*-arekin baizik. Orri cache honek ezaugarri bereziak ditu, eta fitxategi bat mmap bidez atzitzerakoan lor

[1] Adib. *malloc()* funtzioa exekutatzerakoan. Sisteman erabilgarri dagoen memoria baino gehiago eskatu ezkero, sistema deiak huts egingo du eta NULL erakusle bat bueltatuko du, *segmentation fault* bat eraginez (aplikazioa geldiarazi egiten du muinak kasu honetan).

daiteke dinamikoki kargatu ahal izatea memoria ataskatu barik. Horrela, era erraz batean irakur daiteke fitxategi handi bateko edukia RAM memoria guztia okupatu gabe.

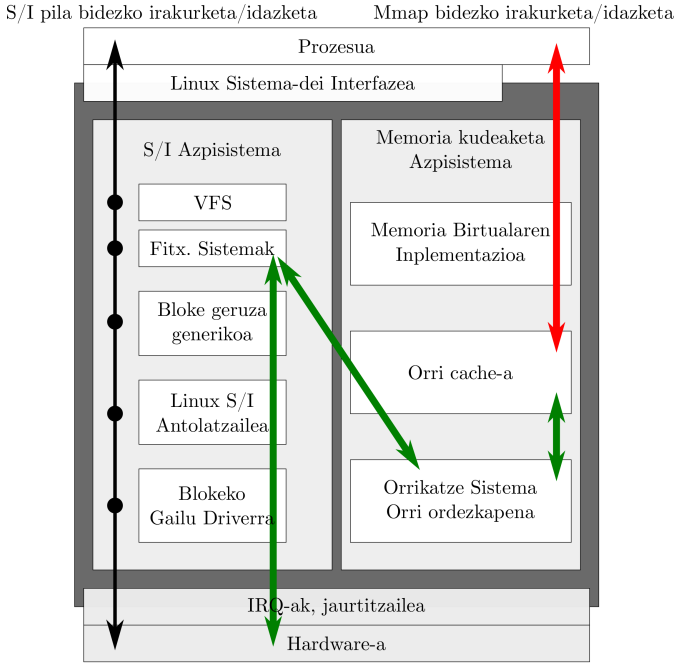
BWA aplikazioa proiektuaren SourceForge biltegian aurki daiteke[2]. Honen barne aurkitzen diren tresna anitzetatik bi dira garrantzitsuenak: *index* eta *mem*. Lehenengoak sarrerako genoma handiaren indizeak sortu egiten ditu formatu espezial batean gordetzeko osterantzean, *Burrows-Wheeler eraldaketa*(Burrows eta Wheeler, 1994) erabiliz datuak konprimitzeko. Bigarrenak indize fitxategi horiek erabiliz, kargatu egiten ditu memorian genoma originala eta irakurketa bat (edo bi), irakurketen sekuentziak genoman bilatzeko. Momentuko inplementazioak arazo bat du, fitxategiak kolpe bakarrean kargatzearen ondorioa dena: datu guztiak aldi berean kargatu ahal izateko memoria asko behar da sisteman edo ezin izango da ezer landu. Artearen egoera honen inguruan eskasa da, argitaratutako lan esanguratsuenak (Van Essen *et al.*, 2012), (Lin *et al.*, 2014) eta (Fedorova, 2019) izanda. Beraz, ikerketa honen helburuak hurrengoak dira:

1. Linux muinaren memoria kudeatze sistemaren ikerketa sakonaren burupena
2. Diskako fitxategi handiak atzitzeko era alternatiboen inguruko ikerketa
3. Mmap eta S/I pila memoria-atzipen metodoen alderapena
4. Mundu errealeko “data-intensive” aplikazio baten (BWA) datu-atzipen teknika aldaketa eta bertsio originalaren aurkako alderapena
5. Mmap interfazearen erabileraren inguruko *artearen egoera*ren hedakuntza

3. Ikerketaren muina

Memoria atzitzeko bi era hauek teknikoki aldez alde jarri baino lehen ikerketa galdera bat proposatu behar da: **mmap interfazea era klasikoen ordez erabiliz gero, errendimendua galdu egiten da ala ez?** Galderari erantzuteko Linux-en datuak atziteko era desberdinen eta hauen inplementazioak aztertu egin dira, bere konplexutasuna neurtzeko. Linux muinaren testuinguruan, diskako datuak era arrunten bidez atzitzeko sarrera/irteera pila (*ingelesez I/O stack*) osoa zeharkatu behar da. 2. Irudiaren eskema sinplifikatuan irudikatzen denaren arabera, S/I pila honek geruza anitz ditu, eta sistema deien bidez erakusten zaio erabiltzaile mailako programei. Mmap interfazeak,

2. Irudia: S/I pila erabiltzeko bidean “geldialdi” gehiago daude mmap-ekoan baino.



berriz, pila hau partzialki sahiesten du orri cache-a erabiliz. Cache honen ezaugarriak direla medio, diska eta RAM

[2] `http://bio-bwa.sourceforge.net/`

memoriaren arteko transferentziak era gardenean kudeatuak izango dira muinaren aldetik. Ondorioz, programak ez du informazioa era esplizituan kopiatu beharrik. Mmap erabiltzerakoan fitxategi bat irakurtzeko, bakarrik lehenengo eragiketak egingo du kopia esplizitoa. Orri cacheak eta bere orri-ekarpen politikak ekarriko dute informazioa modu gardenean osterantzean.

RAM erabilgarririk gabe gelditzeko arriskua dagoen momentuetan (hau da, memoria-presioa handia denean) atzeko planoan exekutatzen den orri cache-aren sistemak erabiltzen ez diren orriak ("hotzak" dauden orriak) ezabatuko ditu, diskarekin sinkronizatuz behar den kasuetan. Bakarrikan mapa sortzeko, eraldatzeko eta ezabatzeko momentuetan izuriko dira sistema-deiak, lehen aipatutako testuinguru aldaketak ia-guztiz sahietsiz. Honekin lehenengo hipotesi bat sortzen da:

(1) **Teorikoki posible da makina baten RAM memoria kopurua baino handiagoa den fitxategi bat "guztiz" erakustea aplikazio bati mmap erabiliz.**

Horrez gain beste hipotesi bat sortu egiten da errendimenduaren inguruan:

(2) **Errendimendu galerarik gabe atzitu daiteke fitxategi bat mmap bidez, S/I metodo tradizionalekin alderatzerakoan.**

Bi hipotesiak frogatzeko esperimentu bat prestatu da. Esperimentuak sintetikoki sortutako fitxategiak irakurri eta idatzi egiten ditu, 1. Taulak aipatzen dituen parametroekin. Aurretiko frogetan 4, 8 eta 16 kilobyte-ko blokeen

1. Taula: Esperimentuan erabilitako aldagaiak bere balio posibleekin.

Aldagaia	Balioa
Teknika	mmap, sist-deia
Froga	irakurketa, idazketa
Fitx. tam.	256MB, 1GB, 4GB
Cache	hotza, beroa
Atzipena	sekuentziala, ausazkoa

desberdintasunak aztertuak izan dira, baina 720 froga burutu eta gero 8KB-eko blokeak bakarrik erabiltzea erabaki da. 1. Taulan agertzen diren konbinazio bakoitzerako 5 froga egin dira, 1etik 5erako "hazi" bat emanez frogak iterazioen artean atzipen patroi berdinak erabiltzeko. Exekuzio multzo bakoitzaren denboraren batazbestekoa eta desbideratze-estandarra kalkulatu dira. Froga guztiak *Intel Xeon Gold 6130* PUZ-a[3], SATA 3 SSD diska bat eta CentOS 7.4[4] duen makina batean exekutatu dira 2. Taulak erakusten dituen banda-zabalerak lortuz.

2. Taula: Froga bakoitzean lortutako banda-zabaleraren batazbestekoa (GB/s-etan) eta desbideraketa estandarra.

Exekuzioa	Froga	256MB	desb	1GB	desb	4GB	dev
hotz sek	MMrd	0.269	0.000	0.227	0.001	0.434	0.002
	IOrd	0.220	0.005	0.085	0.005	0.121	0.002
	MMwr	2.251	0.151	2.085	0.151	0.706	0.592
	IOwr	2.023	0.196	2.009	0.196	0.812	0.435
bero sek	MMrd	0.269	0.000	0.256	0.008	0.500	0.018
	IOrd	0.227	0.001	0.229	0.000	0.229	0.001
	MMwr	2.026	0.116	2.186	0.192	0.896	0.508
	IOwr	1.835	0.209	1.917	0.172	0.958	0.501
hotz ausaz	MMrd	0.267	0.000	0.237	0.011	0.465	0.019
	IOrd	0.153	0.004	0.155	0.001	0.106	0.003
	MMwr	2.749	0.303	2.568	0.259	2.039	0.177
	IOwr	1.855	0.172	1.711	0.129	1.271	0.177
bero ausaz	MMrd	0.267	0.000	0.247	0.007	0.494	0.005
	IOrd	0.229	0.000	0.228	0.001	0.228	0.000
	MMwr	2.753	0.143	2.605	0.203	2.231	0.221
	IOwr	1.879	0.202	1.757	0.157	1.448	0.255

[3] `https://labur.eus/PUZ-Xeon6130`
[4] `https://labur.eus/centos7`

Tauletan erakusten denaren arabera, test sintetikoetan mmap erabiltzea onuragarria da read/write funtzioen erabilerarekin alderatzerakoan. **Baina, aplikazio errealetan hau ere gertatzen da? Zein hobari ekarri liteke BWA moduko aplikazio batean mmap erabiltzeak?**

Burrows-Wheeler Alligner aplikazioaren bi oinarrizko (eta gehien erabilitako) funtzioetan jarriko da arreta: bwa-index eta bwa-mem. Lehenengo funtzioak fasta izeneko formatuan onartzen ditu genoma irakurketak. Fitxategi honetatik abiatuta beste bost fitxategi sortzen ditu: *amb*, *ann*, *bwt*, *pac* eta *sa* izena duten fitxategiak. Hauek tamaina desberdinak dituzte, eta orokorrean behar den memoria zuzenean baldintzatzen dute. 3. Taulan bi eredu agertzen dira memoria erabilera irudikatzeko. Hurrengo funtzioak, bwa-mem, aipatutako fitxategi guztiak (gehi

3. Taula: BWA-index algoritmoak sortzen dituen fitxategiak, bi adibidekin. Pertzentaia sarrerako fasta fitxategiaren tamainarekin dago lotuta.

Fitxategia	SARS-CoV-2	%	ucsc.hg19	%
fasta	72.6MB	1	2.98GB	1
amb	59KB	7.9E-4	8.39KB	2.7E-6
ann	336KB	4.5E-3	3.94KB	1.2E-6
bwt	71.1MB	0.98	2.92GB	0.98
pac	17.8MB	0.24	748MB	0.24
sa	35.6MB	0.49	1.46GB	0.49
TOTALA	197.5MB	2.72	8.1GB	2.72

konparatzeke dauden irakurketak) kargatu egiten ditu RAM memorian aldi berean bilaketa burutzeko. Hau horrela izanda, taulan ikusitako "ucsc.hg19" genoma ezin izango genuke 8GB RAM dituen makina batean prozesatu.

Hau saihesteko bi aukera esanguratsu daude: datuak zati txikiagotan prozesatzea aplikazioak orain arte erabilitako read/write funtzioen bidez edota fitxategiak birtualki proiektatzea mmap interfazea erabiliz. Lehenengo aukerak programazio aldetik eskakizun handiagoa dakar, behar diren memoria zatiak une guztietan kontuan hartu egin behar baitira. Horrez gain, memoria erabilera sistemak duen memoria tamainara gerturatzerakoan, aipatutako *swap* arazoak egongo dira, memoria gabeziak programa geldiarazten ez badu. Mmap interfazea erabiltzerakoan, ordea, "bertan" izango da fitxategia programarentzat, nahiz eta ez egon guztiz kargatuta memorian, eragiketa guztiak "atzetik" gertatuz. Horrez gain, lehenengo metodoak irakurketa eta idazketa txikiago baina anitzagoak ekartzen ditu, sistema dei kopurua eta hauen denbora-galketa handituz.

Sarrerako *fasta* eta sortutako *bwt* eta *sa* fitxategiak mapeatzeak dakar aldaketarik handiena, memoria kantitate handiena suposatzen baitute. Egindako aldaketak BWA aplikazioaren kodean zuzenean egin dira, eta atzigarri daude proiektuko biltegian[5]. Orokorrean, *read()* eta *write()* funtzioen ordez bektoreen gaineko eragiketak/esleipenak sartu dira, bektore hauek mmap bidez sortutako mapak izanda. Aldaketak burutu eta gero, aplikazioaren *index* funtzioa aplikatu zaie sarrerako *fasta* fitxategi desberdinei, 4. Taulan ikusten diren prozesatze-denborak lortuz. Frogak exekutatzeko tamaina desberdinak dituzten *fasta* fitxategiak aukeratu dira, sarrerako tamaina desberdinek

4. Taula: Exekuzio-denboretan ikusitako desberdintasunak bwa-index inplementazio originala eta ikerkuntzaren inplementazioaren artean.

Izena	Fasta tam.	Index (jatorr.)	Index (mmap)	Azelerazio faktorea
Candida Albicans	13.8MB	6.68s	6.14s	**1.087x**
SARS-CoV-2	72.6MB	68.85s	65.91s	**1.044x**
Electrophorus Electricus	533.MB	561.3s	510.1s	**1.100x**
Asparagus Officinalis	1.1GB	1263s	1173s	**1.076x**
Homo Sapiens Sapiens	3.0GB	3942s	3611s	**1.091x**

aplikazioaren errendimenduan izan dezaketen efektuak neurtzeko. Frogetan 1.044 eta 1.100 tarteko azelerazio faktoreak ikusten dira. Hau da, kasu guztietan mmap erabiltzeak hobekuntza erakutsi du. Are gehiago, 8GB RAM dituen beste makina batean hasieran prozesatu ezin zen *Homo Sapiens Sapiens* fitxategiarekin lan egin daiteke kodean aldaketak egin eta gero (infinitutik 3.800 segundotara jaisten da denbora).

[5] `https://gitlab.com/dadi-tfg/bwa-mmap`

4. Ondorioak

Artikuluaren muinean proposatzen diren hipotesiak egiazkoak direla erakusten dute emaitzek. Nahiz eta fitxategiak atzitzeko era arruntena ez izan, mmap-ek eskeintzen ditu bi abantaila nagusi S/I pilaren metodoekin konparatuta:

1. RAM memorian guztiz kargatu ezin daiteken fitxategi batekin lan egitea ahalbideratzen du programatzaileari-rentzat gardena eta erraxa den era batean
2. Fitxategi tamaina batetik aurrera (256MB-tik aurrera) banda-zabalera handiagoa lortzen da mmap erabiliz, exekuzio denbora txikituz

BWA aplikazioaren kasu konkretuarekin igaro egiten dira emaitzak eremu sintetikotik errealera, hipotesiak benetazko "data-intensive" aplikazioetan aplikatu daitezkela erakutsiz.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Behin ikusita BWA-n mmap fitxategi handiekin lan egiteko alternatiba ona dela, lan gehiago egin daiteke horren inguruan, bai BWA aplikazioa eta bai Linux muinaren testuinguruetan:

1. Aplikazioaren aldetik, algoritmoaren bigarren bertsioaren (Vasimuddin *et al.*, 2019) memoria atzipenean "mmap logika" aplikatu daiteke. Honen inguruan saiakerak egin dira proiektuan bertan[6], baina algoritmoaren kodearen aldaketak ez dira xumeak, konbertsioa egiteari arinkeria ebatsiz. Edozein modutan, planteamendu interesgarria da, bigarren bertsio honek memoria askoz gehiago behar baitu funtzionatzeko.
2. Linux muinaren aldetik, orri cache-aren funtzionamendu eta eguneraketa politikak eraldatu daitezke "data-intensive" aplikazioen datu atzipen ereduetan oinarrituz, gaur egun bakarrik ausazko eredu bat inplementatua baitu (Love, 2010). Bestalde, orri erraldoien (huge pages ingelesez) erabilera eta errendimendu-inpaktuaren inguruan ere ikertu daiteke. Honen inguruan aurrerapenak egin dira (Iceta *et al.*, 2020)[7].
3. Esperimentazioaren aldetik, frogak berregitea Linux muinaren bertsio eguneratu batekin da planteamendu argia. Egindako frogak Donostiako Informatika Fakultateak utzitako zerbitzari batean (Linux 3.10 bertsioarekin) burutu dira. Gaur egun Linux-en 5.10.23 LTS bertsioa dago atzigarri. Duela 8 urte atera zen 3.10 bertsioa eta denbora horretan memoriarekin zerikusia duen kodea aldatu da, beraz frogak ez dute guztiz islatzen lortu *daitekeen* errendimendua.

6. Erreferentziak

Burrows, Michael, eta David Wheeler. 1994. A block-sorting lossless data compression algorithm. In *Digital SRC Research Report*. Citeseer.

Fedorova, A., 2019. Webpage: Why is mmap faster than system calls. `https://medium.com/@sasha_f/why-mmap-is-faster-than-system-calls-24718e75ab37`. Accessed: 2021-04-21.

Gorman, Mel. 2004. *Understanding the Linux Virtual Memory Manager*. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education, Inc.

Iceta, Mikel, Pascual Jose A., eta Morlan Ignacio, 2020. Development of file access policies for data-intensive applications in linux. `http://hdl.handle.net/10810/48829`.

Li, Heng, eta Richard Durbin. 2009. Fast and accurate short read alignment with Burrows–Wheeler transform. *Bioinformatics* 25.1754–1760.

——, eta ——. 2010. Fast and accurate long-read alignment with Burrows–Wheeler transform. *Bioinformatics* 26.589–595.

Lin, Zhiyuan, Minsuk Kahng, Kaeser Md. Sabrin, Duen Horng Polo Chau, Ho Lee, eta U Kang. 2014. Mmap: Fast billion-scale graph computation on a pc via memory mapping. In *2014 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, 159–164.

Love, Robert. 2010. *Linux Kernel Development, 3rd ed.*. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education, Inc.

[6] `https://gitlab.com/dadi-tfg/bwa-mem2-mmap`
[7] `https://gitlab.com/dadi-tfg/dadicode`

Makrani, Hosein Mohammadi, Setareh Rafatirad, Amir Houmansadr, eta Houman Homayoun. 2018. Main-memory requirements of big data applications on commodity server platform. In *Proceedings of the 18th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing*, CCGrid '18, p. 653–660. IEEE Press.

Van Essen, Brian, Henry Hsieh, Sasha Ames, eta Maya Gokhale. 2012. Di-mmap: A high performance memory-map runtime for data-intensive applications. In *2012 SC Companion: High Performance Computing, Networking Storage and Analysis*, 731–735. IEEE.

Vasimuddin, M., S. Misra, H. Li, eta S. Aluru. 2019. Efficient architecture-aware acceleration of bwa-mem for multicore systems. In *2019 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS)*, 314–324.

7. Eskerrak eta oharrak

Ikerketa lan honetan ezinbestekoak izan dira pertsona eta entitate anitz. Ez baninduke lagundu ezin izango nukeen proiektu hau bukatu. Horregatik, eskertu nahi diet:

- Jose A. Pascual eta Inaki Morlan-ei, beraiekin burututako Gradu Amaierako Lanean (Iceta *et al.*, 2020) oinarritzen baita ikerketa, eta prozesu guztian arreta handiz gidatu bainaute.
- Donostiako Informatika Fakultateari eta bertako *Intelligent Systems Group* taldeari, lana aurrera eramateko baliabidetaz hornitu bainaute.
- *University of British Columbia*-ko Elektrizitate eta Konputagailu sailako Alexandra Fedorova-ri, bere Linux-en memoriaren inguruko lana goiargia izan baita muina honen memoria-sistema ulertu ahal izateko.

Partizioen konfigurazioaren eragina denbora errealeko sistemen planifikagarritasunean

Amurrio González, A.[1]

Ikerlan (BRTA). Sistema Txertatu Fidagarriak, J. M. Arizmendiarrieta Pasalekua, 2 - 20500 Arrasate-Mondragón (Gipuzkoa)

aamurrio@ikerlan.es

Laburpena

Denbora errealeko sistemen garapenerako ezinbestekoa da diseinu faseetan hartzen diren erabakiek daukaten eragina ezagutzea. Partizioetan oinarritutako arkitekturak gero eta gehiago erabiltzen dira segurtasun funtzionaleko baldintzak dituzten aplikazioak diseinatzeko, eta euren konfigurazioak zuzeneko eragina du sistemen planifikagarritasunean. Hori dela eta, lan honetan partizioak inplementatzeko testuinguru-aldaketa denbora aintzat hartzen duen sistema eredu bat erakutsiko da, eta ondoren diseinu faseetan ezartzen diren konfigurazio parametroen eraginak ebaluatuko dira. Azterketa horren ondorioak planifikazio algoritmo heuristikoen garapenerako irizpide gisa erabiltzeko baliagarriak izango dira.

Hitz gakoak: Denbora errealeko sistemak, Planifikagarritasuna, Partizioak

Abstract

It is necessary to know the effect of design-choices taken during the development of real-time systems. Partition-based architectures are more and more used in the design of safety critical applications, and their configuration has direct impact in the schedulability of the system. That is why in this work, a system model that considers context switch overheads is shown, later to evaluate the effects of configuration parameters that are set during design phases. The conclusions drawn from this study may serve as a guide for the development of heuristic scheduling algorithms.

Keywords: *Real-Time Systems, Schedulability, Partitions*

1. Sarrera eta motibazioa

Denbora errealeko sistemetan, sistema ziberfisikoek (konputazio eta komunikazio elementuak bateratzen dituzten sistema informatikoek) konputatutako emaitzak ez dira bakarrik euren balioen zuzentasunean oinarritzen, baizik eta lorturiko emaitzak zuzenak izateaz gain, aurretik inposaturiko epe baten barruan lortu izana aintzat hartu beharra dago (Stankovic, 1988). Adibidez, industrian edo garraioetan inplementatzen diren kontrol aplikazioek epe zorrotz batzuk bete behar dituzte, eta ez betetzekotan ondorio arriskutsuak suerta daitezke. Kasurik txarrenean ere epeak betetzen direla bermatzeko, planifikazio teknikak erabiltzen dira. Oro har, sistema ziberfisikoak osatzen dituzten prozesadoreetako atazak noiz exekutatzen diren zehazteari planifikazioa deritzo, eta kasu ez tribialetan problema konplexu bat da (Stallings *et al.*, 2008). Planifikazio metodo ezagunenak exekutibo ziklikoa, lehentasunetan oinarritutakoa edota bien konbinazioa den planifikazio hierarkikoa dira, besteak beste.

Industria zein garraio domeinuetan maiz segurtasun funtzionaleko arauak bete behar dira, kontrol aplikazioek errore maila onargarriak eduki dezaten eta horiek suertatzerakoan behar beste neurri aplikatzeko. Aplikazioek bermatzen duten segurtatze-mailaren arabera *Safety Integrity Level* (SIL) izeneko mailak definitzen dira IEC 61508 estandarrean, eta SIL maila ezberdineko konponenteak exekuzio plataforma berdinean exekutatu behar badira, euren arteko isolamendu egokia bermatu beharra dago (IEC, 2010). Horretarako, partizioak erabiltzen dira. Denbora isolamendua bermatzeko, denbora partizioak inplementatzeko gai diren sistema eragileak erabiltzen dira, hala nola Integrity (Green Hill Software). Atazak partizioetan kokatzean, partizioen exekuzioa ere planifikatu beharra dago, sistema osoaren erantzun- denbora, hots ataza guztiek euren betebeharrak amaitzeko behar duten denbora totala, inposaturiko epea baino luzeagoa izan ez dadin.

Denbora errealeko sistemen planifikazioa aspladi jorraturiko gai bat da. Izan ere, lehengo planifikazio eta analisi lanak 1970.eko hamarkadakoak dira (Liu eta Layland, 1973). Hala ere, exekuzio paradigmak eta sistemen konplexutasuna denboraz aldatu eta garatu diren heinean, planifikazio algoritmoek ere sistema eredu horietara egokitu behar izan dute. (Amurrio *et al.*, 2019) lanean azken 40 urtetan denbora errealeko sistemen planifikazioa era batean edo bestean jorratzen duten lanak bildu ziren, eta ondorio garrantzitsuenetariko bat sistema partizionatuen planifikazioa oso lan gutxitan jorratu dela nabarmendu zuten autoreek.

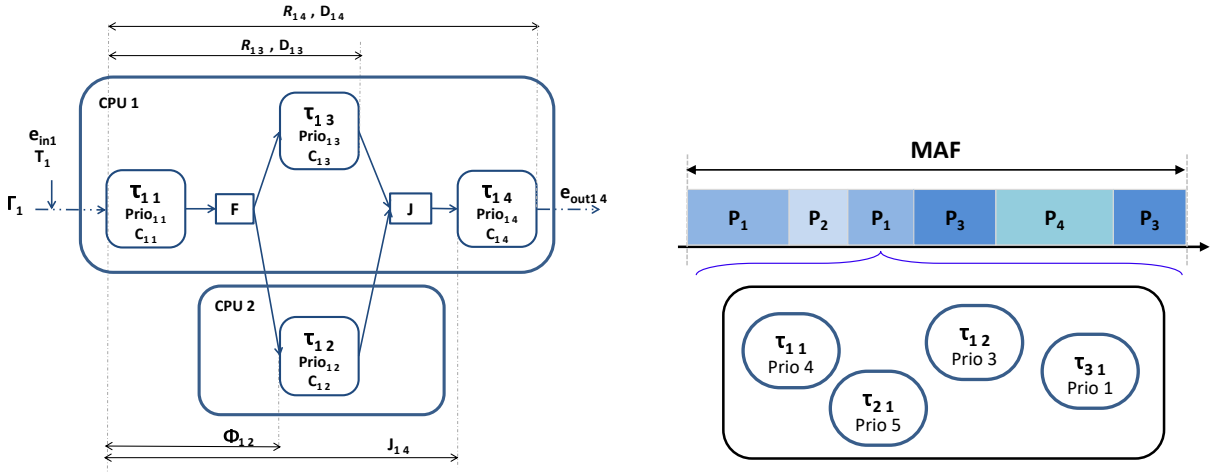
Lan honen helburua trenen gidatzea kontrolatzen duten aplikazioen planifikazioan ardaztuko da. Izan ere, gaur egun aplikazioak exekutibo ziklikoetan oinarritzen dira: aplikazioaren funtzio guztiak ziklikoki exekutatzen dira, nahiz eta beti lan baliagarririk egiten ez duten. Gainera, exekuzio paradigma hori erabilita zaila da konponenteen arteko isolamendua bermatzea. Hortaz, trenen kontrol aplikazioen ber-diseinu orokor bat burutzea proposatu zen (Fang eta Obermaisser, 2017) lanean, partizioetan oinarritutako arkitekturak eta planifikazio hierarkikoa erabilita. Beraz, partizioetan oinarritutako denbora errealeko sistemak planifikatzeko algoritmo bat garatzeko bidean, partizioen konfigurazioaren parte diren parametro jakin batzuek sistemaren planifikagarritasunean duten eragina aztertu beharra dago.

2. Sistema Eredua

Sistema baten ezaugarriak edota portaerak ulertzeko, iragartzeko eta kontrolatzeko egiten diren errepresentazio sinplifikatuei sistema ereduak deitzen zaie. Lan honetan Kantabriako Unibertsitatean garaturiko MAST (Modelling and Analysis Suite for Real-Time applications) [1] ereduarekin bat datorren sistema eredu bat eraikiko da, segurtasun aplikazioen denbora portaera deskribatzeko.

2.1. Arkitektura Logikoa

Ereduaren elementu nagusia gertaera jakin bati erantzunez aktibatzen den *End-to-End Flow* (*e2e flow* aurrerantzean) izeneko jarduera katea da, eta 1(a) irudian adibide sinple bat irudikatu da. Jarduera bakoitza prozesadore batean exekutatzen den ataza bat da, eta *step* izeneko elementuaren bitartez adierazten da. Aurrerantzean *step* eta ataza terminoak berdin erabiliko dira. Aplikazioen exekuzioa aktibatzen dituen gertaerei *Event* (e_in) deitzen zaie eta T_i periodoa dute. Hortaz, Γ_i *e2e flow*-ko j-garren atazari τ_{ij} deituko zaio, eta kasurik txarreneko exekuzio denbora jakin bat dauka, C_{ij}, eta lehentasun bat, $Prio_{ij}$. Atazek errepresentatzen duten prozesadorearen erabilera denbora erlatiboari U_{ij} ditzen zaio, kasurik txarreneko exekuzio denboraren eta aktibazio periodoaren arteko erlazioa delarik: $U_{ij} = C_{ij}/T_i$. Euren exekuzio denborarekin alderatuz askoz txikiagoa denez, lan honetan ez da kontuan hartuko atazen testuingurua kargatzeko behar den denbora, hau da, ataza mailako testuinguru-aldaketa.



(a) Arkitektura logikoa (*e2e flow* banatua)

(b) Partizio eredua

1. Irudia: Sistema eredua

Lehen esan bezala, aplikazioen exekuzioari epe bat inposatzen zaio, beraz ataza bakoitzak D_{ij} izeneko epe

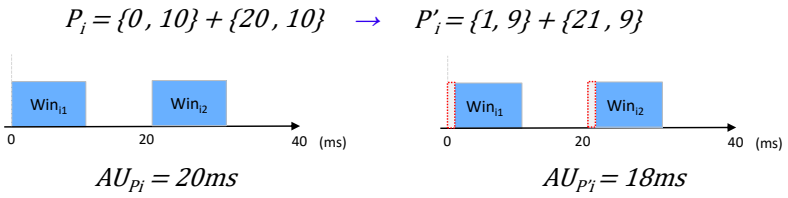
[1] https://mast.unican.es/

bat eduki dezake. Sistemen erantzun-denbora kasurik txarrenean euren exekuzioa burutzeko atazek behar duten denbora totala da, gainerako atazek eta beste edozein elementuren interferentzia guztiak aintzat hartuta. Ataza bakoitzaren erantzun-denbora R_{ij} da eta, nahitaez, inposaturiko epea baino motzagoa izan behar du.

2.2. Partizio eredua

Prozesadore bakoitzean, atazak P_x partizioetan kokatzen dira. Partizioak periodikoki exekutatzen dira exekutibo zikliko (inglesez $MajorFrame$ edo MAF) baten barruan, eta k denbora leihoz (Win_{xk}) konposatuta egon daitezke, 1(b) irudian adierazten den moduan. Partizio leihoen hasiera uneari S_{xk} deritzo, eta denbora luzerari L_{xk}. Partizio bakoitzaren erabilera bertan kokatutako atazen erabilera erlatiboen batuketa da, hots, $U_{P_x} = \sum_{\forall \tau_{ij} \in P_x} U_{ij}$. Partizio bakoitzari prozesamendu denbora totaleko zati bat esleitzen zaio, AU_{Px}.

Oro har, prozesadoreek denbora tarte bat behar dute partizio leiho bakoitzaren testuingurua kargatzeko, hots, prozesamendurako erabili ezin den denbora jakin bat dago. Sistema eragilearen eta exekuzio-arkitekturaren araberakoa da, eta exekuzio osoan zehar konstante mantentzen dela suposatuko dugu. Partizio-mailako testuinguru-aldaketa denbora horri CS deituko zaio eta lan honetan partizio lehio bakoitzaren hasieran ematen dela suposatuko dugu, 2. irudian erakusten den bezala. Beraz, partizio leiho bat deskribatzeko honako notazioa erabiliko da: $Win_{xk} = \{ S_{xk} + CS , L_{xk} - CS\}$.



2. Irudia: Testuinguru-aldaketa denboraren eragina partizio leihoetan ($CS = 1$)

2.3. Planifikagarritasun analisia

Denbora errealeko sistemen erantzun-denbora planifikagarritasun analisi izeneko metodo matematikoen kalkulatzen da, eta sistema eredura egokituta egon behar dute kalkulatutako emaitza benetazko kasurik txarrenekoa izan dadin. Lehen analisia (Liu eta Layland, 1973) lanean aurkeztu zen aspaldi, ataza independiente eta periodikoen planafikagarritasuna aztertzeko. Handik aurrera, analisi teknika asko sortu dira, eta gure sistema ereduarekin antzekotasun gehien dutenak hauexek dira:

- (J.J. Gutiérrez, J.C. Palencia and M. González Harbour, 2000) lanean egileek *Holistic* teknika (Audsley *et al.*, 1991) *e2e flow* ez linealetara aplikatzea porposatu zuten. Hala ere, teknika hori oso pesimista dela aski ezaguna da denbora errealeko ikerketa komunitatean.
- (Palencia eta González Harbour, 1998) laneko autoreek *Offset-based* teknika garatu zuten, *Holistic* teknikaren pesimismoa gutxitzeko, eta sistema partizionatuk analizatzeko gai dena (Palencia *et al.*, 2016). Aldiz, *e2e flow* linealak baino ez zituzten aintzat hartu.

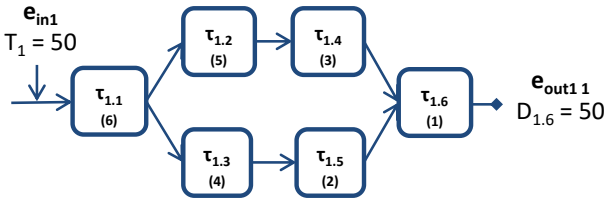
Horregatik (Amurrio *et al.*, 2020) lanean *e2e flow* ez linealen eta partizionatutako sistemen planifikagarritasuna analizatzeko proposamena egin zen. Bertan, *Holistic* teknikaren pesimismoa gutxitzen dela baieztatu zen, baita partizioetan oinarritutako sistemetara aplikagarria dela ere bai. Gure azterketa eta esperimentu guztiak analisi teknika horretan oinarrituta daude.

3. Partizioen konfigurazioaren eragina aztertzen

Atal honetan partizioen konfigurazio parametro desberdinen eragina aztertuko da. Horretarako, deskribatutako ereduarekin bat datorren eta segurtasun aplikazioen adierazgarri den adibide sinple bat erakutsiko da, hurrengo esperimentuak kasu sintetiko horren inguruan jorratzeko.

3.1. Aplikazio sintetikoa

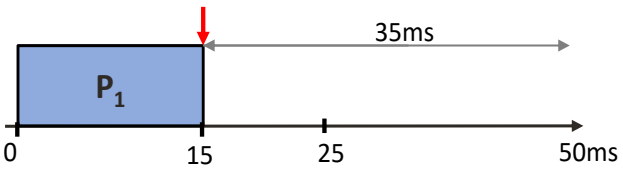
Segurtasun aplikazioen adibide izango den aplikazio sintetiko bat 3. irudian errepresentatu da. Aplikazio sintetikoak ohiko segurtasun aplikazioen ezaugarri nagusiak ditu, hala nola aktibazio periodo jakin bat, prezendentzia erlazioak dituzten atazen exekuzioa eta kasurik txarrenean ere bete beharreko epe bat. 50ms-ro aktibatzen den eta sei *step*-ez konposaturiko *e2e flow* ez lineal bat da, prozesadore bakar batean mapeatu da eta prozesadorean partizio bakar batean (P_1) kokatu da. Sinpletasuna bermatzeko, ataza guztien exekuzio denbora 2ms direla suposatuko da, eta esleitzen zaien lehentasuna parentesi artean idatzi da. Hortaz, aplikazioaren erabilera erlatibo totala %24koa da. Aplikazio sintetiko honen erantzun-denborari buruz ari garenean, 6. *step*-aren erantzun-denboraz (R_{16}) ari gara, horixe baita aplikazioaren azken ataza. Bestalde, esperimentu guztietarako erabiliko den MAF periodikoaren balioa 50ms izango da.



3. Irudia: Aplikazio sintetikoa

3.2. Partizioen analisia eta konfigurazioa

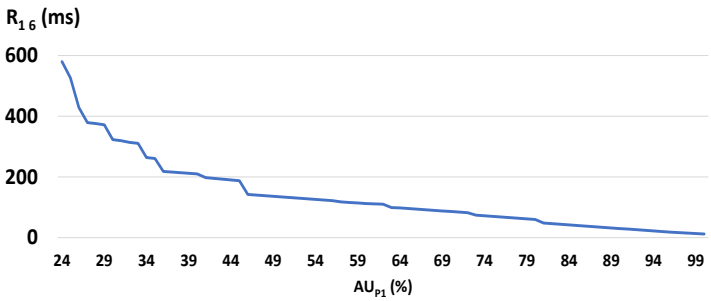
Denbora errealeko sistemen erantzun-denborak kalkulatzen dituzten algoritmoak ezkorrak edo pesimistak direla esaten da. Izan ere, egoerarik txarrena haintzat hartu behar dute beti kalkulu guztietan. Demagun aplikazio sintetikoaren parte den 2ms-ko ataza bakar baten erantzun-denbora kalkulatu nahi dela, 4. irudian adierazi den partizioan kokatu delarik. Adibide horretan, kasurik ezkorrena tarearen aktibazio ebentua partizioaren amaieran suertatzea litzateke (gezi gorri batez irudikatuta). Hortaz, tarearen erantzun-denbora kalkulatzeko, bi termino hartuko dira kontutan: batetik tarearen exekuzio denbora, 2ms, eta bestetik, tareak prozesadorea erabiltzea galarazita duen denbora tartea, 35ms (gogoratu MAFaren aktibazioa ere periodikoa dela). Beraz, atazaren kasurik txarreneko erantzun-denbora 37ms izango litzateke. Agerikoa da partizioari zenbat eta exekuzio-denbora gehiago esleitu orduan eta txikiagoak izango direla barneko tareen erantzun-denborak.



4. Irudia: P_1 partizioan dagoen tarea aktibatzen duen ebentua partizioaren amaieran jazo da, eta MAFaren zikloa berriro hasi arte ezin da exekutatu

Ondorioz, aplikazioen garapen fase goiztiarretan hartu beharreko erabaki bat, partizio bakoitzaren exekuziorako esleitzen zaion denbora da. Hots, lehen deskribatutako ereduaren arabera eta lantzen ari garen adibide sintetikoaren arabera, partizioaren AU_{P1} parametroa finkatu beharra dago. Izan ere, kasurik txarreneko erantzun-denboraren kalkuluan eragin zuzena dauka, 5. irudian azaltzen den bezala. AU_{P1} parametroaren balio minimoa (partizioari esleituriko prozesamendu denbora minimoa) bertan dauden tareen exekuzio denboraren araberakoa izango da. 3. irudiko aplikazio sintetikoaren sei tareak P_1 partizioan kokatu dira, eta euren prozesadore-erabilera erlatiboen batura (U_{ij} sistema ereduan) %24-koa denez, horixe izango da P_1 partizioari esleituko zaion MAFaren ehuneko minimoa. Aipagarria da erantzun-denborak zenbateraino murriztu daitezken partizioari esleitutako prozesamendu-denboraren arabera: 580ms-tik, prozesamendu-denbora minimoa esleituz, 12ms-ra, prozesadorearen %100 esleituz.

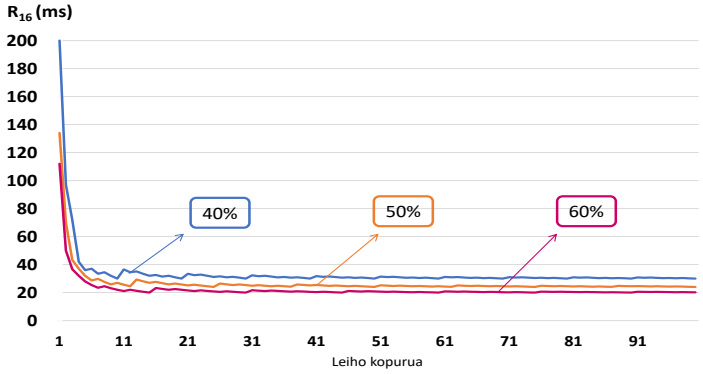
Lehen azaldutako analisi tekniken ezkortasuna gainditzeko beste modu bat partizio leiho kopurua handitzean datza, partizioari esleitutako prozesamendu denbora konstante mantentzen delarik. Izan ere, suerta daiteke AU_{P1}



5. Irudia: erantzun-denboraren eboluzioa AU_{P_1} parametroaren menpe

parametroa handitzea galarazita egotea, adibidez bestelako partizioek (komunikazioetarako, kritikotasun maila ezberdineko beste aplikazio bat exekutatzeko...) MAFaren zati handiago bat beharrez gero. Leiho kopurua handituz, exekuzioa galarazita dagoen denbora tarteen tamaina murrizten da, erantzun denborak era berean txikiagotuz. 6. irudian aplikazioaren erantzun-denboraren eboluzioa leiho kopuruarekiko ikusten da, hasieran esleitutako denbora total ezberdinetarako (%40,%50 eta %60). Adibide guztietan leihoak uniformeki banatu dira MAFean zehar.

Oro har, partizio leiho kopuruak gora egiten duenean, erantzun-denboraren txikiagotzea nabarmena da. Orain arteko esperimentuetan ez da kontutan eduki lehen azaldutako partizio mailako testuinguru-aldaketa denborarik. Prozesamendu denbora horren balioa aplikazioak exekutatzeko erabiltzen den sistema eragilearen araberakoa da. Testuinguru-aldaketa denborak neurtzen dituzten arloko egoerako lanek (Hamelin *et al.*) (Masmano *et al.*), 17μs eta 27μs bitarteko balioak erakusten dituzte, beraz gure saiakuntzetarako $CS = 20\mu$s-ko balioa erabiliko dugu, eta partizio-mailako testuinguru-aldaketa motelagoak irudikatzeko $CS = 200\mu$s-ko balioa ere aztertuko dugu.



6. Irudia: erantzun-denboraren eboluzioa partizio leiho kopurua handitzean, AU_{P_1}-ren balio ezberdinetarako

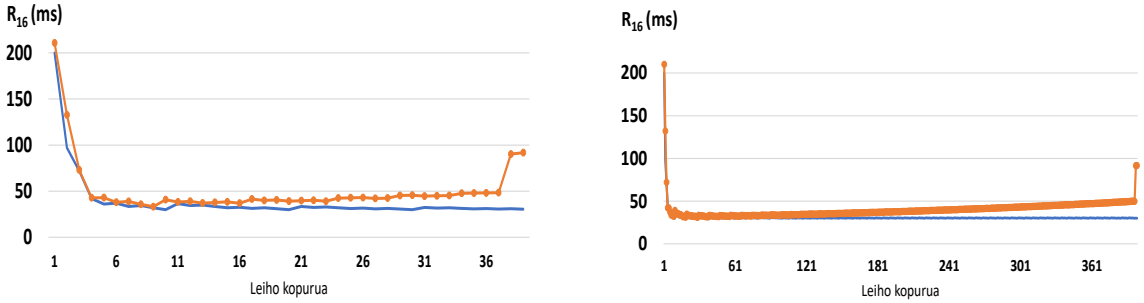
Partizioari esleituriko denbora totala eta testuinguru-aldaketarako denbora zein den jakinda, konfiguratu daitezken partizio leiho kopuru maximoaren (NW_{P1}) kalkulua halaxe da:

$$NW_{P_1} = \lfloor (AU_{P_1} - U_{P_1}) * \frac{MAF}{CS} \rfloor \quad (1)$$

(7.-9.) irudietan partizio konfigurazio desberdinetako kasurik txarreneko erantzun-denborak ikusi daitezke. AU_{P1}-ren balio desberdinetarako erantzun-denborak kalkulatu dira, partizio leiho kopurua 1etik NW_{P_1}-ra. Aztertutako prozesamendu denbora erabilera balioak lehengo berdinak dira, hots, %40 7.irudian, %50 8. irudian eta %60 9. irudian).

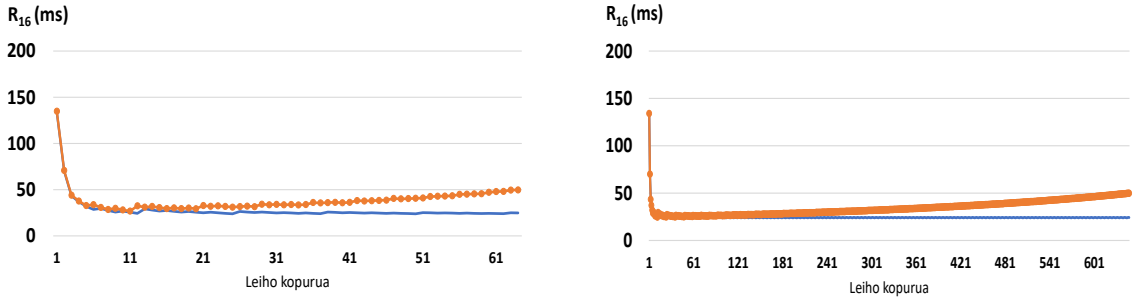
Kualitatiboki, AU_{P1}-ren balioa edozein dela, erantzun-denboraren eboluzioa berdina da beti: balio maximoa partizio leiho bakarra erabiltzen denean lortzen da, eta gutxituz doa kopurua igotzerakoan. Balio minimoetara heltzen denean, bi portaera nabarmendu behar dira. Batetik, egoera ideala suposatzen bada eta testuinguru-aldaketa denborak ez dira aintzat hartzen (lerro urdinak, $CS = 0$), erantzun-denbora egonkor mantentzen da partizio leiho kopurua handitzean. Bestetik, testuinguru-aldaketa denborak aintzat hartzen dituen analisian (lerro laranjak, $CS >$

0) erantzun-denborak gora egiten hasten dira leiho kopurua igotzerakoan. Izan ere, prozesamendurako erabilgarri ez dagoen denbora gero eta handiagoa da partizio leiho kopurua handitzen bada, eta lehen azaldu den bezala, horrek erantzun-denborak nabarmen igotzea dakar.



(a) $CS = 200\mu$s (b) $CS = 20\mu$s

7. Irudia: Kasurik txarreneko erantzun-denborak partizio leiho kopuruaren arabera - $AU_{P_1} = 40\%$

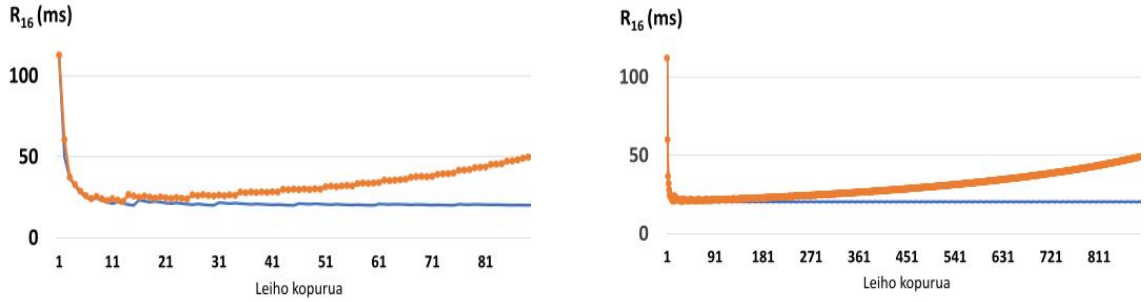


(a) $CS = 200\mu$s (b) $CS = 20\mu$s

8. Irudia: Kasurik txarreneko erantzun-denborak partizio leiho kopuruaren arabera - $AU_{P_1} = 50\%$

4. Ondorioak

Artikulu honetan partizioetan oinarritutako denbora errealeko sistemen planifikagarritasuna ebaluatu dugu, hainbat konfigurazio parametrok duten eragina aztertuz. Proposatutako sistema ereduak partizioen testuinguru-aldaketa denbora aintzat hartzen du, eta kasurik txarreneko erantzun-denbora kalkulatzean eragin garrantzitsua dutela baieztatu da. Gero, erantzun-denboraren kalkuluan partizioek eskuragarri duten denborak nola eragiten duen ebaluatu da, bai eta denbora hori leiho kopuru ezberdinetan banatzearen araberako efektua ere. Ondorio orokorra partizio



(a) $CS = 200\mu$s (b) $CS = 20\mu$s

9. Irudia: Kasurik txarreneko erantzun-denborak partizio leiho kopuruaren arabera - $AU_{P_1} = 60\%$

leihoak gehitzea erantzun-denbora murriztea dakarrela dela esan daiteke. Testuinguru-aldaketa denboraren eraginez kasurik txarreneko erantzun-denborak berriz gora egiten duenez, leiho kopuru aproposa finkatu beharra dago aplikazioaren epea errespetatuko dela bermatzeko.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Lan honetatik abiatuta partizioen planifikazio algoritmo bat garatuko da, eginiko azterketaren ondorioak aintzat hartuta. Sistemaren konplexutasuna dela eta, baliteke pseudo-ausazko bilaketa algoritmo bat garatu behar izana, hala nola algoritmo genetiko bat (Kuijpers, 1996). Hala ere, lehenbizi heuristiko dedikatu batekin probatzea komenigarria da, lan honen bidez lortutako irakaspenak kasu gehienetara orokortu daitezkela ziurtatzeko. Bestalde, sistema ereduan aipatu diren zenbait planifikazio parametroren esleipena, hala nola lehentasunak, sarrerako parametro gisa erabili dira eta ez da haien eragina ebaluatu. Mota honetako azterketa bat egin daiteken arren, lehentasunak esleitzea bilaketa algortimoen betebehar bezala definitzea ere planteatu daiteke. Hala eta guztiz ere, kontuan hartu beharra dago bilaketa algoritmoak erabaki gehiago hartzera behartzean, gero eta motelagoak izango direla emaitzak konputatzeko, eta balizko soluzio optimoetara heltzeko probabilitatea nabarmen murrizten dela.

6. Erreferentziak

Amurrio, A., E. Azketa, J. J. Gutierrez, M. Aldea, eta M. G. Harbour. 2020. Response-time analysis of multipath flows in hierarchically-scheduled time-partitioned distributed real-time systems. *IEEE Access* 8.196700–196711.

Amurrio, Andoni, Ekain Azketa, J Javier Gutierrez, Mario Aldea, eta Jorge Parra. 2019. A review on optimization techniques for the deployment and scheduling of distributed real-time systems. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (in Spanish)* 16.249–263.

Audsley, Neil C, Alan Burns, Mike F Richardson, eta Andy J Wellings. 1991. Hard real-time scheduling: The deadline-monotonic approach. *IFAC Proceedings Volumes* 24.127–132.

Fang, Hongjie, eta Roman Obermaisser. 2017. Execution environment for mixed-criticality train applications based on an integrated architecture. In *2017 International Conference on Promising Electronic Technologies (ICPET)*, 1–7. IEEE.

Green Hill Software. Integrity RTOS.

Hamelin, Etienne, Moha Ait Hmid, Amine Naji, eta Yves Mouafo-Tchinda. Selection and evaluation of an embedded hypervisor: application to an automotive platform. Proceedings of the 10th Embedded Real-Time Systems International Congress (ERTS 2020).

IEC. 2010. IEC 61508: Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems Part 1: General requirements.

J.J. Gutiérrez, J.C. Palencia and M. González Harbour. 2000. Schedulability analysis of distributed hard real-time systems with multiple-event synchronization. In *Proceedings 12th Euromicro Conference on Real-Time Systems. Euromicro RTS 2000*, 15–24. IEEE.

Kuijpers, Cindy. 1996. Algoritmo genetikoak saltzaile ibiltariaren probleman: Gipuzkoako bira egokiaren atzetik. *Elhuyar* 22.10–30.

Liu, Chung Laung, eta James W Layland. 1973. Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard-real-time environment. *Journal of the ACM (JACM)* 20.46–61.

Masmano, Miguel, Ismael Ripoll, Alfons Crespo, eta J Metge. Xtratum: a hypervisor for safety critical embedded systems. Proceedings of the 11th Real-Time Linux Workshop 2009, pages 263-272.

Palencia, J Carlos, Michael González Harbour, J Javier Gutiérrez, eta Juan M Rivas. 2016. Response-time analysis in hierarchically-scheduled time-partitioned distributed systems. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 28.2017–2030.

Palencia, Jose Carlos, eta Michael González Harbour. 1998. Schedulability analysis for tasks with static and dynamic offsets. In *Proceedings 19th IEEE Real-Time Systems Symposium (Cat. No. 98CB36279)*, 26–37. IEEE.

Stallings, William, Itziar Mendizabal, eta Idoia Santamaria. 2008. *Sistema eragileak: barnekoak eta diseinuko printzipioak*. Servicio Editorial Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea.

Stankovic, John A. 1988. Misconceptions about real-time computing: A serious problem for next-generation systems. *Computer* 21.10–19.

7. Eskerrak eta oharrak

Oharra: Lan honen edukia International Conference on Reliable Software Technologies (AEiC 2021) kongresuan aurkeztuko den ekarpenetik eratorria da. Izenburu originala *"How windows size and number can influence the schedulability of hierarchically-scheduled time-partitioned distributed real-time systems"* da. Egileak: Andoni Amurrio, Mario Aldea, J. Javier Gutiérrez eta Ekain Azketa.

Eskerrak eman nahi dizkiet nire zuzendariei. Batetik, Ikerlaneko Ekain Azketari, eta bestetik, Kantabriako Unibertsitateko Mario Aldea eta J. Javier Gutiérrezi. Udako Euskal Unibertsitateari ere nire esker ona adierazi nahi diot, IkerGazte bezalako komunitateak bultzatzeagatik eta, oro har, euskararen alde eginiko lanarengatik.

Zeharkako ebaketa prozesuaren parametroen eragina erresistentzia handiko altzairuzko xafla lodietan

Abedul, D.[1], Galdos, L.[1], Saenz de Argandoña, E.[1], Silvestre, E.[2]
Mondragon Unibertsitatea – Mondragon Goi Eskola Politeknikoa[1],
Fagor Arrasate S. Coop.[2]
dabedul@mondragon.edu

Laburpena

Zeharkako ebaketa prozesuak metalezko bobinak ebakitzeko edo aurre-formatuen murrizketetarako erabiltzen dira. Ebaketa eragiketaren emaitzak, ebaketa kalitateari eta prozesuaren indarrei dagokienez, prozesuaren parametroen eta materialaren portaeraren araberakoak dira. Prozesuaren parametroen ondorioak zehazteko, ebaketa prototipo hidrauliko bat erabiltzen da zeharkako ebakidura eragiketak eginez 10 mm-ko lodiera duen erresistentzia handiko altzairuzko xafla batean. Emaitza hauek prozesuaren indar eskakizunak ulertzen eta bezeroen ebaketa kalitatearen baldintzak betetzen lagunduko dute.

Hitz gakoak: Zeharkako ebaketa, prozesuaren parametroak, xafla lodiak, ebaketa indarrak eta ebaketaren kalitatea.

Abstract

Transversal cutting processes are usually employed for metal coil cutting or precut reduction operations. The final result of a cutting operation, in terms of sheared edge quality and process forces, is dependent on the process parameters and on the material's behavior. In order to determine the effects of the process parameters, an hydraulic blanking prototype is employed to perform transversal cutting operations on a High Strength Steel plate with 10 mm of thickness. These results will help to understand the force requirements of the process and to meet customers' sheared edge quality requirements.

Keywords: Transversal cutting, process parameters, thick plates, cutting forces and sheared edge quality.

1. Sarrera eta motibazioa

Ebaketa prozesuak asko erabiltzen dira txapa konformatzeko industrian. Gaur egun, hainbat prozesu daude mota honetako eragiketak egiteko, hala nola, laser bidezko ebaketa, plasma bidezko ebaketa, ur bidezko ebaketa eta ebaketa mekanikoa. Zaharrenak izanda ere, ebaketa mekanikoko prozesuak industrian erabili ohi dira aipatutako beste prozesuekin alderatuta ekoizpen tasa altuak dituztelako. Bestalde, makinaren indar handiko eskakizunak eta materialaren deformazio handiak suposatzen dituzte.

Azkenaldian, industrian errendimendu handiko materialak erabiltzeko joera egon da, hala nola automobilgintzan, eta horrek erresistentzia handiko altzairuen erabilera ekarri du. Gainera, industria-segmentu astunek altzairuzko xafla lodiak ($\geq$ 5 mm-ko lodiera) erabiltzen dituzte, ontzigintza, eraikuntza edo petrolio industrietan adibidez. Bi faktoreek, materialen erresistentzia handiek eta xaflen lodiera handiek, ebaketa eragiketa egiteko indar eta energia handiak aplikatzea eragiten dute. Xaflak ebakitzeko makina fabrikatzaileek interes handia erakusten dute erresistentzia eta lodiera ezberdineko materialak ebakitzeko indar eta energia eskakizunetan hainbat eragiketa baldintzetan.

Argitalpen honetan, zeharkako ebaketa prozesuko bi parametroen eraginak aztertuko dira (ebaketa jokoa eta ebaketa angelua), bai prozesuaren indar-desplazamendu kurbetan, bai lortutako ebaketa kalitatean. Analisi hau egiteko, erresistentzia handiko altzairuzko xafla lodi bat aukeratu da, zehazki 10 mm-ko lodierako xafla.

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

2.1. Arloko egoera

Ebaketa-prozesuei buruzko ikerketak xafla meheko (<5 mm-ko lodiera) ebaketa eragiketetara bideratu dira batez ere, bereziki automobilgintzako aplikazioetarako, indar eta energia eskakizun nahiko baxuak izanik. MacKensen et al. (2010) argitalpenean, xaflaren orientazioaren, ebaketa angeluaren eta ebaketa jokoaren indarra murrizteko ahaltasunaren azterketa egin zuten. Material bezala, 300-1000 MPa bitarteko erresistentziako altzairuzko xaflak aukeratu zituzten, milimetro 1-eko lodieran. Behrens et al. (2014) artikuluan ere milimetro 1-eko lodierako altzairuzko xaflak erabili zituzten, 1000 MPa-eko erresistentziarekin. Kasu honetan, ebakitako ertzaren kalitatea ebaluatzeko modelizazio numerikoa erabili zuten, materialaren portaeran deformazio-abiadura eta tenperatura mendekotasuna kontuan hartuta. Hartmann et al. (2021) argitalpenean, deformazioa, deformazio-abiadura eta pitzaduraren bilakaera zeharkako ebaketa prozesuan aztertu zituzten, 4 mm-ko lodierako S355MC altzairu xafla baten, abiadura handiko kamera eta “Digital Image Correlation” teknika konbinatuz.

Bestalde, literaturan xafla lodien ebaketari buruzko argitalpenak ere aurkitu dira. Gustafsson et al. (2016) ebaketa jokoaren eta zapalketaren eraginak aztertu zituzten ebaketa indarretan, alboko indarretan, eta kalitatean, 5-6 mm-ko lodierako eta 300-1300 MPa bitarteko erresistentziako xafletan. Demmel et al. (2015) artikuluan tenperatura neurketak egin zituzten puntzonaketa fineko eragiketetan S355MC 6 mm-ko lodierako altzairuzko xafla batekin. Beroak sortutako puntzoiaren eta altzairuzko xaflaren arteko potentzial ezberdintasuna neurtu dute eragiketan sortutako kontaktua aprobetxatuz, ebakitako zonaldean lortutako tenperatura zehaztuz.

2.2. Ikerketaren helburuak

Arloko egoera aztertu ostean, xafla finetan lan asko egin dela ondoriozta daiteke, xafla lodien azterketa baztertuz. Honengatik, argitalpen honen ikerketa lerroa xafla lodien zeharkako ebaketa prozesuetan oinarritu da. Zehazki, zeharkako ebaketa eragiketaren indar-desplazamendu kurbetan eta ebaketa kalitatean eragina duten prozesuaren bi parametro aztertu dira:

- Ebaketa jokoa: aihotzen arteko distantzia.
- Ebaketa angelua: aihotzen arteko angelua.

Azterketa honen ondorioz, bai ebaketa indar maximoan, bai ebaketa energian eta bai ebaketa kalitatean ematen diren aldaketak zehaztu nahi dira.

3. Ikerketaren muina

3.1. Zeharkako ebaketa prozesurako prototipoa

Fagor Arrasate S. Coop-ek, xafla prozesatzeko lerroen fabrikatzaileak, zeharkako ebaketa prototipo hidrauliko bat diseinatu eta fabrikatu du, lodiera handiko xafletan zeharkako ebakidura prozesuaren karakterizaziora bideratua. Prototipoa 5 mm eta 25 mm arteko lodierak eta 600 mm-ko zabalerako xaflak ebakitzeko diseinatuta dago, 2000 kN-eko ebaketa indar maximoa emanez. Zilindro hidrauliko nagusi batek (ebaketa indarra), bi zilindro hidrauliko (zapaltzeko indarra), bi gida lineal, goiko aihotza (mugikorra), beheko aihotza (finkoa) eta gurpileko mahai batek osatzen dute prototipoa.

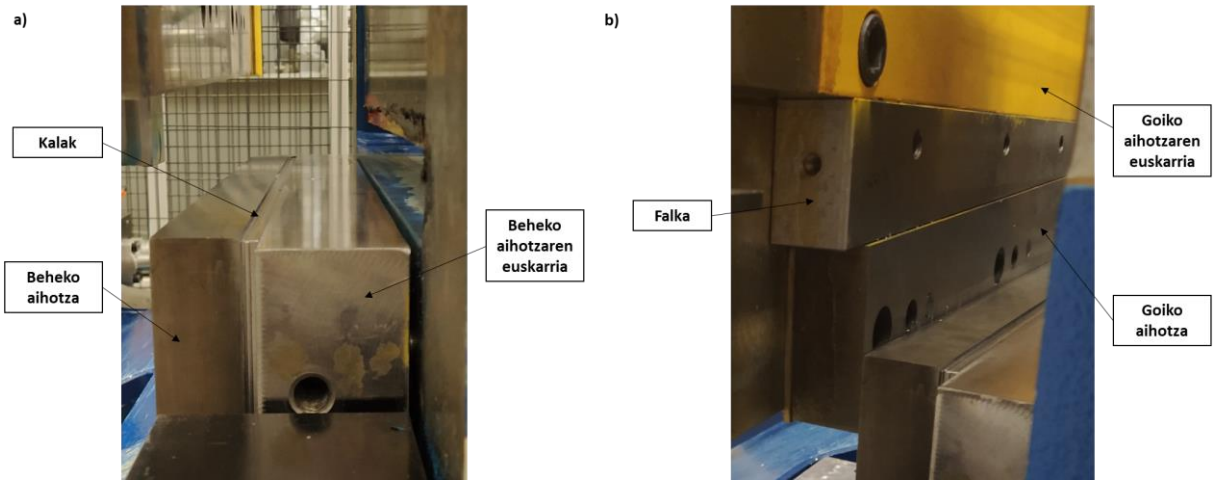
1. irudia. Zeharkako ebaketa prozesurako prototipo hidraulikoa.

Prototipo honetan prozesuaren parametro desberdinekin zeharkako ebakidura eragiketak egin daitezke. Ebaketa jokoa eta ebaketa-angelua erabiltzailearen nahiaren arabera alda daitezke. Bestalde, aihotz mugikorraren abiadura ezin da aldatu, 32 mm/s-tan egin daitezke entseguak soilik.

Ebaketa jokoa aldatzeko, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2 eta 4 mm-ko lodierako kalak erabiltzen dira. Beheko aihotzaren eta beheko aihotzaren euskarriaren artean kalak gehituz edo kenduz, bi aihotzen arteko distantzia murriztu edo handitu egiten da (ikusi 2. irudia). Behin ebaketa jokoa ezarrita dagoenean, aihotzen arteko tartea galga kalibratuekin neurtzen da erabiltzaileak nahi duen ebaketa jokoa ezarri dela egiaztatzeko.

Ebaketa angelua aldatzeko, goiko aihotzaren eta goiko aihotzaren euskarriaren artean angelu ezaguneko falka bat kokatzen da, aihotzari inklinazio bat emanez (ikusi 2. Irudia). Gaur egun, hiru ebaketa angelu ezarri daitezke prototipo honetan: 1.5º, 2.25º eta 3º.

2. irudia. a) Ebaketa jokoa aldatzeko zatien konfigurazioa eta b) ebaketa angelua aldatzeko zatien konfigurazioa.



Indarrak bi norabideetan neurtu daitezke prototipoan. Alde batetik ebaketa indarra, bertikalean, bi presio zundekin neurtzen da. Zilindro hidraulikoko bi ganberen presioaren ezberdintasuna neurtuz prozesuan ebatzeko egiten den indarra kalkulatu daiteke. Neurtu daiteken bigarren indarra xaflaren sarreraren norabidean da, ebaketa lerroa eta indarraren norabide perpendikularrean. Indar hau bi karga zelulen bitartez neurtzen da, bakoitzak 500 kN-eko kapazitatearekin.

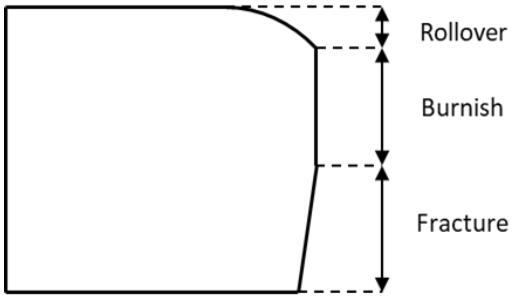
Azkenik, goiko aihotzaren desplazamendua ere neurtu daiteke. Horretarako, sentsore laser bat instalatu da prototipoan. Sentsore honek goiko aihotzaren kokapena neurtu dezake denboran zehar, eta ondorioz, bai aihotzaren desplazamendua eta bai abiadura neurtu daitezke.

Argitalpen honetarako 3 ebaketa jokorekin (lodierako %5, %10 eta %15-arekin) eta 3 ebaketa angelu ezberdinekin (1.5º, 2.25º eta 3º-rekin) egingo dira entseguak. Baldintza konbinazio bakoitzeko 3 saiakuntza egingo dira emaitzak errepikakorrak direla ziurtatzeko.

Saiakuntza guztiak egin ondoren, lortutako xafla zatiak makroskopio optiko batera (Leica DMS 1000) eramango dira ebaketaren kalitateko hurrengo zonalde ezaugarriak neurtzeko (ikusi 3. irudia):

- "Rollover"
- "Burnish"
- "Fracture"

3. irudia. Ebaketaren kalitateko zonalde ezaugarriak.



3.2. Materialaren propietateak

Argitalpen honetan adierazten den ikerketa burutzeko erresistentzia handiko altzairu bat aukeratu da, 10 mm-ko lodierako xafla formatuan eta beroko ijezketa prozesuarekin fabrikatuta. Materialaren propietate mekanikoak hurrengo taulan laburbiltzen dira:

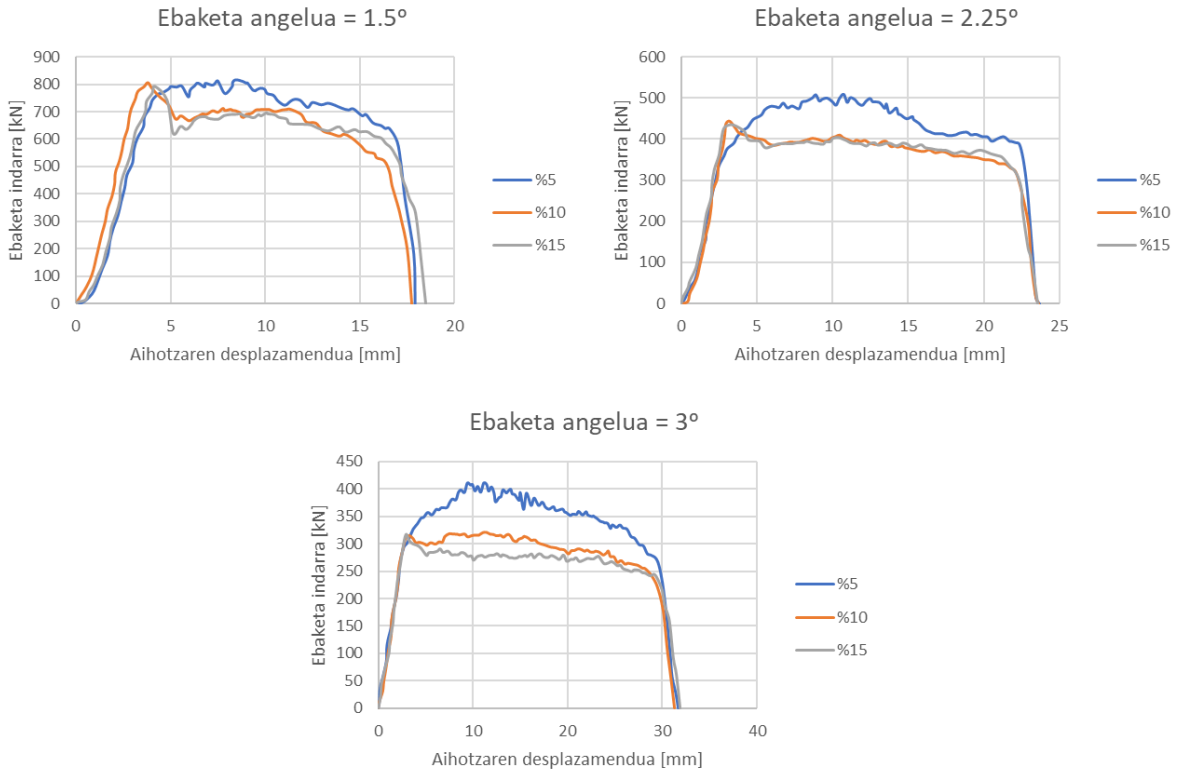
1. taula. Materialaren propietate mekanikoak.

Limite elastikoa [MPa]	Trakzioarekiko erresistentzia [MPa]	Elongazio maximoa [%]	Young-en modulua [GPa]
773.3	824.8	13.1	216.2

3.3 Emaitzak

Emaitzak aztertzeko, lortutako indar-desplazamendu kurbak begiratuz hasiko gara.

4. irudia. Ebaketa jokoarekiko lortutako indar-desplazamendu kurbak.



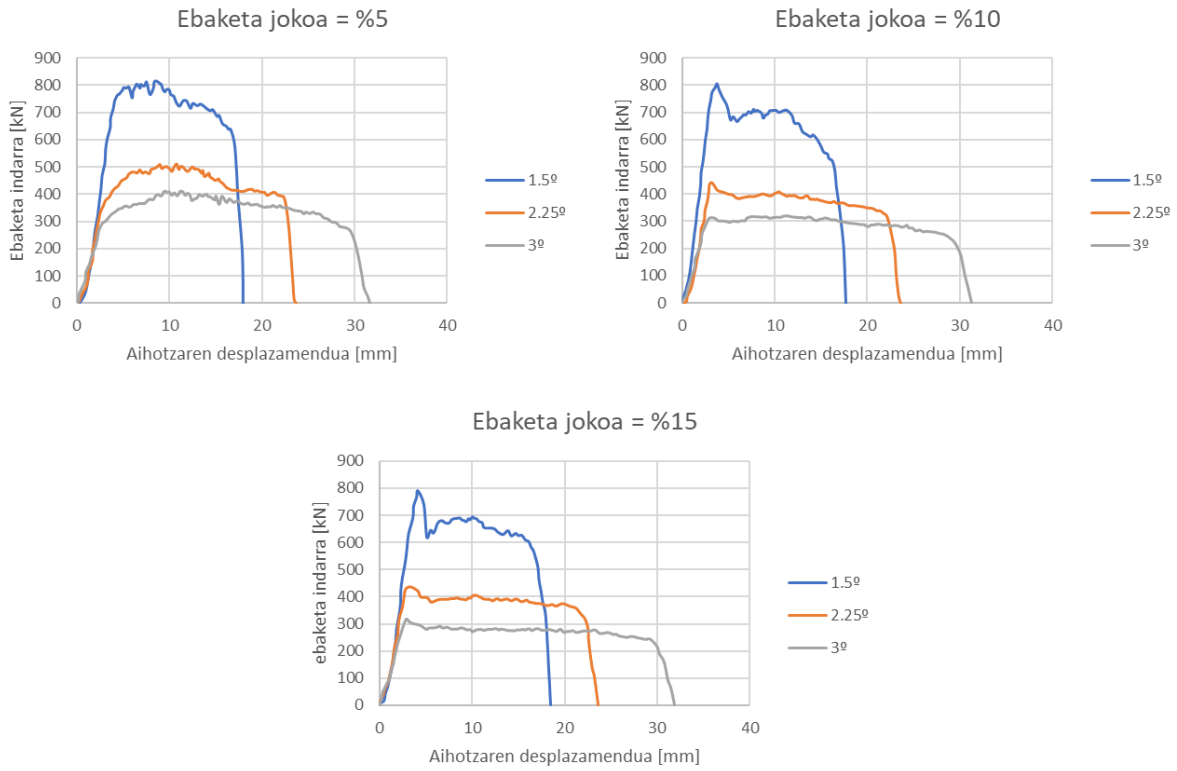
Ebaketa jokoak, bai ebaketa indar maximoan eta bai ebaketa energian (kurba azpian itxitako eremua) eragiten du, ebaketa angeluaren arabera emaitza ezberdinak emanez. 4. irudira begiratuz, argi ikus daiteke ebaketa angelu altuetan ebaketa jokorik txikienak eragin handia duela indar maximoan eta energian (ikusi 2. taula), baina %10 eta %15-eko jokoak konparatzerakoan ezberdintasun eskasak aurkitu daitezke. Angelu txikienarekin ordez, hiru kurben arteko ezberdintasunak murriztu egiten dira.

2. taula. Ebaketa energia neurketak .

		Ebaketa angelua		
		1.5°	**2.25°**	**3°**
Ebaketa jokoa	**%5**	11261 J	9492 J	10305 J
	%10	10494 J	8093 J	8542 J
	%15	10482 J	8218 J	8114 J

4. irudian atentzioa deitzen duen fenomenoa %10 eta %15-eko jokoekin ematen den indar gailurra da. Orokorrean, indarra hazi, limite batera ailegatu eta bertan mantendu egiten da indar murrizketa ailegatu arte, %5-eko jokoarekin gertatzen den bezala. Jokoa handitzean, geroz eta flexio distantzia gehiago uzten diogu xaflari, tentsio egoera aldatuz hausturara ailegatu arte. Tentsio egoeraren aldaketa horrek ezegonkortasunak sor ditzake materialaren haustura gertatzen den unean.

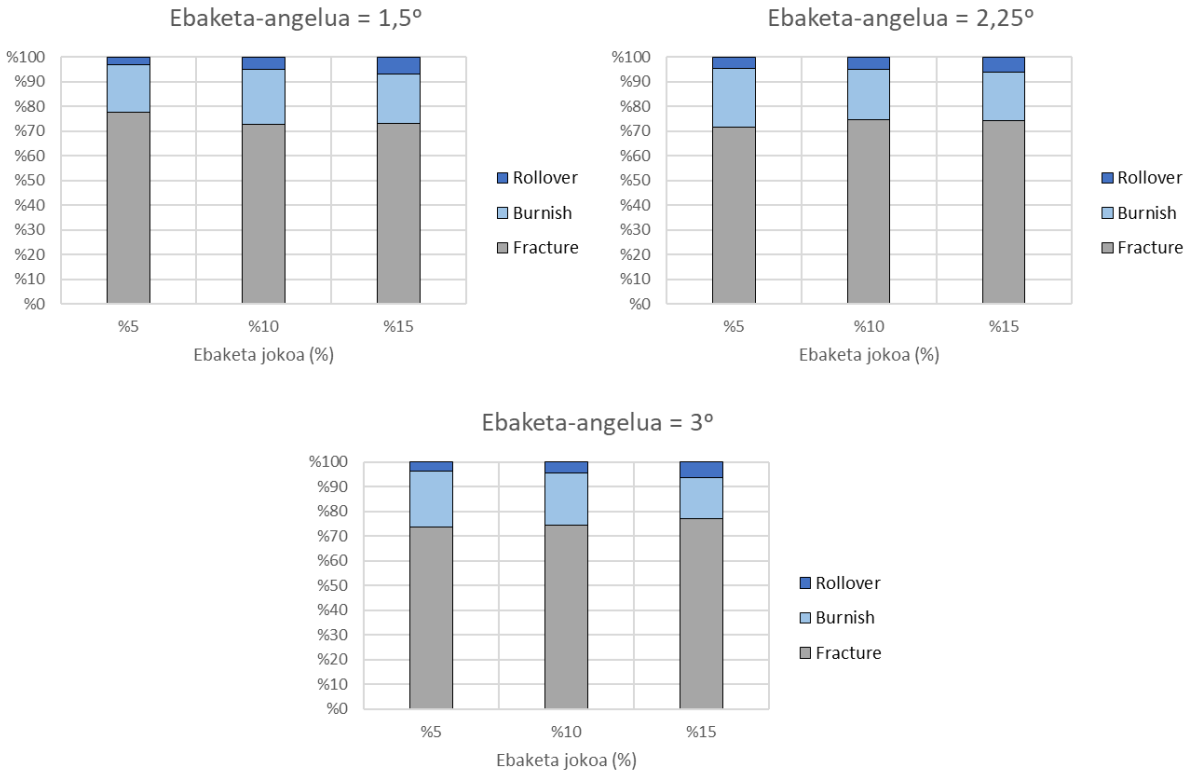
5. irudia. Ebaketa angeluarekiko lortutako indar-desplazamendu kurbak.



5. irudiak emaitza antzekoak adierazten ditu hiru ebaketa jokoentzako. Indar maximoaren murrizketa garrantzitsu bat lortzen da ebaketa angelua handituz, baina kontran, aihotzak eragiketa bukatzeko beharko duen desplazamendua handitu egiten da. Beraz, energia aldetik 2.25º eta 3º-ko ebaketa angeluak eraginkorragoak dira (ikusi 2. taula), eta aldi berean, indar maximoa murriztuz, malgutasun gehiago ematen die ebaketa lerro fabrikanteei makina ez hain zurrunak diseinatzeko.

Ebaketa kalitatea neurketaren azterketarekin jarraituz, makroskopio optikoarekin argazkiak atera dira ebatutako gainazalari aurrez aurre begira, gero neurketak argazkietan bertan egin ahal izateko. 6. irudiak neurketa hauen ideia bat ematen digu.

6. irudia. Neurtutako ebaketa kalitatearen zonalde ezaugarrien dimentsioak.



Neurketek erakusten dutenez, ebaketa jokoak eta ebaketa angeluak eragin txikia dute ebaketa kalitatean. Ebaketa jokoa handitzean, “rollover” zonaldea handitu egiten da eta “burnish” zonaldea, aldiz, murriztu. Hau da, aihotzen arteko distantzia handitu egiten da eta material-fluxua erraztu egiten da deformazio handiagoak lortuz. Hala ere, saiatutako ebaketa jokoen arteko ezberdintasunak ez dira garrantzitsuak kalitateari begira. Horrez gain, ebaketa angeluak ez du kalitatean aldaketarik adierazten aztertutako material honetan.

4. Ondorioak

Egindako saiakuntzekin lortutako emaitzak aztertu ostean, ikerketa argitalpen honetatik atera daiteken ondorioak hurrengoak dira:

- Ebaketa joko baxuek bai indar maximoa eta bai beharrezko energia handitzen dute. Aldiz, ez dute kalitatean hobekuntzarik ematen. Beraz, material honetan ez da komeni lodierako %10-eko ebaketa jokoak baino txikiagoak erabiltzea.
- Ebaketa angeluaren eragina indar maximoan ebaketa jokoarena baino askoz handiagoa da. Ebaketa angelua handitzean, aldiune bakoitzean ebatzen den material kantitatea murriztu egiten da, eragiketa luzatuz baino indarra murriztuz. Lortutako emaitzen arabera, 3º-ko ebaketa angelua erabiltzea komenigarria izango litzateke material honekin, indar maximoa murrizteko energia mantentzen den bitartean.
- %10-eko ebaketa jokotik gora indar gailur bat sortzen da lortutako kurba guztietan. Izan daiteke aihotzen arteko distantzia handitzerakoan ezegonkortasun bat sortzea aihotzak materialean sartu eta apurtu egiten duen bitartean.
- Ebaketa kalitatearekiko, ebaketa angeluek eta jokoek ez dute eragin handirik adierazten material honetan.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Etorkizunerako lan bezala, argitalpen honetan egindako analisia material berdineko beste lodierako xafletan aplikatzea izango litzateke, bizarren neurketak gehituz. Azterketa berri honek, hirugarren parametro baten eragina gehituko luke ikerketara, xaflaren lodiera. Bide honetatik, beste egileek xafla finetan egin duten lana xafla lodietan aplikatu daiteken argituko luke.

Prozesuaren parametroez gain, abiadura handiko kamera baten bidez xaflan lortutako deformazioak eta deformazio abiadurak ezagutzea eta kamera termografiko baten bidez prozesuak xaflan eragindako tenperatura igoera neurtzea interesgarria izango litzateke. Informazio honek zer neurri heinetan karakterizatu behar den materiala zehaztuko luke, gero simulazioen bidez prozesua sakonki aztertu ahal izateko.

6. Erreferentziak

Behrens B. A., Bouguecha A., Vucetic M., Krimm R., Hasselbusch T., eta Bonk, C. (2014): "Numerical and experimental determination of cut-edge after blanking of thin steel sheet of DP1000 within use of stress based damage model", *Procedia Eng.,* 81, 1096-1101.

Demmel P., Hoffmann H., Golle R., Intra C. eta Volk W. (2015). "Interaction of heat generation and material behaviour in sheet metal blanking", *CIRP Ann. – Manuf. Technol.,* 64, 249-252.

Gustafsson E., Oldenburg M. eta Jansson A. (2016). "Experimental study on the effects of clearance and clamping in steel sheet metal shearing", *J. Mater. Process. Technol.,* 229, 172-180.

Hartmann C., Weiss H. A., Lechner P., Volk W., Neumayer, S., Fitschen, J. H. eta Steidl, G. (2021): "Measurement of strain, strain rate and crack evolution in shear cutting", *J. Mater. Process. Technol.,* 288, 116-127.

MacKensen A., Golle M., Golle R. eta Hoffmann H. (2010): "Experimental investigation of the cutting force reduction during the blanking operation of AHSS sheet materials", *CIRP Ann. – Manuf. Technol.,* 59, 283-286.

7. Eskerrak eta oharrak

Egileek eskerrak eman nahi dizkiete bai Fagor Arrasateri doktoretza honen finantzaketa burutzeagatik eta Mondragon Goi Eskola Politeknikoko teknikariei, ebaketa prozesurako prototipoa instalatzeagatik eta martxan jartzeagatik.

Abiadura handiko entseguak egiteko forjaketa-mailu baten garapena

Agirre, J., Arrese, P., Otegi, N., Galdos, L.
Materialak Eraldatzeko Prozesu Aurreratuen ikerketa taldea, Mondragon Unibertsitatea, Loramendi 4, 20500 Arrasate, Gipuzkoa
jagirreb@mondragon.edu

Laburpena

Mailu bidezko forjaketa prozesua era askotariko propietate mekaniko altuko piezak fabrikatzeko erabiltzen da. Forjaketa prozesu hauek egoki diseinatzeko, geroz eta gehiago erabiltzen dira elementu finitu bidezko simulazio softwareak. Software hauen sarrera-datuak egokiak izatea berebizikoa da simulazioen emaitzak fidagarriak izan daitezen, horien artean materialaren portaera definitzea atal garrantzitsuenetakoa delarik. Zoritxarrez, deformazio abiadura handian materialek duten portaera mekanikoa karakterizatzeko entsegu-makina komertzial oso gutxi daude. Hutsune hori betetzeko garatu den laborategi eskalako forjaketa-mailu berri bat aurkezten da artikulu honetan. Makina berri honetan egindako entseguetako emaitzen azterketa egin da, lortutako emaitzak itxaropentsuak izanik.

Hitz gakoak: Mailu-forjaketa, abiadura handiko entseguak, materialen karakterizazioa

Abstract

Hammer forging is a widely employed manufacturing process to produce parts with excellent mechanical properties. In order to achieve an optimal process design, finite element modelling is broadly utilized in industry and research. It is well known that to obtain accurate simulation results, accurate material characterization have to be performed. Although material behaviour of metals under hammer forging conditions are of great industrial interest, few materials have been tested in such high strain rates due to the lack of laboratory machines for high-speed testing. With the objective of addressing that gap, this paper presents a novel automatic forging simulator comprised of an instrumented forging hammer capable of performing high-speed deformations. In this work, results of high strain rate tests performed on the developed hammer were evaluated obtaining promising conclusions.

Keywords: Hammer forging, high-speed testing, material characterization

1. Sarrera eta motibazioa

Forjaketa prozesua propietate mekaniko altuko piezak lortzeko erabiltzen den fabrikazio prozesu garrantzitsuenetarikoa da. Prozesu honetan, geometria sinpleko pieza bat (sekzio zirkular edo errektangeluarrekoa, normalean) plastikoki deformatzen da bi estanpen artean geometria konplexuko pieza lortu arte (Semiatin, 2005). Forjaketa prozesua erakargarria da pieza kopuru handiak fabrikatu behar direnean edota propietate mekaniko oso altuko piezak lortzea nahi denean. Propietate mekaniko altu hauek forjaketa prozesu bidez soilik lortu daitezke kasu askotan (Altan eta Ngaile, 2005). Adibide gisa, Inconel 718 nikel superaleazioaren kasuan, galdaketa bidez fabrikatutako pieza baten giro tenperaturako limite elastikoa 940 MPa den bitartean, forja bidez fabrikatutakoarena 1192 MPa izan daiztezke (Trosch et al., 2016).

Forjaketa prozesurako prentsa mota ezberdinak erabili daitezke, gehien erabiltzen direnak prentsa hidrauliko eta mekanikoak eta mailuak direlarik (Dieter et al., 2003). Prentsa hidraulikoetan, pieza deformatzeko indarra zilindro hidrauliko bitartez egiten da eta aurrez aipatutako prentsen artetik motelenak dira, 10 s^{-1}-eko deformazio abiadura maximoak lortzeko gaitasunarekin (Semiatin, 2005). Prentsa mekanikoei dagokienez, deformazio indarra lortzen da motor elektriko baten biraketa-higidura mugimendu lineal bihurtuz sistema mekaniko baten bitartez. Prentsa mota hauetan, 30 s^{-1}-ko deformazio abiadura maximoak lortu daitezke. Amaitzeko, forjaketa-mailuen kasuan, pieza abiadura handiko talka bidez deformatzen da. Talka-abiadura handiak lortzeko, deformazio estanpak presio handiko zilindro pneumatiko bidez bultzatzen dira normalean. Mailuen kasuan, lortzen diren deformazio abiadurak aurrez aipatutako prentsetan baino askoz handiagoak dira, 100 s^{-1} eta 500 s^{-1} bitartean kasu

askotan (Bhujangrao et al., 2020; Prasad et al., 2015). Artikulu honetan aurkezten den ikerketa mailu bidezko forjaketan oinarritzen da.

Mailu-forjaketa prozesuen diseinu fasean gaur egun gehien erabiltzen den erreminta elementu finitu bidezko simulazioa da. Simulazio hauek osatzeko, simulazio softwarean sarrera-datu ezberdinak zehaztu behar dira, besteak beste, prentsaren zinematika, piezaren hasierako tenperatura, pieza eta estanpen arteko interakzioa, eta piezaren materialaren portaera (Chen et al., 2018). Jakina da simulazioen emaitzaren zehaztasuna simulaziora sartzen diren sarrera-datuen araberakoa dela.

Materialen portaerari dagokionez, sartu beharreko datu bat materialaren erresistentzia da, hau da, materialaren tentsio-deformazio kurba tenperatura eta deformazio abiadura ezberdinetara. Mailu-forjaketan materiala abiadura handian deformatzen da eta jakina da materialaren erresistentzia deformazio abiaduraren arabera aldatzen dela, zenbat eta azkarrago deformatu materiala orduan eta erresistentzia handiagoa izango du materialak. Forjaketa prozesuetako materialen tentsio-deformazio kurbak esperimentalki eskuratzeko egiten den entsegu ohikoena konpresio entsegua da (Semiatin, 2005).

Deformazio abiaduraren eragin handia kontuan hartuta, ezinbestekoa da mailu-forjaketa baldintzetan materialek duten portaera ondo ezagutzea prozesuen diseinu egokia egiteko. Atal honek berebiziko garrantzia duen arren, ikerketa oso gutxi egin dira deformazio abiadura handietan (> 100 s^{-1}) materialek duten portaera aztertzeko (Bhujangrao et al., 2020). Ikerketa-hutsune honen arrazoi nagusiena da abiadura handian materialak karakterizatzeko laborategi-makina komertzial gutxi daudela eskuragarri. Alde batetik, laborategietan materialen karakterizaziorako erabiltzen diren entsegu-makina konbentzionalak abiadura motelean (<10 s^{-1}) entseatzeko gai dira soilik eta ezin dira abiadura handiagotako entseguak egiteko erabili. Bestalde, abiadura oso handietako entseguak egiteko “Split Hopkinson Pressure Bar” (SHPB) izeneko makinak erabiltzen dira. Zoritxarrez, makina mota hauekin lortu daitezkeen deformazio abiadurak (> 1000 s^{-1}) mailu-forjaketa prozesuetan lortzen direnak baino askoz handiagoak dira (100 s^{-1}–500 s^{-1}) eta SHPB-ek zailtasunak aurkezten dituzte deformazio abiadura txikiagoak entseatzeko (Xu et al., 2017).

Mailu-forjaketa baldintzetan materialek duten portaera karakterizatzeko entsegu-makina oso gutxi daudela kontuan hartuta, artikulu honetan entsegu-makina berri bat aurkezten da zeina gai den abiadura altuko konpresio entseguak egiteko Laborategi eskalako entsegu-makina berri hau gai da forjaketa prozesuetan materialek izan ditzaketen askotariko baldintzak errepikatzeko. Horretarako, lau atal nagusi ditu: beroketa labea, probeta abiadura baxuan deformatzeko laborategi eskalako prentsa hidraulikoa, probeta abiadura handian deformatzeko forjaketa-mailua eta hozketa-ontzia. Ikerketa hau forjaketa-mailuan oinarritu da, ekarpen zientifiko gehien izateaz gain, konplexutasun eta berezitasun gehiago dituen makinako atala delako.

Artikulu honetan aurkezten den abiadura handiko entsegu-makinaren zailtasun nagusiena entseguan zeharreko datuak egoki eskuratzea da, entseguak abiadura handian egiten direlako, hain zuzen. Hori kontuan hartuta, abiadura handiko konpresio entseguetatik lortutako tentsio-deformazio kurbak fidagarriak direla bermatzeko, forjaketa-mailuan egindako konpresio entseguetako emaitzak laborategi-makina komertzial bateko emaitzekin konparatu dira. Forjaketa-mailuan entseguak abiadura handian eta makina komertzialean abiadura txikian egin direnez, emaitzak konparagarriak izateko kobrezko probetak erabili dira. Izan ere, kobreak abiadura baxuan eta altuan duen portaera oso antzekoa da eta asko erabili da industriako forjaketa-mailuak karakterizatzeko (Galdos et al., 2014).

2. Ikerketaren helburuak

Sarreran aipatuta da mailu bidezko forjaketa prozesuetan materialek duten portaera mekanikoa ezagutzea ezinbestekoa dela forjaketa prozesua egoki diseinatu ahal izateko. Zoritxarrez, abiadura handiko deformazioetan materialek duten portaera karakterizatzeko entsegu-makina komertzial oso gutxi daude eskuragarri.

Motibazio edo ikerketa-hutsune hori kontuan hartuta, ikerketa honen helburuak bi dira:

- Alde batetik, mailu-forjaketa baldintzetan materialek duten portaera mekanikoa karakterizatzeko laborategi-makina bat garatzea.
- Bestetik, garatutako laborategi-makinan egindako abiadura handiko konpresio entseguen emaitzen fidagarritasuna aztertzea.

Behin laborategiko forjaketa-mailuan eskuratu daitezkeen emaitzen fidagarritasuna bermatuta, material ezberdinen abiadura handiko portaera aztertzea da etorkizunera begira ezarritako xedea.

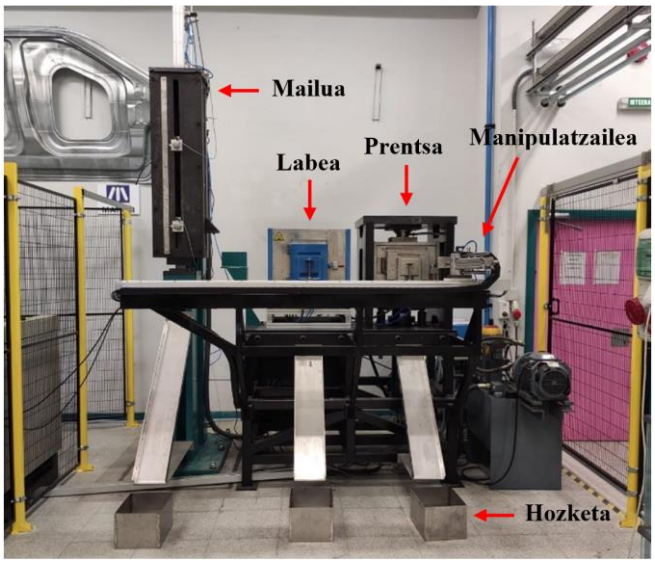
3. Ikerketaren muina

Aurreko atalean zehaztutako bi helburuak kontuan hartuta, 3. atala bi azpi-ataletan banatu da.

3.1. Forjaketa-mailuaren garapena

Sarreran esan bezala, laborategiko entsegu-makina komertzial gutxi daude eskuragarri mailu-forjaketa prozesuetako deformazio abiadurak lortzeko gai direnak (100 s^{-1}-500 s^{-1}). Hutsune hori betetzeko, laborategi mailako forjaketa simulagailu esperimental bat garatu eta eraiki da (1. irudia). Forjaketa simulagailu automatiko hau materialen karakterizaziorako entsegu ezberdinak egiteko garatu da, besteak beste, konpresio, ebaketa edota talka entseguak. Lau atalez osatuta dago: beroketa labea (max. 1350ºC), probeta abiadura baxuan deformatzeko prentsa hidraulikoa, probeta abiadura handian deformatzeko forjaketa-mailua eta hozketa-ontziak. Entseguen errepikakortasuna bermatu eta manipulazio denborak optimizatzeko, entsegu-probetaren manipulazioa automatikoki egiten da entsegu hasieratik amaierara sistema elektro-pneumatiko baten bitartez.

1. irudia. Garatutako forjaketa simulagailua



Artikulu honetan egin den ikerketa forjaketa-mailuan oinarritu da, esan bezala, ekarpen zientifiko gehien izateaz gain konplexutasun eta berezitasun gehiago dituen deformazio-modulua delako. Forjaketa-mailua, funtsean, zilindro pneumatiko batek abiadura handian bertikalki bultzatutako masa bat da. Masa hori 5 m/s-ko abiadura maximora jaurti daiteke, probetaren geometriaren arabera, 300 s^{-1}-eko deformazio abiadurak lortzeko gaitasunarekin. Konpresio entsegu konbentzionaletan, probetaren entseguan zeharreko deformazio abiadura (1) formula erabilita kalkulatzen da:

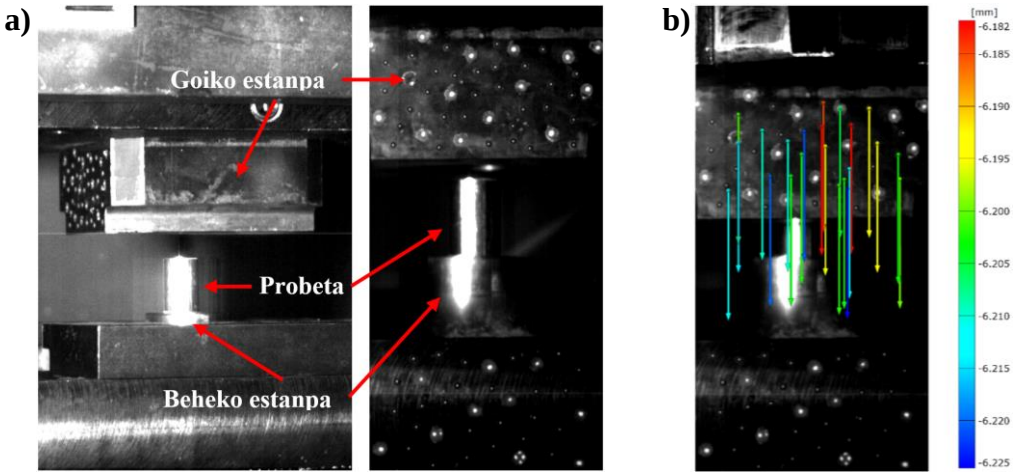
$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{h} \qquad (1)$$

non v deformazio-estanpak momentu oro duen abiadura eta h probeta zilindrikoak momentu oro duen altuera diren. Lortu daitekeen deformazio abiadura hori kontuan hartuta, laborategi-

makina honek mailu bidezko forjaketan ematen diren baldintza guztietan materialak duen portaera aztertzea ahalbidetzen du.

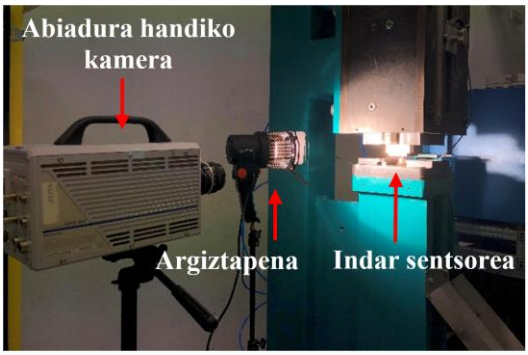
Entseguan zehar datuak eskuratzeko bi teknika erabiltzen dira. Alde batetik, goiko estanparen talka-zinematika neurtzeko Photron Fastcam-APX RS250K abiadura handiko kamera erabiltzen da. Kamera honekin 250.000 fps-erarteko maiztasunarekin grabatu daiteke eta ikerketa honetako entseguetan 15.000 fps-eko grabaketa-maiztasuna erabili da. Grabaketetatik deformazio zinematika eskuratzeko Irudi Korrelazio Digitala ("Digital Image Correlation" (DIC)) teknika erabili da (2. irudia).

2. irudia. a) Forjaketa-mailuaren elementuak eta b) DIC teknikaren bidez eskuratutako zinematika



Entseguaren zinematikaz gain, talkan zehar probeta deformatzeko egin den indarra ere eskuratzen da. Horretarako, beheko estanparen barruan dagoen Kistler 9106A indar sentsorea erabiltzen da eta ikerketa honetan 300 kHz-ko eskuratze-maiztasuna erabili da. 3. irudian ikus daiteke bi eskuratze sistemen muntaia.

3. irudia. Eskuratze sistemen muntaia



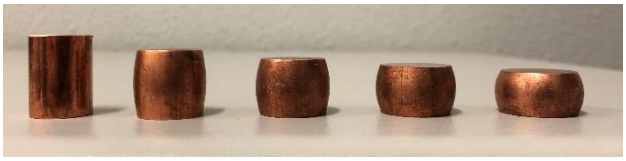
3.2. Emaitzen azterketa

Eraiki den forjaketa-mailuan egindako entseguen fidagarritasuna aztertzeko, konpresio entseguak egin dira lau abiadura ezberdinetara eta hotzetan. Artikuluan zehar irakurketa errazteko, mailuko abiadura baxuena (3,3 m/s) 1. kasu moduan izendatuko da, hurrengo abiadura (4,1 m/s) 2. kasua, hurrengoa (4,8 m/s) 3. kasua eta abiadura altuena (5,1 m/s) 4. kasu moduan izendatuko da. Mailuan egindako entseguetako emaitzekin alderatzeko, Instron-4206 laborategi makina unibertsalean abiadura baxuan entsegu mota bera egin da.

Sarrerako atalean esan bezala, material gehienak zenbat eta abiadura handiagoan deformatu orduan eta handiagoa da beraien erresistentzia, hots, orduan eta altuagoa da lortutako tentsio-deformazio kurba. Azterketa honetarako erabili den kobre puruaren kasuan, aldiz, deformazio abiadurak erresistentzian duen eragina ez da hain nabarmena. Hain zuzen ere, horrexegatik erabili izan dira kobre puruzko piezak industriako forjaketa-mailuen karakterizaziorako. Azterketa honetarako erabili diren kobrezko probeta zilindrikoek Ø15x22,5 mm-ko hasierako

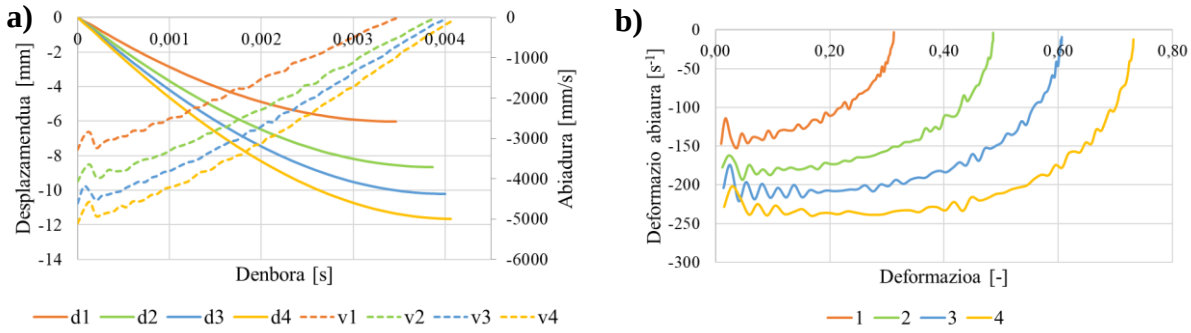
dimentsioa dute. Jarraian datorren 4. irudian probetaren hasierako dimentsioaz gain mailuan lau abiadura ezberdinetara entseatutako probetak ere ikus daitezke. Garbi ikus daiteke mailuaren abiadura zenbat eta altuagoa izan deformazio maila ere orduan eta handiagoa dela.

4. irudia. Mailuan entseatutako kobrezko probetak



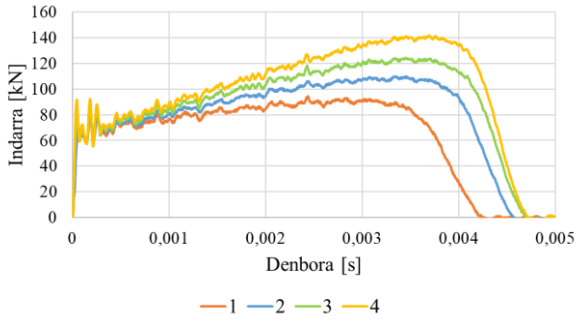
Mailuko entseguetako emaitzekin hasteko, 5. irudian aurkezten dira abiadura handiko kamerarekin eskuratutako desplazamendu eta abiadura kurbak baita (1) formula erabilita kalkulatutako deformazio-abiadural. Ikus daiteke hasierako talkaren ostean goiko estanparen abiadura linealki jaisten dela guztiz gelditu arte, energia zinetikoa probetaren deformazio bihurtuz.

5. irudia. a) Abiadura handiko kamerarekin mailuko entseguetan eskuratutako posizio eta abiadurak eta b) lortutako deformazio abiadurak



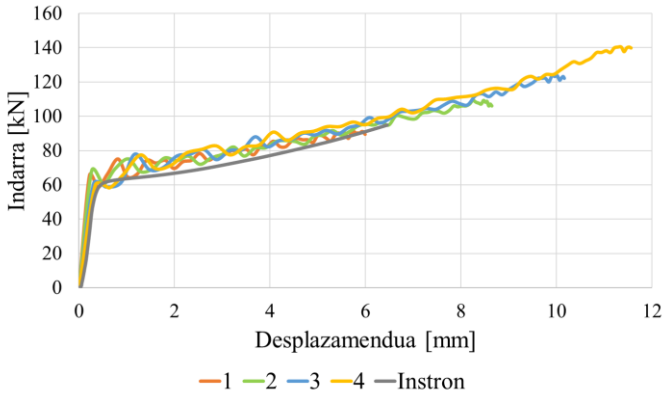
Indarrari dagokionez, ondorengo irudian ikus daitezke mailuko entseguetan indar sentsorearekin neurtutako indarrak (6. irudia):

6. irudia. Indar sentsorearekin mailuko entseguetan neurtutako indarrak



Abiadura handiko kamerarekin eta indar sentsorearekin eskuratutako deformazio datuak konbinatuz, 7. irudian erakusten diren indar-desplazamendu kurbak lortu dira. Irudi honetan gehitu da Instron-4206 laborategi makina unibertsalean egindako entseguaren kurba ere. Ikus daiteke mailuan egindako entseguen eta Instron-ean egindako entseguaren arteko indar diferentzia oso txikia dela.

7. irudia. Mailuko entseguetako eta Instron makina unibertsaleko indar-desplazamendu kurbak



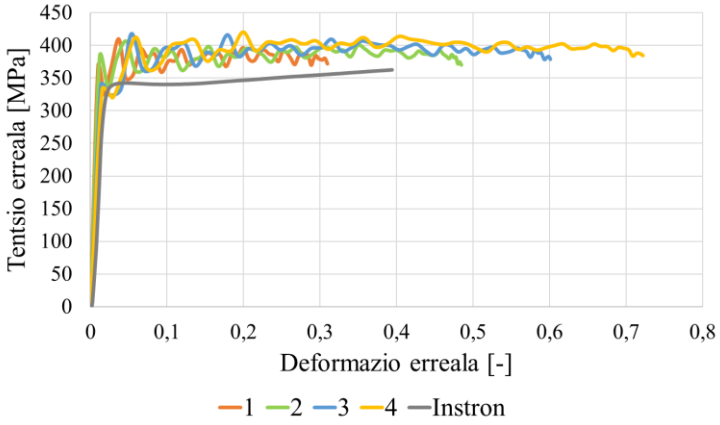
Indar-desplazamendu kurbak ingeniaritza eta arkitektura alorretan materialaren erresistentzia mekanikoa irudikatzeko erabiltzen diren tentsio-deformazio kurba bilakatzeko, (2) eta (3) formulak erabili dira:

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{h}{h_0}\right) \tag{2}$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{3}$$

non h probetak momentu oro duen altuera eta h_0 probetaren hasierako altuera diren, eta F eta A entseguan zeharreko indarra eta probetaren momentuko azalera diren, hurrenez hurren. Bi formula horiek erabilita, 8. irudian aurkezten diren tentsio-deformazio kurbak kalkulatu dira. Lortutako emaitzak guztiz logikoak dira. Alde batetik, mailuan egin diren entseguetako kurben arteko tentsio desberdintasun eta dispertsioa oso baxuak direlako eta, bestetik, Instron makina unibertsalean abiadura baxuan (0,001 s^{-1}) egindako entseguaren kurba baxuagoa izatea deformazio abiadura ezberdintasunak eragin duelako. Mailuan egindako entseguen kurben artean, deformazio abiadura desberdintasuna txikia denez (magnitude-ordena bera), tentsio mailan ez da diferentzia handirik nabaritzen. Dena dela, deformazio abiadura handieneko kurbak (4) tentsio maila altuagoa duela nabaritzen da. Instron makinan egindako entseguaren kasuan, aldiz, deformazio abiadura azkoz txikiagoa izan denez, tentsio desberdintasuna argi ikusten da.

8. irudia. Mailuko entseguetako eta Instron makina unibertsaleko tentsio-deformazio kurbak



4. Ondorioak

Ezarritako helburuei eta ikerketaren emaitzei erreparatuz, hurrengoa ondorioztatu da:

- Mailu bidezko forjaketan materialek duten portaera mekanikoa karakterizatzeko laborategi eskalako forjaketa simulagailu automatiko bat diseinatu eta eraiki da.
- Kobrezko probetekin eginiko entseguetako emaitzak kontuan hartuta, industriako mailu-forjaketa prozesuetan lortzen diren deformazio abiadurak lortu daitezke garatu den makinako entsegu-mailuan.
- Mailuko eta Instron entsegu-makina unibertsaleko tentsio-deformazio kurbei erreparatuz, mailuko entseguetako emaitzak fidagarriak eta errepikakorrak dira.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Artikulu honetan aurkeztu den forjaketa simulagailuaren garapena doktoretza proiektuaren lehen fasea izan da. Behin makina eraikita eta emaitzen fidagarritasun eta errepikakortasuna bermatuta, doktoretzako helburu nagusiei heltzea da hurrengo erronka. Doktoretzaren helburuetako bat, tenperatura altuko mailu bidezko forjaketan nikel superaleazioek duten portaera mekanikoa karakterizatzea da. Horretaz gain, beste helburu bat da forjaketa baldintzek (tenperatura, deformazio abiadura eta deformazio mailak) material aurreratu hauen mikroegituran duten eragina aztertzea. Entseguak tenperatura ezberdinetan egoki egin daitezkeela bermatzea da hurrengo pausua. Dena dela, erresistentzia bidezko labearekin egindako lehenengo frogek emaitza itxaropentsuak eskaini dituzte.

Karakterizazio entsegu horiek guztiak garatutako forjaketa simulagailu berrian egingo dira. Behin entseguak egindakoan, eskuratutako datu esperimentalak forjaketa prozesuen simulazioetako sarrera-datu gisa erabiliko dira, prozesu industrial hauen diseinua ahalik eta zehatzena izan dadin.

Doktoretza proiektu honen ostean, asmoa da eraikitako laborategi-makina askotariko material metalikoen karakterizaziorako erabiltzea, makina honek entseguak baldintza askotan egitea ahalbidetzen baitu, deformazio abiadura handi zein baxuan eta tenperatura hotz zein berotan.

6. Erreferentziak

Altan, T., & Ngaile, G. (2005). *ASM Cold and Hot Forging*. *ASM International*.

Bhujangrao, T., Froustey, C., Iriondo, E., Veiga, F., Darnis, P., & Mata, F. G. (2020). Review of intermediate strain rate testing devices. *Metals*, *10*(7), 1–24. https://doi.org/10.3390/met10070894

Chen, S., Qin, Y., Chen, J. G., & Choy, C.-M. (2018). A forging method for reducing process steps in the forming of automotive fasteners. *International Journal of Mechanical Sciences*, *137*(December 2017), 1–14. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.12.045

Dieter, G. E., Kuhn, H. a., & Semiatin, S. L. (2003). *Handbook of Workability and Process Design*. *Handbook of Workability and Process Design*. https://doi.org/10.1361/hwpd2003p232

Galdos, L., De Argandoña, E. S., Herrero, N., Ongay, M., Adanez, J., & Sanchez, M. (2014). The calibration of high energy-rate impact forging hammers by the copper-column upsetting method and high speed camera measurements. *Key Engineering Materials*, *611–612*(1), 173–177. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.611-612.173

Niu, J., Dai, G., Guo, Y., Sun, Z., Dan, Z., Dong, Y., … Zhou, L. (2021). Microstructure and mechanical properties of B modified Ti–Fe alloy manufactured by casting, forging and laser melting deposition. *Composites Part B: Engineering*, *216*(February), 108854. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108854

Prasad, Y. V. R. K., Rao, K. P., & Sasidhara, S. (2015). *Hot Working Guide - A Compendium of Processing Maps*. *Materials Engineering* (2nd ed.). https://doi.org/10.1016/B978-0-08-033454-

7.50019-X

Semiatin, S. L. (2005). *ASM Handbook: Metalworking: Bulk Forming* (Vol. 14A). https://doi.org/10.1361/asmhba0003971

Trosch, T., Strößner, J., Völkl, R., & Glatzel, U. (2016). Microstructure and mechanical properties of selective laser melted Inconel 718 compared to forging and casting. *Materials Letters*, *164*, 428–431. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.10.136

Xu, Z., Ding, X., Zhang, W., & Huang, F. (2017). A novel method in dynamic shear testing of bulk materials using the traditional SHPB technique. *International Journal of Impact Engineering*, *101*, 90–104. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.11.012

7. Eskerrak eta oharrak

Ikerketa hau Eusko Jaurlaritzak finantziatutako OGForge (Piezas forjadas de prestaciones extremas para el sector Oil & Gas mediante procesos de forja eficientes optimizados por modelos complejos de evolución microestructural) proiektuaren barruan kokatzen da. Egileek eskerrak eman nahi dizkiote ULMA Forja S. Coop. enpresari ere eskainitako laguntza ekonomiko zein teknikoarengatik.

Eraikuntzan erabiltzen diren CLT panelen kontraijeztuen karakterizaziorako on-line laser profilometro baten proposamena

Bargiela, D. eta Durana, G.
Komunikazioen Ingeniaritza Saila, Euskal Herriko Unibertsitatea UPV/EHU, Torres Quevedo Ingeniaria Plaza 1, 48013 Bilbao
danel.bargiela@ehu.eus

Laburpena

Zurak, etorkizunean izango duen aplikazioaren arabera, akabera-tratamenduen menpekoak diren hainbat kalitate-estandar bete behar ditu. Zimurtasunaren karakterizazio azkar eta zehatzak fabrikazio-prozesua denbora errealean zuzentzea ahalbidetuko luke. Lan honetan, laser-teknologian oinarritutako profilometro bat proposatzen da, zimurtasun-parametroak denbora errealean kuantifikatzeko gai dena, behin jasotako seinale gordina era egokian prozesatu eta gero. Emaitzek adostasun-maila handia erakusten dute kontaktuzko profilometro profesional batek eskainitako balioekin, eta gainera laser-teknologiak kontaktu gabeko neurketa oso azkarrak ahalbidetzen ditu, honek dakartzan abantaila guztiekin. Hortaz, lan honek zuraren industrian zimurtasuna on-line eta kontaktu gabe neurtzeko sistema oso bat aurkezten du.

Hitz-gakoak: laser-triangulazioa, profilometroa, CLT, zimurtasun-parametroak.

Abstract

Wood, depending on its future application, must meet several quality standards which are subject to finishing treatments. Fast and accurate characterization of roughness would allow the manufacturing process to be corrected in real-time. In this work, a profilometer based on laser technology is proposed, which is able to quantify the roughness parameters in real-time, once the received raw signal has been properly processed. The results show a high degree of agreement with the values offered by a professional contact profilometer. In addition, laser technology allows very fast non-contact measurements, with all the advantages that this entails. Therefore, this work presents a complete system for measuring the roughness of wood online and without contact that may be of interest to the wood industry.

Keywords: laser triangulation, profilometer, CLT, roughness parameters.

1. Sarrera eta motibazioa/ momentuko egoera

Zurezko produktu manufakturatuen azaleraren zimurtasuna propietate kritikoa da, eta neurri handi batean produktuaren kalitateari, balioari eta, bereziki, CLT (ingelesezko “Cross Laminated Timber”en akronimoa) panel kontraijeztuetan eta zurezko eraikuntzaren eremuan, bizitza erabilgarriari eragiten dio. Zimurtasuna hainbat faktoreren araberakoa da, besteak beste, materialaren propietateak, mekanizazio-prozesua eta ebaketa erreminten baldintzak (Sandak et al., 2019), fabrikazio-prozesu baten adierazle fidagarri bihurtuz.

Zuraren industrian kalitatea kontrolatzeko erabiltzen den metodo arruntena, mekanizazio-prozesuaren ondoren lagin-multzo bat biltzean oinarritzen da (Hu eta Afzal, 2004), ondoren kontaktuzko profilometro baten bidez aztertzeko. Hala ere, kontaktuzko profilometroen kasuan,

metalezko ukitze-orratz – zuraren gainazala urratuko duena-, bat erabiltzeak zenbait eragozpen eragiten ditu: neurketa-abiadura motela, gainazalaren aldaketa, eta abar.

2. Ikerketaren helburuak

Lan honetan aurkezten den soluzio teknologikoak, mekanizazio-prozesuan zehar – eta ez honen ondoren – zuraren gainazala era jarraituan ikuskatzeko aukera eskainiko luke, proposatutako sistemak zur-xaflen ekoizpena etengabeko monitorizazioa egiteko gai baita.

Bestalde, ebaketa-erremintak ordezteko unerik egokiena manufaktura-industriaren erronka nagusietako bat ere bada (Sandak et al., 2019), eta horregatik, tresna optiko honen helburua produkzio-prozesuan zehar gerta litezkeen akatsez ohartaraztea ere bada, azken hauek eta ebaketa-erreminten egoera konkretua neurri handi batetan lotuta baitaude.

3. Ikerketaren muina eta ondorioak

Lan honetan erabiltzen den oinarrizko printzipioa hauxe da: zimurtasun-parametroen balio zehatzak fabrikazio-metodoaren kalitatearen islada dira, beraz, fabrikazio-akatsak murriztu ahal izango dira akabera-prozesua aztertuz eta zuzenduz. Gaur eguneko zuraren industrian duten interesagatik, ikerketa-lan honetan; CLT panel kontraikeztuak kontsideratu dira (Egoin, 2016a).

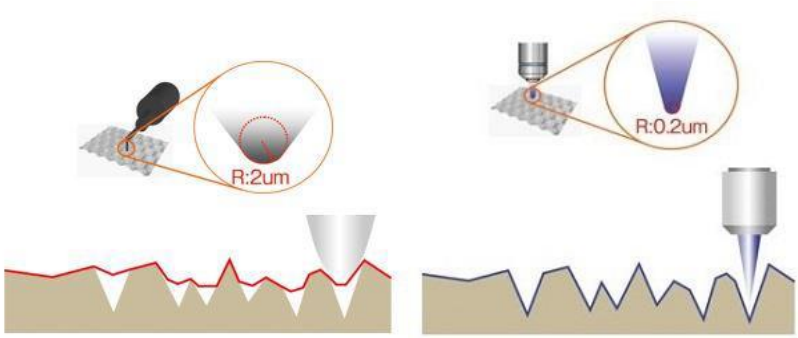
Neurketa-sistemak ekoizpen linean izango lukeen antolamendua simulatzeko, laser-triangulazioan oinarritutako sistema optikoa abiadura konstantean higitzen den plataforma lineal baten gainean kokatu zen berariaz diseinatutako aluminiozko plataforma erabiliz. Neurketa-sistemak zur-gainazalerainoko distantzia neurtzen du bereizmen handiarekin (0.15 μm ingurukoa). Jasotako seinale gordinari iragazketa-tratamendu egokia aplikatu ondoren, desiragarriak ez diren maiztasun-osagaiak deuseztatu daitezke (maiztasun altuko zarata, hala nola instalazioaren bibrazioek eragindakoak, eta abar (Hu eta Afzal, 2004)) zimurtasun-parametro desberdinen balioak determinatu ahal izateko.

Konparaketa beste neurketa-metodo batzuekin:

Zuraren kasuan gainazal-zimurtasuna neurtzeko metodoa fidagarria izatea nahi bada, gutxienez 40 eta 50 mm arteko luzeran zehar neurtzea komeniko litzateke, zimurtasun-parametroak luzera-tarte honetan egonkortzen baitira (Gurau eta Irle, 2017). Halaber, kontaktuzko neurketa-metodoetan eta lagin bigunen kasuan (zura, kasu) lor daitekeen zehaztasuna mugatua da, lagina bera, kaltetu daitekeelako kontaktuaren ondorioz. Azkenik aipatu, ingurune kontrolatuetako saiakuntza puntualetan ez bada, zaila dela hasieratik neurketa-probetak zehazki jartzea kontaktuzko neurketa-metodoetan.

Horrez gain, eta ukitze-puntaren dimentsioari lotuta, hau baino txikiago diren gainazal-eremuetan erabiltzeak xehetasun eta ezaugarri batzuk galtzea eragiten du (ikus 1. irudia), zenbait kasutan informazio-galera eraginez (Sevcik, 2019). Egoera horri laserraren izpi-sorta tamaina txikia kontrajartzen zaio, ukitze-punta baino askoz txikiagoa dena (ikus 1. irudia), eta beraz, kontaktu bidezko teknikekin baino profil askoz zehatzagoa lortzea ahalbidetzen duena.

1. irudia.- Kontaktuzko (esker-irudia) eta kontaktu-gabeko (eskuin-irudia) neurketa-metodoen kasuan, laginarekiko elkarrekintzaren irudia (Sevcik, 2019).



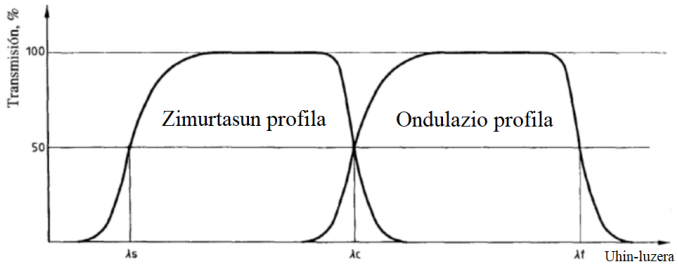
Laginen tamaina:

Azterketa honetako neurketak CLT panelen bi akabera desberdinetan burutu dira: akabera kalibratua eta arrabotatua. Horietariko bakoitzean, 7 metrotan zehar neurtu izan dira zimurtasun-parametroak, hiru CLT panel desberdinetan zehar banatuta (bi aurpegiak aprobetxatuz, eta hauetariko bakoitzean 106 mm luzerako hamaika ibilbide paralelo definituz).

Neurtutako profilaren iragazketa:

Pieza baten gainazal-akabera ebaluatzeko orduan, zimurtasun, ondulazio eta forma-akatsak bereiz daitezke. Beraien arteko desberdintasuna gainazal errealaren desbideratze-espazioan nabari daiteke, alegia, gainazal-perturbazioaren maiztasunean. Horrela, desbideratze-maiztasuna handitzen den neurrian –edo bere uhin-luzera txikitu-, forma-akatsetik zimurtasun-akatseranzko desplazamendua gertatzen da (ikus 2. irudia).

2. irudia.- Ebaki uhin-luzeraren araberako iragazketaren transmisio-kurbak. Parte hartzen duten ebaki uhin-luzera desberdinak: λs, λc eta λf.

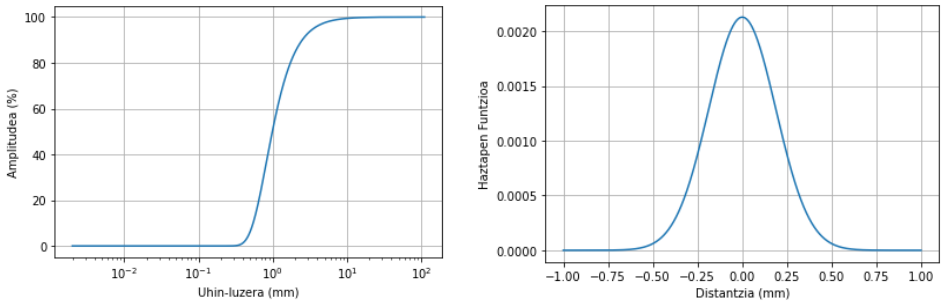


Beraz, zimurtasun-parametroak determinatzeko beharrezkoa den zimurtasun-profila, *λs* eta *λc* ebaki uhin-luzeren arteko maiztasun-osagaiek definituko dute. Era horretako iragazketa denboraren eremuan egiten da iragazki gausstarraren bitartez (ISO 16610-21). Iragazki horrek neurtutako profilaren puntuz-puntuko ekorketa egiten du honako probabilitate-kurbaren bitartez:

$$S(x) = \frac{1}{\alpha * \lambda c} * e^{-\pi * \left(\frac{x}{\alpha * \lambda c}\right)^2} \qquad (1)$$

Era honetako iragazkiaren abantaila nagusia da, ebaki uhin-luzeraren inguruko osagaiak ez direla modu malkartsuan deuseztatzen, baizik eta pixkanaka indargabetzen direla (ikus 3.irudiko ezkerreko kurba).
Desabantaila gisa aipatu, iragazki horren definizioak profilaren ertzetan, bai eta "outliers" deritzen balioa arraroetan ere, distortsioak eragiten dituztela (Galván, 2008).

3. irudia.- 1mm-ko ebaki uhin-luzera duen iragazki gausstarraren anplitude indargabetzea eta haztapen funtzioa.

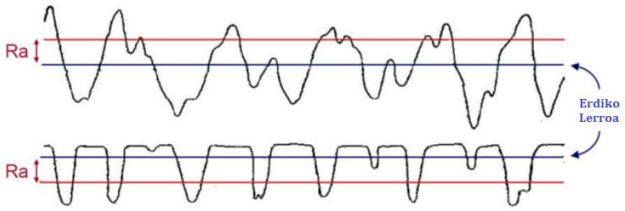


Zimurtasun-parametroak:

Azterlan honetan erabilitako zimurtasun-parametroak azaleretarako eta akaberetarako fabrikazio-industrian adierazgarrienak dira: *Ra, Rq, Rp, Rv, Rz, Rmr* eta *RSm*.

Ra: zimurtasunaren balio absolutuen batez besteko aritmetikoa. Profilak zimurtasunaren batez besteko lerroarekiko dituen desbideratzeak neurtzen ditu (4. irudia). (*Rq*, batez besteko zimurtasun koadratikoa).

4. irudia.- Ra bera duten profilak, baina portaera desberdina dutenak (ETSIB, 2017).



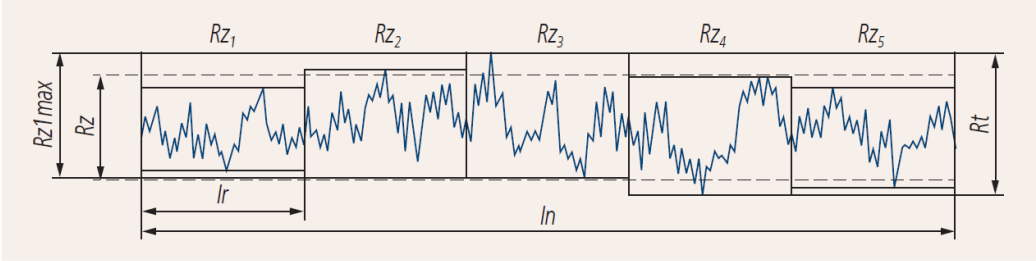
Rp eta *Rv*: tontorren gehieneko altuera eta haranaren gehieneko sakonera, hurrenez hurren. Mozte-luzera bakoitzean dauden haran handieneko gailur eta sakoneraren altuera adierazten dute.

Rz: zimurtasun-profilaren guztizko altuera. Honek tontor garaienaren eta haran sakonenaren sakoneraren arteko aldea erakusten du ebaketa luzera bakoitzean. Ebaluatutako laginketa-luzeren *Rzi* balioen batez besteko balioa. (*Rz1max*: zimurtasunaren gehieneko sakonera. Profilean ebaluatutako laginketa-luzera guztietako *Rz* handiena).

Rmr: profilaren osagai materiala. Profilean zehar trazatutako irudizko lerro baten zatia da, erdiko lerroaren gainetik (µm-tan).

RSm: tontorren batez besteko zabalera.

5. irudia.- zimurtasun-profilaren guztizko altuera (Rt), batez besteko zimurtasun-sakonera (Rz) eta zimurtasunaren gehieneko sakonera (Rz1max) (DANOBAT, 2009).



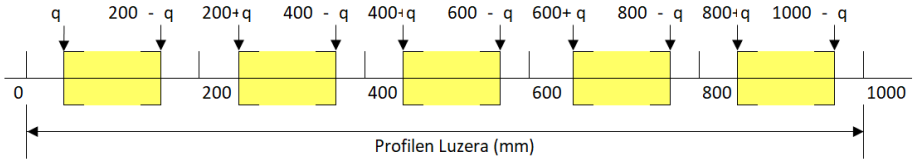
Algoritmoren garapena:

Neurtutako profila hainbat azpitartetan banatu izan da iragazkia aplikatzeko eta ondoren, uhin-osagaiak bereizteko –zimurtasuna eta ondulazioa-, ebaketa-uhinaren luzeren arabera. Distortsio-arazoak direla eta, aurretik ezarri behar dira zenbat ebaketa-luzera eta zenbat ebaluazio-luzera (kasu honetan, Lebal = 5 * Lebak) (Gurau eta Irle, 2017) zimurtasun-balio egokiak ziurtatzeko.

$$q = int\left(\frac{\lambda c}{dx}\right); \qquad L_{ebal} = 5 * \lambda c; \qquad (2), (3)$$

$$(q \rightarrow Iragazkiaren\ luzera\ (lagin\ kopurua), \qquad dx \rightarrow Laginketa\ tartea\ (mm))$$

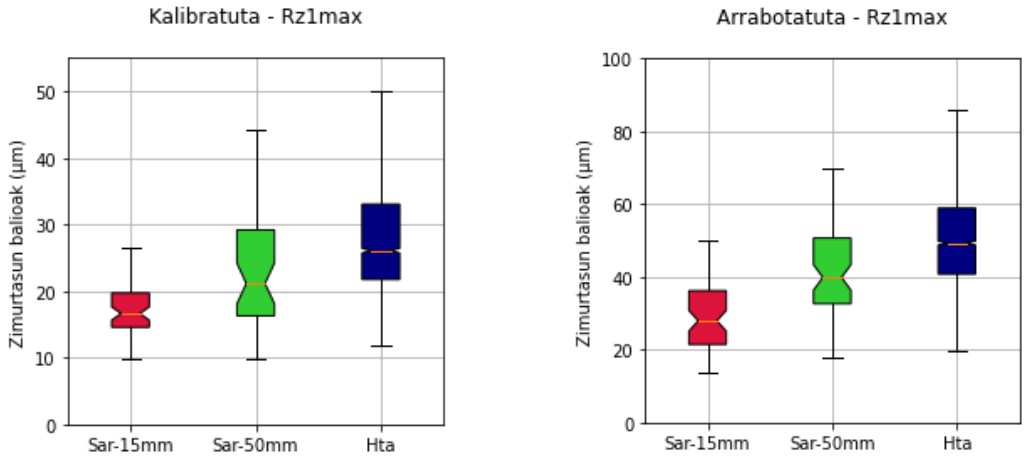
6. irudia.- Neurtutako profilaren zehar iragaztearen adibide teorikoa. 200 puntuko luze diren tarteak iragaziz, informazio kantitate nabarmena baztertu egin beharko da, ertzeko distortsioen ondorioz.



Iragazkia 200 puntuko azpitarteen gainean egiten bada (6. irudia), neurtutako puntu-kopuru bat (*2q*) iragazkiaren bi aldeetan galduko da, eta hori profil oso batera estrapolatuz (adib.: 1000 puntu), informazio garrantzitsuaren galera dakar. Elkarren segidako tarteen artean datuak gal ez daitezen, gainjarri egin dira, ertzetako distortsioek eragindako "*q*" puntu-kopuruaren arabera.

ISO-EN-DIN estandarren arabera (Mitutoyo, 2009) normalizatutako zimurtasun-parametroekin aldera daitezkeen zimurtasun emaitzak lortu dira (Gurau eta Irle, 2017). Are gehiago, rugosimetro eta laser-tresna bidez egindako neurketak alderatzean, haien arteko antzekotasunak nabarmentzen dira (7.irudia), gainera zimurtasuna neurtzeko balioak – arau orokor gisa – ± % 20 -ko tartean aldatzen direla jakinda (Mitutoyo, 2009).

7. irudia. - Sariki ISO neurrien (15 eta 50 mm-koak) eta laser-tresna optikoaren neurrien arteko konparazioa, kalibratuan eta arrabotatuan, Rz1max zimurtasun-parametrorako.

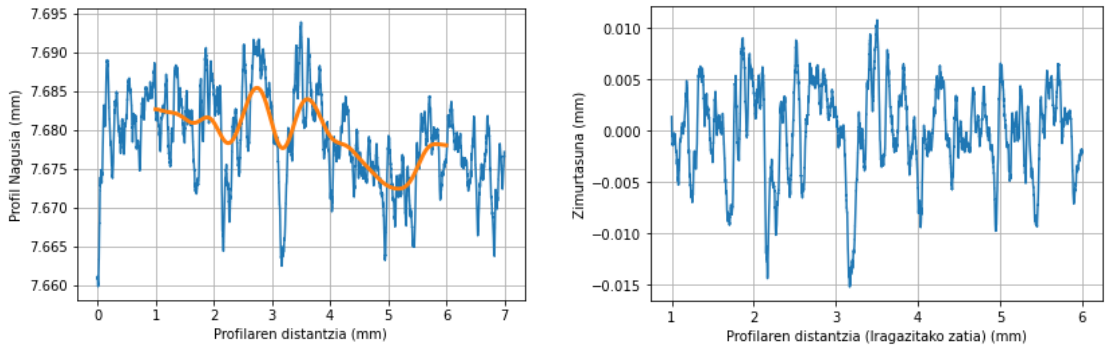


Konparatutako datu-baseen arteko aldeak rugosimetroko ukitze-orratzaren zehaztasun mugatuaren ondoriozkoak dira – 2 µm diametroko buru batekin –, xehetasun jakin batzuk iragazten eta ezagutzen ez dituena, hala nola profilean estuak diren haranen sakontasuna (1.irudia), tresna optikoak aintzat hartzen dituena eta, azkenik, emaitzetan eragiten dituztenak, zimurtasun-parametroen balioak handituz.

Aztertutako profilak (8. irudia) azpitarte baten luzera erakusten du, kasu honetan 14 mm-koa, behin zimurtasun-osagaiak (*10.irudia*) iragazkiaren jardun-tartearen barruan –laranjaz- kendu direnean; kasu honetan, [2 < x < 12] (mm).

$$r(x) = z(x) - m(x) \qquad (4)$$

8. irudia. - Profil primarioa, dagoeneko iragazitako zimurtasun-osagaiekin, profilaren lehen azpitartean. 10. irudia.- Zimurtasun-profila, tarte berean.



Aukeratutako ebaketa-luzeren balioek (λs eta λc-k) zehazten dute profiletik zer xehetasun-maila lortzen den. Ikerketa-lan honetan, iragazketaren errendimendu hoberena 0.008 mm eta 1.5 mm inguruko balioetarako lortu da, hurrenez hurren.

Eztabaida:

Proposatutako neurketa-sistema honetan hardware jakin bat aurkezteaz gain, kode irekiko algoritmo multzo bat ere aurkeztu izan da jasotako neurketa gordinen prozesaketa egokirako. Kodearen izaera irekiak etorkizunean proposa daitezkeen hobekuntzak inplementatzeko aukera eskaintzen du.

Erabilitako CLT panel kontraijeztuen jatorriari dagokionez, hauek zuhaitz berekoak izanik, zentzuzkoa dirudi pentsatzea gainazaleko akabera faktore bereizgarri bakarra izango dela, eta beraz, azterlanaren ardatz nagusia izan behar dela ere.

4. Ondorioak

Lan onetan neurketa-sistema optiko azkarra eta kontaktu gabekoa garatu da, online monitorizaziorako aproposa. Kontaktuzko profilometroak ez bezala, neurketa-tresna malgu bateko portaera izan du. Zuraren kasuan, sarritan ez baita egokia metalekin erabiltzen den gainazal-zimurtasunerako araudia aplikatzea, eta horregatik laser-tresna honen garapena. Hala ere, lortutako emaitzak onak izan badira ere, neurketa-bolumen handiagoa behar da etorkizunean neurketa-sistemaren ondorio guzti hauek erabat baieztatzeko.

5. Etorkizunerako planteatutako norabidea

Aurkeztutako lehenengo emaitza esperimentalek argiro erakusten dute laser profilometroaren inplementazioak izango lukeen potentzial handia CLT panel kontraijeztuen zimurtasun-monitorizazioan; alde batetik, kontaktuzko profilometro estandar batek ematen duen erantzunarekiko bateragarritasun handia erakusten duelako, eta bestetik, neurketak kontaktu gabe era abiadura handian egin daitezkeelako. Hori horrela izanik, lortutako emaitzen fidagarritasuna bermatu beharko litzateke etorkizunari begira. Horri bidea emateko era bat analisi estatistiko sakonago bat litzateke, non panel-lagin kopuru handiago bat, edo/eta zuhaitz-jatorri desberdinak kontsideratuko beharko liratekeen. Beste planteamendu interesgarri bat ekoizpen-linean egindako neurketa esperimentalek eskainitakoa izango litzateke.

6. Erreferentziak

DANOBAT. (2009). *Tailerreko eskuliburu teknikoa*. Danobat Kooperatiba Elkartea. https://www.danobatgroup.com/media/uploads/nosotros/euskera/Tailerreko-eskuliburu-teknikoa-DANOBAT.pdf

Egoin a. (2016.eko Maiatzak 31). *CLT eta CLT mix panel kontraijeztuak dituzten egiturak.* https://egoin.com/eu/clt-eta-clt-mix-panel-kontraijeztuak-dituzten-egiturak/ helbidetik eskuratua

Egoin b. (2016.eko Maiatzak 31). *Gehien erabiltzen ditugun zur motak.* https://egoin.com/eu/gehien-erabiltzen-ditugun-zur-motak/ helbidetik eskuratua

ETSIB, Mekanikako Ingeniaritza Saila (2017*). Tema 17: Metrología del acabado superficial. Módulo IV: Metrología Dimensional (or. 16)*. http://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/745_ca.pdf

Galván, C. (2008.eko Urtarrila). Nuevo Software para Análisis de Datos de Rugosidad en 2D y 3D. *Simposio de Metrología* [Symposium]. Querétaro, México. https://www.researchgate.net/publication/237662556_Nuevo_Software_para_Analisis_de_Datos_de_Rugosidad_en_2D_y_3D

Gurau, L., eta Irle, M. (2017). *Surface Roughness Evaluation Methods for Wood Products - a Review. Current Forrestry Reports, 3*, 119-131. https://link.springer.com/article/10.1007/s40725-017-0053-4

Hu, C., eta Afzal, M. T. (2005). Automatic measurement of wood surface roughness by laser imaging. Part I - Development of laser imaging system. *Forest Products Society, 55*(12), 158-163.

Mitutoyo (2009). *Quick Guide to Surface Roughness Measurement.* Mitutoyo America Corporation. https://www.mitutoyo.com/wp-content/uploads/2012/11/1984_Surf_Roughness_PG.pdf

Pelaz, L. (2012). *Equipos analizadores de señal*. Universidad de Valladolid. https://www.ele.uva.es/~lourdes/docencia/Master_IE/3Equipos%20analizadores%20de%20se%C3%B1al.pdf

Sandak, J., Orlowski, K., Sandak, A., Chuchala, D., eta Taube, P. (2019, Abuztuak 25-30). *Vision System for On-line Monitoring of Wood Surface Roughness.* [Konferentzia] Proceedings of the 24th International Wood Machining Seminar, Corvallis, Oregon, Estatu Batuak. https://zenodo.org/record/3551712#.YH3VkOgzbIU

Sevcik, D. (2019.eko azaroak 28). *Surface Roughness Measurement—Terms and Standards*. (Olympus Corporation) Eskuratze-eguna: 2020.eko abuztuak 17. Iturria: https://www.olympus-ims.com/es/metrology/surface-roughness-measurement-portal/terms-and-standards/

7. Eskerrak

Lan honek European Regional Development Fund-aren laguntza izan du alde batetik, bestetik Ministerio de Economía y Competitividad-rena RTI2018-094669-B-C31 proiektuaren bidez, eta azkenik Eusko Jaurlaritzarena, IT933-16 proiektuarena.