

eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

---

# Teknika Adimentsuetan Oinarritutako Aerosorgailuen Kontrol Sistemen Diseinua

---

PhD Doktorego Tesia

**Egilea: Aitor Saenz Aguirre**

1. Tutorea: Dr. Ekaitz Zulueta Guerrero

2. Tutorea: Dr. Unai Fernández Gámiz

Sistemen Ingeniaritza eta Automatika saila

Euskal Herriko Unibertsitatea / Universidad del País Vasco

Apirila 2020





*“The future depends on what you do today”*  
Mahatma Gandhi



# Laburpena

---

XIX. mende bukaera eta XX. mende hasiera bitartean batez ere Europa mendebaldean eta Ameriketako Estatu Batuetan (AEB) bigarren iraultza industrialak gertatu zen. Ondorioz, energia-kontsumoa nabari handitu zen eta petrolioaren eta ikatza sistema industrial berriaren energia beharrak asetzeko iturri nagusi bilakatu ziren. Honen ondorioak garai hartan oraindik ezezagunak ziren arren, gaur egun jakina da hidrokarburoen konbustio prozesuaren ondorioz sortutako CO<sub>2</sub> gasa egun nabaritzen ari garen klima aldaketaren eragile nagusietako bat dela. Halaber, jakina da klima aldaketa prozesu hau azkar gelditu ezean, ondorioak itzulezin bihurtzeko arriskua dagoela. Asko dira klima aldaketa izenez ezagutzen dugunari atxikitutako fenomenoak: Atmosferako tenperaturen hazkuntza, fenomeno meteorologiko bortitzak, airearen kutsadura maila handia, poloen urtzea, itsasoaren mailaren gorakada, landare eta animalia espezieen desagertzea, besteak beste.

Arazo hauek guztiak kontuan izanik, klimarekiko kontzientziazioa gora doa gizartean eta gasa, petrolioaren eta ikatza bezalako hidrokarburoen erabilera murrizteko joera hasia da. Testuinguru honetan, energia-iturri berriztagarriek rol oso garrantzitsua izan beharko lukete etorkizun hurbileko energia-iturri nagusi eta sistema sozioekonomikoaren sostengu gisa. Izan ere, energia berriztagarrien ezaugarri nagusia klima aldaketan eragiten duten gasik sortzen ez dutela da eta, beraz, energia-iturri garbi edo iraunkortzat katalogatu daitezkeela. Gainera, hidrokarburoekin alderatuz gero, energia berriztagarrien beste ezaugarri positibo

bat bukatzeko arriskurik ez dutela da. Izan ere, gehienek eguzkiari lotutako fenomeno meteorologikoetan dute jatorria, eta ez milioika urte luze den deskonposizio organiko prozesu batean.

Hau guztia dela eta, dagoeneko hasita dago energia-iturri berriztagarrien integrazioa energia elektriko sorkuntza sisteman. Momentuz, energia-iturri berriztagarri hauen guztien artean (eguzki-energia, energia eolikoa, energia hidroelektrikoa, energia fotovoltaikoa, etab.) eguneroko merkatu elektrikoan energia gehien sortzen duen iturria energia eolikoa da. Ondorioz, bere jarduera optimizatzeko ikerkuntza lan gisa bultzada handiena jasotzen duen energia-iturria energia eolikoa da baita ere.

Sistema eolikoek mugimenduan dauden aire masen energia zinetikoa aprobetxatzen dute energia elektriko sortzeko. Energia eoliko honen ustiapenerako erabiltzen den oinarrizko elementua aerosorgailua da. Oro har, aerosorgailuak bi multzo handitan sailkatu daitezke: ardatz horizontalekoak eta ardatz bertikalekoak. Gehien erabiltzen direnak, eta lan honetan kontsideratuko direnak, ardatz horizontalekoak dira, ikusi 1. Irudia. Ardatz horizontaleko aerosorgailu baten elementu nagusiak honako hauek dira: errotorea (haizearen energia jasotzen duten palaz osatuta), “nacelle” edo gondola (barnean sorgailu elektriko eta beste elementu batzuk dituen) eta dorrea (errotorea eta gondola lurrazaletik urruntzen dituen).



**1. Irudia.** Ardatz horizontaleko aerosorgailua Bodegas Pierola-n (Moreda, Araba)

Egun, energia eolikoaren industria oso garatuta dago eta aerosorgailu komertzialek heldutasun maila oso altua lortu dute arlo askotan: materialak,

fabrikazio eta muntaia, sarerako konexioa, kontrol sistema, etab. Hala eta guztiz ere, merkatuaren lehiakortasuna oso handia da eta indar handiko fabrikatzaile ugariaren (Siemens Gamesa, Vestas, Acciona, etab.) existentziaren ondorioz, ikerkuntza lan garrantzitsua dago martxan aerosorgailuen prestazioak etengabe hobetzeko asmoz. Biztanle kopurua eta hauen energia-kontsumoa gora doazen garai honetan, aerosorgailuen operazioa muturrera eraman nahi da eta gero eta ahalik eta potentzia handiena ahalik eta koste txikienarekin sortzea da diseinatzaileen helburua. Gainera, sistema eolikoaren zertifikaziorako eta operaziorako eskatzen diren betebeharrak gero eta konplexuagoak dira eta honek ere beharrezkoa egiten du aerosorgailuen jarduera etengabeko hobetuko duen ikerkuntza prozesua.

Izan ere, aerosorgailuen potentzia izendatua handitu ahala, beren diseinu prozesua konplikatu egiten da. Potentzia handiagoa sortzean, aerosorgailuaren elementuetan eragindako karga mekanikoak handitu egiten dira eta sistema egoera kaltegarriago batean lan egitera bultzatzen da. Egoera horren aurrean, karga mekaniko handiagoak jasan ditzaketen materialak erabiltzea da aukeretakoa bat. Irtenbide honek, ordea, sistemaren kostea nabarmen handitzea ekarriko luke. Testuinguru honetan, garrantzia handia dauka aerosorgailuaren kontrol sistemari aplikatutako ikerkuntza lanak, zeinek koste gehigarririk gabe sistemaren operazioaren hobekuntza ahalbidetuko lukeen.

Aldi berean, datu kopuru handiekin lan egiteko eta haietatik ikasteko aukera ematen duen zientzia bat nabarmen garatzen ari da gaur egun, Inteligentzia Artifiziala edo “Artificial Intelligence” (AI) izenekoa. Egun, edozein sistema edo prozesu industrialetan sentsoreak daude nonahi, eta inoiz baino datu kopuru handiagoak sortzen dira. AI osatzen duten tekniken ezaugarririk garrantzitsuena datu sorta handiak ibiltzeko eta hauetatik informazio baliagarria ateratzeko gaitasuna da. Ikerkuntza lan honen helburua aerosorgailuen operazioa hobetzeko AI tekniketara oinarritutako kontrol sistema adimentsuen diseinua eta simulazio bidezko balioztatzea da.

Alde batetik, ardatz horizontaleko aerosorgailu baten yaw sistemaren kontrola optimizatzeko “Machine Learning” (ML) bidezko kontrol estrategia bat diseinatu da. Yaw kontrol estrategia egoki batekin aerosorgailuaren errorea haizearen norabidearekin lerrotatuta mantenduko da eta, horrela, aerosorgailuak sortutako potentzia elektrikoa uneoro maximizatu. Bi ML bidezko yaw kontrol estrategia diseinatu dira, biek ere Errefortzo bidezko Ikasketa edo “Reinforcement Learning” (RL) algoritmo bat oinarri dutela. Proposatutako ML bidezko yaw kontrol estrategiek hainbat ekintzek aerosorgailuaren operazioan duten eraginetik

ikasi eta egoeraren arabera automatikoki ekintza optimoa hautatzeko gaitasuna dute. Gainera, datu errealetatik etengabe ikasteko aukera ere eskaintzen estrategia hauek. Ondorioz, ingurumen aldakor batean kokatuta dagoen aerosorgailu baten ekintza optimoak automatikoki moldatzeko aukera ere emango lukete.

Lehenengo eta behin, yaw sistemaren bitartez aerosorgailuak sortutako potentzia maximizatzea helburu duen ML algoritmo bat garatu da. Estrategia hau oinarritzko ML bidezko yaw kontrol estrategia bezala ezagutuko da. Proposatutako strategiaren arabera, une jakin batean aerosorgailuaren egoera ebaluatu eta honek sortutako potentzia maximizatuko duen yaw errotazio-abiadura hautatuko da. Estrategiaren balioztatzerako simulazioak burutu dira NREL 5MW aerosorgailua kontsideratuz eta “Fatigue, Aerodynamics, Structure and Turbulence” (FAST) kode aeroelastikoa erabiliz. Lortutako emaitzek erakusten dute potentzia irabazi handiak lor daitezkeela proposatutako kontrol strategiarekin. Gainera, proposatutako ML algoritmoak yaw errotazio-abiadura optimoa automatikoki hautatuko duenez, kontrolagailu konbentzional baten diseinu desegoki bat egiteko arriskua ere desagertu egingo da.

Proposatutako bigarren ML algoritmoan, aerosorgailuak sortutako potentzia optimizatzea ez ezik, yaw errotazioaren eraginez aerosorgailuaren yaw sistemaren rodamentuan induzitutako karga mekanikoak minimizatzea ere bilatuko da. Estrategia hau hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategia bezala ezagutuko da. Izan ere, yaw errotazioan parte hartzen duten elementu estrukturalen inertzia balio handiak direla eta, karga mekaniko handiak sortzen dira. Hortaz, yaw kontrol sistema egoki bat izan ezean, aerosorgailuak sortutako potentzia gutxitu edota karga mekanikoak handiegiak bihurtu daitezke, zeinek elementu mekanikoaren baten haustura eragin dezakeen.

Horregatik, hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategian optimizazio algoritmo bat eta erabaki algoritmo bat ere erabiliko dira. Proposatutako sistemaren arabera, une jakin batean aerosorgailuaren egoera ebaluatu eta honek sortutako potentziaren eta yaw sistemaren rodamentuan induzitutako karga mekanikoen arteko konpromisua aztertuko da. Azkenik, karga mekanikoak balio jakin batera mugatuko dituen eta aerosorgailuak sortutako potentzia maximizatuko duen yaw errotazio-abiadura hautatuko da. Estrategiaren balioztatzerako simulazioak burutu dira NREL 5MW aerosorgailua kontsideratuz eta FAST kode aeroelastikoa erabiliz. Lortutako emaitzek honako hau erakusten dute: sortutako potentzia gutxi gorabehera mantenduz, aerosorgailuaren yaw sistemaren rodamentuan induzitutako karga mekanikoak asko murriztu daitezke.



Beste alde batetik, fluxu kontrolak aerosorgailuaren operazioan eta potentzia sorkuntzan duten eragina ere aztertu da ikerkuntza lan honetan. Fluxu kontrol gailuak aerosorgailuaren paletan jartzen dira eta hauen jarduera aerodinamikoa aldatzeko aukera ematen dute. Kasu honetan ere, bi estrategia desberdin aztertu dira.

Lehenengo eta behin, fluxu kontrol gailu pasiboek aerosorgailuaren operazioan eta potentzia sorkuntzan duten eragina aztertu da. Horretarako, NREL 5MW aerosorgailua kontsideratu eta “Blade Element Momentum” (BEM) kodea erabili da. BEM kodeak ardatz horizontaleko aerosorgailu baten palen jarduera aerodinamikoa konputazionalki erraza den era baten analizatzeko aukera ematen du. 2015. urteko eta 2016. urteko haize-abiadura datu errealak erabiliz, fluxu kontrol pasibo konfigurazio batek aerosorgailuan duen eragina ebaluatu da. Lortutako emaitzek zera erakusten dute: fluxu kontrol gailu pasiboak era egoki batean diseinatu eta inplementatuz gero, aerosorgailuak sortutako potentzia handitu daiteke. Beti ere palen erroan induzitutako karga mekanikoak handitzearen kontura. Fluxu kontrol gailu pasiboen diseinua desegokia izanez gero, potentzia irabazirik ez lortzeaz gain, karga mekanikoak ere handitu egingo dira aerosorgailuaren hainbat elementu estrukturetan.

Proposatutako bigarren fluxu kontrol estrategian, normalean fluxu kontrol pasiborako erabiltzen diren “Gurney Flap” (GF) gailuen operazio aktiboa aztertuko da, horretarako AI teknikak erabiliz. Estrategia hau “Active Gurney Flap” (AGF) bezala ezagutuko da. AGF strategiaren diseinurako Sare Neuronal Artifizial edo “Artificial Neural Network” (ANN) baten eta optimizazio algoritmo baten erabilera kontsideratuko da. Lortutako emaitzen arabera, AI teknikan oinarritutako fluxu kontrol aktibo batekin aerosorgailuaren paletan eragindako karga mekanikoak murriztu eta sortutako potentzia berdintsu mantendu daitezke.

Lortutako simulazio emaitzek erakusten dute posible dela AI teknikak erabiliz ardatz horizontaleko aerosorgailuen operazioaren hobekuntza, batez ere sortutako potentziaren maximizazioari eta eragindako karga mekanikoen minimizazioari dagokionean. Proposatutako kontrol estrategien integrazioa aerosorgailu industrial baten kontrol sisteman etorkizunean kontu handiz landu beharreko gaia da. Ikerkuntza lan honetan zehar lortutako emaitza guztiak “Journal Citation Report” (JCR) txostenean indexatutako eragin handiko aldizkarietan argitaratu dira. Gainera, kongresu internazionaletan ere azaldu izan dira analisisien emaitzetako batzuk.



# Summary

---

The second industrial revolution was a compound of changes in the socioeconomic situation that mainly happened in Western Europe and in the United States of America during the end of the 19th century and the beginning of the 20th century. As a result of the industrial revolution, the energy consumption of the countries involved grew rapidly and the energy sources based on fossil fuels became the main resources to generate the power necessary to respond to the growing consumption. Even if at that time the concept was unknown, today it is accepted that the CO<sub>2</sub> gas produced during the combustion of fossil fuels is one of the main factors causing the climate change that affects the world nowadays. It is also known that if these changes are not ceased promptly, there is a real danger that their consequences will be serious and irreversible. There are many phenomena associated to the climate change: The increase of the atmospheric temperature, severe meteorological phenomena, increment of the atmospheric pollution, melting of big ice masses, sea level rise, extinction of many vegetal and animal species, etc.

Consequently, the climate-consciousness is increasing among the population and a tendency to reduce the use of fossil fuels (natural gas, petrol and coal) as energy sources is already started. In this context, the renewable energy sources should play a key role as the main energy sources and the sustenance of the new socioeconomic system. The main characteristic of the renewable energies is that they do not generate any gases that cause climate change and, thus, can be classified as clean energy sources. Moreover, in comparison to conventional fossil

fuel based energy sources, renewable energies do not have any depletion risk, as they are result of meteorological phenomena related to the sun, and not of an organic decomposition process that lasts millions of years.

As a result, the integration of the renewable energy sources in the electrical energy generation infrastructure has been faced during last years. Nowadays, from all the renewable energy sources (photovoltaic energy, wind energy, hydroelectric energy, geothermic energy, etc.) the one with the biggest generation in the daily electrical market is the wind energy. Hence, a great amount of effort and research is directed to the optimization of the performance of wind energy generation systems.

In the wind energy technology the kinetic energy of moving air masses is used to produce electricity. The main element of a wind energy generation system is called a wind turbine. In general, wind turbines can be classified as horizontal axis wind turbines and vertical axis wind turbines. The most common ones in the industry, and the ones considered in this research work, are the horizontal axis wind turbines, see Figure 1. The main structural elements of a wind turbine are the rotor (formed by blades that extract the aerodynamic power of the wind), the nacelle (contains and protects the electrical generator and some other components of the wind turbine) and the tower (distances the rotor and the nacelle from the ground level).



**Figure 1.** Horizontal axis wind turbine in Pierola wine cellar (Moreda, Araba)

Nowadays, the wind energy industry is highly developed and the wind turbines have acquired a high maturity level in many areas: materials, fabrication

and assembly processes, grid connection, control system, etc. Nevertheless, the competition of the market is very strong and due to the existence of many powerful manufacturers (Siemens Gamesa, Vestas, Acciona, etc.) the research work to improve the performance of the wind turbines is also remarkable. In a time in which both the population and the energy consumption per capita are increasing, the objective is to generate the maximum possible energy with the minimum economic cost. In addition, the complexity of the requirements for the certification and operation of the wind turbines are increasing and, hence, the performance of the wind turbines must be continuously improved.

In fact, as the dimensions and rated power of the wind turbines are increased, the design process of the wind turbines becomes more complicated. By increasing the generated power, the mechanical loads in the structural elements of the wind turbine are increased and the system is forced to operate in a worse scenario. To face this issue, elements with a higher withstand to mechanical loads can be used in the fabrication process. However, these new materials would increment the economic cost of the wind turbine. In this context, it is of great importance the research work directed to improve the performance of the control system of the wind turbine, which could enable an enhancement of the operation of the system without considerable additional costs.

At the same time, a science aimed to manage big data loads and learn from them is experiencing an important growth these last years. This science is commonly known as Artificial Intelligence (AI). Nowadays, any system or industrial process contains many sensors and big amounts of data are being generated. One of the most interesting characteristics of the AI techniques is that they allow to work with these big data loads and extract important information from them. The objective of this research work is the design and simulation validation of wind turbine control strategies based on AI techniques and aimed to improve the performance of horizontal axis wind turbines.

On the one side, a Machine Learning (ML) based control strategy is designed to optimize the performance of the yaw system of a horizontal axis wind turbine. With an adequate yaw control strategy, the orientation of the rotor of the wind turbine can be aligned with the direction of the incident wind and, thus, the power produced by the wind turbine can be maximized. Two different ML based yaw control strategies have been designed. The basic element of these both ML based strategies is a Reinforcement Learning (RL) algorithm. The proposed ML based yaw control strategies learn from the effect of different control actions on the

performance of the wind turbine and, then, are able to select the optimal control action that corresponds to a certain state. Moreover, they have the ability to continuously learn from experience and can, thus, be used in dynamically changing environments.

First, a basic ML based yaw control algorithm to maximize the power generated by the wind turbine has been developed. According to this strategy, the state of the system is evaluated at a certain time and the yaw rotational speed that maximizes the power generation is selected. Simulations considering the NREL 5MW wind turbine and using the aeroelastic code “Fatigue, Aerodynamics, Structure and Turbulence” (FAST) have been carried out to validate the performance of the strategy. The obtained results show that remarkable power gains can be achieved with the proposed strategy. Furthermore, since the ML algorithm is set to automatically select the optimal action, the risk of a manual and inadequate controller tuning is erased.

The proposed second ML strategy, the improved ML based yaw control strategy, is aimed not only to optimize the power produced by the wind turbine, but also to minimize the mechanical loads induced in the yaw system bearing as a result of the yaw rotation. As a result of the high dimension and inertia values of the components of the yaw system, high mechanical loads are induced during the rotation process. Hence, in absence of an adequate yaw control system, there is a real risk to reduce the power produced by the wind turbine or increase the mechanical loads in the bearing above the limit and cause its failure.

Consequently, in the improved ML based strategy an optimization algorithm and a decision making algorithm have designed to complement the performance of the RL algorithm. According to this strategy, the state of the system is evaluated at a certain time and the compromise necessity between the power produced by the wind turbine and the mechanical loads in the yaw system bearing is analysed. Finally, the control action that maximizes the power generation of the wind turbine while keeping the mechanical loads to a certain safe level is selected. Simulations considering the NREL 5MW wind turbine and using the aeroelastic code FAST have been carried out to validate the performance of the strategy. The obtained results show that with the proposed strategy the mechanical loads in the yaw bearing can be drastically reduced with no considerable loss of the generated power.

On the other hand, the effect of different flux control strategies on the performance of a horizontal axis wind turbine have also been studied in this research work. Flux control devices are usually implemented on the surface of the

wind turbine blades and their objective is to vary and improve the aerodynamic performance of the wind turbines. In this work, two different flow control strategies have been analysed.

First, the effect of passive flow control devices on the performance and energy generation of a horizontal axis wind turbine is analysed. To that end, calculations considering the NREL 5MW wind turbine and using the Blade Element Moment (BEM) code have been performed. BEM is an algorithm that allows calculation of the aerodynamic performance of a horizontal axis wind turbine blade in a computationally economical way. Different passive flow control configurations have been evaluated using real wind speed data corresponding to two different years, 2015 and 2016. The obtained results show that with an adequate design and implementation of the passive flow control devices, the power produced by the wind turbine can be incremented at cost of increased mechanical moments in the wind turbine blade roots. In the case of an inadequate design of the flow control devices, the power production of the wind turbine is reduced and the mechanical moments in different structural elements of the wind turbine are increased.

In the proposed second flux control strategy, an active operation of normally passive flow control strategies with the help of AI techniques is proposed. To be precise, the active operation of the flow control devices known as Gurney Flaps (GFs) with the use of an Artificial Neural Network (ANN) and an optimization algorithm is analysed in this research work. This active flow control strategy will be addressed as “Active Gurney Flap” (AGF). The obtained results show that with the active operation of the GFs remarkable mechanical load reductions can be achieved in the roots of the wind turbine blades while keeping the generated power constant.

Overall, the simulation results demonstrate that, with the use of the AI based control algorithms proposed in this research work, an improvement of the performance of a horizontal axis wind turbine, especially in terms of an incremented power generation and a reduction of the mechanical loads, is possible. Consequently, the integration of the proposed strategies in the control system of an industrial wind turbine is to be carried out in the future. All the results obtained in this research work have been published in high impact journals indexed in the Journal Citation Report (JCR). In addition, some results have also been presented in international congresses.





# Eskerrak

---

Ikerkuntza lan hau 2018. urteko urria eta 2020. urteko apirila bitartean burutu da Euskal Herriko Unibertsitateko (UPV/EHU) Sistemen Ingeniaritza eta Automatika sailaren eta Ingeniaritza Nuklear eta Jariakinen Mekanika sailaren partaidetzapean. Lehenik eta behin, ez nuke nire esperientzia pertsonala aipatzeko aukera galdu nahi. Benetan esperientzia polita eta aberasgarria. Ez bakarrik ikasitako guztiagatik, baita ni neu garatzeko eman didan aukeragatik ere.

Hortik aurrera jende askori agertu beharko nioke nire esker ona. Hasteko, ikerkuntza lan honen tutore izan diren bi pertsonak: Ekaitz Zulueta Guerrero PhD irakaslea eta Unai Fernández Gámiz PhD irakaslea. Bioi ere nire esker on zintzoena. Tesi hau ez litzateke posible izango zuen bion ezagutza, aholku ezinhobe, ikerkuntzarako interes eta egindako lan guztia gabe. Eskerrik asko uneoro niri laguntzeko izandako denboragatik eta zuengandik jaso dudan konfiantzagatik. Nabarmentzekoa nire artikulua bidaltzeko prozeduran Unai emandako aholku guztiak eta egindako lana. Eskerrik asko. Bukatzeko, arlo akademikotik harago, mila esker bioi pertsonalki emandako tratuagatik. Benetako plazera izan da zuokin biokin lan egitea.

Tutoreez gain, beste pertsona batzuen lana ere aitortu eta eskertu nahiko nuke. Iñigo Aramendia PhD, eskerrik asko denbora honetan zehar erakutsitako prestutasunagatik eta emandako aholku guztiengatik, batez ere dokumentu honen idazkerari dagokionean. Alain Ulazia PhD irakaslea, mila esker ikerkuntza lan honi

lotutako artikuluetan egindako ekarpen baliagarriengatik eta emandako tratu bikainagatik. Jose Manuel Lopez Guede PhD irakaslea, eskerrik asko kongresu internazionalan gauzak aurrera ateratzeko egindako lanagatik eta, batez ere, eskerrik asko nire hasierako lanei egindako zuzenketa zorrotzagatik.

Eskertzekoa da ere Euskal Herriko Unibertsitateak (UPV/EHU) tesi hau aurrera eramateko egindako ekarpena, batez ere, ikerkuntza taldeei emandako babes ekonomikoari dagokionean. Eskerrik asko azken urteotan emandako tratu eta ezagutza guztiengatik, Eibarreko EUITIn irakatsitako Energia Berriztagarrien Graduan zein Bilboko Ingeniaritza Eskolan irakatsitako INCAR Masterrean.

Ezin ahaztu nire familia eta lagunak, Bilbon zein Oñatin. Eskerrik asko guztioi hor egoteagatik. Ez litzateke posible nik lan egin hau egin ahal izatea, zuek bertan egon ezean. Benetan eskertzekoa, beraz, zuek emandakoa. Esker bereziak amari lana irakurtzeko egindako esfortzuagatik.

Azkenik, ez nuke ahaztu nahi ni orain hitz hauek idazten egotearen erantzule nagusietako bat, Jose Ignacio San Martin PhD irakaslea. Nahiz eta inoiz nire irakasle izan ez zaren, asko dira zuri eskertzeko ditudanak, graduako urteetan zehar emandako tratu ezinhobetik hasi eta hortik aurrera beti laguntzeko erakutsi duzun prestutasuneraino. Asko eskertzekoa da ere, noski, edonon, edonori eta uneoro nire inguruan esan dituzun hitz on guztiak.

Mila esker guztioi!

# Aurkibidea

---

Laburpena.....	i
Summary.....	vii
Eskerrak.....	xiii
Aurkibidea.....	xv
Irudien Aurkibidea.....	xix
Taulen Aurkibidea.....	xxv
Algoritmoen Aurkibidea.....	xxvii
Akronimoak.....	xxix
Nomenklatura.....	xxxiii
Argitalpen Zerrenda.....	xxxvii
<b>1. Kapitulua Sarrera.....</b>	<b>1</b>
1.1 Aurrekariak.....	1
1.2 Helburuak.....	6
1.3 Hipotesiak.....	7
1.4 Metodologia.....	8

---

1.5	Tesiaren Egitura .....	10
<b>2.</b>	<b>Kapitulua Literatura Azterketa .....</b>	<b>13</b>
2.1	Ardatz horizontaleko Aerosorgailuen Kontrol Sistema.....	13
2.2	Yaw Sistema eta Yaw Kontrola.....	18
2.3	Fluxu Kontrola Aerosorgailuen Paletan .....	23
2.3.1	Fluxu Kontrol Pasiboa.....	25
2.3.2	Fluxu Kontrol Aktiboa .....	29
2.4	Kontrol Sistema Adimentsuak .....	33
2.4.1	“Reinforcement Learning” (RL) .....	35
2.4.2	“Artificial Neural Network” (ANN).....	42
2.4.3	Optimizazio Algoritmoak.....	46
2.5	Laburpena eta Inplikazioak.....	52
<b>3.</b>	<b>Kapitulua Diseinu Prozedura.....</b>	<b>55</b>
3.1	ML bidezko Yaw Kontrola.....	56
3.1.1	Oinarrizko ML bidezko Yaw Kontrol Estrategia.....	56
3.1.2	Hobetutako ML bidezko Yaw Kontrol Estrategia .....	65
3.2	Fluxu Kontrola Aerosorgailuen Paletan .....	81
3.2.1	Fluxu Kontrol Pasiboa.....	82
3.2.2	AGF Fluxu Kontrol Aktiboa.....	90
<b>4.</b>	<b>Kapitulua Emaitzak.....</b>	<b>101</b>
4.1	ML bidezko Yaw Kontrola.....	102
4.1.1	Oinarrizko ML bidezko Yaw Kontrol Estrategia.....	104
4.1.2	Hobetutako ML bidezko Yaw Kontrol Estrategia .....	110
4.1.3	Emaitzen Konparaketa .....	115
4.2	Fluxu Kontrola Aerosorgailuen Paletan .....	122
4.2.1	Fluxu Kontrol Pasiboa.....	122
4.2.2	AGF Fluxu Kontrol Aktiboa.....	130
<b>5.</b>	<b>Kapitulua Eztabaida.....</b>	<b>137</b>

5.1 ML bidezko Yaw Kontrola.....	138
5.2 Fluxu Kontrola Aerosorgailuen Paletan.....	139
<b>6. Kapituluak Ondorioak eta etorkizunerako lanak .....</b>	<b>141</b>
6.1 Ondorioak.....	141
6.2 Etorkizunerako lanak.....	143
<b>Bibliografia .....</b>	<b>147</b>



# Irudien Aurkibidea

---

1. <b>Irudia.</b> Ardatz horizontaleko aerosorgailua Bodegas Pierola-n (Moreda, Araba).....	ii
2. <b>Irudia.</b> Alemaniak 2018. urtean sareratutako energia elektrikoaren jatorria [1]	2
3. <b>Irudia</b> Energia eolikoak 2018. urtean zehar hainbat herrialdetan izandako hazkuntza [4].....	4
4. <b>Irudia.</b> Ardatz horizontaleko aerosorgailu baten kontrol sistema. Diagrama sinplifikatua [20] .....	15
5. <b>Irudia.</b> (a) NREL 5MW aerosorgailuaren potentzia kurba (b) NREL 5MW aerosorgailuaren P-n kurba.....	16
6. <b>Irudia.</b> (a) Yaw sistemaren kokapena ardatz horizontaleko aerosorgailu batean [33] (b) Yaw sistemaren barne egituraren sekzio-bista [34] .....	18
7. <b>Irudia.</b> (a) Yaw sistemaren eredu sinplifikatua (b) Momentu angeluarraren aldaketa denborarekiko.....	22
8. <b>Irudia.</b> Haizeak aerosorgailu baten palan sortzen dituen indar aerodinamikoak.....	24
9. <b>Irudia.</b> (a) MTak aerosorgailu baten pala baten gainazalean (b) Xurgatze-gainazalean kokatutako MT batek aire-fluxuan duen eragina [71].....	26
10. <b>Irudia.</b> VGak aerosorgailu baten pala baten gainazalean [79] .....	27

11. <b>Irudia.</b> GF baten kokapena DU91W250 profil aerodinamiko baten [85].....	28
12. <b>Irudia.</b> Fluxu kontrol sistema aktibo baten egitura [72].....	30
13. <b>Irudia.</b> “Trailing Edge Flap” tradizionalak aerosorgailu baten pala batean [69].....	31
14. <b>Irudia.</b> “Air Jet Vortex Generator”-en (a) egitura (b) eragina aerosorgailu baten pala batean [69].....	32
15. <b>Irudia.</b> “Synthetic Jet”-en (a) funtzionamendua (b) egitura [69].....	33
16. <b>Irudia.</b> RL sistema baten oinarrizko egitura .....	36
17. <b>Irudia.</b> Neurona artifizial baten egitura.....	42
18. <b>Irudia.</b> ANN baten egitura generala.....	44
19. <b>Irudia.</b> Optimizazio problema bikoitz baten PoF.....	52
20. <b>Irudia.</b> Oinarrizko ML bidezko yaw kontrol estrategiaren bloke diagrama....	57
21. <b>Irudia.</b> Oinarrizko RL algoritmoaren entrenamendurako erabilitako yaw sistemaren bloke diagrama sinplifikatua .....	60
22. <b>Irudia.</b> Oinarrizko RL algoritmoaren entrenamendurako erabilitako haize-abiadura eta haize-norabidea .....	61
23. <b>Irudia.</b> Aerosorgailuak sortutako potentzia estimatzeko erabilitako interpolazio-taularen egitura .....	62
24. <b>Irudia.</b> Oinarrizko ML bidezko yaw kontrol estrategiaren $Q_P(s,a)$ matrizea.....	62
25. <b>Irudia.</b> $Q_P(s,a)$ matrizearen modelizaziorako erabilitako ANNren sarrera eta irteera egitura.....	63
26. <b>Irudia.</b> Oinarrizko ML bidezko yaw kontrol estrategiaren $Q_P(s(t),a(t))$ funtzioa.....	64
27. <b>Irudia.</b> Hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategiaren bloke diagrama..	66
28. <b>Irudia.</b> Hobetutako RL algoritmoaren entrenamendu prozesurako erabilitako yaw sistemaren bloke diagrama sinplifikatua.....	68
29. <b>Irudia.</b> Aerosorgailuaren yaw rodamentuan z ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa estimatzeko interpolazio-taularen egitura .....	70



<b>30. Irudia.</b> $Q\_P(s,a)$ matrizea (a) HaizeAbiadura=7 m/s YawMugi=90° (b) HaizeAbiadura=7 m/s YawK=0.5 (c) YawAngelua=50° YawMugi=90° (d) YawAngelua=50° YawK=0.5 .....	71
<b>31. Irudia.</b> $Q\_M(s,a)$ matrizea (a) HaizeAbiadura=7 m/s YawMugi=90° (b) HaizeAbiadura=7 m/s YawK=0.5 (c) YawAngelua=50° YawMugi=90° (d) YawAngelua=50° YawK=0.5 .....	72
<b>32. Irudia.</b> $Q\_P(s,a)$ eta $Q\_M(s,a)$ matrizeen modelizaziorako erabilitako ANNren sarrera eta irteera egitura.....	73
<b>33. Irudia.</b> Hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategiaren $Q\_P(s(t),a(t))$ funtzioa (a) HaizeAbiadura=7 m/s YawMugi=90° (b) HaizeAbiadura=7 m/s YawK=0.5 (c) YawAngelua=50° YawMugi=90° (d) YawAngelua=50° YawK=0.5 .....	74
<b>34. Irudia.</b> Hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategiaren $Q\_M(s(t),a(t))$ funtzioa (a) HaizeAbiadura=7 m/s YawMugi=90° (b) HaizeAbiadura=7 m/s YawK=0.5 (c) YawAngelua=50° YawMugi=90° (d) YawAngelua=50° YawK=0.5 .....	74
<b>35. Irudia.</b> Hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategiaren $Q\_P(s(t),a(t))$ funtzioa (a) HaizeAbiadura=11 m/s (b) HaizeAbiadura=21 m/s.....	75
<b>36. Irudia.</b> Hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategiaren $Q\_M(s(t),a(t))$ funtzioa (a) HaizeAbiadura=11 m/s (b) HaizeAbiadura=21 m/s.....	76
<b>37. Irudia.</b> PSO eta PoFn oinarritutako optimizazio algoritmoa (a) HaizeAbiadura=11 m/s, YawAngelua=90° (b) HaizeAbiadura=11 m/s, YawAngelua=30° .....	78
<b>38. Irudia.</b> PSO eta PoFn oinarritutako optimizazio algoritmoaren PoF (a) HaizeAbiadura=11 m/s, YawAngelua=90° (b) HaizeAbiadura=11 m/s, YawAngelua=30° .....	79
<b>39. Irudia.</b> DM algoritmoak hautatutako ekintza optimoa (a) HaizeAbiadura=11 m/s, YawAngelua=90° (b) HaizeAbiadura=11 m/s, YawAngelua=30°.....	81
<b>40. Irudia.</b> BEM algoritmoaren fluxu-diagrama [79].....	84
<b>41. Irudia.</b> Fluxu kontrol pasiboa. Potentzia kurben arteko konparaketa.....	87
<b>42. Irudia.</b> Fluxu kontrol pasiboa. Cp [-] potentzia faktoreen arteko konparaketa .....	88
<b>43. Irudia.</b> CFD analisi bidez lortutako NREL 5MW aerosorgailuaren koefiziente aerodinamikoak (a) $C_L$ [-] (b) $C_L/C_D$ [-] ratioa .....	91

<b>44. Irudia.</b> Koefiziente aerodinamikoaren modelizaziorako erabilitako ANNren sarrera eta irteera egitura.....	92
<b>45. Irudia.</b> Diseinatutako ANNren irteera datuak (a) $C_L$ [-] (b) $C_L/C_D$ [-] ratioa	93
<b>46. Irudia.</b> CFD bidez lortutako eta ANNren irteerako $C_L$ [-] koefizienteen arteko konparaketa.....	94
<b>47. Irudia.</b> CFD bidez lortutako eta ANNren irteerako $C_L/C_D$ [-] ratioen arteko konparaketa.....	94
<b>48. Irudia.</b> Proposatutako BEM algoritmo hobetuaren fluxu-diagrama.....	95
<b>49. Irudia.</b> Maximoa aurkitzeko algoritmoaren funtzionamendua $AoA=1^\circ$ (a) $C_L/C_D$ [-] ratioa (b) $C_L$ [-].....	97
<b>50. Irudia.</b> Maximoa aurkitzeko algoritmoaren funtzionamendua $AoA=3.5^\circ$ (a) $C_L/C_D$ [-] ratioa (b) $C_L$ [-].....	98
<b>51. Irudia.</b> AGF fluxu kontrol aktiboa. Potentzia kurben konparaketa.....	99
<b>52. Irudia.</b> AGF fluxu kontrol aktiboa. $C_p$ [-] potentzia faktoreen arteko konparaketa.....	100
<b>53. Irudia.</b> Haize datuak Salt Lake, Utah, AEBtan .....	103
<b>54. Irudia.</b> Oinarrizko ML bidezko yaw kontrol estrategia. Aerosorgailuaren operazioa 2. kasuan .....	105
<b>55. Irudia.</b> Oinarrizko ML bidezko yaw kontrol estrategia. Karga analisis 2. kasuan .....	107
<b>56. Irudia.</b> Oinarrizko ML bidezko yaw kontrol estrategia. Aerosorgailuaren operazioa 4. kasuan .....	108
<b>57. Irudia.</b> Oinarrizko ML bidezko yaw kontrol estrategia. Karga analisis 4. kasuan .....	110
<b>58. Irudia.</b> Hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategia. Aerosorgailuaren operazioa 2. kasuan .....	112
<b>59. Irudia.</b> Hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategia. Karga analisis 2. kasuan .....	113
<b>60. Irudia.</b> Hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategia. Aerosorgailuaren operazioa 4. kasuan .....	114
<b>61. Irudia.</b> Hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategia. Karga analisis 4. kasuan .....	115

62. Irudia. Emaitzen konparaketa. Aerosorgailuaren operazioa 2. kasuan .....	118
63. Irudia. Emaitzen konparaketa. Karga analisia 2. kasuan .....	119
64. Irudia. Emaitzen konparaketa. Aerosorgailuaren operazioa 4. kasuan .....	120
65. Irudia. Emaitzen konparaketa. Karga analisia 4. kasuan .....	122
66. Irudia. 2015. urteko haize-abiadura datuak .....	123
67. Irudia. 2016. urteko haize-abiadura datuak .....	123
68. Irudia. Hywind parke eolikoaren kokapena .....	124
69. Irudia. 2015. urteko haize-abiaduraren Weibull distribuzioa .....	125
70. Irudia. 2016. urteko haize-abiaduraren Weibull distribuzioa .....	125
71. Irudia. Fluxu kontrol pasiboa. Sortutako potentzia (a) 2015. urtean (b) 2016. urtean .....	126
72. Irudia. Fluxu kontrol pasiboa. “Thrust” indarra (a) 2015. urtean (b) 2016. urtean .....	129
73. Irudia. Fluxu kontrol pasiboa. BM (a) 2015. urtean (b) 2016. urtean .....	130
74. Irudia. Haize-abiadura datuak Salt Lake, Utah, AEBetan .....	131
75. Irudia. Salt Lake, Utah, AEBetan neurtutako haize-abiadura datuen Weibull distribuzioa .....	132
76. Irudia. AGF fluxu kontrol aktiboa. Sortutako potentzia .....	133
77. Irudia. AGF fluxu kontrol aktiboa. “Thrust” indarra .....	134
78. Irudia. AGF fluxu kontrol aktiboa. BM .....	135



# Taulen Aurkibidea

---

1. Taula. NREL 5MW aerosorgailuaren ezaugarri nagusiak.....	8
2. Taula. Oinarrizko RL algoritmoaren entrenamendurako definitutako parametroak.....	61
3. Taula. Oinarrizko ML bidezko yaw kontrol estrategiaren ANNren diseinurako parametroen definizioa.....	64
4. Taula. Hobetutako RL algoritmoaren entrenamendurako definitutako parametroak.....	69
5. Taula. Hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategiaren ANNren diseinurako parametroen definizioa.....	73
6. Taula. PSO eta PoFn oinarritutako optimizazio algoritmoaren parametroen definizioa.....	78
7. Taula. Hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategiaren DM algoritmoaren parametro definizioa .....	80
8. Taula. NREL 5MW aerosorgailuaren palen sekzio banaketa .....	83
9. Taula. Kofiziente aerodinamikoaren modelizaziorako erabilitako ANNren parametro definizioa .....	92
10. Taula. Maximoa aurkitzeko algoritmoaren emaitzak.....	97
11. Taula. Aztertutako haize-abiadura eta norabide kasuak.....	103

<b>12. Taula.</b> Oinarrizko ML bidezko yaw kontrol estrategiarekin hautatutako ekintzak .....	104
<b>13. Taula.</b> Hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategiarekin hautatutako ekintzak .....	111
<b>14. Taula.</b> Proposatutako ML bidezko yaw kontrol estrategiarekin lortutako emaitzak .....	116
<b>15. Taula.</b> Proposatutako ML bidezko yaw kontrol estrategiarekin lortutako emaitzen arteko konparaketa .....	117
<b>16. Taula.</b> Fluxu kontrol pasiboa. AEPren konparaketa .....	127
<b>17. Taula.</b> Fluxu kontrol pasiboa. Irabazi ekonomikoak .....	127
<b>18. Taula.</b> Fluxu kontrol pasiboa. Hidrogeno sorkuntza .....	128
<b>19. Taula.</b> Fluxu kontrol pasiboa. “Thrust” indarraren konparaketa .....	129
<b>20. Taula.</b> Fluxu kontrol pasiboa. BMren konparaketa .....	130
<b>21. Taula.</b> AGF fluxu kontrol aktiboa. Sorutako energia elektrikoaren konparaketa.....	133
<b>22. Taula.</b> AGF fluxu kontrol aktiboa. “Thrust” indarraren konparaketa .....	134
<b>23. Taula.</b> AGF fluxu kontrol aktiboa. BMren konparaketa .....	135

# Algoritmoen Aurkibidea

---

1. Algoritmoa. DPn oinarritutako RL algoritmoaren pseudokodea.....	39
2. Algoritmoa. MC metodoan oinarritutako RL algoritmoaren pseudokodea .....	40
3. Algoritmoa. (a) SARSA n oinarritutako RL algoritmoaren pseudokodea (b) “Q-Learning”-en oinarritutako RL algoritmoaren pseudokodea.....	41
4. Algoritmoa. PSO eta PoFn oinarritutako optimizazio algoritmoaren pseudokodea.....	77
5. Algoritmoa. Maximoa aurkitzeko algoritmoaren pseudokodea.....	96





# Akronimoak

---

AEB	Ameriketako Estatu Batuak
JCR	Journal Citation Report
PLC	Programmable Logic Computer
LCOE	Levelized Cost of Energy
DTD	Drive-train damping
ATD	Active Tower Damping
IPC	Individual Pitch Controller
LIDAR	Light Detection and Ranging
FAST	Fatigue, Aerodynamics, Structure and Turbulence
NREL	National Renewable Energies Laboratory
PID	Proportional, Integral, Derivative
PI	Proportional, Integral
ANN	Artificial Neural Network
AI	Artificial Intelligence
ML	Machine Learning

RL	Reinforcement Learning
DL	Deep Learning
DRL	Deep Reinforcement Learning
MLP	MultiLayer Perceptron
MLP-BP	MultiLayer Perceptron with BackPropagation
BP	BackPropagation
NARXNET	NonLinear AutoRegressive Network
MDP	Markov Decision Process
DP	Dynamic Programming
MC	Monte Carlo
TD	Temporal Differences
GA	Genetic Algorithms
DE	Differential Evolution
PSO	Particle Swarm Optimization
PoF	Pareto optimal Front
MSE	Mean Squared Error
DM	Decision Making
SVM	Support Vector Machines
HCA	Hierarchical Cluster Analysis
PCA	Principal Component Analysis
VG	Vortex Generator
GF	Gurney Flap
MT	MicroTab
CFD	Computational Fluid Dynamics
AGF	Active Gurney Flap
AoA	Angle of Attack
BEM	Blade Element Momentum

AEP

Annual Energy Production



# Nomenklatura

---

- Oinarrizko ML bidezko yaw kontrol estrategia

$\theta_{yaw}$	Yaw angelua
$\theta_{haizea}$	Haizearen norabidea
$\theta_{gondola}$	Gondolaren orientazioa
$YawK$	Yaw errotazio-abiaduraren irabazi proportzionala
$\Omega_{yaw}$	Yaw errotazio-abiadura
$P_{kontrol}$	Sortutako potentzia yaw sistema erabiliz
$P_{ez_kontrol}$	Sortutako potentzia yaw sistema erabili gabe
$P_{optimo}$	Aerosorgailuak sortu dezakeen potentzia optimoa
$\gamma$	Deskontu-faktorea
$T_{RL}$	RL algoritmoan erabilitako denbora-tartea
$Q_P(s, a)$	Sortutako potentziaren irabazi matrizea
$Q_P(s(t), a(t))$	Sortutako potentziaren irabazi funtzioa
$\mu$	ANNren ikasketa-ratioa

• **Hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategia**

$\Delta\theta_{yaw}$	Ahalbidetutako yaw errota
$Q_M(s, a)$	Eragindako karga mekanikoen matrizea
$Q_M(s(t), a(t))$	Eragindako karga mekanikoen funtzioa
$\Phi_{1,max}$	PSO algoritmoaren esplorazio-faktore maximoa
$\Phi_{2,max}$	PSO algoritmoaren esplotazio-faktore maximoa
$H_{max}$	PSO algoritmoaren inertzia maximoa
$P$	PSO algoritmoaren partikula kopurua
$n$	PSO algoritmoaren aldagai kopurua
$x$	Partikula bakoitzaren posizioa
$y$	Partikula bakoitzaren gaitasun-balioa
$v$	Partikula bakoitzaren abiadura
$RN$	PSO algoritmoan erabilitako ANN
$iter$	PSO algoritmoaren iterazio kopurua
$x_{global}$	Aurkitutako soluzio optimoaren posizioa
$y1_{global}$	Lehenengo koste-funtzioaren balio onena
$y2_{global}$	Bigarren koste-funtzioaren balio onena
$x_{PoF}$	PoF osatzen duten partikulen posizioa
$y_{PoF}$	PoF osatzen duten partikulen gaitasun-balioak
$x_{ant}$	Partikula bakoitzaren aurreko posizioa

• **Fluxu kontrol pasiboa**

$V_{haizea}$	Haize-abiadura
$w$	Errotorearen biratzea-abiadura
$r$	Profil aerodinamikoari dagokion erradioa
$a$	Indukzio-faktore axiala

$a'$	Indukzio-faktore tangenziala
$\Phi$	Fluxu-angelua
$\alpha$	Eraso-angelua
$\beta$	Pitch angelua
$\beta_{twist}$	Twist-angelua
$C_L$	Euste-koefizientea
$C_D$	Arraste-koefizientea
$C_P$	Potentzia koefizientea
$C_n$	Karga-koefiziente normala
$C_t$	Karga-koefiziente tangenziala
$B$	Pala kopurua
$c$	Sekzioaren korda
$\rho$	Airearen dentsitatea
$F$	Prandtl-en korrekzio-faktorea
$P$	Aerosorgailuak sortutako potentzia elektrikoa
$T$	Errotorean sortutako "Thrust" indarra
$BM$	Momentu flektatzailea palen erroan
$Nbins$	Weibull distribuziaren haize-abiadura kopurua
$P(V_0, j)$	Haize-abiadura bin batekin sortutako potentzia elektrikoa
$N(V_0, j)$	Haize-abiadura bin bat agertzeko probabilitatea
$P_{batezbeste}$	Batezbeste sortutako potentzia elektrikoa
$h$	Ordu kopurua
$V$	Estrapolatutako haize-abiadura
$V_0$	Haize-abiadura originala
$H$	Estrapolatutako haize-abiaduraren altuera
$H_0$	Haize-abiadura originalaren altuera

$z_0$	Estrapolazio logaritmikoaren laztasun-luzera
$\alpha_H$	Hellman-en lege esponentzialaren marruskadura faktorea
$k$	Weibull distribuzioaren forma faktorea
$c$	Weibull distribuzioaren eskala faktorea

- **Fluxu kontrol aktiboa**

$x$	Maximoa aurkitzeko algoritmoan GF luzera
$\Delta x$	Maximoa aurkitzeko algoritmoan GF luzera aldaketa
$y$	Maximoa aurkitzeko algoritmoan $C_L/C_D$ ratioa
$RN$	Maximoa aurkitzeko algoritmoan erabilitako ANN



# Argitalpen Zerrenda

---

Tesi honen garapenak hurrengo argitalpenak sortu ditu:

- **Aldizkarietako argitalpenak**

- Saenz-Aguirre, A., Fernandez-Gamiz, U., Zulueta, E., Aramendia, I., Teso D.: Flow Control based 5 MW Wind Turbine Enhanced Energy Production for Hydrogen Generation Cost Reduction. International Journal Of Hydrogen Energy, 2020, Vol. 0. ISSN: 0360-3199, DOI:10.1016/j.jhydene.2020.01.022
- Saenz-Aguirre A., Zulueta E., Fernandez-Gamiz U., Ulazia A., Teso D.: Performance Enhancement of the Artificial Neural Network based Reinforcement Learning for Wind Turbine Yaw Control, Wind Energy, 2019, Vol. 0. ISSN: 1095-4244, DOI:10.1002/we.2451
- Saenz-Aguirre A., Fernandez-Gamiz U., Zulueta E., Ulazia A., Martinez-Rico J.: Optimal Wind Turbine Operation by Artificial Neural Network-Based Active Gurney Flap Flow Control, Sustainability, 2019, Vol. 11(10). ISSN: 2071-1050, DOI:10.3390/su11102809
- Saenz-Aguirre A., Zulueta E., Fernandez-Gamiz U., Lozano J., Lopez-Guede J.M.: Artificial Neural Network Based Reinforcement Learning for Wind Turbine Yaw Control, Energies, 2019, Vol. 12(3). ISSN: 1996-1073, DOI:10.3390/en12030436

- Aramendia I., Fernandez-Gamiz U., Zulueta E., Saenz-Aguirre A., Teso D.: Parametric Study of a Gurney Flap Implementation in a DU91W(2)250 Airfoil, *Energies*, 2019, Vol. 12(2). ISSN: 1996-1073, DOI:10.3390/en12020294

- **Kongresuetako argitalpenak**

- Saenz-Aguirre A., Zulueta E., Fernandez-Gamiz U., Lopez-Guede J.M., Ramos-Hernanz J.A.: Artificial Neural Network based Wind Turbine Yaw System Modelling and Real-Time Yaw Moments Estimation. 7th Eur. Conf. Ren. Energy Sys. 10-12 June 2019, Madrid, Spain
- Saenz-Aguirre A., Fernandez-Resines S., Aramendia I., Fernandez-Gamiz U., Zulueta E., Lopez-Guede J.M., Sancho J.: 5 MW Wind Turbine Annual Energy Production Improvement by Flow Control Devices, *Proceedings*, 2018, Vol. 2, pp. 1452. ISSN: 2504-3900, DOI:10.3390/proceedings2231448
- Aramendia I., Saenz-Aguirre A., Fernandez-Gamiz U., Zulueta E., Lopez-Guede J.M., Boyano A., Sancho J.: Gurney Flap Implementation on a DU91W250 Airfoil. *Proceedings* 2018, Vol. 2, pp. 1448. ISSN: 2504-3900, DOI:10.3390/proceedings2231452

- **Aldizkarietako beste argitalpen batzuk**

- Aramendia I., Zulueta E., Teso D., Saenz-Aguirre A., Fernandez-Gamiz U.: Modeling of Motorized Orthosis Control. *Applied Sciences*, 2019, Vol. 9(12). ISSN: 2076-3417, DOI: 10.3390/app9122453
- Teso D., Zulueta E., Fernandez-Gamiz U., Saenz-Aguirre A., Martinez R.: Predictive Dynamic Window Approach Development with Artificial Neural Fuzzy Inference Improvement. *Electronics*, 2019, Vol. 8(9). ISSN: 2079-9292, DOI: 10.3390/electronics8090935
- Aramendia I., Saenz-Aguirre A., Boyano A., Fernandez-Gamiz U., Zulueta E.: Oscillating U-shaped Body for Underwater Piezoelectric Energy Harvester Power Optimization, *Micromachines* 2019, Vol. 10(11). ISSN: 2072-666X, DOI: 10.3390/mi10110737

- **Liburu kapituluak (Berrikuste-prozesuan)**
- Saenz-Aguirre A., Zulueta E., Fernandez-Gamiz U., Ramos-Hernanz J.A., Lopez-Guede J.M.: Self-Tuning Yaw Control Strategy of an Horizontal Axis Wind Turbine based on Machine Learning, in Mahdavi Tabatabaei N., Kurt E., Bizon N. (Eds.): Numerical Methods for Energy Applications (Springer International Publishing)



# 1. Kapitulua

## Sarrera

---

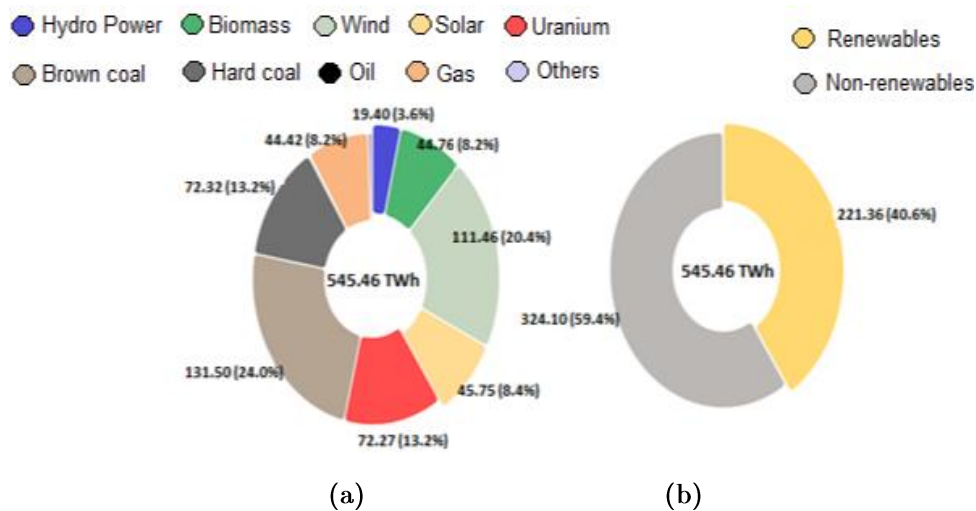
Kapitulu honetan ikerkuntza lan hau era egokian ulertu eta testuinguruan kokatzeko informazioa aurkeztuko da. 1.1 atalean energia berriztagarrien eta energia eolikoaren egoeraren eta honi lotutako kontrol estrategien aurrekarien azterketa bat egingo da. 1.2 eta 1.3 ataletan ikerkuntza lanaren helburuak eta hipotesi garrantzitsuenak aurkeztuko dira, hurrenez hurren. Diseinu prozesuan zehar jarraitutako metodologia 1.4 atalean azalduko da. Azkenik, 1.5 atalean tesiaren gainontzeko kapituluaren egituraketa bat definituko da.

### 1.1 AURREKARIAK

Bigarren iraultza industrialak batez ere Europa mendebaldean eta Ameriketako Estatu Batuetan (AEB) XIX. mende bukaerako eta XX. mende hasierako urteetan zehar gertatu zen aldaketa sozioekonomikoen multzoa izan zen. Elektrizitatea eta orduan energia-iturri berriak zirenak (petrolio eta ikatza) baliatuz, bigarren iraultza industrialak herrialde hauen sistema industrialaren garapen garrantzitsu bat bultzatu zuen. Gainera, garai hartan, autoak, hegazkinak,

makina industrialak eta energia-kontsumoa handitu zuten beste hainbat gailu ere agertu ziren.

Gaur egun, munduko energia elektriko sorkuntza iturri ez-berriztagarrietan oinarritzen da hein handi batean oraindik ere. Energia berriztagarri edo jasangarriak hazten ari dira urteen joanean, baina ez dute oraindik energia ez-berriztagarriari gaina hartzerik lortu. Gainera, energia jasangarriaren sorkuntza aldakorra da herrialdez herrialde, herrialde garatuak izanik energia-iturri berriztagarrien integrazio maila handiena erakusten dutenak. 2. Irudian herrialde garatu batek, Alemaniak kasu honetan, 2018. urtean zehar sareratutako energia elektrikoaren jatorria azaltzen duen diagrama bat aurkezten da. 2. Irudia (b)-n ikus daitekeenez, Alemaniak sortutako energiaren % 40.6 jatorri berriztagarrikoa izan zen eta % 59.4 jatorri ez-berriztagarrikoa. Portzentaia hau askoz kaskarragoa da herrialde ez hain garatuetan. 2. Irudia (a)-ri erreparaturaz gero, ikus daiteke jatorri ez-berriztagarria duten energia-iturrietatik, ikatza (% 37.2) eta energia nuklearra (% 13.2) izan zirela erabilienak. Erregai-fosilei dagokienez, gehien kontsumitutakoak ikatza bera (% 37.2) eta gas naturala (% 8.2) izan ziren.



## 2. Irudia. Alemaniak 2018. urtean sareratutako energia elektrikoaren jatorria [1]

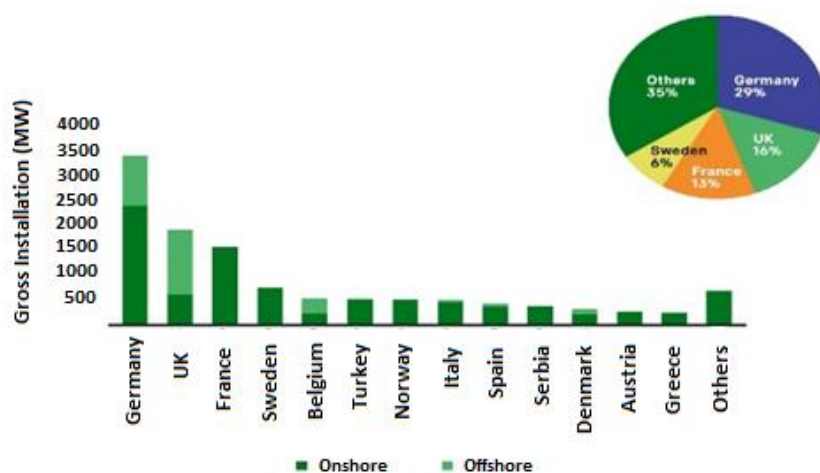
Jatorri berriztagarriko energia-iturriekin alderatuz gero, erregai-fosilek bi arazo nabarmen dituzte. Alde batetik, erregai-fosilen sorkuntza milioika urte luze den deskonposizio prozesu baten ondorio da, eta beraz, kontsumoa sorkuntza baino azkarragoa izanik, hauek agortzeko arriskua erreal da. Bestalde, hainbat ingurumen-arazo daude erregai-fosilen konbustioari lotuta, batez ere, kutsadura

atmosferikoa eta klima aldaketa izeneko kontzeptuaren barruan sar daitezkeen beste hainbat fenomeno: Atmosferako tenperaturen hazkuntza, fenomeno meteorologiko bortitzak, airearen kutsadura maila handia, poloak urtzea, itsasoen mailaren gorakada, landare eta animalia espezieak desagertzea, etab. Spurling et al. [2]-en lanean klima aldaketak planetan izan ditzakeen eraginen analisi bat aurkezten da.

Honen guztiaren ondorioz, energia berriztagarriek gorakada nabarmena izan dute azken urteotan. Alde batetik, energia-iturri iraunkorrak dira, hau da, ez dute klima aldaketarik eragiten eta ez dute agortzeko arriskurik erakusten. Gainera, herrialdeen menpekotasun energetikoa gutxitzeko eta erregai-fosilik ez daukaten herrialdeen garapenerako tresna ere izan daitezke. Beste alde batetik, energia berriztagarrien desabantailen artean aldizkakotasuna (eta ondorioz agertzen den metatzeko beharra) eta paisaia duten eragina nabarmendu daitezke. Energia berriztagarrien integrazio-prozesuan emandako urratsen eta etorkizunean egin beharreko bidearen analisi sakon bat aurkezten da Hammons et al. [3]-en lanean.

Energia-iturri jasangarri edo iraunkorren artean energia eolikoa da merkatu energetiko handiena lortu duena eta gehien hazten ari dena. Energia eolikoak 2018. urtean herrialde desberdinetan izan duen hazkuntzaren diagrama bat azaltzen da 3. Irudian. Diagrama hau WindEurope [4] taldeak 2019. urtean publikatutako txosten batean emandako informazioan oinarritzen da. Bertan ikus daitekeenez, energia eolikoak hazkuntza handia nabaritu du 2018. urtean batez ere lau herrialdetan: Alemania, Erresuma Batua, Frantzia eta Suedia. Txosten berdinaren esanetan, Alemania da haize potentzia eoliko gehiena instalatuta duen herrialdea eta Danimarka bere energiaren ehuneko handiena energia eolikoz betetzen duena, % 41 batekin. Rosales-Asensio et al. [5]-en arabera, Espainian 2015. urtean sortutako potentzia elektrikoaren % 15k jatorri eolikoa izan zuen.

Sektorearen gorakadarekin eta teknologiaren garapenarekin batera fabrikatzaile industrial ugari agertu dira (Siemens Gamesa, Vestas, Acciona, etab.) eta merkatuaren lehiakortasuna asko handitu da. Ondorioz, produktuaren ezaugarriak hobetzeko eta sortutako potentzia maximizatzeko etengabeko bilaketa hasi da fabrikatzaile guztien artean. Teorian, aerosorgailuak sortutako potentzia elektrikoa handitzeak bere elementuetan eragindako karga mekanikoak areagotzea dakar. Gainera, sistema egoera kaltegarriago batean lan egitera bultzatzen denez, aerosorgailuaren elementu estrukturalen biziraupena murriztu egingo da.



### 3. Irudia Energia eolikoak 2018. urtean zehar hainbat herrialdetan izandako hazkuntza [4]

Testuinguru honetan, aerosorgailuen fabrikazioa prozesuan karga mekaniko handiagoak jasan ditzaketen materialak erabiltzeak koste ekonomiko gehigarri bat ekarriko luke. Kontrara, aerosorgailuetan inplementatutako kontrol sisteman egindako hobekuntzek aerosorgailu berrien operazioaren hobetzea ahalbidetuko lukete, koste ekonomikoa gutxi gorabehera berdin mantenduta. Hortaz, aerosorgailuen kontrol sistemaren inguruko ikerkuntza lana indar handia hartzen ari da.

Aerosorgailu batean inplementatutako kontrol sistemak hurrengo helburu nagusiak ditu:

- 1- Aerosorgailuan lan egiten duten eta inguruan dauden pertsonen segurtasuna bermatu.
- 2- Aerosorgailuaren ongizatea bermatu.
- 3- Aerosorgailuak sortutako potentzia maximizatu.
- 4- Sarera injektatutako energia elektrikoaren kalitatea mantendu.

Aurretik aipatu bezala, sistema berriztagarri gehienek, energia eolikoak barne, ez dute egoera egonkor batean funtzionatzen; ingurumen estokastiko baten parte dira, eta aldizkakotasuna da haien ezaugarrietako bat. Gainera, sistema eolikoaren kasuan, aerosorgailuetan inplementatutako kontrol sistemaren eraginez, beren operazioa aldakorra da haizearen abiaduraren arabera. Kontrol sistemaren



eginkizuna operazio-puntu guztietan aerosorgailuaren ongizatea arriskuan jarri gabe honek sortutako potentzia elektrikoa maximizatzea izango da. Adibidez, haize-abiadura leun baten aurrean, elementu mekanikoetan eragindako karga mekanikoak handiak izango ez direnez, kontrol sistemaren helburu nagusia aerosorgailuak sortutako potentzia maximizatzea izango da. Bestalde, haize-abiadura gogor baten aurrean, kontrol sistemaren erantzuna aerosorgailuak sortutako potentzia elektrikoa bere balio izendatuan mantentzea izango da, elementu mekanikoetan eragindako karga mekanikoak mugatzeko helburuarekin.

Aerosorgailuak sortutako potentziak eta elementu mekanikoetan eragindako kargak zeresan handia dute egun gaurkotasan handia daukan kontzeptu batean, Energiaren Koste Orekatua edo “Levelized Cost of Energy” (LCOE) izenekoa. LCOE aerosorgailu batek bere bizitza erabilgarrian zehar eragindako gastuen eta sortutako energiarekin lortutako irabazien arteko erlazioa da [6,7]. Gaur egun, merkatu eolikoan lehiakorra izan nahi duen edozein fabrikatzailerentzat, LCOEren balioa minimizatzea ezinbesteko bilakatu da. Horretarako, aerosorgailuen operazioa optimizatuko duten kontrol algoritmoen garapena funtsezko bilakatu da.

Egun, ardatz horizontaleko aerosorgailuen kontrol sisteman implementatutako algoritmo gehienak kontrol teoria klasikoan oinarritzen dira. Diseinu aldetik sinpleak dira eta urteetako implementazioaren ondoren heldutasun industrial maila handia lortu dute. Hala ere, gaur egun, sarera konektatuta dagoen aerosorgailu bati eskatzen zaizkion baldintzak, merkatuan lehiakor izateko zein sarera konektatuta mantentzeko, askoz konplexuago eta zorrotzagoak bihurtu dira eta inplementatu beharreko kontrol estrategien diseinua ere konplikatu egin da. Hortaz, gaur egun, ikerkuntza lan handia dago aerosorgailuen efizientzia areagotu eta LCOE murriztea helburu duten kontrol algoritmo berriak diseinatuzeko.

Aerosorgailuen kontrol sistema etengabeko hobekuntza batera bideratuta dagoen bitartean, Inteligentzia Artifizial edo “Artificial Intelligence” (AI) izeneko zientzia gorakada handia nabaritzen ari da azken urteotan kontrol industrialaren arloan. Gorakada honen arrazoi nagusia honako hau da: AI osatzen duten teknikek industria bizitzen ari den sentzorizazio eta digitalizazio prozesuei ematen dien erantzun egokia. Digitalizazio prozesu hau laugarren iraultza industrial edo “Industry 4.0” izenez ezagutzen hasia da literaturan [8,9].

AI osatzen duten teknikek duten ezaugarririk garrantzitsuenak honako hau da: datu sorta handiak erabili, hauetatik informazio baliagarria atera eta bertatik ikasteko aukera. Gaur egun, edozein prozesu edota sistema industrialetan datu sorta handiak sortzen dira. Gainera, teknika hauen gorakada azaltzen duen beste

arrazoi bat azken urteetan sistema informatikoen jasandako garapen handia da, prozesatzeko gaitasuna areagotu eta koste ekonomikoak murriztuta.

Ikerkuntza lan honetan aurkeztutako diseinu eta analisisien helburua zera da: AI teknikan oinarritutako zenbait kontrol sistema adimentsuk ardatz horizontaleko aerosorgailu baten efizientzia hobetzeko eta bere elementu estrukturetan eragindako karga mekanikoak murrizteko izan dezaketen eragin positiboa probatu eta simulazio bidez kuantifikatzea.

## 1.2 HELBURUAK

Ikerkuntza lan honen helburu nagusia ardatz horizontaleko aerosorgailu baten operazioa optimizatzeko (sortutako potentzia maximizatu eta karga mekanikoak murriztu) teknika adimentsuetan oinarritutako kontrol algoritmoen diseinu eta simulazio bidezko balioztatzea da. Helburu honen izateko arrazoiak 1.1 atalean deskribatutakoak dira, hots, merkatu eolikoan lehiakor izateko beharra eta AI osatzen duten teknikek hori lortzeko egin dezaketen ekarpen garrantzitsua.

Helburu nagusi hau zenbait helburu txikiagotan banatu daiteke:

- Ardatz horizontaleko aerosorgailu baten yaw angeluaren kontrola burutzeko “Machine Learning” (ML) izeneko teknikan oinarritutako kontrol estrategia baten diseinua eta balioztatzea. ML estrategia honek Sare Neuronal Artifizial edo “Artificial Neuran Network” (ANN), Errefortzu bidezko Ikasketa edo “Reinforcement Learning” (RL) eta optimizazio algoritmoak bezalako teknika adimentsuak erabiliko ditu. Ardatz horizontaleko aerosorgailu baten yaw sistemaren kontrola ML teknika bidez aplikatzea posible dela erakutsi nahi da, eta honek eskaini ditzakeen onurak kuantifikatu.
- Ardatz horizontaleko aerosorgailu baten palen jarduera aerodinamikoan optimizatzeko fluxu bidezko kontrol sistemen diseinua eta balioztatzea. Fluxu bidezko kontrol gailu pasiboek ardatz horizontaleko aerosorgailu baten operazioan (sortutako potentzia elektrikoa eta karga mekanikoak aintzat hartuz) duten eragina aztertu eta Urtebetean Sortutako Energia edo “Annual Energy Production” (AEP) handitzeko eskaintzen duten aukera kuantifikatu nahi da.
- Normalean fluxu kontrol pasiborako erabiltzen diren Gurney Flap (GF) gailuen funtzionamendua hobetu, beren operazio aktiboan oinarritutako fluxu kontrol estrategia bat diseinatuta. Jarduera aktibo hau lortzeko,

ANN bat eta optimizazio algoritmo bat erabiltzen dituen estrategia berri bat proposatuko da. GFen operazio aktiboa kontsideratuta, fluxu kontrol pasiboarekin lortutako emaitzak hobetzea da helburua, batez ere karga mekanikoak murrizteari dagokionean.

### 1.3 HIPOTESIAK

Ikerkuntza lan honetan diseinatutako kontrol estrategiaren bidez espero da ardatz horizontaleko aerosorgailu baten operazioa optimizatzen lagunduko duten kontrol estrategiak lortzea. Aerosorgailuaren jardura ebaluatzeko adierazgarri nagusiak aerosorgailuak egoera jakin batean sortutako potentzia elektrikoa eta sistemaren elementu estruktural nagusietan eragindako karga mekanikoak izango dira.

Aurretiaz 1.2 atalean deskribatutako helburuei erantzuteko diseinatutako diren kontrol estrategiak hurrengoak lortzea espero da:

- ML bidezko yaw kontrolarekin aerosorgailuaren yaw sistemaren operazio autonomo bat garatzea espero da. RL algoritmoaren aldagaiak eta kostefuntzioa egoki definituz gero, kontrol estrategiak era guztiz autonomoan egoera jakin bati dagokion ekintza optimoa aukeratzeko ahalmena izatea espero da. Horrela, kontrolagailuaren diseinu prozesuan ingeniariaren kriterio subjektiboekiko menpekotasuna ezabatzea espero da. Gainera, proposatutako ML bidezko yaw kontrol estrategiarekin aerosorgailuak sortutako potentzia elektrikoa eta bere elementu estruktural nagusietan eragindako karga mekanikoak optimizatzea espero da.
- Fluxu kontrol gailu pasiboen erabilerarekin aerosorgailuak sortutako potentzia handitzea espero da, palen erroetan eta dorrean eragindako karga mekanikoak areagotzearen kontura. Hala eta guztiz ere, fluxu kontrol gailu pasiboen diseinu egoki batekin aerosorgailuaren AEP handitzea espero da.
- Fluxu kontrol estrategia aktibo baten bidez fluxu kontrol gailu pasiboen jardura hobetzea espero da, batez ere aerosorgailuaren elementuetan eragindako karga mekanikoak murrizterako orduan. Gainera, fluxu kontrol gailuen operazio aktiboarekin fluxu kontrol gailu pasiboen diseinu desegoki bat egiteko aukera minimizatu edota ezabatzea espero da.

- Teknika adimentsuetan oinarritutako kontrol estrategien funtzionamendu egokia lortu eta aerosorgailu industrial batean aplikatzeko baliozkotasuna frogatzea espero da. Alde batetik, ANNen inplementazioarekin datu kopuru handiak errazago erabili eta datu errealetatik etengabe ikasteko aukera lortzea espero da. Optimizazio algoritmoek aerosorgailuaren funtzionamendu optimo bat lortzeko aukera ematea espero da. Azkenik, RL algoritmoak aerosorgailuaren operazio optimo eta autonomo bat lortzeko bidea erakutsiko duela espero da.

## 1.4 METODOLOGIA

Ikerkuntza lan honetan proposatutako kontrol estrategia aurreratuen diseinu eta simulazio bidezko balioztatzerako lehen urratsa analisirako erabiliko den aerosorgailua aukeratzea izango da. Lan honetan deskribatutako diseinu prozedura eta simulazio emaitzak guztiak Jonkman et al. [10]-en lanean aurkeztutako eta “National Renewable Energies Laboratory”-k (NREL) garatutako NREL 5MW ardatz horizontaleko aerosorgailuan oinarrituko dira. NREL 5MW aerosorgailuaren ezaugarri nagusiak 1. Taulan jaso dira.

1. Taula. NREL 5MW aerosorgailuaren ezaugarri nagusiak

Aerosorgailuaren izena	NREL 5MW
Potentzia izendatua	5 MW
Errotorearen diametroa	126 m
Gondolaren altuera	90 m
Errotorearen masa	110000 kg
Gondolaren masa	240000 kg
Dorrearen masa	347460 kg
Konexio haize-abiadura	3 m/s
Haize-abiadura izendatua	11.4 m/s
Deskonexio haize-abiadura	25 m/s
Errotorearen errotazio-abiadura izendatua	12.1 rpm

Proposatutako kontrol estrategien diseinu eta simulazio bidezko balioztatzerako Matlab [11] kalkulu softwarea erabiliko da. Matlab oinarri hartuta, bi metodologia desberdin jarraituko dira.

- **Aerosorgailuaren operazio tenporalaren analisisia**

Aerosorgailuaren operazio tenporalaren analisisirako “Fatigue, Aerodynamics, Structure and Turbulence” (FAST) izeneko kode aeroelastikoa erabiliko da, bere exekuzioa Matlab R2013b softwaretik kudeatuta. Ikerkuntza lan honetan aurkeztutako simulazio emaitza guztiak Jonkman et al. [12]-ek beren lanean azaldutako FAST v7 bertsio librea erabilita lortu dira.

FAST lurrazalean zein itsasoan kokatutako ardatz horizontaleko aerosorgailu baten jarduera modelizatzeko gai da. Horretarako, ardatz horizontaleko aerosorgailu bat osatzen duten elementu estrukturalak (palak, dorrea, potentzia ardatza, etab.) irudikatzen dituzten ekuazio diferentzial multzoak erabiltzen ditu. Era honetan, operazio-puntu desberdinetan aerosorgailuaren elementu guztiak modelizatu eta duten portaera kalkulatzeko gai da.

Jonkman et al. [12]-en lanean adierazi bezala, FAST kode aeroelastikoak garapen esanguratsua jasan du azken urteetan eta, gaur egun, lurrazalean zein itsasoan kokatutako eta bi zein hiru pala dituzten ardatz horizontaleko aerosorgailuekin lan egiteko aukera eskaintzen du. Gainera, FAST erabilita, aerosorgailuaren operazio-puntu desberdinetan simulazio tenporal ez-linealak egiteaz gain, eredu linealak ere kalkulatu daitezke.

Halaber, lortutako simulazio tenporalak eta eredu linealak zenbait preprozesatzaile eta postprozesatzaileekin konbinatuz gero, oso interesgarriak izan daitezkeen analisiak egiteko aukera ere eskaintzen du FASTek. Horrela, BModes [13] preprozesatzailearekin aerosorgailuaren elementu estruktural nagusien maiztasun naturalak kalkulatu daitezke. MLife [14] eta MCrunch [15] postprozesatzaileekin, aldiz, neke-karga mekanikoen eta kasu okerreneko karga mekanikoen analisiak egin daitezke, hurrenez hurren.

FAST softwarearen inguruko beste datu garrantzitsu bat aerosorgailuaren kontrol sistema Matlab/Simulink kalkulu tresnan kanpo-fitxategi gisa inplementatzeko aukera ematen duela da. Ondorioz, simulazio ez-linealak egiterako orduan, kanpo-fitxategi batean dagoen kontrol sistema bat erabili daiteke. Horrela, malgutasun handia dago aerosorgailuaren kontrol sisteman aldaketak egin eta hauek aerosorgailuaren portaeran (potentzia sorkuntzan edota karga mekanikoetan) duten eragina aztertzeko.

Ikerkuntza lan honetan FAST bidezko simulazioak ML bidezko yaw kontrol estrategiak balioztatzekeo baliatuko dira. Simulazio tenporal ez-linealak egiteko beharrezkoak diren haize-abiadura eta haize-norabide datuak bi motakoak izango dira: datu errealak edota Turbsim [16] softwarearen bidez lortutakoak.

- **Aerosogailuaren palen jarduera aerodinamikoaren analisisia**

NREL 5MW ardatz horizontaleko aerosogailuaren palen jarduera aerodinamikoaren analisisia egiteko “Blade Element Momentum” (BEM) izeneko algoritmoa baliatuko da. Algoritmoa Matlab softwarea erabiliz exekutatu da.

BEM algoritmoaren oinarriko kontzeptuak Hansen et al. [17]-en lanean azaldutakoak dira. Algoritmo honek aerosogailuaren pala hainbat sekziotan banatzen du eta sekzio bakoitzak independente eta indibidualki aerosogailuaren palaren jarduera aerodinamikoan duen ekarpena kalkulatu du. Azkenean, sekzio guztien ekarpena gehituz, aerosogailuaren palaren jarduera aerodinamikoaz aztertu daiteke, konputazionalki oso erreza den modu batean. BEM kodea oso erabilgarria da fluxu kontrol sistema desberdinek aerosogailuaren jarduera aerodinamikoan duten eragina aztertzeke.

BEM algoritmoaren funtzionamendu egoki bat lortzeko beharrezko da aurretiaz aerosogailuaren palen koefiziente aerodinamikoak zehatz-mehatz kalkulatu izana. Era berean, edozein fluxu kontrol estrategiak aerosogailuaren jarduera aerodinamikoan duen eragina aztertzeke, beharrezko da fluxu kontrol gailu konfigurazio bakoitzak aerosogailuaren palen koefiziente aerodinamikoak nola aldatzen dituen ezagutzea. Koefiziente aerodinamiko hauek kalkulatzeko bi aukera daude: “Computational Fluid Dynamics” (CFD) kodeak baliatuz simulazioak egitea edota haize-tuneletan egindako lan esperimentaletan lortutako datu errealak erabiltzea.

CFD kodeek aerosogailuaren palen inguruko aire-fluxua eta atzealdean utzitako haize-lorrazta zehaztasun handiz modelizatzeko aukera eskaintzen dute. Ikerkuntza lan honetan beharrezkoak suertatu diren CFD simulazioak egiteko baliatu diren softwareak StarCCM+ [18] eta OpenFoam [19] izan dira. Tresna hauek baliatuta, hainbat fluxu kontrol konfiguraziok aerosogailuaren jarduera aerodinamikoan duten eragina zehaztasun handiz kalkulatu daiteke.

## **1.5 TESIAREN EGITURA**

Doktoretza tesi honek hurrengo egitura du: 2. Kapituluian ikerkuntza lan honetan jorratutako diren gaien inguruko literatura azterketa bat aurkeztuko da.

Proposatutako teknika adimentsuetan oinarritutako kontrol estrategien diseinu prozedura 3. Kapituluuan deskribatuko da. 4. Kapituluuan eta 5. Kapituluuan diseinatutako kontrol estrategiekin lortutako emaitzen aurkezpena eta eztabaida burutuko dira, hurrenez hurren. Azkenik, 6. Kapituluuan ateratako ondorioak eta etorkizunean jarraitu beharreko ikerkuntza lerroak garatuko dira.





## 2. Kapituluia

# Literatura Azterketa

---

Kapitulu honetan ikerkuntza lan honetan zehar jorratuko gaien inguruan egindako literatura azterketa aurkeztuko da. 2.1 atalean ardatz horizontaleko aerosorgailuetan implementatutako ohiko kontrol sistema deskribatuko da. Aerosorgailu baten yaw sistemari lotutako literatura 2.2 atalean aztertuko da. 2.3 atalean fluxu kontrol tekniken aurrekariak eta uneko egoera aztertuko dira. Kontrol teknika adimentsuen inguruko literatura azterketa 2.4 atalean aurkeztuko da. Azkenik, literatura azterketaren laburpena eta inplikazioak 2.5 atalean deskribatuko dira.

### **2.1 ARDATZ HORIZONTALLEKO AEROSORGAILUEN KONTROL SISTEMA**

Ardatz horizontaleko aerosorgailu batean implementatutako ohiko kontrol sistemak hainbat helburu ditu. Aerosorgailuaren operazioari dagokionez, helburu garrantzitsuenak turbinaren ongizatea bermatzea eta sortutako potentzia elektrikoa maximizatzea dira. Gainontzeko helburu guztiak 1.1 atalean deskribatu dira

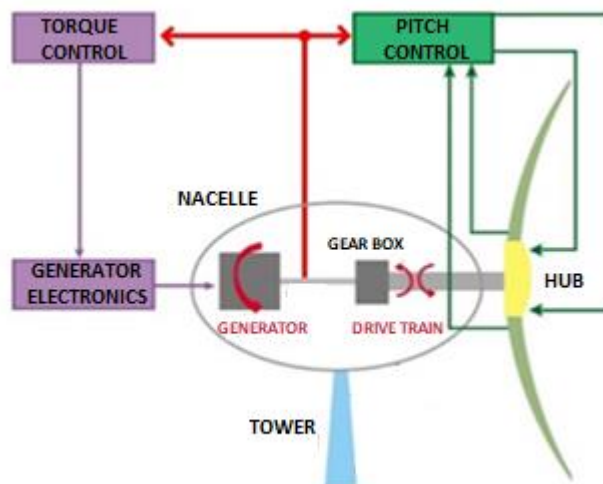
aurretiaz. Kontrol sistemaren bidez sorgailu eolikoaren operazioa erregulatzeko, gaur egun fabrikatutako edozein ardatz horizontaleko aerosorgailu estandarrek hiru aktuazio sistema ditu: Potentzia bihurgailu elektronikoa (aerosorgailuak sortutako momentu elektromagnetikoa, eta beraz potentzia elektrikoa, moldatzen ditu), pitch aktuazio sistema (sarrerako haizearekiko aerosorgailuaren palen eraso-angeluan eragiten du) eta yaw aktuazio sistema (aerosorgailuaren dorreak definitutako ardatz bertikalarekiko gondolaren eta errotorearen biratzea ahalbidetzen du). Aktuazio sistema bakoitzak bere ezaugarri bereizgarriak eta kontrol helburuak ditu.

- **Aerosorgailuaren errotazio-abiaduraren kontrola**

Turbinaren ongizatea bermatzeko eta honek sortutako potentzia maximizatzeko funtsezkoa da errotorearen errotazio-abiaduraren kontrola. Hau lortzeko erabiltzen diren kontrol begiztak momentu begizta eta pitch begizta dira, zeintzuk potentzia bihurgailu elektronikoa eta pitch aktuazio sistema erabiltzen dituzten, hurrenez hurren, beren funtzioa betetzeko.

Bi kontrol estrategia hauek aerosorgailuaren barnean kokatzen den Ordenagailu Industrial edo “Programmable Logic Array” (PLC) batean programatzen dira. Kontrol begizta bakoitzak aerosorgailuaren operazio-puntu barruti guztiaren tarte batean besterik ez du funtzionatzen eta, bien artean, barruti guztia hartzen dute. Ardatz horizontaleko aerosorgailu baten kontrol sistemari dagozkion momentu begizta, pitch begizta, potentzia bihurgailu elektronikoa eta pitch aktuazio sistema irudikatzen dituen eskema sinplifikatu bat ikus daiteke 4. Irudian.

Ardatz horizontaleko aerosorgailu baten funtzionamendua eta operazio-puntuak definitzen dituzten bi kurbak potentzia kurba eta P-n kurba dira. 5. Irudian NREL 5MW aerosorgailuari dagozkion potentzia kurba eta P-n kurba daude ikusgarri. Alde batetik, aerosorgailuaren potentzia kurbak, ikusi 5. Irudia (a), aerosorgailuak sortutako potentzia elektrikoa eta honen sarrerako haize-abiadura erlazionatzen ditu. Bestetik, aerosorgailuaren P-n kurbak, ikusi 5. Irudia (b), aerosorgailuak sortutako potentzia elektrikoa eta sorgailu elektrikoaren biratze-abiadura erlazionatzen ditu.

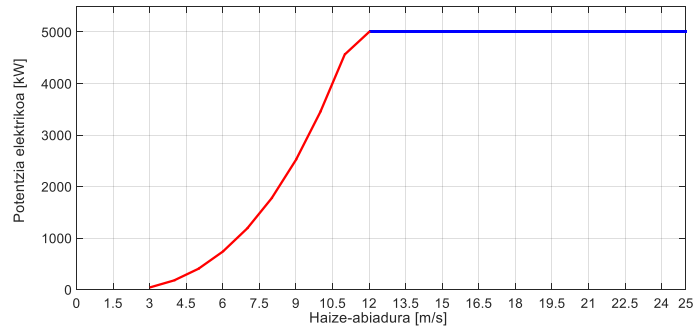


4. Irudia. Ardatz horizontaleko aerosorgailu baten kontrol sistema. Diagrama sinplifikatua [20]

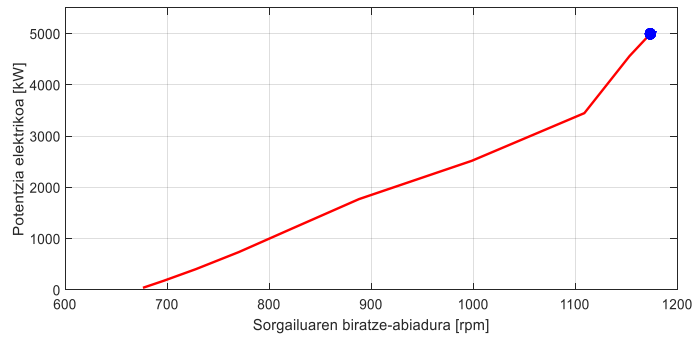
Potentzia bihurgailu elektronikoan oinarritutako momentu kontrol begiztak 5. Irudia (a)-n eta 5. Irudia (b)-n gorritz marraztutako eremuan egiten du lan. Operazio-puntu hauek potentzia partzialeko eremua osatzen dute. Pitch aktuazio sisteman oinarritutako pitch kontrol begiztak, aldiz, 5. Irudia (a)-n eta 5. Irudia (b)-n urdinez marraztutako eremuan egiten du lan. Eremu hau potentzia izendatuko eremu izenez ezagutzen da. Ma et al. [21]-en lanean 100 kW-ko aerosorgailu baten potentzia kurbaren, P-n kurbaren eta eremu bakoitzean aplikatutako kontrol estratejiaren azalpen zehatza eskaintzen da.

Potentzia partzialeko eremuan (5. Irudia (a)-n eta 5. Irudia (b)-n gorritz nabarmenduta), Harris et al. [22]-ek adierazi bezala, kontrol sistemaren helburua aerosorgailuak haizetik jasotako potentzia aerodinamikoa maximizatzea da. Ondorioz, sistemak sortutako potentzia elektrikoa ere maximoa izango da. Hau lortzeko, palen pitch angelua aurretiaz aerosorgailuaren diseinu prozesuan definitutako balio optimo batera mantentzen da eta momentu begiztan oinarritutako kontrol begizta ireki batek funtzionatzen du [23,24].

Eremu honetako operazio-puntu gutxi batzuetan, normalean sarerako konexio-puntutik gertu (konexio-abiadura deritzona) eta sorgailu elektrikoaren errotazio-abiadura izendatutik gertu (trantsizio-eremua deritzona) momentu begiztan oinarritutako kontrol begizta itxi batek egiten du lan. Puntu hauek baina, oso aldakorrek dira aerosorgailu baten modelo batetik bestera.



(a)



(b)

**5. Irudia.** (a) NREL 5MW aerosorgailuaren potentzia kurba (b) NREL 5MW aerosorgailuaren P-n kurba

Potentzia izendatuko eremuan (5. Irudia (a)-n eta 5. Irudia (b)-n urdinez nabarmenduta) kontrol sistemaren helburua aerosorgailuaren errotazio-abiadura kontrolatuz honek haizetik jasotzen duen potentzia balio jakin batera mugatzea da. Ondorioz, aerosorgailuak sortutako potentzia elektrikoa bere balio izendatuan mantenduko da eta elementu mekaniko estruktural nagusien (potentzia transmisioko ardatza, palak eta dorrea) jardura segurua bermatuko da [22,23]. Eremu honetan pitch begiztan oinarritutako kontrol begizta itxi batek funtzionatzen du [25,26].

Azkenik, ardatz horizontaleko aerosorgailu batean aurkitu daitekeen hirugarren kontrol begizta yaw kontrolari dagokiona da. Azken hau, ikerkuntza lan honetako atal garrantzitsu bat izanik, hurrengo 2.2 atalean izango da aztergai zehaztasun handiagoz.

- **Karga mekanikoak murrizteko algoritmoak**

Errotorearen biratze-abiadura, eta ondorioz aerosorgailuak sortutako potentzia elektrikoa, kontrolatzeko algoritmoez gain, aerosorgailuaren elementu estruktural nagusietan karga mekanikoak murrizteko algoritmo bereziak ere programatzen dira ardatz horizontaleko aerosorgailu baten ohiko kontrol sisteman. Algoritmorik erabilienak hurrengoak dira: potentzia transmisio ardatzaren kargak murrizteko “Drive Train Damping” (DTD), dorrearen kargak murrizteko “Active Tower Damping” (ATD) eta paletan kargak murrizteko diseinatzen den “Individual Pitch Controller” (IPC).

Aerosorgailu batean naturalki ezegonkorra den potentzia transmisio ardatzaren oszilazioak murrizteko erabiltzen den kontrol algoritmoa da DTD. Licari et al. [27]-ek beren lanean adierazi bezala, kontrol algoritmo honen estruktura ohikoena “passband” motako filtro bat da. Filtro honen sarrera sorgailu elektrikoaren biratze-abiadura da eta irteera momentu kontrol begiztak potentzia bihurgailu elektronikoari bidalitako erreferentzia seinaleari gehitzen zaio. Algoritmo hau erabilia potentzia transmisio ardatzean eragindako karga mekanikoak asko murrizten dira [28,29].

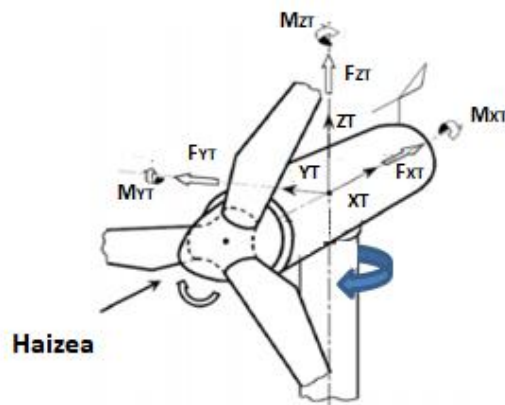
Aerosorgailuaren dorreak definitutako ardatzarekiko plano perpendikularrean oszilazioak murrizteko erabiltzen den kontrol algoritmoa da ATD. Lio et al. [30]-en lanean adierazi bezala, kontrol algoritmo honen sarrera dorrearen ardatzarekiko plano perpendikularreko azelerazioa da eta irteera pitch eragingailuari bidalitako erreferentzia seinaleari gehitzen zaio. Aschemann et al. [31]-en arabera, algoritmo honen erabilerarekin dorrearen oszilazioak asko murriztu daitezke. Hau oso garrantzitsua da, izan ere, haizeari aldakortasun handia dela eta aerosorgailuak haizetik jasotako potentzia oso aldakorra da. Hortaz, sistemak asko oszilatuz dezake.

IPC aerosorgailuaren elementu desberdinetan karga mekanikoak gutxitzeko erabiltzen den kontrol estrategia da, helburu nagusia aerosorgailuaren palen oszilazioak murriztea izanik. Ondorioz, aerosorgailuaren elementu mekaniko nagusietan kargak txikitzea lortu daiteke. Estrategia honek hainbat egitura izan ditzake: Zhang et al. [23]-ek “Proportional, Integral” (PI) kontrolagailuetan oinarritutako IPC estrategia bat proposatzen dute. Han et al. [32]-ek, ordea, logika difusioan oinarritutako estrategia bat garatu eta proposatzen dute euren lanean. Kasu guztietan, algoritmo honen irteera aerosorgailuaren pala bakoitzaren pitch angelu erreferentziari indibidualki gehituko zaio.

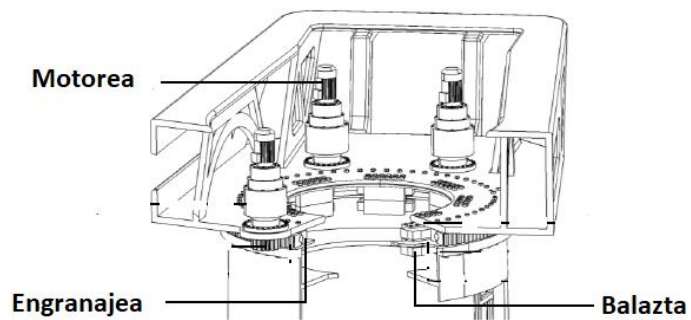
## 2.2 YAW SISTEMA ETA YAW KONTROLA

### *Yaw sistema*

Ardatz horizontaleko aerosorgailu baten yaw sistemak errotorearen eta gondolaren biratzea ahalbidetzen du dorreak definitutako ardatz bertikalarekiko. 6. Irudia (a)-n ardatz horizontaleko aerosorgailu baten elementu nagusiek definitzen dituzten ardatzak erakusten dira. Era berean, 6. Irudia (a)-n yaw sistemak ahalbidetutako errotazio mugimendua nabarmendu da urdin kolorez. Kokapenari dagokionez, aerosorgailuaren dorrearen eta gondolaren artean kokatzen da yaw sistema.



(a)



(b)

6. Irudia. (a) Yaw sistemaren kokapena ardatz horizontaleko aerosorgailu batean [33] (b) Yaw sistemaren barne egituraren sekzio-bista [34]

Aerosorgailu baten yaw sistemak konponente mekaniko ugari ditu, ikusi 6. Irudia (b). Augusto et al. [35]-ek adierazi bezala, sistema honen konponente nagusiak honako hauek dira: motoreak, engranajea (normalean planetario forma hartzen duena) eta balazta hidraulikoa. Yaw sistemaren motoreen eginkizuna aerosorgailuaren gondola eta errotorea biratzeko sortu beharreko momentua angeluarra sortzea da. Engranajeak motoreak sortutako momentua jaso eta biratze-prozesua ahalbidetzen du. Balaztaren helburua, Kim et al. [34]-en lanean azaldu bezala, desiratutako posiziora heldutakoan gondolaren posizioa mantentzea da. Horrela, kanpo aktoreen eraginez engranajeen induzitu litezkeen oszilazioak saihesten dira. Balaztak egindako blokeo indarrari esker yaw sistemaren engranajeen eta aerosorgailuaren beste hainbat elementu mekaniko estrukturaletan eragindako karga mekanikoak nabarmen murriztu daitezke.

### *Yaw kontrola*

Ardatz horizontaleko aerosorgailuetan inplementatutako ohiko kontrol sisteman, arestian 2.1 atalean azaldu bezala, momentu eta pitch kontrol begiztak dira aerosorgailuaren biratze-abiadura kontrolatzen dutenak. Yaw sistemaren helburua bestelakoa denez, gutxien landu izan ohi den kontrol sistema izan da yaw kontrol begizta.

Hala eta guztiz ere, ukaezina da egoki diseinatutako yaw kontrol sistema batek eragin nabarmena duela ardatz horizontaleko aerosorgailu batek haizetik jaso dezakeen potentzia aerodinamikoan. Ondorioz, eragin nabarmena izango du baita aerosorgailuak sor dezakeen potentzia elektrikoan ere. Definizioz, yaw angelua aerosorgailuaren errotorearen orientazioaren eta honen sarrerako haizearen norabidearen arteko diferentzia da. Yaw angeluak ardatz horizontaleko aerosorgailu batek sor dezakeen potentzia elektrikoan duen eragina Ek. (1) eta Ek. (2)-n dago aztergai.

Ek. (1)-k kasurik onenean aerosorgailuak haizetik jaso dezakeen potentzia aerodinamikoaren balio maximoa adierazten du.

$$P_{opt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p \cdot A \cdot v^3 \quad [W] \quad (1)$$

non  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] airearen dentsitatea,  $C_p$  [-] aerosorgailuaren operazioaren menpekota den potentzia koefizientea,  $A$  [m<sup>2</sup>] aerosorgailuaren errotoreak hartzen duen azalera eta  $v$  [m<sup>2</sup>/s] errotorearen sarreran haizea-abiadura diren.

Halaber, aerosorgailuak haizetik jaso dezakeen potentzia erreal maximoa kalkulatu ahal izateko, yaw angelua kontutan hartu beharra dago, ikusi Ek. (2).

$$P = P_{opt} \cdot \cos^3(\theta_{yaw}) \quad [W] \quad (2)$$

non  $\theta_{yaw}$  [°] yaw angeluaren balioa den.

Ek. (1) eta Ek. (2)-k adierazitakoaren arabera, aerosorgailuaren errotorearen orientazioa honen sarrerako haizearen norabidearekin egokitu ezean, potentzia galera handiak sor daitezke, batez ere 2.1 atalean azaldutako aerosorgailuaren operazioari dagokion potentzia partzialeko eremuan. Ardatz horizontaleko aerosorgailuetan errotorearen orientazio egokia mantentzeko arduraduna yaw sistema da. Kragh et al. [36]-en arabera, yaw kontrol sistema egoki batekin ardatz horizontaleko aerosorgailu batek sortutako potentzian irabazi nabarmenak lor daitezke. Choi et al [37]-ek ere yaw kontrol sistema egoki bateri esker lortutako potentzia irabazi adierazgarriak aurkezten dituzte beren lanean.

Bestalde, yaw kontrol estrategia egoki bat izan ezean, potentzia galerak ez ezik [38,39], potentzia transmisio ardatzean zein aerosorgailuaren beste hainbat elementu estrukturaletan karga mekanikoak areagotu daitezke, Spinato et al. [40]-ek beren lanean adierazi bezala. Yaw errotazioaren eraginez sortutako hainbat karga mekanikoren azterketa aurkezten dute Shariatpanah et al. [41]-ek.

Ardatz horizontaleko aerosorgailuen ohiko yaw kontrol estrategiak diseinatzeko “Proportional, Integral, Derivative” (PID) edota PI kontroladoreetan oinarritutako kontrol algoritmo klasikoak erabili izan dira. PID kontroladorearen eta PI kontroladorearen adierazpenak Ek. (3) eta Ek. (4)-n aurkitu daitezke, hurrenez hurren.

$$PID(s) = K_p + \frac{K_p}{T_i \cdot s} + K_p \cdot T_d \cdot s \quad (3)$$

$$PI(s) = K_p + \frac{K_p}{T_i \cdot s} \quad (4)$$

Literatura aztertuz gero, PID bidezko yaw kontrol estrategiak aurkezten dituzten lanak [41-43] aurkitu daitezke bertan. Karakasis et al. [43]-en arabera, PID kontroladore klasikoetan oinarritutako eta yaw kontrol aplikazioetarako implementatutako estrategiek erakusten duten arazo garrantzitsuena akzio integralaren saturazioa da, “wind-up” izenez ere ezagutzen dena. Saturazio honen ondorioz, kontroladorearen erantzun denbora izugarri handitzen da eta oszilazio



oso handiak agertzen dira sistemaren erantzunean. Honek yaw sistemaren engranajea eta aerosorgailuaren beste hainbat elementu estrukturaletan karga mekanikoak nabarmen handituko lituzke.

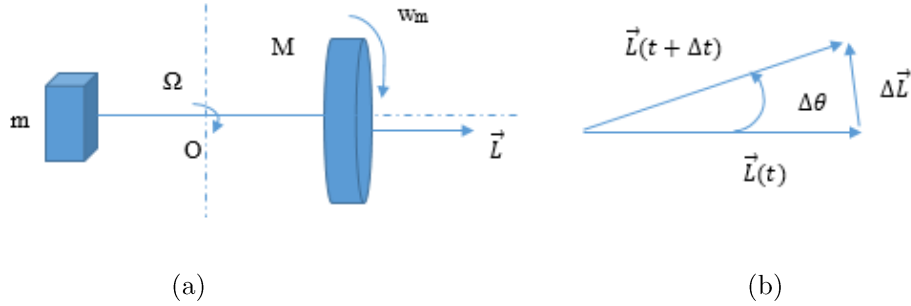
Kontroladore klasikoek ardatz horizontaleko aersorgailu baten yaw sistemaren kontrola burutzeko izan ditzaketen arazoak direla eta, literaturan sektore eolikoan aplikatutako yaw kontrol estrategia aurreratuago batzuk aurkitu daitezke. Farret et al. [44]-ek yaw sistemaren sentsore gabeko kontrol estrategia bat aurkezten dute beren lanean. Bahrani et al. [45]-ek logika difusoa oinarritutako yaw kontrol estrategia bat diseinatzen dute ardatz horizontaleko aersorgailu batean aplikatzeko. Song et al. [46]-ek “Particle Swarm Optimization” (PSO) optimizazio algoritmoa baliatzen dute yaw kontroladorearen parametroak kalkulatzeko. Song et al. [47]-ek potentzia irabazi balio adierazgarriak aurkezten dituzte beren lanean kontrol prediktiboan oinarritutako yaw kontrol estrategia bat erabilia. Beste hainbat lanetan, yaw sistemaren jardura hobetzeko asmoz, “Light Detection and Ranging” (LIDAR) sentsoreak baliatuta haizearen norabidearen neurketan haize-lorrazaren eragina ezabatzea proposatzen da [38,48,49].

Gaur egun, Gebraad et al. [50]-en lanean azaldu bezala, yaw sistemari ematen zaion erabilerarik garrantzitsuenetako bat parke eolikoaren potentziaren optimizazioa da. Izan ere, aerosorgailu jakin batzuk sarrerako haizearen norabidearekin ez lerrokatuta, parke eoliko guztiaren potentzia sorkuntza maximizatzea lortu daiteke. Horrela, Munters et al. [51]-ek gradiente-jaisieran oinarritutako algoritmo bat aurkezten dute aerosorgailu bakoitzaren angelu optimoa kalkulatzeko. Era berean, Dar et al. [52]-ek programazio dinamikoan oinarritutako optimizazio algoritmo bat proposatzen duten angelu optimoaren kalkulurako. Azkenik, parke eoliko baten potentzia sorkuntza optimizatzeko asmoz, Ghanavati et al. [53]-ek eta Choi et al. [37]-ek ekuazio diferentzial partzialetan oinarritutako eta MLen oinarritutako estrategiak aurkezten dituzte, hurrenez hurren.

### *Yaw errotazioaren ondorioz sortutako karga mekanikoak*

Ardatz horizontaleko aerosorgailu batek sortutako potentzian gertatuko galerak asko murriztu daitezke yaw errotazioari esker. Bestalde, errotazio mugimendu honi lotutako arazorik garrantzitsuena aerosorgailuaren elementu estrukturaletan eragindako karga mekaniko handiak dira. Karga mekaniko hauek efektu girokopikoaren bidez azaldu daitezke.

Bere ardatzaren inguruan abiadura handian biratzen duen gorputz batek beste ardatz perpendikular baten inguruan abiadura txikiago batean biratzen duenean sortzen den efektua da efektu girokopikoa [54,55]. Printzipio honen eragina azaltze aldera, aerosorgailuaren yaw errotazioari dagokion eredu sinplifikatu bat aurkezten da 7. Irudian.



7. Irudia. (a) Yaw sistemaren eredu sinplifikatua (b) Momentu angeluarraren aldaketa denborarekiko

non  $m$  [kg] masa estatikoak aerosorgailuaren gondolaren masa irudikatzen duen eta  $M$  [kg] masa birakariak bere ardatz propioaren inguruan  $w_m$  [rad/s] abiadurarekin eta  $O$  ardatzaren inguruan  $\Omega$  [rad/s] abiadurarekin biratzen duen aerosorgailuaren errotorearen masa irudikatzen duen.

7. Irudia (a)-n azaltzen den sistema sinplifikatua aintzat hartuta eta efektu girokopikoaren printzipioaren arabera, sistemaren momentu angeluarra ( $L$  [kg · m<sup>2</sup>/s])  $w_m$  [rad/s] abiaduraren errotazio-ardatzari paraleloa dela kontsidera daiteke, ikusi 7. Irudia (b). Ondorioz, sistema guztia  $O$  ardatzaren inguruan biratzeko sortzen den momentu mekanikoa Ek. (5)-n aurkeztutako adierazpenarekin kalkulatu daiteke.

$$M_{yaw} = \frac{|\vec{L}| \cdot \Delta \theta}{\Delta t} \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (5)$$

Denborarekiko angeluaren aldaketa errotazio-abiadura dela kontsideratuta eta momentu angeluarraren balioa inertiaren eta errotorearen biratze-abiaduraren arabera adierazi daitekela aintzat hartuta, Ek. (6)-n erakutsitako adierazpena lortzen da.

$$M_{yaw} = I_m \cdot w_m \cdot \Omega \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (6)$$

non  $I_m$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ] sistemaren inertzia den.

Hortaz, Ek. (6) aztertuz gero, garbi ikus daiteke efektu giroskopikoaren ondorioz konponente mekanikoetan eragindako karga mekanikoak handitu egiten direla aerosorgailuaren errotorearen biratze-abiadura handituz gero. Gainera, yaw errotazioan parte hartzen duten elementuen dimentsio eta masa handiak direla eta, errotazio-sistemaren inertzia mekanikoa oso altua izango da. Ondorioz, sortutako momentu mekanikoak ere areagotu egiten dira.

Efektu giroskopikoaren ondorioz sortutako kargak murrizteko estrategia posible batzuk ere aurkitu daitezke literaturan. Zheng et al. [56]-ek filtro moldakor bat erabiltzea proposatzen dute sistema aeronautiko baten errotorean efektu giroskopioak eragindako oszilazioak murrizteko asmoz. Ahrens et al. [57]-ek “cross-feedback” teknikan oinarritutako kontrol estrategia deszentralizatu baten erabilera proposatzen dute efektu giroskopiko honen aurrean erantzuteko.

Hortaz, yaw kontrol estrategia egoki batek aerosorgailuak sortutako potentzia elektrikoa maximizatzeko aukera eskaintzen du. Hala eta guztiz ere, aintzat hartu beharra dago potentzia irabazi honek aerosorgailuaren elementu mekanikoetan kargak handitzea ekarriko duela, batez ere, yaw aktuazio sistemaren elementu estrukturaletan.

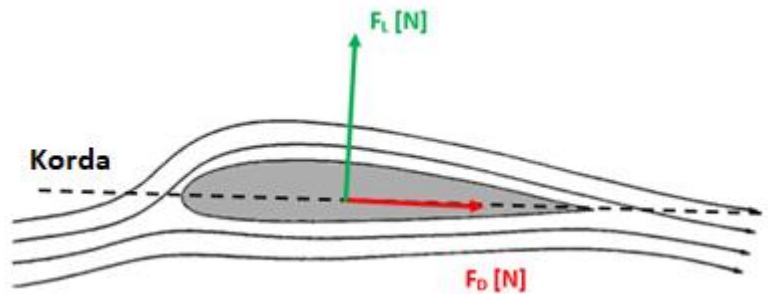
### 2.3 FLUXU KONTROLA AEROSORGAILUEN PALETAN

Aerosorgailuen palen inguruko aire-fluxua moldatzean datzan kontrol teknika da fluxu kontrola, helburua aerosorgailuen palen jarduera aerodinamikoa hobetzea izanik. Ardatz horizontaleko aerosorgailu baten jarduera aerodinamiko hobetzean, honek sortutako potentzia elektrikoa handitzea ez ezik, elementu mekanikoetan eragindako kargak murriztea ere lor daiteke. Jatorriz, fluxu kontrol gailu gehienak sektore aeronautikoan erabiltzeko diseinatu ziren. Esaterako, Taylor et al. [58]-ek sektore aeronautikoan aplikatutako fluxu kontrol gailuekin lortutako emaitza onak aurkezten dituzte beren lanean.

Egun, Oh et al. [59]-ek azaldu bezala, ahalik eta koste ekonomiko txikienarekin ahalik eta potentzia elektriko handiena sortzen duten aerosorgailuak diseinatzea da helburua. Horretarako, Baldacchino et al. [60]-ek beren lanean adierazi bezala, aerosorgailuen palen erroek gero eta sekzio zabalagoak dituzte. Gainera, gero eta elementu handiago baina arinagoekin fabrikatzen dira aerosorgailuak [27,61]. Ondorioz, palen jarduera aerodinamikoa okertu egiten da eta potentzia galerak, karga mekaniko handiagoak eta zarata mekanikoak agertu

daitezke aerosorgailuaren operazioari lotuta [60,62,63]. Testuinguru honetan, fluxu kontrol gailuek sektore aeronautikoan lortutako emaitza onak ikusita, energia eolikoaren sektorean sartu ziren aerosorgailuen palen jarduera aerodinamikoa hobetzeko helburuarekin.

Ardatz horizontaleko aerosorgailu baten errotorearen errotazioa indar aerodinamikoek eragiten dute, haizea palen inguruan pasatzean sortzen direnak. Izan ere, aerosorgailuen palen profilen diseinu bereziari esker, haizea bertatik pasatzean, bi indar aerodinamiko sortzen dira, euste-indarra (palaren errotazioa eragiten du) eta arraste-indarra (palaren mugimenduaren aurka egiten du). Bi indar aerodinamikoak irudikatzen dituen diagrama bat aurkezten da 8. Irudian.



**8. Irudia.** Haizeak aerosorgailu baten palan sortzen dituen indar aerodinamikoak

Euste eta arraste-indar aerodinamikoek adierazpenak Ek. (7) eta Ek. (8)-n aurkeztutakoak dira, hurrenez hurren:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \quad [\text{N}] \quad (7)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \quad [\text{N}] \quad (8)$$

non  $C_L$  [-] euste-koefizientea,  $C_D$  [-] arraste-koefizientea,  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] haizearen dentsitatea,  $A$  [m<sup>2</sup>] aerosorgailuaren errotoreak hartzen duen azalera eta  $v$  [m<sup>2</sup>/s] errotorearen sarrerako haize-abiadura diren.

Aerosorgailu baten jarduera aerodinamiko eta operazio optimo bat lortzeko honako hau lortu behar da: Aerosorgailuaren paletan sortzen den euste-indarra maximizatu (aerosorgailuak haizetik jasotako potentzia handitzeko [64-68]) eta arraste-indarra minimizatu (aerosorgailuaren elementu estrukturetan karga

mekanikoak murrizteko, Baldacchino et al. [60]-ek azaldu bezala). Fluxu kontrol gailuak bi helburu horiek lortzeko diseinatzen dira.

Gaur egun gehien erabiltzen diren fluxu kontrol gailuen azalpena eta sailkapena Aramendia et al. [69,70]-en lanean aurkitu daiteke. Fluxu kontrol gailuak sailkatzeko erabiltzen den irizpide arruntena beren operazio printzipioarekin loturikoa da eta bi taldetan sailkatzen dira: Fluxu kontrol gailu pasiboak eta fluxu kontrol gailu aktiboak. Alde batetik, fluxu kontrol gailu pasiboek ez dute inongo kanpo energia-iturriren beharrik beren operaziorako eta jarduera estatiko bat erakusten dute. Beste alde batetik, fluxu kontrol gailu aktiboek jarduera dinamikoa dute baina kanpo energia-iturri baten beharra duten beren operaziorako.

Egun sektore eolikoan gehien inplementatzen diren fluxu kontrol gailu pasibo eta aktiboen inguruko azterketa zehatzagoa eskainiko da 2.3.1 eta 2.3.2 ataletan, hurrenez hurren.

### 2.3.1 Fluxu Kontrol Pasiboa

Ardatz horizontaleko aerosorgailu baten palen jarduera aerodinamiko optimoa aire-fluxua palaren profilari paralelo eta gertu mugitzen denean gertatzen da, ikusi 8. Irudia. Aire-fluxu honen bereizketa edo urruntzea gertatzen bada, orduan palaren jarduera aerodinamiko okerragotu egiten da eta arestian aipatutako potentzia galera, karga mekaniko eta zarata mekanikoak agertzen dira. Fluxu kontrol gailu pasiboen helburua palaren inguruko aire-fluxuaren bereizketa ekidin eta aerosorgailuen palen jarduera aerodinamiko hobetzea da.

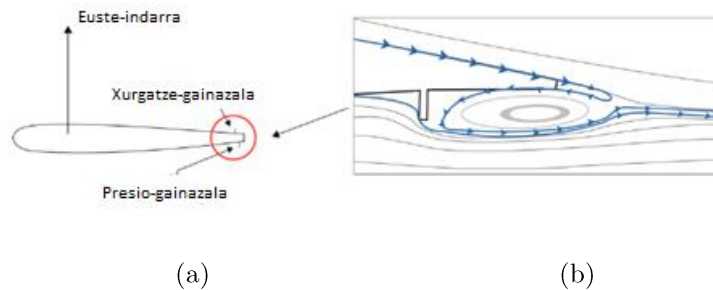
Aerosorgailuen palen masa eta jasan beharreko karga mekanikoen balioa handitzeaz batera, Baldacchino et al. [60]-ek azaldu bezala, palen erroen sekzio zabalagoak diseinatzen dira. Honek aire-fluxua aerosorgailuaren palaren profiletik gertu mantentzen duen presio gradientearen aurka egiten du eta aire-fluxuaren bereizketa azkartu egiten da. Ondorioz, gaur egun diseinatzen diren potentzia handiko aerosorgailuek erronka berriak ekarri dituzte, sistemaren jarduera aerodinamiko hobetzeraz bideratuta daudenak.

Fluxu kontrol gailu pasiboek aire-fluxuaren bereizketa atzeratu eta aerosorgailuen palen jarduera aerodinamiko nabarmen hobetu dezakete. Horretarako, egoki diseinatu eta aerosorgailuen palen gainazaleko puntu zehatzetan kokatu behar dira. Hala eginez gero, sistemaren operazioa hobetu eta sortutako potentzia elektrikoa areagotu daiteke. Fluxu kontrol gailu pasiboen artean

“Microtab”-ak (MT), “Vortex Generator”-ak (VG) eta GFak dira gaur egun erabiliak.

### “MicroTab”-ak (MT)

MTak, Aramendia et al. [70]-en lanean azaldu bezala, aerosorgailuen palen atzealdean gainazalari perpendikular jartzen diren hegal txiki batzuk dira. 9. Irudia (a)-n MTak dituen ardatz horizontaleko aerosorgailu baten pala baten sekzio bat erakusten da. Normalean, MTeak hartzen duten altuera kokatzen diren palaren sekzioari dagokion kordaren luzeraren % 1-2 ingurukoa izaten da. Kokapenari dagoikonez, euste-indarra areagotzeko, palaren sekzioaren xurgatze-gainazalean kokatu behar dira, ikusi 9. Irudia (b).



**9. Irudia.** (a) MTak aerosorgailu baten pala baten gainazalean (b) Xurgatze-gainazalean kokatutako MT batek aire-fluxuan duen eragina [71]

Energia eolikoaren sektorean MTetan oinarritutako fluxu kontrol estrategien helburua zera da: aerosorgailuaren errotorearen errotazioa eragiten duen euste-indarra handitu. Horretarako, arestian adierazi bezala, MTak palaren profilaren xurgatze-gainazalean kokatu behar dira. MTak presio-gainazalean kokatuz gero, fluxu kontrol gailuek aire-fluxuan luketen eragina kontrakoa litzateke eta euste-indarra txikitu egingo litzateke. Efektu hau desiragarria gerta liteke automobilgintza sektorean, non euste-indarra autoen ezegonkortasun iturri bezala kontsideratzen den.

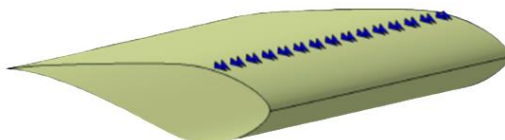
Johnson et al. [72]-ek azaldu bezala, MTak erabilia ardatz horizontaleko aerosorgailu baten paletan sortzen den euste-indarra areagotzen da aire-fluxuaren urruntzea ekidinez. MTetan oinarritutako fluxu kontrol estrategiek, kasu batzuetan MTen operazio aktibo bat kontsideratuz, aerosorgailu baten jarduera aerodinamikoan duten eragina aztertzen duten hainbat lan aurkitu daitezke literaturan [73-78]. MTen forma eta luzeraz gain, fluxu kontrol gailuen kokapena

ere zehatz-mehatz diseinatu beharra dago aerosorgailuen palen jarduera aerodinamikoan onurak lortzeko. Fernandez-Gamiz et al. [71]-ek MTen kokapenerako diseinu prozesu bat aurkezten duten beren lanean.

Halaber, MTetan oinarritutako fluxu kontrol estrategiekin onurak bakarrik ez eta arazoak ere agertu daitezke. Johnson et al. [72]-en lanean MTen erabilerak ekarritako alde onak eta txarrak aztertzen dira. Abantailen aldetik, sinpletasuna eta tamaina txikia, aktibazio eta erantzun azkarra eta energia-kontsumo txikia nabarmendu daitezke. Desabantailen artean, zarata mekanikoak, instalaziorako zailtasunak eta airearen filtrazioa azpimarratu daitezke.

### *“Vortex Generator”-ak (VG)*

VGak aerosorgailuen palen profilean xurgatze-gainazalari perpendikular jartzten diren hegal txiki batzuk dira, ikusi 10. Irudia. VGetan oinarritutako fluxu kontrol estrategien helburua, Fernandez-Gamiz et al. [79]-ek beren lanean adierazi bezala, aerosorgailuen palen inguruan doan aire-fluxuaren bereizketa atzeratzea da. Horretarako, aire-fluxuaren kanpoko eremutik barruko eremura momentua eramaten dute eta, ondorioz, fluxuaren bereizketa atzeratu egiten da. Bereizketa atzeratzean, aerosorgailuaren errotorearen errotazioa eragiten duen euste-indarra handitu egiten da.



### **10. Irudia.** VGak aerosorgailu baten pala baten gainazalean [79]

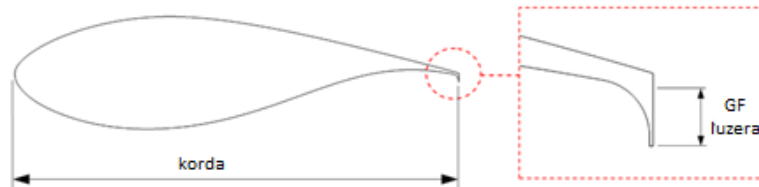
Palen gainazalean VGak kokatzearen eragina sakon aztertu da literaturan. Izan ere, VGetan oinarritutako fluxu kontrol estrategia baten diseinu egoki bat egiteko hainbat parametro hartu behar dira kontuan. Esaterako, Lin [80]-ek VGek eduki ahal duten forma ezberdinen analisi bat aurkezten dute beren lanean. Forma hauen artean errektangeluarrak, triangeluarrak eta trapezoidalak daude. Era berean, Gutierrez-Amo et al. [81]-ek forma eta geometria ezberdinetako VGak karakterizatzeko eredu konputazional bat aurkezten dute beren lanean. VGen altuerari dagokionez, Fernandez-Gamiz et al. [79]-ek VGen altuera egokia honako hau dela azaltzen dute: aire-fluxuak VGa kokatuta dagoen posizioan duen altueraren balioa bera. Azkenik, Gao et al. [82]-en lanean VGen hainbat altuera,

luzera eta espazio balioen analisi bat proposatzen da, horretarako DU97-W-300 profila eta CFD simulazioak erabilia.

VGetan oinarritutako fluxu kontrol estrategiak erabilia lortutako emaitzei dagokionez, Martinez-Suarez et al. [83]-ek euste-indarrari lotutako momentuaren % 0.54-ko eta “thrust” indarraren % 0.67-ko hazkuntzak erakusten dituzte NREL/NASA-Amesa Phase VI pala batean “Rod Vortex Generator”-ak (RVG) erabilia. Baldacchino et al. [60]-ek arraste-koefizientearen handitzea eta aerosorgailuen paletan induzitutako momentu mekanikoen areagotzea aurkezten dituzte VGen erabileraren arazo nagusi gisa.

### “Gurney Flap”-ak (GF)

GFak Daniel Gurney izeneko auto gidari batek erabili zituen lehen aldiz 1971. urtean bere autoaren euste-indar negatiboa handitu eta autoaren egonkortasuna areagotzeko. Gerora, GFak sektore eolikoan erabiltzen hasi ziren aerosorgailuen palen jarduera aerodinamiko hobetu eta euste-indarra handitzeko. Fernandez-Gamiz et al. [84]-en lanean adierazi bezala, GFa hegal txiki bat da, zein aerosorgailuaren palaren atzealdean presio edo xurgatze-gainazalean eta profilaren kordari perpendikular kokatzen den, ikusi 11. Irudia. GFaren altuera kokatuta dagoen profilari dagokion kordaren luzeraren % 1-2 tarte ingurukoa izan ohi da.



11. Irudia. GF baten kokapena DU91W250 profil aerodinamiko baten [85]

Wang et al. [86] eta Jeffrey et al. [87]-en lanetan ardatz horizontaleko aerosorgailu baten palen gainazalean GFak kokatzeak dituen eraginaren azterketa bat aurkezten da. Woodgate et al. [88]-en lanean GFetan oinarritutako fluxu kontrol estrategiak eskala handiko aerosorgailuen bizitza erabilgarria luzatzeko aukera apropos gisa aurkezten dira.

GFen geometriari dagokionez, ohikoena fluxu kontrol gailu hauek geometria errektangularra izatea da. Hala ere, van Dam et al. [78] eta Chow et al. [89]-en lanetan geometria desberdinetako GFak ere aztertzen dira. GFen kokapenari dagokionez, Shukla et al. [90]-ek aerosorgailuaren palaren sekzio desberdinetan



kokatutako GFen jarduera aztertzen dute. Woodgate et al. [88]-en lanean erakusten den bezala, GFek aerosorgailuen palen jarduera aerodinamikoan izango duten eragina aztertzekeo CFD analisiak erabili daitezke.

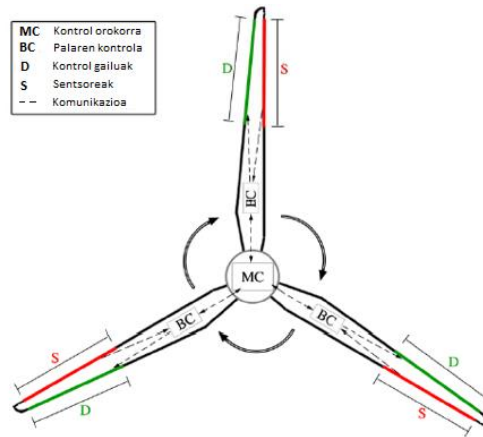
GFek ardatz horizontaleko aerosorgailuen operazioan eta potentzia sorkuntza duten eragina aztertzen duten hainbat lan aurkitu daitezke literaturan. Esaterako, Shukla et al. [90]-ek beren lanean adierazitakoaren arabera, euste-koefizientearen, euste-indarraren eta palaren errotazioa-abiaduraren areagotzeak lortzen dira GFak NACA0012 eta NACA0015 profiletan erabilia. Storms et al [91]-ek euste-indarraren % 13 inguruko handitzea erakusten dute GFak era egokian diseinatuz gero. Azkenik, Fernandez-Gamiz et al. [79]-ek NREL 5MW aerosorgailuak sortutako potentziaren gehikuntza erakusten dute beren lanean GFen erabilerarekin.

### 2.3.2 Fluxu Kontrol Aktiboa

Aerosorgailuen palen inguruko aire-fluxua dinamikoki kontrolatzeko gaitasuna duten sistemak dira fluxu kontrol gailu aktiboak. Beren helburu nagusia, Johnson et al. [92]-en lanean adierazi bezala, aerosorgailuen paletan gertatzen diren karga mekanikoak murriztea da.

Ardatz horizontaleko aerosorgailu baten paletan sortzen diren karga mekanikoak hainbat faktoreren ondorio izan daitezke: haizearen kondizioa (haizearen gradientea altuerarekiko, haizearen goranzko eraso, haizealdi bortitza, turbulentzia atmosferikoa), fenomeno fisikoak (grabitazio-indarra) edota aerosorgailuaren diseinua (“tilt” angelua, biratze-inertzia). Gainera, Johnson et al. [72]-ek beren lanean azaldu bezala, paletan agertzen diren karga mekaniko hauek bestelako eratan nabaritzen dira palaren sekzio desberdinetan. Beraz, sekzio bakoitzean kargak murrizteko egin beharreko ekintza desberdina izan daiteke.

Aurretik 2.3 atalean aipatu bezala, fluxu kontrol gailu aktiboek kanpo energia-iturri baten beharra dute euren operaziorako. Gainera, sentsoire eta eragingailuak erabiltzen dituzte. Johnson et al. [72]-ek adierazi bezala, fluxu kontrol gailu aktiboetan oinarritutako fluxu kontrol sistemen arkitektura ohikoena kontrol sistema nagusi bat da, aerosorgailuaren paletan ipinitako sentsoire eta eragingailuekin komunikatzen dena, 12. Irudian erakusten den bezala.



12. Irudia. Fluxu kontrol sistema aktibo baten egitura [72]

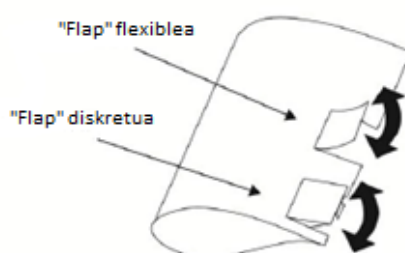
Aplikazioaren arabera, fluxu kontrol aktibo sistemetan hainbat kontrol estrategia (ereduan oinarritutakoak, kontrol optimoa, sentsoreetatik jasotako informazioan oinarritutakoak, etab.), hainbat gailu (“Trailing Edge Flap”-ak, “Air Jet Vortex Generator”-ak, “Synthetic Jet”-ak, MTak, etab.) eta hainbat eragingailu (piezoelektikoak, pneumatikoak, motoreak, etab.) aurkitu daitezke. Oro har, Johnson et al. [92]-en lanean azaldu bezala, fluxu kontrol gailu aktibo guztiek ezaugarri komun batzuk eduki behar dituzte:

- Tamaina txikia, edonon jarri ahal izateko.
- Aktibazio azkarra eta energia-behar aldetik ekonomikoa.
- Sendoa eta integrazio errazekoa.

Gaur egun fluxu kontrol gailu aktiboen artean “Trailing Edge Flap”-ak, “Air Jet Vortex Generator”-ak eta “Synthetic Jet”-ak dira erabilienak.

#### *“Trailing-Edge Flap”-ak*

“Trailing-Edge Flap” tradizionalak ardatz horizontaleko aerosorgailu baten palen profil aerodinamikoan zabaltzen diren aleroiak dira, ikusi 13. Irudia. “Trailing Edge Flap” tradizionalak, Aramendia et al. [69]-en lanean aurkeztu bezala, aerosorgailuen paletan sortutako euste-indarrean eragiten dute. Fluxu kontrol gailuak profilaren presio-gainazalean kokatuz gero, euste-indarra areagotu egingo da. Alderantziz, fluxu kontrol gailuak profilaren xurgatze-gainazalean kokatuz gero, euste-indarra txikitu egingo da.



**13. Irudia.** “Trailing Edge Flap” tradizionalak aerosorgailu baten pala batean [69]

“Trailing Edge Flap” bidez fluxu kontrola lortzeko, aktuazio sistema batek aleroia distantzia jakin bat desplazatzen du hasierako posiziotik. Aleroiaren formaren arabera, “flap” diskretuak eta “flap” flexibleak bereizi daitezke, ikusi 13. Irudi. “Flap” flexibleak, forma konplexuago bat izanik, eraginkorragoak dira. Hala ere, sinpletasunagatik “flap” diskretuak dira gaur egun erabilienak.

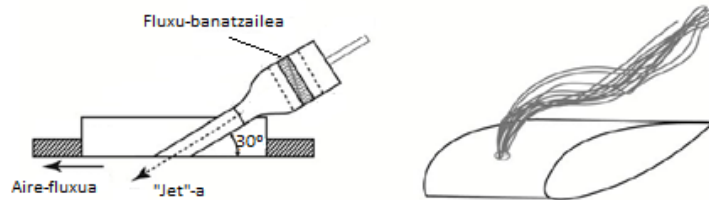
“Trailing Edge Flap” gailuak asko erabiltzen dira gaur egun hegazkinetan. Ondorioz, sektore aeronautikoan erakutsitako emaitza onak direla eta, energia eolikoaren sektorean sartzen ere hasiak dira. Horrela, “Trailing Edge Flap”-ak erabilita, ardatz horizontaleko aerosorgailuen palen erroan eragindako karga mekanikoen murrizketa garrantzitsuak aurkezten dituzten lanak [93,94] aurkitu daitezke literaturan. Zhu et al. [95]-en lanean, gainera, fluxu kontrol gailu berberak erabilita, aerosorgailuak sortutako potentzia elektrikoa areagotzeko aukera ere azaltzen da. Bak et al. [96] eta Castaignet et al. [97]-en lanetan, “Trailing Edge Flap”-ak erabilita, haize-tunelean eta Vestas fabrikatzailearen turbina batean lortutako emaitza esperimentalak aurkitu daitezke, hurrenez hurren.

“Trailing Edge Flap”-tan oinarritutako sistema batek aurkeztu ditzakeen arazoak honako hauek dira: tamaina handia, zarata akustikoa eta energia-kontsumo adierazgarria.

***“Air Jet Vortex Generator”-ak***

“Air Jet Vortex Generator”-ak, Wallis et al. [98]-n lanean azaldu bezala, aerosorgailuen palen profil aerodinamikoaren inguruan doan aire-fluxuari aire boladak sartzen dizkion fluxu kontrol gailu aktiboak dira. “Air Jet Vortex Generator”-en helburu nagusia, Compton et al. [99]-ek adierazitakoaren arabera, aerosorgailuen palen inguruan doan aire-fluxuaren bereizketa atzeratzea da, ondorioz, palaren jarduera aerodinamikoa hobetzeko.

“Air Jet Vortex Generator”-etan oinarritutako fluxu kontrol estrategietan aire masak sartzeko erabiltzen den eragingailua 14. Irudian dago ikusgarri. Sortutako “vortex”-en eraginez, energia transferentzia bat gertatzen da, aire-fluxua profil aerodinamikoaren inguruan denbora luzeagoz geratzea lortzen duena.



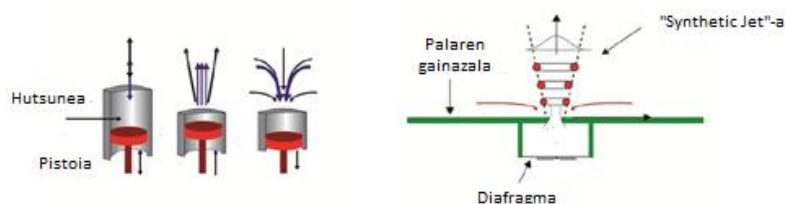
14. Irudia. “Air Jet Vortex Generator”-en (a) egitura (b) eragina aerosorgailu baten pala batean [69]

VG normalekin konparatuz gero, “Air Jet Vortex Generator”-ek malgutasun handiagoa ematen dute, izan ere, sartutako airearen abiadura eta maiztasuna kontrolatzeko aukera eskaintzen dute. Ondorioz, lortutako emaitzak hobeak izaten dira. Johnston et al. [100,101]-en lanetan, “Air Jet Vortex Generator”-en funtzionamendu eta emaitza onak erakusten dituzten analisiak aurkezten dira.

“Air Jet Vortex Generator”-etan oinarritutako fluxu kontrol estrategia aktibo baten desabantailen artean hurrengo nabarmendu daiteke: nahiz eta aktuazio sistema mekanikoki konplexua ez izan, funtzionamendurako beharrezkoa den aire konprimatua garraiatzeko zirkuitu bat diseinatu behar da.

#### *“Synthetic Jet”-ak*

Aerosorgailuen palen inguruan doan aire-fluxuan “vortex”-ak sortzen dituzten fluxu kontrol gailu aktiboak dira “Synthetic Jet”-ak, ikusi James et al. [102]. Hau da, beren helburua “Air Jet Vortex Generator”-ek duten helburuaren berdintsua da, bien arteko diferentzia aktuazio sisteman eta injektatutako airearen masan egonik. Izan ere, “Synthetic Jet”-etan oinarritutako estrategia batean, “vortex”-ak diafragma oszilatzailer batek eratzen ditu xurgatze eta injekzio bidez, ikusi 15. Irudia. Ondorioz, kontsumitutako airearen masa totala zero da. Printzipio hau ez da betetzen “Air Jet Vortex Generator”-etan oinarritutako estrategia batean.



15. Irudia. “Synthetic Jet”-en (a) funtzionamendua (b) egitura [69]

“Synthetic Jet”-etan oinarritutako fluxu kontrol estrategia aktiboak aplikazio aeronautikoetan erabili dira [103,104] emaitza onak lortuta. Emaitza on hauen ondorioz, “Synthetic Jet”-ak sartzen hasiak dira sektore eolikoan. You et al. [105]-ek “Synthetic Jet”-en funtzionamenduaren azterketa bat aurkezten dute ardatz horizontaleko aerosorgailu batean aplikatuta. Chawla et al. [106]-en eta Shun et al. [107]-en lanetan, “Synthetic Jet”-ak erabilia ardatz horizontaleko aerosorgailu baten efizientziaren eta operazioaren hobekuntza bat aurkezten dira, hurrenez hurren. “Synthetic Jet”-ak erabilia ardatz horizontaleko aerosorgailu baten paletan eragindako karga mekanikoak nabarmen murrizten dira Maldonado et al. [108,109]-en lanetan.

## 2.4 KONTROL SISTEMA ADIMENTSUAK

AI gizakien inteligentzia tresna teknologikoetan proiektatzean oinarritzean datzan zientzia da, hau da, tresna teknologikoetan jokabide aurreratu eta adimentsuak garatzea da AIren helburua. Berez, historian urte askoan atzera doan kontzeptua da AI. Zenbait mito eta istorioren arabera, Grekoen garaian ere gizakien jokaera imitatzen zituzten sistema mekanikoak diseinatu zituzten.

Gerora, XIX. eta XX. mendeetan zehar gertatu zen lehenengo ordenagailuen diseinua gizakion burmuina imitatzeko ahalegin gisa kontsideratu daiteke, batez ere, kalkulu gaitasun eta memoriari dagokienez. Gaur egun, XXI. mendean teknologiaren arloan gertatu diren hobekuntza guztiei esker, AI sistemek izugarritzko bilakaera izan dute. Askoz azkarrago funtzionatu duten eta kalkulu gaitasun handiagoa duten plataforma teknologikoen diseinu eta komertzializazioa izan dira bilakaera honen gakoak.

AI zientzia teknika adimentsu ugari osatzen dute, zeintzuk, Wang et al. [110]-en lanean azaldu bezala, gizakion burmuinaren jokabidea edota naturan aurkitu daitezkeen beste elementu edo prozesu batzuen jokabidea imitatzen

saiatzen diren. Teknika bakoitzak bakarrik edota beste teknika batzuekin elkarlanean funtziona dezake. AI osatzen duten teknika adimentsuen artean hurrengoak nabarmendu daitezke:

- **Gainbegiratutako ikasketa:** Sarrerako datu eta irteerako datu bezala egituratutako informazioa jaso eta bien arteko erlazioa ikasteko aukera ematen duten teknikak dira [111-113]. Erregresio lineala, erregresio logistikoa, Erabaki zuhaitzak, “Support Vector Machines” (SVM) etab. dira gainbegiratutako ikasketa sistemei dagozkien teknikarik ezagunenak.
- **Gainbegiratu gabeko ikasketa:** Informazioa sarrerako datu bezala jaso eta eredu komunak bilatzeko eta sailkapenak egiteko aukera ematen duten teknikak dira. Gainbegiratu gabeko ikasketa teknika erabilienak, Usama et al. [114]-en lanean azaldu bezala, honako hauek dira: “K-Means”, “Hierarchical Cluster Analysis” (HCA) eta “Principal Component Analysis” (PCA).
- **Errefortzu bidezko ikasketa edo RL:** Sistema batek, bere inguruarekin duen esperientzia oinarri hartuta, egoera bakoitzean ekintza optimoa era autonomoan hartzen ikasteko aukera ematen duen teknika da [115-118].
- **Sare neuronal artifizialak edo ANN:** Gizakion burmuinetan dauden sare neuronal biologikoen egitura imitatzen duten sistema sare artifizialak dira, sare biologikoen antzerako funtzionamendu bat lortzeko helburuarekin [119-121]. Gainbegiratutako edota gainbegiratu gabeko ikasketa teknikei dagozkien algoritmoak erabili ohi dira ANNen entrenamendu prozesurako.
- **Optimizazio algoritmoak:** Sistema edo prozesu bat koste-funtzio baten bitartez adieraztea posible bada, sistemaren balio optimoa (maximoa zein minimoa) aurkitzeko aukera ematen duten algoritmoak dira [122,123].
- **Logika difusoa:** Logika Booleano-tik aldendu eta taldetara pertenezia partzialak kontsideratzen dituen teknika da. Logika difusioaren oinarriak Driankov et al. [124]-en lanean azaltzen dira. Energia eolikoaren sektorean Logika difusioaren aplikazioak aurkitu daitezke literaturan [125,126].
- **Sare Bayesiarrak:** Erabaki onenak hartzeko helburuarekin probabilitatearen teoria oinarritutako teknikak dira [127,128]. “A priori”

probabilitateak ezagututa, egoera jakin batean ekintza bat burutuz gero, “a posteriori” probabilitatea kalkulatzeko aukera ematen dute. Burmuinaren erabakiak hartzeko gaitasuna modelatzen dute.

AI zientziarekin lotuta eta azken urteetan asko garatu den beste kontzeptu bat ML izenekoa da. Fadlullah et al. [129]-ek adierazi bezala, ML sistemei era automatiko eta autonomo batean ikasteko gaitasuna ematen dien teknika bat da. Horrela, RL ML mota bat da, non, lehen azaldu bezala, sistemek bere inguruarekin duten interakzioaren bidez era autonomoan ikasteko gaitasuna duten.

Era berean, informatikaren arloan gertatutako garapen teknologikoari esker, MLari lotutako beste ikasketa autonomo teknika bat ere jaio da, “Deep Learning” (DL) izenez ezagutzen dena. DLek proposatutako kontzeptua MLek proposatutako kontzeptuaren berdina da. Bi tekniken arteko diferentzia nabarmenenak zera dira: ikasketa-prozesuan zehar erabilitako datu kopurua eta diseinatutako ANNren geruza ezkutu eta neurona zenbakia. Fadlullah [129]-en lanean azaldu bezala, DL aplikazioetan askoz ere datu kopuru eta ANN handiagoak erabiltzen dira. Azkenik, nabarmentzekoa da, Fadlullah [129]-ek adierazitakoaren arabera, RL eta DL teknikak konbinatzen dituen “Deep Reinforcement Learning” (DRL) kontzeptua ere jaio dela. DRL teknikak datu kopuru oso handiekin lan egiteko eta inguruarekin elkarrekintzatik ikasteko gaitasunak elkartzen ditu.

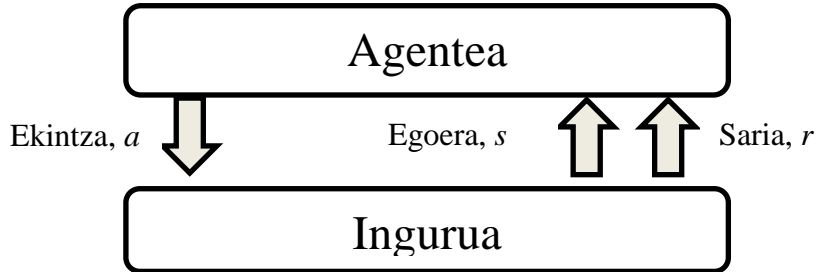
Ardatz horizontaleko aerosorgailu baten kontrol sistema hobetzeko helburuarekin, ikerkuntza lan honetan erabilitako hiru teknika adimentsuak zehatzago azalduko dira hurrengo ataletan: RL teknika 2.4.1 atalean, ANNak 2.4.2 atalean eta optimizazio algoritmoak 2.4.3 atalean.

### 2.4.1 “Reinforcement Learning” (RL)

Sistema batek bere inguruarekin duen esperientzia oinarri hartuta sistema horren jarduera guztiz autonomoa lortzeko erabiltzen den ikasketa teknika bat da RL [115-118]. Sutton et al. [118]-ek adierazi bezala, ikasketa autonomoa proposatzen duen ML teknikari dagokion algoritmo posibleetako bat da RL.

RL algoritmo baten oinarritzko funtzionamendua 16. Irudian aurkeztutako diagramaren bidez laburbildu daiteke. Honen arabera, ingurumen jakin batean dagoen agente batek bere egoeraren ( $s \in S$ ) inguruko informazioa jasoko du eta ( $a \in A$ ) ekintza burutzea erabakiko du. Ekintza horren ondorioz, agenteak bere egoera berriaren eta lortutako sariaren ( $r \in R$ ) informazioa jasoko du. Agentearen helburua, Kaelbling [130]-ek azaldutakoaren arabera, egoera bakoitzean epe-luzeko

saria maximizatuko duen ekintza aurkitzea izango da. Kontzeptu hau agentearen politika  $\pi(s,a)$  izenez ezagutuko da.



16. Irudia. RL sistema baten oinarrizko egitura

Hortaz, RL bidezko ikasketa-prozesu baten hurrengo funtsezko elementuak aurkitu daitezke:

- Egoera: Ingurumen baten parte den agente baten egoera definitzen du ( $s \in S$ ).
- Ekintza: Egoera jakin batean agenteak burutzen duen ekintza definitzen du ( $a \in A$ ).
- Saria: Agente batek egoera jakin batean egonda eta ekintza jakin bat burututa ingurutik jasotzen duen saria ( $r \in R$ ) adierazten du. Egoera jakin batean egindako ekintza baten kalitatea edo eraginkortasuna definitzen ditu.
- Politika: Egoera bakoitzean agenteak ekintzak hautatzeko dituen irizpideak definitzen ditu ( $\pi(s,a)$ ).
- Epe-luzeko saria: Egoera jakin batean egonda ekintza jakin bat burututa maximizatu nahi den balioa ( $R_t$ ).

RL sistema batean epe-luzeko saria definitzeko zenbait modu daude. Normalean, deskontu-faktore bat erabiliz, agenteak denbora-tarte jakin batean lortutako sarien gehiketa erabiltzen da, ikusi Ek. (9).

$$R_t = \sum_{k=t}^{t+T} \gamma_k \cdot r_{t+k+1} \quad (9)$$



Ekintza burutu aurretik agenteak jasoko duen saria ezezaguna denez, esperotako saria izenez ezagutuko den kontzeptu berri bat definituko da, ikusi Ek. (10).

$$E \left( \sum_{k=t}^{t+T} \gamma_k \cdot r_{t+k+1} \right) \quad (10)$$

RL algoritmoari loturiko kontzeptu garrantzitsu bat ingurumenaren definizioa da. RL algoritmoetan ingurumena Markov-en Erabaki Prozesu edo “Markov Decision Process” (MDP) bezala definituko da. MDPren arabera, ingurumenaren egoeraren trantsizioak ez daude iraganeko egoeren menpe, baizik eta bakarrik momentuko egoeraren eta burututako ekintzaren menpe, ikusi Ek. (11) eta Ek. (12).

$$p_{ss'}^a = p \{s_{t+1} = s' | s_t = s, a_t = a\} \quad (11)$$

$$R_{ss'}^a = E \{r_{t+1} | s_t = s, a_t = a, s_{t+1} = s'\} \quad (12)$$

Arestian azaldu bezala, agentearen politikak  $\pi(s,a)$  egoera bakoitzean ( $s \in S$ ) ekintza bakoitza ( $a \in A$ ) burutzeko probabilitatea definitzen du. Ondorioz, agenteak esperotako sariaren funtzioa agentearen politika eta momentuko egoeraren menpe adierazi daiteke, ikusi Ek. (13).

$$V^\pi(s) = E_\pi \{R_t | s_t = s\} = E_\pi \left\{ \sum_{k=t}^{t+T} \gamma_k \cdot r_{t+k+1} | s_t = s \right\} \quad (13)$$

Era berean, agenteak esperotako sariaren funtzioa agentearen politika, momentuko egoera eta burututako ekintzaren menpe ere adierazi daiteke, ikusi Ek. (14).

$$\begin{aligned} Q^\pi(s, a) &= E_\pi \{R_t | s_t = s, a_t = a\} \\ &= E_\pi \left\{ \sum_{k=t}^{t+T} \gamma_k \cdot r_{t+k+1} | s_t = s, a_t = a \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

Bakoitzaren balio optimoa kalkulatzeko Ek. (15) eta Ek. (16)-n adierazitako funtzioak erabiliko dira.

$$V(s) = \max(V^\pi(s)) \quad (15)$$

$$Q(s, a) = \max(Q^\pi(s, a)) \quad (16)$$

MDPn oinarritutako problema bat ebazteari dagokionez, hurrengo lerroetan azalduko dira hiru metodoak erabilienak.

**“Dynamic Programming” (DP)**

MDPn oinarritutako problema bat Programazio Dinamiko edo “Dynamic Programming” (DP) bidez ebatzi ahal izateko inguruaren eredu bat ezagutzea beharrezkoa da. Ingurumenaren eredua ezagutuz gero, Bertsekas et al. [131,132]-en lanetan azaldu bezala, Ek. (11) eta Ek. (12)-n adierazitako egoera-trantsizio probabilitatea eta esperotako epe-luzeko saria analitikoki kalkulatu daitezke. Era berean, sistemak ekintza optimoak aukeratzeko jarraitu beharreko politika ere matematikoki kalkulatu ahal izango da.

Ek. (13) eta Ek. (14) oinarri hartuta, DP bidezko ebazpen batean agenteak esperotako saria Ek. (17) eta Ek. (18)-n aurkeztu bezala adierazi daiteke.

$$\begin{aligned} V^\pi(s) &= E_\pi \{r_{t+1} + \gamma \cdot V^\pi(s_{t+1}) | s_t = s\} \\ &= \sum_a \pi(s, a) \sum_{s_{t+1}} p_{ss'}^a \cdot [R_{ss'}^a + \gamma \cdot V^\pi(s_{t+1})] \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} Q^\pi(s, a) &= E_\pi \{r_{t+1} + \gamma \cdot Q^\pi(s_{t+1}, a_{t+1}) | s_t = s, a_t = a\} \\ &= \sum_a \pi(s, a) \sum_{s_{t+1}} p_{ss'}^a \cdot [R_{ss'}^a + \gamma \cdot Q^\pi(s_{t+1}, a_{t+1})] \end{aligned} \quad (18)$$

Halaber, DP bidezko ebazpen batean, sistemak jarraitu beharreko politika optimoaren kalkulurako, algoritmo iteratibo bat garatuko da. Algoritmo honetan, kontsideratutako egoera bakoitzean ( $s \in S$ ) ekintza guztien ( $a \in A$ ) efektua aztertuko da, eta azkenean, sistemak ekintza optimoak aukeratzeko jarraitu beharreko politika ( $\pi(s, a)$ ) lortuko da. DPn oinarritutako RL algoritmo baten pseudokodea dago erakusgarri 1. Algoritmoan.

## 1. Algoritmoa. DPn oinarritutako RL algoritmoaren pseudokodea

---

**Programazio Dinamiko algoritmoa**

---

```
% Q(s,a) ausaz hasieratu
Q(s,a) = Q(s,a)_ini
% Hasi DP algoritmoa
while ( $\Delta > \beta$ ) do
  % Hasieratu Q(s,a) gutxieneko hobekuntza
   $\Delta = 0$ 
  % Egoera s definitu eta ekintza a hautatu
  s  $\leftarrow$  (s  $\in$  S)
  a  $\leftarrow$  (a  $\in$  A)
  % Kalkulatu Q(s,a)
  Q(s,a)  $\leftarrow$  Ek. (18)
  % Kalkulatu Q(s,a) hobekuntza
   $\Delta = \text{abs}(Q\_ant(s,a) - Q(s,a))$ 
  Q_ant(s,a) = Q(s,a)
end
```

---

*“Monte Carlo” metodoa (MC)*

MDPn oinarritutako problemen “Monte Carlo” (MC) bidezko ebazpenak esperientzian funtsatzen dira. MC bidezko ebazpen prozesuaren oinarriak Kao et al. [133]–en eta Coulom et al [134]–en lanetan azaltzen dira. Hauen arabera, agentea egoera jakin batean ( $s \in S$ ) egonda, ekintza jakin bat ( $a \in A$ ) burutzen da eta lortutako sariaren estatistiko bat kalkulatu eta kontsideratzen da  $V^\pi(s)$  gisa. Azkenean, sistemak ekintza optimoak aukeratzeko jarraitu beharreko politika ( $\pi(s,a)$ ) lortuko da.

MC bidezko ebazpena bi modutara egin daiteke:

- “On-policy”: Agenteak hartutako erabakiak zuzenean eragiten dio kontrolari, hau da, sinkronizatuta daude.
- “Off-policy”: Kontroleko politika eta hobetu nahi den politika ez daude sinkronizatuta eta ez dira aldi berean gertatzen.

MCn oinarritutako RL algoritmo baten pseudokodea azaltzen da 2. Algoritmoan.

2. Algoritmoa. MC metodoan oinarritutako RL algoritmoaren pseudokodea

---

**Monte Carlo algoritmoa**

---

```

% Politika  $\pi$  definitu eta gertaera bat hautatu
% Egora  $s$  bakoitzeko hautatu ekintza  $a$ 
 $s \leftarrow (s \in S)$ 
 $a \leftarrow (a \in A)$ 
% Kalkulatu epe-luzeko saria  $R_t$ 
 $R_t \leftarrow \text{Ek. (14)}$ 
 $R_t\_vec = [R_t\_vec, R_t]$ 
% Kalkulatu  $Q(s,a)$ 
 $Q(s,a) = \text{average}(R_t\_vec)$ 
% Ebaluatu politika  $\pi$ 

```

---

*“Temporal Differences” (TD)*

MDPn oinarritutako problemen Diferentzia Tenporal edo “Tenporal Differences” (TD) bidezko ebazpenak aurretik aurkeztutako bi metodoen abantailak batzen ditu. Alde batetik, etorkizuneko sariak alde aurretik estimatzeko aukera ematen du. Bestetik, ez du kalkuluetarako inguruaren eredu baten beharrik.

TDetan oinarritutako bi RL algoritmo garrantzitsuenak Adam et al. [135]-en lanean azaldutako SARSA algoritmoa eta Watkins et al. [136,137]-en lanean azaldutako “Q-Learning” algoritmoak dira. Bi algoritmo hauen arteko diferentzia nabarmenena agenteak esperotako epe-luzeko balioa zehazten duen  $Q(s,a)$  matrizearen definizioa da. “Q-Learning” algoritmoan matrize diskretu bat erabiltzen den bitartean, SARSA algoritmoan batezbesteko funtzio esponentzialak erabiltzen dira.

Ek. (14) oinarri hartuta, SARSA eta “Q-Learning” bidezko ebazpenetan agenteak esperotako sariaren funtzioak adierazten dira Ek. (19) eta Ek. (20)-n, hurrenez hurren.

$$Q(s_t, a_t) = Q(s_t, a_t) + \alpha \cdot [r + \gamma \cdot Q(s_{t+1}, a_{t+1}) - Q(s_t, a_t)] \quad (19)$$

$$Q(s_t, a_t) = Q(s_t, a_t) + \alpha \cdot [r + \gamma \cdot \max_a Q(s_{t+1}, a_{t+1}) - Q(s_t, a_t)] \quad (20)$$

SARSA eta “Q-Learning” metodoetan oinarritutako RL algoritmo baten pseudokodeak aurkezten dira 3. Algoritmoan eta 4. Algoritmoan, hurrenez hurren.

3. Algoritmoa. (a) SARSA n oinarritutako RL algoritmoaren pseudokodea  
(b) “Q-Learning”-en oinarritutako RL algoritmoaren pseudokodea

(a)

---

**SARSA algoritmoa**

---

```
% Q(s,a) ausaz hasieratu
Q(s,a) = Q(s,a)_ini
% Hasi SARSA algoritmoa
while (s ∈ Episode) do
  % Egoera s definitu eta ekintza a hautatu
  s ← (s ∈ S)
  a ← (a ∈ A)
  % Kalkulatu r and st+1
  % Hurrengo ekintza at+1 definitu
  at+1 ← (a ∈ A)
  % Kalkulatu Q(s,a)
  Q(s,a) ← Ek. (19)
  s = st+1
% Ebaluatu politika π
end
```

(b)

---

**“Q-Learning” algoritmoa**

---

```
% Q(s,a) ausaz hasieratu
Q(s,a) = Q(s,a)_ini
% Hasi “Q-Learning” algoritmoa
while (s ∈ Episode) do
  % Egoera s definitu eta ekintza a hautatu
  s ← (s ∈ S)
  a ← (a ∈ A)
  % Kalkulatu r and st+1
  % Hurrengo ekintza at+1 definitu
  at+1 ← (a ∈ A)
  % Kalkulatu Q(s,a)
  Q(s,a) ← Ek. (20)
  s = st+1
% Ebaluatu politika π
end
```

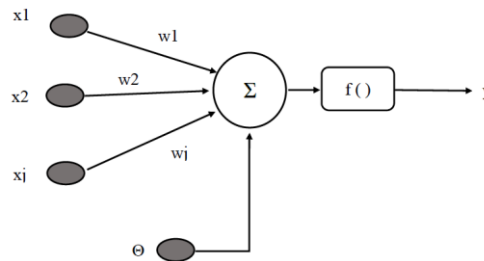
---

### 2.4.2 “Artificial Neural Network” (ANN)

ANNak sistema artifizialak dira, gizakion burmuinean aurki daitezkeen sare neuronal biologikoen estruktura imitatu eta haien antzerako funtzionamendu bat lortzeko helburua dutenak [119-121]. Lehenengo neurona artifiziala, Yang et al. [138]-en lanean azaldu bezala, W. McCulloch eta W. Pitts-ek aurkeztu zuten 1943. urtean. Geroztik, sare neuronalek garapen izugarria bizi izan dute. Gaur egun, ANNen erabilerak eskaintzen dituen bi ezaugarri garrantzitsuenak honakoak dira: prozesamendu paralelorako gaitasuna (neurona ugari prozesatzen dute informazio paraleloan) eta datu kopuru oso handiek emandako esperientziatik ikasteko ahalmena.

ANN mota ugari daude: “MultiLayerPerceptron with BackPropagation” (MLP-BP), “NonLinear AutoRegressive Network” (NARXNET), ANN errepikariak, ANN estokastikoak, ANN hierarkikoak, etab. Gaur egun, ANNek duten aplikaziorik garrantzitsuenak hurrengoak dira: funtzio edota sistema ez-linealen modelizazio eta estimaziora eta datu kopuru oso handien erabilera eta tratamendua.

ANNk hainbat modutan konektatu daitezkeen neuronaz osatzen dira. ANN baten elementurik oinarritzkoena, neurona individual bat, 17. Irudian dago ikusgai.



17. Irudia. Neurona artifizial baten egitura

Neurona baten oinarritzko elementuak hurrengoak dira:

- Sarrerak ( $x_j$ ): Neuronaren sarrerako aldagaiak zehazten dituzte.
- Sarrera-pisuak ( $w_j$ ): Neuronaren sarrera aldagai bakoitzak hedapen-arauan duen pisua adierazten dute.
- Hedapen-araua ( $h_j$ ): Aktibazio-funtzioaren aurretik neuronaren sarrera eta sarrera-pisu guztien arteko konbinazioa definitzen du. Hedapen-arau ugari existitzen dira eta batan edo besteren erabilera aplikazioaren

arabera definitzen da. Hedapen-arau erabiliena sarrera guztien eta hauei dagozkien pisuen produktuaren konbinazio linealean oinarritzen dena da. Gainera,  $\theta$  bezala adierazten den beste parametro bat ere gehitzen da. Azaldutako hedapen-arauaren adierazpena Ek. (21)-n dago ikusgai.

$$h(x_1, \dots, x_j, w_1, \dots, w_j) = \sum_{j=1}^n w_j \cdot x_j - \theta \quad (21)$$

- Aktibazio-funtzioa ( $f_i$ ): Aktibazio-funtzioak neuronaren aktibazio egoera eta irteera balioa definitzen ditu. Bi aktibazio-funtzio dira gaur egun erabiltzenak.

“On/Off” neurona bat izanez gero, neuronaren irteera diskretua da, hots, 1 edo 0 balioak hartuko ditu, eta bere aktibazio-funtzioa Ek. (22)-n adierazitakoaren arabera definitu daiteke.

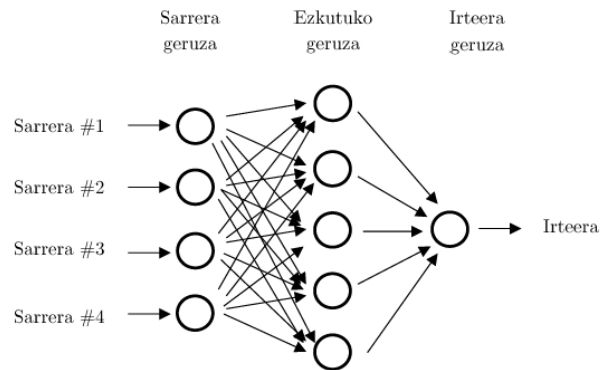
$$y = \begin{cases} 1 & \text{if } \sum_{j=1}^n w_j \cdot x_j \geq \theta \\ 0 & \text{if } \sum_{j=1}^n w_j \cdot x_j < \theta \end{cases} \quad (22)$$

Neuronak irteera jarraia izatea nahi bada, orduan, Ek. (23)-n adierazitako funtzio sigmoide [139] bat erabili daiteke aktibazio-funtzio gisa.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\beta \cdot x}} \quad (23)$$

non faktore esponenzialaren balioa  $\beta > 0$  bezala definitzen den.

ANNk egitura desberdina duten eta era desberdinetan konektatzen diren neurona zenbaki aldakorrek sortzen dira. ANN bat osatzen duten neuronak geruzetan banatzen dira. Normalean, 18. Irudian erakutsi bezala, ANNen egiturak sarrera geruza bat, ezkutuko geruza bat eta irteera geruza bat izan ohi ditu, guztiak ere neurona kopuru aldakorrez osatuta. Sarrera geruzaren neurona kopurua ANNren sarrerek zehazten dute. Era berean, irteera geruzaren neurona kopurua ANNren irteera kopuruarekin bat dator. Azkenik, ezkutuko geruza kopurua eta ezkutuko geruza bakoitzeko neurona zenbakia diseinatzailearen eta aplikazioaren esku geratzen dira.



### 18. Irudia. ANN baten egitura generala

Gaur egun, ANNk irizpide anitzen arabera sailkatu daitezke.

Geruza kopurua:

- Geruza sinplekoak: Neurona geruza bakarra duten ANNk.
- Geruza anitzekoak: Zenbait neurona geruza dituzten ANNk.

Informazio-fluxuaren norabidea:

- “Feedforward” edo aurrekariak: Informazio-fluxua sarrerako neuronetatik irteerako neuronetaranzko norabidean gertatzen da eskusiboki. Talde honi dagokion ANN topologia ezagunena “MultiLayerPerceptron” (MLP) izenekoa da.
- “Feedback” edo atzerakariak: Informazio-fluxua sarrerako neuronetatik irteerako neuronetaranzko edota irteerako neuronetatik sarrerako neuronetaranzko norabidean gerta daiteke. Talde honi dagokion ANN topologia ezagunena NARXNET izenez ezagutzen dena da.

ANNen entrenamendua sare neuronalari hornitutako datu egituretatik ikastea ahalbidetzen duen prozesua da. ANNen entrenamendu teknikak bi multzo handitan banatu daitezke. Alde batetik, Chen et al. [119]-en lanean azaldu bezala, gainbegiratutako ikasketa-prozesuaren bidez, ANN osatzen duten neurona bakoitzaren pisuak zehazten dira. Helburua zera da: sare neuronalaren irteerako balio erreal eta izan beharreko balioen arteko errorea minimizatzea. Hortaz, gainbegiratutako ikasketa entrenamendu batean ANNren irteeraren erreferentzia balioak ezagunak izan behar dira. Gainbegiratutako ikasketa bidez entrenatutako ANNen aplikazio nagusiak eredu ez-linealen erregresioa eta modelizazioa dira.



Gainbegiratutako ikasketa teknika erabiliena Sivaram et al. [140]-en lanean azaldutako “BackPropagation” (BP) izenekoa da.

Bestetik, ANNen gainbegiratu gabeko ikasketa, ANNen irteeraren erreferentzia baliorik gabe burutu daitekeen entrenamendu teknika bat da. Prozesu honen bidez, Usama et al. [114]-en lanean azaldu bezala, sare neuronal hainbat motatako datuekin elikatzen da eta hauen arteko erlazioa aurkitzea da helburua. Gainbegiratu gabeko ikasketa-prozesuaren aplikazio nagusia datuen kategorizazioa da. Azkenik, ANNk entrenatzeko posible da ere gainbegiratutako eta gainbegiratu gabeko teknikak konbinatzea.

Literatura aztertuz gero, sektore eolikoan aplikatutako eta ANNetan oinarritutako diseinuak proposatzen dituzten hainbat lan aurkitu daitezke. Ardatz horizontaleko aerosorgailuen kokapen optimo bat lortzeko ANN batean oinarritutako potentzia elektriko estimatzaile bat proposatzen dute Mabel et al. [141]-ek beren lanean. Honen arabera, zenbait parke eolikori dagozkien 3 urtez jasotako datuekin entrenatu eta parke eoliko berriak kokatzeko leku geografiko desberdinen kalitatea estimatzeko erabiltzen da sare neuronal. Halaber, Barbounis et al. [142]-ek ANN errepikakor baten diseinua proposatzen dute parke eoliko batean denboran aurreragoko haize-abiaduraren balioak estimatzeko.

### *“MultiLayer Perceptron with BackPropagation” (MLP-BP)*

MLP-BP sare neuronalak neurona kopuru aldakor batez osatutako sareak dira [143-145]. MLP-BP sareak osatzeko 17. Irudian aurkeztutako neurona erabiltzen dira. Sare neuronal hauen ezaugarri nagusia honakoa da: informazio-fluxua eskusiboki norabide bakarrean gertatzen da, sarrerako neuronetatik eta irteerako neuronetarantz. Gainera, MLP-BPak ezkutuko geruza zenbaki aldakor batez eta geruza bakoitzean neurona kopuru desberdinez osatzen dira, aplikazioaren arabera.

MLP-BP sistemekin erabilitako ikasketa-prozesu ohikoena gainbegiratutako ikasketa da, zeinek, arestian azaldu bezala, neuronon pisuak doitzen dituen sare neuronalaren irteera balio teorikoen eta errealeen arteko balioa txikitzeko. Sivaram et al. [140]-en lanean BP algoritmoaren azalpen zehatz bat aurkezten da.

MLP-BP sare neuronalen aplikaziorik ohikoenak hurrengoak dira: sistemen modelizazioa, etorkizuneko balioen estimazioa eta elementuen identifikazioa. Li et al. [146]-en lanean MLP topologiako sare neuronal bat proposatzen da munduko ibilgailu arinen erregai-kontsumoa estimatzeko. Hu et al. [147]-ek MLP topologiako

sare neuronal bat proposatzen dute gainazal iragazgaitzen identifikazio edo estimazioa egiteko hainbat iruditan.

### *“NonLinearAutoregressive Neural Network” (NARXNET)*

NARXNET sare neuronalak berrelikadura atzerakaria duten sare neuronalak dira, hau da, informazio-fluxua ez da eskusiboki sarrerako geruzatik eta irteerako geruzara ematen, baizik eta baita kontrako norabidean ere [148,149]. NARXNET sare neuronalak ezkutuko geruza zenbaki aldakor batez eta geruza ezkutu bakoitzean neurona kopuru aldakorrez osatzen dira, aplikazioaren arabera.

MLP-BP sareekin alderatuz gero, informazio-fluxua da aurkezten duten diferentzia handiena. Izan ere, NARXNET sareetan informazioa sarrera geruzatik irteera geruzarantz bakarrik ez ezik, irteerako geruzatik sarrera geruzara ere ematen da. NARXNET sare neuronalen aplikazio nagusia sistema dinamikoen modelizazioa da. Esaterako, Cheng et al. [150]–ek beren lanean NARXNET sare neuronal bat proposatzen dute eragingailu piezoelektriko baten dinamikaren modelizaziorako. Era berean, Alzahrani et al. [151]–en lanean NARXNET sare neuronal baten bidez eguzki-irradiazioa iragartzeko prozedura bat aurkezten da.

### 2.4.3 Optimizazio Algoritmoak

Optimizazio algoritmoak funtzio baten optimoa (maximo zein minimoa) aurkitzeko diseinatutako teknikak dira. Optimizazio algoritmoen lehenengo erabilera XX. mendean du abiapuntua. Gaur egun, Yang et al. [152]–en lanean adierazi bezala, optimizazio algoritmoek erabilera ugari dituzte, batez ere ingeniariaren arloan, non prozesu industrialak optimizatzea, kosteak murriztea eta efizientzia handitzea garrantzia handiko kontzeptu bilakatu diren.

Optimizazio algoritmoen garapena bultzatu duen funtsezko gertaera mikroprozesatzaileen diseinua izan da, algoritmoen exekuzioa denbora murriztea ahalbidetu baitute. Gaur egun, optimizazio prozesurako beharrezko den eredu matematikoen erdiespena izan daiteke optimizazio algoritmoen loturiko arazorik handiena. Horretarako, Chen et al. [150]–ek beren lanean egin bezala, ANNek sistemen modelizaziorako eskaintzen duten gaitasuna aprobeztatu daiteke.

Egun, optimizazio algoritmo ugari daude, hainbat irizpide jarraituz sailkatu daitezkeenak. Yang et al. [152]–ek hurrengo sailkapena proposatzen dute.

Algoritmoaren exekuzioan zehar deribatu baten existentzia:

- Gradientean oinarritutako algoritmoak: Deribatuetan oinarritutako algoritmoak dira. Gauss-Newton algoritmoak [153,154] sar daiteke multzo honetan, esaterako.
- Gradiente gabeko algoritmoak: Deribatuz ez duten algoritmoak dira. Adibidez, “Nelder-Mead downhill simplex” [155,156] izenez ezagutzen den algoritmoa.

Ausazkotasunaren existentzia:

- Algoritmo deterministak: Ez dago ausazkotasunik optimizazio kodigoan. Hortaz, algoritmoaren hasiera-puntua berdina den bitartean, lortutako emaitza ere berbera izango da. Algoritmo determinista baten adibidea ausazkotasun gabeko hasiera duen “Hill Climbing” algoritmoa [157,158] izan daiteke.
- Algoritmo estokastikoak: Ausazkotasunean oinarritzen diren optimizazio algoritmoak dira. Ondorioz, nahiz eta hasiera-puntua berbera izan, algoritmoak lortutako emaitza desberdina izango da. Algoritmo genetikoak (GA) [159,160] dira algoritmo estokastikoen adibide bat.

Algoritmoaren exekuzioan zehar dagoen mugikortasuna:

- Lokalak: Emaitza optimo lokaletan konbergitzeko joera dute. Ausazkotasun faltaren ondorioz optimo lokaletatik ihes egin eta optimo globalak aurkitzeko arazoak izaten dituzte. Normalean algoritmo deterministak izaten dira talde honen barruan.
- Globalak: Emaitza optimo globalak aurkitzeko joera dute. Ausazkotasunaren existentziaren ondorioz, optimo lokaletatik ihes egin eta optimo globalak aurkitzeko gaitasuna dute. Normalean algoritmo estokastikoak izaten dira talde honen barruan.

Optimizazio algoritmoen barruan nabarmendu beharreko talde bat optimizazio algoritmo metaheuristikoen izenez ezagutzen dena da. Algoritmo hauek prozesu naturaletan inspiratutako optimizazio algoritmoak dira [110,161,162]. Gaur egun, optimizazio algoritmo metaheuristikoen ugari daude: “Ant” algoritmoa [163], “Bee” algoritmoa [164], “Simulated Annealing” [165], GA, PSO, “Differential Evolution” (DE) etab.

Hurrengo lerroetan egun erabilienak diren optimizazio algoritmo metaheuristikoen analisi sakonago bat egingo da.

*“Genetic Algorithms” (GA)*

Charles Darwin zientzialariak proposatutako espezieen eboluzioan oinarritutako optimizazio algoritmo metaheuristkoak dira GAK [159,160]. 1960 eta 1970 hamarkaden bitartean aurkeztu zituen lehen aldiz Holland [166] zientzialariak.

GAK, Wang et al. [110]-en lanean adierazi bezala, kromosoma edo banako kopuru aldakorrez osatutako populazio batez eratzen dira. Kromosoma edo banako bakoitzak optimizazio problemaren emaitza posible bat zehazten du. Optimizazio problema ebatzi ahal izateko, optimizatu beharreko koste-funtzioa ezagutu behar da. Koste-funtzio honek banako bakoitzari gaitasun-balio bat esleitzen dio, zeinek banako bakoitzak koste-funtzioa betetzeko duen ahalmena adieraziko duen, eta, ondorioz, banako bakoitzaren biziraupena eta ugaltzeko aukera definituko dituen. Gaitasun-balio handiena duten banakoek bizirauteko joera handiagoa erakutsiko dute. Horrela, algoritmoak emaitza optimoetara joko du.

GAetan oinarritutako algoritmo baten exekuzioa bost urratsetan laburbil daiteke:

- Hasiera: Populazioa ausaz sortutako banakoekin hasieratzen da normalean.
- Ebaluazioa: Populazioa osatzen duten banako bakoitzaren gaitasun-balioa kalkulatu da.
- Aukeraketa: Ugalketa prozesuan parte hartuko duten banakoak aukeratuko dira, duten gaitasun-balioa kontuan hartuta.
- Eboluzioa: Banako berriak sortuko dira ugalketa eta mutazio prozesuen bidez. Populazio berria belaunaldi berriko banakoekin eta aurreko belaunaldiko banako gutxi batzuekin osatuko da.
- Bukaera: Bigarrenetik eta laugarrenera arteko pausuk errepikatuko dira bukaerako baldintzak bete arte.

Energia eolikoaren sektorean aplikatutako GAen hainbat erabilera aurkitu daitezke literaturan. Esaterako, instalazio eoliko baten optimizazioa aerosorgailuen kokapen fisikoaren optimizazioaren bidez [167,168], aerosorgailu baten sorgailu elektrikoaren diseinu optimoa urteko energia-sorkuntza kontutan hartua [169] edota energia-sorkuntza handiko uneetan sistemaren operazioa optimizatzeko aerosorgailuaren kontrol sistemari aplikatutako algoritmo bat [170].

*“Particle Swarm Optimization” (PSO)*

PSO algoritmoa, Kennedy et al. [171]-ek azaldu bezala, optimizazio algoritmo metaheuristiko bat da, bilaketa-espazio jakin batean emaitza optimoetarantz eboluzionatzen duen partikula talde baten jokabidean inspiratutakoa. Wang et al. [110]-en lanean adierazitakoaren arabera, PSO asko erabiltzen den optimizazio algoritmoa da, batez ere aurkezten dituen sendotasun altu, inplementazio errez eta diseinu parametro kopuru murriztuari esker.

PSO algoritmoan, ikusi Khan et al. [161], partikula bakoitzak optimizazio problemaren emaitza posible bat irudikatzen du, eta posizio bektore batekin  $x_{i,t}$  eta abiadura bektore batekin  $v_{i,t}$  definitzen da. GAetan bezala, PSO algoritmoan ere partikula bakoitzari gaitasun-balio bat esleituko dion koste-funtzio bat definitu beharra dago.

Taldea osatzen duten partikula bakoitzaren abiaduraren  $v_{i,t}$  eta posizioaren  $x_{i,t}$  eguneratzea Ek. (24) eta Ek. (25)-n aurkeztutako adierazpenak jarraituz egiten dira, hurrenez hurren.

$$v_{i,t+1} = H \cdot v_{i,t} + \Phi_1 \cdot (x_{opt_{i,t}} - x_{i,t}) + \Phi_2 \cdot (x_{global\_opt_{i,t}} - x_{i,t}) \quad (24)$$

$$x_{i,t+1} = x_{i,t} + v_{i,t+1} \cdot \Delta t \quad (25)$$

non  $H$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ] sistemaren inertzia konstantea,  $\Phi_1$  [-] explotazio faktorea,  $\Phi_2$  [-] esplorazio faktorea,  $x_{opt_{i,t}}$  partikula jakin batek aurkitutako emaitzarik onena eta  $x_{global\_opt_{i,t}}$  talde osoak aurkitutako emaitzarik onena diren.

Ek. (24)-n aurkeztutako adierazpenean ikus daitekeenez, partikula bakoitzaren abiadura partikulak berak aurkitutako emaitza onena eta talde osoak aurkitutako emaitza onena aintzat hartuz kalkulatzen da. Hortaz, PSO algoritmoaren jarduera doitu nahi izanez gero, algoritmoaren esplorazio eta explotazio gaitasunak molda daitezke,  $\Phi_1$  [-] eta  $\Phi_2$  [-] parametroen balioa aldatuta. Era berean, sistemaren inertzia konstanteak  $H$  partikulen mugitzeko gaitasuna zehaztuko du.

PSO algoritmoaren exekuzioa bost urratsetan laburbildu daiteke:

- Hasiera: Taldea osatzen duten partikulak ausaz hasieratuko dira.
- Ebaluazioa: Taldea osatzen duten partikula bakoitzaren gaitasuna kalkulatuko da.

- Aldaketa: Partikula bakoitzaren emaitza onena eta talde osoaren emaitza onena kontuan izanda partikula bakoitzaren abiadura kalkulatu da.
- Eguneratzea: Partikula bakoitza bere posizio berrira mugituko da.
- Bukaera: Bigarrenetik eta laugarrenera arteko pausuak errepikatuko dira bukaerako baldintzak bete arte.

Energia eolikoaren sektorean aplikatutako PSO algoritmoen hainbat erabilera aurki daitezke literaturan. Esaterako, parke eoliko batean aerosorgailuen kokapen fisikoa optimizatzeko [172], aerosorgailu baten zenbait elementuren diseinu optimorako [173], parke eolikoak sortutako tentsio elektrikoa erregulatuko duen kontrolagailu baten diseinurako [174] edota parke eoliko batek sortutako energia almagatzeko sistema baten diseinu optimorako [175].

### *“Differential Evolution” (DE)*

DE algoritmoa optimizazio algoritmo metaheuristiko bat da, printzipio ebolutiboetan oinarritzen dena. DE algoritmo originala Storn eta Price [176]-en lanean aurkeztu zen lehen aldiz. Funtzionamenduari dagokionez, DE algoritmoa ausaz hasieratutako bektoreekin hasten da eta GAen haria jarraituz, mutazio, ugalketa eta aukeraketa prozesuetan oinarritzen da optimizazio problemaren emaitza optimoak aurkitzeko. Hala ere, DE algoritmoak, GAek ez bezala, emaitza bektoreen dimentsio bakoitzean era banatuan jarduten du.

DE optimizazio algoritmoari dagokion mutazio prozesuaren oinarria, ausaz aukeratutako hiru bektoreen konbinaketa da, Ek. (26)-n erakusten den bezala.

$$v_{i,t+1} = x_{a,t} + T \cdot (x_{b,t} - x_{c,t}) \quad (26)$$

non  $T \in [0,2]$  pisu diferentzial bezala ezagutu ohi den diseinu parametro den.

Mutazioaren ostean,  $C_r \in [0,1]$  ugalketa probabilitatean oinarritutako ugalketa prozesua gauzatu eta banako berrien gaitasuna ebaluatzen da. Banako bakoitzaren gaitasun-balioaren arabera izango da aukeraketa prozesua.

DEn oinarritutako algoritmoen exekuzioa bost urratsetan laburbildu daiteke:

- Hasiera: Populazioa ausaz sortutako banakoekin hasieratuko da normalean.
- Mutazioa: Ek (26)-n adierazitako mutazioa gauzatuko da.

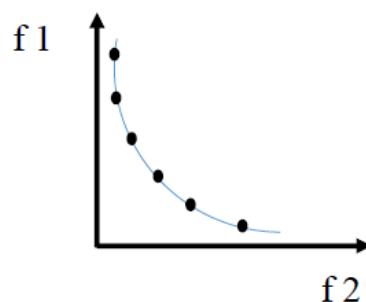
- Ugalketa: Belaunaldi berriko banakoak sortuko dira ugalketa probabilitatea aintzat hartuz.
- Aukeraketa: Hurrengo belaunaldian egongo diren banakoak aukeratuko dira, duten gaitasun-balioa kontuan hartuta.
- Bukaera: Bigarrenetik eta laugarrenera arteko pausuak errepikatuko dira bukaerako baldintzak bete arte.

Energia eolikoaren sektorean aplikatutako DE algoritmoen hainbat erabilera aurkitu daitezke literaturan. Esaterako, parke eoliko baten aerosorgailuen kokapen fisiko optimoa kalkulatzeko [177], aerosorgailu baten sorgailu elektrikoaren diseinu optimo bat burutzeko [178], aerosorgailu baten potentzia kurba datu errealekin era optimoan modelizatzeko [179] edota parke eoliko batek sortutako energia almagatzeko erabilitako bateria batzuen kokapen fisiko optimoa kalkulatzeko [180].

### *Optimizazio aldagaiantza*

Optimizazio aldagaiantza [181-183] optimizazio problema bat da, koste-funtzio bat baino gehiago dituen. Koste-funtzio bakar batean oinarritutako optimizazio problemek ez bezala, optimizazio prozesu aldagaiantzetan gerta daiteke emaitza optimo bakar bat baino gehiago egotea, zeintzuk optimizatu beharreko koste-funtzioen arteko konpromiso behar bati erantzuten dioten.

Optimizazio aldagaiantzaren kontzeptua Vilfredo Pareto [184]-k aurkeztu zuen lehen aldiz 1896. urtean. Problema hauetan emaitza jakin bat menderatua dela esaten da, beste edozein emaitza baldin badago zeinek optimizatu beharreko koste-funtzio guztietan gaitasun-balio hobea (handiagoa edo txikiagoa optimizazio problemaren naturaren arabera) aurkezten duen. Horrelako soluziorik egon ezean, hau da, koste-funtzio bateri lotutako gaitasun-balioa hobetzeak beste edozein koste-funtziori lotutako gaitasun-balioa okertzea badakar, orduan emaitza hori ez-menderatua dela esaten da. Ez-menderatuak diren emaitza guztiek Paretoren Fronte optimoa edo “Pareto optimal Front” (PoF) izeneko osatzen duten. Bi koste-funtzioen optimizazioari dagokion optimizazio problema baten PoF dago ikusgai 19. Irudian.



### 19. Irudia. Optimizazio problema bikoitz baten PoF

19. Irudian ikus daitekeenez, marra jarraia osatzen duten puntu guztiek optimizazio problemaren PoF osatzen dute eta aurretiaz azaldutako koste-funtzioei dagokien konpromiso beharrari erantzuten diote. Bestela esanda, koste-funtzioetako bati lotutako gaitasun-balioa handituz gero, besteari lotutako gaitasun-balioa txikituko da. PoFn oinarritutako optimizazio problema aldagaienitza bat 2.4.3 atal honetan azaldutako edozein optimizazio algoritmorekin implementatu daiteke.

Energia eolikoaren sektorean aplikatutako optimizazio aldagaienitza hainbat erabilera aurkitu daitezke literaturan. Esaterako, aerosorgailu baten sorgailu elektrikoaren diseinurako [185], aerosorgailu baten sare-konexioari dagokion transformadorearen optimizaziorako [186], sistema eoliko baten sistema elektrikoaren optimizaziorako [187,188] edota energia eoliko eta energia fotovoltaikoan oinarritutako planta hibrido baten operaziorako [189].

## 2.5 LABURPENA ETA INPLIKAZIOAK

Azken belaunaldietako ardatz horizontaleko aerosorgailuek hiru aktuazio sistema izan ohi dituzte haizearen egoera aldakorraren aurrean erantzun eta sorgailu eolikoaren operazioa kontrolatzeko: Potentzia bihurgailu elektronikoa (momentu kontrol begiztak erabiltzen duena), pitch aktuazio sistema (pitch kontrol begiztak erabiltzen duena) eta yaw aktuazio sistema (yaw kontrol begiztak erabiltzen duena). Literatura aztertuta, atera daitekeen lehenengo ondorioa zera da: oro har, ardatz horizontaleko aerosorgailu baten operazioa optimizatzeko yaw kontrol egoki batek izan dezakeen eraginari buruzko informazioa falta da. Hau da, momentu eta pitch kontrol begiztak sakon aztertu eta landu diren bitartean, yaw kontrol begizta alde batera uzteko joera bat dagoela esan daiteke. Horregatik, lan honetan, yaw kontrol begiztaren analisi zehatzago bat egin eta honek aerosorgailuaren operazioa optimizatzeko (sortutako potentzia elektriko



maximizatu karga mekanikoak minimizatu bitartean) duen gaitasuna aztertzea erabaki da.

Bestalde, egungo merkatu ekonomikoaren lehiakortasuna eta energia-kontsumo gorakor baten ondorioz, ahalik eta koste txikienarekin ahalik eta potentzia handiena sortu dezaketen aerosorgailuak diseinatzea da helburua. Ondorioz, aerosorgailu baten tamaina eta potentzia izendatua handitzean, diseinu eta operazioa zaildu egiten dira, batez ere karga mekanikoen hazkuntza dela eta. Egoera honetan, azken urteetan agertzen hasi diren fluxu kontrol estrategiak balizko konponbide gisa azaltzen dira. Literaturaren arabera, aerosorgailuaren jarduera aerodinamikoa, eta ondorioz operazioa, hobetzeko gaitasuna duten koste ekonomiko handirik gabeko sistemak dira fluxu kontrol gailuak. Hori dela eta, lan honetan fluxu kontrol gailuetan oinarritutako estrategiek ardatz horizontaleko aerosorgailu baten operazioa hobetzeko duten gaitasuna aztertzea erabaki da.

Azkenik, arestian azaldutako bi helburuak lortzeko, gaur egungo teknologiaren garapenarekin eta datu kopuru handiak sortzearekin agertu diren teknikak baliatzea ere erabaki da. Izan ere, literaturan ikusi ahal izan denez, AI osatzen duten teknikak, datu kopuru handiekin lan egiteko aukera ez ezik, haietatik ikasteko gaitasuna ere eskaintzen dute. Horregatik, lan honetan, AI osatzen duten zenbait teknika adimentsuk ardatz horizontaleko aerosorgailu baten operazioa optimizatzeko diseinatutako estrategietan egin dezaketen ekarpena aztertzea ere erabaki da.

Ondorioz, ikerkuntza lan honek ardatz horizontaleko aerosorgailuen operazioa optimizatzea helburu duten hurrengo bi gai nagusiak izango ditu oinarri: Alde batetik, AI teknikak erabiliz ML bidezko yaw kontrol estrategia baten diseinu eta simulazio bidezko balioztatzea. Eta, bestetik, fluxu kontrol gailu pasiboen azterketa eta AI teknikak erabiliz fluxu kontrol estrategia aktibo baten diseinu eta simulazio bidezko balioztatzea.



# 3. Kapituluia

## Diseinu Prozedura

---

Ikerkuntza lan honetan ardatz horizontaleko aerosorgailu baten jarduera hobetzera bideratutako hainbat kontrol estrategia diseinatu dira. Alde batetik, ML bidezko bi yaw kontrol estrategia garatu dira. Hauen helburua aerosorgailuaren yaw sistemaren operazio optimo eta erabat autonomoa lortzea da. Bestetik, zenbait fluxu kontrol gailuk ardatz horizontaleko aerosorgailu baten operazioan eta potentzia sorkuntzan izan ditzaketen onurak aztertu dira. Horretarako, teknika adimentsuak baliatzen dituen fluxu kontrol teknika aktibo bat ere diseinatu da.

Proposatutako kontrol estratgien diseinu prozedura izango da aztergai kapitulu honetan. 3.1 atalean ardatz horizontaleko aerosorgailu baten yaw operazioa erregulatzeko asmoz proposatutako ML bidezko yaw kontrol estratgien diseinu prozesua deskribatuko da. Fluxu kontrolean oinarritutako kontrol estratgien diseinu prozedura 3.2 atalean aurkeztuko da.

### 3.1 ML BIDEZKO YAW KONTROLA

Ikerkuntza lan honetan proposatutako ML bidezko yaw kontrol estrategiak hainbat teknika adimentsu erabiltzen dituzte, 2.4 atalean aurkeztutako AIren parte direnak. Teknika adimentsuak erabiltzearen arrazoi nagusia zera da: desiratutako helburua lortzeko kontrol sistema konbentzionalek baino ezaugarri hobek eskaintzen dituzte. Lan honetan, zehazki, bi ML bidezko yaw kontrol teknika garatu dira. Lehenengo teknikak (oinarrizko ML bidezko yaw kontrol izenez ezagutuko denak) aerosorgailuak sortutako potentziaren optimizazioa du helburu. Bigarren teknikak (hobetutako ML bidezko yaw kontrol izena hartuko duenak), aldiz, aerosorgailuak sortutako potentziaren optimizazioaz gain, yaw sistemaren rodamentuan z ardatzarekiko sortutako karga mekanikoen optimizazioa ere badu helburu. Aurrerago azalduko denez, aerosorgailu baten yaw errotazioa egiterako orduan, sortutako potentziaren maximizazioa eta eragindako karga mekanikoen minimizazioa helburu kontrajarri gisa agertuko dira.

Bi kasuetan, ML bidezko yaw kontrol estrategiaren oinarrizko elementua RL algoritmo bat da. Algoritmo honek, aurretik 2.4.1 atalean azaldu bezala, sistemaren egoera eta ekintzak sari balio batekin lotuko ditu eta, ondorioz, entrenamendu prozesu baten ostean, egoera bakoitzean saria maximizatu/minimizatzen duen ekintza optimoa hautatzea ahalbidetuko du. Kasu honetan, sistema ardatz horizontaleko aerosorgailu baten yaw aktuazioa izango da. RL algoritmoaren erabilerarekin automatikoki doituko den yaw kontrol algoritmo bat garatzea espero da, diseinatzailearen iritzi subjektiboa ezabatu eta egoera desberdinetan aerosorgailuaren operazioa optimizatuko duena. Gainera, RL algoritmoaren etengabeko ikasteko aukera dela eta, aerosorgailuaren kontrol sistemak ingurune desberdinetara egokitzeko ahalmena izatea espero da.

Atal honek hurrengo egitura izango du: Oinarrizko ML bidezko yaw kontrol estrategiaren diseinu prozesua 3.1.1 atalean azalduko da. 3.1.2 atalean, berriz, hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategiaren diseinu prozesua deskribatuko da.

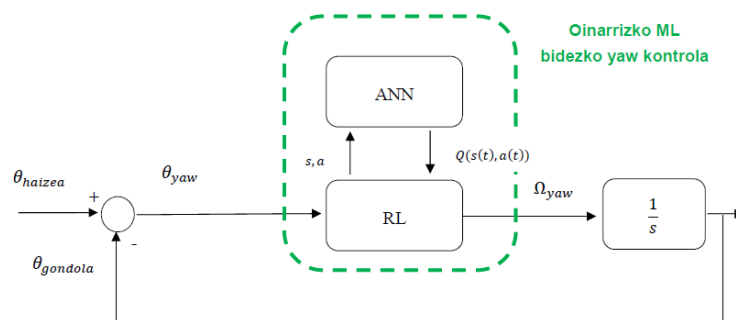
#### 3.1.1 Oinarrizko ML bidezko Yaw Kontrol Estrategia

Atal honetan proposatutako ML bidezko yaw kontrol estrategiaren helburua honakoa da: teknika konbentzionaletan oinarritutako beste yaw kontrol estrategia sinpleago batzuk ordezkatu eta era autonomoan funtzionatuko duen yaw operazio

bat lortzea. Azken helburua aerosorgailuak sortutako potentzia maximizatzea izango da.

Oinarrizko ML bidezko yaw kontrol estrategiak AIri lotutako bi teknika adimentsuren erabilera aurreikusten du. Alde batetik, strategiaren oinarrizko elementua RL algoritmo bat izango da. Algoritmo honek sistemari lotutako egoera eta ekintza guztien arteko mapeoa egingo du. Bestetik, ANN baten erabilera ere aurreikusten da RL algoritmoaren ondorioz sortutako  $Q(s,a)$  matrizea  $Q(s(t),a(t))$  funtzio jarrai bihurtzeko. 20. Irudian proposatutako kontrol sistemaren bloke diagrama sinplifikatua aurkezten da.

ANN baten bidez  $Q(s,a)$  matrizea  $Q(s(t),a(t))$  funtzio jarrai bezala gordetzeak hainbat abantaila ditu. Esaterako, funtzio jarraiekin lan egitean, egoera eta ekintzen kuantifikazioari lotutako arazoak ekiditen dira. Gainera, interpolazio-taula batekin alderatuz gero, ANN bat erabiltzeak datu kopuru handiekin lan egiteko eta gainazal oso ez-linealak erraz modelizatzeko aukera eskaintzen du. Era honetan, mikroprozesatzailearen memoria arazoak ere saihestu daitezke.



20. Irudia. Oinarrizko ML bidezko yaw kontrol strategiaren bloke diagrama

### *RL algoritmoaren egituraketa*

Oinarrizko ML bidezko yaw kontrol algoritmoaren diseinu prozesuaren lehen urratsa RL algoritmoaren egitura zehaztea izango da. Aurretik 2.4.1 atalean azaldutakoaren arabera, RL algoritmo batek hiru oinarrizko elementu ditu: Egoera, ekintza eta saria. Kasu honetan, sistema ardatz horizontaleko aerosorgailu baten yaw aktuazioa izanik, RL algoritmoaren oinarrizko elementuak aerosorgailuaren operazio honekin lotutako aldagaiekin erlazionatu behar dira, betiere lortu nahi den helburua kontuan izanik. Egoera, ekintza eta sari aldagaiak era egokian zehaztu

ezean, ez da posible izango yaw kontrol estrategiaren funtzionamendu egoki bat lortzea. Proposatutako RL algoritmoaren oinarritzko elementuak hurrengoak dira:

Egoera:

- YawAngelua [°]: Aerosorgailuaren errotorearen orientazioaren eta errotorearen sarrerako haizearen norabidearen arteko diferentzia adierazten du. 2.2 atalean ikusitakoaren arabera, zenbat eta handiagoa izan yaw angeluaren balioa, orduan eta handiagoa izango da aerosorgailuaren potentzia galera. Yaw angeluaren balioa kalkulatzeko, Ek. (27)-ko adierazpena erabiliko da.

$$\theta_{yaw} = \theta_{haizea} - \theta_{gondola} \quad (27)$$

Ekintza:

- YawK [-]: Aerosorgailuaren yaw errotazio-abiadurari lotutako irabazi proportzionala da. Ekintza honek aerosorgailuaren yaw errotazio-abiaduran duen eragina Ek. (28)-n ikusi daiteke.

$$\Omega_{yaw} = YawK \cdot \theta_{yaw} \quad (28)$$

Epe-motzeko saria:

- PotentziaIrabazia [%]: Egoera jakin batean (YawAngelua [°]) ekintza jakin bat (YawK [-]) burutuz gero, aerosorgailuak lor dezakeen potentzia sorkuntza irabazia adierazten du. Epe-motzeko sari hau kalkulatzeko adierazpena Ek. (29)-n aurkeztutakoa da.

$$PotentziaIrabazia = \frac{P_{kontrol} - P_{ez_kontrol}}{P_{optimo}} \cdot 100 \quad (29)$$

non  $P_{kontrol}$  [W] aldagaiak yaw kontrol estrategia aktibo dagoenean aerosorgailuak sortutako potentzia adierazten duen,  $P_{ez_kontrol}$  [W] aldagaiak yaw kontrol estrategia aktibo ez dagoenean aerosorgailuak sortutako potentzia adierazten duen eta  $P_{optimo}$  [W] aldagaiak aerosorgailuaren errotorea eta honen sarrerako haizea guztiz lerrokatuta daudenean, hau da, YawAngelua=0° denean, sistemak sortutako potentzia adierazten duen.

Epe-motzeko saria erabilia RL algoritmoaren epe-luzeko saria kalkulatzeko, batezbesteko mugikor esponentzial bat erabiliko da, ikusi Ek. (9). Batezbesteko hau aurretiaz definitutako denbora-tarte batean kalkulatu da, ekintza hasten den

unetik eta denbora-tarte honen bukaera arte. Kasu honetan, simulazioak luzeegiak izan ez daitezzen,  $T_{RL} = 60$  s denbora-tartea hartu da. Gainera, tartean zehar kalkulaturako balio guztiei garrantzia berbera aitortu zaienez, deskontu-faktorea  $\gamma = 1$  bezala definitu da. Azkenean, proposaturako oinarrizko ML bidezko yaw kontrol estrategiaren epe-luzeko saria kalkulatzeko adierazpena Ek. (30)-n aurkezten da.

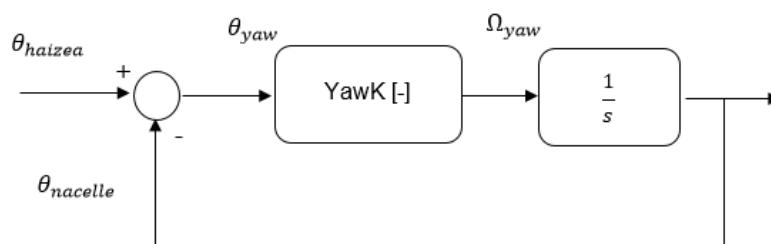
$$Q_P(s, a) = \frac{\frac{1}{T_{RL}} \int_t^{t+T_{RL}} (P_{kontrol}(t) - P_{ez_kontrol}(t)) \cdot dt}{\frac{1}{T_{RL}} \int_t^{t+T_{RL}} P_{optimo} \cdot dt} \cdot 100 \quad [\%] \quad (30)$$

### *RL algoritmoaren entrenamendua*

Behin RL algoritmoaren egitura definituta, entrenamendu prozesua zehaztu behar da. Izan ere, RL algoritmoaren funtzionamendu egokiaren oinarria entrenamendu prozesu bat da, zeinetan egoera, ekintza eta sari guztien arteko mapeoa egingo den. Mapeo honen bidez sistemaren ikasketa ahalbidetzen da. Ondorioz, entrenamendu prozesu ostean, RL algoritmoak egoera bakoitzean ekintza optimoak era autonomoan hautatzeko gaitasuna izan beharko luke.

RL algoritmo bat entrenatzeko hainbat teknika daude. Alde batetik, “offline” motako entrenamendu bat burutu daiteke. Entrenamendu mota honetan RL algoritmoaren entrenamendua eta aerosorgailuaren operazioa ez daude sinkronizatuta, hau da, lehenak ez dauka bigarrenean eragin zuzenik. Bestalde, “online” motako entrenamendua ere badago. Entrenamendu mota honetan RL algoritmoaren entrenamendua eta aerosorgailuaren operazioa sinkronizatuta daude, hots, lehenak eragin zuzena dauka bigarrenean denbora errealean. Azkenik, bien arteko nahasketa den entrenamendu bat egitea ere posible da. Horretarako, lehenengo eta behin, RL algoritmoaren “offline” motako entrenamendu bat burutuko da. Ondoren, aerosorgailua martxan dagoela, honen operazioarekin sinkronizatuta dagoen eta era jarraian ikasteko aukera eskaintzen duen “online” ikasketa-prozesu bat abiatuko da.

Atal honetan garaturako RL algoritmoaren ikasketarako “offline” motako entrenamendu bat proposatzen da, non ikasketarako beharrezkoak diren datuak 21. Irudian erakusten den diagrama sinplifikatua baliatuz lortuko diren.



### 21. Irudia. Oinarrizko RL algoritmoaren entrenamendurako erabilitako yaw sistemaren bloke diagrama sinplifikatua

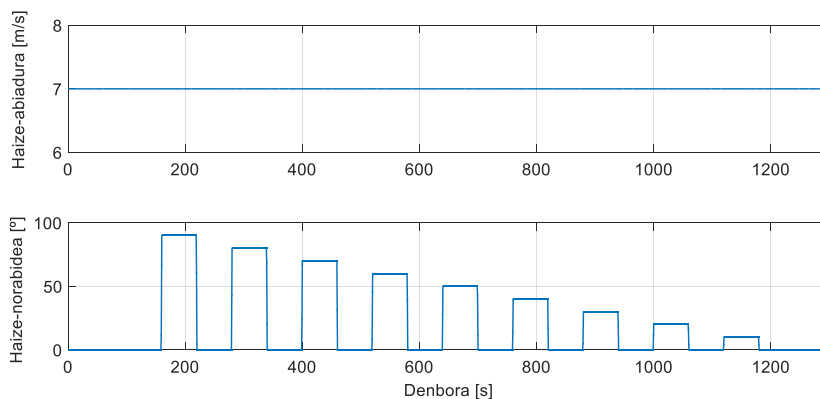
RL algoritmoaren entrenamendua egiteko FAST kode aeroelastikoa erabili beharrean eredu sinplifikatu bat baliatzearen alde garrantzitsu bat zera da: “online” ikasketa bat egin ahal izateko eskaintzen duen malgutasun handia. Izan ere, ekuazio matematiko konplexuen ondorio den seinalerik erabiltzen ez denez, edozein aerosorgailutan eskuragai dauden datu errealak erabilia burutu ahal izango litzateke “online” ikasketa.

Beste alde batetik, RL algoritmoaren entrenamendua burutu ahal izateko beharrezkoa da beste bi kontzeptu zehaztea: diseinu prozeduran zehar kontsideratuko den ardatz horizontaleko aerosorgailuaren datuak eta aerosorgailuaren sarrerako haizearen definizioa. Aerosorgailu motari dagokionez, arestian 1.4 atalean adierazi bezala, ikerkuntza lan honetan egindako simulazio eta erakutsitako emaitza guztiak NREL 5MW aerosorgailuan oinarrituko dira. Aerosorgailu honen potentzia kurba eta ezaugarri garrantzitsuenak 5. Irudia (a)-n eta 1. Taulan daude ikusgai, hurrenez hurren.

Haizearen abiadurari dagokionez, 2.1 atalean azaldu bezala, aerosorgailuak sortutako potentzian yaw angeluak duen eragina oso bestelakoa da haize-abiaduraren balioaren arabera. Aerosorgailuaren potentzia partzialeko eremuan duen eragina askoz nabarmenagoa da potentzia izendatuko eremuan duena baino. Izan ere, potentzia partzialeko eremuan yaw angeluaren edozein baliok potentzia elektriko galera bat eragingo du. Bestalde, potentzia izendatuko eremuan eta aerosorgailuan implementatutako kontrol sistemaren eraginez, yaw angeluaren edozein baliok ez du beti potentzia elektriko galera bat eragingo, bakarrik bere balioa aerosorgailua potentzia izendatuko eremutik ateratzeko bezain handia denean. Horregatik, atal honetan proposatutako ML bidezko yaw kontrol estrategiaren entrenamendua NREL 5MW aerosorgailuaren potentzia partzialeko eremuari dagokion 7 m/s-ko haize-abiadura erabiliz egin da.



Haizearen norabideari dagokionean, sortutako potentzia elektrikoa zerora eramán dezaketen norabideak mugatzat hartuta, bata bestearengatik  $10^\circ$ -ra dauden haize-norabideak kontsideratuko dira simulazioetan, hots,  $-90:10:90$   $^\circ$ . Entrenamendu prozesuan erabilitako haize-abiadura eta haize-norabide profilak 22. Irudian daude ikusgai.



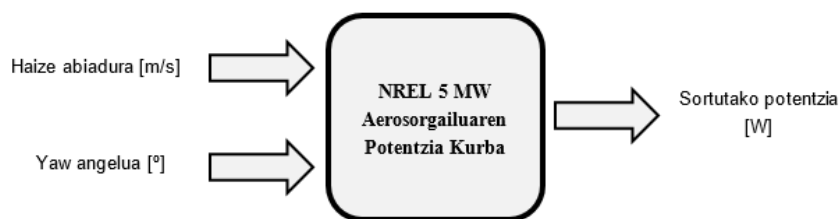
## 22. Irudia. Oinarrizko RL algoritmoaren entrenamendurako erabilitako haize-abiadura eta haize-norabidea

Era berean, RL algoritmoan definitutako YawK [-] ekintzak YawAngelua  $^\circ$  egoeran duen eragina aztertzeko, ekintzaren hainbat balio kontsideratuko dira. Konkretuki, YawK [-] ekintzaren 0:0.1:1 [-] balioak erabiliz egingo dira simulazioak.

## 2. Taula. Oinarrizko RL algoritmoaren entrenamendurako definitutako parametroak

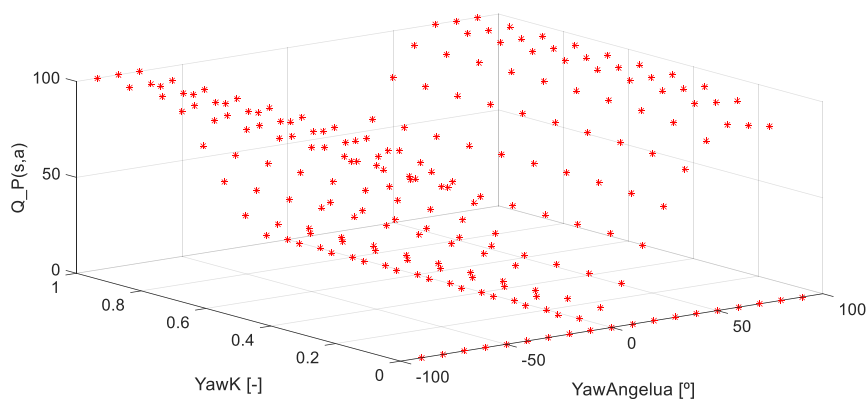
Parametroa	Balioa
HaizeAbiadura [m/s]	7
YawAngelua $^\circ$	-90:10:90
YawK [-]	0:0.1:1

Azkenik, entrenamendu prozesua burutzeko beharrezkoa da egoera bakoitzean aerosorgailuak sortutako potentzia kalkulatzea. Horretarako, 5. Irudia (a)-n aurkeztutako potentzia kurba erabiliko da. Simulazioen exekuzioaren bitartean potentzia kurbaren datuak lortzeko interpolazio-taula bat erabiliko da, ikusi 23. Irudia.



**23. Irudia.** Aerogailuak sortutako potentzia estimatzeko erabilitako interpolazio-taularen egitura

Simulazioak Matlab/Simulink softwarea baliatuz egingo dira, kontsideratutako haize-abiadura, haize-norabide eta YawK [-] ekintza balio guztiekin, ikusi 2. Taula. Azkenean, simulazio guztiak amaituta, 24. Irudian erakutsitako  $Q_P(s,a)$  matrizea lortuko da.  $Q_P(s,a)$  matrizeak honakoa adieraziko du: YawAngelua [°] egoera bakoitzean YawK [-] ekintza bakoitzak aerogailuak lortutako potentzia irabazian duen eragina.



**24. Irudia.** Oinarrizko ML bidezko yaw kontrol estrategiaren  $Q_P(s,a)$  matrizea

24. Irudian ikus daitekeenez, aerogailuak lortutako potentzia irabazia hazi egingo da YawAngelua [°] egoeraren balioa handitu ahala. Egoera honen balio oso handietarako,  $\text{YawAngelua} > 70^\circ$ , irabazia % 100 izango da. Honek adierazten du egoera horretan, yaw kontrola aktibo egon ezean, aerogailuak sortutako potentzia zerora jausiko litzatekela. Ez da hain nabarmena YawK [-] ekintzak aerogailuak lortutako potentzia irabazian duen eragina. Hala ere, garbi ikus daiteke YawK [-] ekintzaren balioa nulua denean, aerogailuak yaw errotazioaren bidez ez duela potentziarik irabaziko. YawK [-] ekintzaren balio handitu ahala,

aerosorgailuak lortutako potentzia irabazia ere hazi egingo da, betiere YawAngelua [°] egoeraren balioa handitzean haziko dena baino hein txikiago batean.

### *ANNren diseinua*

Behin  $Q_P(s,a)$  matrizea lortuta, hau  $Q_P(s(t),a(t))$  funtzio jarrai bezala gordeko da ANN bat erabilita. Aurretik azaldu bezala, matrizeekin lan egin beharrean funtzio jarrai bat edukitzeak abantaila ugari eskaintzen ditu, batez ere kuantifikazioa ekiditeari eta datu kopuru handi eta ez-linealekin lan egiteko aukerari dagokienean. Kasu honetan,  $Q_P(s(t),a(t))$  funtzioa lortzeko erabilitako ANNren topologia 2.4.2 atalean azaldutako MLP-BP sare neuronalak izango da.

Diseinatutako MLP-BP sare neuronalak bi sarrera (Yaw Angelua [°] eta YawK [-]) eta irteera bat ( $Q_P(s(t),a(t))$  [%]) izango ditu. Sarrera eta irteera hauen egitura 25. Irudian dago ikusgai. Era berean, diseinatutako MLP-BPak hiru neurona geruza ditu: Sarrera geruza (2 neuronaz osatutakoa, sarrera bakoitzari bat dagokio), ezkutuko geruza (10 neuronakoa) eta irteerako geruza (neurona bakarrekoa, sare neuronalaren irteerari dagokiona). Azkenik, diseinatutako MLP-BPak ez dauka atzerazko berrelikadurarik eta neurona guztietan kontsideratutako aktibazio-funtzioa tangente hiperbolikoa da.



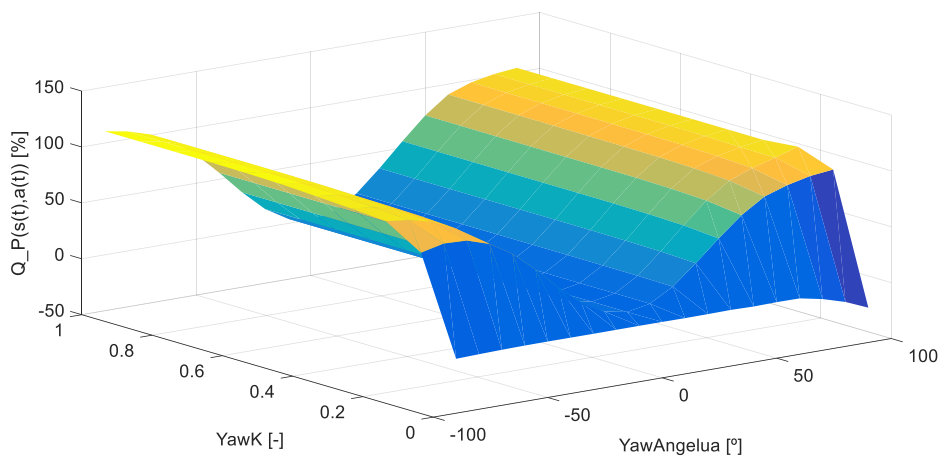
**25. Irudia.**  $Q_P(s,a)$  matrizearen modelizaziorako erabilitako ANNren sarrera eta irteera egitura

Sare neuronalaren entrenamenduari dagokionez, sarea 209 datu multzorekin entrenatu da, aurretik  $Q_P(s,a)$  matrizea osatzen zutenak. Entrenamendu prozesurako datu multzoen banaketa horrela zehaztu da: % 90 entrenamendu faserako, % 5 balioztatze faserako eta % 5 test faserako. Entrenamendurako hautatutako optimizazio algoritmoa gradiente-jaitsiera izan da eta aukeratutako ikasketa-indizea  $\mu = 1 \cdot 10^{-50}$ . Diseinatutako MLP-BP sare neuronalaren egiturari eta entrenamenduari dagozkion parametro esanguratsuenak 3. Taulan jaso dira.

**3. Taula.** Oinarrizko ML bidezko yaw kontrol estrategiaren ANNren diseinurako parametroen definizioa

Parametroa	Balioa
Sarrera neuronak [-]	2
Ezkatuko neuronak [-]	10
Irteera neuronak [-]	1
Ikasketa-ratioa [-]	$1 \cdot 10^{-50}$
Entrenamendu fasea [%]	90
Balioztatze fasea [%]	5
Test fasea [%]	5

Sare neuronalaren entrenamendu prozesu ostean lortutako emaitzei dagokienez, korrelazio-koefizientearen  $r^2=0.9999$  eta Batezbesteko Errore Karratua edo “Mean Squared Error”-aren (MSE)  $2.7825 \cdot 10^{-5}$  balioak eskuratu dira. Korrelazio-koefizientearen balio altuak zein MSE erroreak balio txikiak MLP-BPren entrenamendua arrakastatsua izan dela adierazten dute. YawAngelua [°] egoera eta YawK [-] ekintza bakoitzeko MLP-BP sarearen irteera, hau da,  $Q\_P(s(t),a(t))$  funtzioa, azaltzen da 26. Irudian.



**26. Irudia.** Oinarrizko ML bidezko yaw kontrol estrategiaren  $Q\_P(s(t),a(t))$  funtzioa

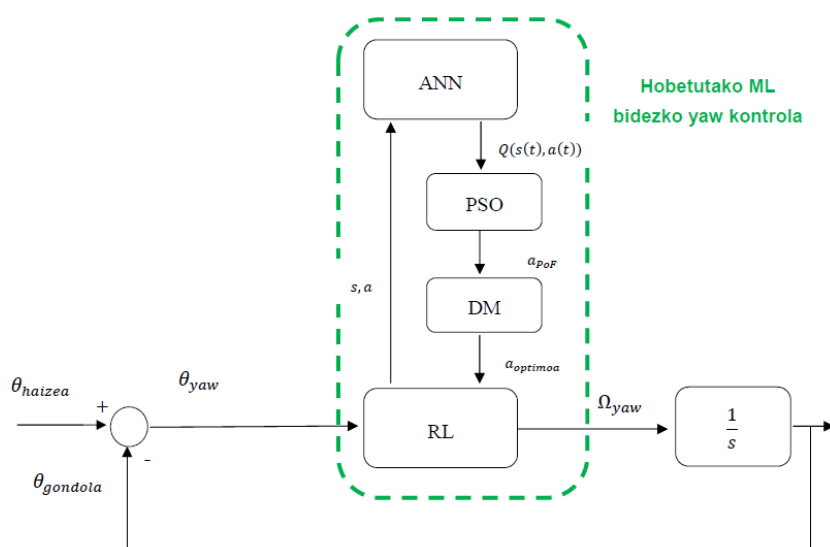
24. Irudian erakutsitako  $Q_P(s, a)$  matrizea eta 26. Irudian erakutsitako  $Q_P(s(t), a(t))$  funtzioa alderatuz gero, bien arteko antzekotasun handia ikusten da, forman zein balioetan. Honek entrenamendu prozesua egokitasuna bermatzen du.

Lortutako  $Q_P(s(t), a(t))$  funtzioa aztertuz gero, ikus daiteke, espero bezala,  $Q_P(s(t), a(t))$  [%] irteeraren balioa handituz doala YawAngelua [°] egoeraren balioa handitu ahala. Hau da, errorearen orientazioaren eta haizearen norabidearen arteko diferentzia zenbat eta handiagoa izan, orduan eta lagungarriagoa izango da yaw kontrola aktibatzea. Era berean, baina hein txikiago batean,  $Q_P(s(t), a(t))$  [%] irteeraren balioa ere handitu egingo da YawK [-] ekintzaren balioa handitu ahala. Honen arabera, zenbat eta azkarrago egin yaw erroretzia, orduan eta murriztagoa izango da errorea eta haizea lerrokatuta ez dauden denbora-tartea eta, ondorioz, potentzia galera.

#### 3.1.2 Hobetutako ML bidezko Yaw Kontrol Estrategia

Atal honetan proposatutako ML bidezko yaw kontrol strategiaren helburua honakoa izango da: 3.1.1 atalean diseinatutako strategiaren prestakuntzak hobetu eta era autonomoan aerosorgailuak sortutako potentzia maximizatuko duen yaw operazio bat lortzea, betiere karga mekanikoak ahalik eta txikienak mantenduta.

Hobetutako ML bidezko yaw kontrol strategiaren oinarritzko elementua ere RL algoritmoa izango da. Algoritmo honek sistemaren egoera, ekintza eta sari guztien arteko mapeoa eginez, ekintza optimoei bideratutako ikasketa-prozesu automatiko bat lortuko du. Kasu honetan ere, ANN baten erabilera aurreikusten da RL algoritmoaren ondorioz lortutako  $Q(s, a)$  matrizeak  $Q(s(t), a(t))$  funtzio jarrai gisa gordetzeko. Aurretiaz 3.1.1 atalean deskribatutako strategiak ez bezala, hobetutako ML bidezko yaw kontrol strategiak bi aldagairen optimizazioa burutuko du: aerosorgailuak sortutako potentzia eta yaw erroretziaren eraginez aerosorgailuaren yaw sistemaren rodamentuan z ardatzarekiko induzitutako karga mekanikoa, hain zuzen ere. Horretarako, PSO eta PoFn oinarritutako optimizazio algoritmo bat eta Erabaki edo “Decision Making” (DM) algoritmo bat erabiliko dira. Proposatutako yaw kontrol sistemaren bloke diagrama sinplifikatu bat 27. Irudian aurkezten da.



**27. Irudia.** Hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategiaren bloke diagrama

27. Irudian ikus daitekeenez, PSO eta PoFn oinarritutako optimizazio algoritmoak RL algoritmoak zehaztutako egoera eta ekintza eta ANNean gordetako  $Q(s(t), a(t))$  funtzioak baliatuko ditu egoera jakin bati dagozkion ekintza optimoak kalkulatzeko. Ekintza optimo hauek PoF osatuko dute. Aurretik 2.4.3 atalean azaldu bezala, PoF bi koste-funtzio kontrajarriren balioak optimizatzen dituen emaitza multzoa da. Azkenik, DM algoritmo batekin PoF osatzen duten ekintza optimo guztien artetik bat aukeratuko da.

#### *RL algoritmoaren egituraketa*

Hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategiaren diseinuari dagokion lehenengo urratsa RL algoritmoaren egitura zehaztea izango da. Aurretik 2.4.1 atalean azaldu bezala, RL algoritmo batek hiru oinarritzko elementu ditu: Egoera, ekintza eta saria. Kasu honetan, sistema ardatz horizontaleko aerosorgailu baten yaw aktuazioa izanik, RL algoritmoaren oinarritzko elementuak aerosorgailuaren operazio honekin lotutako aldagaiekin erlazionatuko dira, betiere lortu nahi den helburua kontuan izanik.

Atal honetan diseinatutako algoritmoan, aurretiaz 3.1.1 atalean deskribatutako RL algoritmoan ez bezala, egoera, ekintza eta sari aldagai bikoitzak kontsideratu dira. Aldagai bikoitzak kontsideratzearen arrazoi nagusiak hurrengoak dira: Aerosorgailuaren operazioaren karakterizazio hobea eta ML bidezko yaw

kontrol estrategiaren funtzionamendu hobea lortzea. Proposatutako RL algoritmoaren oinarritzko elementuak hurrengoak dira:

Egoerak:

- YawAngelua [°]: Aerosorgailuaren errotorearen orientazioaren eta errotorearen sarrerako haizearen norabidearen arteko diferentzia adierazten du, ikusi Ek. (27). Aurretik 2.2 atalean adierazi bezala, zenbat eta handiagoa izan yaw angeluaren balioa, orduan eta handiagoa izango da aerosorgailuaren potentzia galera.
- HaizeAbiadura [m/s]: Aerosorgailuaren operazio-puntua definitzen du. Aurretik 2.1 atalean azaldutakoaren arabera, aerosorgailuak sortutako potentzia kontrol sistemak definitzen du sarrerako haizearen arabera, bien arteko erlazioa ez-lineala izanik. Hori dela eta, haizearen norabidearekin lerrokatuta ez egoteagatik aerosorgailuak galdu dezakeen potentzia ez da berdina haize-abiadura balio guztietarako. Haize-abiadura egoera bezala kontsideratzeak yaw angeluaren efektua aerosorgailuaren edozein operazio-punturako partikularizatzea ahalbidetuko du.

Ekintzak:

- YawK [-]: Aerosorgailuaren yaw errotazio-abiadurari lotutako irabazi proportzionala da. Ekintza honek yaw errotazio-abiaduran duen eragina Ek. (28)-n ikusi daiteke.
- YawMugi [°]: Aerosorgailuaren yaw errotazioa angulu jakin batera mugatzen duen ekintza da, ikusi Ek. (31).

$$\Delta\theta_{yaw} \in [-YawMugi, YawMugi] \quad (31)$$

Epe-motzeko sariak:

- PotentziaIrabazia [%]: Egoera jakin batean (YawAngelua [°] eta HaizeAbiadura [m/s]) kontrol sistemak ekintza jakin bat (YawK [-] eta YawMugi [°]) burutuz gero aerosorgailuak lor dezakeen potentzia irabazia adierazten du. Epe-motzeko sari hau kalkulatzeko adierazpena Ek. (29)-n erakutsitakoa da.
- YawMomentua [N · m]: Egoera jakin batean (YawAngelua [°] eta HaizeAbiadura [m/s]) kontrol sistemak ekintza jakin bat (YawK [-] eta YawMugi [°]) burutuz gero aerosorgailuaren yaw sistemaren





Atal honetan ere, 3.1.1 atalean bezala, RL algoritmoaren entrenamendurako beharrezkoak diren simulazioak NREL 5MW aerosorgailua oinarri hartuta egin dira. Ardatz horizontaleko aerosorgailu honen ezaugarririk garrantzitsuenak 1. Taulan daude ikusgai.

3.1.1 atalean azaldutako RL algoritmoaren entrenamendua aerosorgailuaren potentzia partzialeko eremuari dagokion 7 m/s-ko haize-abiadura eta -90:10:90 [°]-ko yaw angeluaren balioak kontsideratuta burutu da. Kasu honetan, haize-abiaduraren balioa RL algoritmoaren egoera bat izanik (HaizeAbiadura [m/s]) aerosorgailuaren operazio-barruti guztiari dagozkion haize-abiadura konstanteak, hots, 3:2:25 [m/s] erabiliko dira simulazioetarako. Gainera, haize-abiadura bakoitzean -90:10:90 [°]-ko yaw angeluak kontsideratuko dira.

RL algoritmoaren ekintzei dagokienez, YawK [-] eta YawMugi [°] ekintzen hainbat balio erabiliko dira simulazioetan, 0:0.1:1 [-] eta 0:10:90 [°], hurrenez hurren. Horrela, ekintza balio bakoitza egoera bakoitzean simulatuta, ekintzek egoera banatan duten eragina aztertu ahal izango da.

Gainera, hobetutako RL algoritmoaren entrenamenduan, yaw errotazioaren bidez potentzia gutxi irabaziko den kasuetan errotazioa ekiditeko funtzionalitate bat ere gehitu da. Honen arabera, yaw errotazioaren bidez aerosorgailuak irabaziko duen potentzia PotentziaIrabaziMin [%] parametroa baino txikiagoa bada, ez da yaw errotaziorik burutuko. Izan ere, irabaziko litzatekeen potentziak ez ditu eragingo diren karga mekanikoak konpentsatzen.

#### 4. Taula. Hobetutako RL algoritmoaren entrenamendurako definitutako parametroak

Parametroa	Balioa
HaizeAbiadura [m/s]	3:2:25
YawAngelua [°]	-90:10:90
PotentziaIrabaziMin [%]	5
YawK [-]	0:0.1:1
YawMugi [°]	0:10:90

Azkenik, RL algoritmoaren entrenamendua aurrera eraman ahal izateko beharrezkoa da sistemaren egoera eta ekintza bakoitzarekiko epe-motzeko sariak kalkulatu ahal izatea. Horretarako, kasu bakoitzean aerosorgailuak sortutako

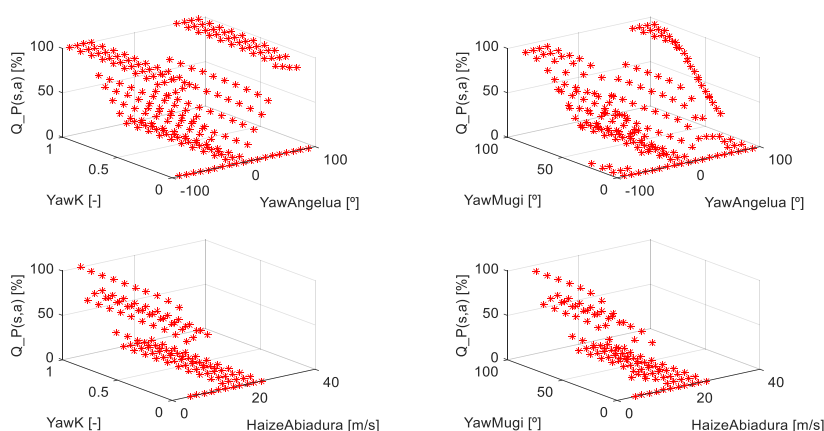
potentzia eta yaw sistemaren rodamentuan z ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa ezagutu behar dira. Aerosorgailuak operazio-puntu desberdinetan sortutako potentzia kalkulatzeko NREL 5MW aerosorgailuaren potentzia kurba erabiliko da, 23. Irudian erakutsi bezala.

Yaw sistemaren rodamentuan z ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa kalkulatu ahal izateko, simulazioak egin dira FAST kodigo aeroelastikoa erabiliz. Horrela, RL algoritmoan kontsideratutako egoera eta ekintza guztiekin simulazioak eginda, ikusi 4. Taula, egoera eta ekintza guztien menpekoea den interpolazio-taula bat lortu ahal izango da, ikusi 29. Irudia. Ondorioz, aerosorgailuaren operazioari lotutako egoera eta ekintzak ezagutuz gero, yaw sistemaren rodamentuan z ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoaren balioa ezagutu daiteke “offline” entrenamendu batean.



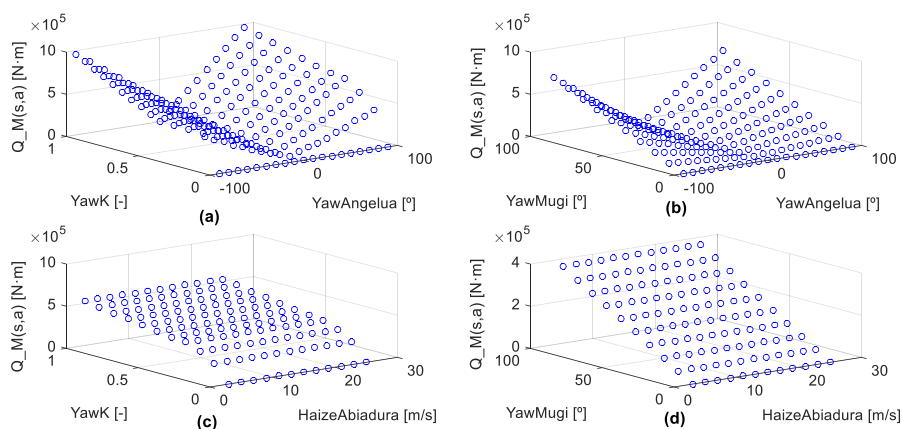
**29. Irudia.** Aerosorgailuaren yaw rodamentuan z ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa estimatzeko interpolazio-taularen egitura

Simulazioak Matlab/Simulink softwarea erabiliz egingo dira. Azkenean, simulazio guztiak amaituta,  $Q_P(s,a)$  eta  $Q_M(s,a)$  matrizeak lortuko dira. Alde batetik,  $Q_P(s,a)$  matrizeak aerosorgailuaren potentzia irabaziari dagokionean ekintza bakoitzak (YawK [-] eta YawMugi [°]) egoera bakoitzean (YawAngelua [°] eta HaizeAbiadura [m/s]) duen eragina adieraziko du. Bestetik,  $Q_M(s,a)$  matrizeak aerosorgailuaren yaw rodamentuan induzitutako karga mekanikoei dagokienean ekintza bakoitzak (YawK [-] eta YawMugi [°]) egoera bakoitzean (YawAngelua [°] eta HaizeAbiadura [m/s]) duen eragina adieraziko du. 30. Irudian eta 31. Irudian  $Q_P(s,a)$  eta  $Q_M(s,a)$  matrizeen kasu adierazgarri batzuk aurkezten dira, hurrenez hurren.



**30. Irudia.**  $Q_P(s,a)$  matrizea (a) HaizeAbiadura=7 m/s YawMugi=90° (b) HaizeAbiadura=7 m/s YawK=0.5 (c) YawAngelua=50° YawMugi=90° (d) YawAngelua=50° YawK=0.5

30. Irudia (a)-n aerosorgailuaren potentzia irabazia YawAngelua [°] egoeraren eta YawK [-] ekintzaren menpe irudikatu da. Ikus daitekeenez, YawAngelua [°] egoeraren balioa handitu ahala, sistemak irabazi dezakeen potentzia ere handitu egingo da. Ondorio hau bat dator 3.1.1 atalean ikusitakoarekin. 30. Irudia (b)-tik zera ondorioztatu daiteke, YawMugi [°] ekintzaren bidez yaw errotazioa mugatuz gero, lortu daitekeen potentzia irabazia ere murriztu egingo da. 30. Irudia (c)-n potentzia irabazia HaizeAbiadura [m/s] egoeraren eta YawK [-] ekintzaren menpe irudikatu da. Bertan antzematen da HaizeAbiadura [m/s] egoeraren balioa handituz gero, potentzia izendatuko eremuan sartuko dela sistema, eta, ondorioz, irabazi daitekeen potentzia txikiagotu egingo dela. YawK [-] ekintzaren eragina ez da hain adierazgarria, baina nabaritzen da hau handitu ahala, potentzia irabaziaren balioa ere handitu egingo dela. Azkenik, 30. Irudia (d)-n ikus daitekeenez, YawMugi [°] ekintzaren bidez yaw errotazioa mugatuz gero, sortutako potentzia irabazia murriztu egingo da HaizeAbiadura [m/s] egoeraren balio txikiatarako. Mugaketa honek ez du eraginik izango HaizeAbiadura [m/s] egoeraren balio handiekin.



**31. Irudia.**  $Q_M(s,a)$  matrizea (a) HaizeAbiadura=7 m/s YawMugi=90° (b) HaizeAbiadura=7 m/s YawK=0.5 (c) YawAngelua=50° YawMugi=90° (d) YawAngelua=50° YawK=0.5

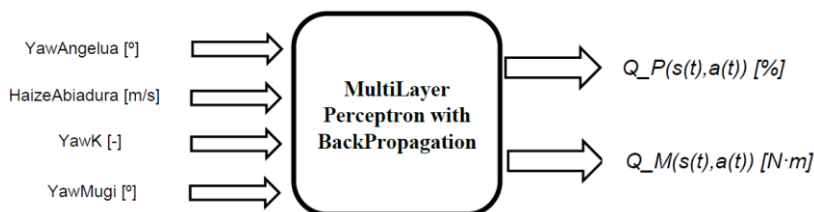
31. Irudia (a)-n momentu mekanikoa irudikatu da YawAngelua [°] egoeraren eta YawK [-] ekintzaren menpe. Antzeman daitekeenez, egoeraren zein ekintzaren balioa handituz gero, yaw sistemaren rodamentuan eragindako karga mekanikoa ere handitu egingo da. 31. Irudia (b)-n zera ikusten da: YawMugi [°] ekintzaren bidez yaw errotazioa mugatuz gero, rodamentuan eragindako karga mekanikoa ere mugatu egingo dira. Azkenik, 31. Irudia (c)-n eta 31. Irudia (d)-n momentu mekanikoa HaizeAbiadura [m/s] egoeraren eta YawK [-] eta YawMugi [-] ekintzen menpe irudikatu da, hurrenez hurren. Hauen arabera, HaizeAbiadura [m/s] egoerak momentu mekanikoa duen eragina txikia da, baina YawK [-] eta YawMugi [-] ekintzak handituz gero, eragindako karga mekanikoen balioa handitu egingo da.

### ANNren diseinua

3.1.1 atalean egin bezala, behin  $Q_P(s,a)$  eta  $Q_M(s,a)$  matrizeak kalkulatu, hauek  $Q_P(s(t),a(t))$  eta  $Q_M(s(t),a(t))$  funtzio jarri bezala gordeko dira ANN bat erabiliz. Atal honetan ere,  $Q_P(s(t),a(t))$  eta  $Q_M(s(t),a(t))$  funtzioak lortzeko erabilitako sare neuronalaren topologia 2.4.2 atalean azaldutako MLP-BP izango da.

Diseinatutako MLP-BP sare neuronalak lau sarrera (Yaw Angelua [°], HaizeAbiadura [m/s], YawK [-] eta YawMugi [°]) eta bi irteera ( $Q_P(s(t),a(t))$  [%] eta  $Q_M(s(t),a(t))$  [N·m]) izango ditu. Sarrera eta irteera hauen egitura 32. Irudian dago ikusgai. Gainera, diseinatutako MLP-BPak lau neurona geruza izango

ditu: Sarrera geruza (4 neuronaz osatutakoa, bat sarrera bakoitzeko), ezkutuko 2 geruza (lehen 75 neuronakoa eta bigarrena 25 neuronakoa) eta irteera geruza bat (2 neuronaz osatutakoa, bat irteera bakoitzeko). Azkenik, diseinatutako MLP-BPak ez dauka atzerazko berrelikadurarik eta neurona guztietan kontsideratutako aktibazio-funtzioa tangente hiperbolikoa da.



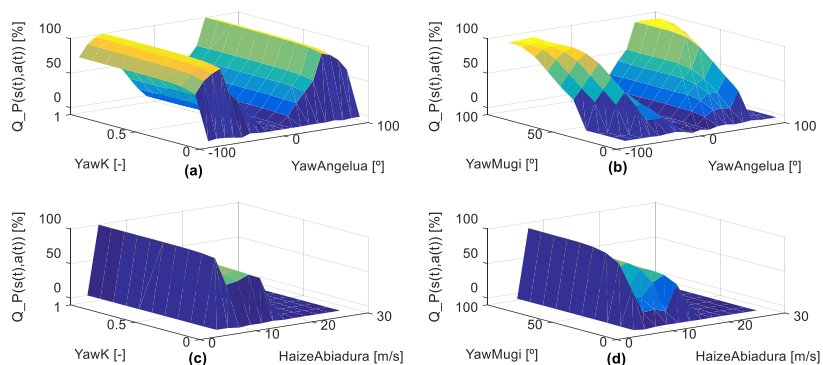
**32. Irudia.**  $Q_P(s,a)$  eta  $Q_M(s,a)$  matrizeen modelizaziorako erabilitako ANNren sarrera eta irteera egitura

MLP-BP sarearen entrenamenduari dagokionez, 2508 datu multzorekin entrenatu da sarea, aurretik  $Q_P(s,a)$  eta  $Q_M(s,a)$  matrizeak osatzen zituztenak. Entrenamendu prozesurako datu multzoen banaketa horrela zehaztu da: % 90 entrenamendu faserako, % 5 balioztatze faserako eta % 5 test faserako. Entrenamendurako hautatutako optimizazio algoritmoa gradiente-jaitsiera izan da eta aukeratutako ikasketa-indizea  $\mu = 1 \cdot 10^{-50}$ . Diseinatutako MLP-BP sare neuronalaren egiturari eta entrenamenduari dagozkion parametro esanguratsuenak 5. Taulan jaso dira.

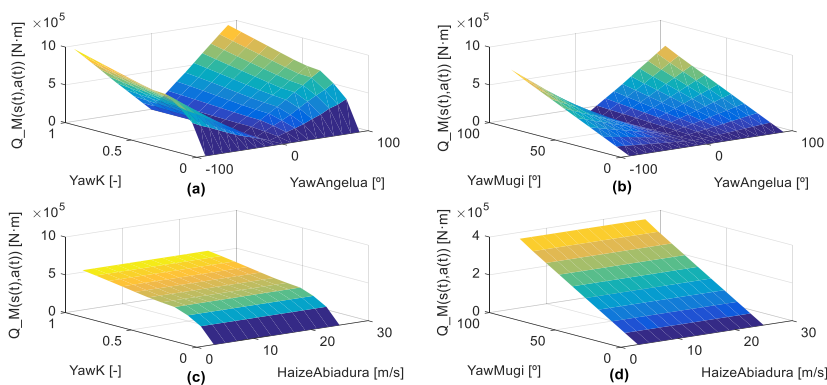
**5. Taula.** Hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategiaren ANNren diseinurako parametroen definizioa

Parametroa	Balioa
Sarrera neuronak [-]	4
Ezkutuko neuronak [-]	[75 25]
Irteera neuronak [-]	2
Ikasketa-ratioa [-]	$1 \cdot 10^{-50}$
Entrenamendu fasea [%]	90
Balioztatze fasea [%]	5
Test fasea [%]	5

Sarearen entrenamendu prozesu ostean lortutako emaitzei dagokienez, korrelazio-koefizientearen  $r^2=0.9999$  eta MSE errorearen  $1.62 \cdot 10^{-6}$  balioek MLP-BParen entrenamendua egokia izan dela adierazten dute. 33. Irudian eta 34. Irudian RL algoritmoaren hainbat egoera eta ekintza aintzat hartuta MLP-BP sarearen irteerak, hau da,  $Q\_P(s(t),a(t))$  eta  $Q\_M(s(t),a(t))$  funtzioak, azaltzen dira.



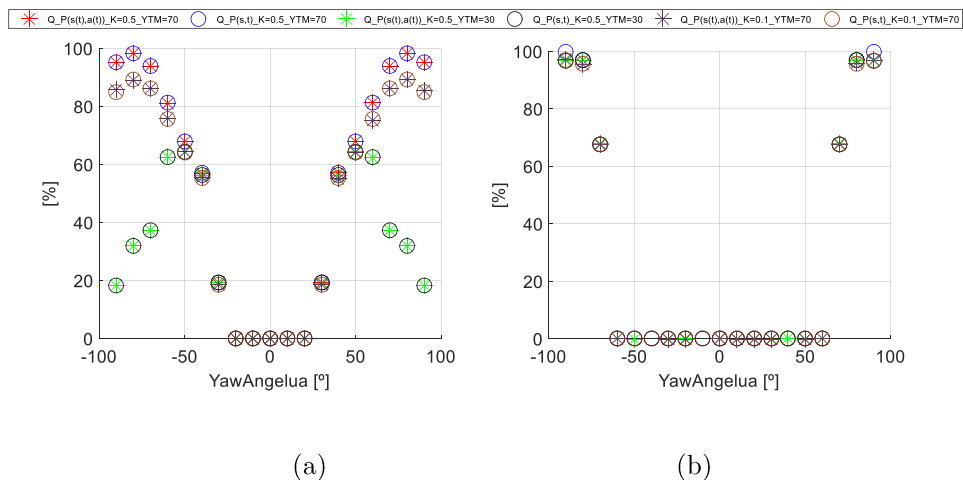
**33. Irudia.** Hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategiaren  $Q\_P(s(t),a(t))$  funtzioa (a) HaizeAbiadura=7 m/s YawMugi=90° (b) HaizeAbiadura=7 m/s YawK=0.5 (c) YawAngelua=50° YawMugi=90° (d) YawAngelua=50° YawK=0.5



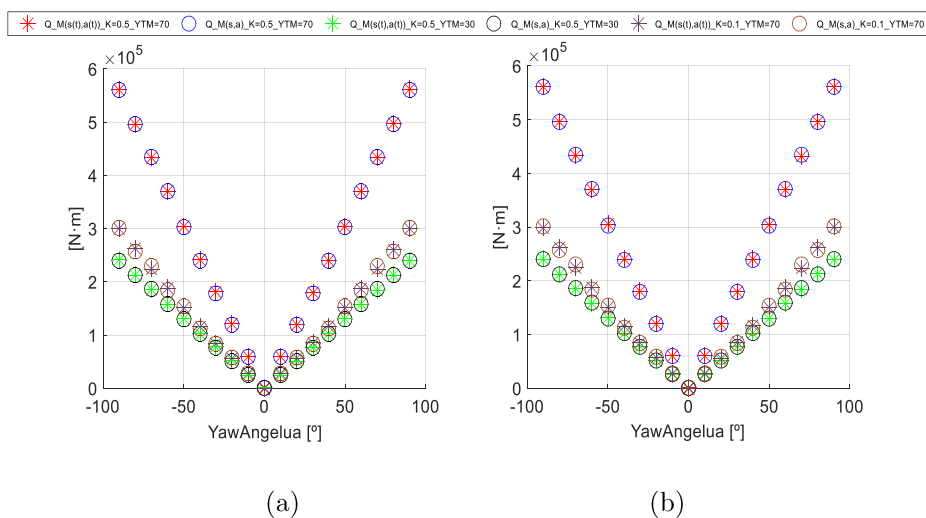
**34. Irudia.** Hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategiaren  $Q\_M(s(t),a(t))$  funtzioa (a) HaizeAbiadura=7 m/s YawMugi=90° (b) HaizeAbiadura=7 m/s YawK=0.5 (c) YawAngelua=50° YawMugi=90° (d) YawAngelua=50° YawK=0.5

30. Irudian eta 31. Irudian aurkeztutako  $Q_P(s,a)$  eta  $Q_M(s,a)$  matrizeak eta 33. Irudian eta 34. Irudian aurkeztutako  $Q_P(s(t),a(t))$  eta  $Q_M(s(t),a(t))$  funtzioak konparatuz gero, bien arteko antzekotasun handia ikusten da, forman zein balioetan. Honek entrenamendu prozesua egokia izan dela adierazten du.

Diseinu prozesu zehatzago bat egiteko, bi kasu desberdin garatuko dira hemendik aurrera. Kasu hauek bi HaizeAbiadura [m/s] egoera, bi YawK [-] ekintza eta bi YawMugi [°] ekintza desberdin irudikatuko dituzte. Lehenengo eta behin, egoera eta ekintza guzti hauek osatutako kasuetan  $Q_P(s,a)$  eta  $Q_M(s,a)$  matrizeen eta  $Q_P(s(t),a(t))$  eta  $Q_M(s(t),a(t))$  funtzioen arteko korrespondentzia egiaztatuko da. Horretarako, aerosorgailuak yaw kontrolaren bidez lor dezakeen potentzia irabazia eta yaw kontrolaren eraginez yaw sistemaren rodamentuan z ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa aurkezten dira 35. Irudian eta 36. Irudian, hurrenez hurren. 35. Irudian eta 36. Irudian aurkeztutako balioen arteko antzekotasun handiak entrenamendu prozesua egokia izan dela adierazten du, aurretiaz kalkulaturako korrelazio-koefizienteak eta MSE erroreak iragarri bezala. Ondorioz, lortutako  $Q_P(s(t),a(t))$  eta  $Q_M(s(t),a(t))$  funtzioak proposatutako ML bidezko yaw kontrol estrategian erabilgarritzat jo daitezke.



**35. Irudia.** Hobetutako ML bidezko yaw kontrol strategiaren  $Q_P(s(t),a(t))$  funtzioa (a) HaizeAbiadura=11 m/s (b) HaizeAbiadura=21 m/s



**36. Irudia.** Hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategiaren  $Q_M(s(t), a(t))$  funtzioa (a) HaizeAbiadura=11 m/s (b) HaizeAbiadura=21 m/s

Aerosorgailuak yaw kontrolaren bidez lor dezakeen potentzia irabaziari dagokionez, 35. Irudian honako hau ikus daiteke: HaizeAbiadura [m/s] egoeraren balio txikienerako (35. Irudia (a)) YawAngelua [°] egoeraren balioa handitu ahala, sistemak irabazi dezakeen potentzia hazi egiten da; hau da,  $Q_P(s(t), a(t))$ -ren balioa hazi egiten da. Oстера, HaizeAbiadura [m/s] egoeraren balio handienerako (35. Irudia (b)) YawAngelua [°] egoeraren balio oso handia denean baino ez da potentzia irabazten. Hau da, nahiz eta YawAngelua [°] egoeraren balio handitu,  $Q_P(s(t), a(t))$  funtzioaren balioa txikia izango da, lehenengoaren balioa nabarmen hazi arte.

YawK [-] eta YawMugi [°] ekintzen eraginari dagokionez, ekintzen balioak handitu ahala, lortutako potentzia irabazia ere hazi egingo da. Hau batez ere HaizeAbiadura [m/s] egoeraren balio txikienean antzematen da, hots, 35. Irudia (a)-n.

Yaw kontrolaren eraginez yaw sistemaren rodamentuan z ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoari dagokionez, zera ikusten da 36. Irudian: HaizeAbiadura [m/s] egoerak ez dauka eragin handirik momentu mekanikoaren balioan. Oстера, YawAngelua [°] egoeraren edota YawK [-] eta YawMugi [°] ekintzen balioa handituz gero, rodamentuan eragindako kargak mekanikoak ere hazi egingo dira.



**PSO eta PoF bidezko optimizazio algoritmoaren diseinua**

Behin  $Q_P(s(t), a(t))$  eta  $Q_M(s(t), a(t))$  funtzioak lortuta, PSO eta PoFn oinarritutako optimizazio algoritmoa diseinatuko da. Optimizazio algoritmo honen helburua aerosorgailuaren operazio-puntu bakoitzerako yaw ekintza optimo multzoa kalkulatzeko da. Proposatutako PSO eta PoFn oinarritutako optimizazio algoritmoaren pseudokodea 4. Algoritmoan dago ikusgai.

**4. Algoritmoa.** PSO eta PoFn oinarritutako optimizazio algoritmoaren pseudokodea

---

**PSO eta PoF optimizazio algoritmoa**

---

```
% Hasiarako populazioa eta parametroak definitu
Phi_1_max=Phi_1_max
Phi_2_max=Phi_2_max
H_max = H_max
P=P
n=n
x=x_ini(2,P)
y=RN(x)
% Hasi PSO algoritmoa
while (iter<n) do
  for 1:1:P
    % Populazioa ebaluatu
    y=RN(x)
    % PoFn sartu edo ez ebaluatu
    if y(1)<y1_global && y(2)<y2_global
      y_PoF=RN(x_ant)
      PoF=[PoF,y_PoF]
      x_PoF=[x_PoF,x_ant]
    end
    % Populazio berria sortu
    v=rand(0, H_max) * v+rand(0, Phi_1_max) * (x_opt-x)+ +rand(0,
Phi_2_max) * (x_global-x)
    x=x+v
  end
end
```

---

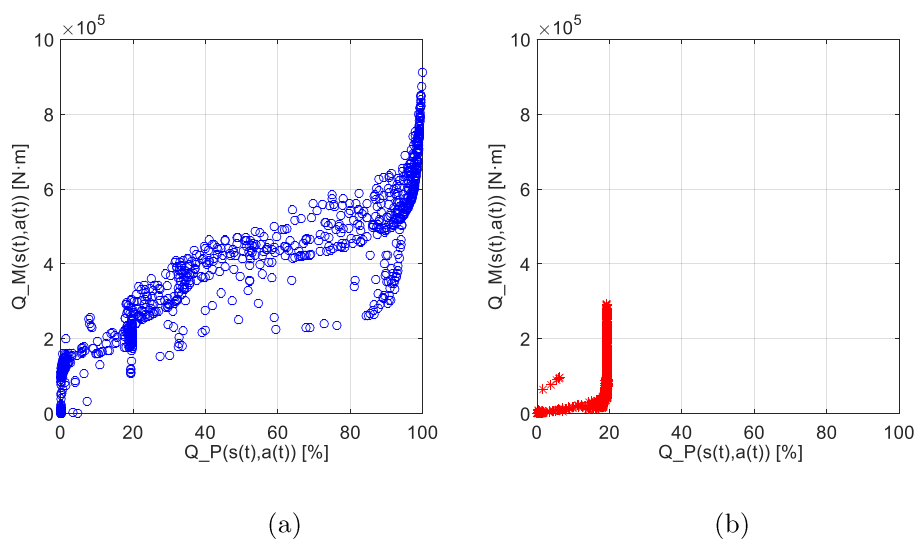
4. Algoritmoan aurkeztutako optimizazio algoritmoaren funtzionamendu egokia lortzeko definitutako parametroak 6. Taulan zerrendatu dira.

**6. Taula.** PSO eta PoFn oinarritutako optimizazio algoritmoaren parametroen definizioa

Parametroa	Sinboloa	Balioa
Populazioa	P	1000
Iterazioak	n	30
Esplorazio-faktore maximoa [-]	$\Phi_{1\_max}$	1.5
Esplotazio-faktore maximoa [-]	$\Phi_{2\_max}$	0.1
Inertzia maximoa	$H_{max}$	0.5

Diseinatutako PSO eta PoFn oinarritutako optimizazio algoritmoaren funtzionamendu egokia egiaztatzeko, algoritmoaren jardura analizatuko da. Horretarako, aurretik aurkeztutako egoeretako bi (HaizeAbiadura=11 m/s, YawAngelua=90° eta HaizeAbiadura=11 m/s, YawAngelua=30°) baliatuko dira.

Lehenik eta behin, operazio-puntu bakoitzean PSO optimizazio algoritmoaren ibilbidea adierazten da 37. Irudian.

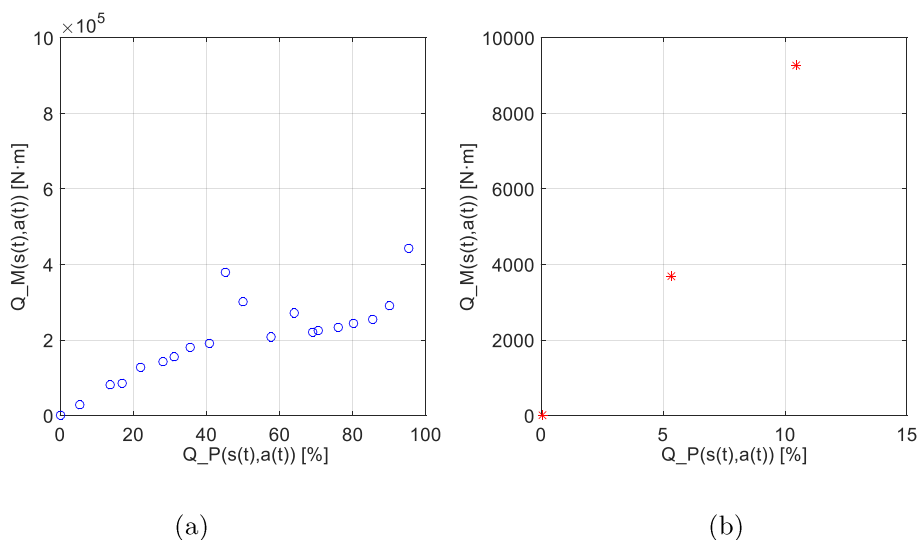


**37. Irudia.** PSO eta PoFn oinarritutako optimizazio algoritmoa (a) HaizeAbiadura=11 m/s, YawAngelua=90° (b) HaizeAbiadura=11 m/s, YawAngelua=30°

37. Irudian aurkeztutako bi grafikak zehatz-mehatz aztertuz gero, bien arteko antzekotasun eta desberdintasunak ikus daitezke. Alde batetik, 37. Irudia (a)-n zein 37. Irudia (b)-n PoF baten erabilera justifikatzen duen joera antzeman daiteke, hots, bi kasuetan ikusten da  $Q\_P(s(t),a(t))$  funtzioaren balioa handituz gero,  $Q\_M(s(t),a(t))$  funtzioaren balioa ere handitu egiten dela. Era berean,  $Q\_M(s(t),a(t))$  funtzioaren balioa murrizteak  $Q\_P(s(t),a(t))$  funtzioaren balioa ere txikitzea dakar.

Bestalde, 37. Irudia (a)-n eta 37. Irudia (b)-n aurkeztutako grafikek desberdintasun handiak erakusten dituzte optimizatu nahi diren koste-funtzioen balioei dagokienez. Esaterako, 37. Irudia (a)-n erakutsitako grafikan lor daitekeen potentzia irabazia % 100ra iristen da. 37. Irudia (b)-n, ordea, lor daitekeen potentzia irabazi maximoa % 15 ingurukoa da.

Proposatutako optimizazio algoritmoaren irteerako PoF 38. Irudian dago ikusgai. PoF hau osatzeko, optimizazio algoritmoak potentzia irabazi posiblea % 5ko tartetan banatu eta tarte bakoitzean momentu mekaniko txikiena eragiten duen eta potentzia irabazi maximoa lortarazten duen soluzioa aukeratzen du.



**38. Irudia.** PSO eta PoFn oinarritutako optimizazio algoritmoaren PoF (a) HaizeAbiadura=11 m/s, YawAngelua=90° (b) HaizeAbiadura=11 m/s, YawAngelua=30°

***DM algoritmoaren diseinua***

Azkenik, PSO eta PoFn oinarritutako optimizazio algoritmoaren irteera den eta yaw ekintza optimoen multzoa adierazten duen PoFtik yaw ekintza optimo bakarra aukeratu beharra dago. Ekintza hau yaw kontrol sistemaren erreferentzia bilakatuko da. Horretarako, DM algoritmo bat diseinatuko da.

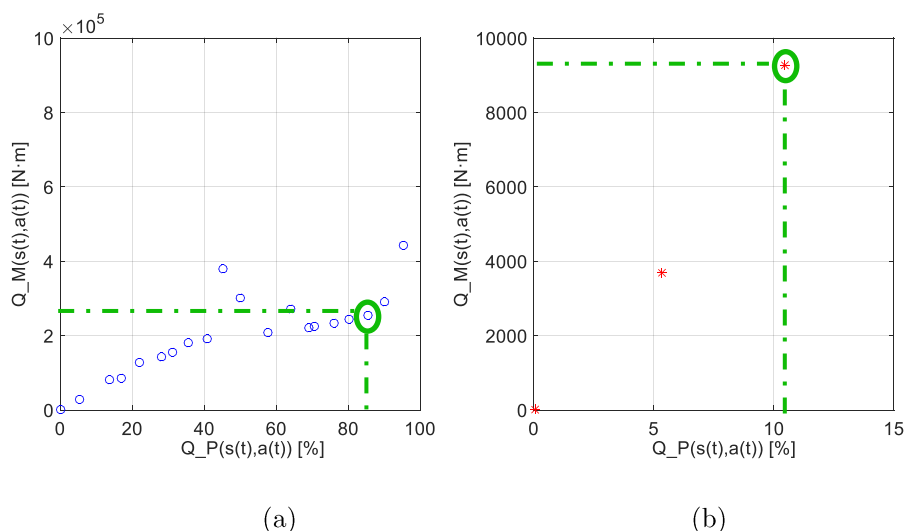
Diseinuari dagokionez, egitura eta konplexutasun maila askotako DM algoritmoak garatu ahalko liriteke. Atal honetan proposatutako ML bidezko yaw kontrol estrategian, DM algoritmo simple bat diseinatu da. Honen arabera, yaw sistemaren rodamentuan z ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa balio maximo batera mugatuz, potentzia irabazia maximizatzen duen yaw ekintza aukeratu da. Hortaz, proposatutako DM algoritmoaren jarduera hurrengo bi puntuetan laburbildu daiteke:

- Momentu mekaniko maximoa gainditzen ez duten yaw ekintzak bilatu.
- Yaw ekintza hauetatik potentzia irabazi handiena ekarriko duena aukeratu.

Proposatutako DM algoritmoaren parametrizazioa 7. Taulan ikus daiteke. Era berean, aurretiaz aurkeztutako aerosorgailuaren egoeretan DM algoritmoak egindako ekintza optimoaren aukeraketa erakusten da 39. Irudian.

**7. Taula.** Hobetutako ML bidezko yaw kontrol strategiaren DM algoritmoaren parametro definizioa

<b>Parametroa</b>	<b>Balioa</b>
Momentu mekaniko maximoa [N · m]	$2.5 \cdot 10^5$



**39. Irudia.** DM algoritmoak hautatutako ekintza optimoa (a) HaizeAbiadura=11 m/s, YawAngelua=90° (b) HaizeAbiadura=11 m/s, YawAngelua=30°

### 3.2 FLUXU KONTROLA AEROSORGAILUEN PALETAN

Ikerkuntza lan honetan, fluxu kontrol pasiboak ardatz horizontaleko aerosorgailu baten operazioan eta urteko potentzia sorkuntzan duen eragina aztertu da. Era berean, AI teknikak erabiliz fluxu kontrol gailu pasibo jakin baten jarduera aktibo bihurtuz, honek ardatz horizontaleko aerosorgailu batean izan dezakeen eragina hobetzea ere bilatu da.

Atal honetan aurkeztutako simulazio emaitza guztiak NREL 5MW aerosorgailua kontsideratuz lortu dira. Gainera, aerosorgailuaren jarduera aerodinamiko aztertze erabilitako tresna BEM kodea izan da. Azkenik, fluxu kontrol estrategia aktiboan erabilitako AI teknikak ANN bat eta optimizazio algoritmo bat izan dira.

Atal honek hurrengo egitura aurkeztuko du: Fluxu kontrol gailu pasiboek NREL 5MW aerosorgailuaren operazioan eta AEPn duten eragina aztertze prozeduraren oinarriak 3.2.1 atalean azalduko dira. AI teknikak darabiltzan GFetan oinarritutako fluxu kontrol estrategia aktiboaren diseinu prozedura 3.2.2 atalean azalduko da.

### 3.2.1 Fluxu Kontrol Pasiboa

Atal honetan fluxu kontrol estrategia pasibo baten diseinu prozedura aurkeztuko da, bere helburua ardatz horizontaleko aerosorgailu baten operazioa hobetzea izanik. Era berean, proposatutako fluxu kontrol estrategia pasiboak ardatz horizontaleko aerosorgailuaren AEPn duen eragina ere aztertuko da.

#### *Fluxu kontrol estrategia*

Diseinu prozesuaren lehen urratsa analisirako erabiliko den aerosorgailua hautatzea izango da. Aurretiaz adierazi bezala, analisia NREL 5MW ardatz horizontaleko aerosorgailua kontsideratuta egingo da. Aerosorgailu honen palen egitura eta estazio bakoitzean erabilitako profil aerodinamikoa 8. Taulan ikus daitezke.

Hurrengo urratsa aerosorgailuaren paletan instalatuko diren fluxu kontrol gailuen diseinua izango da. 2.3 atalean aurkeztutako literatura azterketaren arabera, fluxu kontrol gailu pasiboen funtzionamendu egoki bat lortzeko beharrezkoa da hauen forma eta kokapen egokia zehaztea. Hau egin ezean, eragin nulu edo kontrajarri bat lor daiteke.

Arazo honen aurrean, fluxu kontrol gailuen konfigurazio desberdinekin lan egitea da aukeretako bat. Horretarako, aerosorgailuaren jarduera aerodinamikoa hobetu dezaketela uste den hasierako konfigurazio multzo bat hautatu eta bakoitzaren eragina aztertuko da. Lortutako emaitzak hobetu daitezkeela uste bada, orduan konfigurazio hauen gainean aldaketa txikiak sartuko dira eta berriro ere analizatu. Prozesu hau errepikatu egingo da, ardatz horizontaleko aerosorgailuaren aerodinamika nahi beste hobetzen duen fluxu kontrol gailuen konfigurazioa aurkitu arte. Esaterako, Fernandez-Gamiz et al. [79]-en lanean fluxu kontrol gailu pasiboetan oinarritutako 25 konfigurazio desberdin diseinatu eta aztertzen dira. Azkenean, 25 konfigurazioetatik aerosorgailuaren aerodinamika gehien hobetzen duena identifikatzen da.

## 8. Taula. NREL 5MW aerosorgailuaren palen sekzio banaketa

Estazio zenbakia	r [m]	Profil aerodinamiko mota
1	2.8667	Cylinder1
2	5.6000	Cylinder1
3	8.3333	Cylinder2
4	11.7500	DU40
5	15.8500	DU35
6	19.9500	DU35
7	24.0500	DU97W300
8	28.1500	DU91W(2)250
9	32.2500	DU91W(2)250
10	36.3500	DU93W210
11	40.4500	DU93W210
12	44.5500	NACA64XX
13	48.6500	NACA64XX
14	52.7500	NACA64XX
15	56.1667	NACA64XX
16	58.9000	NACA64XX
17	61.6333	NACA64XX

Atal honetan, Fernandez-Gamiz et al. [79]-en lanean konfigurazio onentzat identifikatu den fluxu kontrol pasibo estrategia erabiliko da analisirako. Hautatutako fluxu kontrol gailu pasiboen konfigurazio hau NREL 5MW aerosorgailuaren paletan inplementatutako VG eta GFn arteko nahasketa batean datza:

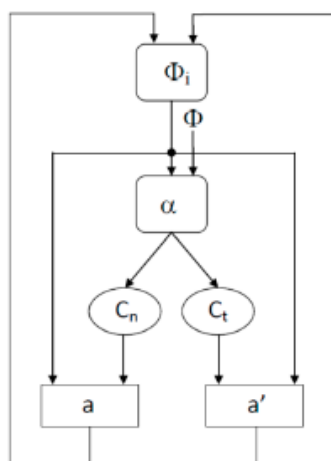
- Palaren 7. estazioan, ikusi 8. Taula, VGak instalatu dira, eraso-ertzetik neurtzen hasita, profilaren kordaren luzeraren % 30ko distantziara. Estazio honetan ez da GFik instalatu.
- Palaren 8. eta 9. estazioetan VGak instalatu dira, eraso-ertzetik neurtzen hasita, profilaren kordaren luzeraren % 20ko distantziara. Gainera,

profilaren kordaren luzeraren % 2ko altuera duten GFak instalatu dira profilaren irteera-ertzean.

- Palaren 10. eta 11. estazioetan VGak instalatu dira, eraso-ertzetik neurtzen hasita, profilaren kordaren luzeraren % 60ko distantziara. Estazio honetan ez da GFik instalatu.

### *BEM algoritmo bidezko azterketa aerodinamikoa*

Hautatutako fluxu kontrol gailu pasibo konfigurazioak NREL 5MW aerosorgailuan duen eragina aztertzeko, aurretik 1.4 atalean aurkeztutako BEM kodea erabiliko da. Kode honek ardatz horizontaleko aerosorgailuen jarduera aerodinamikoa zehatz eta konputazionalki erraza den eran aztertzeko aukera ematen du. BEM algoritmoa egitura iteratibo batean programatzen da eta bere oinarria ekuazioak dira, aerosorgailuaren paletan gertatzen diren fenomeno aerodinamikoak modelizatzen dituztenak. 40. Irudian BEM algoritmoaren fluxu-diagrama bat aurkezten da.



40. Irudia. BEM algoritmoaren fluxu-diagrama [79]

BEM algoritmoa osatzen duten ekuazioak ebatzi eta hautatutako fluxu kontrol estrategia pasiboaren azterketa egin ahal izateko, beharrezkoa da aurretiaz ezagutzea aerosorgailuaren palari dagozkion koefiziente aerodinamikoak ( $C_L$  [-] eta  $C_D$  [-]). Gainera, fluxu kontrol gailuen implementazioak aerosorgailuaren palen jarduera aerodinamikoa aldatuko duenez, aztertu nahi den fluxu kontrol gailu konfigurazio kasu bakoitzari dagozkion koefiziente aerodinamikoak ere ezagutu



beharra dago. Koefiziente aerodinamiko hauen kalkulurako CFD bidezko simulazioak edota haize-tuneletan egindako lan esperimentalak erabil daitezke. Analisi honetan, Timmer et al. [190]-en lanean azaldutako koefiziente aerodinamikoak erabili dira, haize-tunelean lorturikoak, hain zuzen ere.

Behin koefiziente aerodinamikoak ezagututa, BEM algoritmoa ebazteko prozedura hurrengoa litzateke:

- 1) Indukzio-faktore axial eta tangenzialaren hasierako balioa zehaztea.
- 2) Fluxu-angeluaren kalkulua, ikusi Ek. (33).

$$\Phi = \text{atan} \left( \frac{(1 - a) \cdot V_{haizea}}{(1 + a') \cdot w \cdot r} \right) \quad (33)$$

- 3) Eraso-angeluaren kalkulua, ikusi Ek. (34).

$$\alpha = \Phi - (\beta + \beta_{twist}) \quad (34)$$

- 4) Euste- eta arraste-koefizienteen irakurketa, ikusi Ek. (35) eta Ek. (36).

$$C_L = f(\alpha) \quad (35)$$

$$C_D = f(\alpha) \quad (36)$$

- 5) Karga-koefiziente normal eta tangenzialaren kalkulua, ikusi Ek. (37) eta Ek. (38).

$$C_n = C_L \cdot \cos(\Phi) + C_D \cdot \sin(\Phi) \quad (37)$$

$$C_t = C_L \cdot \sin(\Phi) + C_D \cdot \cos(\Phi) \quad (38)$$

- 6) Indukzio-faktore axial eta tangenzialaren kalkulua, Ek. (39) eta Ek. (40).

$$a = \frac{1}{\frac{4 \cdot \sin^2(\Phi)}{\frac{B \cdot c}{2\pi \cdot r} \cdot C_t} + 1} \quad (39)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \cdot \sin(\Phi) \cdot \cos(\Phi)}{\frac{B \cdot c}{2\pi \cdot r} \cdot C_t} - 1} \quad (40)$$

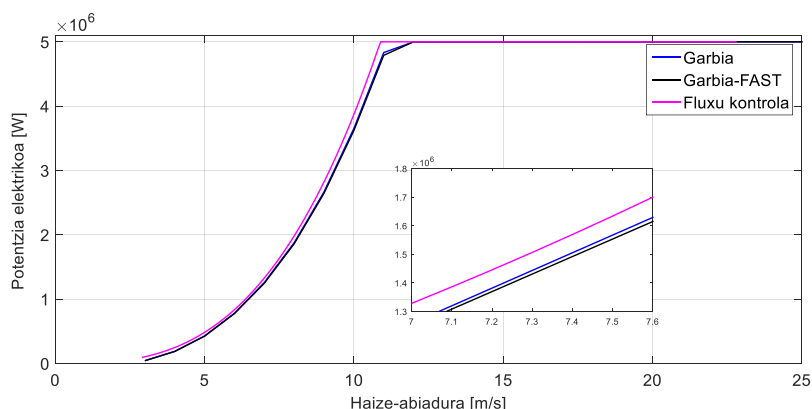
- 7) Indukzio-faktore axial eta tangentialaren konbergentziaren ebaluazioa.
- 8) Konbergentzia egonez gero, aerosorgailuak sortutako potentzia (P), Ek. (41), errotorean sortutako “thrust” indarra (T), Ek. (42), eta palen erroan eragindako momentu flektatzailea edo “Bending Moment”-a (BM), Ek. (43), kalkulatu dira.

$$P = \int_{i=0}^R 4\pi \cdot r_i^3 \cdot \rho \cdot V_0 \cdot w^2 \cdot a'_i \cdot (1 - a_i) \cdot F \cdot dr_i \quad (41)$$

$$T = \int_{i=0}^R 4\pi \cdot r_i \cdot \rho \cdot (V_0)^2 \cdot w \cdot a_i \cdot (1 - a_i) \cdot F \cdot dr_i \quad (42)$$

$$BM = \int_{i=0}^R 4\pi \cdot r_i^2 \cdot \rho \cdot (V_0)^2 \cdot w \cdot a_i \cdot (1 - a_i) \cdot F \cdot dr_i \quad (43)$$

BEM algoritmoa ebatzian aerosorgailuaren operazio-barruti guztia osatzen duten haize-abiadura balioak erabiliz gero, haize-abiaduraren balio guztietarako emaitzak lortu dira. Ondorioz, haize-abiadurarekiko independenteak diren ondorioak ere lortu ahal izango dira. Izan ere, 2.1 atalean azaldu bezala, aerosorgailuaren kontrol sistema dela eta, haize-abiaduraren eta sistemak sortutako potentziaren arteko erlazioa ez da lineala. 41. Irudian fluxu kontrol gailuen aplikazioarekin eta aplikaziorik gabe NREL 5MW aerosorgailuaren potentzia kurba dago ikusgai.



#### 41. Irudia. Fluxu kontrol pasiboa. Potentzia kurben arteko konparaketa.

41. Irudian ikus daitekeenaren arabera, fluxu kontrol gailu pasiboak erabiliz potentzia partzialeko eremuan aerosorgailuaren potentzia kurba hobetzea lortzen da. Honek zera esan nahi du: Potentzia partzialeko eremuan, aerosorgailuak sortutako potentzia handitu egingo da fluxu kontrol pasiboa erabilita. Potentzia izendatuko eremuan, berriz, aerosorgailuak sortutako potentzia mantendu egingo da kontrol sistemaren eraginez. Fluxu kontrol gailu pasiboen bidez lortutako potentzia kurbaren hobekuntza hau oso garrantzitsua izango da, izan ere, urtean zehar aerosorgailuak energia gehiago sortzeko gaitasuna izango du.

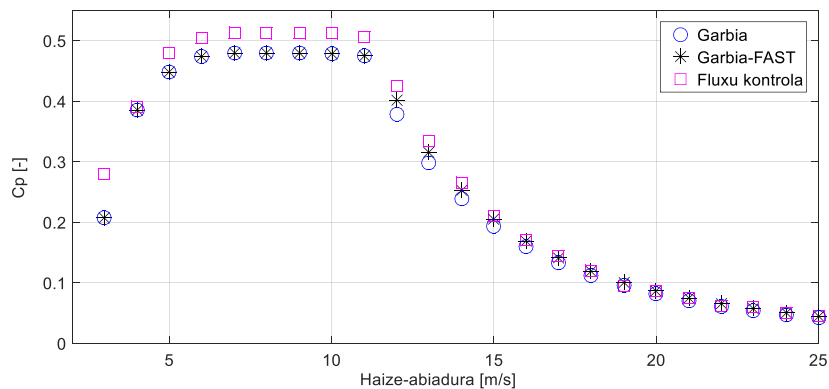
Gainera, BEM kalkuluen baliozkotasuna baieztatzeko asmoz, pala garbiarekin (fluxu kontrol gailurik gabe) lortutako emaitzak Jonkman et al. [10]-en lanean aurkeztutako balioekin alderatu dira, ikusi 41. Irudia. Bertan antzematen denez, BEM analisi bidez lortutako emaitzek eta FAST bidez irudikatutako NREL 5MW aerosorgailuaren potentzia kurbak elkarrekikotasun handia dute. Honek BEM kodea erabiliz lortutako emaitzak egokiak direla baieztatzen du.

Era berean, sortutako potentzia erabiliz, palen jarduera aerodinamikoari buruzko informazioa ematen duen  $C_p$  [-] potentzia koefizientea kalkulatu daiteke, ikusi Ek. (44).

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3} \quad [-] \quad (44)$$

non  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] airearen dentsitatea,  $P$  [W] aerosorgailuak sortutako potentzia,  $A$  [m<sup>2</sup>] aerosorgailuaren errotoreak hartzen duen azalera eta  $v$  [m/s] errotorearen sarrerako haize-abiadura diren.

$C_p$  [-] potentzia koefizientea aerosorgailuaren operazio-barruti guztia osatzen duten haize-abiadura balioak erabiliz kalkulatuz gero, 42. Irudian erakusten den grafika lortuko da.



#### 42. Irudia. Fluxu kontrol pasiboa. $C_p$ [-] potentzia faktoreen arteko konparaketa

42. Irudian ikus daitekeenez, fluxu kontrol gailu pasiboak erabilita potentzia partzialeko eremuan  $C_p$  [-] potentzia koefizientea haztea lortzen da.

#### *AEP kalkulua*

Aerosorgailuaren potentzia kurba eta bere kokapenari dagozkion urtebeteko haize datuak ezagutuz gero, posible da aerosorgailuaren AEP kalkulzea. Horretarako, lehenengo eta behin, haize-abiadura datuak aerosorgailuaren errotorearen altueran jarrita dagoen sentsore bat erabiliz lortu ez badira, beharrezkoa da haize-abiadura balioen tratamendu bat egitea. Prozesu hau, estrapolazio izenez ezagutzen da eta hainbat teknika erabiliz egin daitezke.

Aukeretako bat estrapolazio logaritmiko bat egitea da, ikusi Ek. (45).

$$\frac{V}{V_0} = \frac{\ln\left(\frac{H}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{H_0}{z_0}\right)} \quad (45)$$

non  $H_0$  erreferentzia altuera,  $H$  haize-abiadura estrapolatuko den altuera,  $V_0$  erreferentzia haize-abiadura,  $V$  estrapolatuko den haize-abiadura eta  $z_0$  laztasun-luzera diren.

Horrez gain, estropolaziorako beste aukera bat Hellman-en lege esponentziala erabiltzea da, ikusi Ek. (46).

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{H}{H_0}\right)^{\alpha_H} \quad (46)$$

non  $H_0$  erreferentzia altuera,  $H$  haize-abiadura estropolatuko den altuera,  $V_0$  erreferentzia haize-abiadura,  $V$  estropolatuko den haize-abiadura eta  $\alpha_H$  Hellman-en edo marruskadura faktorea diren.

Behin haize-abiadura datuak altuera egokira estropolatuta, datuen Probabilitate Dentsitate Funtzioa (PDF) kalkulatu da. PDF honek aldagai baten ausazko balio batek aldagaiaren balioa berdintzeko duen probabilitatea definitzen du. Horrela, energia eolikoaren sektorean PDFren helburua haize-abiadurak balio jakin bat hartzeko duen probabilitatea definitzea da. Emaitza grafikoki irudikatuz gero, Weibull-en diagrama lortuko da, zeinen adierazpen matematikoa Ek. (47)-n aurkezten den.

$$f(x) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{x}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^k} \quad (47)$$

non  $k$  eta  $c$  forma eta eskala faktoreak diren, hurrenez hurren.

Azkenik, aerosorgailuaren potentzia kurba eta urteko haize-abiadura datuen Weibull distribuzioa ezagututa, Ek. (48)-n azaldutako adierazpena erabiliko da urteko batezbesteko potentzia sorkuntza kalkulatzeko, Schramm et al. [191]-en lanean azaldu bezala.

$$P_{batezbeste} = \frac{\sum_{j=1}^{j=Nbins} P(V_{0,j}) \cdot N(V_{0,j})}{\sum_{j=1}^{j=Nbins} N(V_{0,j})} \quad [W] \quad (48)$$

non  $N(V_{0,j})$  haize-abiadura bin bakoitzari dagokion probabilitatea eta  $P(V_{0,j})$  haize-abiadura bin horrekin sortutako potentzia balioak diren.

Batezbesteko potentzia sorkuntza ezagutua, AEP oso erraz kalkulatu daiteke Ek. (49)-n aurkeztutako adierazpena erabilita.

$$AEP = P_{batezbeste} \cdot h \quad [W \cdot h] \quad (49)$$

non  $h = 8760$  urte oso bati dagokion ordu kopurua den.

### 3.2.2 AGF Fluxu Kontrol Aktiboa

Atal honetan proposatutako fluxu kontrol teknikak honako helburua du: jatorriz fluxu kontrol pasiborako erabili izan diren GFen jarduera hobetzea. Horretarako, AI teknikak darabiltzan GFetan oinarritutako fluxu kontrol estrategia aktibo bat diseinatuko da. Estrategia honi erreferentzia egiteko, “Gurney Flap Aktibo” (AGF) izena erabiliko da hemendik aurrera.

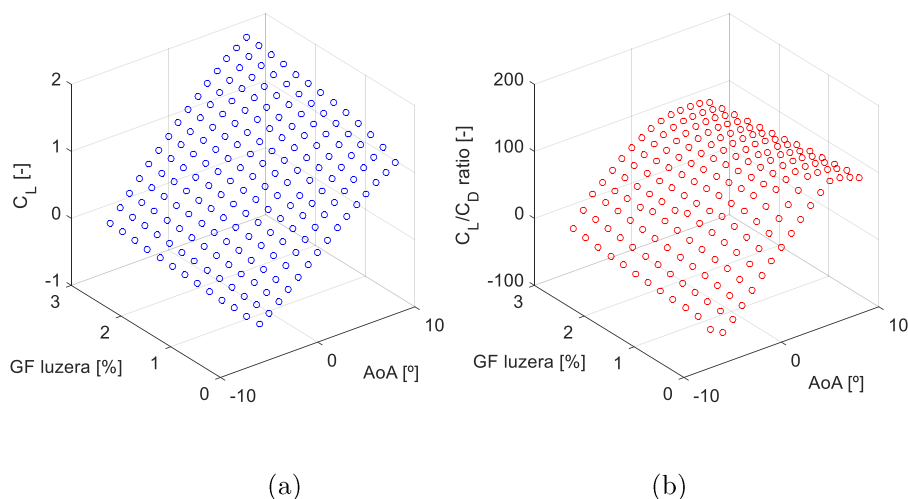
AGF estrategia eta GFetan oinarritutako hainbat fluxu kontrol estrategia pasibo aztertuko dira atal honetan. Horretarako, estrategia bakoitzak, NREL 5MW aerosorgailuaren potentzia sorkuntzan zein jardueran duen eragina analizatuko da.

#### *Fluxu kontrol estrategia*

2.3 atalean aurkeztutako literatura azterketan azaldutakoaren arabera, GFetan oinarritutako fluxu kontrol estrategia bat diseinatzerako orduan oso garrantzitsua da GFen luzera optimoa aukeratzea. Luzera hori egoki zehaztuz gero, aerosorgailuaren potentzia partzialeko eremuan sistemaren potentzia sorkuntza maximizatzeaz gain, aerosorgailuaren hainbat elementutan eragiten diren karga mekanikoak murriztea ere lor daiteke. Hala ere, diseinu optimoa ez da erreza, izan ere, Ek. (35) eta Ek. (36)-k adierazten duten moduan, aerosorgailuaren palen jarduera aerodinamikoa, eta ondorioz GFen eragina, aerosorgailuaren palen eraso-angeluaren edo “Angle of Attack”-aren (AoA [°]) araberakoa da, eta hau, era berean, haize-abiadurarekin batera aldatu egiten da. Hortaz, haize-bolada azkarren edota aerosorgailuaren operazio eremuaren aldatetaren ondorioz, AoA [°] angelua aldatu egingo da eta diseinatutako GFen luzera ez-optimo bilakatuko da. Hori dela eta, sortutako potentziak, eta batez ere aerosorgailuaren palen erroan eragindako karga mekanikoek, okerrera egin dezakete. Horregatik, aerosorgailuaren operazio-barruti guztian zehar GFen jarduera optimizatzeko helburuarekin, AGF fluxu kontrol estrategia aurkeztuko da atal honetan. GFen luzera dinamikoki moldatzeko, Blaylock et al. [192]-en lanean aurkeztu bezalako sistema pneumatikoa erabiliko litzateke, zeinek erantzun denbora oso azkarrak ahalbidetzen dituen.

AGF fluxu kontrol strategiaren diseinu prozeduraren lehen urratsa, hainbat luzerako GFek aerosorgailuaren paletan sortutako  $C_L$  [-] euste-koefizientean eta  $C_D$  [-] arraste-koefizientean duten eragina aztertzea da. Gainera, azterketa hau aerosorgailuaren palek izaten duten ohiko AoA [°] guztientzako egingo da. Horretarako, CFD simulazioak egin dira Star CMM+ kodigo komertziala erabiliz. CFD simulazioak egiterako orduan NREL 5MW aerosorgailuaren palaren 8. eta 9.

estazioei dagokien DU91W(2)250 profil aerodinamikoaren eta  $Re=2 \cdot 10^6$  Reynolds zenbakia kontsideratu dira. Lortutako emaitzak 43. Irudian daude ikusgai.



**43. Irudia.** CFD analisi bidez lortutako NREL 5MW aerosorgailuaren koefiziente aerodinamikoak (a)  $C_L$  [-] (b)  $C_L/C_D$  [-] ratioa

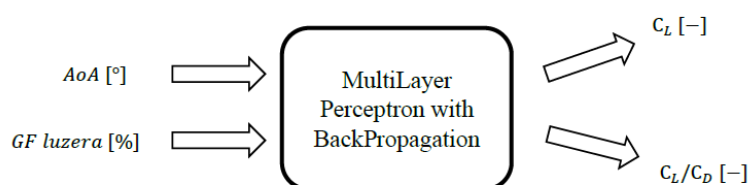
43. Irudia aztertuz gero, nabarmena da GFen luzerak aerosorgailuaren palaren jardura aerodinamikoan eragina duela. Alde batetik, 43. Irudia (a)-ko datuetatik honako hau ondorioztatu daiteke: GFen luzera handitu ahala  $C_L$  [-] euste-koefizientearen balioa ere hazi egiten da. 2.3 atalean azaldutakoaren arabera,  $C_L$  [-] euste-koefizientearen balio handiago batek euste-indar handiago bat ekarriko luke, zeinek, era berean, haizetik jasotako potentzia aerodinamiko handitu egin dela adierazten duen.

Beste alde batetik, 43. Irudia (b) aztertuz gero, ikus daiteke GFen luzera handitzean  $C_L/C_D$  [-] koefizientearen arteko ratioa txikitu egiten dela. Murrizketa honek zera adierazten du:  $C_D$  [-] arraste-koefizientearen  $C_L$  [-] euste-koefizientearen baino gehiago handitzen dela. Ondorioz, palen jardura aerodinamikoak okerrera egin eta aerosorgailuaren paletan zein beste hainbat elementu ekoizterietan eragindako karga mekanikoak hazi egingo dira.

Atal honetan proposatutako AGF fluxu kontrol estrategiaren helburua AoA [°] angeluaren balio bakoitzerako GFen luzera optimizatzea da. Horretarako, AoA [°] angeluak zehaztutako operazio-puntu bakoitzean  $C_L/C_D$  [-] koefizientearen arteko ratioa maximizatzea bilatuko da. 43. Irudian jasotako datuak eskuragarri egon daitezkeen AGF estrategia exekutatu ahala, ANN bat diseinatuko da datuak

gordetzeko. Gainera, datuak ANN baten gordetzeak beste abantaila batzuk ere baditu, batez ere, kuantifikazio arazoak ekiditeari, datu kopuru handien tratamenduari eta biltegitratzearen erraztasunari dagokionean.

Hautatutako ANNren topologia 2.4.2 atalean azaldutako MLP-BP sare neuronalak da. Diseinatutako MLP-BP sare neuronalak bi sarrera (AoA [°] eta GF luzera [%]) eta bi irteera ( $C_L$  [-] eta  $C_L/C_D$  [-]) ditu, ikusi 44. Irudia. Gainera, MLP-BPak ez dauka atzerazko berrelikadurarik eta neurona guztien aktibazio-funtzioa tangente hiperbolikoa da.



#### 44. Irudia. Koefiziente aerodinamikoaren modelizazioarako erabilitako ANNren sarrera eta irteera egitura

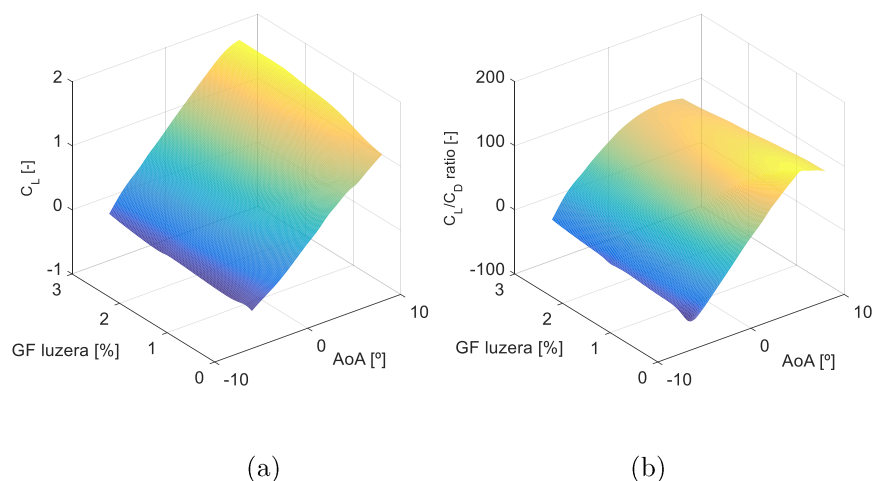
MLP-BParen entrenamenduari dagokionez, 390 datu multzo erabili dira, AoA [°] angelu bakoitzeko eta GF luzera [%] bakoitzeko aerosorgailuaren paletan eragindako  $C_L$  [-] euste-koefizientea eta  $C_L/C_D$  [-] koefizienteen arteko ratioa adierazten dutenak. Sare neuronalaren egiturari eta entrenamendu prozesuari dagokion parametro esanguratsuenak 9. Taulan jaso dira.

#### 9. Taula. Koefiziente aerodinamikoaren modelizazioarako erabilitako ANNren parametro definizioa

Parametroa	Balioa
Sarrera neuronak [-]	2
Ezkatuko neuronak [-]	20
Irteera neuronak [-]	2
Ikasketa-ratioa [-]	$1 \cdot 10^{-25}$
Entrenamendu fasea [%]	90
Balioztatzea fasea [%]	5
Test fasea [%]	5

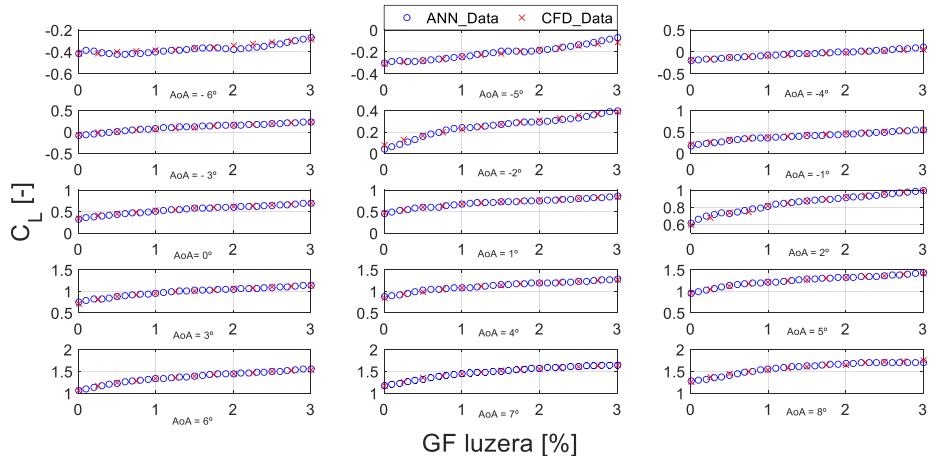


MLP-BP sarearen entrenamendu ostean lortutako korrelazio-koefizientearen  $r^2=0.99984$  balioak eta MSE errorearen 0.172 balioak entrenamendua egoki bete dela adierazten dute. 45. Irudian MLP-BP sarearen irteerak ( $C_L$  [-] euste-koefizientea eta  $C_L/C_D$  [-] koefizienteen arteko ratioa) azaltzen dira AoA [°] angeluaren eta GF luzeraren [%] menpe.

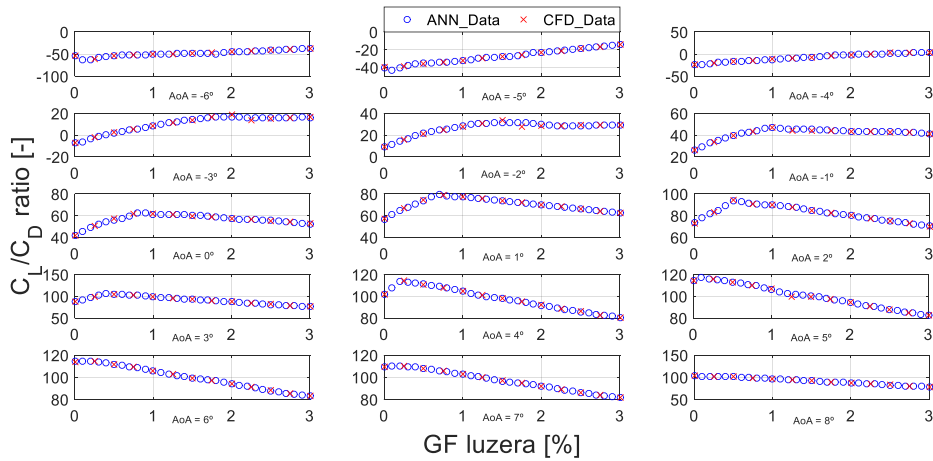


45. Irudia. Diseinatutako ANNren irteera datuak (a)  $C_L$  [-] (b)  $C_L/C_D$  [-] ratioa

Gainera, sare neuronalaren fidagarritasuna egiaztatzeko, CFD simulazio bidez lortutako zein MLP-BParen irteerako  $C_L$  [-] euste-koefizientearen eta  $C_L/C_D$  [-] koefizienteen arteko ratioaren balioen arteko konparaketak aurkezten dira 46. Irudian eta 47. Irudian, hurrenez hurren. Hainbat AoA [°] angelu eta GF luzera [%] balio erabiliz egin dira konparaketa hauek.



46. Irudia. CFD bidez lortutako eta ANNren irteerako  $C_L$  [-] koefizienteen arteko konparaketa



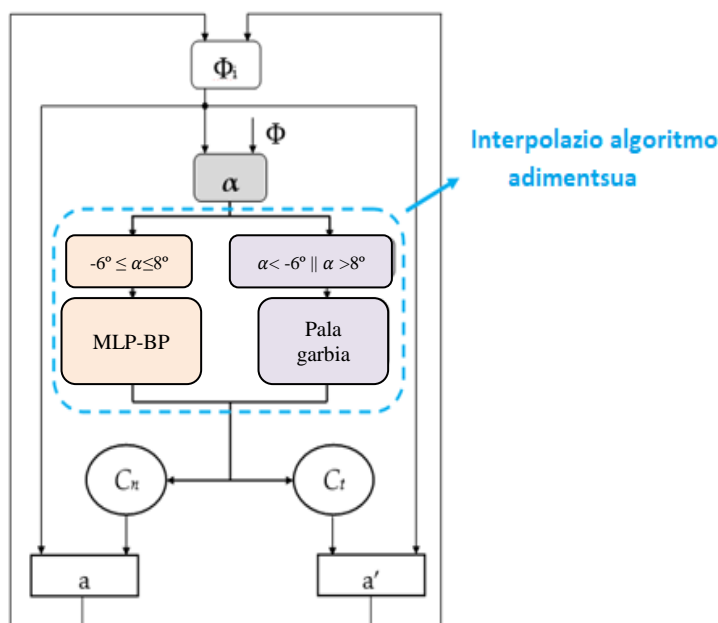
47. Irudia. CFD bidez lortutako eta ANNren irteerako  $C_L/C_D$  [-] ratioen arteko konparaketa

46. Irudian eta 47. Irudian ikus daitekeenez, kontsideratutako AoA [°] angelu eta GF luzera [%] guztietarako  $C_L$  [-] euste-koefizientearen eta  $C_L/C_D$  [-] koefizienteen arteko ratioaren modelizazioa egokia da. Gainera, MLP-BP sare neuronalaren irteera jarraia izanik  $C_L$  [-] euste-koefizientearen eta  $C_L/C_D$  [-] ratioaren bitarteko balioak ere kalkulatu daitezke, ez bakarrik CFD simulazio bidez lortutakoak. Horrela, AGF fluxu kontrolaren exekuzioan kuantifikazio arazoak saihestu ahal izango dira.

*BEM algoritmo bidezko azterketa aerodinamikoa*

3.2.1 atalean azaldutakoaren arabera, ardatz horizontaleko aerosorgailu baten palen jardura aerodinamikoa aztertzeko erabiltzen da BEM algoritmoa. Azterketa aerodinamikoaren ondorioz, haize-abiadura jakin baterako aerosorgailuak sortutako potentzia, errotorean sortutako “thrust” indarra eta aerosorgailuaren palen erroan eragindako BM kalkulatu dira, ikusi Ek. (41)-(43).

AGF fluxu kontrol estrategia bi teknikaren konbinaketan oinarritzen da: 40. Irudian erakutsitako BEM kodea eta interpolazio algoritmo adimentsu bat. BEM algoritmo hobetua NREL 5MW aerosorgailuaren palen 8. eta 9. estazioetan aplikatutako da bakarrik, non luzera dinamikoki aldatzen duten GF aktiboak kokatuko diren. Proposatutako BEM algoritmo hobetuaren fluxu-diagrama 48. Irudian dago ikusgai.



48. Irudia. Proposatutako BEM algoritmo hobetuaren fluxu-diagrama

Gainera, 48. Irudian ikus daitekeenez, BEM algoritmoari gehitutako interpolazio algoritmo adimentsuak AoA [°] angeluaren balio jakin batzuekin funtzionatuko du bakarrik. AoA [°] angeluaren balio hauek bat datoz ardatz horizontaleko aerosorgailu batek ohiko funtzionamenduan izaten dituen eraso-angeluekin. Gainontzeko AoA [°] angeluaren balioentzat BEM algoritmo

hobetuaren portaera 3.2.1 atalean azaldutako BEM algoritmoaren berdina izango da. Izan ere, eraso-angeluaren tarte horretatik kanpo, GFek aerosorgailuaren palen jarduera aerodinamikoan eraginik izango ez dutela kontsideratuko da.

Proposatutako AGF algoritmoaren helburua aerosorgailuak bere operazio-eremu osoan zehar  $C_L/C_D$  [-] koefizienteen arteko ratioa maximizatzen duen GF luzerarekin [%] funtzionatzea da. Horrela, palen jarduera aerodinamikoan optimizatuko da. Koefiziente aerodinamikoaren arteko ratio maximoa kalkulatzeko, maximoa aurkitzeko optimizazio algoritmo bat baliatuko da. Algoritmo hau BEM kode hobetuarekin batera exekutatu da, eta momentuko AoA [°] erabiliz,  $C_L/C_D$  [-] koefizienteen arteko ratioa maximizatzen duen GF luzera [%] kalkulatu da. Horretarako, aurretik diseinatutako MLP-BP sare neuronalak erabiltzeko da.

Behin GF luzera [%] optimoa kalkulatu, honen ondorioz aerosorgailuaren paletan sortzen diren  $C_L$  [-] eta  $C_D$  [-] koefizienteak lortu daitezke, zeintzuk aerosorgailuaren palen jarduera aerodinamikoan definituko duten. Proposatutako maximoa aurkitzeko algoritmoaren pseudokodea 5. Algoritmoan dago ikusgai.

#### 5. Algoritmoa. Maximoa aurkitzeko algoritmoaren pseudokodea

---

```

Maximoa aurkitzeko algoritmoa
% Hasierako baldintza aldakorrak definitu
x=xini
y=RN(xini)
% Maximoa aurkitzeko algoritmoa hasi
while (Irten~=1) do
    % Hurrengo balioa aztertu
    x=x_ant+Δx
    % ANNren irteerak kalkulatu
    y=RN(x)
    % CL/CD [-] irteeraren balioa konparatu
    if y>y_ant
        Irten=0
    else
        Irten=Maximo_lokala_begiratu(x,y)
    end
    % Balio optimoak eguneratu
    x_ant=x
    y_ant=y
end

```

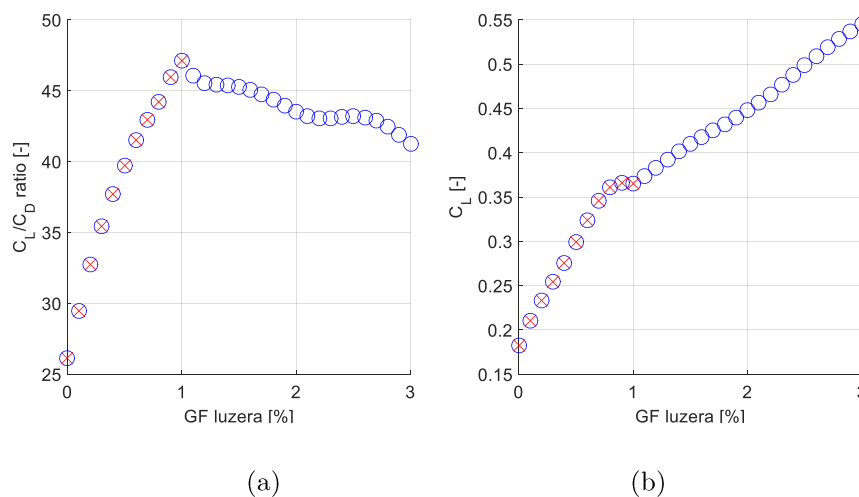
---

Proposatutako maximoa aurkitzeko algoritmoaren funtzionamendu egokia egiaztatzeko, aerosorgailuaren operazioari lotutako bi egoera desberdinetan ( $AoA=-1^\circ$  eta  $AoA=3.5^\circ$ ) lortutako emaitzak aztertuko dira, ikusi 10. Taula.

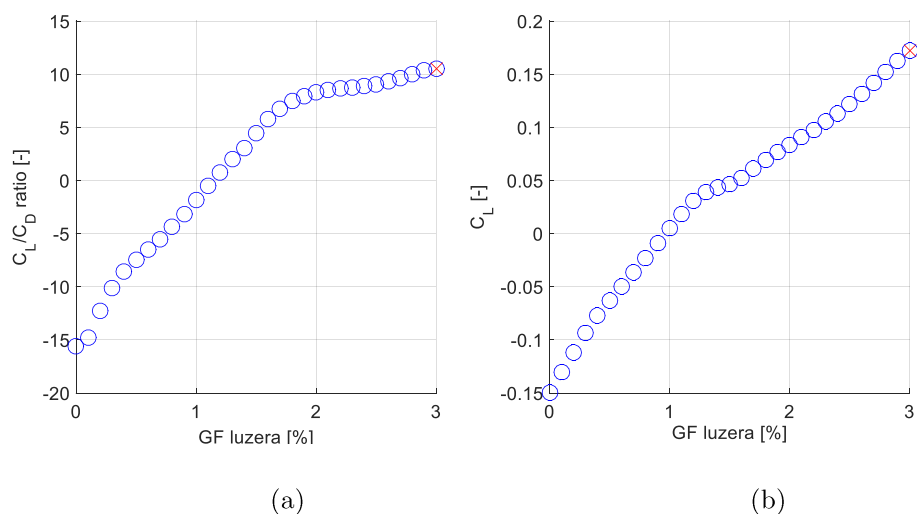
10. Taula. Maximoa aurkitzeko algoritmoaren emaitzak

AoA [°]	Konbergentzia denbora [s]	$C_L/C_D$ ratio optimoa [-]	$C_L$ optimoa [-]	GF luzera optimoa [%]
- 1	0.1116	47.1287	0.3652	1
- 3.5	0.0363	10.5028	0.1725	3

Lortutako emaitzak egokiak direla frogatzeko,  $AoA$  [°] angeluaren balio bakoitza erabiliz, maximoa aurkitzeko algoritmoaren ibilbidea erakusten da 49. Irudian eta 50. Irudian, hurrenez hurren.



49. Irudia. Maximoa aurkitzeko algoritmoaren funtzionamendua  $AoA=-1^\circ$  (a)  $C_L/C_D$  [-] ratioa (b)  $C_L$  [-]



**50. Irudia.** Maximoa aurkitzeko algoritmoaren funtzionamendua  $AoA=3.5^\circ$  (a)  $C_L/C_D$  [-] ratioa (b)  $C_L$  [-]

49. Irudian eta 50. Irudian ikus daitekeenez, proposatutako algoritmoaren funtzionamendua egokia da. Bi kasuetan, algoritmoaren ibilbidea (ANNren balioak urdinez eta bilaketa algoritmoarenak gurutze gorritz) geratu egiten da  $C_L/C_D$  [-] koefizienteen arteko ratioa maximizatzen duen GFaren luzera optimoa [%] aurkitzean. Nabarmentzekoa da AGF fluxu kontrol estrategiaren helburua ez dela  $C_L$  [-] koefizientearen balioa maximizatzea, baizik eta, aerosorgailuaren palen jarduera aerodinamikoa optimizatzea, hots,  $C_L/C_D$  [-] koefizienteen arteko ratioa maximizatzea. Hori agerikoa da 49. Irudian, bertan garbi geratzen da maximoa aurkitzeko algoritmoak zehaztutako GF luzeraren [%] eraginez lortutako  $C_L$  [-] koefizientea lortu zitekeen handiena ez dela.

Gainera, algoritmoaren konbergentzia denbora murrizteko helburuarekin,  $AoA$  [ $^\circ$ ] angeluaren araberakoak diren hasierako baldintzak ezarri dira. Hori dela eta, 49. Irudian algoritmoaren bilaketa GF luzera [%] txikienetatik hasten den bitartean, 50. Irudian algoritmoaren bilaketa GF luzera [%] handienetatik hasten da.

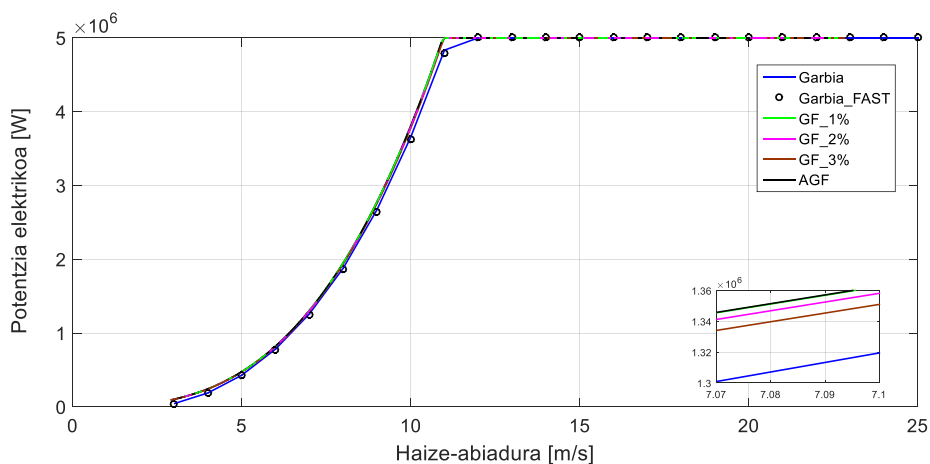
Maximoa aurkitzeko algoritmoaren konbergentzia denborarik okerrenea ( $AoA=-1^\circ$  eraso-angeluari dagokiona) 10. Taulan jaso da. Analisisirako erabiliko diren haize-abiadura datuak 1 s periodoarekin jasotakoak direnez, kasu okerreneko konbergentzia denbora egokitzat jotzen da. Gainera, Matlab softwarean exekutatu

beharrean, algoritmoa denbora errealeko mikroprozesatzaile batean exekutatzean, konbergentzia denbora gehiago murriztuko dela kontsideratzen da.

AGF estrategiak aerosorgailuaren jarduera aerodinamikoan duen eragina aztertzeko, BEM algoritmo hobetua aerosorgailuaren operazio-barruti osoa osatzen duten haize-abiadura balioak erabiliz ebatziko da, 3.2.1 atalean egin bezala. Horrela, haize-abiadurarekiko independenteak diren ondorioak lortu ahal izango dira. Era berean, fluxu kontrolik gabeko eta luzera konstantea duten GFetan oinarritutako 3 fluxu kontrol estrategia pasibo kasuak ere aztertu dira:

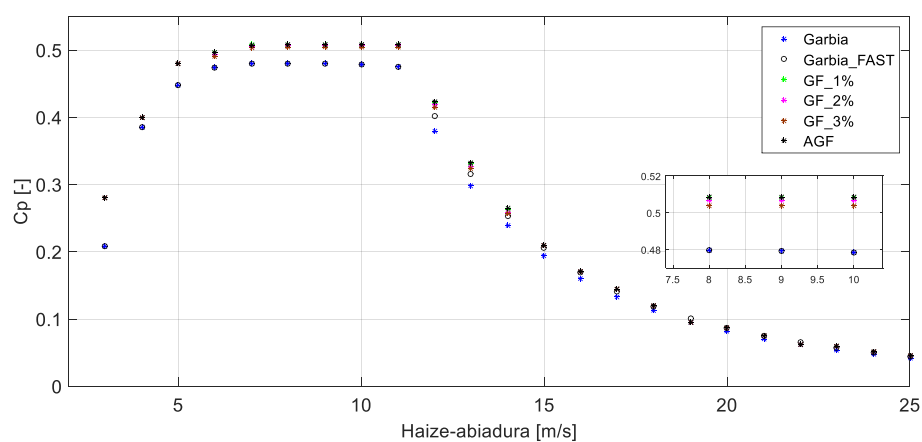
- Profilar dagokion kordaren luzeraren % 1ko luzera (edo altuera) duten GFak.
- Profilar dagokion kordaren luzeraren % 2ko luzera (edo altuera) duten GFak.
- Profilar dagokion kordaren luzeraren % 3ko luzera (edo altuera) duten GFak.

Fluxu kontrol estrategia pasiboak aztertzearen helburua honako hau da: AGF estrategiak luzera konstantea duten GF pasiboen aurrean dituen onurak kuantifikatu ahal izatea. 51. Irudian azaldutako kasu bakoitzari dagokion NREL 5MW aerosorgailuaren potentzia kurba dago ikusgai.



**51. Irudia.** AGF fluxu kontrol aktiboa. Potentzia kurben konparaketa

Era berean, aurretik azaldutako kasu bakoitzari dagokion  $C_p$  [-] potentzia koefizientearen kurba irudikatu da 52. Irudian.



## 52. Irudia. AGF fluxu kontrol aktiboa. $C_p$ [-] potentzia faktoreen arteko konparaketa

51. Irudiak eta 52. Irudiak erakusten dutenez, AGF fluxu kontrol estrategia aktiboarekin GF bidezko fluxu kontrol estrategia pasibo onenaren emaitzak parekatu edota arinki hobetzea lortu da. Ostera, % 2ko eta % 3ko luzera duten GF pasiboen kasuan, aerosorgailuaren potentzia kurba nabarmen okertu dela ikus daiteke.

Hortaz, % 1ko luzera duten GF pasiboekin alderatuz gero, ez da espero aerosorgailuak sortutako potentzia asko hobetzerik AGF fluxu kontrol estrategia erabilia. Alabaina, proposatutako estrategia aktiboarekin errotorean sortutako “thrust” indarra eta aerosorgailuaren paletan eragindako BM murriztea espero da.



# 4. Kapitulu

## Emaitzak

---

Ikerkuntza lan honetan, ardatz horizontaleko aerosorgailuen operazioa eta efizientzia hobetzeko teknika adimentsuetan oinarritutako kontrol estrategiak diseinatu eta balioztatu dira. Batetik, ardatz horizontaleko aerosorgailu baten yaw sistemaren funtzionamendu autonomo eta optimo bat lortzeko helburuarekin, ML bidezko yaw kontrol estrategia bat diseinatu da. Bestetik, fluxu kontrol gailuek ardatz horizontaleko aerosorgailu baten operazioan izan ditzaketen onurak ere aztertu dira. Gainera, fluxu kontrol gailu pasiboak ez ezik, AI teknikak erabiliz fluxu kontrol teknika aktibo bat diseinatu eta balioztatu ere egin da.

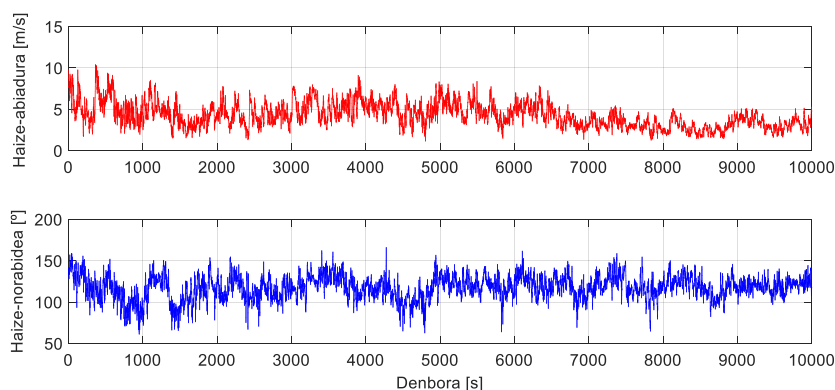
Kapitulu honetan, diseinatutako kontrol estrategiekin lortutako emaitzak aurkeztu eta aztertuko dira. 4.1 atalean ML bidezko yaw kontrol estrategiekin lortutako emaitzak aurkeztuko dira. Diseinatutako fluxu kontrol estrategiekin - pasibo zein aktibo- lortutako emaitzak 4.2 atalean aztertuko dira.

## 4.1 ML BIDEZKO YAW KONTROLA

Atal honetan, proposatutako ML bidezko yaw kontrol estrategiekin ardatz horizontaleko NREL 5MW aerosorgailuaren operazioan zer-nolako eragina duten aztertuko da. Horretarako, lehenengo pausua analisirako erabiliko diren haize datuak zehaztea izango da. Kasu honetan, ML bidezko yaw kontrol estratgien balioztatzerako, Salt Lake, Utah, AEBetan kokatutako estazio meteorologiko batetik lortutako haize datu errealak [193] erabili dira. Datu hauek aurretiaz beste ikerketa lan batzuetan [194-196] ere izan dira erabiliak. Aipatutako estazio meteorologikoaren koordinatu geografiko zehatzak  $[-112.0621^\circ, 40.5938^\circ]$  dira.

Haize datuak zazpi anemometro ultrasoniko baliatuz jaso eta erregistratu dira. Anemometro ultrasonikoen funtzionamenduaren printzipioa Zhou et al. [197]-en lanean azaldutakoa da. Printzipio honen arabera, anemometro ultrasonikoetan seinale ultrasonikoek igorle eta hartzailearen arteko bidea egiteko behar duten denbora neurtzean da. Denbora hau haizearen ezaugarrien menpe egonik, ultrasoinuzko anemometroak haizearen ezaugarriak kalkulatzeko gai dira. Gainera, Li eta al. [198]-ek adierazi bezala, elementu birakaririk ez dutenez, ultrasoinuzko anemometroek mantentze mekaniko txikia behar dute eta oso fidagarriak kontsideratzen dira.

Haizearen neurketari dagokionez, Salt Lake-ko estazio meteorologikoan kokatutako anemometroek 1 s baino periodo txikiagoarekin erregistratzen dituzte datuak, gero hauek 1 s periodora bihurtzeko. Azkenik, estazio meteorologikoaren kokapen geografiko egokiari esker (haizearentzako oztopo fisiko handirik gabe), lege logaritmikoa erabili da, ikusi Emeis et al. [199], anemometroaren haize datuak NREL 5MW aerosorgailuaren errotorearen altuerara bihurtzeko. 53. Irudian Salt Lake-ko estazio meteorologikoan neurtutako eta NREL 5MW aerosorgailuaren altuerara bihurtutako 10000 s-ko haize-lagin bat dago ikusgai.



### 53. Irudia. Haize datuak Salt Lake, Utah, AEBtan

53. Irudiak erakusten duenez, irudikatutako haize-laginaren abiadura eta norabidea ez dira nabarmen aldatzen, hau da, ez dago neurketa faltsurik eta aerosorgailuaren operazio-puntua nahiko egonkorra da. Proposatutako ML bidezko yaw kontrol estrategien simulaziorako neurketa faltsurik gabeko eta 60 s (ML bidezko algoritmoaren denbora-tartearekin bat) luze diren haize kasuak erabiliko dira. Gainera, proposatutako kontrol estrategiek sistemaren egoera desberdinetan ondo funtzionatzen dutela egiaztatzeko, aerosorgailuaren operazio-puntu desberdinei dagozkien haize-abiadura eta norabide kasuak identifikatuko dira Salt Lake-ko estazio meteorologikoan neurtutako datuetan. Aztertutako kasuen batezbesteko haizearen abiadura eta norabidea 11. Taulan zerrendatu dira.

11. Taula. Aztertutako haize-abiadura eta norabide kasuak

Kasua	HaizeAbiadura [m/s]	YawAngelua [°]
1. Kasua	9.1	72.5
2. Kasua	10.73	38.8
3. Kasua	15.3	-49.1
4. Kasua	15.7	43.4
5. Kasua	25	42.19
6. Kasua	6.3	-46.3

11. Taulan jasotako haize-abiadura eta norabide kasuak erabilita, proposatutako bi ML bidezko yaw kontrol estrategien funtzionamendua aztertuko

da. Gainera, biekin lortutako emaitzak ere konparatuko dira. 4.1.1 atalean oinarrizko ML bidezko yaw kontrol estrategiarekin lortutako emaitzak aurkeztuko dira. 4.1.2 atalean hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategiarekin lortutako emaitzak aurkeztuko dira. Azkenik, 4.1.3 atalean, bi estrategiekin lortutako emaitzak konparatuko dira.

#### 4.1.1 Oinarrizko ML bidezko Yaw Kontrol Estrategia

Atal honetan aztertutako ML bidezko yaw kontrol strategiaren helburua, 3.1.1 atalean azaldu bezala, aerosorgailuak sortutako potentzia maximizatzea da. Ez dira kontuan hartuko yaw errotazioaren eraginez yaw sistemaren rodamentuan eragindako karga mekanikoak.

Aurretik adierazi bezala, proposatutako strategiaren simulazio bidezko balioztatzerako 11. Taulan zerrendatutako haize kasu guztiak aztertuko dira. Horretarako, yaw kontrol sistemak 60 s denbora konstantearekin filtratutako haizenorabidea erabiliko du RL algoritmoaren egoera den YawAngelua [°] kalkulatzeko. Behin egoera kalkulatuta,  $Q\_P(s(t), a(t))$  funtzioaren balioa maximizatzen duen YawK [-] ekintzaren balioa hautatuko da kontrol seinale gisa.

Haize kasu bakoitzean oinarrizko ML bidezko yaw kontrol strategiak hautatutako YawK [-] ekintzaren balioa 12. Taulan aurkitu daiteke.

**12. Taula.** Oinarrizko ML bidezko yaw kontrol estrategiarekin hautatutako ekintzak

Kasua	YawK [-]
1. Kasua	0.5
2. Kasua	0.7
3. Kasua	0.9
4. Kasua	0.6
5. Kasua	0.6
6. Kasua	0.9

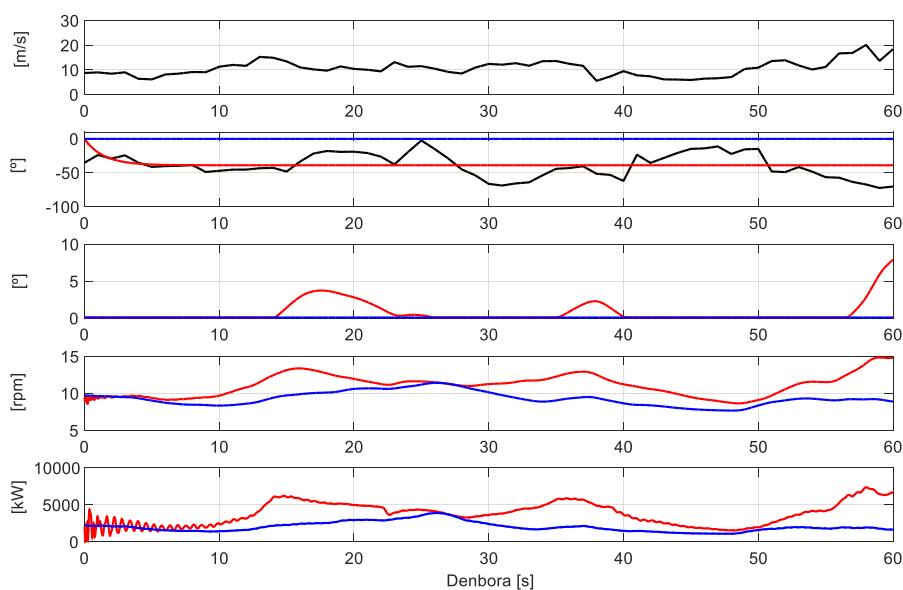
Proposatutako ML bidezko yaw kontrol strategiaren funtzionamendu egokia ziurtatzeko, kontrol sistemak hautatutako yaw ekintzaren balioak hartu eta simulazioak egin dira, horretarako FAST kode aeroelastikoa erabilia.

Aerosorgailuaren bi operazio-puntu desberdin irudikatzen dituzten bi kasuren azterketa sakonago bat eskainiko da hurrengo lerroetan.

**2. kasua:  $HaizeAbiadura=10.73\text{ m/s}$  ,  $YawAngelua=38.8^\circ$**

Kasu honetan, 11. Taulak erakusten duenez, batezbesteko haize-abiadurak  $10.73\text{ m/s}$ -ko balioa hartzen du. Honen arabera aerosorgailua oraindik ez dago potentzia izendatuko eremuan. Hortaz, errotorearen orientazioaren eta haizearen norabidearen arteko diferentziek potentzia galerak sortu beharko lituzkete. Kasu honetan, batezbesteko yaw angeluaren balioa  $38.8^\circ$ -koa da.

Aerosorgailuaren portaera aztertzeko, 54. Irudian FAST kode aeroelastikoa erabiliz lortutako simulazio emaitzak azaltzen dira. 54. Irudian azaltzen diren aldagaiak hurrengoak dira: haize-abiadura (1. grafika), haizearen eta errotorearen norabidea (2. grafika), pitch angelua (3. grafika), errotorearen biratze-abiadura (4. grafika) eta aerosorgailuak jasotako potentzia aerodinamikoa (5. grafika).



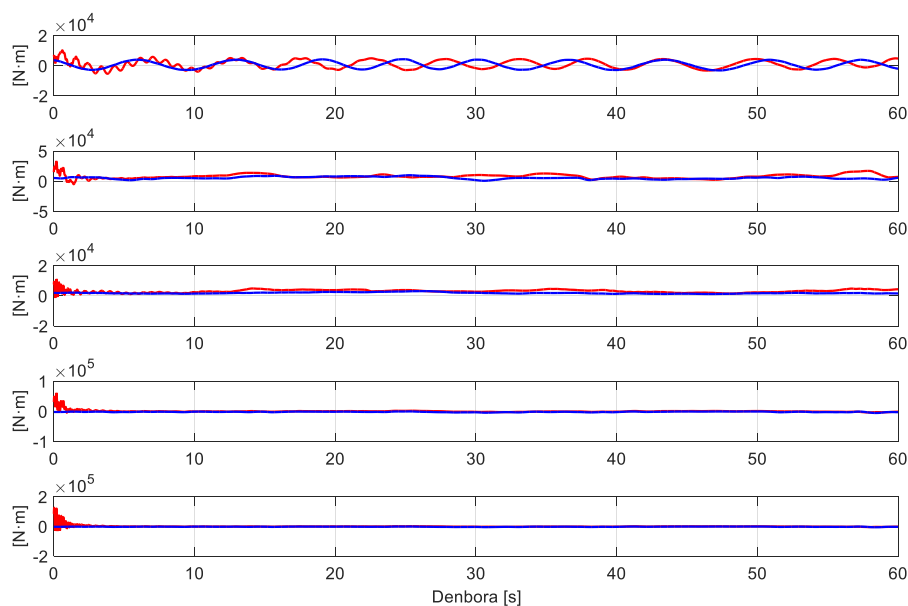
**54. Irudia.** Oinarritzko ML bidezko yaw kontrol estrategia. Aerosorgailuaren operazioa 2. kasuan

Ikus daitekeenez, haize-abiadura eta haize-norabidea (beltzez) denboran aldakorrak dira, haien batezbesteko balioak 11. Taulan jasotakoak izanik. Gainera, 2. grafikan argi geratzen denez, irudikatutako bi kasuetako batean (urdinez) ez da

yaw kontrolik burutzen. Bestean (gorriz), ordea bai, eta errotorearen norabidea haizearen norabidearekin lerrokatzen da yaw sistemaren aktuazioaren eraginez. Azkeneko 3 grafikak aztertuz, yaw sistemaren aktuazioak NREL 5MW aerosorgailuaren operazioan duen eragina beha daiteke:

- Haizearen norabidea eta errotorea lerrokatzeren ondorioz, aerosorgailuak sortutako potentzia eta errotorearen biratze-abiadura handitu egiten dira.
- Biratze-abiaduraren hazkuntzaren ondorioz, sistema potentzia izendatuko egoerara pasatzen da une batzuetan. Hau garbi ikusten da pitch angelua hazi egiten den momentu horietan.
- Yaw kontrola aktibo dagoen kasuan aerosorgailuak sortutako potentzia nabarmen handitzen da yaw kontrola aktibo ez dagoen kasuarekin konparatuz gero.
- Yaw errotazioak sortutako potentzian eragindako oszilazio garrantzitsu batzuk antzematen dira.

Halaber, sistemaren potentzia sorkuntza hobetzeaz gain, karga mekanikoak kontuan izatea ere garrantzitsua da. Horregatik, 55. Irudian aerosorgailuaren hainbat elementutan eragindako karga mekanikoen azterketa bat aurkezten da. 55. Irudian erakutsitako aldagaiak hurrengoak dira: palen erroan x ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa (1. grafika), palen erroan y ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa (2. grafika), dorrearen basean y ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa (3. grafika), potentzia transmisio ardatzean z ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa (4. grafika) eta yaw sistemaren rodamentuan z ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa (5. grafika).



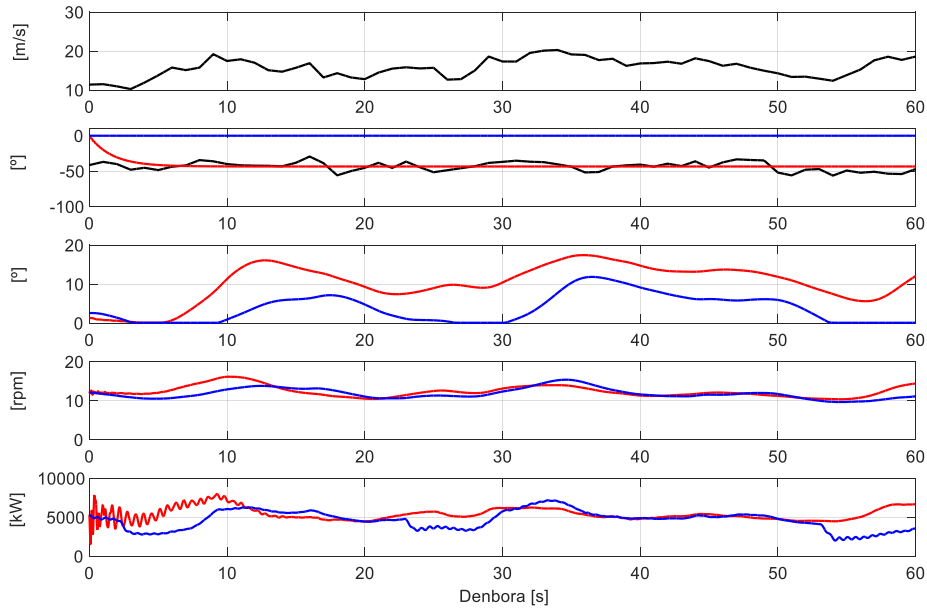
**55. Irudia.** Oinarrizko ML bidezko yaw kontrol estrategia. Karga analisia 2. kasuan

55. Irudian aurkeztutako grafiken arabera, yaw errotazioaren eragina dela eta karga mekaniko handienak jasaten dituzten elementuak potentzia transmisio ardatza, dorrea eta, batez ere, yaw sistemaren rodamentua dira. Nahiz eta palen erroan eragina ere antzeman daitekeen, eragin hau txikiagoa da potentzia transmisio ardatzean, dorrean eta yaw sistemaren rodamentuan ikusten dena baino.

**4. kasua:**  $HaizeAbiadura=15.7 \text{ m/s}$  ,  $YawAngelua=43.4^\circ$

Kasu honetan, 11. Taulan ikus daitekeenez, batezbesteko haize-abiadura 15.7 m/s-koa da. Balio honen arabera aerosorgailua potentzia izendatuko eremuan dago. Beraz, errotorearen orientazioaren eta haizearen norabidearen arteko diferentzia oso handia ez bada, ez litzateke potentzia galerarik egon behar izango. Kasu honetan, batezbesteko yaw angeluak 43.4°-ko balioa hartzen du. Hortaz, batezbesteko balio hauek kontsideratuz, ez litzateke potentzia galera garrantzitsurik egon beharko nahiz eta yaw kontrol sistema aktibo ez egon. Dena den, haizearen turbulentziak batezbesteko balio honekiko desbideratze txikiak eragin ditzake.

Aerosorgailuaren jardura aztertze aldera, 56. Irudian FAST bidezko simulazioak azaltzen dira. 56. Irudian azaltzen diren aldagaiak honako hauek dira: haize-abiadura (1. grafika), haizearen eta errotorearen norabidea (2. grafika), pitch angelua (3. grafika), errotorearen biratze-abiadura (4. grafika) eta aerosorgailuak jasotako potentzia aerodinamiko (5. grafika).



**56. Irudia.** Oinarritzko ML bidezko yaw kontrol estrategia. Aerosorgailuaren operazioa 4. kasuan

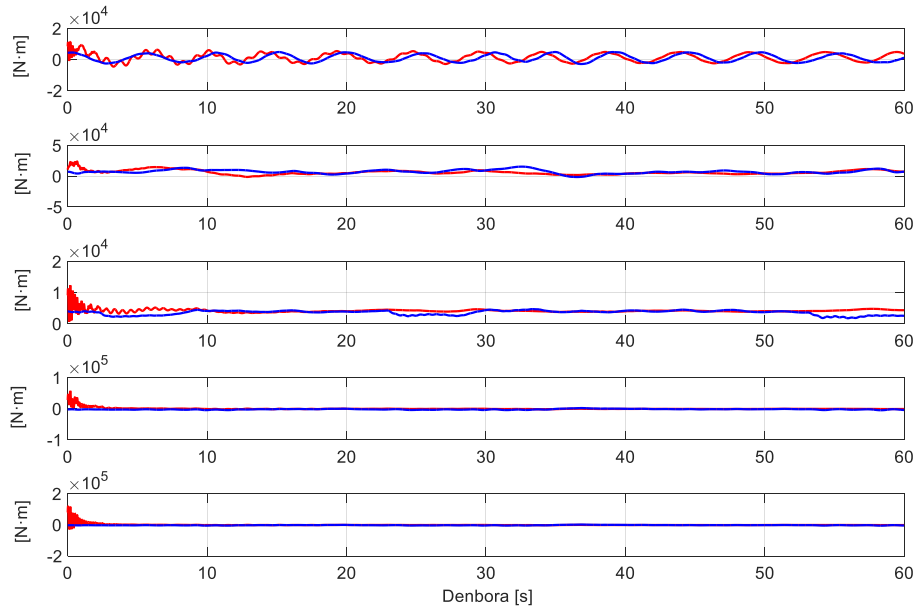
56. Irudian ikus daitekeenez, kasu honetan ere, haize-abiadura eta haize-norabidea (beltzez) denboran aldakorrek dira. Gainera, 2. grafikan bi kasu desberdin daudela ikusten da: bi kasuetako batean (urdinez) yaw kontrola ez dago aktibo. Bestean (gorriz), ordea bai, eta errotorearen norabidea haizearen norabidearekin lerrokatzen da yaw sistemaren aktuazioaren eraginez. Azkeneko 3 grafikak aztertuz, yaw sistemaren aktuazioak NREL 5MW aerosorgailuaren operazioan duen eragina behatu daiteke:

- Nahiz eta haizearen norabidea eta errotorea lerrokatu, potentzia ez da modu adierazgarrian handitzen. Errotorearen biratze-abiadurari dagokionez, hau gutxi gorabehera konstante mantentzen da denbora-tarte osoan.



- Yaw kontrola aktibo dagoen kasuan, sistema uneoro dago potentzia izendatuko eremuan. Yaw kontrola aktibo ez dagoen kasuan, ordea, une puntaletan potentzia partzialeko eremura pasatzen da aerosorgailua. Trantsizio hau haize-abiadura txikitzean gertatzen da.
- Orohar, nahiz eta sistema puntualki potentzia partzialeko eremura pasatu eta sortutako potentzia murriztu, potentzia maila berdin mantentzen da yaw errotazioa aktibo egon ala ez.
- Yaw errotazioaren eraginez oszilazio garrantzitsuak agertzen dira sortutako potentzian. Oszilazio hauek ez dira agertzen yaw errotaziorik egiten ez den kasuan.

Sistemaren potentzia sorkuntza aztertzeaz gain, garrantzia handikoa da aerosorgailuaren elementu estrukturaletan sortutako karga mekanikoak aztertzea ere. 57. Irudian erakutsitako aldagaiak hurrengoak dira: palen erroan  $x$  ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa (1. grafika), palen erroan  $y$  ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa (2. grafika), dorrearen basean  $y$  ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa (3. grafika), potentzia transmisio ardatzean  $z$  ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa (4. grafika) eta yaw sistemaren rodamentuan  $z$  ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa (5. grafika).



57. Irudia. Oinarrizko ML bidezko yaw kontrol estrategia. Karga analisia 4. kasuan

57. Irudian aurkeztutako grafikak aztertu eta gero atera daitezkeen ondorioak 55. Irudiarekin ateratakoak bezalakoak dira, hots, karga mekanikoei dagokienean elementu guztien artean eragin handiena erakusten duena yaw sistemaren rodamentua da. Gainerako elementuen artean, potentzia transmisio ardatza eta dorrea dira kaltetuenak. Palak, berriz, eragin txikiena jasaten dutenak.

#### 4.1.2 Hobetutako ML bidezko Yaw Kontrol Estrategia

Atal honetan aztertutako ML bidezko yaw kontrol strategiaren helburua, ikusi 3.1.2 atala, aerosorgailuak sortutako potentzia ez ezik, yaw errotazioren eraginez yaw sistemaren rodamentuan z ardatzarekiko eragindako karga mekanikoak optimizatzea ere bada.

Proposatutako strategiaren simulazio bidezko balioztatzerako 11. Taulan jasotako haize kasu guztiak aztertuko dira. Yaw kontrol sistemak 60 s denbora konstantearekin filtratutako haizearen abiadura eta norabidea erabiliko ditu RL sistemaren egoera diren  $HaizeAbiadura [m/s]$  eta  $YawAngelua [^\circ]$  kalkulatzeko. Behin egoerak kalkulatu, PSO eta PoFn oinarritutako optimizazio algoritmoak,  $Q_P(s(t), a(t))$  eta  $Q_M(s(t), a(t))$  funtzioak erabilia, sistemak sortutako

potentzia maximizatuko duen eta karga mekanikoak murriztuko dituen ekintzen PoF kalkulatu du. Azkenik, DM algoritmoarekin, YawK [-] eta YawMugi [°] ekintza pare optimoa hautatu da.

Haize kasu bakoitzean, hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategiak hautatutako YawK [-] eta YawMugi [-] ekintzak 13. Taulan jaso dira.

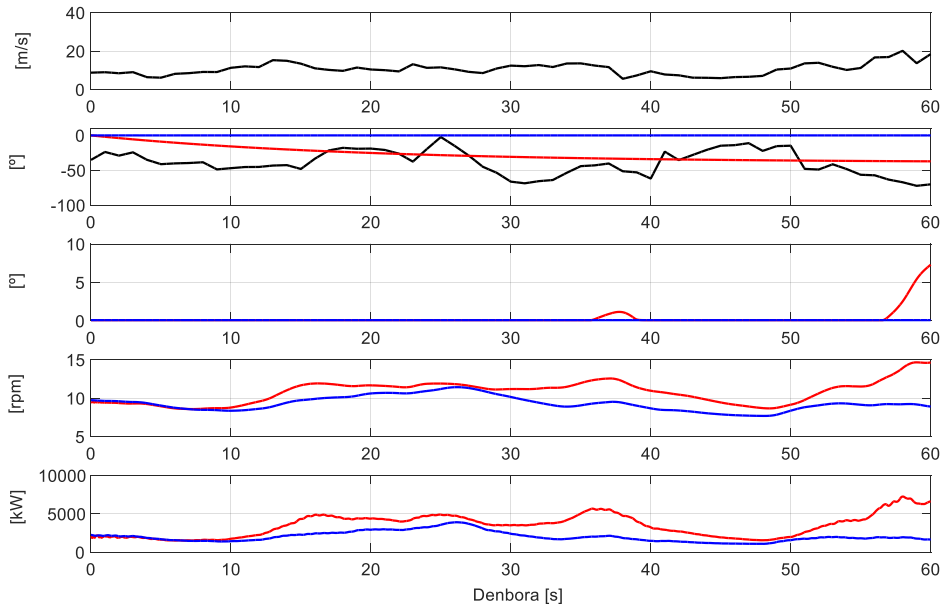
**13. Taula.** Hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategiarekin hautatutako ekintzak

Kasua	YawK [-]	YawMugi [°]
1. Kasua	0.1368	68.87
2. Kasua	0.0521	65.8992
3. Kasua	0.2821	7.6969
4. Kasua	0	0
5. Kasua	0	0
6. Kasua	0.0272	37.72

Hobetutako ML bidezko yaw kontrol strategiaren funtzionamendu egokia ziurtatzeko, kontrol sistemak hautatutako yaw ekintzen balioak hartu eta simulazioak egin dira FAST kode aeroelastikoa erabiliz. Aurretik 4.1.1 atalean landutako bi kasuak sakonago aztertuko ditugu hurrengo lerroetan.

**2. kasua:** *HaizeAbiadura=10.73 m/s , YawAngelua=38.8°*

Aerosorgailuaren portaera aztertzeko, 58. Irudian FAST bidezko simulazioak azaltzen dira. 58. Irudian azaltzen diren aldagaiak honako hauek dira: haize-abiadura (1. grafika), haizearen eta errotorearen norabidea (2. grafika), pitch angelua (3. grafika), errotorearen biratze-abiadura (4. grafika) eta aerosorgailuak jasotako potentzia aerodinamikoa (5. grafika).

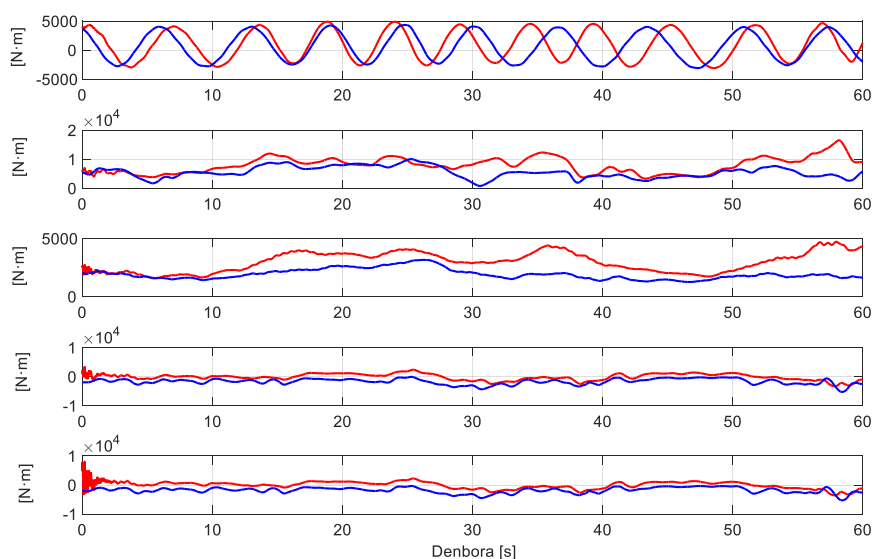


**58. Irudia.** Hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategia. Aerosorgailuaren operazioa 2. kasuan

58. Irudian ikus daitekeenez, honako honetan ere bi kasu irudikatu dira: kasu batean (urdinez) yaw kontrola ez dago aktibo. Bestean (gorriz), bai, eta errotorearen norabidea haizearen norabidearekin lerrokatzen da yaw sistemaren aktuazioaren eraginez. Azkeneko 3 grafikak aztertuz, yaw sistemaren aktuazioak NREL 5MW aerosorgailuaren operazioan duen eragina ondorioztatu daiteke:

- Haizearen norabidea eta errotorea lerrokatzearen ondorioz, aerosorgailuak sortutako potentzia eta errotorearen biratze-abiadura hazi egiten dira.
- Biratze-abiaduraren hazkuntza dela eta, sistema potentzia izendatuko egoerara pasatzen da une batzuetan.
- Yaw kontrola aktibo egonez gero, aerosorgailuak sortutako potentzia nabarmen handitzen da yaw kontrola aktibo ez dagoen kasuarekin konparatuz gero.
- Sortutako potentzia elektrikoan ez da yaw errotazioak eragindako oszilaziorik antzematen.

59. Irudian aerosorgailuaren hainbat elementu estukturaletan eragindako karga mekanikoen azterketa aurkezten da. Bertan erakutsitako aldagaiak hurrengoak dira: palen erroan x ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa (1. grafika), palen erroan y ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa (2. grafika), dorrearen basean y ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa (3. grafika), potentzia transmisio ardatzean z ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa (4. grafika) eta yaw sistemaren rodamentuan z ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa (5. grafika).



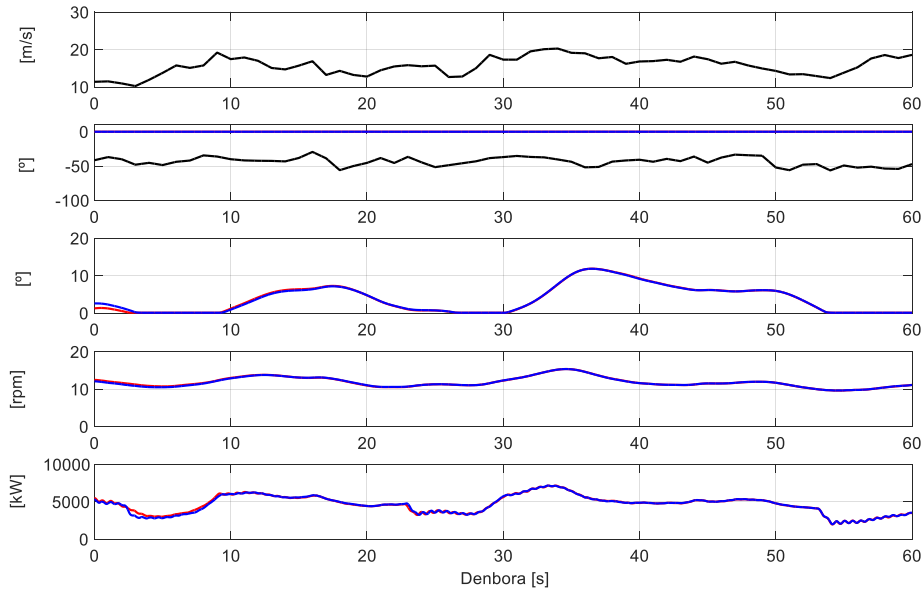
#### 59. Irudia. Hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategia. Karga analisia 2. kasuan

59. Irudian aurkeztutako grafikak aztertuz gero, karga mekanikoei dagokienean elementu guztien artean kaltetuena yaw sistemaren rodamentua dela ondoriozta daiteke. Potentzia transmisio ardatzak, dorreak eta palek, berriz, yaw errotazioarekiko afekzio txikiagoa erakusten dute.

**4. kasua:**  $HaizeAbiadura=15.7\text{ m/s}$  ,  $YawAngelua=43.4^\circ$

Aerosorgailuaren jarduera aztertze aldera, 60. Irudian FAST bidezko simulazioak azaltzen dira. Bertan azaltzen diren aldagaiak hurrengoak dira: haize-abiadura (1. grafika), haizearen eta errotorearen norabidea (2. grafika), pitch

angelua (3. grafika), errotorearen biratze-abiadura (4. grafika) eta aerosorgailuak jasotako potentzia aerodinamiko (5. grafika).



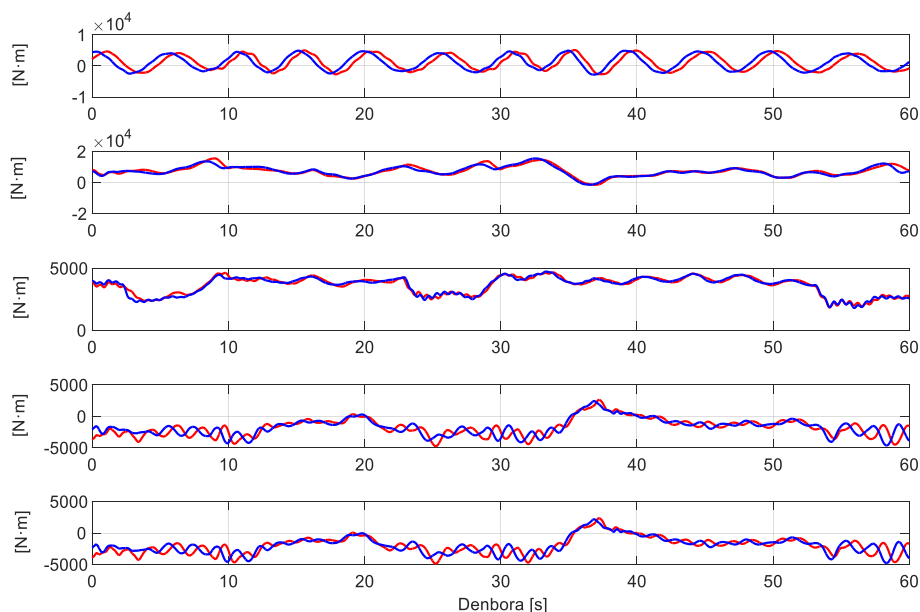
#### 60. Irudia. Hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategia. Aerosorgailuaren operazioa 4. kasuan

60. Irudian ere bi kasu aztertu dira: Batean (urdinez) yaw kontrola ez dago aktibo. Bestean (gorriz), aktibo dago, baina nahiz eta aktibo egon, ez dago yaw errotaziorik. Azkeneko 3 grafikak aztertuz, yaw sistemaren aktuazioak NREL 5MW aerosorgailuaren operazioan duen eragina behatu daiteke:

- Yaw kontrola aktibo dagoen kasuan ere ez da yaw errotaziorik gertatzen. Ondorioz, errotorearen biratze-abiadura, pitch angelua eta sortutako potentzia yaw kontrola aktibo ez dagoen kasuaren balio berdinekoak dira.
- Ez da potentzia irabazirik lortzen.
- Yaw errotazioaren eraginez potentzia elektrikoan eragindako oszilazioak guztiz desagertzen dira.

61. Irudian karga mekanikoen azterketa aurkezten da. Bertan erakutsitako aldagaiak hurrengoak dira: palen erroan x ardatzarekiko eragindako momentu

mekanikoa (1. grafika), palen erroan y ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa (2. grafika), dorrearen basean y ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa (3. grafika), potentzia transmisio ardatzean z ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa (4. grafika) eta yaw sistemaren rodamentuan z ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa (5. grafika).



**61. Irudia.** Hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategia. Karga analisis 4. kasuan

61. Irudian aurkeztutako grafikak aztertuz gero, elementu estrukturalen karga mekanikoetan inongo eraginik ez dagoela ondoriozta daiteke. Emaitza hau bat dator 13. Taulan jasotakoarekin.

#### 4.1.3 Emaitzen Konparaketa

Ikerkuntza lan honetan, bi ML bidezko yaw kontrol estrategia aztertu dira: Oinarrizko ML bidezko yaw kontrol estrategia 4.1.1 atalean eta hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategia 4.1.2 atalean. Horrez gain, atal honetan, proposatutako kontrol estrategiekin haize kasu bakoitzean lortutako emaitzen arteko konparaketa egingo da. Horretarako, aerosorgailuak lortutako potentzia irabaziaren eta yaw sistemaren rodamentuan eragindako momentu mekanikoaren balioak jaso dira 14. Taulan, yaw kontrol estrategia bakoitza erabilia.

14. Taula. Proposatutako ML bidezko yaw kontrol estrategiekin lortutako emaitzak

Kasua	Oinarrizko ML estrategia		Hobetutako ML estrategia	
	Potentzia irabazia [%]	Momentu mekanikoa [N·m]	Potentzia irabazia [%]	Momentu mekanikoa [N·m]
1. Kasua	47.83	$5.185 \cdot 10^5$	42.64	$3.657 \cdot 10^5$
2. Kasua	27.43	$3.325 \cdot 10^5$	21.86	$8.317 \cdot 10^4$
3. Kasua	13.92	$5.114 \cdot 10^5$	12.92	$1.533 \cdot 10^5$
4. Kasua	0	$5.609 \cdot 10^5$	0	0
5. Kasua	0	$8.308 \cdot 10^5$	0	0
6. Kasua	32.5	$4.487 \cdot 10^5$	19	$1.227 \cdot 10^5$

Ikus daitekeenez, 14. Taulan jasotako emaitzak bat datoz 4.1.1 eta 4.1.2 ataletan azaldutako simulazio emaitzekin. 14. Taulan zein simulazioetan ikusitakoaren arabera, 2. haize kasuan posible da aerosorgailuak potentzia irabazia lortzea. Honen arrazoia hurrengoa da: haize-abiaduraren balioa oso altua ez izanik, aerosorgailua ez da potentzia izendatuko eremuan egongo, eta haize-norabidearen eta aerosorgailuaren errotorearen arteko desbiderapen batek potentzia galera sortuko du. Galera hori berreskuratu ahal izango litzateke yaw sistema erabilia. Era berean, bai 14. Taulan bai simulazioetan ikusitakoaren arabera, 4. haize-kasuan aerosorgailuak ez du lortuko potentzia irabazi nabarmenik. Honen arrazoia zera da: Haize-abiaduraren balioa altua izanik, haize-norabidearen eta errotorearen arteko desbiderapen handiak besterik ez du potentzia galera sortuko. Kasu honetan desbiderapena handia ez denez, aerosorgailuak, nahiz eta yaw sistema erabili errotorea egoki orientatzeko, ez du potentzia irabazirik lortuko.

Yaw sistemaren rodamentuan eragindako karga mekanikoei erreparatuz gero, hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategiekin karga mekanikoak nabarmen murriztu direla ikusi daiteke. Bi estrategiekin lortutako emaitzen arteko konparaketa 15. Taulan jaso da.



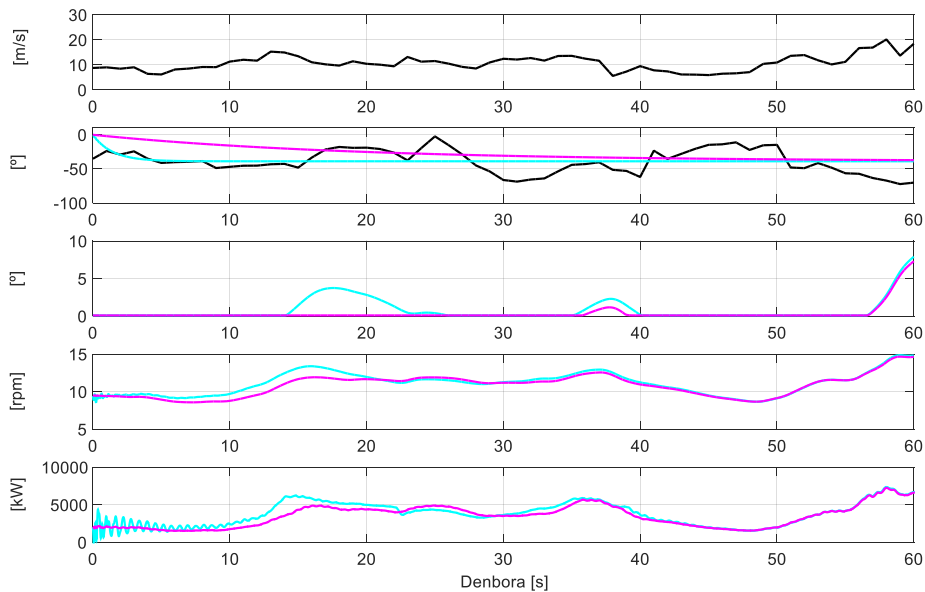
15. Taula. Proposatutako ML bidezko yaw kontrol estrategiekien lortutako emaitzen arteko konparaketa

Kasua	$\Delta$ Potentzia irabazia [%]	$\Delta$ Momentu mekanikoa [%]
1. Kasua	-5.19	-29.45
2. Kasua	-5.57	-74.99
3. Kasua	-1	-70.08
4. Kasua	0	-100
5. Kasua	0	-100
6. Kasua	-13.5	-72.65

15. Taulan jasotako emaitzen arabera, hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategia erabilia momentu mekanikoaren murrizketa oso garrantzitsuak lortu daitezke. Gainera, karga mekanikoen murrizketarekin alderatuz gero, hobetutako strategiarekin lortzen den potentzia irabazi txikiagoa ez da inondik inora ere adierazgarria. Hori dela eta, hurrengo lerroetan, aurretik 4.1.1 atalean eta 4.1.2 atalean aztertutako bi kasuetarako FAST kode aeroelastikoarekin egindako simulazioen konparaketa eskainiko da.

**2. kasua: HaizeAbiadura=10.73 m/s , YawAngelua=38.8°**

Aerosorgailuaren operazio eta potentzia sorkuntzari dagokienean, 62. Irudian azaltzen diren aldagaiak hurrengoak dira: haize-abiadura (1. grafika), haizearen eta errotorearen norabidea (2. grafika), pitch angelua (3. grafika), errotorearen biratze-abiadura (4. grafika) eta aerosorgailuak jasotako potentzia aerodinamikoa (5. grafika).



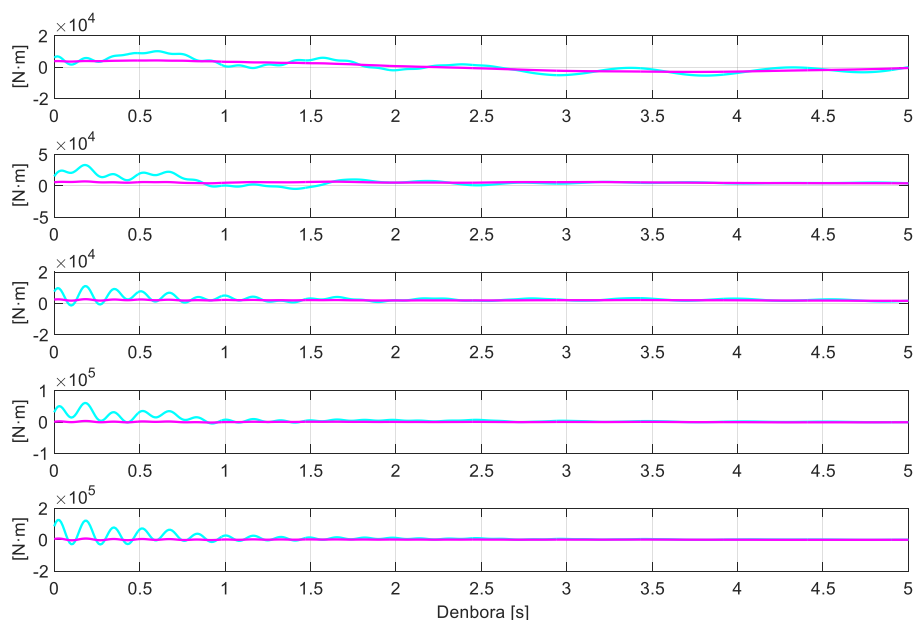
## 62. Irudia. Emaizten konparaketa. Aerosorgailuaren operazioa 2. kasuan

62. Irudian bi kasu aurkeztu dira: oinarrizko ML bidezko yaw kontrol estrategia (urdin argiz) eta hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategia (magentaz). Grafikoak aztertuz gero, kontrol estrategia bakoitzak NREL 5MW aerosorgailuaren operazioan duen eragina ikusi daiteke:

- Hobetutako estrategiak eragindako yaw errotaioa oinarrizko estrategiak eragindakoa baino askoz motelagoa da.
- Bi kasuetan, errotoarearen biratze-abiadura eta sortutako potentzia elektrikoa oso berdintsuak dira.
- Hobetutako estrategiarekin oinarrizko estrategiarekin baino pitch aktuazio txikiagoa lortzen da. Ondorioz, pitch aktuazio sisteman karga mekanikoak murriztea lortuko da.
- Yaw errotaioaren eraginez potentzia elektrikoan sortutako oszilazioak asko murriztu daitezke hobetutako yaw kontrol estrategia erabilita.

63. Irudian yaw kontrol estrategia bakoitzarekin elementu estrukturaletan eragindako karga mekanikoen simulazio emaitzak aurkezten dira. Erakutsitako aldagaiak hurrengoak dira: palen erroan x ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa (1. grafika), palen erroan y ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa (2. grafika), dorrearen basean y ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa (3. grafika), potentzia transmisio ardatzean z ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa (4. grafika) eta yaw sistemaren rodamentuan z ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa (5. grafika).

Gainera, hobetutako ML bidezko yaw kontrol strategiarekin lortutako karga mekaniko murrizketa hobeto ikusi ahal izateko, simulazioaren lehenengo 5 s irudikatu dira bakarrik 63. Irudian.

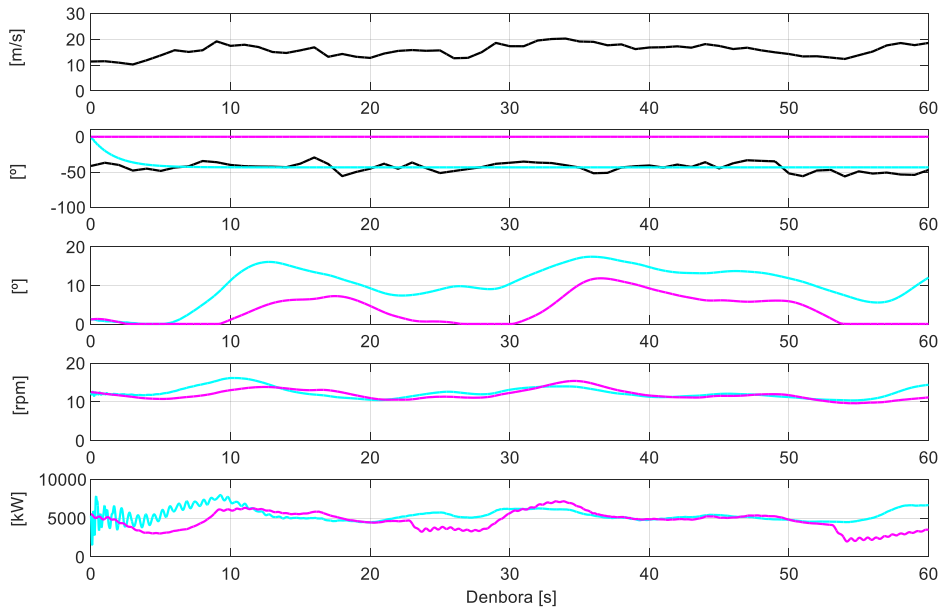


### 63. Irudia. Emaitzen konparaketa. Karga analisia 2. kasuan

Konparaketa grafikoa aztertu ondoren, hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategia erabilia elementu estruktural guztietan eragindako momentu mekanikoak murriztu daitezkeela ikusten da. Murrizketa hau batez ere esanguratsua da yaw sistemaren rodamentuan eta potentzia transmisio ardatzean. Hala eta guztiz ere, dorrean eta paletan eragindako momentu mekanikoak ere txikitzen direla antzematen da 63. Irudian.

**4. kasua: HaizeAbiadura=15.7 m/s , YawAngelua=43.4°**

Aerosorgailuaren operazio eta potentzia sorkuntzari dagokienean, 64. Irudian azaltzen diren aldagaiak honako hauek dira: haize-abiadura (1. grafika), haizearen eta errotorearen norabidea (2. grafika), pitch angelua (3. grafika), errotorearen biratze-abiadura (4. grafika) eta aerosorgailuak jasotako potentzia aerodinamikoa (5. grafika).



**64. Irudia.** Emaitzen konparaketa. Aerosorgailuaren operazioa 4. kasuan

64. Irudian erakutsitako simulazio emaitzetan ere bi kasu irudikatu dira: oinarritzko ML bidezko yaw kontrol estrategiarekin lortutako emaitzak (urdin argiz) eta hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategiarekin lortutako emaitzak (magentaz). Grafikoak aztertuz gero, kontrol estrategia bakoitzak NREL 5MW aerosorgailuaren operazioan duen eragina ikus daiteke:

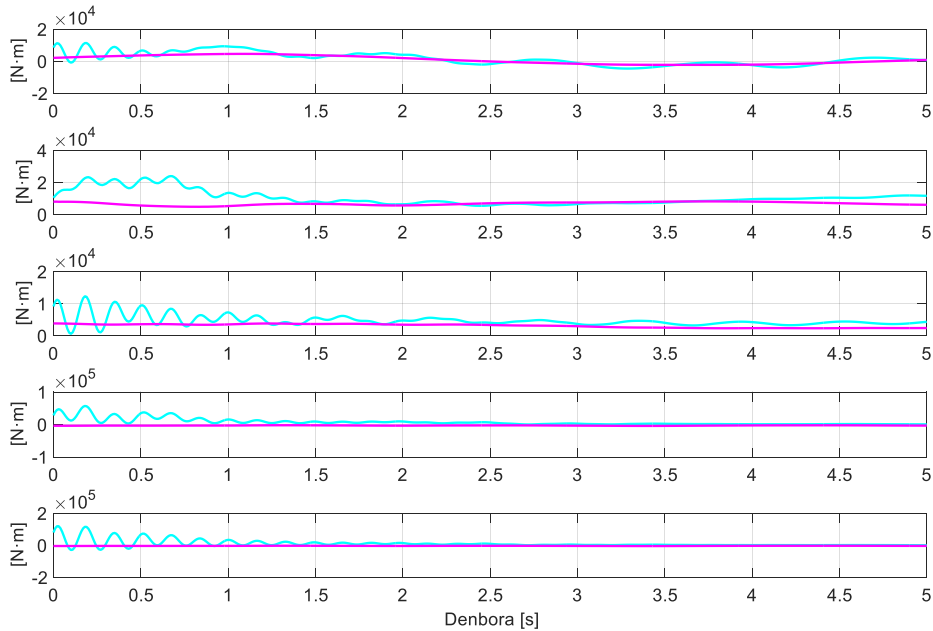
- Hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategia erabiltzean, ez dago yaw errotaziorik. Oinarritzko ML bidezko yaw kontrol estrategiarekin, berriz, bai.
- Bi kasuetan, errotorearen biratze-abiadura eta sortutako potentzia balioak berdintsuak dira. Hobetutako strategiaren kasuan haize-

abiaduraren jaitsierak eragindako potentzia-murrizketa puntualak ikusten dira.

- Hobetutako estrategiarekin aerosorgailua potentzia partzialeko eremura pasatzen da une jakinetan. Oinarrizko estrategiarekin aerosorgailua potentzia izendatuko eremuan dago uneoro. Pitch aktuazioa antzerakoa da bi kasuetan.
- Yaw errotazioa dela eta potentzia elektrikoan eragindako oszilazioak guztiz ezabatzen dira hobetutako kontrol estrategia erabilia

65. Irudian yaw kontrol estrategia bakoitzarekin elementu estururaletan eragindako karga mekanikoen simulazio emaitzak aurkezten dira. Erakutsitako aldagaiak hurrengoak dira: palen erroan x ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa (1. grafika), palen erroan y ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa (2. grafika), dorrearen basean y ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa (3. grafika), potentzia transmisio ardatzean z ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa (4. grafika) eta yaw sistemaren rodamentuan z ardatzarekiko eragindako momentu mekanikoa (5. grafika).

Kasu honetan ere, hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategiarekin lortutako karga mekaniko murrizketa hobeto ikusi ahal izateko, simulazioaren lehenengo 5 s irudikatu dira bakarrik 65. Irudian.



### 65. Irudia. Emaizten konparaketa. Karga analisia 4. kasuan

65. Irudia aztertu eta gero atera daitezkeen ondorioak 63. Irudiarekin ateratakoak bezalakoak dira. Hau da, karga mekanikoei dagokienean, hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategiarekin elementu estruktural guztietan eragiten diren momentu mekanikoak txikitzen dira. Murrizketa hau batez ere esanguratsua da yaw sistemaren rodamentuan eta potentzia transmisio ardatzean.

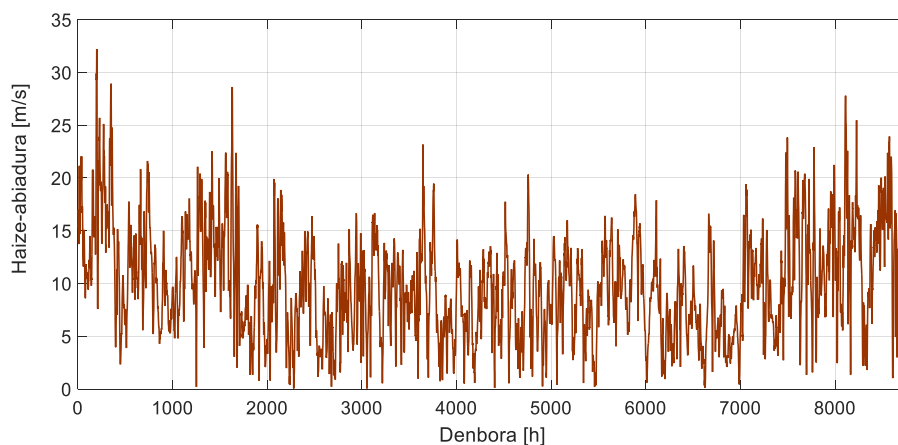
## 4.2 FLUXU KONTROLA AEROSORGAILUEN PALETAN

Hainbat fluxu kontrol estrategiek ardatz horizontaleko NREL 5MW aerosorgailuaren operazioan eta potentzia sorkuntzan zer eragin duten aztertzeko egindako analisiaren emaitzak azalduko dira atal honetan. Lehenik, fluxu kontrol gailu pasiboetan oinarritutako estrategia batek NREL 5MW aerosorgailuan duen eragina aztertuko da 4.2.1 atalean. Hurrena, teknika adimentsuak erabiltzen dituen fluxu kontrol gailu aktiboetan oinarritutako AGF estrategiak aerosorgailu berdinean duen eragina aztertuko da 4.2.2 atalean.

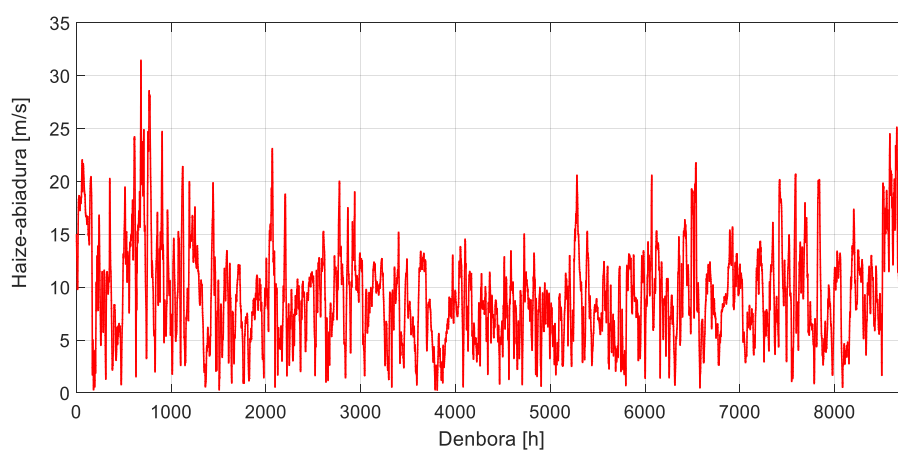
### 4.2.1 Fluxu Kontrol Pasiboa

Fluxu kontrol gailu pasiboetan oinarritutako estrategia batek NREL 5MW ardatz horizontaleko aerosorgailuaren operazioan eta AEPn duen eragina aztertuko

da atal honetan. Horretarako, bi urte osori (2015. urtea eta 2016. urtea) dagozkien haize-abiadura datu errealak erabiliko dira emaitzak lortzeko, ikusi 66. Irudia eta 67. Irudia.



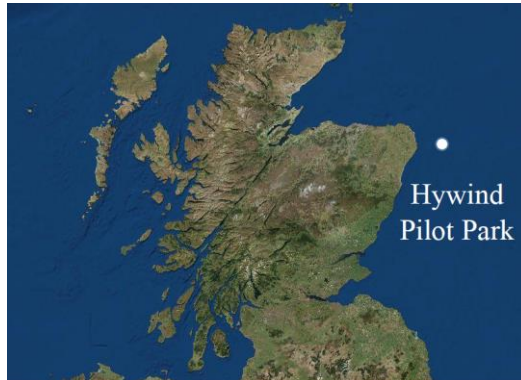
**66. Irudia.** 2015. urteko haize-abiadura datuak



**67. Irudia.** 2016. urteko haize-abiadura datuak

Haize-abiadura datu hauek 2015. urtean eta 2016. urtean zehar Hywind parke eolikoa kokatzekoa den gunean erregistratutako haize datuak dira. 68. Irudian erakutsi bezala, Eskoziako kostatik gertu instalatzekoa den parke eoliko bat da Hywind, zein 6 MWko potentzia izendatua duten 5 aerosorgailuz osatuta

egongo den. Bertan instalatzekoak diren aerosorgailuen fabrikatzailea Siemens Gamesa da.



**68. Irudia.** Hywind parke eolikoaren kokapena

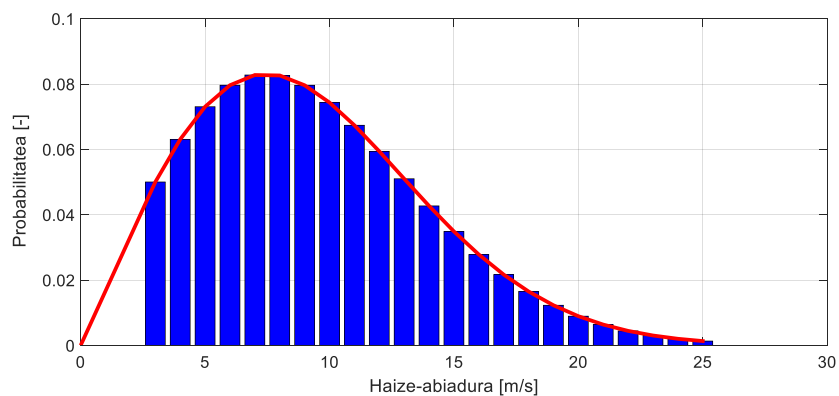
Parke eolikoaren kokapen zehatza definitzen duten koordenatuak  $[57.484^\circ, -1.363^\circ]$  dira. Koordenatu hauek erabilita, “NASA Earth” datu-baseak [200] puntu geografiko honi dagozkion haize-abiadura balioak jasotzeko aukera ematen du, hainbat altueratarako eta hainbat denbora-tarteren batezbestekoak eginda. Altuerari dagokionez, 2 m, 10 m eta 50 m-ra erregistratutako haize-abiadura balioak aurki daitezke datu-basean. Denbora-tarteei dagokienez, 1 h, 3 h edota 1 hilabeteko batezbesteko haize-abiadura balioak lor daitezke.

Kasu honetan, NREL 5MW aerosorgailuaren altuera 90 m-koa izanik, ikusi 1. Taula, beharrezkoa da datu-basetik deskargatutako haize-abiadura datuak 90 m-ko altuerara estrapolatzea. 3.2.1 atalean azaldu bezala, hainbat estrapolazio metodo erabil daitezke horretarako. Orohar, Hellman-en lege esponentziala, ikusi Ek. (46), 100 m-tik gorako altueratarako erabiltzen da eta lege logaritmikoa, ikusi Ek. (45), 20 m inguruko altueratarako. NREL 5MW aerosorgailuaren errotoarearen altuera 90m-koa izanik, Hellman-en lege esponentziala erabiliko da kasu honetan haize-abiadura balioen estrapolaziorako.

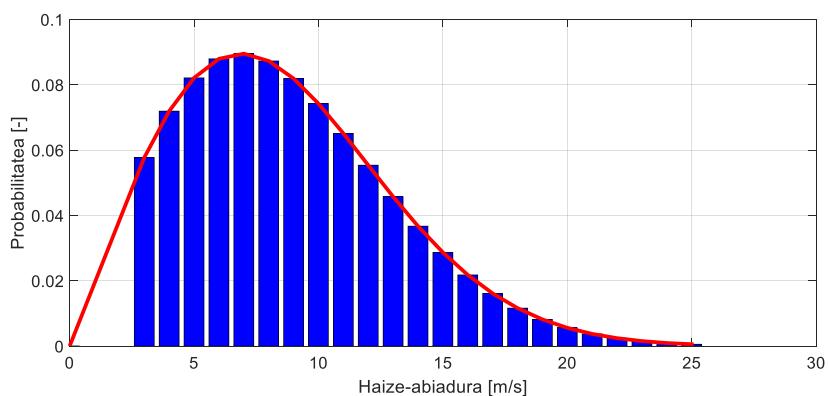
Behin haize-abiadura balioak altuera berrira estrapolatuta, 3.2.1 atalean proposatutako PDF funtzioa erabiliko da, ikusi Ek. (47), urte bakoitzeko haize-abiadura balioen probabilitateak kalkulatzeko. Ondorioz lortutako urte bakoitzeko Weibull diagramak 69. Irudian eta 70. Irudian daude ikusgai, hurrenez hurren. 2015. urteko haize-abiadurari dagokion Weibull diagrama lortzeko  $k=2$  forma parametroa eta  $c=10.305$  m/s eskala parametroa kontsideratu dira. Era berean,



2016. urteko haize-abiadurari dagokion Weibull diagrama lortzeko  $k=2$  forma parametroa eta  $c=11.18$  m/s eskala parametroa erabili dira.



**69. Irudia.** 2015. urteko haize-abiaduraren Weibull distribuzioa

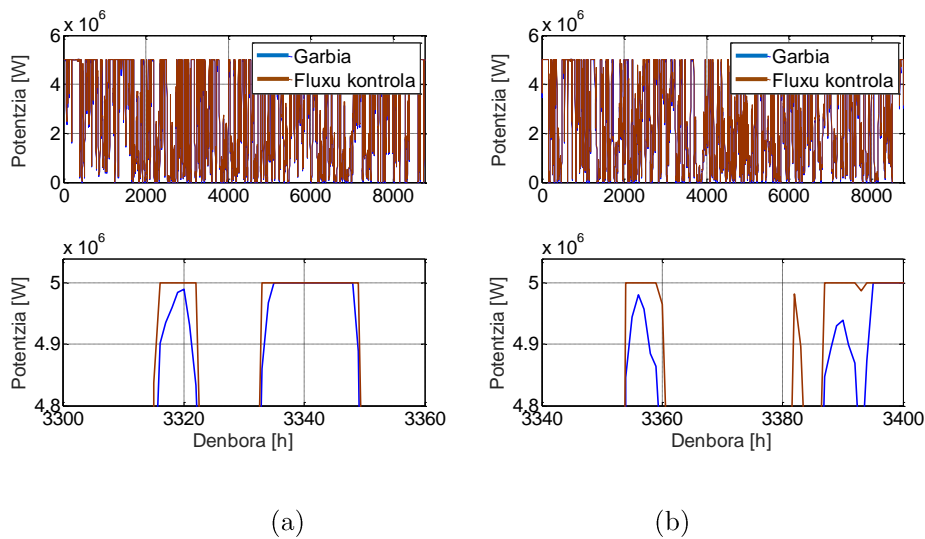


**70. Irudia.** 2016. urteko haize-abiaduraren Weibull distribuzioa

69. Irudian eta 70. Irudian irudikatutako Weibull diagramek erakusten dute 2015. urtean zein 2016. urtean sarrien jaso diren haize-abiadurak 7 m/s ingurukoak direla. Gainerako haize-abiadura balioei dagokienez, Weibull diagramen arabera, 2016. urtean aerosorgailuaren potentzia sorkuntza partziala eragingo duten haize-abiadura balioak izateko probabilitatea 2015. urtean baino handiagoa da. Era berean, aerosorgailuaren potentzia sorkuntza izendatua eragingo duten haize-abiadura balioak sarriagoak dira 2015. urtean 2016. urtean baino.

Ondoren, fluxu kontrol gailu pasiboek aerosorgailuaren operazioan duten eragina aztertzeko, operazio hau ebaluatzeko oso garrantzitsuak diren honako hiru aldagai hauek aztertuko dira: Aerosorgailuak sortutako potentzia, aerosorgailuaren errotorean sortutako “thrust” indarra eta aerosorgailuen palen erroetan eragindako BM. Horretarako, 3.2.1 atalean azaldutako BEM kodean oinarritutako kalkuluak erabiliko dira.

Aztertutako urte bakoitzean aerosorgailuak sortutako potentzia irudikatu da 71. Irudian, bai fluxu kontrol gailu pasiboak erabiliz eta bai fluxu kontrol gailu pasiborik gabe ere.



**71. Irudia.** Fluxu kontrol pasiboa. Sortutako potentzia (a) 2015. urtean (b) 2016. urtean

Ikus daitekeenez, fluxu kontrol gailu pasiboak erabilita aerosorgailuak sortutako potentzia handitu daiteke, betiere sistema potentzia izendatuko eremuan ez dagoenean. Ondorioz, aerosorgailuaren AEP hazi egingo da.

Aztertutako urte bakoitzean aerosorgailuaren AEP kalkulatzeko honako hauek erabiliko dira: aerosorgailuaren potentzia kurbak, ikusi 41. Irudia, eta urte bakoitzeko haize-abiaduraren Weibull diagramak, ikusi 69. Irudia eta 70. Irudia. AEPren kalkulua Ek. (48) eta Ek. (49)-n aurkeztutako adierazpenetan oinarrituko da. Lortutako emaitzak 16. Taulan daude ikusgai.

**16. Taula.** Fluxu kontrol pasiboa. AEPren konparaketa

	2015		2016	
	AEP [W · h]	Δ AEP [%]	AEP [W · h]	Δ AEP [%]
Pala garbia	$2.4708 \cdot 10^{10}$	-	$2.4371 \cdot 10^{10}$	-
Fluxu kontrol pasiboa	$2.5309 \cdot 10^{10}$	2.4329	$2.5023 \cdot 10^{10}$	2.6773

16. Taulan jasotako emaitzek erakusten dutenez, fluxu kontrol gailuak erabilia NREL 5MW aerosorgailuaren AEP % 2.4329 handituko litzateke 2015. urtean eta % 2.6773 2016. urtean. Fluxu kontrol gailuen instalazio kosteak txikiak direla kontuan hartuz, urteko potentzia sorkuntzen hazkuntzak oso garrantzitsuak dira bi kasuetan.

Aerosorgailu batek edota parke eoliko batek sortutako potentzia elektrikoak hainbat helburu izan ditzake. Jatorriz, parke eolikoaren betebeharra merkatu elektrikoan saltzeko energia elektrikoaren sortzea izan da. Hala ere, gaur egun, merkatu elektrikoan konektatu gabe funtzionatzen duten aerosorgailuak ere badaude. Sorgailu eoliko hauek norberaren beharrak asetu edota beste aplikazio batzuetarako energia sor dezakete. Aplikazio hauetako bat hidrogeno bidezko kotxeak elikatzeko hidrogeno sorkuntza da. Eta honek berebiziko garrantzia du, izan ere, etorkizun hurbilean oso balagarria izan daiteke hidrogeno bidezko automobil elektrikoaren garapenerako.

Kasu honetan, NREL 5MW aerosorgailua merkatu elektrikoan energia saltzera bideratuta dagoela kontsideratuz gero, urtean lortu daitezkeen irabazi ekonomikoak kalkulatu daitezke, ikusi 17. Taula. Horretarako, energiaren 3 ct/ kW · h eta 5 ct/ kW · h prezioak definitu dira. Ikus daitezkeenez, koste ekonomiko oso txikia duten fluxu kontrol gailuak erabilia, urteko irabazi ekonomiko handiak lor daitezke, aerosorgailuaren hasierako inbertsioa zein LCOE murrizten lagunduko dutenak.

**17. Taula.** Fluxu kontrol pasiboa. Irabazi ekonomikoak.

	2015. urtea	2016. urtea
3 ct/kW · h	18030 €	30050 €
5 ct/kW · h	19575 €	32625 €

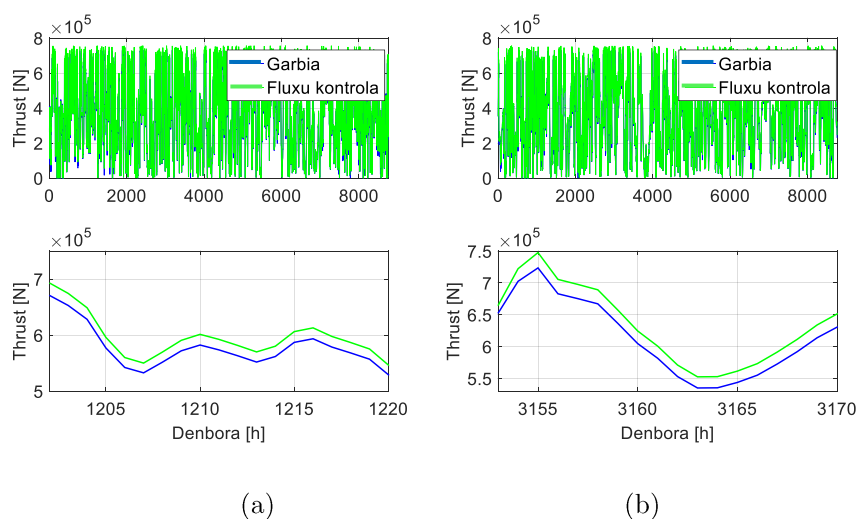
Era berean, NREL 5MW aerosorgailua hidrogeno sorkuntzara bideratuta dagoela kontsideratuz gero, fluxu kontrolaren bidez sortu daitezkeen hidrogeno bolumen gehigarriak erakusten dira 18. Taulan. Kalkuluak egiteko McPhy konpainiaren McLyzer 400-30 eskala handiko elektrolizatzaile komertziala erabili da. Elektrolizatzaile hau Hebei, Txinan kokatutako “Power to Gas” motako 4 MW-ko parke eoliko batean erabiltzen da gaur egun [201]. Elektrolizatzaile honen kontsumoa  $4.5 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{Nm}^3$ -koa da.

18. Taula. Fluxu kontrol pasiboa. Hidrogeno sorkuntza

	2015		2016	
	Hidrogenoa [Nm <sup>3</sup> ]	$\Delta$ Hidrogenoa [Nm <sup>3</sup> ]	Hidrogenoa [Nm <sup>3</sup> ]	$\Delta$ Hidrogenoa [Nm <sup>3</sup> ]
Pala garbia	$5.4907 \cdot 10^6$	-	$5.4158 \cdot 10^6$	-
Fluxu kontrol pasiboa	$5.6242 \cdot 10^6$	133500	$5.5607 \cdot 10^6$	144998

18. Taulan jasotako emaitzen arabera, hidrogeno bolumen gehigarri handiak lortu daitezke fluxu kontrol gailu pasiboak erabilita. Bolumen hauei esanahi konkretuago bat emateko, lortutako hidrogeno bolumen gehigarri horiekin gutxi gorabehera urtean hidrogenozko 1 milioi automobilen 100 km bete ahal izango liriteke. Karbono emisiorik gabeko hidrogeno bidezko automobilgintzarentzat bultzakada ikaragarria izango litzateke hidrogeno sorkuntza hobetu hau.

Bestalde, fluxu kontrol gailu pasiboak erabilita lortutako potentzia irabaziaz gain, errotorean sortutako “thrust” indarra eta palen erroan eragindako BM ere aztertuko dira. “Thrust” indarrak zein BMk aerosorgailuaren zenbait elementutan karga mekanikoak handitzea ekarriko dute. 72. Irudian aztertutako urte bakoitzean errotorean sortutako “thrust” indarra dago ikusgai, pala garbiaren zein fluxu kontrol pasiboaren kasuan.



72. Irudia. Fluxu kontrol pasiboa. “Thrust” indarra (a) 2015. urtean (b) 2016. urtean

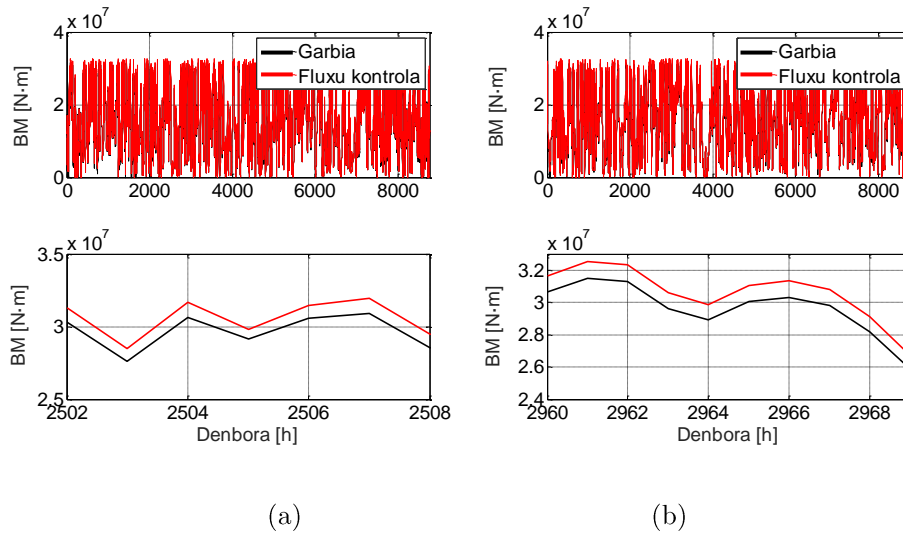
Urte osoko batezbesteko “thrust” indarrean balioak 19. Taulan jaso dira.

19. Taula. Fluxu kontrol pasiboa. “Thrust” indarraren konparaketa

	2015		2016	
	Thrust [N]	$\Delta$ Thrust [%]	Thrust [N]	$\Delta$ Thrust [%]
Pala garbia	$3.3176 \cdot 10^5$	-	$3.3935 \cdot 10^5$	-
Fluxu kontrol pasiboa	$3.3634 \cdot 10^5$	1.3812	$3.4425 \cdot 10^5$	1.4434

19. Taulan ikus daitekeenez, fluxu kontrol gailu pasiboak erabilia, aztertutako bi urteetan “thrust” indarraren batezbesteko balioa hazi egiten da. Hazkunde honen eragin nabarmenena aerosorgailuaren dorrearen karga mekanikoen areagotzea izango da. Hala eta guztiz ere, fluxu kontrol gailuak erabilia lortutako potentzia irabazia kontuan izanik, “thrust” indarraren hazkundera ez da fluxu kontrol estrategiaren erabilera baztertzea erabakitze bezain esanguratsua.

73. Irudian aztertutako urte bakoitzean aerosorgailuaren palen erroan sortutako BM dago ikusgai, pala garbiaren zein fluxu kontrol pasiboaren kasuan.



73. Irudia. Fluxu kontrol pasiboa. BM (a) 2015. urtean (b) 2016. urtean

Urte osoko batezbesteko BMren balioak 20. Taulan jaso dira.

20. Taula. Fluxu kontrol pasiboa. BMren konparaketa

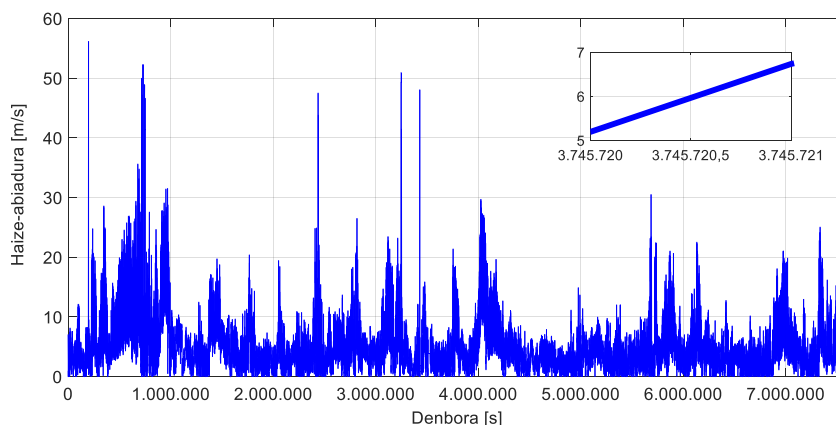
	2015		2016	
	BM [N · m]	$\Delta$ BM [%]	BM [N · m]	$\Delta$ BM [%]
Pala garbia	$1.4169 \cdot 10^7$	-	$1.4692 \cdot 10^7$	-
Fluxu kontrol pasiboa	$1.4290 \cdot 10^7$	0.8543	$1.4547 \cdot 10^7$	0.9968

20. Taulan jasotako balioek erakusten dutenez, fluxu kontrol gailu pasiboak erabilia, aztertutako bi urteetan palen erroan eragindako BMren batezbesteko balioa hazi egiten da. Ondorioz, aerosorgailuaren paletan eragindako karga mekanikoak ere handitu egingo dira. Kasu honetan ere, “thrust” indarraren batezbesteko balioaren hazkuntzaren kasuan bezala, fluxu kontrol gailuen erabilerarekin lortutako potentzia irabazia kontuan izanik, BMren hazkundera ez da fluxu kontrol strategiaren erabilera baztertzeko bezain garrantzitsua.

#### 4.2.2 AGF Fluxu Kontrol Aktiboa

Fluxu kontrol gailu aktiboetan oinarritutako estrategia batek NREL 5MW ardatz horizontaleko aerosorgailuaren jardueran zer-nolako eragina duen aztertuko

da atal honetan. Gainera, fluxu kontrol estrategia aktibo honek gailu berdinetan oinarritutako estrategia pasibo baten aurrean eskaintzen dituen abantailak ere azalduko dira. Horretarako, lehendabizi, emaitzak lortzeko erabili diren haize-abiadura datuak deskribatuko dira, ikusi 74. Irudia.

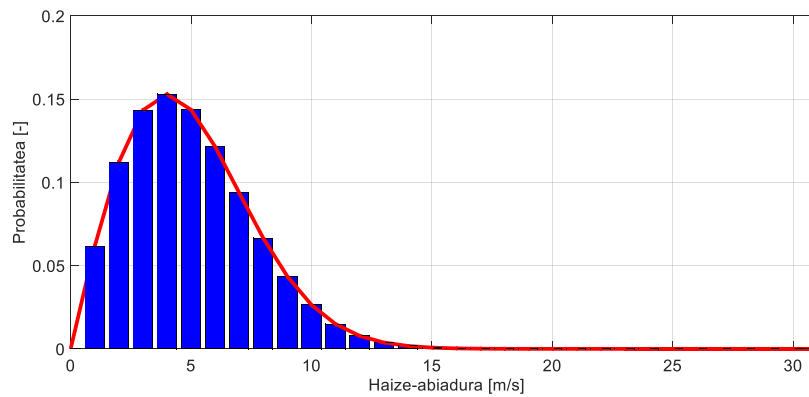


74. Irudia. Haize-abiadura datuak Salt Lake, Utah, AEBetan.

Aurretik 4.1 atalean erabilitako haize-abiadura eta norabidearen datuak bezala, 74. Irudian erakutsitako haize-abiadura datuak ere Salt Lake, Utah, AEBetako estazio meteorologiko batean kokatutako anemometro ultrasonikoen bidez lortu dira, 1 s-ko periodoarekin. Haize-abiadura datuak NREL 5MW aerosorgailuari aplikatu ahal izateko, datu hauek aerosorgailuaren altuera baliora bihurtu dira lege esponontziala erabiliz.

Garrantzia handikoa da analisi honetan 1 s periodoko haize-abiadura datuak izatea. Izan ere, proposatutako AGF strategiaren helburua haize-abiadura aldaketa azkarren aurrean erantzun eta palen jarduera aerodinamikoa hobetzea da. Hortaz, 4.2.1 atalean erabilitako 1h-eko batezbesteko haize-abiadura balioekin alderatuz, 1 s periodoko datuek analisi askoz egoki eta interesgarriagoa egiteko aukera emango dute.

Haize-abiadura balioak altuera berrira bihurtuta, 3.2.1 atalean proposatutako PDF funtzioa erabiliko da, ikusi Ek. (47), urte bakoitzeko haize-abiadura balioen probabilitateak kalkulatzeko. Ondorioz lortutako Weibull diagrama 75. Irudian dago ikusgai. Weibull diagrama hau lortzeko  $k=2$  forma parametroa eta  $c=5.615$  m/s eskala parametroa kontsideratu dira.



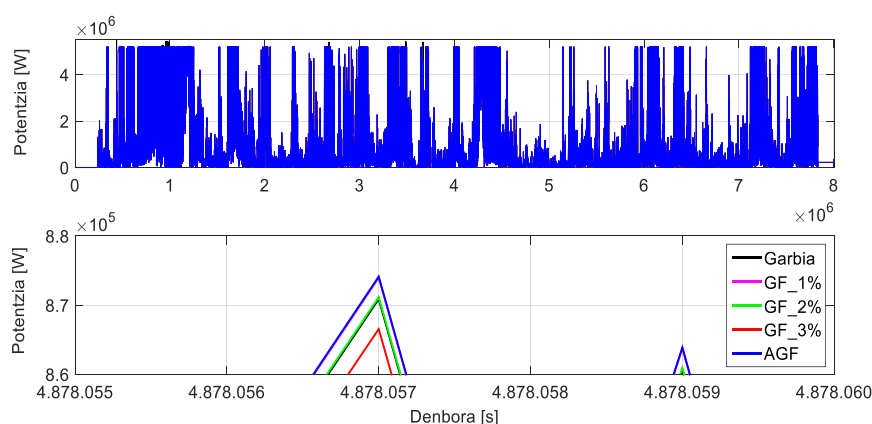
**75. Irudia.** Salt Lake, Utah, AEBetan neurtutako haize-abiadura datuen Weibull distribuzioa.

Ondoren, BEM kodea erabiliko da fluxu kontrol estrategiek NREL 5MW aerosorgailuaren operazioan duten eragina aztertzeko. Operazio hau ebaluatzeko hiru aldagai aztertuko dira: Aerosorgailuak sortutako potentzia, aerosorgailuaren errotorean sortutako “thrust” indarra eta aerosorgailuaren palen erroetan eragindako BM. Horretarako, 3.2.2 atalean proposatutako BEM kodea erabiliko da.

Gainera, AGF estrategiak GF pasiboen aurrean eskaintzen dituen onurak aztertzeko, 4 fluxu kontrol estrategia desberdin kontsideratu dira analisisian. Alde batetik, GF gailuen operazio aktiboan oinarritzen den AGF estrategia aztertuko da. Bestalde, 3 luzera desberdineko GF pasiboetan oinarritutako fluxu kontrol estrategiak ere izango dira aztergai. Azkenik, fluxu kontrolik gabeko kasua ere aztertuko da.

Kontsideratutako haize-abiadura profilarekin, aztertutako kasu bakoitzean aerosorgailuak sortutako potentzia irudikatu da 76. Irudian.





### 76. Irudia. AGF fluxu kontrol aktiboa. Sortutako potentzia

Gainera, kasu bakoitzari dagokion aerosorgailuaren potentzia kurba, ikusi 51. Irudia, eta haizearen Weibull diagrama ezagutua, ikusi 75. Irudia, aerosorgailuak sortutako energia kalkulatu daiteke. Horretarako Ek. (48) eta Ek. (49)-n aurkeztutako adierazpenak erabiliko dira. Lortutako emaitzak 21. Taulan daude ikusgai.

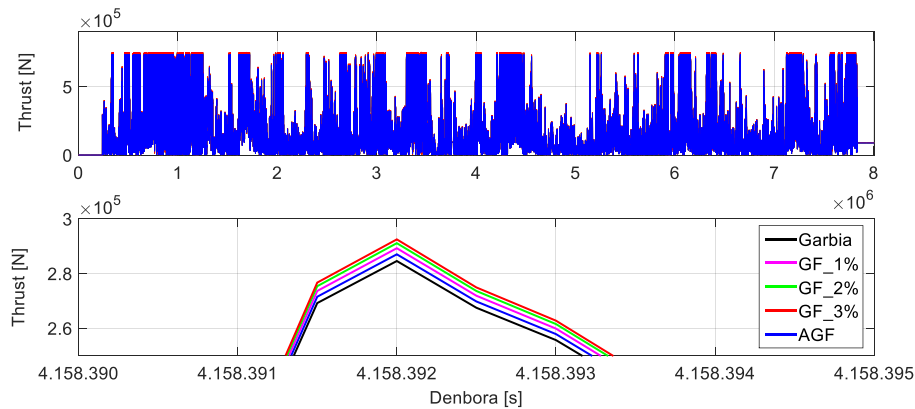
21. Taula. AGF fluxu kontrol aktiboa. Sorutako energia elektrikoaren konparaketa

Kasua	Energia [W · h]	$\Delta$ Energia [%]
Garbia	$2.1532 \cdot 10^9$	-
GF 1%	$2.2662 \cdot 10^9$	5.2477
GF 2%	$2.2604 \cdot 10^9$	4.9789
GF 3%	$2.2509 \cdot 10^9$	4.5395
AGF	$2.2665 \cdot 10^9$	5.2618

Ikus daitekeenez, AGF fluxu kontrol estrategiarekin eta % 1 luzerako GF pasiboekin lortutako energia irabazia berdina dela esan daiteke. Bi kasuetan % 5tik gorako energia irabaziak lortzen dira. Honek adierazten du % 1 luzerako GFa aerosorgailuaren potentzia partzialeko eremuan potentzia handitzeko diseinu onena dela. GF pasiboen luzera handitu ahala lortutako energia irabazia murriztu egiten

da. Energia irabazi txikiago hau palaren jardura aerodinamiko okerragoaren adierazle da.

Sortutako potentziaz gain, estrategia bakoitzak “thrust” indarrean eta BMan eragindako bilakaera ere aztertuko dira. Horretarako, kontsideratutako haize-abiadura profilarerkin eta aztertutako fluxu kontrol estrategia bakoitza erabilia, lortutako “thrust” indarra aurkezten da 77. Irudian.



77. Irudia. AGF fluxu kontrol aktiboa. “Thrust” indarra

Aerosorgailuaren errotorean sortutako “thrust” indarraren batezbesteko balioen konparaketa 22. Taulan aurkitu daiteke.

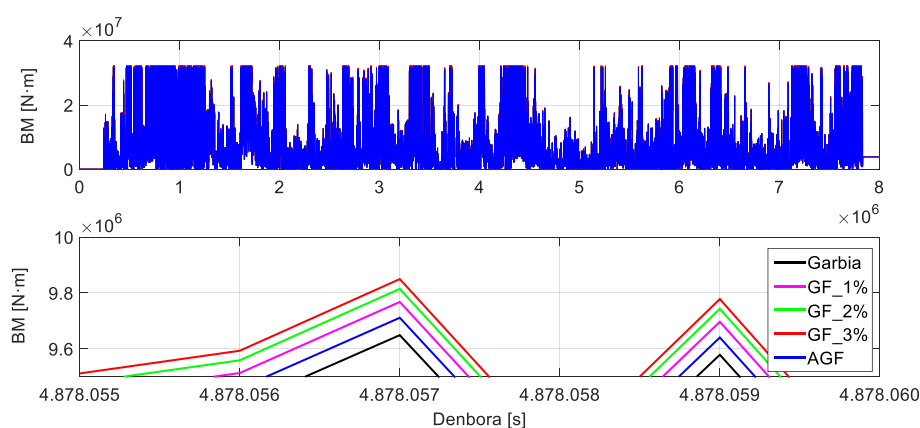
22. Taula. AGF fluxu kontrol aktiboa. “Thrust” indarraren konparaketa

Urtea	Thrust [N]	$\Delta$ Thrust [%]
Garbia	$1.5497 \cdot 10^5$	-
GF 1%	$1.5697 \cdot 10^5$	1.2872
GF 2%	$1.5783 \cdot 10^5$	1.8405
GF 3%	$1.5867 \cdot 10^5$	2.3854
AGF	$1.5596 \cdot 10^5$	0.6346

Ikus daitekeenez, AGF estrategia erabilia “thrust” indarraren hazkuntza asko murriztea lortzen da. Izan ere, proposatutako AGF estrategiak GF luzera [%] moldatzen duenez, potentzia sorkuntza handitzea posible ez denean arraste-indarra

txikitzen da. Hau oso erabilgarria suertatu daiteke haize-bolada oso azkarretan edota aerosorgailuaren potentzia izendatuko eremura trantsizioetan.

Azkenik, kontsideratutako haize-abiadura profilarekin eta aztertutako fluxu kontrol estrategia bakoitza erabilia, lortutako BM aurkezten da 78. Irudian.



78. Irudia. AGF fluxu kontrol aktiboa. BM

Aerosorgailuaren palen erroan eragindako BMren batezbesteko balioen konparaketa 23. Taulan aurki daiteke.

23. Taula. AGF fluxu kontrol aktiboa. BMren konparaketa

Urtea	BM [N · m]	$\Delta$ BM [%]
Garbia	$6.6963 \cdot 10^6$	-
GF 1%	$6.7398 \cdot 10^6$	0.6495
GF 2%	$6.7633 \cdot 10^6$	1.0006
GF 3%	$6.7846 \cdot 10^6$	1.3176
AGF	$6.7038 \cdot 10^6$	0.1111

“Thrust” indarrarekin gertatu bezala, AGF estrategia erabilia palen erroan eragindako BM asko murriztea lortu da. “Thrust” indarrean zein BMan lortutako murrizketa hauek, batez ere aerosorgailuaren dorrean eta paletan karga mekanikoak asko txikitzea eragingo dute, hurrenez hurren. Ondorioz, elementu mekaniko hauen biziraupena handitu edota beren diseinua ekonomikoago bat egitea

posible egitea izango da. Edozein kasutan ere, aerosorgailuaren LCOE murriztea lortuko da.

## 5. Kapituluia

# Eztabaida

---

Energia berriztagarrien garaia abian da eta etorkizunak energia-iturri iraunkorretan oinarritutako sorkuntza sistemen garapenerako ateak guztiz zabalduko ditu. Gainera, energia-kontsumoa pertsona bakoitzeko etengabe handitzen ari den gizarte batean, Lurrak, bizirik mantendu ahal izateko, inoiz baino gehiago behar izango ditu energia berriztagarrietan oinarritutako sorkuntza sistemak.

Erregai-fosilak atzean utzi eta energia berriztagarrietara trantsizioa ahalik eta azkarren gertatzeko, garrantzi handikoa izango da ikerkuntza lana. Lan hori energia-iturri iraunkorretan oinarritutako sorkuntza sistemen garapenera bideratu behar da. Izan ere, garapen horri esker lortuko da sistema berriztagarrien instalazioa bultzatuko duen energiaren prezioaren edo LCOEren murrizketa.

Energia eolikoaren kasuan, esaterako, azken urteotan izugarri garatu da aerosorgailuen diseinu eta fabrikazio prozesua. Horren adibide dira gaur egun merkatuan saltzen diren aerosorgailuak, 10 MW-tik gorako potentzia izendatua dutenak. Orain dela 20 urte pentsaezina zen horren potentzia handiko sistemak

diseinatu ere egin ahal izatea. Aerosorgailu berri hauen dorreak askoz altuagoak dira eta palen luzera bikoiztu ere egin da. Gainera, zalantzarik ez dago etorkizuneko aerosorgailuak oraindik ere potentzia handiagokoak izango direla. Baina, bestalde, kontuan izan behar da potentzia elektriko handiagoa sortzeko asmoz, dorrearen edota palen luzera handitzeak fabrikazio prozesuaren koste ekonomiko handiagoa dakarrela. Gainera, aerosorgailuen elementu estrukturalen dimentsioak handitzean, hauetan eragiten diren karga mekanikoak ere handitu egiten dira. Ondorioz, diseinu prozesua kontu handiz egin ezean, aerosorgailuen elementu estrukturalak hautsi egin daitezke, eta haustura hauen eraginez, LCOEren balioa handitu egingo litzateke. Izan ere, aerosorgailuak gelditu egin beharko liriateke.

Hori guztia dela eta, ikerkuntza lan honetan proposatutako kontrol estrategiak testuinguru honetan kokatzen dira, hots, helburua ardatz horizontaleko aerosorgailu baten LCOE murriztea da. Horretarako, aerosorgailuak sortutako potentzia elektrikoa handitzeaz gain, karga mekanikoak txikitzea ere bilatu da. Gainera, lan honetan proposatutako kontrol estrategien koste ekonomikoa txikia da, dorre edota pala handiagoen diseinuarekin alderatuz gero.

Tesiaren ekarpen garrantzitsuenak laburbilduko dituen kapitulu honek hurrengo egitura aurkeztuko du: 5.1 atalean ML bidezko yaw kontrol estrategiak erabilia lortutako emaitzen eztabaida aurkeztuko da. 5.2 atalean aztertutako fluxu kontrol teknika desberdinak erabilia lortutako emaitzak eztabaidatuko dira.

## 5.1 ML BIDEZKO YAW KONTROLA

Lehenengo eta behin esan yaw kontrol sistema oso lagungarria izan daitekela ardatz horizontaleko aerosorgailu batek sortutako potentzia areagotzerako orduan. 12. Taulan ikus daitekeenez, % 47.83ko potentzia irabaziak ere lortu dira 60 s-ko denbora-tarte batean yaw kontrola erabilia eta NREL 5MW aerosorgailuaren potentzia partzialeko eremuari dagokion haize-abiadura batekin. Potentzia irabazi hau handiagoa ere izan liteke haizearen ezaugarrien arabera, batez ere, yaw angeluaren balioa handiagoa balitz.

Hala eta guztiz ere, garbi izan behar da yaw errotazioa burutzean aerosorgailuak sortutako potentzia elektrikoa handitzeaz gain, aerosorgailuaren hainbat elementu estrukturaletan eragindako karga mekanikoak ere areagotu egiten direla. Alde honetatik, yaw sistemaren rodamentua eta potentzia transmisio ardatza azaldu dira eragin handiena jasaten duten elementu mekanikoak bezala. Kontzeptu hau oso garrantzitsua da, izan ere, aerosorgailuen diseinu eta fabrikazioa

simulazioetan lortutako karga mekanikoen arabera egingo da, eta beraz, karga mekanikoak murriztea lortuz gero, helburu bikoitz bat lortuko da: Batetik, rodamentu txikiago bat instalatu ahal izango da aerosorgailuaren yaw sisteman. Rodamentu hau merkeagoa izango da eta aerosorgailuaren prezioa txikituko du. Bestetik, behin aerosorgailua instalatuta, karga mekanikoak murriztean pieza mekanikoaren bizitza luzeagoa ere lortuko da.

13. Taulan jasotako emaitzek erakusten dutenez, hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategia erabilita, aerosorgailuak sortutako potentzia irabaziak gutxi gorabehera mantentzeaz gain, elementu estruktural guztietan eragindako karga mekanikoak txikitzea lortzen da. Karga mekanikoen murrizketa batez ere esanguratsua da yaw sistemaren rodamentuan. Gainera, adierazgarria da aerosorgailuaren potentzia izendatuko eremuan % 100ko murrizketak ere lortu direla yaw rodamentuaren karga mekanikoetan.

Ondorioz, honako hau erakutsi da: hobetutako ML bidezko yaw kontrol estrategia erabilita, aerosorgailuak sortutako potentzia maximizatzea lortu ez ezik, hau karga mekanikoak ahalik eta txikien mantenduz egin daiteke. Halaber, kontrol strategiaren diseinuan erabilitako AI teknika adimentsuei esker, aerosorgailua martxan dagoela “online” motako entrenamendu bat burutzea ere posible izango da. Ondorioz, estrategiak automatikoki etengabe hobetzen joateko eta ingurumen aldakorretarako moldatzeko aukerak izango ditu.

### 5.2 FLUXU KONTROLA AEROSORGAILUEN PALETAN

Esan bezala, fluxu kontrol estrategiek ardatz horizontaleko aerosorgailuek sortutako potentzia areagotzeko aukera eskaintzen dute, sistema eolikoaren elementu estrukturalen dimentsioak handitzeko beharrik izan gabe. Fluxu kontrol gailuen abantaila nagusiak honako hauek dira: Inplementazio erraza, koste txikia eta aerosorgailuen operazioan eragin nabarmena.

16. Taulan jasotako emaitzen arabera, fluxu kontrol gailu pasiboetan oinarritutako estrategia erabilita NREL 5MW aerosorgailuaren AEPren hazkuntza esanguratsuak lortu dira:: % 2.4329ko hazkuntza 2015. urtean eta % 2.6773ko hazkuntza 2016. urtean. Sortutako energia elektriko gehigarri honek hainbat erabilera lezake. Batetik, aerosorgailuaren helburua energia merkatu elektrikoan saltzea bada, fluxu kontrol gailu pasiboak erabilita 2015. urtean 19575 € eta 2016. urtean 32625 € lortuko lirake (bi kasuetan energiaren 5 ct/ kW · h prezioa erabili da). Bestalde, aerosorgailua hidrogeno sorkuntzara bideratuta egonez gero, fluxu

kontrol gailu pasiboak erabilia 2015. urtean  $133500 \text{ N} \cdot \text{m}^3$  hidrogeno gehigarri eta 2016. urtean  $144998 \text{ N} \cdot \text{m}^3$  hidrogeno gehigarri lortuko lirateke (bi kasuetan hidrogenoa sortzeko McLyzer 400-30 eskala handiko elektrolizatzailea kontsideratu da,  $4.5 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{Nm}^3$ -ko kontsumoa duena).

Aerosorgailuaren helburua aurretik azaldutako bietako edozein izanik ere (energia merkatu elektrikoan saldu edota hidrogenoa sortzeko erabili), fluxu kontrol pasiboa erabilia irabazi handiak lor daitezke, batez ere fluxu kontrol gailu pasiboen koste ekonomiko txikia kontutan hartuz. Energia merkatu elektrikoan salduz gero, aerosorgailuaren hasierako inbertsioa azkarrago amortizatzea ahalbidetuko duen irabazi ekonomiko bat lortuko da. Energia hidrogeno sortzeko erabiliz gero, hidrogeno bidezko automobilgintza bultzatzeko oso garrantzitsua izan daitekeen hidrogeno gehigarri bat sortuko da. Edonola ere, sorkuntza sistema eolikoaren sustapena ekarriko du.

Hala ere, 19. Taulan eta 20. Taulan erakusten denez, kontuan izan behar da fluxu kontrol gailu pasiboak erabilia errotorean sortutako “thrust” indarra eta palen erroan eragindako BM balioak ere hazi egingo direla. Hazkuntza hauen eraginez, aerosorgailuaren hainbat elementutan eragindako karga mekanikoak, batez ere dorrea eta palak, ere handitu egingo dira. Kara mekaniko berri hauek kontuan hartu beharko lirateke aerosorgailuaren diseinu prozesuan. Ostera, elementu estrukturalen bizi-iraunkortasuna txikitu eta haustura gertatuko litzateke.

Karga mekanikoei dagokienean, 3.2.2 atalean proposatutako AGF estrategia erabilia, NREL 5MW aerosorgailuak sortutako potentzia elektrikoa mantendu eta “thrust” indarra eta palen BM asko murriztea lortu da, ikusi 21. Taula, 22. Taula eta 23. Taula, hurrenez hurren.

Ondorioz, aerosorgailuaren hainbat elementu estrukturaleri karga mekanikoak murriztu eta beren bizi-iraunkortasuna handitzea lortuko da, eta honek aerosorgailuaren LCOE murriztea ekarriko du. Desabantaila handiena GF gailuen jarduera aktiboa lortzeko muntatu beharko litzatekeen zirkuitu pneumatikoa izango litzateke, kontrol estrategiaren koste ekonomikoa zerbait handitzea ekarriko luke eta.



# 6. Kapitulua

## Ondorioak eta

### etorkizunerako lanak

---

Kapitulu honek hurrengo egitura izango du: Ikerkuntza lanaren amaieran ateratako ondorioak 6.1 atalean agertuko dira. 6.2 atalean etorkizunerako lanak izango dira aztergai.

#### **6.1 ONDORIOAK**

Ardatz horizontaleko aerosorgailuen operazioa hobetzea helburu duten teknika adimentsuetan oinarritutako kontrol estrategiak diseinatu dira ikerkuntza lan honetan. Aerosorgailuen operazioa aztertzeke erabilitako adierazleak honako hauek izan dira: sistemak sortutako potentzia elektrikoa eta aerosorgailuaren hainbat elementu estrukturaletan eragindako karga mekanikoak. Lortutako emaitzak analizatu ostean, diseinatutako kontrol estrategien funtzionamenduaren inguruko hainbat ondorio atera daitezke.

Lehenik, argi geratu da gaur egungo aerosorgailu komertzialen heldutasun teknologiko eta industrialaren oso handia bada ere, oraindik ere posible dela beren jarduera optimizatzea. Hala erakusten dute 4. Kapituluaren azalduetako emaitzek. Emaitza hauek lortzeko diseinatutako kontrol estrategiak NREL 5MW ardatz horizontaleko aerosorgailuan aplikatu dira.

Diseinatutako kontrol estrategiari dagokienez, yaw errotazioa erabilita ardatz horizontaleko aerosorgailu batek sortutako potentzia nabarmen handitu daitekeela ondorioztatu daiteke. Gainera, yaw errotazioa egiterako orduan yaw sistemaren rodamentuan eragindako karga mekanikoak kontuan hartuz gero, aerosorgailuaren elementu mekanikoetan eragindako karga mekanikoak asko murriztu daitezke sortutako potentzia berdintsu mantenduz. Murrizketa hau lortzeko yaw errotazio-abiadura moldatzen da. Nahiz eta karga mekanikoak batez ere yaw sistemaren rodamentuan eta potentzia transmisio ardatzean garrantzitsuak izan, aerosorgailuaren dorrean eta paletan ere antzeman daitezke.

Gainera, yaw kontrol estrategiaren diseinurako erabilitako ML algoritmoari esker, aerosorgailuak ingurutik ikasteko aukera izango du. Ikasketa hau “online” edo “offline” motakoa izan daiteke, hau da, aerosorgailuaren operazioarekin sinkronizatuta edo ez sinkronizatuta egon daiteke. Edozein kasutan ere, entrenamendu baten bitartez, sistemak ekintza desberdinek optimizatu nahi den sarian duten eragina ikasteko gaitasuna izango du. Ondorioz, diseinu prozesuan zehar diseinatzailearen iritzi subjektiboa ezabatu eta automatikoki doituko den kontrolagailu bat lortuko da. Halaber, sistemak datu errealetatik ikasi ahal izango duenez, dinamikoki aldakorrak diren inguruetara moldatzeko gaitasuna izango du.

Era berean, lortutako emaitzak aztertuta atera daitezkeen beste ondorio bat zera da: ardatz horizontaleko aerosorgailu batek sortutako potentzia hobetu egin daiteke fluxu kontrol pasiboa erabilita. 2015. urteko eta 2016. urteko haize-abiadura datu errealek erabilita, aerosorgailuaren AEPren hazkuntza ikusi ahal izan da. Hala ere, fluxu kontrol gailu pasiboek ere badute desabantailarik. Esaterako, potentzia sorkuntza hobetuarekin batera “thrust” indarraren eta palen erroetako BMren hazkuntzak gertatzen dira, zeintzuk aerosorgailuaren hainbat elementu estrukturaletan karga mekanikoak handitzea ekarriko duten.

Fluxu kontrol pasiboa erabiltzearen ondorioz gertatzen den karga mekanikoen handitzea ekiditeko aukera bat fluxu kontrol aktibo estratagia bat diseinatzea da. Horretarako, fluxu kontrol gailuen jarduera aktiboa lortzea ahalbidetzen duen sistema bat diseinatu behar da. Kasu honetan, diseinatutako AGF estrategiaren exekuziorako sistema pneumatiko bat proposatzen da. AGF

estrategiaren funtzionamenduari dagokionez, haize-abiadura datu errealekin lortutako emaitzek honakoa erakusten dute: aerosorgailuak sortutako potentzia elektrikoa berdintsu mantenduz, “thrust” indarraren eta BMren murrizketa adierazgarriak lortu dira, fluxu kontrol pasiboarekin alderatuta. Ondorioz, aerosorgailuaren elementu mekanikoen bizi-iraupena luzatu egingo da.

Diseinatutako estrategien inplementazioaren inguruan, nabarmentzekoa da ikerkuntza lan honetan proposatutako kontrol estrategiak batez ere software elementuetan oinarritzen direla eta, beraz, beren kostu ekonomikoa hardware elementuena baino txikiagoa izango dela. Aurkeztutako estrategietan erabilitako hardware elementu bakarrak fluxu kontrol gailuak eta AGF strategiaren sistema pneumatikoa dira. Edozein kasutan ere, hardware sistema hauen kostu ekonomikoa askoz ere murriztagoa izango da potentzia handiagoa sortzeko helburuarekin aerosorgailuaren elementu estruktural handiagoak diseinatzea baino.

Azkenik, AI osatzen duten teknika adimentsuek aerosorgailuaren operazioa hobetzeko ekarpen garrantzitsua egin dezaketela ere ondorioztatu daiteke. Ekarpen hau batez ere esanguratsua da datu kopuru handien erabilerari, soluzio optimoen hautaketari eta berez ikasteko gaitasuna duten sistema adimentsuen garapenari dagokienean. Inongo zalantzarik gabe, teknologia informatikoaren garapenarekin eta aerosorgailuei eskatutako betebeharren hazkuntzarekin batera, teknika adimentsuen erabilerak goranzko joera izango du sektore eolikoan. Izan ere, ikerkuntza lan honetan erakutsi bezala, kontrol estrategia adimentsuak erabilia, energia eolikoaren LCOE murriztea posible litzateke, sektore eolikoarentzat bultzada handia izango litzatekeena.

## 6.2 ETORKIZUNERAKO LANAK

Ikerkuntza lanean proposatutako kontrol estrategia adimentsuak diseinatuta eta simulazio bidez balioztatuta, hurrengo etorkizunerako lanak ikusten dira.

### *Neke-kargen analisisia*

Ikerkuntza lan honetan diseinaturiko ML bidezko yaw kontrol estrategia hobetua erabilia, neke-kargen analisi bat egitea proposatzen da. Izan ere, lan honetan, haize-abiadura eta haize-norabide jakin bat ezarri eta FAST kode aeroelastikoa erabilia uneko karga mekanikoen eboluzio tenporala besterik ez da aztertu.

Etorkizunerako lan gisa, uneko karga mekanikoak aztertzeaz gain, yaw errotazioaren eraginez hainbat elementu mekanikotan eragindako neke-kargen analisi bat egitea ere interesgarria izan daitekela kontsideratzen da. Neke-kargek elementu mekanikoek epe-luzera jasaten dituzten kaltea eta hausteko arriskua azaltzen dituzte.

Gainera, neke-kargen analisia garrantzitsua izango da ML bidezko yaw kontrol estrategiaren  $T_{RL}$  denbora-tartea zehazteko, hots, yaw errotazioa zenbateko periodoarekin egiten den definitzeko. Izan ere, lan honetan aztertutako uneko karga mekanikoak yaw kontrolaren  $T_{RL}$  denbora-tartearekiko independenteak dira. Ez da baina berdina gertatuko neke-kargekin, zeintzuk yaw errotazioaren periodoaren mendekotasun handia erakutsiko duten. Zenbat eta sarriago egin yaw errotazioa, orduan eta handiagoak izango dira neke-kargak.

#### ***ML bidezko yaw kontrol estrategiaren garapena***

Ikerkuntza lan honetan proposatutako ML bidezko yaw kontrol estrategia hobetua oraindik ere gehiago garatzea proposatzen da. Horretarako, RL algoritmoaren diseinuan aerosorgailuaren operazioan eragina izan dezaketen egoera gehiago aintzat hartzea proposatzen da, esaterako errotorearen biratze-abiadura edota pitch angelua. Egoera gehiago kontsideratuz gero, zehatzago kalkulatu ahal izango litzateke aerosorgailuaren yaw operazioa optimizatzen duen kontrol ekintza.

Era berean, aerosorgailuaren elementu estrukturalen karga mekanikoetan yaw errotazioak duen eragina txikitzeke helburuarekin, RL algoritmoaren sari gisa hainbat elementuren kargak erabiltzea proposatzen da. Horretarako, yaw sistemaren rodamentuan z ardatzarekiko eragindako karga mekanikoez gain, RL algoritmoaren saritzat hainbat elementutan eragindako karga mekanikoen batezbestekoa edo ponderazio bat erabil litezke. RL algoritmoaren sariaren konfigurazio desberdinak eraiki eta analisi bat egitea proposatzen da, azkenean emaitzarik onenak ematen dituen hautatzeko.

#### ***Fluxu kontrol estrategiak FAST kode aeroelastikoarekin analizatu***

Ikerkuntza lan honetan proposatutako fluxu kontrol estrategiak -pasibo zein aktibo- FAST kode aeroelastikoa baliatuz aztertzea proposatzen da. Ardatz horizontaleko aerosorgailuen jarduera aerodinamikoa aztertzeke BEM algoritmoa egokia izan arren (lan honetan lortutako emaitzek halaxe frogatzen dute), jarduera aerodinamikoak aerosorgailuen operazioan duen eragina askoz zehatzago aztertu daiteke FAST erabilita. Izan ere, kode aeroelastikoa BEM algoritmoan kalkulatzeko

ez diren beste aldagai asko ere kalkulatu dira. Horregatik, BEM algoritmo bidez diseinatutako fluxu kontrol estrategiak FAST bidez aztertzea ere proposatu da.

Fluxu kontrol pasiboari dagokionez, palen koefiziente aerodinamikoak denboran aldatzen ez direnez, ez legoke zailtasun handirik proposatutako estrategia FAST simulazio bidez aztertzeko. Hala ere, fluxu kontrol aktiboari dagokionez, palen koefiziente aerodinamikoak denboran aldakorrak direnez, FAST bidezko simulazioak egiteko biderik ba ote den aztertu beharra dago.

### *Karga mekanikoen murrizketa handiagoa fluxu kontrol aktibo bidez*

Ikerkuntza lan honetan diseinatutako AGF strategiaren hobekuntza bat proposatu da, aerosorgailuaren potentzia izendatuko eremuan karga mekanikoak gehiago murrizteko. Izan ere, lan honetan azaldutako AGF strategiaren helburua zera da: aerosorgailuaren operazio-puntu guztietan  $C_L/C_D$  koefizienteen arteko ratioa [-] maximizatzea. Hala ere, sistema potentzia izendatuko eremuan dagoenean, aerosorgailuan inplementatutako kontrol sistemak haizetik jasotzen den potentzia mugatzeko jarduten du. Ondorioz, potentzia sorkuntzaren ardura alde batera utzita, karga mekanikoak gehiago txikitze helburu eksklusiboarekin fluxu kontrol gailuak moldatzea posible ote den aztertu nahi da.

Etorkizunerako lan gisa, premisa hau kontuan hartzen duen AGF estrategia baten garapena proposatu da. Aerosorgailuak sortutako potentziari eutsi eta karga mekanikoak gehiago murriztea izango litzateke helburua.

### *Integrazioa aerosorgailuaren kontrol sisteman*

Ikerkuntza lan honetan diseinatutako kontrol estrategia adimentsuak aerosorgailu baten kontrol sisteman integratzea proposatu da. Integrazio-prozesuan hainbat muga azaldu daitezke, batez ere mikroprozesatzailearen ziklo bakoitzeko exekuzio denborari eta memoria erabilgarriari dagokienean.

Muga hauek diseinatutako kontrol estrategietan izango luketen eragina ahalik eta txikiena izan dadin, integrazio-prozesua kontu handiz egin beharko litzateke. Gainera, muga hauetara moldatzeko beharra egonez gero, kodearen optimizazio bat ere egin beharko litzateke, batez ere, ANNen eta optimizazio algoritmoen inplementazioari dagokienean.



# Bibliografia

---

- [1] : [https://www.energy-charts.de/energy\\_pie.htm?year=2018](https://www.energy-charts.de/energy_pie.htm?year=2018), (accessed on 12 November 2019).
- [2] Spurling A.: Climate change in Australia: Losing the battle?, Engineering Technology, 2016, 11, (10), pp. 38-41.
- [3] Hammons T.J., Boyer J.C., Connors S.R., *et al.*: Renewable energy alternatives for developed countries, IEEE Trans.Energy Convers., 2000, 15, (4), pp. 481-493.
- [4] WindEurope.: Wind energy in Europe in 2018. Trends and Statistics, 2019.
- [5] Rosales-Asensio E., Borge-Diez D., Blanes-Peiro J., Perez-Hoyos A., Comenar-Santos A.: Review of wind energy technology and associated market and economic conditions in Spain, Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2019, 101, pp. 415-427.
- [6] Nyanteh Y., Schneider N., Netter D., Wei B., Masson P.J.: Optimization of a 10 MW Direct Drive HTS Generator for Minimum Levelized Cost of Energy, IEEE Trans.Appl.Supercond., 2015, 25, (3), pp. 1-4.

- [7] Abrahamsen A.B., Liu D., Magnusson N., *et al.*: Comparison of Levelized Cost of Energy of Superconducting Direct Drive Generators for a 10-MW Offshore Wind Turbine, *IEEE Trans.Appl.Supercond.*, 2018, 28, (4), pp. 1-5.
- [8] Aazam M., Zeadally S., Harras K.A.: Deploying Fog Computing in Industrial Internet of Things and Industry 4.0, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14, (10), pp. 4674-4682.
- [9] Fernández-Caramés T.M., Fraga-Lamas P.: A Review on the Application of Blockchain to the Next Generation of Cybersecure Industry 4.0 Smart Factories, *IEEE Access*, 2019, 7, pp. 45201-45218.
- [10] Jonkman J.M., Butterfield S., Musial W., Scott G.: Definition of a 5MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2009.
- [11] : <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>, (accessed on 12 October 2018).
- [12] NREL NWTC FAST Version 7. Available online: <https://nwtc.nrel.gov/FAST7/> (accessed on 21 October 2018).
- [13] : NREL BModes, Available online: <https://nwtc.nrel.gov> (accessed on 21 October 2018).
- [14] : NREL MLife, Available online: <https://nwtc.nrel.gov> (accessed on 21 October 2018).
- [15] : NREL MCrunch, Available online: <https://nwtc.nrel.gov> (accessed on 21 October 2018).
- [16] Kelley N., Jonkman B.: NWTC Computer-Aided Engineering Tools (TurbSim)., 2012, pp. Available online: <http://wind.nrel.gov/designcodes/preprocessors/turbsim> (accessed on 17 January 2016).
- [17] Hansen M.O.L., Sørensen J.N., S Voutsinas, Sørensen N.N., Aagaard Madsen Helge.: State of the art in wind turbine aerodynamics and aeroelasticity, *Prog.Aerospace Sci.*, 2006, 42, pp. 285-330.



- [18] Siemens STAR CCM+ Version 11.06.011. Available online: <http://mdx.plm.automation.siemens.com/> (accessed on 10 June 2018).
- [19] : <https://openfoam.com/>, (accessed on 10 June 2018).
- [20] J.H. L., L.Y. P., A. W.: Control of Wind Turbines: Past, Present, and Future, American Control Conference 2009, June 2009 St. Louis (USA).
- [21] Ma Z., Yan Z., Shaltout M.L., Chen D.: Optimal Real-Time Control of Wind Turbine During Partial Load Operation, IEEE Trans.Control Syst.Technol., 2015, 23, (6), pp. 2216-2226.
- [22] Harris M., Hand M., Wright A.: LIDAR for Turbine Control, NREL Technical Report NREL/TP-500-39154., 2005.
- [23] Zhang Y., Cheng M., Chen Z.: Load mitigation of unbalanced wind turbines using PI-R individual pitch control, IET Renewable Power Generation, 2015, 9, (3), pp. 262-271.
- [24] Burton T., Jenkins N., Sharpe D., Bossanyi E.A.: Wind Energy Handbook, Ed. Wiley, 2001.
- [25] Bossanyi E.A.: The Design of Closed Loop Controllers for Wind Turbines, Wind Energy, 2000, 3, (3), pp. 149-163.
- [26] Bossanyi E.A.: Controller for 5 MW reference turbine, European Upwind Project Report. [www.upwind.eu](http://www.upwind.eu) (accessed on July 2019), 2009.
- [27] Licari J., Ugalde-Loo C.E., Ekanayake J.B., Jenkins N.: Damping of Torsional Vibrations in a Variable-Speed Wind Turbine, IEEE Trans.Energy Convers., 2013, 28, (1), pp. 172-180.
- [28] Kambrath J.K., Khan M.S.U., Wang Y., Maswood A.I., Yoon Y.: A Novel Control Technique to Reduce the Effects of Torsional Interaction in Wind Turbine System, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7, (3), pp. 2090-2105.
- [29] Xi X., Geng H., Yang G., Li S., Gao F.: Torsional Oscillation Damping Control for DFIG-Based Wind Farm Participating in Power System Frequency Regulation, IEEE Trans.Ind.Appl., 2018, 54, (4), pp. 3687-3701.

- [30] Lio W.H., Jones B.L., Rossiter J.A.: Estimation and Control of Wind Turbine Tower Vibrations Based on Individual Blade-Pitch Strategies, *IEEE Trans.Control Syst.Technol.*, 2019, 27, (4), pp. 1820-1828.
- [31] Aschemann H., Kersten J.: Active tower damping for an innovative wind turbine with a hydrostatic transmission. *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Nov, pp. 003314-003319.
- [32] Han B., Zhou L., Yang F., Xiang Z.: Individual pitch controller based on fuzzy logic control for wind turbine load mitigation, *IET Renewable Power Generation*, 2016, 10, (5), pp. 687-693.
- [33] Choi H., Kim J., Cho J., Nam Y.: Active yaw control of MW class wind turbine. *ICCAS 2010*, Oct, pp. 1075-1078.
- [34] Kim M., Dalhoff P.: Yaw Systems for wind turbines. Overview of concepts, current challenges and design methods., *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, 524, pp. 012086.
- [35] Augusto G.L., Culaba A.B., Lim L.A.G.: Design of yaw brake system for horizontal axis wind turbine generator. *2015 International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)*, Dec, pp. 1-6.
- [36] Kragh K., Hansen M.: Potential of power gain with improved yaw alignment, *Wind Energy*, 2014, 18.
- [37] Choi D., Shin W., Ko K., Rhee W.: Static and Dynamic Yaw Misalignments of Wind Turbines and Machine Learning Based Correction Methods Using LiDAR Data, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2019, 10, (2), pp. 971-982.
- [38] Fleming P., Scholbrock A., Jehu A., *et al.*: Field-test results using a nacelle-mounted lidar for improving wind turbine power capture by reducing yaw misalignment, *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, 524, pp. 012002.
- [39] Wan S., Cheng L., Sheng X.: Effects of Yaw Error on Wind Turbine Running Characteristics Based on Equivalent Wind Speed Model, *Energies*, 2015, 8, pp. 6286-6301.

- [40] Spinato F., Tavner P.J., Bussel G.J.W.V., Koutoulakos E.: Reliability of wind turbine subassemblies, IET Renewable Power Generation, 2009, 3, (4), pp. 387-401.
- [41] Shariatpanah H., Fadaeinedjad R., Rashidinejad M.: A New Model for PMSG-Based Wind Turbine With Yaw Control, IEEE Trans.Energy Convers., 2013, 28, (4), pp. 929-937.
- [42] Habibi H., Nohooji H.R., Howard I.: Adaptive PID Control of Wind Turbines for Power Regulation With Unknown Control Direction and Actuator Faults, IEEE Access, 2018, 6, pp. 37464-37479.
- [43] Karakasis N., Mesemanolis A., Nalmpantis T., Mademlis C.: Active yaw control in a horizontal axis wind system without requiring wind direction measurement, IET Renewable Power Generation, 2016, 10, (9), pp. 1441-1449.
- [44] Farret F.A., Pfitscher L., Bernardon D.: Sensorless active yaw control for wind turbines, 02, pp. 1370.
- [45] Bharani R., Jayasankar K.C.: Yaw Control of Wind Turbine Using Fuzzy Logic Controller, Power Electronics and Renewable Energy Systems, 2015, 326, pp. 997-1006.
- [46] Song D., Fan X., Yang J., Liu A., Chen S., Joo Y.H.: Power extraction efficiency optimization of horizontal-axis wind turbines through optimizing control parameters of yaw control systems using an intelligent method, Appl.Energy, 2018, 224, pp. 267-279.
- [47] Song D., Yang J., Fan X., *et al.*: Maximum power extraction for wind turbines through a novel yaw control solution using predicted wind directions, Energy Conversion and Management, 2018, 157, pp. 587-599.
- [48] Mikkelsen T., Angelou N., Hansen K., *et al.*: A spinner-integrated wind LiDAR for enhanced wind turbine control, Wind Energy, 2013, 16.
- [49] Schlipf D., Kapp S., Anger J., *et al.*: Prospects of optimization of energy production by lidar assisted control of wind turbines, EWEA 2011 Conference Proceedings, 2011, pp. 1-10.

- [50] Gebraad P., Teeuwisse F., Wingerden J., *et al.*: Wind plant power optimization through yaw control using a parametric model for wake effects—a CFD simulation study, *Wind Energy*, 22 December 2014.
- [51] Munters W., Meyers J.: Dynamic Strategies for Yaw and Induction Control of Wind Farms Based on Large-Eddy Simulation and Optimization, *Energies*, 2018, 11, (1), pp. 177.
- [52] Dar Z., Kar K., Sahni O., Chow J.H.: Windfarm Power Optimization Using Yaw Angle Control, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 8, (1), pp. 104-116.
- [53] Ghanavati M., Chakravarthy A.: PDE-Based Modeling and Control for Power Generation Management of Wind Farms, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2019, 10, (4), pp. 2104-2113.
- [54] Riemann B., Sehr M.A., Schittenhelm R.S., Rinderknecht S.: Real gyroscopic uncertainties in robust control of flexible rotors. 52nd IEEE Conference on Decision and Control, Dec, pp. 3762-3769.
- [55] Vance J.M., Zeidan F.Y., Murphy B.: *Machinery Vibration and Rotordynamics*. Hoboken (NJ), USA., John Wiley & Sons, 2010.
- [56] Zheng S., Yang J., Song X., Ma C.: Tracking Compensation Control for Nutation Mode of High-Speed Rotors With Strong Gyroscopic Effects, *IEEE Trans.Ind.Electron.*, 2018, 65, (5), pp. 4156-4165.
- [57] Ahrens M., Kucera L., Larssonneur R.: Performance of a magnetically suspended flywheel energy storage device, *IEEE Transactions on Control System Technology*, 1996, 4, (5), pp. 495-502.
- [58] Taylor H.D.: *The elimination of Diffuser Separation by Vortex Generators*, R-15064, United Aircraft Corporation, CT, USA, 1947.
- [59] Oh K., Park J., Lee J., Epureanu B.I., Lee J.: A Novel Method and its Field Tests for Monitoring and Diagnosing Blade Health for Wind Turbines, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, 64, (6), pp. 1726-1733.

- [60] Baldacchino D., Ferreira C., De Tavernier D., Timmer W.A., van Bussel G.J.W.: Experimental parameter study for passive vortex generators on a 30% thick airfoil, *Wind Energy*, 2018, 21, (9), pp. 745-765.
- [61] Ostergaard K.Z., Brath P., Stoustrup J.: Gain-scheduled Linear Quadratic Control of Wind Turbines Operating at High Wind Speed, 11, pp. 276.
- [62] Skrzypiński W., Gaunaa M., Bak C.: The effect of mounting vortex fenerators on the DTU 10MW reference wind turbine blade, *J Phys Conf Ser*, 2014, 524.
- [63] Oerlemans S.: Wind turbine noise: primary noise sources, Technical Report NLR-TP-2011-066, NLR, 2011.
- [64] Astolfi D., Castellani F., Fravolini M., Cascianelli S., Terzi L.: Computing the Real Impact of Wind Turbine Power Curve Upgrades: A SCADA-Based Multivariate Linear Method and a Vortex Generator Test Case, June 2018.
- [65] Terzi L., Lombardi A., Castellani F., Astolfi D.: Innovative methods for wind turbine power curve upgrade assessment, *J.Phys., Conf.Ser.(UK)*, 2018, 1102, pp. 012036 (11 pp.); 012036(11.)-012036 (11 pp.).
- [66] Astolfi D., Castellani F., Berno F., Terzi L.: Numerical and Experimental Methods for the Assessment of Wind Turbine Control Upgrades, *Applied Sciences*, 2018, 8, pp. 2639.
- [67] Astolfi D., Castellani F., Fravolini M., Cascianelli S., Terzi L.: Precision computation of wind turbine power upgrades: a SCADA-based multivariate linear method and a vortex generator and control optimization test case, *Journal of Energy Resources Technology*, January 2019.
- [68] Astolfi D., Castellani F., Terzi L.: Wind Turbine Power Curve Upgrades, *Energies*, May 2018, 11, (5), pp. 1300.
- [69] Aramendia-Iradi I., Fernandez-Gamiz U., Sancho-Saiz J., Zulueta-Guerrero E.: State of the art of active and passive flow control devices for wind turbines, 2016, *DYNA*, 91(5). 512-516.
- [70] Aramendia I., Fernandez-Gamiz U., Ramos-Hernanz J., Sancho J., Lopez-Guede J., Zulueta E.: Flow Control Devices for Wind Turbines, in *Bizon N.*,

---

Mahdavi Tabatabaei N., Blaabjerg F., Kurt E. (Eds.): Energy Harvesting and Energy Efficiency: Technology, Methods, and Applications (Springer International Publishing, Cham, 2017, pp. 629-655.

[71] Fernandez-Gamiz U., Zulueta E., Boyano A., Ramos J., Lopez-Guede J.: Microtab Design and Implementation on a 5 MW Wind Turbine, Applied Sciences, 2017, 7, pp. 536.

[72] Johnson S.J., Baker J.P., van Dam C.P., Berg D.: An overview of active load control techniques for wind turbines with an emphasis on microtabs, Wind Energy, 2010, 13, pp. 239-253.

[73] Mayda E.A., van Dam C.P., Yen-Nakafuji D.T.: Computational investigation of finite width microtabs for aerodynamic load control, AIAA-2005-1185, 2005.

[74] Chow R., van Dam C.: Computational investigations of deploying load control microtabs on a wind turbine airfoil, AIAA-2007-1018, 2007.

[75] Baker J.P., Standish K.J., van Dam C.P.: Two-dimensional wind tunnel and computational investigation of a microtab modified airfoil, Journal of Aircraft, 2007, 44, pp. 563-572.

[76] D.T. Y., C.P. v.D., R. L. S., S.D. C.: Active load control for airfoils using microtabs, Journal of Solar Energy Engineering, 2001, 123, pp. 282-289.

[77] Standish K.J., van Dam C.P.: Computational analysis of a microtab-based aerodynamic load control system for rotor blades, Journal of the American Helicopter Society, 2005, 50, pp. 249-258.

[78] van Dam C.P., Chow R., Zayas J.R., Berg D.A.: Computational Investigations of Small Deploying Tabs and Flaps for Aerodynamic Load Control, Journal of Physics, Conference series: The Science of Making Torque from Wind, 2007, 75.

[79] Fernandez-Gamiz U., Zulueta E., Boyano A., Ansoategui I., Uriarte I.: Five Megawatt Wind Turbine Power Output Improvements by Passive Flow Control Devices, Energies, 2017, 10, (6), pp. 742.

[80] Lin J.C.: Review of research on low-profile vortex generators to control boundary-layer separation, 2002, 38 (4-5), pp. 389-420.

- [81] Gutierrez-Amo R., Fernandez-Gamiz U., Errasti I., Zulueta E.: Computational Modelling of Three Different Sub-Boundary Layer Vortex Generators on a Flat Plate, *Energies*, 2018, 11, (11).
- [82] Gao L., Zhang H., Liu Y., Han S.: Effects of vortex generators on a blunt trailing-edge airfoil for wind turbines, *Renewable Energy*, 2015, 76, pp. 303-311.
- [83] Suarez J.M., Flaszynski P., Doerffer P.: Application of rod vortex generators for flow separation reduction on wind turbine rotor, *Wind Energy*, 2018, 21, (11), pp. 1202-1215.
- [84] Fernandez-Gamiz U., Gomez-Marmol M., Chacon-Rebollo T.: Computational Modeling of Gurney Flaps and Microtabs by POD Method, *Energies*, 2018, 11, (8), pp. 2091.
- [85] Aramendia I., Fernandez-Gamiz U., Zulueta E., Saenz-Aguirre A., Teso D.: Parametric Study of a Gurney Flap Implementation in a DU91W(2)250 Airfoil, *Energies*, January 2019.
- [86] Wang J.J., Li Y.C., Choi K.-.: Gurney flap—Lift enhancement, mechanisms and applications, *Progress in Aerospace Sciences*, 2008, 44, pp. 22-47.
- [87] Jeffrey D., Zhang X., Hurst D.W.: Aerodynamics of Gurney flaps on a single-element high-lift wing, *J.Aircr.*, 2000, 37, (2), pp. 295-301.
- [88] Woodgate M.A., Pstrikakis V.A., Barakos G.N.: Rotor Computations with Active Gurney Flaps, In: Braza M., Bottaro A., Thompson M. (eds) *Advances in Fluid-Structure Interaction. Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, vol 133. Springer, Cham, 2016.
- [89] Chow R., van Dam C.P.: On the temporal response of active load control devices, *Wind Energy*, 2010, 13, (2-3), pp. 135-149.
- [90] Shukla V., Kaviti A.K.: Performance evaluation of profile modifications on straight-bladed vertical axis wind turbine by energy and Spalart Allmaras models, *Energy*, 2017, 126, pp. 766-795.
- [91] Storms B.L., Jang C.S.: Lift Enhancement of an Airfoil using a Gurney Flap and Vortex Generators, *J.Aircr.*, 1994, 31, (3), pp. 542-547.

- [92] Johnson Scott J., van Dam C.P., Berge Dale E.: Active Load Control Techniques for Wind Turbines (SANDIA REPORT, SAND2008-4809 August, 2008).
- [93] Andersen P., Henriksen L., Gaunaa M., Bak C., Buhl T.: Deformable trailing edge flaps for modern mega-watt wind turbine controllers using strain gauges, *Wind Energy*, 2010, 13, pp. 193.
- [94] Buhl T., Gaunaa M., Bak C.: Load Reduction Potential Using Airfoils with Variable Trailing Edge Geometry, *Journal of Solar Energy Engineering*, 2005, 127, pp. 503-516.
- [95] Zhu B., Zhang W., Huang Y.: Energy extraction properties of a flapping wing with a deformable airfoil, *IET Renewable Power Generation*, 2019, 13, (11), pp. 1823-1832.
- [96] Bak C., Gaunaa M., Andersen P., Buhl T., Hansen P., Clemmensen K.: Wind tunnel test on airfoil Risø-B1-18 with an Active Trailing Edge Flap, *Wind Energy*, 2010, 13, pp. 207.
- [97] Castaignet D., Couchman I., Poulsen N.K., Buhl T., Wedel-Heinen J.J.: Frequency-Weighted Model Predictive Control of Trailing Edge Flaps on a Wind Turbine Blade, *IEEE Trans.Control Syst.Technol.*, 2013, 21, (4), pp. 1105-1116.
- [98] Wallis R.A.: A preliminary Note on a Modified Type of Air Jet for Boundary Layer Control, *A. R. C. C. P. N'*. 5135, 1960.
- [99] Compton D.A., Johnston J.P.: Streamwise Vortex Production by Pitched and Skewed Jets in a Turbulent Boundary Layer, *AIAA Journal*, 1992, 30, pp. 640.
- [100] Johnston J.P., Nishi M.: Vortex generator jets - A means for passive and active control of boundary layer separation, *AIAAJ*, 1989.
- [101] Johnston J.P., Nishi M.: Vortex generator jets - Means for flow separation control, *AIAAJ*, 1990, 18, (6).
- [102] James R.D., Jacobs J.W., Glezer A.: A Round Turbulent Jet Produced by an Oscillating Diaphragm, *Phys. Fluids* 8:2484, 1996.



[103] Seifert A., Bachar T., Koss D., Shepshelovich M., Wygnanski I.: Oscillatory Blowing: A Tool to Delay Boundary-Layer Separation, *AIAA Journal*, 1993, 31, (11).

[104] Donovan J.F., Kral L.D., Cary A.W.: Active Control Applied to an Airfoil, *AIAA Paper 98-0210*, 1998.

[105] You D., Moin P.: Active control of flow separation over an airfoil using synthetic jets, *Journal of Fluids and Structures*, 2008, 24, (8), pp. 1349-1357.

[106] Chawla J., Suryanarayanan S., Puranik B., Sheridan J., Falzon B.G.: Efficiency improvement study for small wind turbines through flow control, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2014, 7, pp. 195–208.

[107] Shun S., Ahmed N.A.: Wind Turbine Performance Improvements using Active Flow Control Techniques, *Procedia Engineering*, 2012, 49, pp. 83-91.

[108] Maldonado V., Farnsworth J., Gressick W., Amitay M.: Active control of flow separation and structural vibrations of wind turbine blades, *Wind Energy*, 2009, 132-3.

[109] Maldonado V., Boucher M., Ostman R., Amitay M.: Active Vibration Control of a Wind Turbine Blade Using Synthetic Jets, *International Journal of Flow Control*, 2009, 1, pp. 227-238.

[110] Wang L., Shen J.: A Systematic Review of Bio-Inspired Service Concretization, *IEEE Transactions on Services Computing*, 2017, 10, (4), pp. 493-505.

[111] Singh A., Thakur N., Sharma A.: A review of supervised machine learning algorithms. 2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), March, pp. 1310-1315.

[112] Saravanan R., Sujatha P.: A State of Art Techniques on Machine Learning Algorithms: A Perspective of Supervised Learning Approaches in Data Classification. 2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), June, pp. 945-949.

[113] Kotsiantis S.B.: Supervised Machine Learning: A Review of Classification Techniques, *Informatica*, 2007, 31, pp. 249-268.

- [114] Usama M., Qadir J., Raza A., *et al.*: Unsupervised Machine Learning for Networking: Techniques, Applications and Research Challenges, IEEE Access, 2019, 7, pp. 65579-65615.
- [115] Zhang D., Han X., Deng C.: Review on the research and practice of deep learning and reinforcement learning in smart grids, CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4, (3), pp. 362-370.
- [116] Jagodnik K.M., Thomas P.S., Bogert A.J.v.d., Branicky M.S., Kirsch R.F.: Training an Actor-Critic Reinforcement Learning Controller for Arm Movement Using Human-Generated Rewards, IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2017, 25, (10), pp. 1892-1905.
- [117] Mongillo G., Shteingart H., Loewenstein Y.: The Misbehavior of Reinforcement Learning, Proc IEEE, 2014, 102, (4), pp. 528-541.
- [118] Sutton R.S., Barto A.G.: Reinforcement Learning: An Introduction, MIT Press, 1998, (Cambridge, MA, USA).
- [119] Chen S.H., Jakeman A.J., Norton J.P.: Artificial Intelligence techniques: An introduction to their use for modelling environmental systems, Mathematics and Computers in Simulation, 2008, 78, pp. 379-400.
- [120] Yao X.: Evolving artificial neural networks, Proc. IEEE, 1999, 87, (9), pp. 1423-1447.
- [121] Oong T.H., Isa N.A.M.: Adaptive Evolutionary Artificial Neural Networks for Pattern Classification, IEEE Trans.Neural Networks, 2011, 22, (11), pp. 1823-1836.
- [122] Ma H., Simon D., Siarry P., Yang Z., Fei M.: Biogeography-Based Optimization: A 10-Year Review, IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence, 2017, 1, (5), pp. 391-407.
- [123] León-Aldaco S.E.D., Calleja H., Alquicira J.A.: Metaheuristic Optimization Methods Applied to Power Converters: A Review, IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30, (12), pp. 6791-6803.
- [124] Driankov D., Hellendoorn H., Reinfrank M.: An Introduction to Fuzzy Control , Germany Berlin:Springer-Verlag, 1993.

- [125] Soliman M.A., Hasanien H.M., Azazi H.Z., El-Kholy E.E., Mahmoud S.A.: An Adaptive Fuzzy Logic Control Strategy for Performance Enhancement of a Grid-Connected PMSG-Based Wind Turbine, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15, (6), pp. 3163-3173.
- [126] Muyeen S.M., Al-Durra A.: Modeling and Control Strategies of Fuzzy Logic Controlled Inverter System for Grid Interconnected Variable Speed Wind Generator, *IEEE Systems Journal*, 2013, 7, (4), pp. 817-824.
- [127] Castro P.A.D., Zuben F.J.V.: Learning Ensembles of Neural Networks by Means of a Bayesian Artificial Immune System, *IEEE Trans.Neural Networks*, 2011, 22, (2), pp. 304-316.
- [128] Khanafer R.M., Solana B., Triola J., *et al*: Automated Diagnosis for UMTS Networks Using Bayesian Network Approach, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57, (4), pp. 2451-2461.
- [129] Fadlullah Z.M., Tang F., Mao B., *et al*: State-of-the-Art Deep Learning: Evolving Machine Intelligence Toward Tomorrow's Intelligent Network Traffic Control Systems, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 2017, 19, (4), pp. 2432-2455.
- [130] Kaelbling L.P., Littman M.L., Moore A.W.: Reinforcement learning: A survey, *J. Artif. Intell. Res.*, 1996, 4, (1), pp. 237-285.
- [131] Bertsekas D.P.: *Abstract Dynamic Programming*, Belmont, MA, USA:Athena Scientific, 2013.
- [132] Bertsekas D.P.: *Dynamic Programming and Optimal Control: Approximate Dynamic Programming*, Belmont, MA, USA:Athena Scientific, 2012, 2.
- [133] Kao K., Wu I., Yen S., Shan Y.: Incentive Learning in Monte Carlo Tree Search, *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*, 2013, 5, (4), pp. 346-352.
- [134] Coulom R.: Efficient selectivity and backup operators in Monte-Carlo tree search, *Proc. 5th Int. Conf. Comput. Games*, 2006, pp. 72-83.

- [135] Adam S., Busoniu L., Babuska R.: Experience Replay for Real-Time Reinforcement Learning Control, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 2012, 42, (2), pp. 201-212.
- [136] Watkins C.J.C.H.: Learning from Delayed Rewards, PhD thesis, King's College, Cambridge, UK, May 1989.
- [137] Watkins C.J.C.H., Dayan P.: Q-learning, *Mach.Learning*, 1992, 8, (3), pp. 279-292.
- [138] Yang Z., Merrick K., Jin L., Abbass H.A.: Hierarchical Deep Reinforcement Learning for Continuous Action Control, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2018, 29, (11), pp. 5174-5184.
- [139] Jain A.K., Mao J., Mohiuddin K.M.: Artificial neural networks: a tutorial, *Computer*, 1996, 29, (3), pp. 31-44.
- [140] Sivaram G.S.V.S., Hermansky H.: Sparse Multilayer Perceptron for Phoneme Recognition, *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 2012, 20, (1), pp. 23-29.
- [141] Mabel M.C., Fernandez E.: Analysis of wind power generation and prediction using ANN: A case study, *Renewable Energy*, 2008, 33, (5), pp. 986.
- [142] Barbounis T.G., Theocharis J.B.: Locally recurrent neural networks for long-term wind speed and power prediction, *Neurocomputing*, 2006, 69, (4), pp. 466.
- [143] Zhang X., Zou J., He K., Sun J.: Accelerating Very Deep Convolutional Networks for Classification and Detection, *IEEE Trans.Pattern Anal.Mach.Intell.*, 2016, 38, (10), pp. 1943-1955.
- [144] Silvestre M.R., Oikawa S.M., Vieira F.H.T., Ling L.L.: A Clustering Based Method to Stipulate the Number of Hidden Neurons of mlp Neural Networks: Applications in Pattern Recognition, *TEMA - Tendências em Matemática Aplicada e Computacional*, 2008, 9, (2).
- [145] Li Y., Cao W.: An Extended Multilayer Perceptron Model Using Reduced Geometric Algebra, *IEEE Access*, 2019, 7, pp. 129815-129823.

- [146] Li Y., Tang G., Du J., Zhou N., Zhao Y., Wu T.: Multilayer Perceptron Method to Estimate Real-World Fuel Consumption Rate of Light Duty Vehicles, *IEEE Access*, 2019, 7, pp. 63395-63402.
- [147] Hu X., Weng Q.: Estimating impervious surfaces from medium spatial resolution imagery using the self-organizing map and multi-layer perceptron neural networks, *Remote Sens. Environ.*, 2009, 113, (10), pp. 2089.
- [148] Gao Y., Er M.J.: NARMAX time series model prediction: feedforward and recurrent fuzzy neural network approaches, *Fuzzy Sets Syst.*, 2005, 150, (2), pp. 331.
- [149] Chen S., Billings S.: Representations of non-linear systems: The NARMAX model, *Int J Control*, 2008, 49.
- [150] Cheng L., Liu W., Hou Z., Yu J., Tan M.: Neural-Network-Based Nonlinear Model Predictive Control for Piezoelectric Actuators, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Dec. 2015, 62, (12), pp. 7717-7727.
- [151] Alzahrani A., Kimball J.W., Dagli C.H.: Predicting Solar Irradiance Using Time Series Neural Networks, *Procedia Computer Science*, 2014, 36.
- [152] Yang X.S.: Optimization and Metaheuristic Algorithms in Engineering, in: *Metaheuristics in Water, Geotechnical and Transport Engineering* (Eds. X. S. Yang, A. H. Gandomi, S. Talatahari, A. H. Alavi), Elsevier, 2013, pp. 1-23.
- [153] Consolini L., Lini G.: A Gauss-Newton Method for the Synthesis of Periodic Outputs With Central Pattern Generators, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2014, 25, (7), pp. 1394-1400.
- [154] Gao B., Xu Z.: Phaseless Recovery Using the Gauss-Newton Method, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017, 65, (22), pp. 5885-5896.
- [155] Musafir H.A., Mahmood A.: Dynamic Hassan Nelder Mead with Simplex Free Selectivity for Unconstrained Optimization, *IEEE Access*, 2018, 6, pp. 39015-39026.
- [156] Baudzus L., Krummrich P.M.: Modified downhill simplex method for fast adaption of optical filters in optical communication systems, *Electron.Lett.*, 2019, 55, (8), pp. 471-473.

- [157] Xiao X., Huang X., Kang Q.: A Hill-Climbing-Method-Based Maximum-Power-Point-Tracking Strategy for Direct-Drive Wave Energy Converters, *IEEE Trans.Ind.Electron.*, 2016, 63, (1), pp. 257-267.
- [158] Khan O., Acharya S., Hosani M.A., Moursi M.S.E.: Hill Climbing Power Flow Algorithm for Hybrid DC/AC Microgrids, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33, (7), pp. 5532-5537.
- [159] Srinivas M., Patnaik L.M.: Genetic algorithms: A survey, *Computer*, 1994, 27, (6), pp. 17-26.
- [160] Anderson-Cook C.M.: *Practical Genetic Algorithms*, Oxfordshire, U.K.: Taylor & Francis, 2005.
- [161] Khan B., Singh P.: Selecting a Meta-Heuristic Technique for Smart Micro-Grid Optimization Problem: A Comprehensive Analysis, *IEEE Access*, 2017, 5, pp. 13951-13977.
- [162] Bala A., Ismail I., Ibrahim R., Sait S.M.: Applications of Metaheuristics in Reservoir Computing Techniques: A Review, *IEEE Access*, 2018, 6, pp. 58012-58029.
- [163] Liao T., Socha K., Oca M.A.M.d., Stützle T., Dorigo M.: Ant Colony Optimization for Mixed-Variable Optimization Problems, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2014, 18, (4), pp. 503-518.
- [164] Xiang Y., Zhou Y., Tang L., Chen Z.: A Decomposition-Based Many-Objective Artificial Bee Colony Algorithm, *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, 49, (1), pp. 287-300.
- [165] Bandyopadhyay S., Saha S., Maulik U., Deb K.: A Simulated Annealing-Based Multiobjective Optimization Algorithm: AMOSA, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2008, 12, (3), pp. 269-283.
- [166] Holland J.H.: *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, Ann Arbor, MI, USA: Univ. Michigan Press, 1975.
- [167] Senjyu T., Hayashi D., Urasaki N., Funabashi T.: Optimum configuration for renewable generating systems in residence using genetic algorithm, *IEEE Trans.Energy Convers.*, 2006, 21, (2), pp. 459-466.

- [168] Fonseca I., Farinha J.T., Barbosa F.M.: Maintenance planning in wind farms with allocation of teams using genetic algorithms, *IEEE Latin America Transactions*, 2014, 12, (6), pp. 1062-1070.
- [169] Jung S., Jung H., Hahn S., Jung H., Lee C.: Optimal Design of Direct-Driven PM Wind Generator for Maximum Annual Energy Production, *IEEE Trans.Magn.*, 2008, 44, (6), pp. 1062-1065.
- [170] Altin M., Hansen A.D., Barlas T.K., Das K., Sakamuri J.N.: Optimization of Short-Term Overproduction Response of Variable Speed Wind Turbines, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 9, (4), pp. 1732-1739.
- [171] Kennedy J., Eberhar R.C.: Particle swarm optimization, *Proc. IEEE Int. Conf. Neural Netw.*, Perth, WA, Australia, Jul 1995, pp. 1942-1948.
- [172] Hou P., Hu W., Soltani M., Chen Z.: Optimized Placement of Wind Turbines in Large-Scale Offshore Wind Farm Using Particle Swarm Optimization Algorithm, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2015, 6, (4), pp. 1272-1282.
- [173] Paul S., Rather Z.H.: A Pragmatic Approach for Selecting a Suitable Wind Turbine for a Wind Farm Considering Different Metrics, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 9, (4), pp. 1648-1658.
- [174] Yang J., Chen Y., Hsu Y.: Small-signal stability analysis and particle swarm optimisation self-tuning frequency control for an islanding system with DFIG wind farm, *IET Generation, Transmission Distribution*, 2019, 13, (4), pp. 563-574.
- [175] Zhou T., Sun W.: Optimization of Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage Station in Wind/Solar Generation System, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2014, 5, (2), pp. 408-415.
- [176] Storn R., Price K.: Differential evolution—A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces, *J. Global Optim*, 1997, 11, (4), pp. 341-359.
- [177] Wang Y., Liu H., Long H., Zhang Z., Yang S.: Differential Evolution With a New Encoding Mechanism for Optimizing Wind Farm Layout, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14, (3), pp. 1040-1054.

- [178] Yahia H., Liouane N., Dhifaoui R.: Differential evolution method-based output power optimisation of switched reluctance generator for wind turbine applications, *IET Renewable Power Generation*, 2014, 8, (7), pp. 795-806.
- [179] Lydia M., Selvakumar A.I., Kumar S.S., Kumar G.E.P.: Advanced Algorithms for Wind Turbine Power Curve Modeling, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2013, 4, (3), pp. 827-835.
- [180] Zhang Y., Dong Z.Y., Luo F., Zheng Y., Meng K., Wong K.P.: Optimal allocation of battery energy storage systems in distribution networks with high wind power penetration, *IET Renewable Power Generation*, 2016, 10, (8), pp. 1105-1113.
- [181] Ehrgott M., Gandibleux X.: A survey and annotated bibliography of multiobjective combinatorial optimization, *OR-Spektrum*, 2000, 22, (4), pp. 425-460.
- [182] Durillo J.J., Nebro A.J., Garcia-Nieto J., Alba E.: On the Velocity Update in Multi-Objective Particle Swarm Optimizers, in Coello Coello C.A., Dhaenens C., Jourdan L. (Eds.): *Advances in Multi-Objective Nature Inspired Computing* (Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010, pp. 45-62.
- [183] Coello Coello C.A., Dhaenens C., Jourdan L.: Multi-Objective Combinatorial Optimization: Problematic and Context, in Coello Coello C.A., Dhaenens C., Jourdan L. (Eds.): *Advances in Multi-Objective Nature Inspired Computing* (Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010, pp. 1-21.
- [184] Pareto V.: *Cours D'Economie Politique*, F. Rouge, Lausanne, 1896, I, (II).
- [185] Akuru U.B., Kamper M.J.: Formulation and Multiobjective Design Optimization of Wound-Field Flux Switching Machines for Wind Energy Drives, *IEEE Trans.Ind.Electron.*, 2018, 65, (2), pp. 1828-1836.
- [186] Baktash A., Vahedi A.: Design of a Wound Core Pulse Transformer Using Multiobjective Optimization Method, *IEEE Trans.Plasma Sci.*, 2015, 43, (3), pp. 857-863.
- [187] Mao Y., Niu S., Yang Y.: Differential Evolution-Based Multiobjective Optimization of the Electrical Continuously Variable Transmission System, *IEEE Trans.Ind.Electron.*, 2018, 65, (3), pp. 2080-2089.



- [188] Kolar J.W., Friedli T., Krismer F., *et al.*: Conceptualization and Multiobjective Optimization of the Electric System of an Airborne Wind Turbine, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2013, 1, (2), pp. 73-103.
- [189] Long H., Eghlimi M., Zhang Z.: Configuration Optimization and Analysis of a Large Scale PV/Wind System, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 8, (1), pp. 84-93.
- [190] Timmer W., van Rooij R.: Summary of the Delft University wind turbine dedicated airfoils, *Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the Asme*, 2003, 125, (4), pp. 488-496.
- [191] Schramm M., Rahimi H., Stoevesandt B., Tangager K.: The Influence of Eroded Blades on Wind Turbine Performance Using Numerical Simulations, *Energies*, 2017, 10, (9), pp. 1420.
- [192] Blaylock M., Chow R., Cooperman A., van Dam C.P.: Comparison of pneumatic jets and tabs for Active Aerodynamic Load Control, *Wind Energy*, 2013, 17, pp. 1365-1384.
- [193] UCAR/NCAR - Earth Observing Laboratory. 2013. PCAPS ISFS 1 second data. Version 1.0. UCAR/NCAR - Earth Observing Laboratory. <https://doi.org/10.5065/D6QV3JRP>. (accessed on 15 July 2018).
- [194] Young J.S.: Investigation of wintertime cold-air pools and aerosol layers in the Salt Lake Valley using a lidar ceilometer, The University of Utah, 2013.
- [195] Foster C.S.: Simulation of a cold-air pool in Utah's Salt Lake Valley, The University of Utah, 2015.
- [196] Lareau N.P., Horel J.D.: Dynamically induced displacements of a persistent cold-air pool, *Boundary-Layer Meteorology*, 2015, 154, (2), pp. 291-316.
- [197] Zhou X., Yang Q., Zhen X., *et al.*: Recovery of the three-dimensional wind and sonic temperature data from a physically deformed sonic anemometer, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11, (11), pp. 5981-6002.
- [198] Li X., Zhu G., Gao W., *et al.*: A novel ultrasonic array signal processing scheme for wind measurement, *ISA Trans.*, 2018, 81, pp. 259-269.

[199] Emeis S., Turk M.: Comparison of Logarithmic Wind Profiles and Power Law Wind Profiles and their Applicability for Offshore Wind Profiles, February 2007, pp. 61-64.

[200] <https://earthdata.nasa.gov/> (accessed on 3 December 2018).

[201] Fuel Cells B.: McPhy delivers 4 MW of hydrogen production to China for P2G application with wind farm, Elsevier, 2017, 6, pp. 1.