



IKER
GAZTE
NAZIOARTEKO
IKERKETA EUSKARAZ

IV. IKERGAZTE NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

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

ANTOLATZAILEA:
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)

INGENIARITZA ETA ARKITEKTURA

**Industria eolikoko palen efizientzia
aerodinamikoaren azterketa
esperimental baldintza ideal
eta errealetan,**

*Ander Zarketa-Astigarraga,
Markel Peñalba-Retes,
Alain Martin-Mayor eta
Manex Martinez-Agirre*

81-89 or.

<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.iv.03.10>



Industria eolikoko palen efizientzia aerodinamikoaren azterketa esperimental 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 Industrialak, 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, turbulenzia 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 errealetan egiteko beharra ondorioztatzen da.

Hitz gakoak: energia eolikoa, aerodinamika esperimental, efizientzia aerodinamiko, turbulenzia, 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, experimental 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 daitekeenez¹. 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 Empresarial Eólica* (AEE) erakundeko datuen arabera, kontsumitako energiaren %21². Hego Euskal Herriko egoera ere erakundeko datuetan irakur daiteke, 1.5 GW inguruko potentzia metatuarekin, zeinetatik 1.3 (% 87) Nafarroan kokatzen diren³, nahiz eta *Euskal Energiaren Erakundeak* (EEE) egungo haize-parkeen hedapen bat aurreikusirik duen, 153 MWko potentziatik 730 MWra igarotzeko planarekin⁴. 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 daitezten, 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 daitezkeelarik⁵. Industria eolikoaren kasuan, aipaturiko aurrerapenak bi zentzutan egin daitezke: lehenak parke eolikoaren ingurune-inpaktua nahiz bisuala gutxitzea du helburu, eta *offshore* teknologiararen hazkundera islatzen da. Hala, parkeen kokapen geografikoa itsas zabalera mugitzea du 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* teknologiararen 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* teknologiararekin 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, turbulentsia edo zurrumbilo gutxiarekin 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, turbulentsia. Bestalde, kresalaren efektu korrosiboak, eta hirigunetako airean aurki daitezkeen partikula anitzak, palen gainazal integritatea baldintzatzen dute, erosio nahiz zikinkeria-metaketa bidezko degradazioak sortuz. Gainera, tamaina txikiako 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, “turbulentsia” 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 turbulentsia 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 ingeniartzari 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 konkrituak eragiteko. Hori da esperimentazioaren muina. Industria eolikoan erabiltzen diren palen aerodinamika aztertzeke, baldintza kontrolatuen erdiespena haize-tunelen bidez lortzen da.

Haize-tunelak, zentzu honetan, tenperatura, hezetasun eta, batez ere, abiadura konkrituko aire korranteak lortzeko erabiltzen diren gailuak dira. Mota desberdineko tunelak badaude ere, guztien funtsa berdina da: kokaturik dauden ingurunekeo airea azeleratuz, test-sekzioa deritzaion eremu batean profil homogeneo eta kontrolatuko aire korrante

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 aerodinamiko ebaluatuko baitute. Haize-tunel bidezko esperimendazioak muga nabarmenak ditu. Lehenik eta behin, eskala kontua dago: tamaina desberdinetako haize-tunelak badaude ere, ez da ohikoa aerosorgailua bere osotasunean entseatzeko, 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 txikiagoan entseatu. Bestalde, aerosorgailua bera karakterizatu beharrean, osagai aerodinamikoak 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 txikiagoak bada, beraz, nahikoa da entsegu abiadura handitzearekin, emaitzak adierazgarriak izan daitezkeen.

Esan bezala, Reynolds zenbakia bermatzeko eskala efektua deuseztatzea dakar, abiadura handitzearen kostura. Baina lortu ahal diren abiadurak haize-tunelaren potentzia baldintzapezetara 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 txiki gailuetara mugatuak berez.

Eskala efektuak palen ikerketara mugatzen gaitu, baina ez da baldintzapeze bakarra. Izan ere, fluxua kontrolatua izan behar baldintza modu murriztailean betetzen da orokorrean. Beste era batera esanda: kalitate parametro batzuk definitzen dira, fluxuaren turbulentsia maila nahiz desalineazio maximoak adibidez, edo neurtu beharreko gailuak izan ahal duen gainazal-akabera zabarrena, besteak beste. Noski, guzti honek esperimendazioaren errepikakortasun eta kontrolagarritasuna ditu helburu, baina paradoxa bat suertatzen da hala: horren “garbiak” egitean, fluxu esperimendatuek 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 aerodinamiko lortzeko moldaketa anitz gehitu izan dira, moldaketa horiek baldintza artifizialekin soilik testeatu (Vorobiev *et al.*, 2013; Van Treuren, 2015; Meng *et al.*, 2018). Baina Van Treuren ikertzaileak (2015) laneko ondorioetan azaltzen duen moduan, beharrezkoa da baldintza errealek erreproduzitzen hastea diseinu prozedura egoki bat izateko. Eta, esan bezala, horrek bi efektu txertatzen garamatza: turbulentsia, fluxuaren egokitzapen aldetik, eta degradazioa edo ingurumen-eragileek induzituriko gainazal-zimurtasuna, palen geometria moldatze aldera. Bietan ditugu aurrekariak.

Turbulentsiari 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 ezarriak badaude, sorturiko fluxu turbulentsia 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 aldentuz eta neke kargak eraginez (Schottler *et al.*, 2016; Dimitrov *et al.*, 2017). Bestalde, efizientzia aerodinamikoaren jaitsiera nabarmen bat turbulentsia-intentsitatea handitzean, etekin energetiko txikiagoak lortuz (Tian *et al.*, 2019). Turbulentsia 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 aerodinamiko guztiz estandarizaturik gabeko prozedura da (Bons, 2010). Hala, ez da harrizkoa 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 daitezkeen 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) (Watkins <i>et al.</i> , 2010) (Schottler <i>et al.</i> , 2016; Dimitrov <i>et al.</i> , 2017) (Tian <i>et al.</i> , 2019)	Burdinsare bidezko turbulentziaren karakterizazioa. Altuera baxutan operatzen duten gailuek jasaten duten turbulentzia. Turbulentziaren izaera oszilakorra palen kurba aerodinamikotan isladatzen denaren ebidentziak. Efizientzia energetikoaren jaitsiera turbulentzia intentsitatearen igoerarekin.
Degradazio ikerketak	(Nikuradse, 1933) (Coleman <i>et al.</i> , 1984) (Corten eta Veldkamp, 2001) (Khalfallah eta Koliub, 2007) (Bons, 2010) (Pugh <i>et al.</i> , 2021)	Gainazalaren karakterizazio hidrodinamikoa. Gainazalaren karakterizazio aerodinamikoa. Intsektu zikinkeriak eragindako efizientzia galera. Desertuko hautsak eragindako efizientzia galera eta operazio denborak eragindako degradazio metatua. Palen gune zaurgarrienen identifikazioa eta korrosio bidezko degradazioa. 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 esperimentera erreproduzitzea? Bada, teknika ohizkoena ez da aldentzen aurrez aipaturiko Nikuradsek XX. mende hasieran proposatu zuenetik: palaren gune zaurgarrietan zimurtasun jakineko banda edo xingola bat itsastean datza, ingurumen-eragileek sortzen duten efektuak simulatzen dituela onartuz.

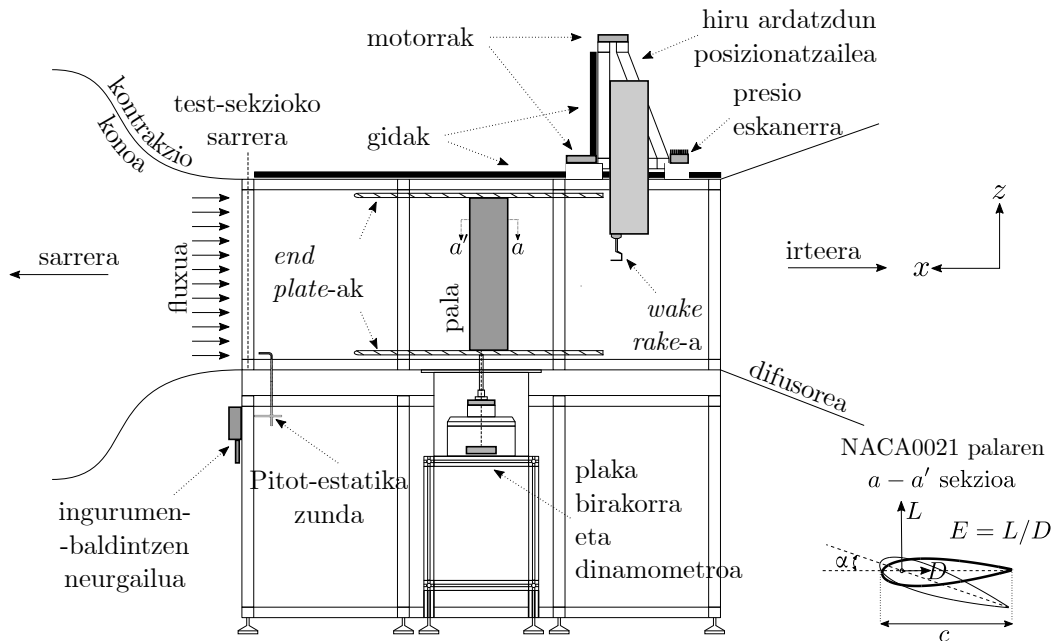
Hala ere, turbulentzia- eta degradazio-efektuak horren nabariak izanik, ez dago bi eragileak uztartzen dituen ikerketarik, ez egileek ezagutzen duten bibliografian behintzat. Baldintza idealetatik aldentzean portaera aerodinamikoa nabarmen aldatzen dela agerikoa da, eta beharrezkotzat jotzen da entseguak harik eta egoera errealean 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, bata 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-tunelko test-sekzioa ageri da, aire fluxua ezkeretik eskuinera doalarik. Irudia tunelaren sarrera osteko kontrakzio konoan hasten da, zeinak fluxua azeleratu eta homogeneizatzen duen test-sekziora sartu aurretik. Test-sekziorako sarreraren ingurumen baldintzak —presioa, hezetasuna eta tenperatura— neurtzen dituen gailu bat dago, eta fluxuaren abiadura eskuratzen duen Pitot-estatika zunda bat. Lau datu horiek Reynolds zenbakia kalkulatu da. Esperimentatzaileak tunelko 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-ekerraldean 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 diseinatuak⁶. Izan ere, ikerketaren helburua ez da aplikazio partikular bat aztertzea, ingurumenak sortzen dituen fluxu eta geometria aldatetarik 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 , deritzazio. Muntaketa honetan, esperimentatzaileak eraso-angelua alda dezake, haize-tunela kontrolatzen duen sistematik plaka birakorra mugituz. Plaka birakorrean ezarritik dagoen dinamometroak, haizeak palaren gainean eragiten duen *lift* indarra, L , neurtzea du helburu; kroskisean 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* deritzaziona, 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 homogenea; 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 erlazioa 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* deritzaziona 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 torsio 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 aerodinamiko 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>

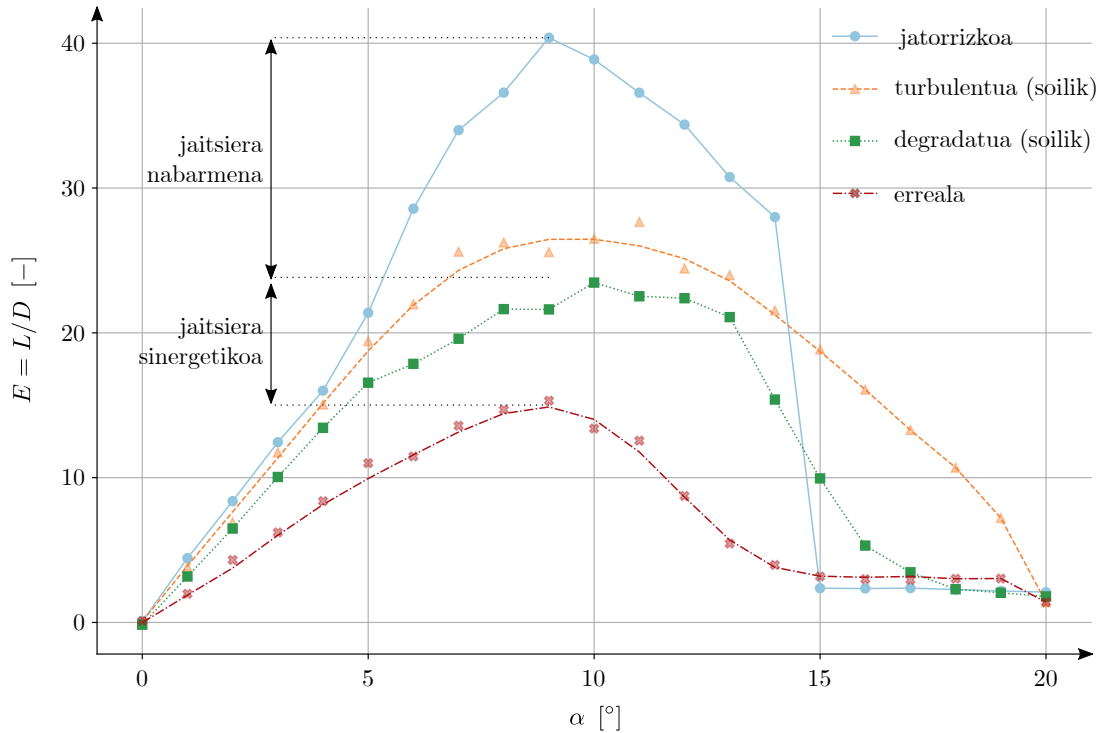
bera lortzeko input txikiagoa adierazten dute. Bi adibideei dagokienez, hegazkinen kasuan efizientzia altuagoak distantzia jakin bat burutzeko erregai kontsumo baxuagoen seinale dira; aerosorgailuenean, aldiz, energia-etekin handiagoen adierazle. Efizientzia terminotan egingo da ikerketa honetako analisisia, beraz.

Azkenik, 2. atalean aipaturiko fluxu-baldintza errealen erdiespenari dagokionez: haize-tunelaren jatorrizko turbulentsia maila % 0.2koa da (Torrano, 2016), eta berori handitzeko burdinsare bidezko zurrunbiloak sorrarazi dira. Burdinsarea egoki hautaturik dagoela eta, beraz, produzituriko turbulentsiak profil unibertsala jarraitzen duela bermatzeko, Krogstad eta Davidson autoreek (2010) urtean argitaraturiko lanean zehazten duten karakterizazio-metodoa erabili da, $I = \% 4$ ko turbulentsia 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 berdina diren bi kurbez osatua edo, pala tridimentsionalean, berdina diren bi gainazalez. Bandak gainazal horietako bakoitzaren % 10 estaltzen du, palaren berezko simetria kontserbatuz. Zimurtasunen batzbesteko altuera $\approx 200 \mu\text{m}$ 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 $\text{Re} = 1.2 \cdot 10^5$ Reynolds zenbakian burutuz. Reynolds hau arestian aipaturiko erregimen trantsizionari 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, etekin 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 zimirtasunaren arteko interakzioaren beste adierazle bat da hori. Efektuen sinergia negatiboa da, hala, azterketa honek mahaigaineratzen duen fenomenoak, gutxi aztertua gaur artean.

4. Ondorioak

Orain arte azalduko atzerabegirako batean laburbildu daiteke. Funtsean, ikerketak argi uzten du konfigurazio gero eta erreagoetara 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 zimirtasuna, 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 errealean diren konfigurazioetan eginiko azterketak barnebildu behar ditu, efektu horiek ezin direlako baldintza errealean kontribuzio partikularrak kontsideratuz aurreikusi, bereziki. Izan ere, baliteke portaera aerodinamiko hobetzeko orain arte diseinatu eta frogatu diren konponbide anitzek beren balioarritasuna galtzea baldintza errealean entseatzeko, eta beste kontrol mekanismo batzuen proiektzio beharrezkoa izatea. Halako prozedura bat definitu ezean, industria eolikoak berorrek dakartzan erronkei aurrerago 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. Lehenetsun eta egingarritasun irizpideen bueltan sailkatuz, hauek dira etorkizunerako ikerketa-lerro nabarmenak:

- Lehenik eta behin, fluxua kontrolatzeko diseinatu diren egungo teknikak berrikusi behar dira, beraien eragin-kortasuna baldintza errealean 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 errealean.
- Bigarrenez, ikerketan aintzat hartu daitezkeen parametro aerodinamiko 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, et al 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, et al R. Taylor. 1984. A Re-Evaluation of Schlichting's Surface Roughness Experiment. *Journal of Fluids Engineering* 106.60–65.
- Corten, G.P., et al H.F. Veldkamp. 2001. Insects Cause Double Stall. *European Wind Energy Conference 2001* 470–474.
- Dimitrov, Nikolay, Anand Natarajan, et al Jakob Mann. 2017. Effects of normal and extreme turbulence spectral parameters on wind turbine loads. *Renewable Energy* 101.1180–1193.
- Han, Woobeom, Jonghwa Kim, et al 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, et al M. Arjomandi. 2014. Laminar Separation Bubble Effect on the Lift Curve Slope of an Airfoil. In *19th Australasian Fluid Mechanics Conference*, 1–4, Melbourne.
- Khalfallah, Mohammed G., et al 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, et al 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., et al P. A. Davidson. 2010. Is grid turbulence Saffman turbulence? *Journal of Fluid Mechanics* 642.373–394.
- Latoufis, Kostas, Vasilis Riziotis, Spyros Voutsinas, et al Nikos Hatzigiorgiou. 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, et al Shijun Luo. 2018. Lift improvements using duty-cycled plasma actuation at low Reynolds numbers. *Aerospace Science and Technology* 72.123–133.
- Meseguer-Ruiz, José, et al Ángel Sanz-Andrés. 2012. Ecuaciones generales. In *Aerodinámica Básica*, 18–23. Madrid: 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, et al 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, et al 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, et al 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, et al 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, et al 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 *35th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, number January, Reno, NV, U.S.A. American Institute for Aeronautics and Astronautics (AIAA).
- Tian, Wei, Ahmet Ozbay, et al 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] kodigoan 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.