

GIPUZKOAKO INGENIARITZA ESKOLA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE GIPUZKOA

EIBAR

**GRAL : ERAIKINETAN INTEGRATUTAKO HAIZE ERROTA BATEN ESKALAKO
EREDUAREN ERAIKUNTZA**

1. DOKUMENTUA: MEMORIA

Gradua: Energia Berriztagarrien Ingeniaritza

Ikasturtea: 2019 – 2020

Egilea: Maitane Zirion Martinez de Musitu

Zuzendaria: Alain Ulazia Manterola

ESKER-EMATEAK

Denbora askoren ostean, heldu da eguna, atal hau idatziz amaiera ematen diot nire gradu bukaerako lanari, eta honekin batera, Eibarko Energia Berriztagarrien Ingeniaritza Eskolako ikasketei. Lau urte hauek ikasketa denboraldi bizia izan dira niretzat, ez bakarrik inguru zientifikoan, baizik eta pertsonalki ere. Hau dela eta, atal hau prozesu honetan zehar lagundu didaten pertsona guztiei eskertzeko erabiltzea erabaki dut.

Hasteko, eskerrak eman nahi dizkiet Roseo enpresako praktikan nire irakasle izan ziren Mario del Río eta Oscar Garcíari. Haiek asko lagundu didate proiektu honetan zehar, egunero nire zalantzak argitzeko eskuragarri egonez eta edozein gauzatan laguntzeko prest egonez. Honekin jarraituz, eskerrak eman nahi dizkiot Alain Ulazia Doktoreari, lan honetan nire tutorea izan denari, nire lana hobetzeko aholkuak eta laguntza emateagatik.

Esker bereziak eman nahi dizkiet nire lagun eta kide guztiei, lan honen garapenaren bitartean ni jasan behar izateagatik, eta garrantzitsuagoa dena, nik lanari buruz pentsatzeari uztea lortu dut, lana ez den gaiei buruz hitz egiten eta ekintzak eta irteerak prestatuz.

Amaitzeko, eskerrik asko nire guraso eta familia osoari, haien aholku eta ulermenagatik.

Eskerrik asko guztiei!

AURKIBIDEA

1.	LABURPENA	1
2.	DEFINIZIOAK ETA AKRONIMOAK	3
3.	SARRERA	5
3.1	Haize teknologia txikia	5
3.2	Metodologia	9
3.3	Hirigunetako eolika teknologiaren garapena	10
4.	AURREKARIAK	15
4.1	Haizearen portaera eraikinetan	16
4.2	Errotorearen diseinua	18
4.3	kontzentradorearen diseinua	20
4.3.1	Roseo kontzentradorea	20
4.3.2	Anemoi kontzentradorea	21
4.3.3	Kontzentradoreen abantailak	21
4.4	Laborategi probak	22
4.5	Lortutako erantzunak	25
4.6	Blockage ratio	25
5.	ROSEO PROTOTIPOAREN ERAIKUNTZA	35
5.1	Errotorearen diseinua	35
5.2	Eraikinaren diseinua	38
5.3	Motorea	41
5.4	Kontzentradorearen diseinua	41
5.5	Arduinoa	45
5.6	Prototipoaren akabera	47
5.7	Blockage ratioaren egiaztapena	49
6.	LABORATEGI PROBAK	51
6.1	Handiagotze faktorearen proba	52
6.2	Skew proba turbinarekin	55
7.	ONDORIOAK	63
7.1	Esperimentuen erantzunen ondorioak	63
7.2	Etorkizuneko ikuspegia	64

1. LABURPENA

Gaur egungoko haize teknologia txiki gehiena eraikinetan instalatzeko erabilgaitza da, gehiegizko zarata eta bibrazioengatik eta integrazio arkitektoniko txarragatik. Desabantaila hauek Roseo deitutako proiektuak konpondu nahi ditu. Roseo proiektua eraikinetan integratutako sorkuntza eolikoko sistema baten diseinuan datza. Hirigunetako baldintzen aprobetxamendu optimorako pentsatuta dago, zona hauetako haize korronteen berezitasunak aprobetxatuz eta ohiko aerosorgailuek sortu ahal dituzten problemak konpontzen saiatuz.

Proiektu hau beste bi Gradu Amaierako Lanetan oinarrituta dago, 2017-2018 ikasturteko ekainean aurkeztu zirenak "Integración de turbinas eólicas en edificios I y II" deituak. Lan hauek Gipuzkoako Ingeniaritza Eskola – Eibarko sekzioaren eta Roseo Junior Enpresa Asoziazioaren arteko kooperazioaren ondorioz sortu ziren. Roseo Junior Enpresa GIE-Eibarko sekzioko 4 ikasleen eskutik jaio zen: Mario del Rio, Yaiza Torres, Garikoitz Arcelus eta Óscar García.

Aurreko lanetan, Roseo prototipoa azaltzen zen eta honekin aerosorgailuaren eraginkortasuna frogatzeko eman ziren laborategiko esperimentuen prozesua azaltzen da. Hala ere, proben emaitzak ez ziren eztaba daezinak, haize tunelaren mugen eta proben planifikazio txarragatik. Ondorioz, Gradu Amaierako Lan honetan, emaitza txar horien zergatia azalduko da, hauei konponbide bat emanez. Konponbidea zehaztuta, eskalako prototipo bat eraikiko da zeinekin laborategiko proba berriak egingo diren eta emaitza berriak hausnartuko diren.

2. DEFINIZIOAK ETA AKRONIMOAK

AKRONIMOA	DEFINIZIOA	ITZULERA
WWEA	<i>World Wind Energy Association</i>	Munduko Haize Energia Elkartea
nZEB	Nearly Zero Emission Building	Ia Zero Igorpeneko Eraikina
BIWT	Building-Integrated Wind Turbine	Eraikinetara integratutako haize turbina
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine	Ardatz horizontaleko haize turbina
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine	Ardatz bertikaleko haize turbina
CFD	Computational Fluid Dynamics	Fluxuen dinamika konputazionala
PAGV	Power Augmentation Guide Vanes	Potentzia handipenerako pala gidariak
Cut-in	Minimum Velocity	Abiarazte abiadura
Cut-off	Maximum velocity	Gelditze abiadura
C_P	Power Coefficient	Potentzia koefizientea
C_T	Thrust Coefficient	Bulkada koefizientea
BR	Blockage Ratio	Eragozpen ratioa
TSR	Tip Speed Ratio	
BE	Blockage Effect	Eragozpen efektua
f	Blockage Correction factor	Eragozpen zuzenketa faktorea
F_D	Drag force	Bulkada indarra
F_L	Lift force	Euste indarra

3. SARRERA

3.1 HAIZE TEKNOLOGIA TXIKIA

Orokorrean, turbina eoliko txikien merkatua gaur egun hazten ari den arren, eraikinetan instalatzeko turbina txikien merkatua proportzio txikiago batean hazten ari da. *World Wind Energy Association*-aren (WWEA-ren) arabera, turbina eoliko txikien instalazioa %12-aren inguruan handituko da urtero 2015-etik 2020-ra. Turbina eoliko txikien etekin ekonomiko ona eta teknologiaren etengabeko aurrerapena haize turbina txikien merkatuaren haziera azaltzen duten faktore erabakigarriak dira. Bestalde, azken urte hauetan, ikerketa askok eraikinen energia kontsumoa murriztera laguntzen duten teknologia ezberdinetan zentratzen ari dira. Filosofia hau nZEB (*nearly Zero-Energy Building*) bezala ezagutzen da eta EU 2010/31/CE direktibaren barnean dago, eraikinen energia efizientziarekin erlazioa duenak. 2018-tik aurrera, eraikin publiko berriak arauketa honen arabera eraikita egon beharko lirateke eta 2020-tik aurrera, eraikin berri guztiek jarraitu beharko lukete arautegi hau. [1] Oraindik kontzeptu hau ez dago guztiz zehaztuta, baina honela laburbildu daiteke:

- Efizientzia energetikoko maila oso altuko eraikinak dira.
- Berriztagarria ez den oinarritzko energia azalerarekiko (kWh/m^2) bezala kuantifikatzen da.
- Beharrezko energia iturri berriztagarrietatik eratorritako energiarekin bete behar da, neurri handi batean.
- Guzti hau errentagarritasun maila optimoekin.

Filosofia honentzat hainbat definizio daude. Gehienetan, eraikinean pertsonak eta sistemek erabilitako energia eta energia berriztagarrien bidez sortutako energiaren arteko balantzea bezala definitzen da; eraikina eta bere osagaiak eraikitzerakoan eta entregatzean erabilitako energia kontuan hartu barik. Helburua energia efizientzia maximizatzea eta baliabide fosiletatik eratorritako energia primarioaren erabilera txikitzea da, horrela beharrezko energia eskaera energia berriztagarriekin bete ahal izateko.

Horrez gain, nabarmentzekoa da 2020-an Europar Batasunak hartutako konpromiso berria. *European Climate Law*-aren bidez, Europar Batzordeak proposatu du 2050-erako berotegi efektuko gasen igorpena garbi nulua izatea, honela, energia berriztagarrien erabilpena sustatuz. [2]

Modu honetan, haize teknologia txikia, 100KW edo gutxiagoko turbinekin 200m² baino txikiagoko azalerak betetzeko energia sortzeko balio dutenak, zeregin garrantzitsua izan dezake. Hala ere, badaude hainbat teknologia erronka oraindik ez direnak guztiz konpondu, hala nola, bibrazioak, sortutako soinu-maila eta gailuaren estetika eta integratze arkitektonikoa.

Dena dela, gailu hauek abantaila ugari dituzte:

1. Gailu independente bezala funtziona dezakete, beraz, energia sor dezakete kokapen isolatuetan sare elektrikora konektatuta egon gabe.
2. Mikro-sorkuntza banatua moduan lan egiten dute, honela garraio eta banaketako energia galerak txikituz. Gailu hauek energia sortzen dute amaierako erabiltzailetik hurbil dagoen leku batean, modu honetan infraestruktura elektrikoen beharra drastikoki murriztuz.

3. Horrez gain, energia fotovoltaiakoarekin konbina daiteke instalazio hibridoetan erabilpen optimoa eta partekatutako metagailu elektrikoen kudeaketa baimentzeko.

Hirigunetarako haize energian eman diren garapen berriek Eraikinetan integratutako haize turbinei (BIWT: *Building-Integrated Wind Turbine*) buruzko proiektu mota ezberdin asko inspiratu dituzte. Lehenengo proiektua, eta agian adierazgarriena, Bahrein-en aurkitzen den World Trade Centre izan zen. 2008-an eraiki zen eta 34 pisuko bi eraikin berdinez osatuta dago, haize korronteak sortzen dituztenak. Eraikin hauen artean, 29 metroko diametroa duten 3 haize turbina zintzilikatuta daude.

Esan beharra dago proiektu honetan erabilpen faktorea txikiagoa dela, haize turbinen ardatza finko dagoelako, eta beraz, turbinek bakarrik aprobetxa dezakete haizearen energia haizea noranzko optimoan datorrenean. Hala ere, eraikinek haizea bideratzen dutenez, energia sorkuntza ezaugarri berdineko ohiko sorgailu batena baino handiagoa izatea lortzen da.



Irudia 3-1. BIWT-ko lehen proiektua Bahrein-eko World Trade Centre eraikinean

Hiriko eolikan egin diren aurrerakuntzen ondorioz, mota honetako proiektu gehiago sortzen ari dira, adibidez, Londresen. Strata SE1 43 pisuko eraikin altua da eta bere teilatuan 9m-ko diametroko haize turbinak barneratu dira, *Venturi* efektua erabiltzen duten karkasetan. 19KW-ko haize turbina hauentzat haize abiadura optimoa 8 eta 16m/s artean dago eta eraikinaren argi eskaria hornitzeko erabiliko dira. Eraikin hau oso egokia da haize sorgailuak instalatzeko, alde batetik, hegorantz dagoelako kokatuta, eta Londreseko haize arrosak haize nagusia hego-mendebalderantz du. Gainera, bere forma kurbatuak haizea sorgaiuetara bideratzen du. Azkenik, eraikina altua da eta Londresek altuera honako haizea eragotzi dezaketen eraikin altu gutxi ditu. [3]



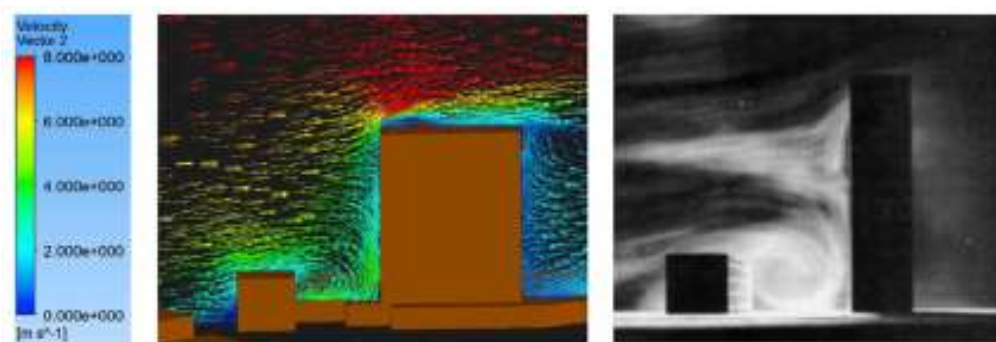
Irudia 3-2. Londreseko Strata SE1 eraikina

Eskala txikiago batean, ardatz horizontaleko haize turbinak (HAWTs: *Horizontal-Axis Wind Turbines*) eraikinetan integratzen dituzten proiektu askotan aurki daitezke, ardatz bertikaleko haize turbinen (VAWTs: *Vertical-Axis Wind Turbines*) kasuan bezala. Proiektu hauek existitzen diren eraikinetan haize turbinak integratzean zentratzen dira. Hortaz, eraikin hauek ez ziren aurretik diseinatuak izan haize fluxuak azeleratzeko, aurretik aipatutako Bahrain-eko World Trade Centre edo Strata SE1 eraikinak ez bezala. Post-integrazio joera honen arabera, eraikinetan integratutako haize turbinak leku estrategikoetan kokatzen ari dira geometria ezberdinen ondorioz sortutako haize fluxuen azelerazioa antzemateko. Honi dagokionez, kokaleku interesgarrienak goiko eta aldeko ertzak dira, batez ere goikoa, etxeekiko distantzia dezente batera dagoelako.



Irudia 3-3. Gorlov Helical Turbine (GHT) turbinen instalazioa Londreseko eraikin batean

Gaur egun, hirigunetako haize energia aprobetxatzen duen sistema optimo baten garapenean lan egiten duten hainbat proiektu daude. Gehienek oztoporik gabeko inguruneetan kokatutako haize turbinak ingurune hiritarretarako aproposak ez direla ondorioztatu dute, hirigunetan ematen den fluxu turbulentuagatik. Izan ere, eraikinetako goiko ertzetan turbulentzia intentsitate esanguratsua eratu daiteke. Baduzzi et al.-ek garatutako CFD simulazioan [1] erakutsi zen haizearen turbulentzia %10 eta %30 artean handitzen dela eraikinaren goialdeko ertzan. Horrez gain, eraikinetako instalazioak modu egokian lan egin dezan, erabakitako eraikina bere inguruko eraikinak baino altuagoa izan behar da, turbulentzia arazoak saihesteko eta haizearen abiadura handiagoak aprobetxatzeko. Gainera, eraikinaren eta bere aurrekoaren ertzak haize fluxuan eragina duten ezaugarri nagusietakoak dira. Azkenik, eraikinaren teilatuaren formak ere eragin handia du. Ledo et al.-ek garatutako azterketa batean, haize fluxua eta eraikinen teilatuen arteko erlazioa ikertu zen, eta teilatu lauak potentzia handia sortzeko formarik egokiena dela ondorioztatu zuten. [4,5]



Irudia 3-4. Blocken eta Carmeliet et al.-ek CFD-ren bidez eraikin baten gaineko haize fluxuen azterketa

Arrazoi honengatik, HAWT gailuak, normalean fluxu laminarrekin etekin ona erakusten dutenak, hiriko paisaietan desegoki ibiltzen dira, izan ere, HAWT gailuek %10-a baino txikiagoko turbulentziekin lan egin dezakete bakarrik. Hala ere, [6] lanean, teilatu esferikoek turbulentzien intentsitatea txikitzen dutela konprobatu zen. Gainera, hormatik teilaturako trantsizioa leuna bada (kurbatua bada) haizearen abiadura handitzen da. Kasurik interesgarriena da teilatu esferikoa horma zilindrikoarekin. Kasu honetan, haizearen abiadura beste kasuetan baino handiagoa da, eta HAWT makinek duten turbulentzia limitea ez da pasarazten. Horrez gain, HAWT makinek 500m-ko erradio batean 200 dB bezain altuko soinua sortzen dute, hirietan erabiltzeko ezegokia bihurtzen duenak.

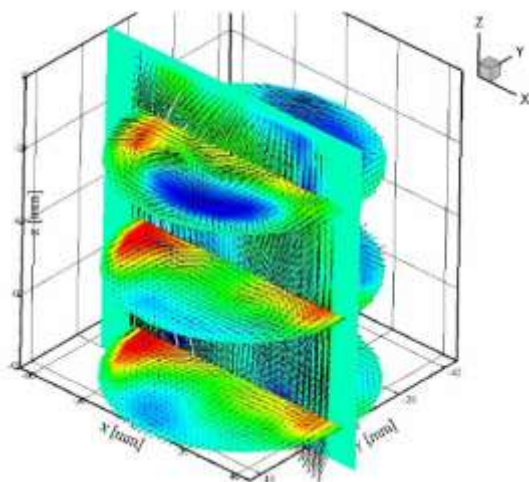
Ostera, VAWT eta *drag* gailuek (bultzada indarraren bidez lan egiten dutenek) oinarritzko zeregina daukate hirigunetan haize energia sortzen, izan ere, haien jarduera ez dago kaltetuta fluxu turbulentuen bidez (%20-ko turbulentziak jasan ditzakete), eta isilak izaten ohi dira. Orokorrean, eraikinez inguratutako gunetan, turbulentzia handia dago, bereziki eraikinen ertzetan, beraz kasu hauetarako VAWT gailuak erabiltzea gomendatzen da. Bereziki *Savonius* turbina, izan ere, turbulentzia handitzean errotorean bueltatzen dagoen palan geruza limitea banatzen da eta pare negatiboa txikitzen da. Gainera, VAWT eta *drag* gailuek HAWT gailuek baino *cut-in* (abiarazte abiadura) txikiagoa dute eta *cut-off* (gelditze abiadura) handiagoa edota mugagabea, funtzionamendu denbora luzeagoa bermatuz. *Drag* gailuen desabantaila bat da haien C_p -a *lift* turbinekin (euste indarraren bidez funtzionatzen dutenekin) lortzen denarekiko oso urrun dagoela. Baina abantaila asko dituzte, hala nola, diseinuaren sinpletasuna, bibrazio gutxiago, integrazio bisual hobea...

Atal honetan aipatu den bezala, turbinek sortzen duten zarata kontuan hartu behar da, izan ere, haize turbinak etxebizitzaz inguratutako espazio batean kokatzean, sortzen den soinua onargarria izan behar da. Honi dagokionez, VAWT gailuak HAWT gailuak baino gomendagarriagoak dira, oso isilak izaten direlako. Horrez gain, turbinen bibrazio maila ere murriztu behar da, turbinan neke kalteak sortzen dituelako, zarata maila handitzea eragin dezakeena.

3.2 METODOLOGIA

Honekin jarraituz, egungo hirigunetako haize energiaren potentzialak ikertzaileak inguru hauetako haize energia estimatzeko metodologia apropos bat garatzera bultzatu ditu. Metodologia sistema ezberdin hauek hiru taldetan bana daitezke: sistema enpirikoak, simulazio konputazionalak eta hibridoak.

Hasteko, sistema enpirikoek satellite edo estazio meteorologikoetatik lortutako datuak erabiltzen dituzte, modelaketa eta iragarpenetarako. Metodo honek erantzun onak ematen ditu, kasu gehienetan, epe luzetako iragarpenetan. Talde honetan, anemometroez gain, SPIV (*Stereo Particle Image Velocimetry*) eta ARMA (*Autoregressive-Moving-Average model*) bezalako sistemak aurki daitezke. [18,19]



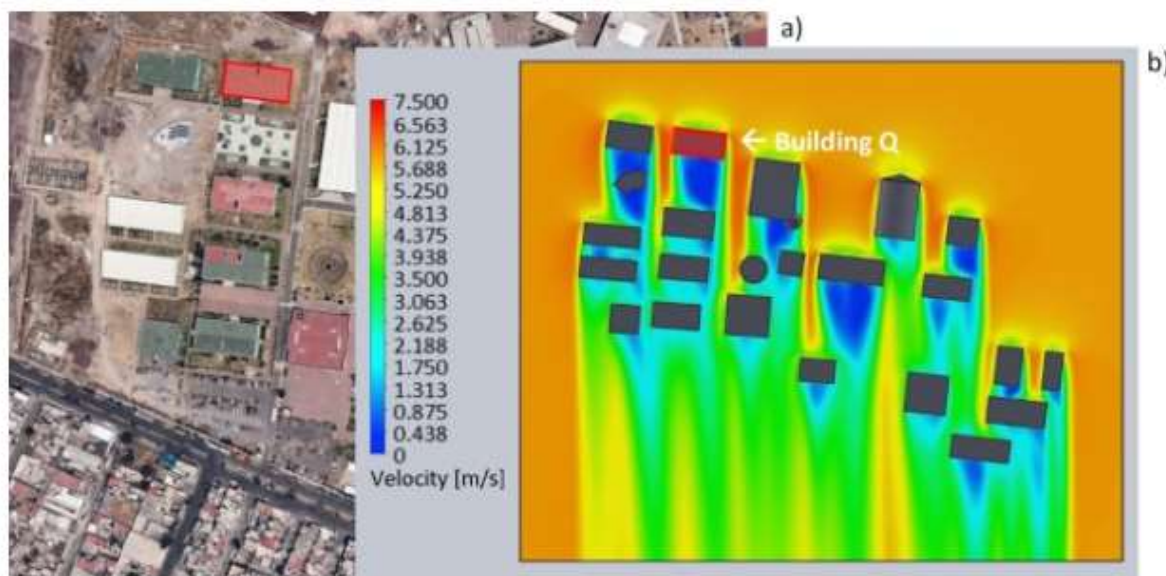
Irudia 3-5. SPIV metodoaren bidez egindako 3 dimentsiotako simulazioa

Bigarren taldea simulazio konputazionalak erabiltzen dituzten sistemak dira. Modelo hauek modelo meteorologikoetatik lortutako aldagai esplikatzaileak erabiltzen dituzte haize potentzia aurreikusteko. Sistema hauek inguru konplexuetan haize sorgailuak kokatzeko leku egokiak aurkitzeko erabiltzen dira. Gainera, funtsezkoak dira epe laburreko iragarpenak egiterako orduan. Talde honetan CFD (*Computational Fluid Dynamics*), RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*), WAsP (*Wind Atlas Analysis and Application Programm*) edo LES (*Large Eddy Simulation*) sistemak sartzen dira. Aipatutakoetatik, LES da turbinen geometria kontuan hartzen duen bakarretakoa [20,21]. Horrez gain, hauen artean, CFD sistema oso erabilia da gaur egun, bereziki hirigunetako haize energia auresateko, eta hemen garatuko da.

CFD zabalki erabilitako erraminta informatikoa da, ingeniarietako edozein adarretan lagungarria izan daitekeena, aeronautika, aeroespaziala, ingeniarietza mekanikoa... barnean

sartuz. [9] Energia berriztagarrien kasuan, kutsadura sakabanatzea, hirietako kaleetako haize mugimendua eta BIWT proiektuetarako erabiltzen da. Hainbat azterketa egin dira oinezkoen mailan haize korronteen eraginari buruz. Azterketa hauek CFD simulazio asko dauzkate eraikinen aurrealdeetatik haizearen jokaera aurrelategi, oinezkoen erosotasunarekin lotuz. Antzerako azterketek ingurunearen ebaluaketa eta kutsaduraren sakabanaketa barneratzen dute. Horrez gain, beste CFD simulazioei buruzko argitalpenak haize turbina txikien konfigurazio ezberdinen zarataren murrizpenarekin lotuta daude.

Adibidez, hurrengo irudian CFD simulazio bat aurkitzen da, Q eraikinaren haize korrante lerroak identifikatzeko diseinatuta. Simulazio honen bidez eraikinaren geometriaren aerodinamika identifikatu daiteke, haize korrante lerro errealek lortzeko eta haize fluxua aztertu ahal izateko. Emaitzek erakusten dute estela efektu gorakorra eraikinaren teilatuan iparraldetik eraikinaren atzealdera.



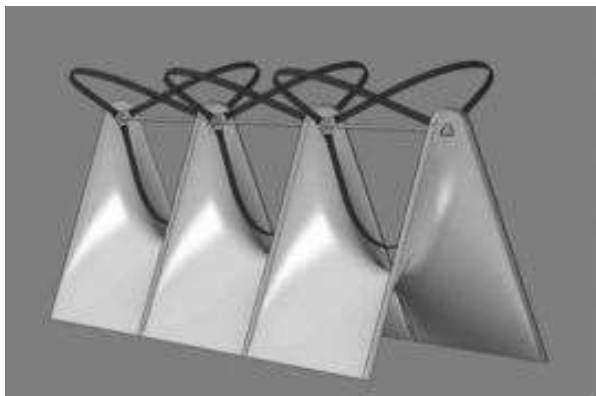
Irudia 3-6. CFD-ren bidez egindako simulazioa. a) airetiko ikuspegia. b) CFD simulazioaren emaitza

Azkenik, badaude sistema batzuk aurreko bi metodologiak batzen dituztenak, hibridoak. Haize abiadura eta potentziaren aurreikusketa oso aztertua izan da hibridoen ikuspegitik iragarpen zehatzagoak lortzeko helburuarekin. [22] Lan honetan, adibidez, honelako sistema batekin lan egin da. Izan ere, anemometroa erabili da, enpirikoa dena, baina modelo meteorologikoaren simulazioetatik lortutako datuak erabiltzen dira, geografian txertatuta, kalibratzeko.

3.3 HIRIGUNETAKO EOLIKA TEKNOLOGIAREN GARAPENA

Gaur egun, T. Sharpe eta P. Gordon hiri-ingurunetan eta eraikinetan espezifiki inplementatzeko turbina batean ari dira lan egiten. Haiek *Darrieus* turbinaren optimizazioan zentratu dira. Diseinuaren alderdirik berriena da turbina ez dagoela eraikinera finkatuta mastil baten bitartez. Haien diseinuan, *Darrieus* baten hasierako kontzeptua, ardatz bertikalean kokatzea izango litzatekeena, aldatzen dute eta turbina ardatz horizontalarekin instalatzen dute. Honela, eraikinaren kubiartan karga banaketa

hobeaz lortzeaz gain, turbinaren oinarriak haize korronteak bideratzea lortzen dute, turbinaren eraginkortasuna hobetuz.

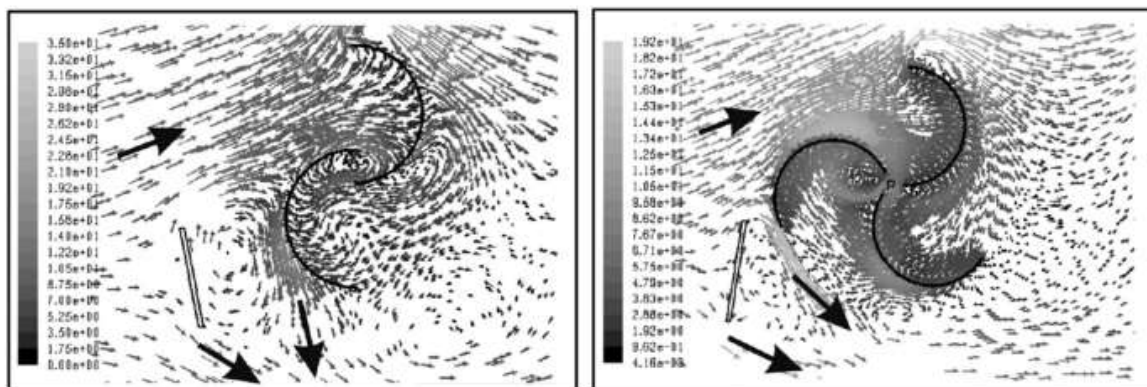


Irudia 3-7 eta 3-8. T. Sharpe eta P. Gordon-en turbinaren diseinua eta haren instalazioa eraikin baten goiko ertzan

Turbinaren diseinu arinak turbinak segurtasunez eraikinaren ertzetan inplementatzea baimentzen du, non potentzial handia dagoen, izan ere, korrante bertikalak edota eraikinetan ertzetan sortzen diren korranteak aprobetxatzen dira.

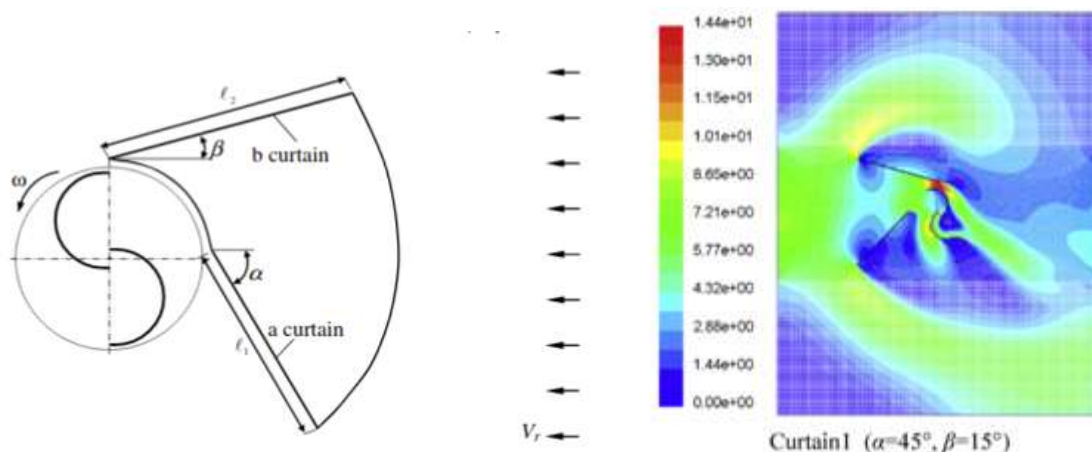
Lehen azaldu bezala, azterketa zientifiko askok argi utzi dute VAWT HAWT gailuak baino hobeak direla inguru hiri-ingurunetan inplementatzerako orduan. Hortaz, hiriko eolikaren inguruko azterketa berriak *Power Augmentation Guide Vanes*-en (PAGV-en) hobekuntzan zentratzen dira. Gailu hauek haizearen abiadura kontzentratzeko eta igotzeko eta aldi berean VAWT palen gainean sortutako pare negatiboa kentzeko balio duten gailuak dira. VAWT gailuak *drag* (*Savonius* eta *Sistan*) edo *lift* motakoak (*H-rotor* eta *Darrieus*) izan daitezke.

Mohamed et al. CFD-ren bitartez, *Savonius* turbinen diseinuak hobetuz joan dira, pare negatiboa kentzen duten plakak gehituz. Modu honetan, potentzia koefizientea %27 baten hobetzea lortu dute bai bi palako eta baita hiru palako errotoretan.



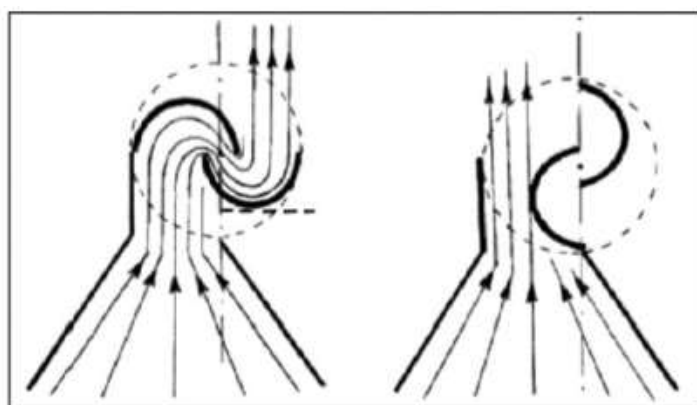
Irudia 3-9. Mohamed et al.-ek burututako itzultzen ari den palarekiko haizeak duen eragina kentzen duen plakaren kokapen optimoaren azterketan egindako simulazioa CFD-ren bidez.

Altan eta Atigan-ek plaken diseinu berri batean lan egin zuten, bueltatzen ari den palan haizearen eragina kentzeaz gain, palan eragina duen haizea azeleratzeko *Venturi* efektu bat lortu nahi zuten. Emaitzarik onenak $\alpha=45^\circ$ eta $\beta=15^\circ$ angeluekin lortu ziren, C_p -aren %38.5-eko hobekuntzarekin 2 palako *Savonius* errotore batean. Idazle berdinek, ondorengo azterketa batean, haien erantzunen baliotasuna konprobatu zuten CFD programaren bidez, eta oso korrelazio onak lortu ziren.



Irudia 3-10 eta 3-11. Alan eta Atiganek aztertutako errotorearen hobekuntza eta CFD-ren bidezko konprobaketa

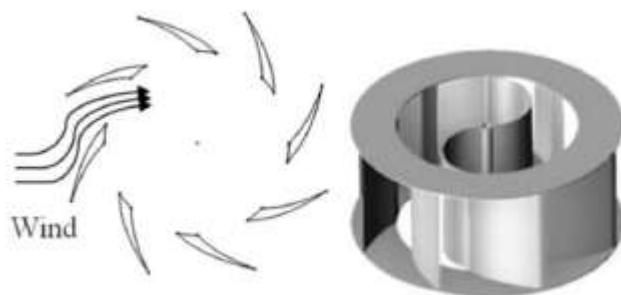
Shikha et al.-ek ere *Savonius* errotoreentzako haize kontzentradoreen inguruan azterketa asko egin zituzten eta sarrera eta irteera azalaren ateko 0,15-eko erlazioarekin kontzentradore ezberdinak frogatuz joan ziren, 3.7-ko haizearen abiaduraren haziera maximo bat lortuz.



Irudia 3-12. Shikha et al.-ek diseinatutako kontzentradorea

Kontuan izan behar da aurretik ikusitako azterketa guztiak noranzko bakarreko haizetan zentratzen direla, hau da, turbinaren ekintza haizearen norabide bakar baterako aztertzen da, eta beraz, izan liteke praktikan erabilpen baxuko faktorea izatea. Honen ondorioz, zientzialariak norabide orotako haizearen kontzentrazioarako gailu bat (PAGV) hedatzean ahalegin handia egiten ari dira. Mekanismo hauek potentzia hobetzen dute haizea

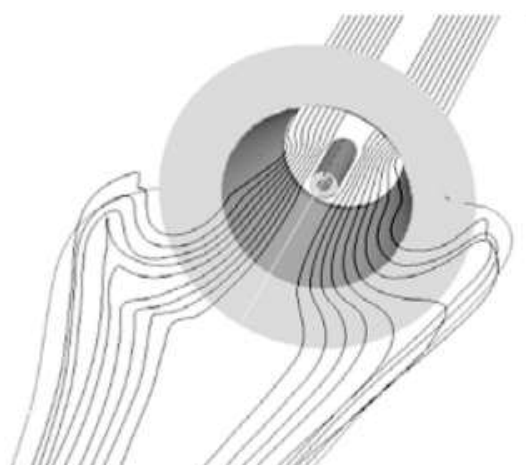
berbideratzen, eraso angelu hobe bat lortzen edo haizearen abiadura azeleratzen. Gailua borobila da eta haizea turbinaren paletara bideratzeko bandekin osatuta dago, turbinak haizearen energia xurgatu dezala, haizearen norabidea zeinahi ere den.



Irudia 3-13. PAVG-aren diseinua

Sistema honen hobekuntzarako azterketa zientifiko ezberdinek lortu dute 0,48-ko CP-a bi paletako Savonius batekin, Cp-aren %240-ko igoera suposatzen duenak PAGV gabeko turbinei dagokionez.

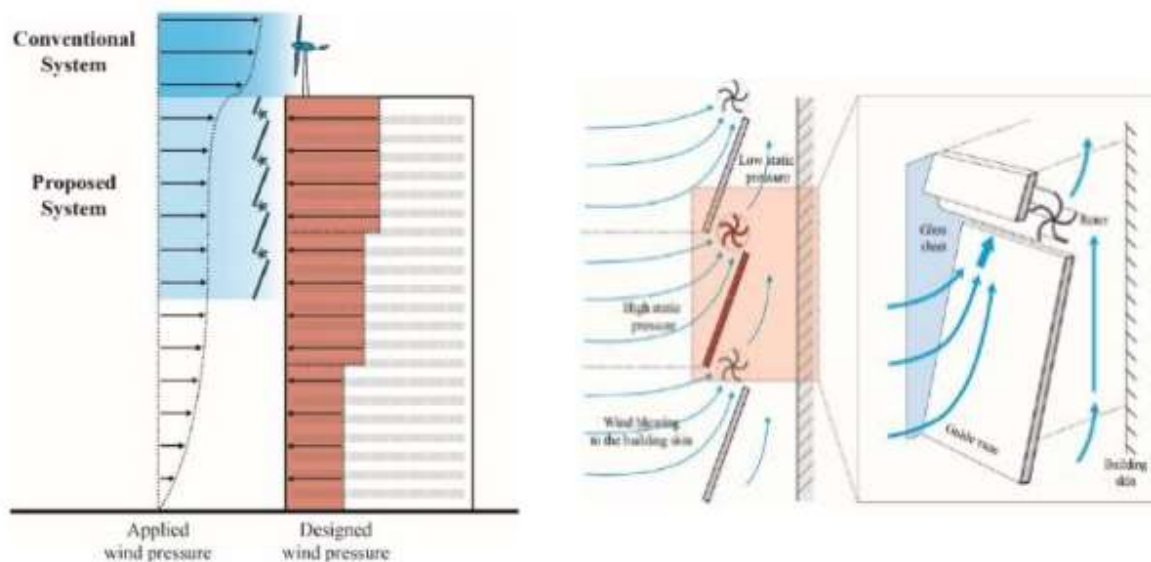
Chong et al.-ek VAWT gailuetan integratzeko Omni-Direction-Guide-Vane (ODGV) diseinatu zuten, norabide orotako hegal gidari bezala itzul daitekeena. Hegalak tutu zilindriko baten inguruan kokatuta daude eta haize fluxua VAWT-arantz bideratzen dute. Modu honetan, cut-in txikiagoa lortzen zen eta sorgailua denbora gehiago lan egitea lortzen zen. Beste adibide bat Ohya et al.-ek proposatutako eta ondoren hainbat zientzialari aztertutako Diffuser augmented wind turbine (DAWT) izan daiteke. Sorgailu honek turbina normal batek baino 4-5 aldiz potentzia gehiago lortzen du, haizea difusoretik azeleratzen delako. [7,8]



Irudia 3-14 eta 3-15. Ohya et al.-ek diseinatutako DAWT eta bere funtzionamendua

PAGV sistema hauek eraikinetako goialdean kokatzeko eta haizearen korrante askea aprobetxatzeko diseinatuta daude, eraikinetako izkinetan sortzen diren haize korronteen azelerazioak aprobetxatzean zentratu gabe. Hala ere, badaude eraikinen aldeetan sortzen diren korrante bertikalak aprobetxatzean arreta jartzen duten proiektuak.

J. Park et al.-ek eraikin baten aurrealdea azalera erabilgarrian bihurtzeko ideia garatu zuten, *Savonius* turbinak gehituz, hurrengo argazkian ikus daitekeen moduan. Esperimentu hau Roseo proiekturako interesgarria izan zen, eraikinen korrante bertikalak aprobetxatzean zentratzen delako. Hurrengo atalean azalduko den moduan, eraikinek haizearen fluxuaren azelerazioak sortzen dituzte eraikinetako aldeetan, eta hauek potentzial eoliko handia dute. [10]



Irudia 3-16. J. Park et al.-ek proposatutako instalazioaren diseinua

4. AURREKARIAK

Laburpenean azaldu den bezala, proiektu hau Roseo enpresak garatu zuen hirietako haize energia aprobetxatzeko helburuarekin, gaur egun gizateriak duen erregai fosilen eta kanpoko energiarekiko menpekotasuna gutxitzeko helburuarekin batera. Horretarako, Roseok bi poratera proposatu ditu: Alde batetik, Anemoi, potentzial eolikoa neurtzeko erraminta bat dena, eta beste aldetik, Rosbi, hirigunetarako pentsatuta dagoen aerosorgailua dena. Roseok, bi proposamen hauekin zerbitzu integral bat eskaini nahi du, non diseinutik turbinaren instalazio eta mantenu lanetara bezalako ekintzak sartzen diren. Hala ere, lan honetan aukera hauetako bat bakarrik aztertuko da, Rosbi prototipoa hain zuzen ere.



Irudia 4-1: Roseoren instalazioaren diseinua

Prototipo hau eraikinetan integratzea helburua duen *drag* motako *Savonius* turbina baten diseinua da. Turbina ROSEO-BIWT deitu da eta hirigunetan lan egiteko diseinatu da zehazki. Inguru hauetako haizea bere turbulentiengatik desberdintzen da, beraz, abiadura baxuko aire fluxuak aprobetxatzea garrantzitsua da. ROSEO-ren proiektuak bere lehenengo saria irabazi zuen EDP-RENEWABLE UNIVERSITY CHALLENGE 2017 erronkan, eta proiektuaren kideek ROSEO deitutako unibertsitate *start-up* bat eratu zuten.

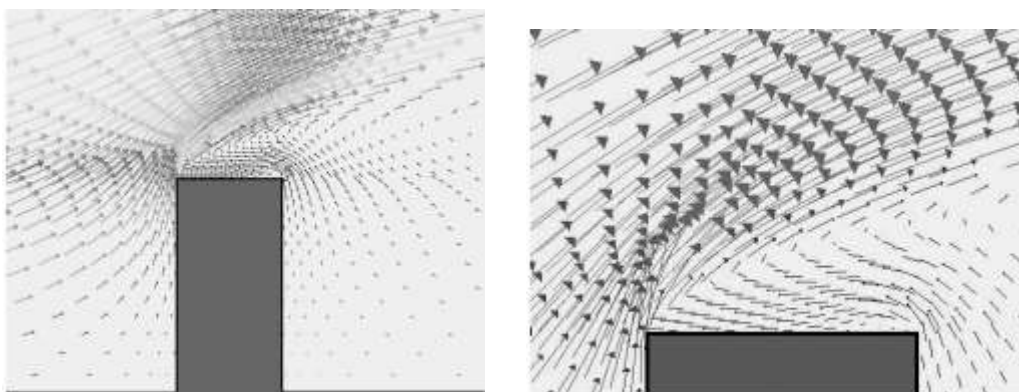
Normalean ardatz bertikaleko turbina bezala erabilia den arren, ROSEO-BIWT horizontalean kokatutako *Savonius* turbina batez eta *Venturi* efektuari esker, aire fluxua azeleratzen duten kontzentrazio helizez osatuta dago. Helize hauek normalean PAGV deitzen dira, aurretik azaldu den bezala. Proposatutako turbina arkitektonikoki integratzeko erraza izateko diseinatu izan zen. *Savonius* haize turbina *drag* indarrean oinarritutako gailua da, beste turbinak ez bezala, *lift* indarrean oinarritzen direnak. Izan ere, ezberdintasun honek zarata maila baxuak eta bibrazio gutxi izatea ahalbidetzen du, eraikinetako instalazioetan oso garrantzitsua dena. PAGV-ak haizearen abiadura handitzen du azalera handitzen den heinean, eta hortaz, sistema hau 1m/s inguruko haize

abiaduretan hasteko gai da, ondorioz, energia-sortze ordu asko bermatuz. Horrez gain, turbinak energia sortzeari jarraitzen dio haizearen abiadura altua izan arren. [1]

4.1 HAIZEAREN PORTAERA ERAIKINETAN

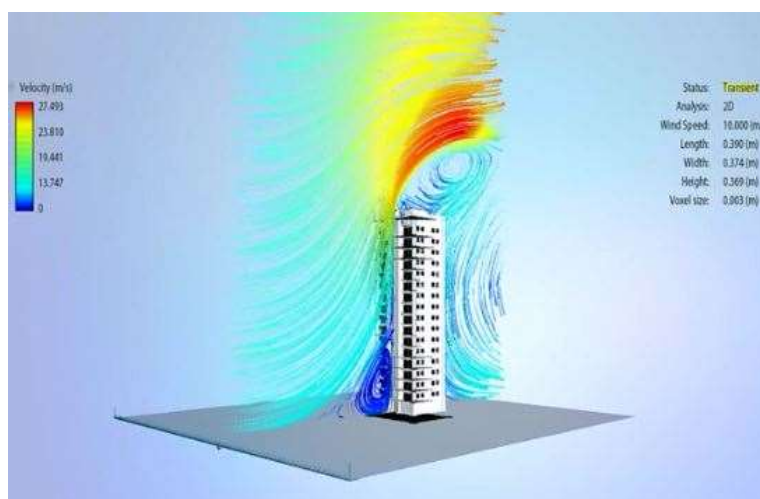
Proiektu hau aurrera eramateko, lehenengo haizearen portaera eraikinetan aztertu zen. Gai hau arkitekturaren arloan asko ikertu da, aire fluxuek eraikinaren estrukturan eragiten duten karga dinamikoak aztertzeko helburuarekin. Beraz, haizeak eraikinetan duen eraginari buruzko ezagutza handia jaso da, askotan CFD simulazioen bidez egiten dena.

Azterketa guztiek eraikinaren goialdeko haizearen norabidearekiko zuzendutako aldearen ertzaren potentzialari buruz bat datoz. Izan ere, haizea altuera garai batean dagoen objektu bat inguratzean, banatu egiten da zonalde baxua eta altuaren artean. Efektu hau eraikinaren altuera igo ahala handitu egiten da, haizearen norabidea handituz eraikinaren aurrealdearekiko gero eta perpendikularragoa denean. Adibidez, 5 pisuko eraikin batean, haizearen abiaduraren igoera, hasierako abiadurarekiko 1,2 aldikoa da.



Irudia 4-2 eta 4-3. CFD simulazioa abiadura bektoreak kalkulatzeko 2D eraikin batean, non fluxua ezkerretik datorren.

Azterketa hauek egiaztatu dute eraikinetako ertzetan haizea korrante askearekiko azeleratzen dela. Ondorioz, proiektua korrante bertikalak aprobeztatzean zentratzea erabaki zen, errota sorgailuen ilara bakarra jarritz eraikinaren goiko ertzan, potentzial handieneko puntua delako.



Irudia 4-4. Haizearen portaeraren simulazioa

Aurretik azaldu den moduan, hirietan haizea oso turbulentua izaten da eta eraikinen ertzetan handiagotzen da. Arrazoi honengatik VAWT gailuak erabiltzea gomendatzen da, turbulentzia altuagoak jasaten dituztelako, bereziki *Savonius* turbina.

Prototipoaren instalaziorako eraikinen potentzial eolikoaren azterketa egin behar da, izan ere, eraikin guztiak ez dira aplikazio honetarako erabilgarriak. Eraikina erabilgarria izateko, eraikinen fatxadetako bat haizearen noranzko nagusirantz begira egon behar da eta eraikina bere ingurukoak baino altuagoa izan beharko da, korrante nagusiak oztoporik ez izateko.

Haizearen abiadura baldintza neutraletan kalkulatzeko, hurrengo formula erabiltzen da, Oke-en legeari dagokiona:

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right)$$

Non, u_* : frikzio abiadura den.

k : von Karman konstantea ($\sim 0,4$).

z : lurrazal altuera.

z_0 : zimurdura aerodinamikoa, lurrazal motaren arabera dena.

d : Zero planoaren desplazamendua, non haizearen abiadura 0 m/s-koa den. Desplazamendu honen altueraren azpitik, eraikinak bezalako oztopoek haize fluxua eragiten dute.

Haizearen potentziala aztertzerakoan, haizearen portaera batzuk hartu behar dira kontuan. Hala nola, haizearen abiadura altuerarekiko handiagotzen dela. Gainera, erreferentzia datu batzuk izanda, haizearen abiadura kalkula daiteke beste altuera eta zimurdura baldintzetan. Hau, hurrengo formularekin kalkula daiteke:

$$\frac{U(z)}{U(z_r)} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)}$$

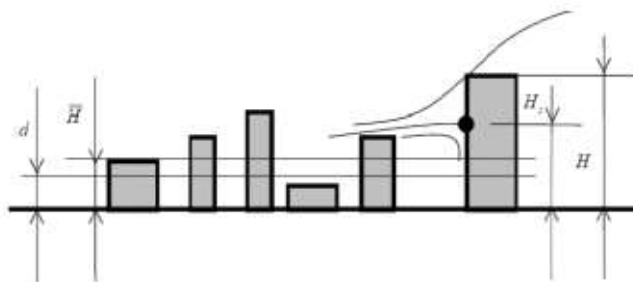
Non, erreferentzia datuak (z_r , $U(z_r)$) diren, eta zimurdura (z_0) den.

Kontuan izan behar da, hirietan zimurdura hain handia dela, barne kapa limite bat eratzen duela, h_k altuerakoa, Ekman kapa ere deitua. Honen barruan desplazamendu altuera d garrantzitsua da, haizearen abiadura eraikinen eragina adierazten duenak. Desplazamendu altuera hiriaren ezaugarrien arabera da eta honela kalkulatu da:

$$d = \bar{H} - 4.3z_0(1 - A_H)$$

Non, H eraikinen batz besteko altuera den, normalean 25 metroko balorekoa izan ohi dena. A_H eraikitako azalera da, normalean 0.42 baliokoa, eta z_0 zimurdura da, 0,8 eta 1 arteko balio ohikoarekin.

Desplazamendu abiadura fatxadako geldialdi puntua lortzeko balio du, hau da, fatxadatik igotzen diren haize fluxuak eta fatxadan gelditzen diren korrante turbulentuak desberdintzen dituen presio puntu maximoa.



Irudia 4-5. Eraikin bateko geldialdi puntua (H_s)

Desplazamendu altuera (d) eta geldialdi puntuarekin (H_s) jakin daiteke zein eraikin diren erabilgarriak prototipoaren inplementaziorako, eraikinetan $H_s > H$ bada, ez direlako eraikinaren goialdeko ertzan haizearen azeleraziorik gertatzen.

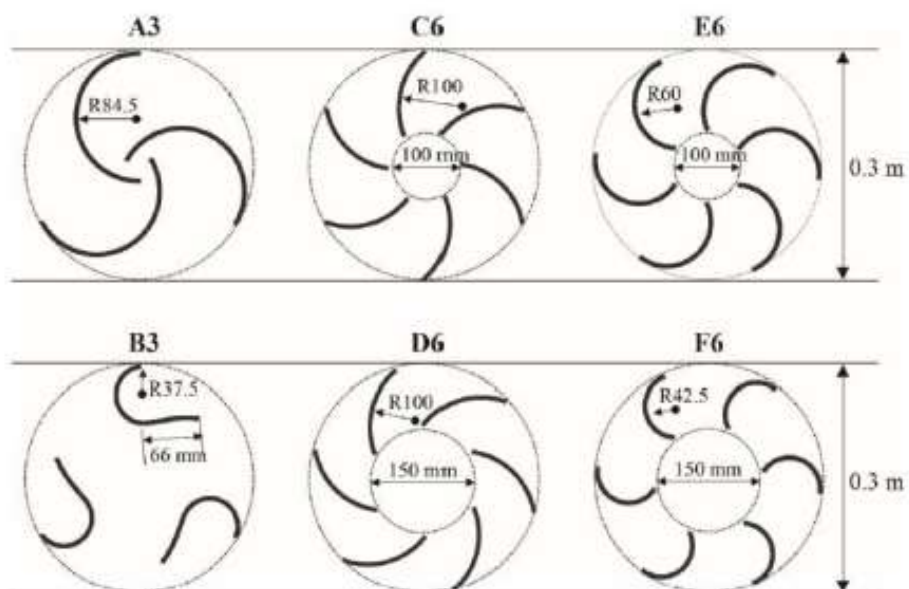
Hirietan haizearen analisia konplexua izan daiteke. Horregatik hirietako potentzial eolikoaren analisia CFD simulazioen bidez egingo da, modu grafiko batean potentzial gehien daukaten lekuak aurkitzeko.

4.2 ERROTOREAREN DISEINUA

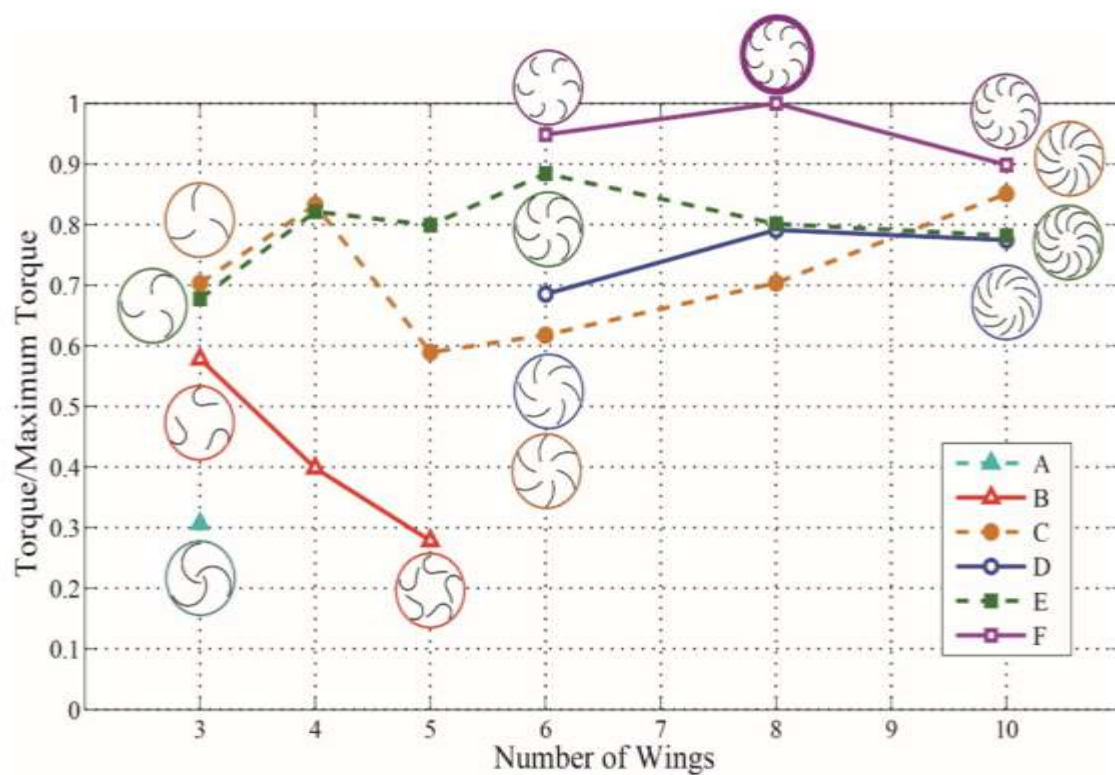
Aurretik azaldu den moduan, proiektu honetan *drag* indarraz baliatzen den turbina bat erabiliko da, zehazki *Savonius* turbina, VAWT turbinen barruan sailkatzen dena. *Savonius* turbinaren palek, haien kurbadurari esker, erresistentzia gutxiago jasaten dute haizearen kontra mugitzen direnean, haizearen alde mugitzen direnean baino. Kostu baxuko turbina da eta aplikazio ezberdinetara moldatzeko erraza. Bere *cut-in* baxua da, 3m/s-tik aurrerakoa, eta abiarazte pareta altua dauka. Gainera, bere eraikuntzarako ez da teknologia oso garaturik behar. Ardatz bertikalean erabiltzeko diseinatuta egon arren, proiektu honetan, korrante bertikalak aprobetxatzeko asmoz, posizio horizontalean erabiliko da.

Turbina mota hauen desabantailetakoa bat bere C_p baxua da, efizientzia baxua eragiten duena. Bi paletako erroto mota honek izan ohi duen C_p -a 0,15 ingurukoa da, hau da, bakarrik transformatu dezake haizearen potentziaren %15 bat potentzia mekaniko erabilgarrian.

Turbina honen errendimendua hobetzeko azterketa asko egin dira, eta proiektu honek diseinatutako prototipoa aurretik aipatutako azterketa horietan oinarritzen da, efizientzia eta abiarazte pareta hobetzeko asmoz. Modu honetan, aztertu da turbina honen efizientzia maximoa lortzeko bere luzera diametroa baino 6 aldiz handiagoa izan behar duela ($H=6D$) eta 6 palekin lortzen dela. Zehaztasun hauek Roseo prototipoan erabili dira.



Irudia 4-6. P. Jeongsu et al.-ek haien azterketetan frogatutako diseinu ezberdinak



Irudia 4-7. Jeongsu et al.-ek haien azterketan lortutako erantzunak

4.3 KONTZENTRADOREAREN DISEINUA

Lehen aipatutako *Savonius* turbinen C_p baxua, itzultzen ari den turbinaren besoak duen pare negatiboagatik izaten da, eta pare negatibo hau deuseztatuz, turbinaren efizientzia hobetzen da.

Savonius errotoarearen C_p -a hobetzeko proposatu zen lehenengo neurria, pare negatiboa deuseztatzen zuen plaka bat jartzean oinarritu zen, eta esperimentu hauek efizientzia %27 batean hobetzea lortu zuten.

Aurrerago, pare negatiboa kentzeaz gain, haizearen azeleratzen zuten sistemetan lan egiten hasi zen. Sistema hauei kontzentradore deitzen zaia, eta ezaguna den *Venturi* efektua aprobetxatzen dute haizea azeleratzeko. Sistema hauek aztertuz, Shikha et al.-ek haizearen abiadura 3,7 baten handitzea lortu zuten honako ezaugarriak zituen errotoare batean: Sarrera eta irteera azalaren arteko erlazioa 0,15-ekoa zen eta kontzentradorearen luzera 55 cm-koa zen.



Irudia 4-8. Shikha et al.-ek landutako kontzentradorearen diseinua, 6 palako Savonius errotoarearekin.

Honen ondoren, B. Altan eta M. Altigan ikerlariak diseinu honetarako makurdura angeluak eta luzera optimoak aztertu zituzten eta ondorioztatu zuten C_p -a handitu egiten dela errotoarearen diametroa txikitzean eta kontzentradorearen luzera handitzean. Azterketa hau jarraituz, kontzentradorea eta diametroaren arteko erlazioa 3:1-ekoa dela zehaztu da, hau da, kontzentradorea diametroa baino 3 aldiz handiagoa izango da. Erlazio hau aplikatuz, kontzentradorearen irteeran haizearen abiadura %400 baten handituko dela jakin da.

Datu hauek jarraituz, bi diseinu aztertu ziren:

4.3.1 Roseo kontzentradorea

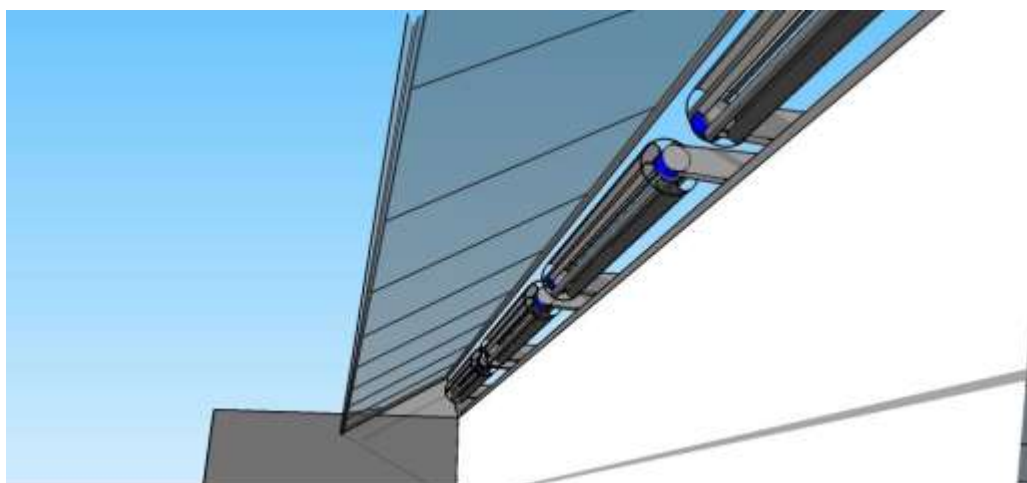
Kontzentradore hau bi plaka lauez osatuta dago, polikarbonato gardenez osatuta eta altzairu galbanizatutako marko batekin. Plakek turbinaren zati bat estaltzen dute, eta hauen makurdura erregula daiteke oinarritzko haizearen arabera, errendimendua hobetzeko.



Irudia 4-9. Roseo prototipoaren 3-D irudia, azpitiko bista.

4.3.2 Anemoi kontzentradorea

Bigarren diseinuak plaka bakarra du. Modu honetan, fabrikazioa errazten da eta kosteak murrizten dira. Hala ere, diseinu honekin turbinaren efizientzia sakrifikatzen da errentagarritasun ekonomikoa eta amortizazio epe murrizt batengatik.



Irudia 4-10. Anemoi prototipoaren 3-D irudia, azpitiko bista.

4.3.3 Kontzentradoreen abantailak

Kontzentradoreak, sorkuntza sistemari batzean, haizearen abiadura handiagotzen du eta honen turbulentzia murrizten du, aerosorgailuaren C_p -a igoz. Honen ondorioz potentzia ere igotzen da, eta honekin batera, sortutako energia era handiagotuz. Horrez gain, kontzentradoreek beste hainbat abantaila dituzte, ondoren zerrendatuko direnak:

Hasteko, integrazio arkitektoniko hobea baimentzen du, sorgailua kontzentradorearen atzean ezkutatuta gelditzen da, itxura antiestetikoa izatea saihestuz.

Gainera, bere akaberarako aukera asko aurkezten ditu kontzentradoreak, hala nola: polikarbonato gardena, eraikinaren forma eta kolorea kopiatzen dituen binilo itsatsia, energiaren ekarpena gehitzen diren panel fotovoltaikoen erabilpena, etabar.

Zarata baxuagoa izango da, izan ere, turbinaren potentzia baterako, tamaina txikiago bat erabiliko da. Bibrazioak ere murriztuko dira.

Prezio totala ere txikituko da turbinaren tamaina murriztean, instalazioaren kostu gehiena suposatzen duena.

Abiarazte abiadura txikiagoa izango da, energia sortzen ari den denbora luzatuz.

Aerosorgailuak istripuren bat jasoko balu, kontzentradoreak estaltzen duenez, kalteak murriztuko lirateke.

Hegaztientzat suposatzen duen arriskua txikitzen da, ez dutelako turbinaren zati mugikorretara, hau da, kalte egin ahal dizkien ataletara, sartzeko modurik.

4.4 LABORATEGI PROBAK

Roseo prototipoaren garapen teorikoaren ondoren, laborategiko proben prozesua garatu zen, proiektuaren efizientzia egiaztatzeko. Planteamendu askoren ondoren, erabaki zen, Gipuzkoako Ingeniaritza Eskolaren (Eibarko sekzioaren) partetik, Leading Edge deitutako Erresuma Batuko enpresa batek merkaturatutako *Savonius* motako turbina bat eskuratzea. Modeloa "Vertical Axis Wind Turbine LV-50" deitzen da. Haren ezaugarri garrantzitsuenak ondoren aurkezten dira:



Rotor diameter - 270mm **Height** - 456mm
Rotor type - 3-Blade savonius
Blade material - Aluminium
Rated output - 10W at 12m/s (26mph)
Peak output - 80W
Cut-in speed - 5m/s (11mph)
Weight - 9Kg
Warranty - 2 years
DC Output voltage - 12V, 24V, 48V

Irudia 4-11. LV-50 turbinaren argazkia eta ezaugarri orria

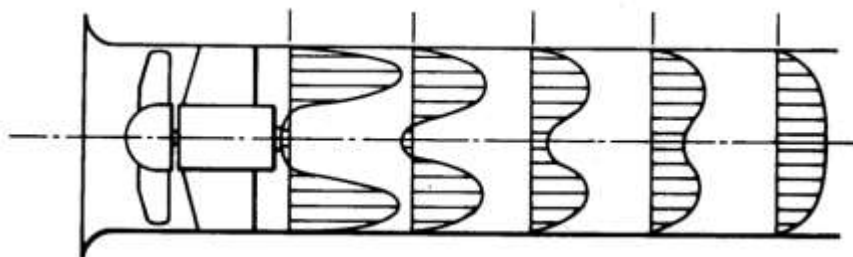
Behin turbina eskuratuta, probak egiten hasi ahal zen. Horretarako, Eibarko Ingeniaritza Eskolako haize tunela erabiltzea erabaki zen. Gainera, datu lorketarako metodo bat bilatu behar izan zen, eta *Arduino* batekin lan egitea erabaki zen. Arduinioa *open-source hardware* sistema bat da, automatizazio eta kontrol zereginak modu erraz batean burutzea

baimentzen duena. Gainera, *open-source* ezaugarri honi esker, *Arduinoak* elkarte indartsua dauka, material, tutorial eta adibideak izateko aukera ematen duenak.



Irudia 4-12. Experimentuak egiteko erabilia izan zen Arduinoaren plakaren argazkia

Honekin batera, esperimentuekin hasi zen. Hasieran, turbina Eibarko Unibertsitateko haize tunelaren atzealdean kokatzea erabaki zen, haizagailuaren atzealdeko korrante turbulentua dela kontuan izanda. Hala ere, esperimentuak egiterakoan erreparatu zen haizearen neurketan asko aldatzen zutela. Izan ere, haize tunela aspirazio bidez funtzionatzeko pentsatuta dago, hau da, haizagailua haize tunelaren atzealdean dago kokatuta eta probak haize tunelaren erdialdean egiten dira. Modu honetan, haizagailuak eratzen ditu zona batzuk non haize korrontea ez den uniforme.



Irudia 4-13. Haizagailuaren atzealdeko haizearen abiaduraren perfila.

Honen ondorioz, turbina haize tunelaren barruan kokatzea erabaki zen, esperimentuaren eskala haize tunelaren dimentsio txikietarako handiegia dela jakinda.



Irudia 4-14. Aerosorgailua haize tunelaren barruan sartzeko muntaia.

Behin aerosorgailua haize tunelaren barruan edukita, hainbat proba ezberdin egin ziren: Hasteko, ez ziren haizearen portaera aldatzen duten elementurik gehitu, muntaia aurreko argazkikoa bezalakoa izanez. Bigarren proban, horma bezala jokatzen zuen xafla bat gehitu zen, turbina eraikin baten gainean dagoela simulatzeko. Azkenik, kontzentradore moduan lan egingo zuen xafla diagonal bat gehitu zen.



Irudia 4-15. Haize tunelaren barruan gauzatutako horma simulatzen zuen esperimentua.



Irudia 4-16. Haize tunelaren barruan gauzatutako kontzentradorea simulatzen zuen esperimentua.

4.5 LORTUTAKO ERANTZUNAK

Haizearen abiadura aztertzerakoan, argi ikusi zen horma eta kontzentradorea gehitzean abiadura asko jaisten zela. Izan ere, tunelari elementuak gehitu ahala, haizearen dinamika aldatu egiten da. Hau gertatzen da esperimentuaren eskala handiegia delako, eta ondorioz, honek haizearen portaeran eragina duelako.

Horrez gain, erantzunak aztertuz, lehenengo proba parametro normalen barruan dagoela ikusi zen, baina horma eta kontzentradorea gehitzerako orduan balio hauek txarrera doaz nabarmen handiz. Hala ere, aurretik azaldu da beste kide batzuek egindako esperimentuetan *Savonius* aerosorgailuen potentzia koefizientea hobetzea lortu zela elementuak gehitzerakoan, adibidez, plaka batekin par negatiboa kentzean.

Erantzun hauek *blockage ratio* edo eragozpen ratioaren ondorioz eragin izan ziren, hurrengo atalean azalduko dena. [10]

4.6 BLOCKAGE RATIO

Hainbat diseinu aerodinamiko, hala nola, aireontziak, automobilak, eraikin garaiak eta haize-sorgailuak, metodo esperimental, teoriko eta konputazionalen baturan oinarrituta daude. Haize tunela aerodinamika esperimentalaren erramintarik garrantzitsuenak da. Haize tunelek modeloak aztertzea ahalbidetzen dute eta informazio fidagarri asko ematen dute, diseinuarekiko erabakiak hartzeko balio dutenak. Horrez gain, haize tunelek denbora eta dirua aurrezten dute eta irekiak ala itxiak izan daitezke. Haize tunel itxi baten barruan, haize fluxuaren baldintzak ez dira aire zabalean dagoen aire fluxu mugagabeena bezalakoa; nagusiki haize tunelen sekzioa mugatua delako. Ondorioz, haize tuneletan gauzatzen diren azterketek efektu batzuk hartu behar dituzte kontuan, adibidez, *solid blockage*, *wake blockage* eta horrelakoak. Haize tunel irekietan, aldiz, haize fluxua zabaltu egiten da, eta beraz, ez da *blockage*-ik ematen.

Airesorgailu bat haize tunel itxi batean lan egitean, haize tunelaren hormek haize fluxua estutzen dute. Honek haizea turbinatik azkarrago pasaraztea eragiten du, eta ondorioz, turbinak aire zabalean sortuko lukeena baino potentzia gehiago sortzen du. Efektu hau

rotor blockage ratio (BR) eta errotoreek sortutako potentziagatik eragiten da. Sortzen den potentzia *tip speed ratio* (TSR) eta errotoarearen *pitch* angelua-ren (β) menpekoa da. [11]

Blockage ratio-a honela definitu ahalko litzateke: modeloaren azalera frontala, haize tunelaren sekzioaren azalerarekiko duen erlazioa. Eragozpen proportzio honek kontuan hartzen du tunelaren sekzioetako zein ehuneko betetzen duen modeloak. Proportzio honi buruz artikulu eta azterketa asko daude haize tunel baten emandako neurketak errealitatearen antzekoak izateko zuzenketak egiten, baina honi buruz aurrerago hitz egingo da.

Tip speed ratio-a (TSR) turbinaren palaren abiadura eta haize tuneletik doan haizearen abiaduraren arteko erlazioa da. Honako hau da bere formula: [12]

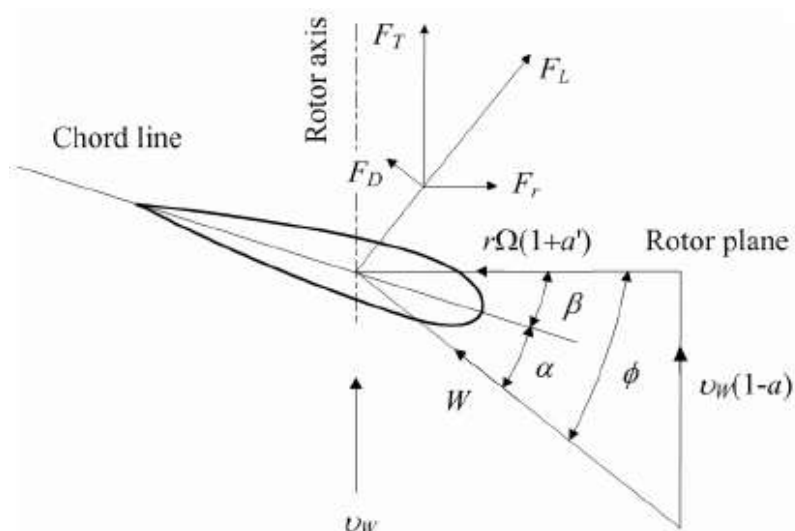
$$TSR = \frac{\text{Speed of rotor tip}}{\text{wind speed}} = \frac{v \text{ [m/s]}}{V \text{ [m/s]}} = \frac{w \cdot r}{V}$$

Non, $w = 2\pi f$ [rad/s]

r: errotoarearen erradioa [m]

Errotorea motelki biratzen duenean, haize gehiegi pasatzen utziko du honetan eraginik egin gabe, ahalko lukeena baino energia gutxiago lortuz. Bestalde, errotorea oso azkar biratzean, haizeari disko solido baten modura agertuko litzaioke, *drag* indar asko eratuz. *Tip speed ratio*-a, palen profil aerodinamikoaren, pala kopuruaren eta haize tunel motaren araberakoa da. Orokorrean, hiru paletako turbinek 6 eta 8 arteko TSR-a daukate. Horrez gain, aipatzekoa da *Savonius* modeloetan, Roseo prototipoan erabiltzen dena hain zuzen ere, TSR-a oso txikia izaten ohi dela, eta ondorioz, ez duela eragin askorik izaten.

Pitch angelua (β) aerosorgailuaren palaren kordaren eta errotorearen errotazio planoaren arteko angelua da. Hurrengo irudian ondo azter daiteke:



Irudia 4-17. Aerosorgailu baten palaren funtzionamendu aerodinamikoa

Non, W: Haizearen abiadura erlatiboa.

α : eraso angelua. Palaren kordaren eta haizearen abiadura erlatiboaren arteko angelua.

\emptyset : Eraso angelua eta *pitch* angeluaren batura. Errotazio planoaren eta haizearen abiadura erlatiboaren arteko angelua.

F_L : *Lift* edo esekidura indarra.

F_D : *Drag* edo arrastre indarra.

Chord line: Palaren korda diren.

Hala ere, kasu honetan, *pitch* angelua *lift* makina batena da, eta kasu hau normalena da, *lift* makinetan *pitch* angeluaren kontrola eta zehaztasuna ezinbestekoa delako. Baina lan honetan, arrastreko makina bat erabiliko da, *Savonius* turbina bat hain zuzen ere, eta makina horietan *pitch* angeluak ez du *lift* makinetan duen garrantzia, izan ere, *drag* makinetan *pitch* angeluaren kontrola ez da existitzen.

Azkenik, haize tuneletan, *blockage correction factor* (f) bat egon beharko da, izan ere, blokeatzen den azalera handiegia denean hau zuzendu beharko da jakiteko turbinak nola egingo lukeen lan baldintza errealetan. Oraingoz ez dago zuzenketa zehatzik, eta gainera, haize tunel motaren arabera izaten da, irekia edo itxia, hain zuzen ere. Gainera, faktore hau BR, TSR eta *pitch* angeluaren menpe dago.

Blockage correction factor-a *wake blockage* eta *solid blockage*-aren ondorioz gertatzen den abiadura igoeraren gehiketa (*blockage factor*) bezala definitu zen. Baina *Savonius* errotorea bezalako geometria ezohikoa eta haien inguruko haize fluxuaren ondorioz, oso zaila da faktore hauek kalkulatzeko. Hala ere, Pope eta Harper zientzialariek honako formula hau iradoki zuten geometria ezohikoak dituzten haize tuneletan *blockage correction factor*-a kalkulatzeko:

$$f = \frac{1}{4} \left(\frac{\text{modeloaren azalera frontala}}{\text{haize tunelaren sekzioaren azalera}} \right)$$

Hala ere, aurretik esan den bezala, ez dago formula bat bakarrik, adibidez, faktore hau beste modu honen bitartez kalkulatzeko proposatu da: haize tunelaren barruko haize fluxuaren abiadura errotorea barruan dagoenean (U) eta errotorerik gabeko haize tuneleko haize fluxuaren abiaduraren (U') arteko erlazioa bezala, hurrengo formulatik ikus daitekeen moduan:

$$f = \frac{U}{U'}$$

Faktore hau 0-tik 1-era doa, eta *blockage effect*-arekin (BE) oso lotuta dago. Izan ere, *blockage correction factor* baxua izateak *blockage effect* handia izatea suposatzen du. Honen ondorioz, *blockage factor*-ak 1 balioa duenean, *blockage effect*-a nulua da, hau da, haize tuneleko haizeak ez du eraginik jasotzen eta modeloaren erantzunak errealitatekoetara berdinduko dira. Eta *blockage factor*-aren balioa jaisten doan heinean, $f < 1$, *blockage effect*-aren balioa igoko da.

Blockage efektua *blockage ratio*-a, *tip speed ratio*-a eta *pitch* angeluaren arabera da. [14]

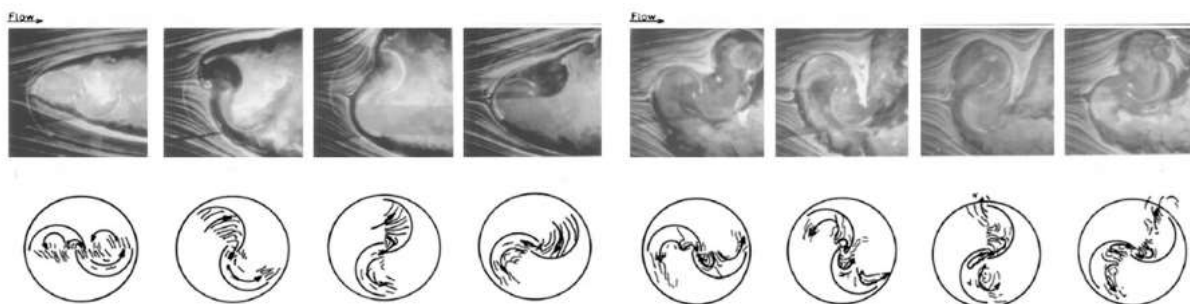
Guzti hau azaldu ondoren, *blockage ratio*-a aztertuko da. Efektu honek eragiten duen aire fluxuaren distortsioa saihesteko, diseinu kode askok BR-a %5 batera mugatzen dute, kode batzuk ratio handiagoa ahalbidetzen duten arren, hala nola %10-ekoa. Hau 1966-an proposatua izan zen Pope eta Harper-engatik "Low-Speed Wind Tunnel Testing" testuan. Gainera, aurretik Pankhurst eta Holder-ek proposatu zuten 1952-an, haien "Wind-Tunnel Technique: An Account of Experimental Methods in Low- and High-Speed Wind Tunnels" testuan, eta biek ematen dituzte *solid* eta *wake blockage*-entzako baliozko zuzenketa metodoak. [13]

Teoria hau jarraituz, Schreck et al.-ek 10,1m-ko diametroko errore baten azterketak egin zituzten %9,3-ko BR-arekin, eta ez zuten zuzenketarik egin. Hirai et al.-ek HAWT turbinen aerodinamika ulertzeko haize tunel batean hainbat esperimendu gauzatu zituzten. Haien azterketan, BR-a %10 ingurukoa izan zen eta, hauek ere, ez zuten zuzenketarik egin. [11]

Aurreko azterketen kontran, arlo honen inguruko azterketa gehienek *blockage* efektuak hartzen dituzte kontuan, eta arazo honi aurre egiteko hainbat konponbide proposatu dira. Ikuspuntu teoriko eta esperimentalak existitzen dira, eta normalean aire zabaleko eta haize tunelaren barruko turbinaren portaeraren ezberdintasunetan oinarritzen dira.

Ez dago *Savonius* modelo aerodinamikoari buruzko azterketa zabalik haize tuneletako *blockage correction* arloaren inguruan, baina *Savonius* errorearen kontzeptuari buruzko azterketa orokorrak badaude. Hurrengoan, BR-ari buruzko azterketak eta hauek lortutako ondorioak aipatuko dira, guztiak *Savonius* modeloari buruzkoak ez izan arren. Horrez gain, hurrengo azterketetan egiaztatuko da TSR eta BR igotzean, BE ere igotzen dela.

Hasteko, 1992an Fujisawa eta Gotoh zientzialariek bi paletako *Savonius* batekin haize fluxua aztertu zuten, turbina geldi eta mugimenduan zegoenean. Honetarako, haize fluxu nagusia bistaratu zuten kea sartuz, eta honako irudia lortu zuten. Irudi hau ondoren gauzatutako esperimendu askotan balio izan du. [13]



Irudia 4-18. Fujisawa eta Gotoh-ek haize tunel bateko haize fluxuaren portaera aztertzeko kea erabiliz egindako esperimendua

Badaude beste azterketa batzuk ardatz bertikaleko haize turbinen portaeran eragiten duen haize tunelen *blockage*-an oinarritu direnak. Adibidez, [15] lanean, eskala txikiko *Darrieus* motako turbina erabili zen BR-aren eragina aztertzeko. Lan honetan, turbina bera erabili zuten neurri ezberdineko hiru haize tuneletan, %3.5, %13.4 eta %24.7 BR-ak lortuz. 4, 5, 6 eta 7m/s-ko abiadura ezberdinetan neurtu ziren. Erantzunetan ondo nabaritu zen %13.4 eta %24.7-ko BR-arekin neurtutako Cp-a 1.3 eta bi aldiz handiagoa zela %3.5-ko BR-arekin lortutakoa baino.

Bestalde, 2016an "Assesment of blockage effect on the wake characteristics and power of wind turbines" azterketak haize tunelen interferentziak ikertu zituen HAWT motako turbinetan *large eddy simulation* (LES) simulazioarekin. Azterketa honetan, 0.2, 0.09, 0.05 eta 0.02-ko *blockage ratio*-ak eta 1etik 12rako TSR ezberdinak erabili ziren. Erantzunetan ikusi zen optimoak baino TSR balio baxuentzat, *blockage effect*-a baliogabea dela potentzia (C_p) eta bulkada (C_T) koefizientetan. Aldiz, TSR-aren balioa optimoarena bezalakoa edo handiagoa denean, 0.05 baino BR handiagoek paletako indar normal eta tangenzialetan izango dute eragina, eta ondorioz, potentzia eta bulkada koefizientetan ere. Gainera, erantzun hauekin egiaztatzen da %10eko BR handiago batek turbinaren portaeran eragin handia izango duela. [16]

HAWT motako turbinetan BR-ak duen eragina ikertzen duten azterketekin jarraituz, [11] lana aurki daiteke. Honetan, 30, 24 eta 14.5cm-ko diametroko palak erabili ziren, %28.3, %20.2 eta %10.2-ko *blockage ratio*-ak lortuz. Ondorioek erakutsi zuten BE-a TSR, BR eta *pitch* angeluen arabera dela. Horrez gain, TRS-a 1.5 baino txikiagoa denean eta BR %10 arabera dena, *blockage correction*-a %5 baino txikiagoa dela frogatu zuten.

Ondoren, Abdelgalil Eltayesh et al.-ek "Effect of Wind Tunnel Blockage on the Performance of a Horizontal Axis Wind Turbine with Different Blade Number" lanean haize tuneletako *blockage*-a ikertu eta ardatz horizontaleko haize turbina (HAWT) baten portaera aerodinamikoa ulertu nahi zuten. Esperimentua TSR ezberdinak erabiltzen gauzatu zen, pala kopuru ezberdinekin ere, hiru eta bost, hain zuzen ere. *Pitch* angelua konstante mantendu zen, abiadurak 100-800rpm artean aldatuz. Azterketa honetarako, potentzia koefizientea hurrengo formularekin kalkulatu zen:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^3}$$

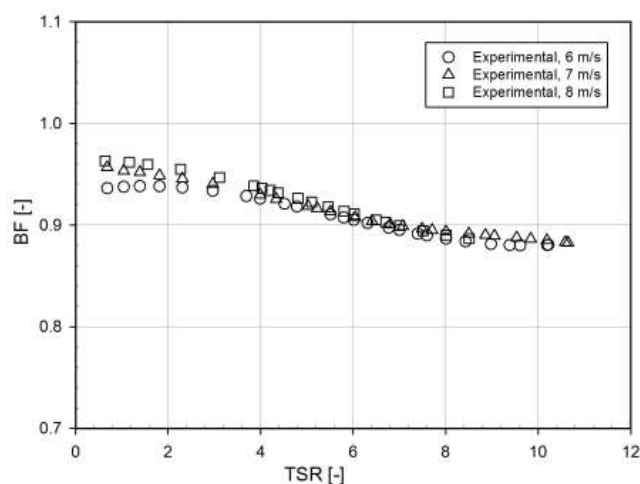
Azterketa honek konparatu nahi zituen haize tunelaren barruko baldintzak aire zabaleko baldintzekin, eta beraz, *blockage factor*-a behar zen faktore hauek zuzentzeko. Zuzenketa metodo honetarako f -a aurretik ikusitako formularen bidez kalkulatu zen. Honez gain, zuzendutako potentzia koefizientea eta zuzendutako TSR-a honela kalkulatu ziren:

$$f = \frac{U}{U'}$$

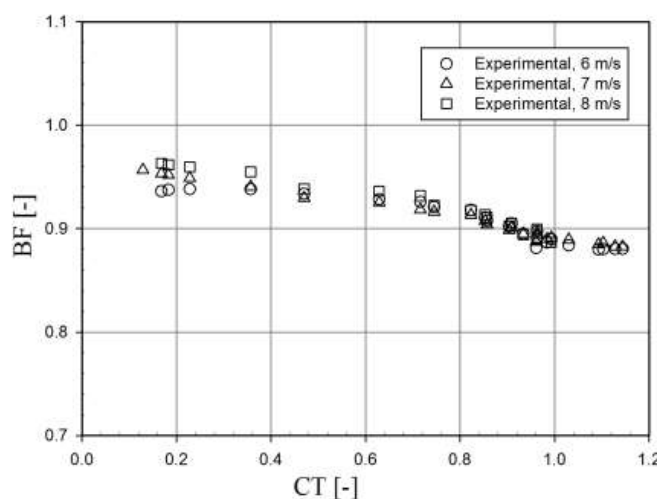
$$C_p' = C_p \cdot \left(\frac{U}{U'}\right)^3 = C_p \cdot f$$

$$TSR' = TSR \cdot \left(\frac{U}{U'}\right) = TSR \cdot f$$

Erantzunak analizatzean, f eta TSR-aren arteko erlazioa eta f eta C_T -aren arteko erlazioa irudikatu ziren haize abiadura desberdinetan hiru paletako turbinarekin. Hurrengo irudietan ikusten den moduan, *blockage factor*-a txikitzen da TSR eta C_T handitzen direnean.



Irudia 4-19. Tip speed ratio eta blockage factor-aren arteko erlazioa



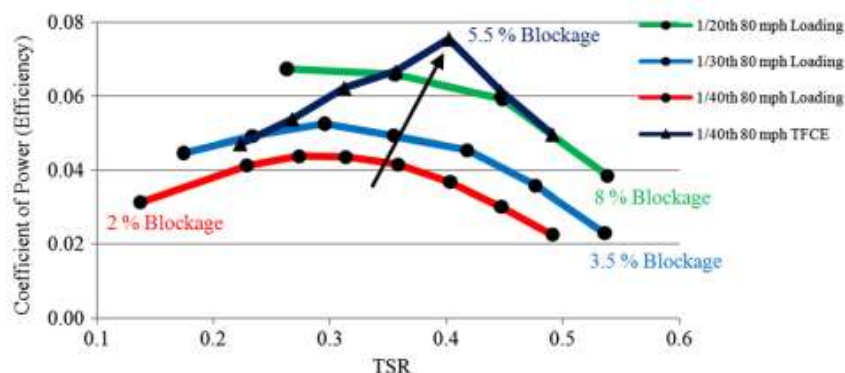
Irudia 4-20. Bulkada koefizientea eta blockage factor-aren arteko erlazioa

5 paletako turbina aztertzean ikusi zen, erlazio hauek antzekoak zirela baina eragin handiago batekin. Kasu guztietan, f -a txikitzen da TSR-a handitzean.

Bestalde, ondorioetan erakusten da TRS-aren balioa 8 baino handiagoa denean, f -a konstante mantendu egiten dela 0.888-ko baliora helduz. Izan ere, TSR-a baxua denean, errotoretik haize fluxu asko pasarazten da. Aldiz, TSR-a handitzean, turbinaren palek hain azkar biratzen dute, disko solido baten moduan jokatzeko dutela. Ondorioz, bulkada koefizientea igotzen da eta aireari errotorea inguratzea behartzen zaio. Normalean, efektu hau txikitzen da haize tunel ireki batean, itxi batean baino. Gainera, *blockage*-aren ondorioz potentzia koefizientea handitu zen, Betz limitera hurbilduz, abiadura guztietarako eta 3 eta 5 palekin. [14]

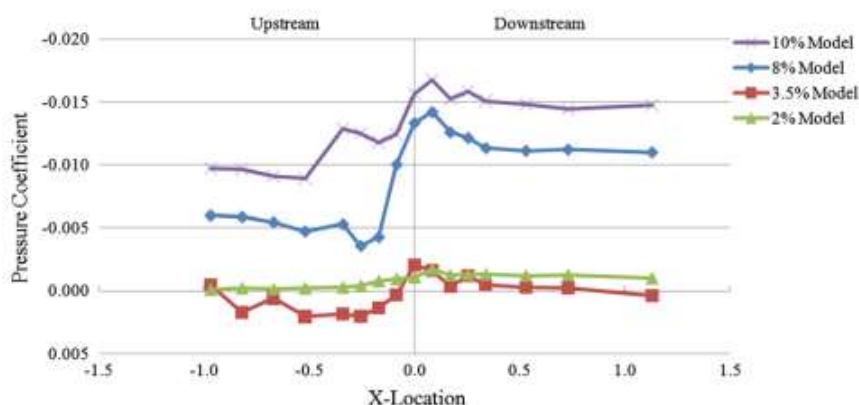
Azkenik, Ian Ross eta Aaron Altmanek azterketa batean, tamaina ezberdineko hiru *Savonius* modelo ezberdin erabili ziren, %2, %3.5 eta %8-ko BR-ekin eta azkenengo modeloa beste haize tunel batean sartu zen %5.5-eko BR-a sortuz. Esperimentu honi esker ikusi da *blockage* faktoreak VAWT modeloen efizientzia eragina izan dezakeela. Izan ere,

BR-a handitzean, turbinaren eraginkortasunean jauzi bat ageri da. Potentzia koefizientea handitu egiten da haize fluxuaren abiadura kalkuluetan erabilitakoa baino handiagoa bada.



Irudia 4-21. TSR eta Cp-aren arteko erlazioa Blockage ratio ezberdinekin

Horrez gain, aztertu zen BR ezberdinek potentzia koefizientearen duten eragina. Hurrengo irudian ikus daitekeen moduan, %10 eta %8-ko BR-ek eragin handia dute haize fluxuko presioan, eta BR baxuek eragin txikiagoa dute. [13]



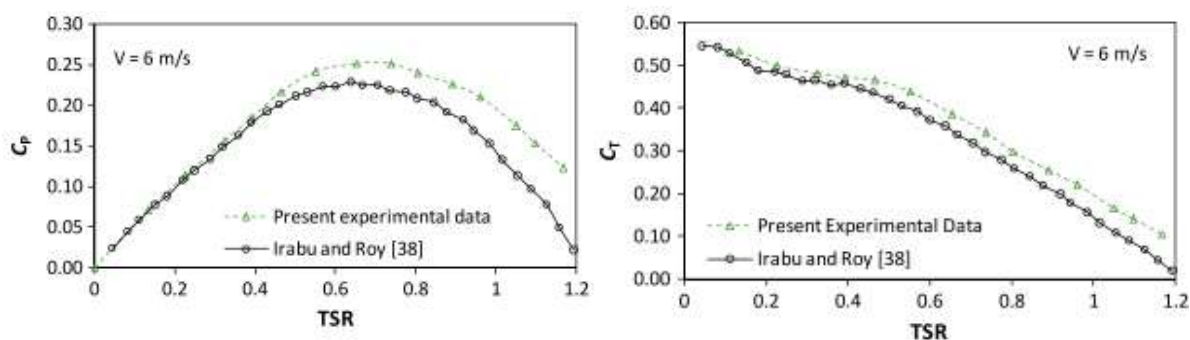
Irudia 4-22. Potentzia koefizientearen aldaketa blockage ratio ezberdinak erabiltzean

Azterketa hauen ondorioz, *blockage ratio*-ari buruzko hainbat ezaugarri argi gelditu dira: Alde batetik, BR eta TSR-a handitzean eta *pitch* angelua txikitzean, *blockage effect*-a handitzen dela, eta hortaz, *blockage factor*-a txikitzen dela. Bestalde, *blockage* efektua handitzean potentzia koefizientea igo egiten dela, eta *tip speed ratio*-a handitzean bulkada koefizientea handitzen dela. Horrez gain, TSR txikiekin eta %10 baino txikiagoko *blockage ratio*-ekin, oso zuzenketa gutxi behar direla errealitateko erantzunak lortzeko.

Hala ere, aurretik azaldu den moduan, *Savonius* motako turbinetan, TSR-aren balioa txikia izaten ohi da eta ez du eragin handirik; Roseo prototipoan, TSR-a ez da 2 baino handiagoa izaten. Horregatik, ez da efektu hau kontuan hartu behar.

Honekin jarraituz, zientzialari gehienek diote BR-a %10 baino handiagoa denean, zuzenketa behar direla, zientzialari batzuek limitea ehuneko handiagotik jartzen duten arren. Adibidez, [17] lanean, haize tunel ireki batean BR-aren eragina aztertu zen

%21,16-ko *Savonius* turbina bat erabiliz, eta lortutako erantzunak Irabu eta Roy-ek haien azterketan lortutako datu esperimentalekin alderatu ziren. Hurrengo irudietan ikus daitekeen moduan, erantzunek aurkeztu zuten *blockage* zuzenketarik gabe, C_{Pmax} eta C_{Tmax} balioak, 0,251 eta 0,534, hurrenez hurren, datu esperimentaletan lortutakoen antzekoak zirela (0,228 eta 0,544).

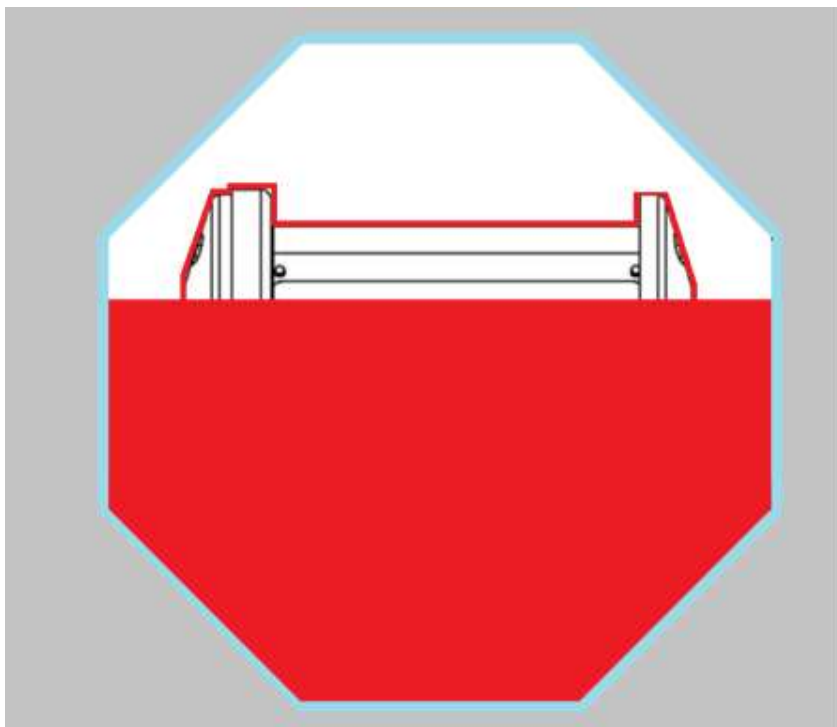


Irudia 4-23 eta 4-24. C_p eta C_t grafikak, zuzenketarik gabeko datuak eta datu esperimentalak alderatuz

Ondoren, grafika horietan *blockage correction factor*-a (f) %1-etik %10-era aldatuz joan zen, eta argi ikusten zen zuzenketak gero eta handiagoak izatean, C_p eta C_t datuak aurreikusitako datuetara hurbiltzen direla. Honekin konprobatu zen %21,16-ko BR batekin, %4-10-eko zuzenketak behar direla.

Azkenik, modelo txikiagoak erabili ziren, %16 eta %12-ko *blockage ratio*-koak. Hauekin lortutako C_p eta C_t balioak datu esperimentaletara gehiago hurbiltzen ziren. Ondorioz, %16-ko BR-rako, TSR txikiekin, %5 baino txikiagoko zuzenketekin aurreikusitako erantzunak lortu ziren, eta %12-ko BR-rako ez ziren ia zuzenketarik behar.

Aurretik azaldutako BR-aren informazioa ulertuta, Roseo prototipoarekin egindako laborategi probak aztertzen badira, argi dago lortutako erantzunak ez zirela zuzenak izan BR-arengatik. Izan ere, aurretik azaldutako azterketek bat datozte BR-a %10-a baino txikiagoa izan behar dela, eta erabilitako turbinak, %70-a baino gehiago hartzen zuen, eta ez zuen zuzenketarik izan. Beraz, probetan gorabeherak egon ziren eta ez zen Roseo turbinaren eraginkortasunari buruzko benetako informazioa lortu.



Irudia 4-25. Objektuak haize tunelean okupatzen zuten espazioaren irudia

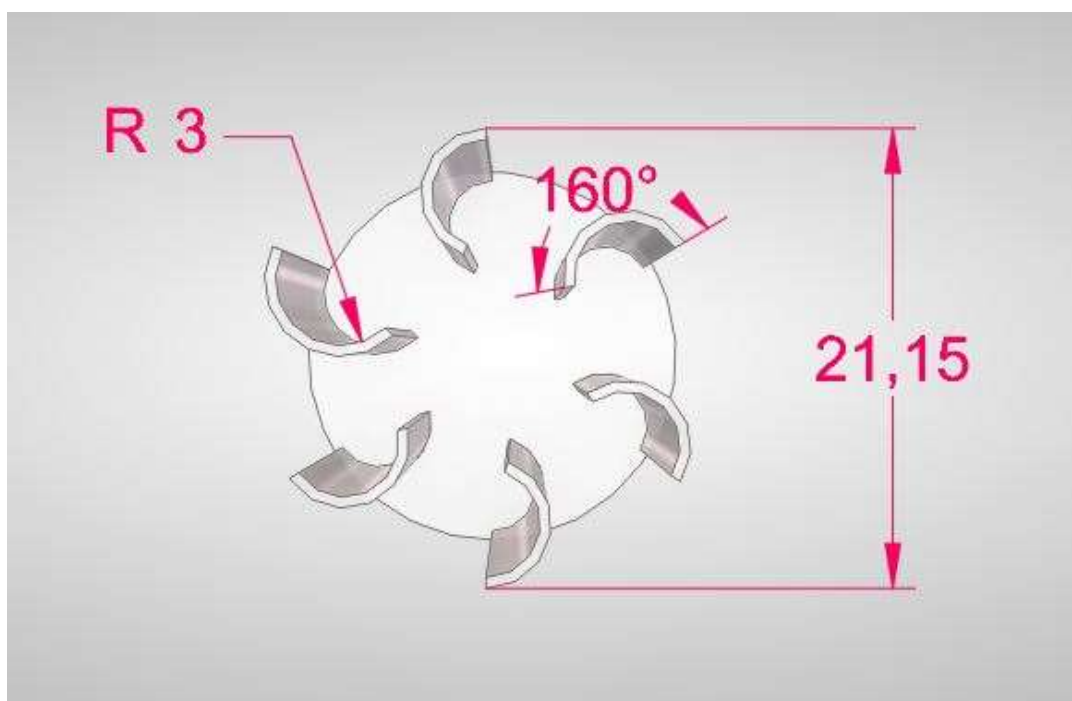
Hau zuzentzeko asmoarekin, erabaki zen prototipo txikiago bat eraikitzea, *blockage ratio* txikiago batekin. Hurrengo ataletan sakonduko da modelo honen eraikuntza, haize tuneletan egindako probak eta hauen ondorioz lortutako erantzunak.

5. ROSEO PROTOTIPOAREN ERAIKUNTZA

Aurretik azaldutako prototipoarekin nahi ziren erantzunak ez zirenez lortu, eta hau *blockage ratio*-arengatik izan zenez orokorrean, haize tunel berdinean erabiltzeko BR zuzen bat duen prototipo berria egitea pentsatu zen. Honetan, BR-a %25-koa izango da. Lehen azaldu den bezala, BR ideala %10-a baino txikiagoa da. Roseok modelo berriak %25-a okupatzea erabaki zuen, prototipo hau aurkezpenetan erakusteko eta erosleei tamaina apropos batean aurkezteko, erosleek produktuaren ideia on bat egin ahal izateko. Hau erabakita, prototipo berri oso bat eraiki behar izan zen, eskala txikiago batean. Horregatik, oraingoan ez da haize sorgailua erosiko, eraiki beharko da material ezberdinak erabiliz, oso tamaina txikikoa izan behar delako. Atal honetan, modelo berriaren eraikuntza pausoz-pauso azalduko da.

5.1 ERROTOREAREN DISEINUA

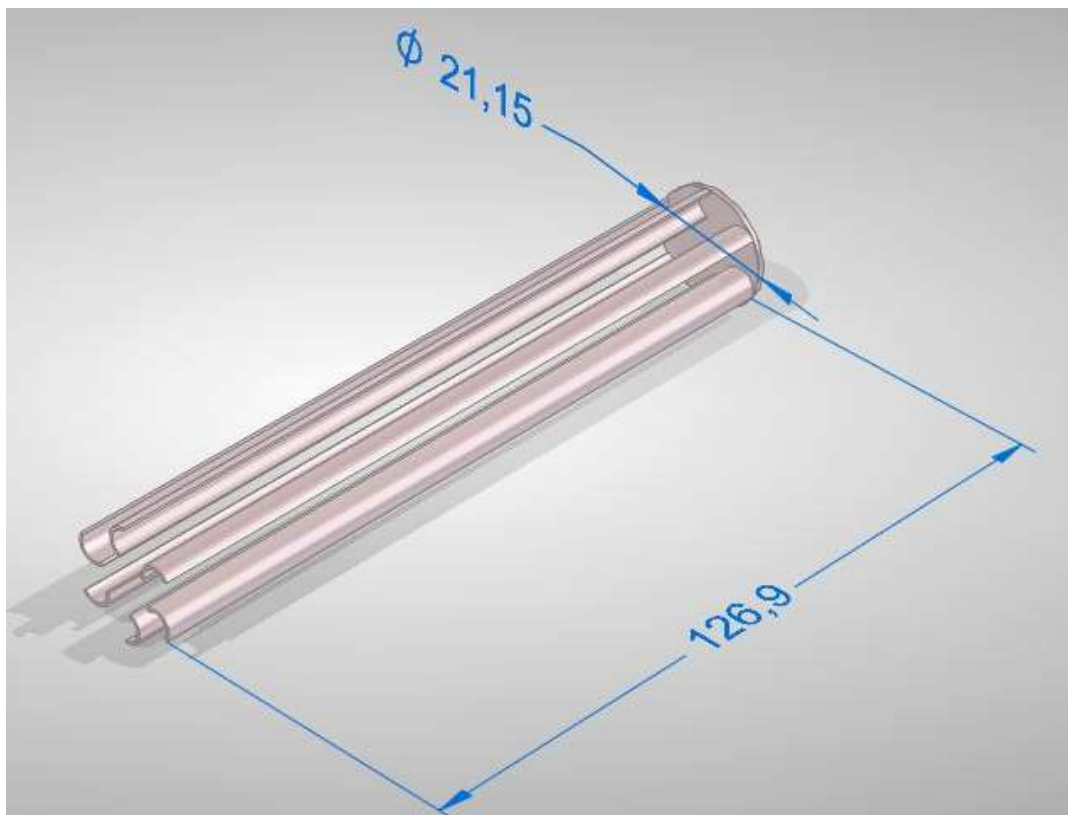
Aurretik aukeratu zen moduan, Roseo turbina *Savonius* batean oinarrituta dago, ardatz horizontalean kokatuta, eraikinen haize fluxu bertikalak aprobetxatu ahal izateko. Horrekin batera, erabaki zen 6 pala izango zituela, turbinaren eraginkortasuna handitzeko.



Irudia 5-1. Errotorearen diseinua Solid Edge programarekin eginda

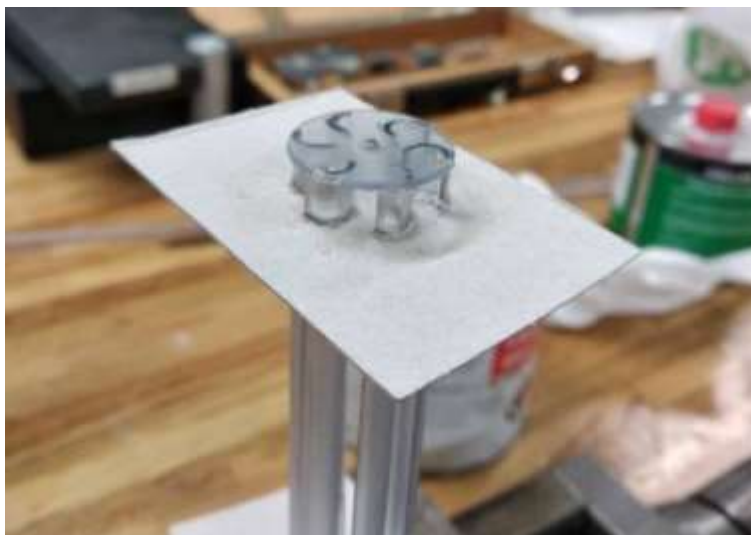
Ondorioz, prototipoak %25-ko *blockage ratio*-a mantentzeko, hurrengo neurriak erabiltzea erabaki zen.

Atala	Neurria (mm)
Euskarriaren diametroa (DT)	21,15
Palen erradioa (RP)	3
Palen luzera (LP)	126,9

Taula 5-1. Eskalako ereduaren errotoarearen neurriak**Irudia 5-2. Turbinaren neurriak Solid Edge programan egindako diseinuan**

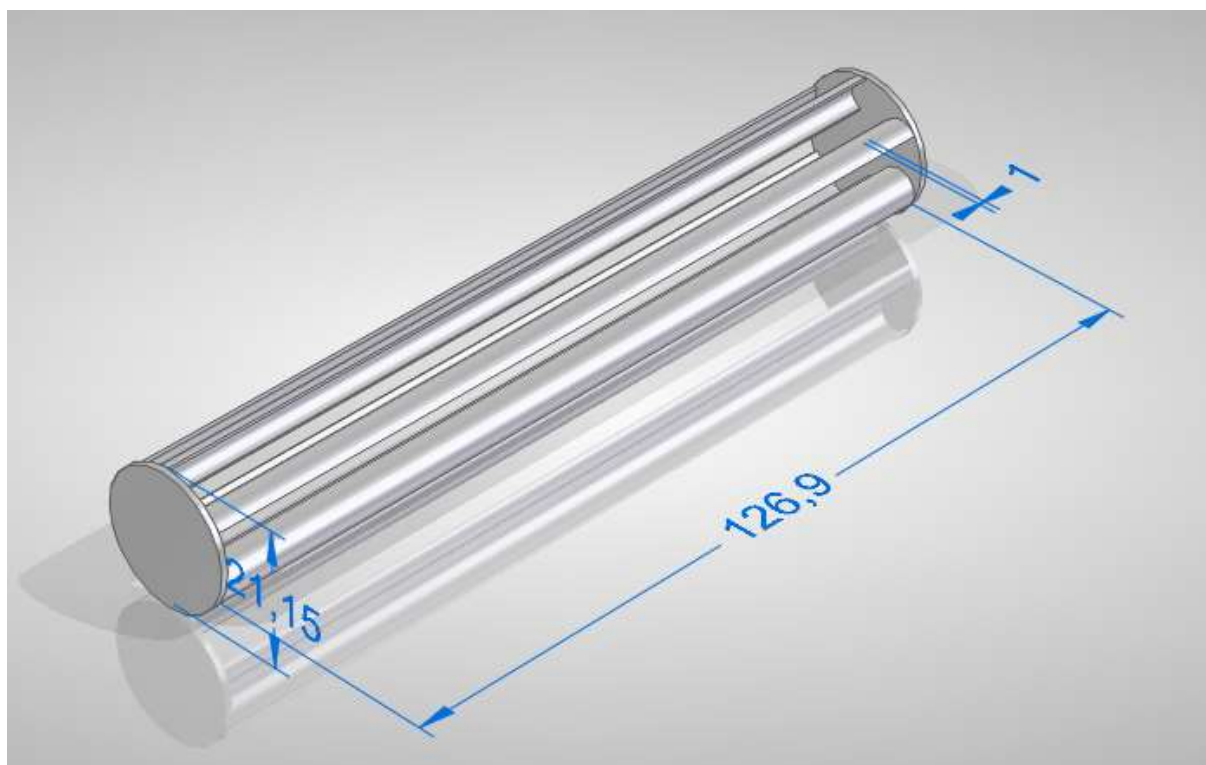
Hasteko, palak egiteko, PVC-ko hodi batzuk erabili ziren. Hauek 12,7 cm-ko luzeran moztu ziren xerrarekin. Hodiekin 6mm-ko diametroa zuten. Ondoren, palek 60º-koak izan behar zirenez, hodietan 60º kalkulatu ziren haien erradioetan eta handik moztu ziren, xerrarekin ere. Hala ere, hodi luze horiek eskuz luzetara moztea zaila da eta ez ziren zuzen gelditzen. Ondorioz, hodiak erditik moztea erabaki zen, eta gero hauek limatzea 60º horiek lortu arte.

Ondoren, bi euskarriak egiteko, PVC-ko xafla batean hauek moztu ziren taulan adierazitako diametroaz, hauek ere eskuz eta ondoren limatuz.

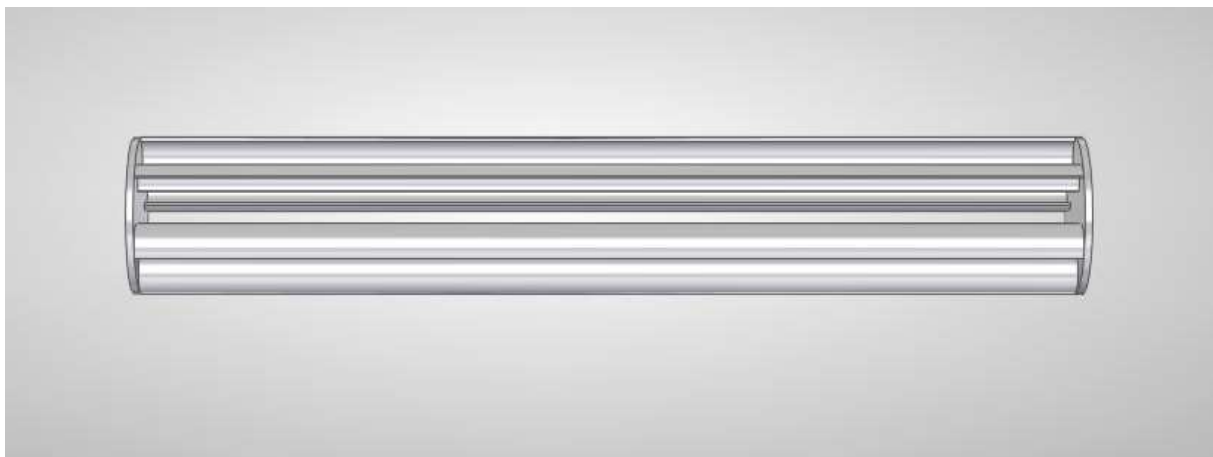


Irudia 5-3. Eskalako turbinaren eraikuntza

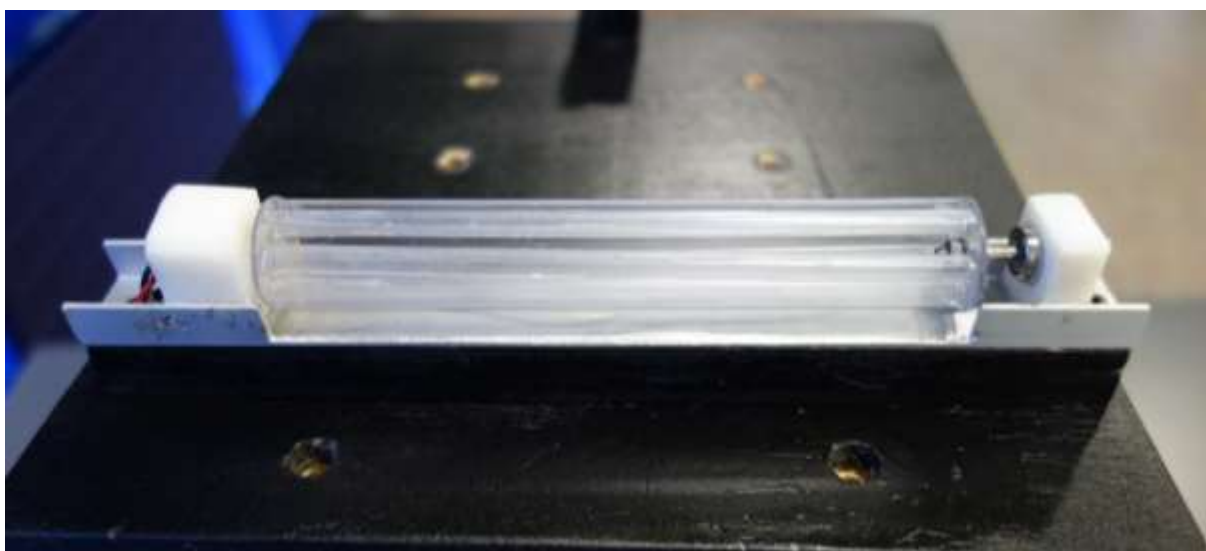
Azkenik, palak euskarri batera batu ziren PVC soldaduraz. Horretarako, palen inguruan kartoi bat jarri zen, aurreko argazkian ikus daitekeen bezala, pala bakoitza euskarrian ondo kokatuta egoteko, eta euskarria soldatu ziren. Sikatu ostean, beste euskarria itsatsi ziren, errotorea osatuz.



Irudia 5-4. Turbina osoaren diseinua neurriekin Solid Edge-en bidez irudikatuta



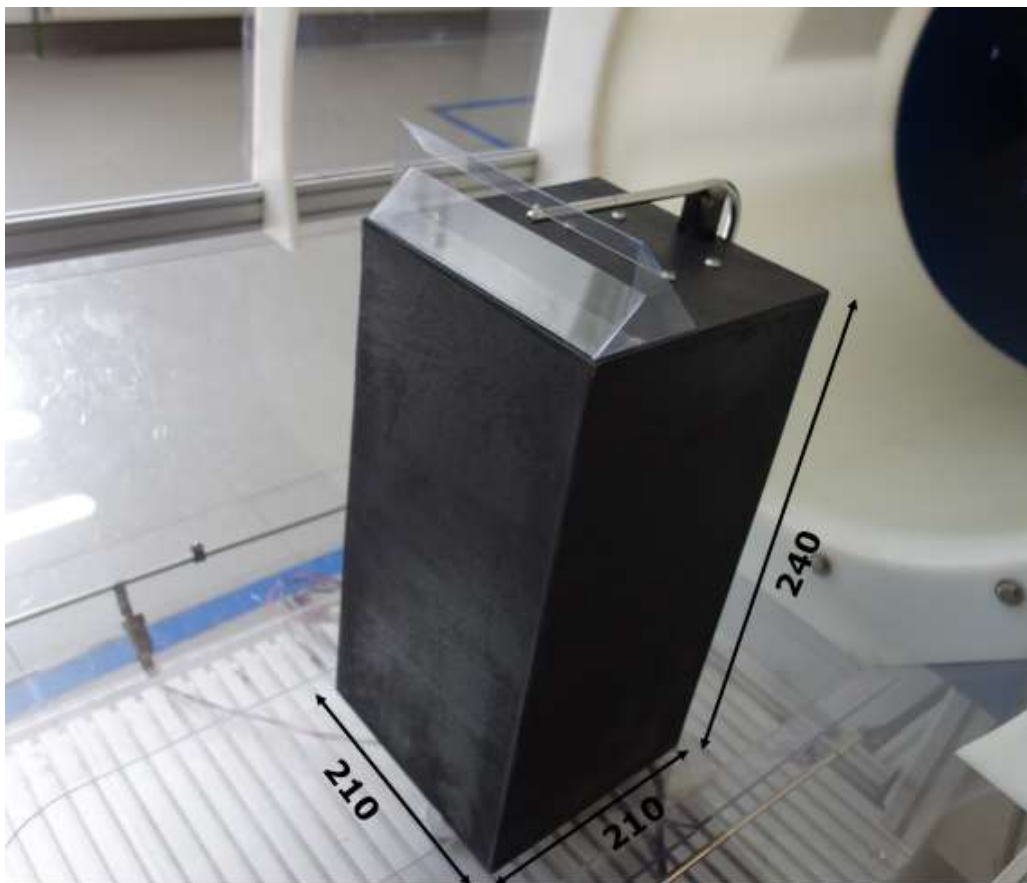
Irudia 5-5. Turbinaren diseinuaren alboko bista Solid Edge programaren bidez



Irudia 5-6: Eskalako turbinaren argazkia

5.2 ERAIKINAREN DISEINUA

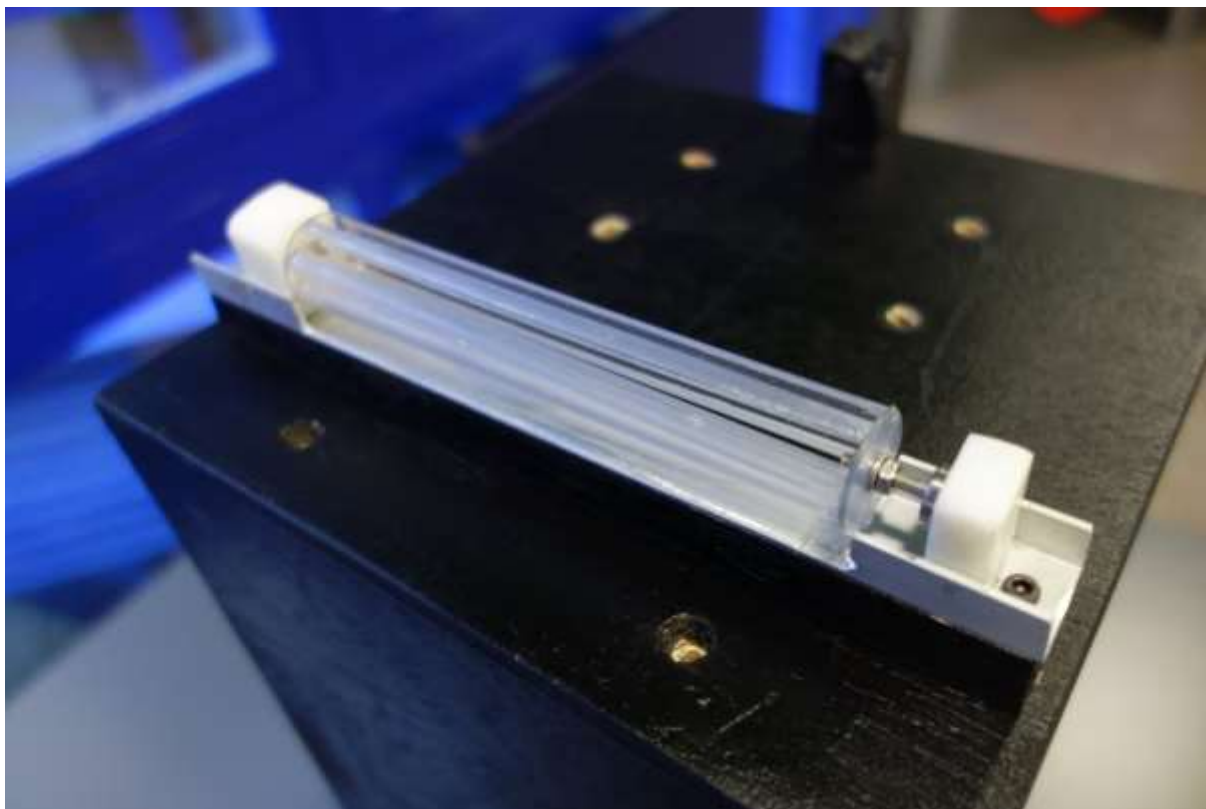
Ondoren, eraikin baten maketa eraikitzea erabaki zen, aerosorgailua eraikin baten gainean kokatuta dagoela simulatzeko, eta haize tunelean sartzerakoan haizea errealitatearen antzera jokatzeko. Izan ere, eraikina gehitzerakoan, eraikinaren hormatik igotzen diren haize fluxuak aprobetxatu daitezke, errealitatean gertatuko litzatekeen modura. Eraikina egiteko egurrezko xafak erabili ziren, xerra mekanikoarekin moztu zirenak hurrengo neurriak jarraituz (milimetrotan).



Irudia 5-7. Eraikinaren neurriak

Bost xafiak moztu eta limatu osten, haien artean itsatsi ziren. Lehen azaldu den bezala, prototipo hau aurkezpenetarako erabiltzea ere pentsatu zen, beraz, modeloaren itxura zaindu nahi izan zen, eta horretarako xafiak margoztu ziren.

Ondoren, eraikinaren goialdean turbina kokatu zen. Honetarako, turbinaren aldeak turbinaren diametroa baino luzeagoak diren kubo batzuetara finkatu ziren torloju baten bidez. Honi esker, turbina tente egon daiteke, eta ez du teilatua jotzen, turbina askatasunez biratzea utziz. Estructura hau metalezko xafia luze baten gainean itsatsi zen, bere eskuman motor txiki bat kokatzeko lekua duenak. Guzti hau egurrezko laukizuzen baten gainean muntatu zen eta hau eraikinaren teilatuan itsatsi zen, hurrengo irudian azter daitekeen muntaia osatuz:



Irudia 5-8. Turbina eraikinaren prototipoan muntatuta ezkerretik ikusita



Irudia 5-9. Turbina modeloan muntatuta eskuinetik ikusita

5.3 MOTOREA

Laborategiko probetan *blockage ratio*-ak eragina izan ez dezan, modeloa ahalik eta espazio gutxien okupatu beharko luke, eta horretarako, erabiliko zen motorea ere ahalik eta txikiena izan behar zen. Horregatik, Maxon motor markako DCX06M EB KL 6V modeloa erosi zen. Motore hau 24mm-ko luzerakoa da eta 6mm-ko diametroa du.



Irudia 5-10. Prototipoan erabiliko den motorraren irudia

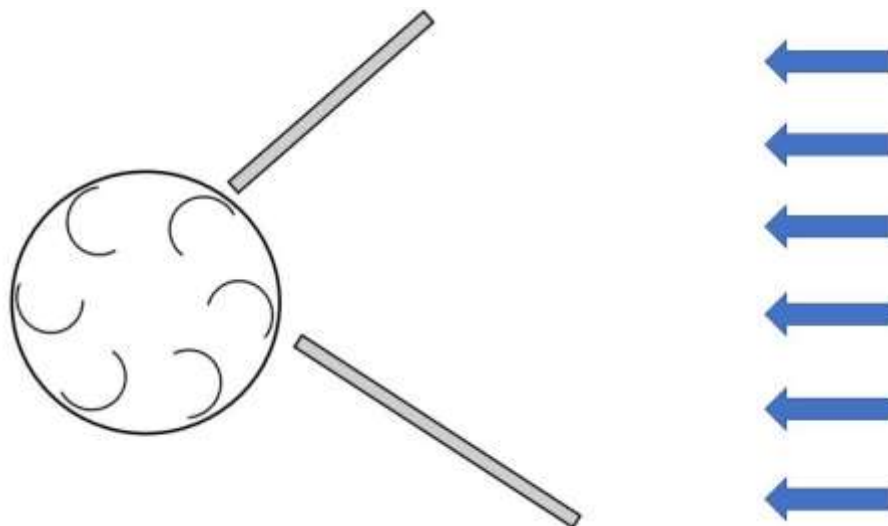
Motore honen ezaugarri nagusiak honako hauek dira, zeintzuk baldintza-agiri karpetan ezaugarri guztiak aurkezten diren.

Detalles de la combinación	
Requisitos de su aplicación	
Tensión disponible	6 V
Velocidad en vacío	4560 min ⁻¹
Par de fuerza	0,26 mNm
Prestaciones al máximo voltaje disponible	
Tensión disponible	6 V
Máx. velocidad mecánica	8040 min ⁻¹
Máx. par permanente	0,330.26 mNm
Máx. corriente en continuo	0,11 A
Potencia eléctrica requerida para el punto de trabajo	
Velocidad en vacío	4560 min ⁻¹
Par de fuerza	0.26 mNm
Tensión necesaria	4,89 V
Corriente necesaria	0,09 A

Irudia 5-11. Motor-DCX06M motorearen ezaugarri nagusiak

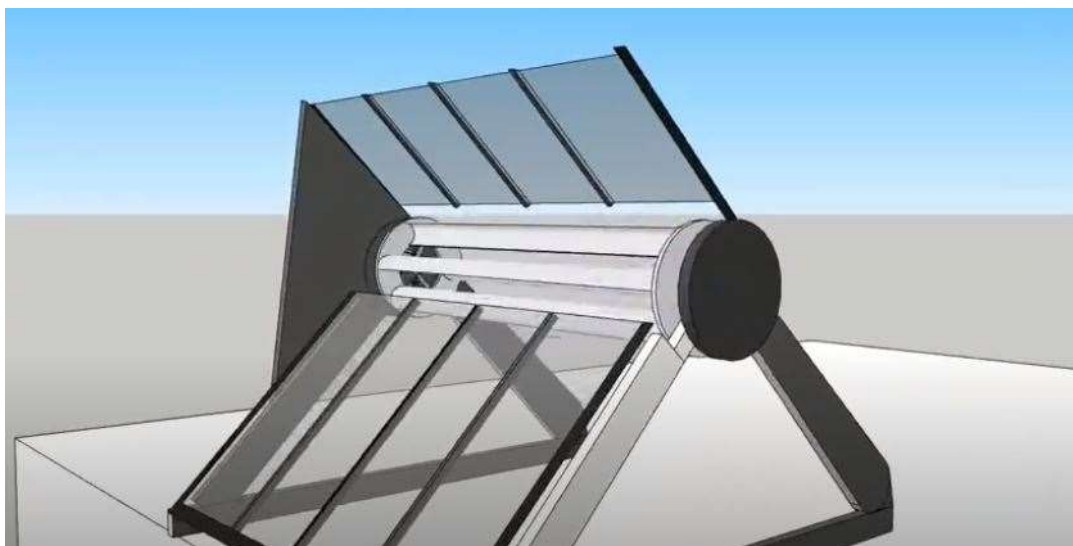
5.4 KONTZENTRADOREAREN DISEINUA

Kontzentradore Roseo prototipoan oinarrituta dago, aldaketa batzuekin eta eskala txikiago batean. Kontzentradorearen diseinua pentsatuta dago turbinaren aurrean bi xafla egoteko. Aurretik azaldu den bezala, hauen helburua da *Savonius* turbinen pare negatiboa deuseztatzea eta haizea turbinara bideratzea eta azeleratzea.



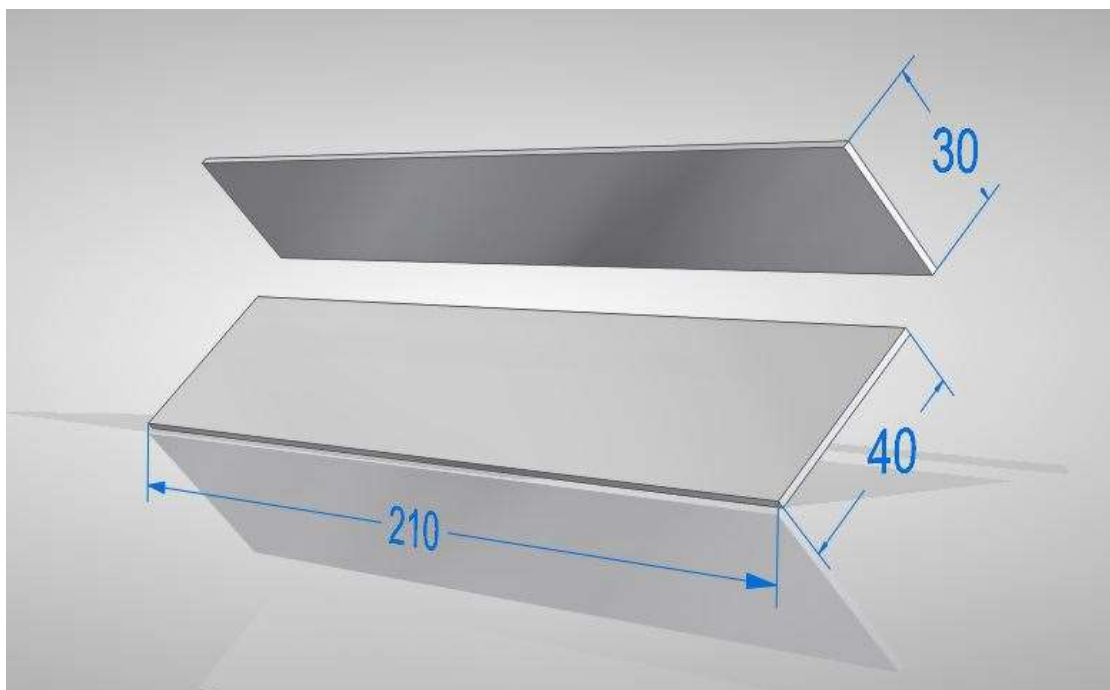
Irudia 5-12. Kontzentradorearen diseinuaren profila

Hala ere, turbinaren aurrean egongo diren bi xafla horiek ezin dira haien kabuz posizio horietan egon, eta horretarako, muntaia bat behar dute. Prototipoaren kasuan, alde bakoitzean euskarri bezala jokatzen duten material berdineko xafla zati batzuk jarri ziren eta oinarri bat egin zen. Errealitatean, honako diseinua planteatu da kontzentradorerako.

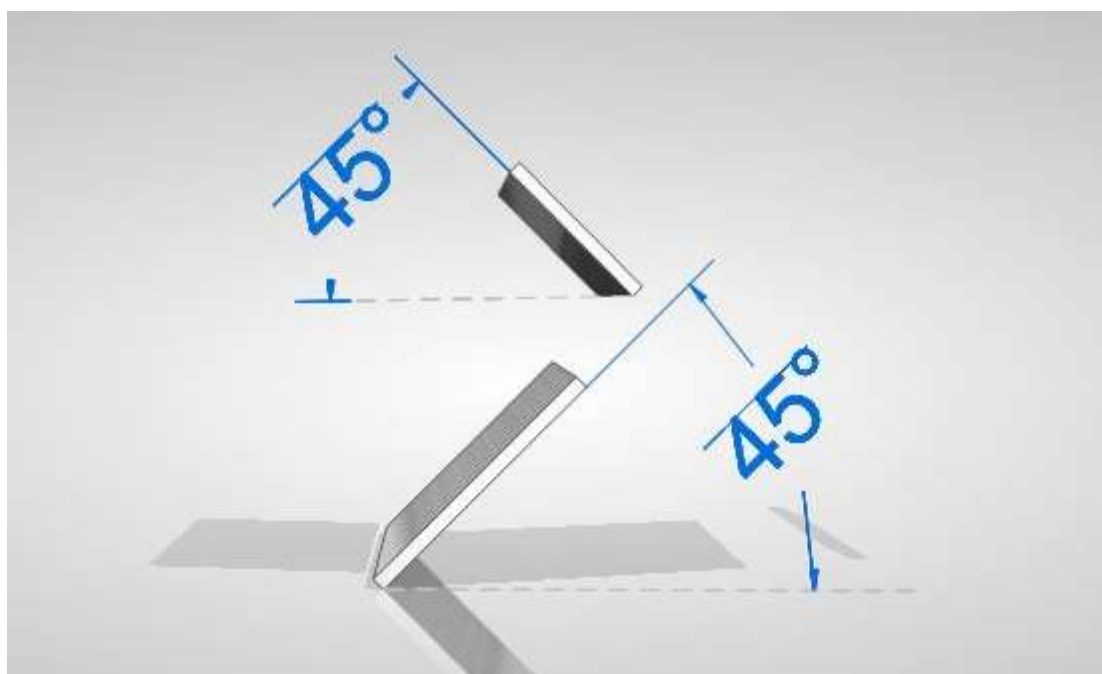


Irudia 5-13. Kontzentradorearen diseinua

Prototipoaren kontzentradorea eraikitzeko PVC gardeneko xafлак erabili ziren. Hauek xerrarekin moztu eta gero limatu ziren. Azkenik, diseinua jarraituz haien artean batu ziren. Hasieran pentsatu zen kontzentradorea bakarrik turbinaren aurrean jartzea, eta honen luzerakoa izatea. Baina dauzkan dimentsio txikiengatik eta diseinuaren sinpletasunagatik erabaki zen kontzentradorearen luzera eraikinaren neurrikoa egitea. Ondorioz, kontzentradorearen neurriak hurrengoak dira milimetrotan:



Irudia 5-14. Kontzentradorearen diseinua Solid Edge programaren bidez irudikatuta

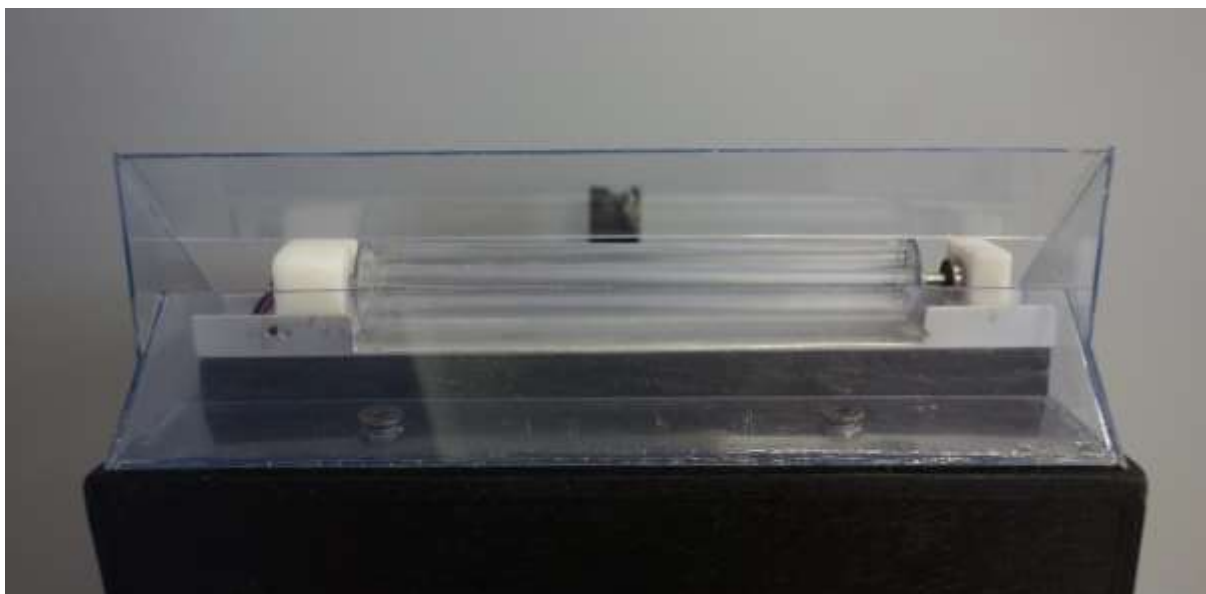


Irudia 5-15. Kontzentradorearen profilaren diseinua Solid Edge programaren bidez irudikatuta

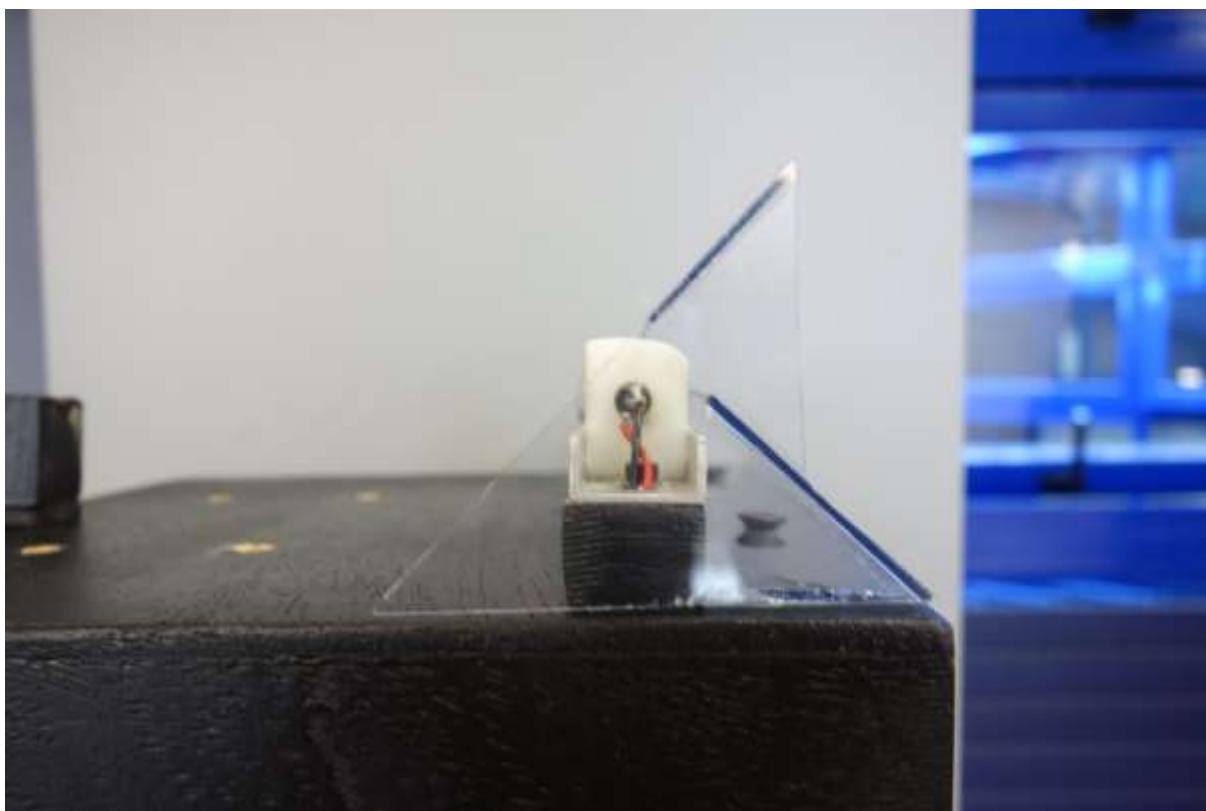
“Planoak eta irudiak” karpetan aurki daitezke aurrekoak bezalako autoreak egindako prototipoari buruzko argazki guztiak.

Kontzentradorea prototipoaren eraikinaren teيلاتuan torlojuz kokatu zen, haizea jasotzean mugitu ez dadin. Hala ere, torloju hauek erraz ken daitezke, eta ondorioz, probak egin

daitezke kontzentradorearekin eta hau gabe, kontzentradorearen efizientzia konprobatzeko.



Irudia 5-16. Kontzentradorea eraikita eta eraikinean kokatuta aurretik ikusita

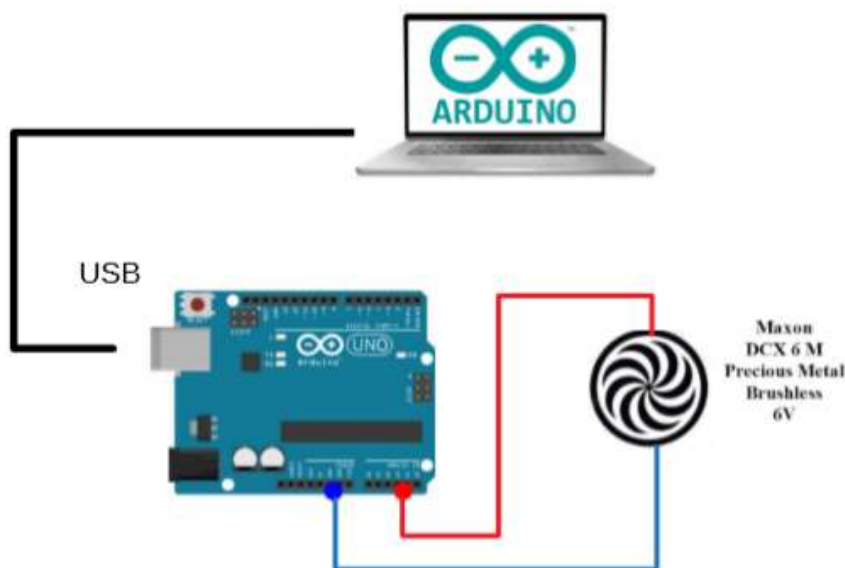


Irudia 5-17. Kontzentradorea alde batetik ikusita

5.5 ARDUINO

Arduino open-sorce hardware sistema bat da eta automatizazio eta kontrol zereginak modu erraz batean betetzea uzten duen plaka batean oinarritzen da. Hau da, programazio hizkuntza erraz eta oso betea da, jarraitzaile elkarte handi bat duena. *Hardware* eta *software* aske bat denez, aipatutako elkarteak etengabe honen hobekuntzan lan egiten du, eta ondorioz, sarean material, tutorial eta adibide asko aurki daitezke.

Arduinoa datu eskurapen *software*-a ez duten elementuentzat baliagarria izan daiteke. Izan ere, sentsore batzuekin eta inplementazio metodo batzuen bidez, arduinoak aldagaiak monitorizatu ditzake.



Irudia 5-18: Arduinoaren bidezko datuen lorpenerako eskema

Arduinoaren elikaura 7 eta 12 V-ren artean egiten da. 7V-tik behera, pin digitaletara ez dira 5V heltzen eta 12 V-tik gora, gainberotzen hasten da eta arduinoa apurtzeko aukera dago.

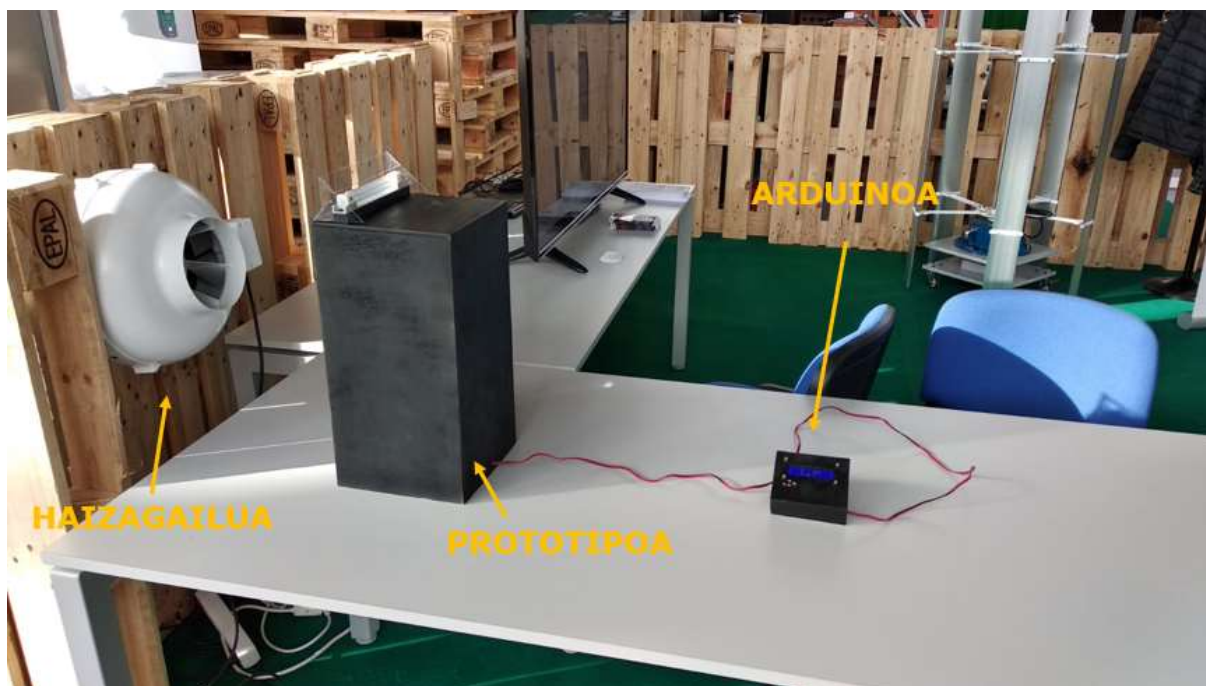
Laborategian probak egin nahi direnean, Arduinoa ordenagailura konektatuta egon behar da, seriean, Arduino plakaren B motako USB portua eta ordenagailuaren USB porturen bat erabiliz. Modu honetan, Arduinoa USB kablearen bidez elikatu egiten da, eta ez da beharrezkoa bateria gehitzea. Gainera, arduinoa ordenagailura konektatuta egon behar da datuen eskurapena egiteko, geroko analisi bat egin ahal izateko.

Roseo prototipoan arduino bat erabili da, laborategiko probetan aldagaiak neurtzeko eta ondoren erantzunak analizatzeko. Horrez gain, muntaia luzaerako irauteko eta neurketak egiteko erabiltzeko helburuarekin, zirkuitua eskuz egindako zurezko kutxa batean sartu da, muntaia konpaktuagoa bihurtuz.



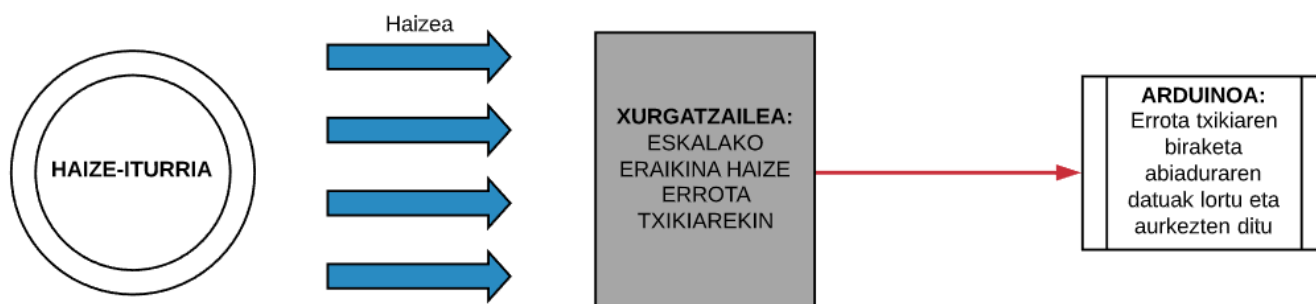
Irudia 5-19. Arduinoa zurezko kutxaren barruan

Hurrengo argazkia Durangoko *Berdeago* ferian atera zen 2019-an. Han proiektu hau aurkeztu zen. Prototipoaren aurrean haizagailu bat jarri zen honi haizea ematen. Prototipoari arduinoa konektatu zitzaion, turbinaren rpm-ak eta potentzia neurtu zituenak. Honi esker konprobatu zen kontzentradorea jartzen eta kentzean, potentzia igo eta jaitsi egiten zela, hurrenez hurren.



Irudia 5-20. Berdeago ferian aurkeztutako prototipoa arduinoarekin konektatuta

Aurreko argazkian, Durangoko Berdeago ferian erabili zen aurkezpenaren argazkia agertzen da, eta irudi hau ondo ulertzeko nahiarekin, fluxu diagrama bat egin da, elementu guztiak eta hauen ekintzak deskribatuz.



Irudia 5-21. Berdeago feriako aurkezpenaren fluxu diagrama

Ondorioz, arduinoa ez da bakarrik laborategirako erabiltzen, honen kanpoan ere erabili ahal izan da eta oso erabilgarria izan da. Kasu honetan, arduinoa ez dagoenez ordenagailu bati konektatuta, arduinoa elikatzeke bateria bat erabili zen. Bateria 8 AA pilekin 12 V hornitzeko pentsatu zen.



Irudia 5-22. Arduinoa elikatzeke erabilitako bateria

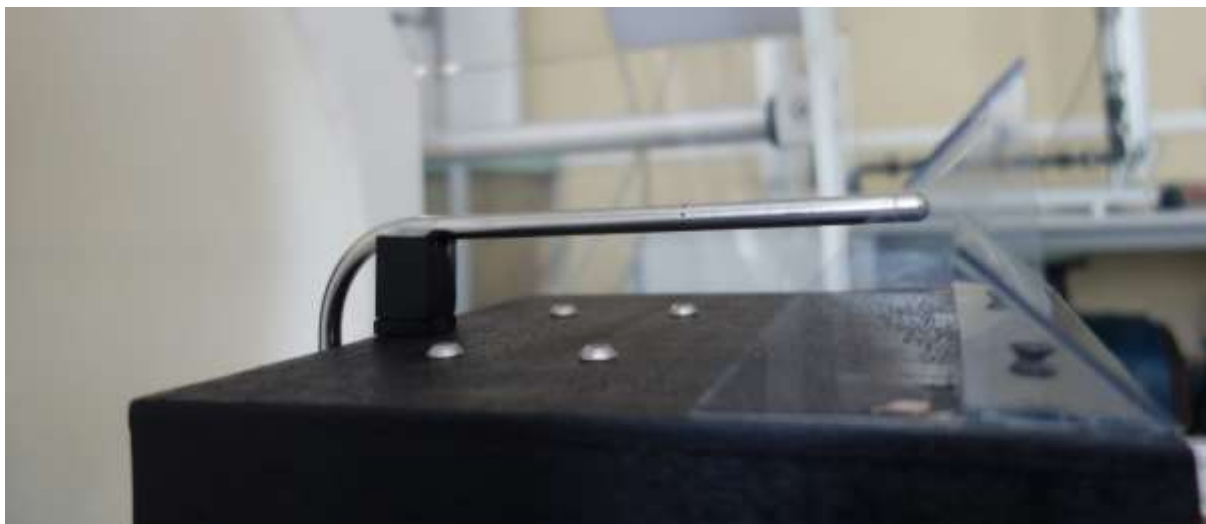
5.6 PROTOTIPOAREN AKABERA

Behin modeloaren zati guztiak eraikita eta maketaren teilatuan kokatuta egon, prototipoa laborategi probak gauzatzeko prest dago.



Irudia 5-23: Prototipoa guztiz eraikita

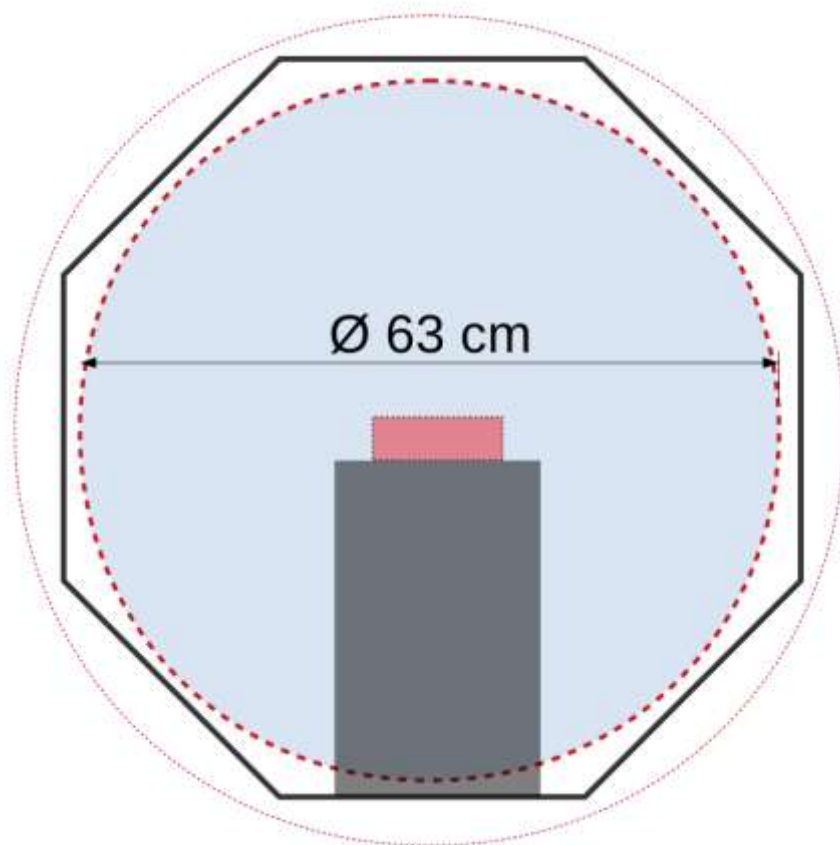
Horrez gain, eraikinaren gaiko aldean, zurezko zutabe zati bat itsatsi zen, laborategi probetan kontzentradorearen irteeran haizeak duen abiadura neurtu nahi bada, Pitot hodi bat han finkatu ahal izateko. Beraz, zurezko zutabe bat moztu zen eta goiko aldean zirkunferentzia erdiko zuloa egin zen, Pitot-en hodia han finkatzeko eta mugitu ez dadin. Ondoren, gainerako eraikina bezala, beltzez margoztu zen, eta eraikinaren teilatua izango litzatekeen erdialdean kokatu zen, turbina eta kontzentradorearen atzean. Hau laborategi probetarako oso baliagarria izango da.



Irudia 5-24: Pitot hodiarentzat eraikitako zurezko euskarria

5.7 BLOCKAGE RATIOAREN EGIAZTAPENA

Eibarko Ingeniaritzako Eskolako haize tunelean sartzerakoan, argi ikus daiteke prototipo hau aurrekoa baino askoz txikiagoa dela, eta beraz, *blockage ratio* txikiagoa izango duela. Baina hau kalkulatu da eraikitako eraikinaren neurriak hartuz, benetako BR-a zein den jakiteko, eta kalkulatu izan zen ratioa mantendu den aztertzeko. Honetarako, modeloaren azalera hartuko da, eta haize tunelaren sekzioa fabrikatzaileak gomendatutako diametro maximoaren arabera kalkulatu da.



Irudia 5-25: Prototipo berriaren irudi frontala haize tunelaren barruan

Haize tunelaren sekzioa = 0,31172526 m²
 Prototipoaren azalera frontala=0,0882 m²

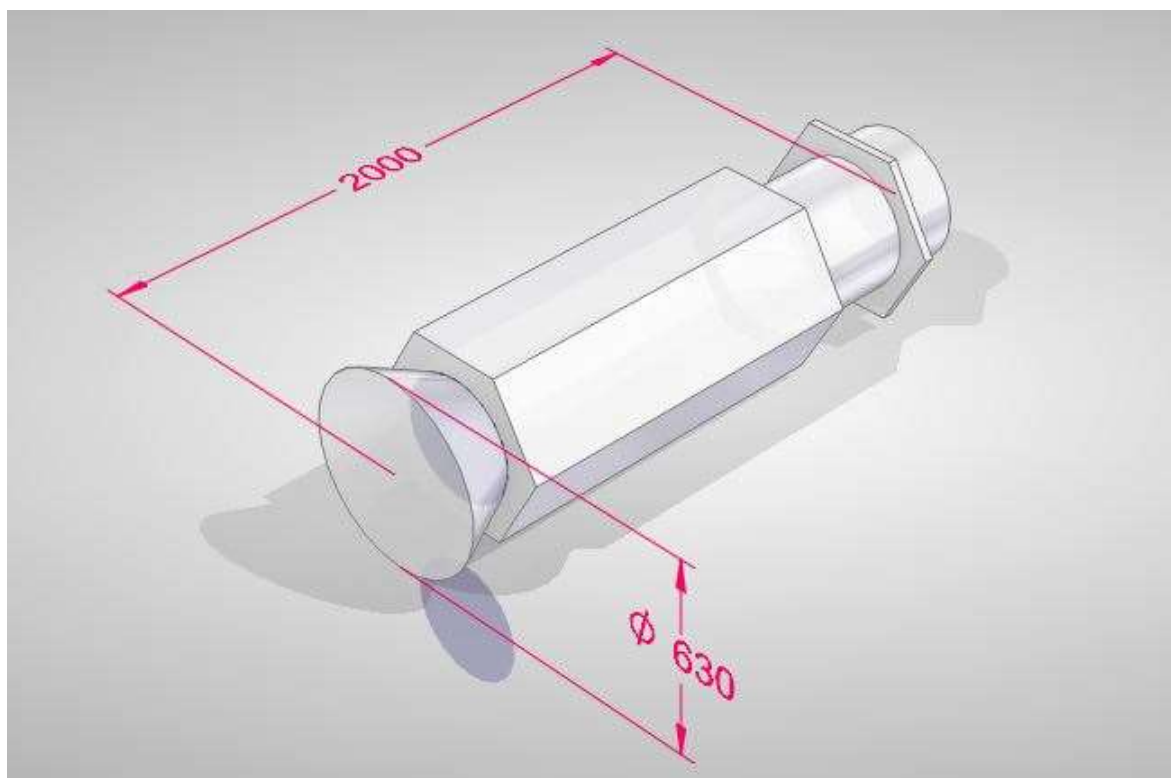
$$BR \text{ erreal} = \frac{\text{Prototipoaren azalera frontala}}{\text{Haize tunelaren sekzioa}} = \frac{0,0882}{0,31172526} = 0,28 = \%28$$

Beraz, eraikitako prototipoa Eibarreko Ingeniaritzako Eskolako haize tunelean sartuta, %32-ko BR-a duela jakin daiteke, hasieran kalkulatu zenaren antzekoa, baina pixka bat handiagoa. Honi esker, konproba daiteke modeloa hasierako baldintzak jarraituz eraiki dela.

6. LABORATEGI PROBAK

Atal honetan laborategi probekin eta datuen eskurapenarekin lotura dituzten atalak garatuko dira.

Esperimentu hauek aurrera eramateko erabilitako haize tunela *Windmill Test-Bench (EN 04.1)* modeloa izan da, Eibarreko Energia Berriztagarrien Ingeniaritzako laborategian dagoena, hain zuzen ere. Haize tunel hau 2 metroko luzerakoa da eta 630 milimetroko diametroa du, hurrengo argazkian zehazten den moduan. Hala ere, bere ezaugarri guztiak baldintza-agiri karpetan sartuta daude.



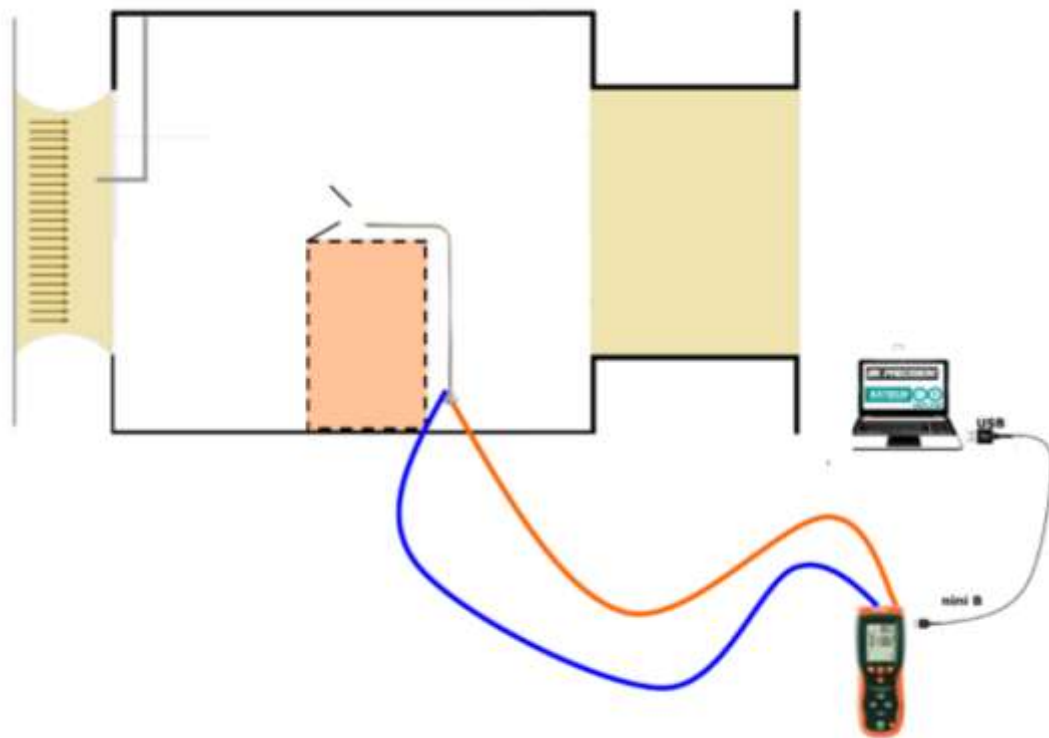
Irudia 6-1. Haize tunelaren neurriak Solid Edge programan irudikatuta



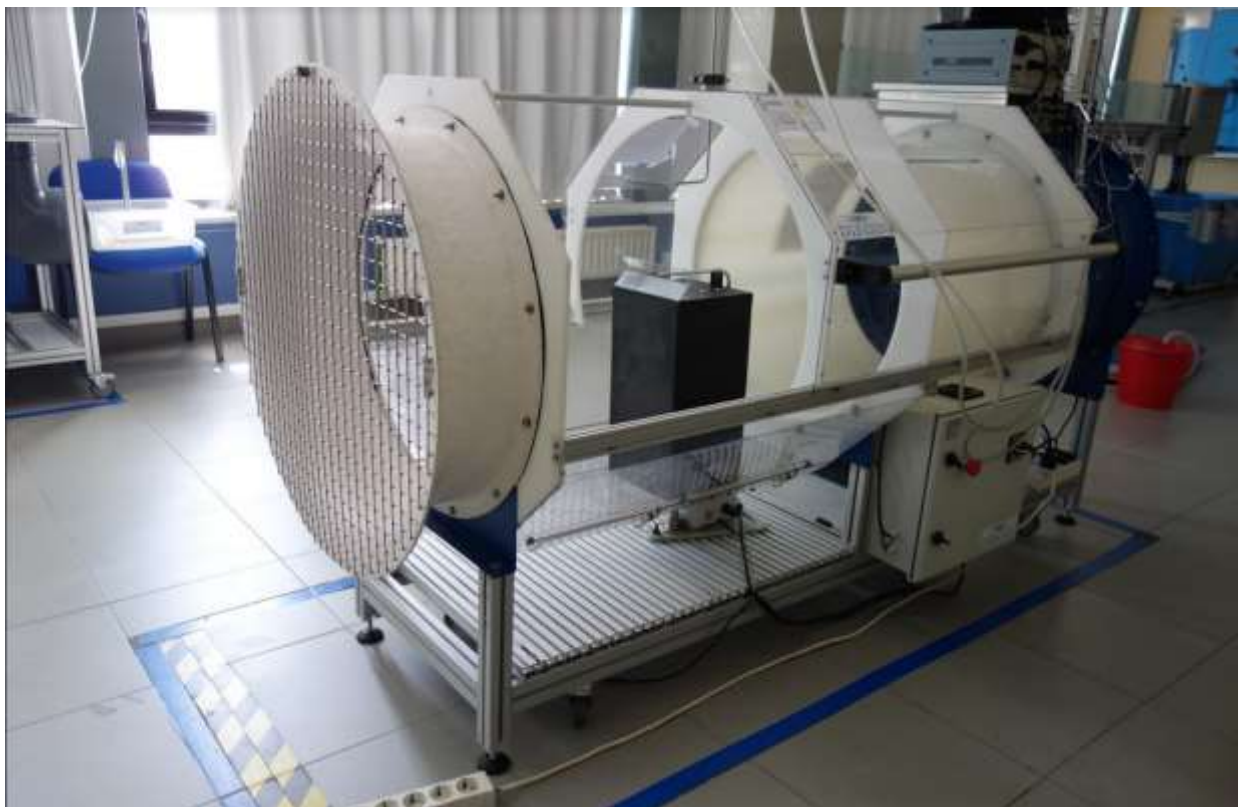
Irudia 6-2. Esperimentuetarako erabilitako haize tunela

6.1 HANDIAGOTZE FAKTOREAREN PROBA

Esperimentu honen helburua kontzentradorearen handiagotze faktorea zein den aztertzea da, hau da, haizearen abiadura zenbat aldiz handitzen den kontzentradorearen irteeran, haizearen abiadura librearekiko. Proba honetarako bi *pitot* hodi erabili dira, bat haize tunelaren sarreran, eta bestea, kontzetradorearen irteeran, 6-3 irudiaren arabera:



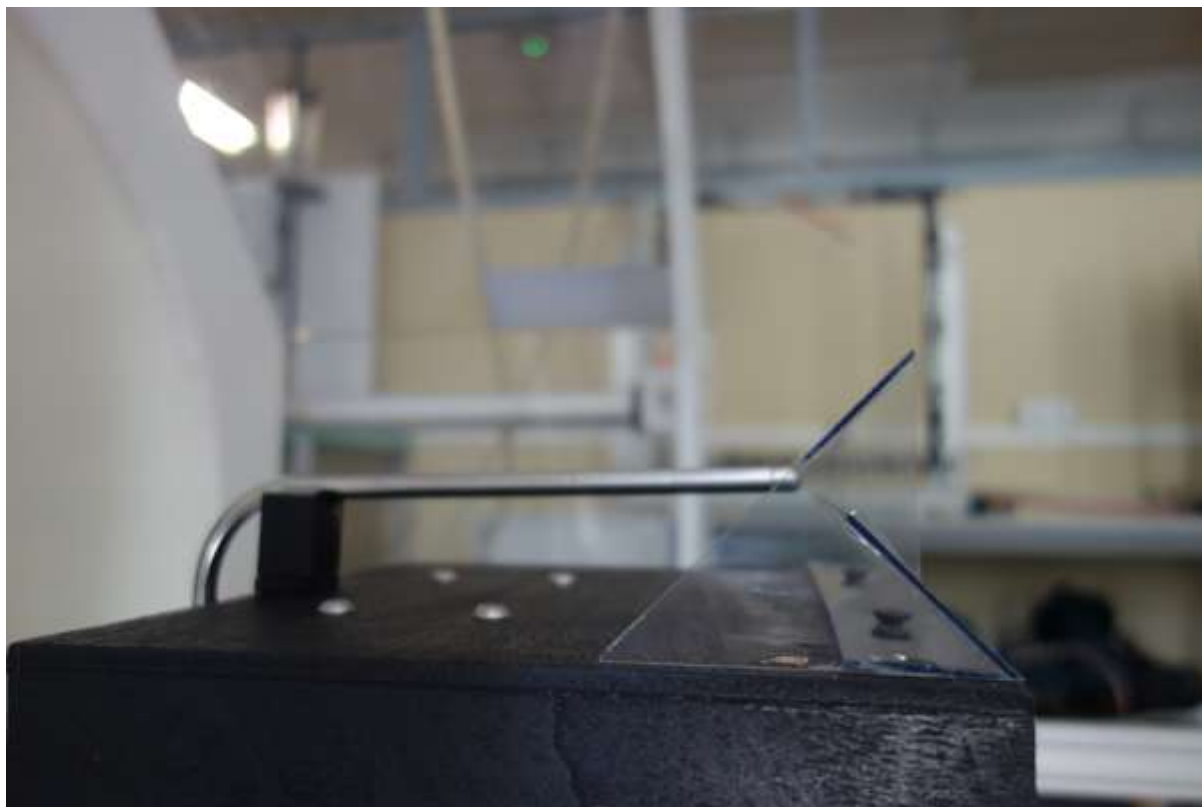
Irudia 6-3: Handiagotze faktorearen probaren alboko bistaren irudia



Irudia 6-4: Handiagotze faktorearen proba



Irudia 6-5: Kontzentradorearen irteerako haizea neurtzeko Pitot hodiaren kokapena



Irudia 6-6: Kontzentradorearen irteerako haizea neurtzeko Pitot hodiaren kokapenaren alboko bista

Hala ere, proba hauek ez dira eztaba daezinak izan, beharbada erabilitako Pitoten hodia neurtu nahi izan den fluxurako handiegia delako. Gainera, zergatia oso klaro ez egon arren, ezin izan zen proba hau hobetzen hasi, benetako akatsak aurkitzeko eta konpontzeko. Hori dela eta, erabaki zen hurrengo probak turbinarekin gauzatu daitezkeenak izatea.

6.2 SKEW PROBA TURBINAREKIN

Roseo aerosorgailuaren instalazioaren ezaugarri garrantzitsuenetariko bat da noranzko bakarreko aerosorgailua dela, hau da, eraikin bateko aurrealde batean kokatuko da bakarrik, eta bere ahalmen faktorea norabide horretako haizeari lotuta egongo da. Horregatik, aurretik kokapenaren ikasketa bat egiteak garrantzi handia dauka, potentzial eoliko handien duen fatxada aurkitu ahal izateko, kokapen horretan aerosorgailua ipintzeko eta ahal den energiarik gehiena sortu ahal izateko. Hemen *skew*-aren garrantzia automaten da, orain azalduko dena.

Skew angelua, edo eraso angelua, haizearen norabidearen eta errotorearen biraketa abiaduraren arteko angelua da, hau da, turbinara heltzen den haizearen norabidearen angelua. Hurrengo formularen bitartez defini daiteke:

$$\cos Y = \frac{n \cdot V'}{|n| \cdot |V'|}$$

Non, n : Biraketa abiaduraren norabidearen bektorea den.

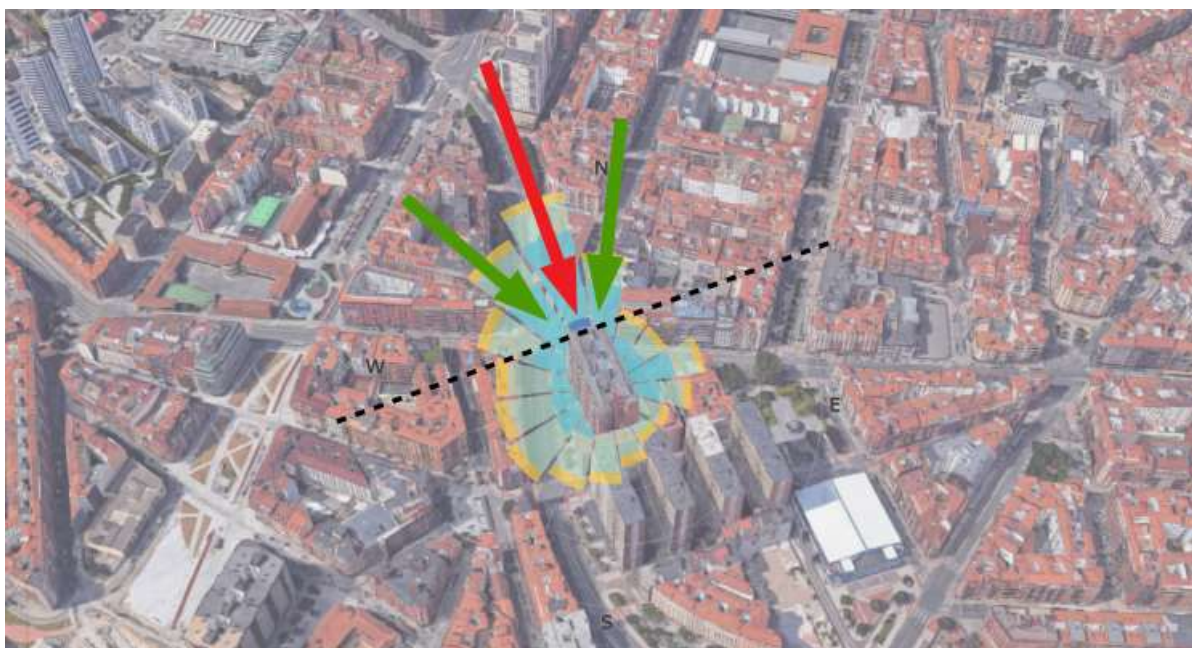
V' : Haizearen abiaduraren norabidea den.

Eraikinen gaineko haize fluxuak oso aztertuak izan dira ikertzaileen bidez azkenengo hamarkada honetan, eta ondorio interesgarriak lortu dituzte, fluxuaren handiagotzea eta fluxuaren zehiartasuna bezalakoak. Mertens-ek egindako lanean, frogatu zen *skew* angelurik handiena lortzen dela haizearen kontra dagoen eraikinaren ertzan, eta teilatuan zehar angelua txikitzen dela, teilatuaren erdialdean -5 eta -10 gradutara jaitsiz gutxi gora behera.

Skew angeluak turbinaren errendimenduan eragina izango du, bai HAWT edo VAWT izanda. Hala ere, HAWT gailuen kasuan, jakina da angelua kaltegarria dela, eta kontrari, VAWT gailuentzako *skew*-a onuragarria da.

Kasu honetan, Roseo aerosorgailua eraikinen teilatuaren ertz bakar batean kokatzen da, hau da, norabide bakarreko turbina da. Ondorioz, kokapenaren potentziala aztertzeke probak egiterakoan, fatxadaren perpendikularra den haizea bakarrik aztertzen bada, urtero oso potentzia txikia lortzen dela aurkitzen da. Aldiz, kontuan hartzen badira perpendikularrak ez diren haizearen beste norabideak, eta hauek ere turbina mugiarazten badute, urtero energia gehiago sortuko da eta turbinaren eraginkortasuna hobea izango da.

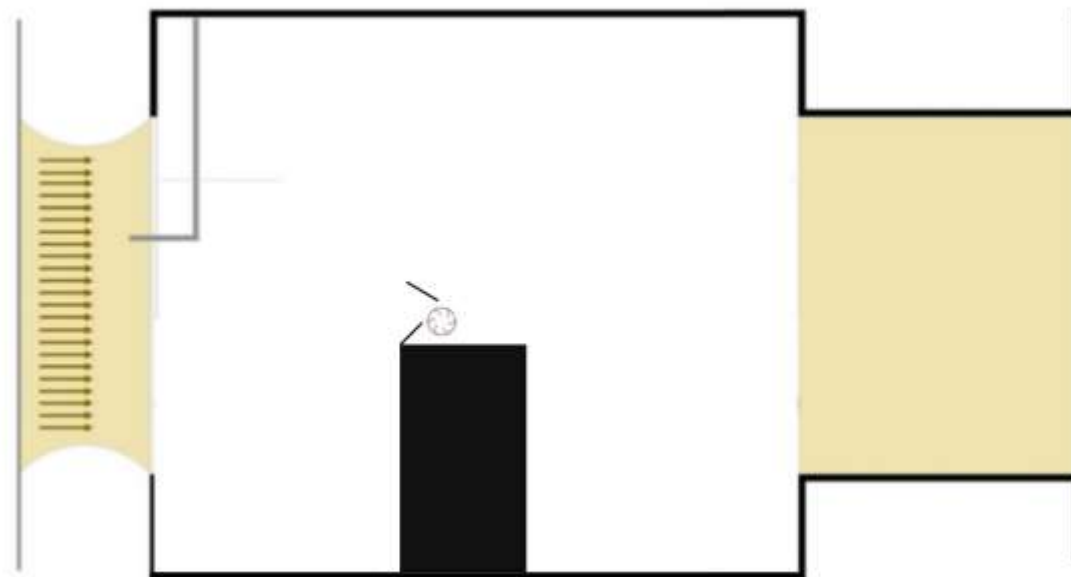
Ondorioz, proba hauen helburua izango da haize perpendikularrak sortuko duen energia aztertzea, beste norabideetan heltzen den haizeak sortzen duenarekin batera, turbinan eragina duten angelua guztiak ikertuz. Izan ere, turbinan perpendikularra ez den haizeak eragina badu, turbina ez da norabide bakarrekoa izango, eta honen produkzio orduak handiagotuko dira.



Irudia 6-7: Eraikin baten haize arrosa, ertz batean kokatutako aerosorgailuak jasotzen duen haize norabide ezberdinak nabarmenduz

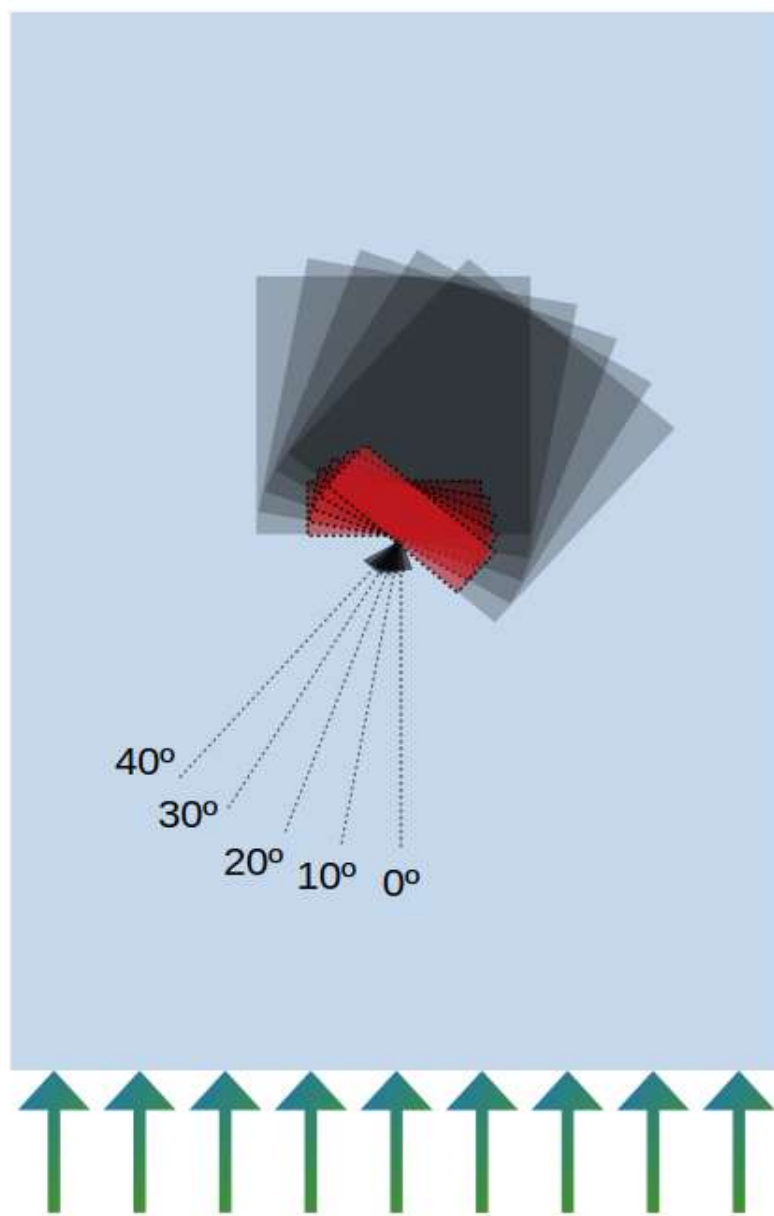
Aerosorgailuaren funtzionamendua *skew* angelu ezberdinekin kalkulatzek, haizea norabide nagusia ez denean, hau da, fatxadarekiko perpendikularra ez denean, aerosorgailuak zenbateko energia sortuko duen jakitea ahalbidetuko du. Modu honetan, erabilgarriak diren angeluen erradioa handituko da, eta honekin batera, urteko funtzionamendu orduak hazi egingo dira, instalazioaren amortizazioa jaitsiz.

Honi buruz laborategian egindako proban turbinaren abiaduraren neurketa hartzen da hutsean *skew* angelu desberdinetarako. Hurrengo irudian ikus daiteke probaren alboko bista:



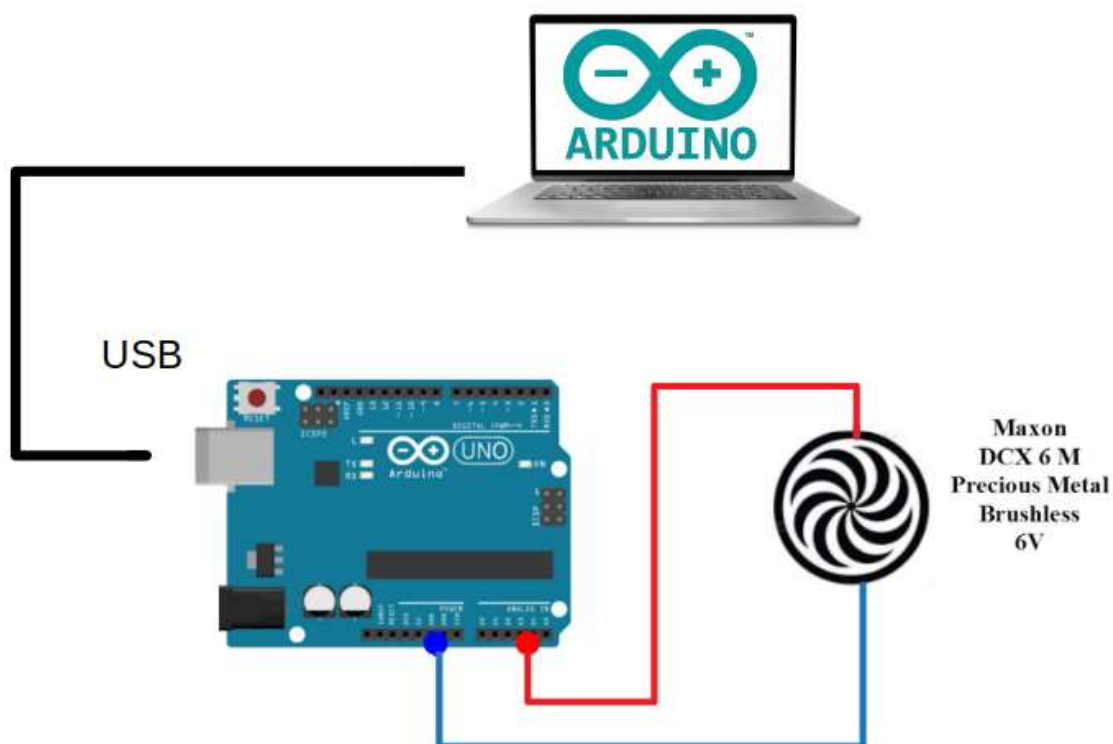
Irudia 6-8: Skew angeluaren probaren alboko bistaren irudia

6-9. irudian ikus daitekeen moduan, laborategi proba hiru *skew* angelu ezberdinetarako eta hiru abiadura ezberdinetarako gauzatu da. Datuak minutu oso batean zehar jaso dira saiakera bakoitzarentzat.



Irudia 6-9: Skew angeluaren proben saiakera ezberdinak

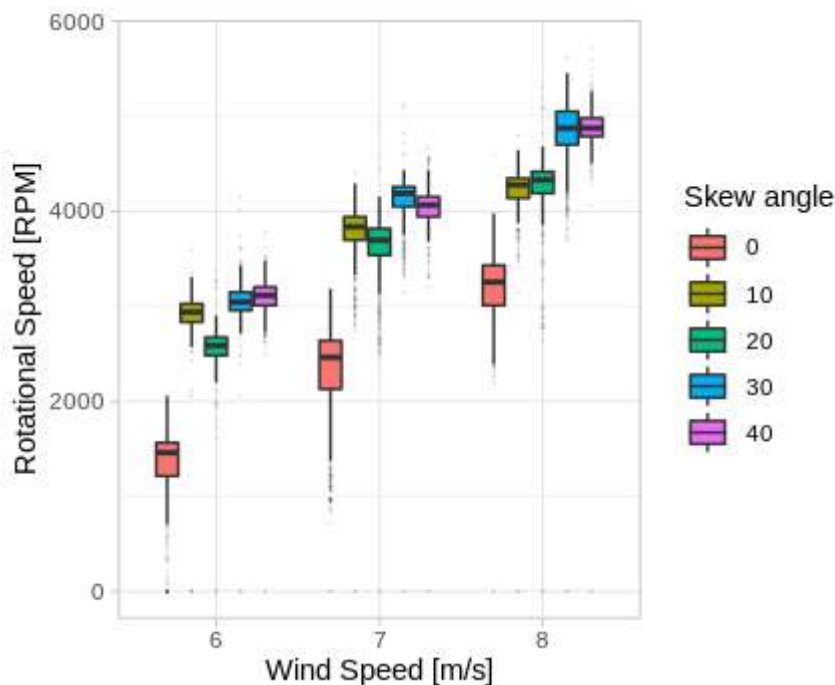
Datuen lorpenerako Arduinoa erabili da, hasierako proben moduan, baina kasu honetan hurrengo eskema jarraitu da. Modu honetan, datuak ordenagailuan jasotzen dira zuzenean. Datuen lorpenerako erabilitako Arduinoaren script-a kalkuluen karpetan gehituko da.



Irudia 6-10: Skew probako datuak eskuratzeko erabilitako sistemaren eskema

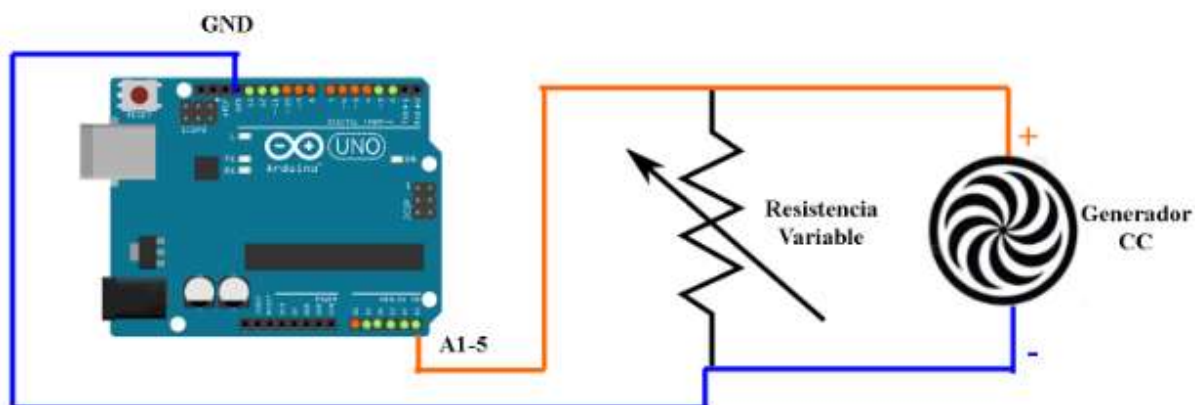
Lortutako emaitzak onuragarriak izan dira. Intuitiboki, logikoa izango litzateke pentsatzea haize korronteak perpendikularrak ez direnean turbinaren abiadura jaitsiko litzatekeela, baina lortutako erantzunek kontrakoa erakusten dute, turbinaren abiadura handipena aurkezten da *skew* angelua igotzen den heinean. Erantzun hauek oso oparokoak dira, haize arrosaren sektore oso zabal bat hartzen duelako, eta honen ondorioz, urteko funtzionamendu orduak hazi egingo dira, instalazioaren amortizazioa jaitsiz.

Hala ere, proba hau ez da nahikoa izan Roseo turbinaren gaineko *skew* angeluak duen eragina aztertzeko, izan ere, hutsean bakarrik burutu denez, potentzia kurbak lortzeko informazioa falta izan da eta ezin izan dira hauek garatu.



Irudia 6-11: Biraketa abiadura haize abiadura eta skew angelu ezberdinetarako

Lortutako erantzun hauen aurrean, planteatu da hurrengo helburua potentzia kurbak lortzea izatea, eta horretarako, sorgailua hutsean biratzea uztearen ordez, motorraren borneetan bere abiadura aldatzea uzten digun erresistentzia aldakor bat gehitzea beharrezkoa ikusi da.

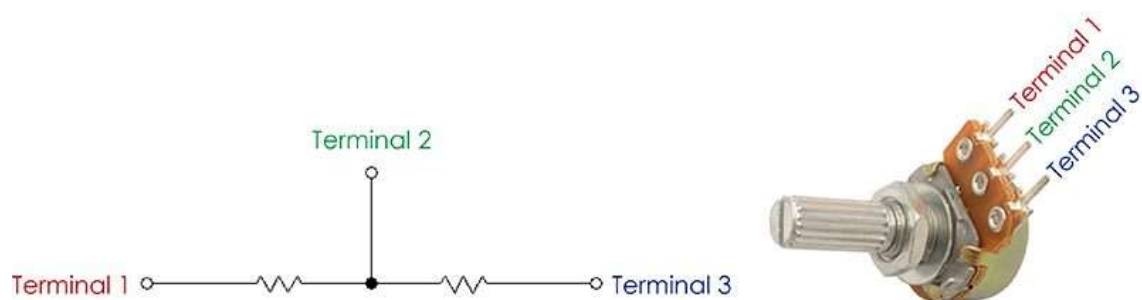


Irudia 6-12: Erresistentzia aldakorren gehiketaren eskema

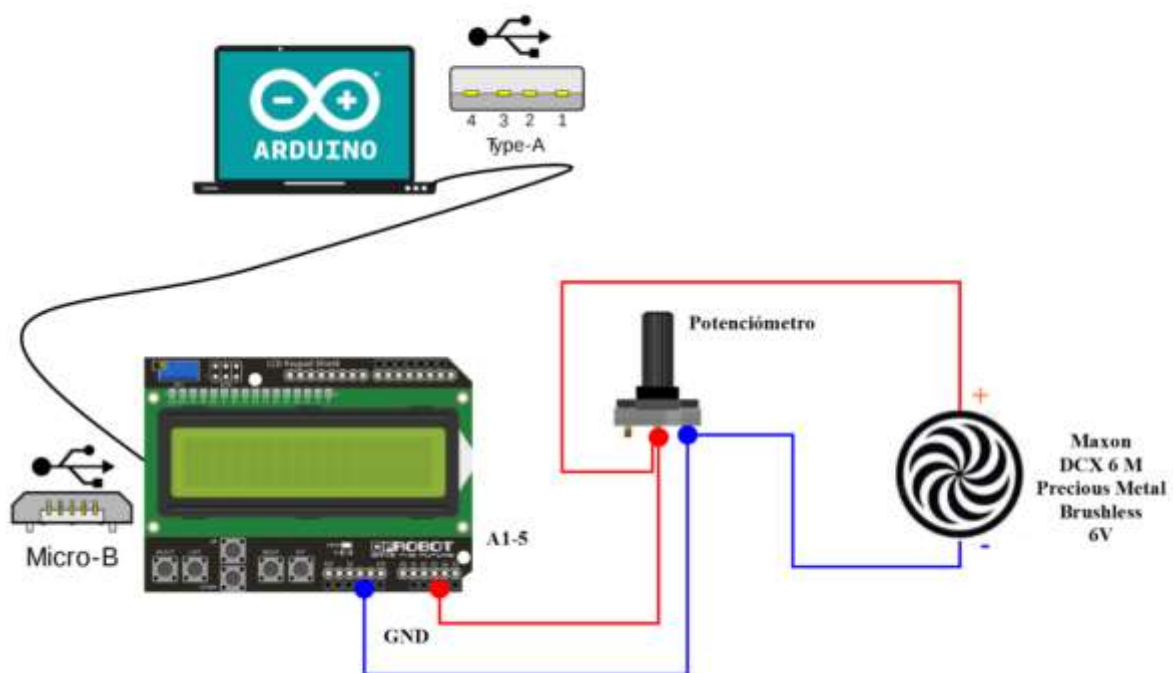
Eibarko Ingeniaritza Eskolako laborategian dagoen erresistentzia aldakorra potentzia eta tentsio altuagoetarako diseinaturik dagoenez, erresistentzia aldakor hau beste bideren batez lortu behar izango dela ikusi da, eta lehenengo aukera bezala, potensiometro txiki batean pentsatu da.



Irudia 6-13: Eibarreko laborategiko erresistentzia aldakorra



Irudia 6-14: Potentziometroaren eskema elektrikoa



Irudia 6-15: Potentziometroaren erabileraren eskema

Hala ere, proba hau burutu ahal izan aurretik, COVID-19 birusak sortutako egoerak Eibarko Unibertsitatea ixtera eraman zuen, eta honekin, lana aztertzen zen laborategia ere. Hori dela eta, proba hau ezin izan da bukatu eta lan honetan ezin izango da hau zehaztasun gehiagorekin aztertu.

7. ONDORIOAK

7.1 ESPERIMENTUEN ERANTZUNEN ONDORIOAK

Aurreko atalean aztertu izan den bezala, prototipo berri honekin egindako laborategi probek ez dute erantzun eztaba daezinik lortu. Alde batetik, handiagotze faktorearen probaren neurketen emaitzek ez zuten zentzuduneko daturik ematen, eta hau ezin izan zen konpondu, hasteko, ez zelako ziurtasunez aurkeztu zer zen erantzun horien eragilea, eta horrez gain, pentsatu zelako erantzun horien eragilea fluxua izan zitekeela, fluxua handiegia izateagatik, hain zuzen ere, eta horren kontra ez zen konponbiderik aurkitu.

Bestalde, *skew* angeluaren proban zehar hainbat arazo sortu ziren, adibidez, erresistentzia aldakor baten beharra. Hurrengo arazoa izan zen Eibarreko Eskolako erresistentzia aldakorra erabiltzen saiatzea, baina hau ezinezkoa zela ikusi zen. Azkenik, proba honekin jarraitzeko konponbidea aurkitu zenean, hau da, potentziometro bat erabiltzea, orduan urte honetan zehar bizitako egoera berria hasi zen. Honen ondorioz, ezin izan da proba hauekin jarraitu, izan ere, maketa eta haize tunela Eibarreko Ingeniaritza Eskolan geratu ziren, eta egoera berri honetan debekatuta egon zen ikastetxeak irekita egotea. Hasieran, pentsatu zen egoera hori aste batzuetakoa izango zela bakarrik, eta lan honetan laborategi proba hauekin jarraitu ahal izango zela, baina denbora pasa ahalaz, argi ikusi zen lan hau aurkeztu behar izango zela probak egiteari jarraitu ahal izan baino lehen. Hori dela eta, laborategi proben atala amaitu gabe gelditu behar izan da, *skew* angeluaren probari konponbide bat eman gabe, eta pentsatuta zeuden proba gehiago gauzatu ahal izan barik.

Hala ere, *skew* proban lortutako erantzunak oparokoak izan direla esan daiteke. Izan ere, erabilgarriak diren haize korranteak eta perpendikularrak ez direnen potentzia handitzea lortu da, urteko funtzionamendu orduak haziz eta instalazioaren amortizazioa jaitsiz.

Ikuspuntu komertzial batetik eta hasiera batetik, proiektu honen helburua arrazoizko errentagarritasun ekonomiko hornitutako aerosorgailu bat lortzea izan da, merkatuko sorkuntza berriztagarriko teknologien antzerako amortizazio batekin. Horretarako, proiektuaren hasieratik ahal bezain material eskuragarrienak bilatu dira, eta fabrikazio kosteak jaitsiko dituen eta existitzen den eta industrial inguruan dagoen teknologiarekin gauzatu daitekeen diseinu sinple baten alde egin da. Guzti hau lortzeko, sorkuntza sistemaren efizientzia sakrifikatzeko aukera zegoen, errentagarritasun ekonomiko handiagoa lortzeko helburuarekin.

Aldiz, lortutako erantzuna izan da, planteatutako baldintzak beteta ere, efizientzia gogobetekoa izan dela eta koste onargarriekin eraikia izan daitekeela, jakinda inguru hurbilenak industria heldua eta lehiakorra duela, ezaugarri hauetako aerosorgailu bat sortzeko prest dagoena, eta modu honetan, aerosorgailu errentagarri bat lortzeko hasierako helburua bete ahal izango dela.

Horrez gain, berrogeialdiaren egoeratik alde on bat ere lortu da. Egoera honetan pertsona guztiek etxean sartuta egon behar zirela ikusirik, lan honi bukaera emateko eta Roseo enpresa ezagutarazteko, Roseori buruzko hiru bideo egin izan dira, bakoitza hizkuntza ezberdin batean, euskaraz, ingelesez eta erderaz. Bideo hauek "marketing" helburuarekin egin dira, pertsona guztiei zuzenduta daude eta modu errez batean Roseoren helburua, hasieran egindako laborategi probak eta lan honetan azaltzen den prototipoaren eraikuntza eta probak azaltzen dira. Bideo hauek "Bideotutoriala" izeneko karpeta gehituta daude.

7.2 ETORKIZUNEN IKUSPEGIA

COVID-19-ak sortutako egoera honek eragin garrantzitsua izan du esperimentu honen garapenean. Izan ere, egoera honetan ezin izan da kalera atera, bizi den hiritik atera edota unibertsitatara joan. Beraz, lan honetako kasuan, ezin izan da Eibarrera joan, ez Eibarreko Ingeniaritza Eskolako laborategia erabili, prototipoarekin probak egiten jarraitzeko. Hau dela eta, lan hau osatzeko prestatu ziren ekintza asko ezin izan dira burutu eta lan hau amaitu gabe gelditu behar izan da. Atal honetan zehar azalduko da egoera honetan izan duen eragina eta hauek konpontzeko bilatu diren irtenbideak.

Hasteko, Eibarko Ingeniaritza Eskolako haize tunelean burutu nahi ziren proba gehienak ezin izan dira aurrera eraman, eta beste aukerak bilatu behar izan dira erantzunak lortzeko eta modeloaren eraginkortasuna aztertzen jarraitu ahal izateko. Lan honetatik ondorio zehatzagoak lortzeko, maketa hau Eibarko haize tunelean sakonago aztertzea onuragarria izan litzateke, prototipoak %25-ko *blockage ratio*-a duela kontuan hartuz eta interpretatuz. Hala ere, lan honetan azalduko ez den arren, proba hauek etorkizunean burutu ahal izango dira, egoera hau aldatzean eta Eibarko Unibertsitatara sartzea ahalbidetzen denean. Modu honetan, beste ikerketa batean modeloaren eraginkortasunaren ikerketarekin jarraitu ahal izango da, amaitu gabe gelditu diren probak jarraitu ahal izango dira eta erantzun zehatzagoak lortu ahal izango dira.

Gainera, prototipoak, erabilitako haize tunelean sartuta, %25-ko BR-a du, eta lan honen garapenean askotan aipatu izan den moduan, azterlari gehienek BR-a %10-a baino txikiagoa izatea gomendatzen dute, lortzen diren datuak errealitatekoetara hurbiltzeko. Beraz, berrogeialdiko egoera hau hasi aurretik, modelo txikiago bat eraikitzea proposatu zen, haize tunel berdinean sartuta, BR-a errespetatzeko eta esperimentu berriak gauzatzeko. Hau aurrera eraman balitz, prototipo honen portaerari buruzko erantzun zehatzagoak lortu ahal izango lirateke, BR-a betetzen duen prototipo batekin lan egingo zelako, lehenengo aldiz.

Hau oraingoz lortuko ez dela onartzean, erabaki zen lan honetan burututako esperimentuetako erantzunak zuzentzea *blockage correction factor* baten bidez, errealitateara berdintzen diren erantzun zehatzagoak lortzeko helburuarekin. Hala ere, zuzenketa hau bizitako egoera hau igarotzean egin beharko da, eta beraz, ezin izango da lan honetan aztertu. Hala ere, atal honetan azalduko da zuzenketa hau nola gauzatu daitekeen, ikerketa hau jarraitzen duenak oinarri bezala erabil dezan:

Hasteko, esperimentua egiterako momentuan beharrezkoa da tenperatura neurtzea, honekin Reynolds-a kalkulatu ahal izateko. Izan ere, eraikin handi batean eratzen den Reynolds-a handia izaten da, eskala txikiago batean neurtzen denarekin konparatuz. Baina, simulazioa ondo egiteko eta erantzun zuzenak lortzeko, Reynolds zenbakiak modelan eta prototipoan berdinak izan behar dira.

Hau aztertzeko erabaki da honi buruzko adibide bat egitea, Eibarko unibertsitateko eraikinean oinarrituta. Jakinda Reynolds zenbakiaren formula honako hau dela:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} = \frac{v \cdot L}{\nu}$$

Non, ρ : fluxuaren dentsitatea [kg/m³]

v : fluxuaren abiadura [m/s]

L : eraikinaren luzera [m]

μ : biskositate dinamikoa [kg/m·s]

ν : biskositate zinematikoa [m²/s] diren.

Eibarko unibertsitatearen eraikina eta eskala txikiago bateko prototipoaren arteko konparazio hau egiteko, hurrengo datuak erabiliko dira: Eraikinaren altuera 50 metrokoa dela, eraikin honen teilatua Roseok kokatutako anemometroarekin lortutako haizearen bataz besteko abiadura 2m/s-koa dela eta eskalako eraikinaren altuera 420mm-koa dela. Horrez gain, aipatzekoa da biskositate dinamikoa bi eremuetan berdina izango dela, eta horregatik, biskositate dinamikoaren formula erabiliko da.

Bi modeloek Reynolds berdina izango duten helburuarekin, aurreko datuak formulan ordezkatu dira eta formulak berdindu dira:

$$\frac{\rho \cdot v_{anem} \cdot L_{eraikin}}{\mu} = \frac{\rho \cdot v_{maketa} \cdot L_{maketa}}{\mu}$$
$$1,225 \cdot 2 \cdot 50 = 1,225 \cdot v_{maketa} \cdot 0,420 \rightarrow v_{maketa} = 238.1 \text{ m/s}$$

Beraz, Reynolds zenbaki berdina lortzeko, haize tunelean aurreko abiadura erabili beharko litzateke.

Bestalde, biskositate zinematikoa tenperaturarekiko alda daiteke. Ondorioz, laborategian udan, tenperatura oso altuek egongo dira, eta neguan, aldiz, tenperatura baxuagoak. Beraz, probak ---- ezberdinetan gauzatzen badira, tenperatura ezberdinekin, biskositate zinematikoa ezberdina izango da ere, eta hau kontuan hartu beharko da. Horregatik gure kasuan, kalkulu hau egiteko, biskositate dinamikoa erabiltzea erabaki da. Hurrengo taulan, tenperaturaren arabera biskositate zinematikoaren aldaketa aurkezten da.

Table A.10

Properties of Air at Atmospheric Pressure (SI Units)

Temperature, $T (^{\circ}\text{C})$	Density, $\rho (\text{kg/m}^3)$	Kinematic Viscosity, $\nu (\text{m}^2/\text{s})$
0	1.29	1.33E-05
5	1.27	1.37E-05
10	1.25	1.41E-05
15	1.23	1.45E-05
20	1.21	1.50E-05
25	1.19	1.54E-05
30	1.17	1.59E-05
35	1.15	1.64E-05
40	1.13	1.69E-05
45	1.11	1.74E-05
50	1.09	1.79E-05
55	1.08	1.83E-05
60	1.06	1.89E-05
65	1.04	1.94E-05
70	1.03	1.98E-05
75	1.01	2.04E-05
80	1.00	2.09E-05
85	0.987	2.14E-05
90	0.973	2.19E-05
95	0.960	2.24E-05
100	0.947	2.29E-05

Irudia 17-1. Airearen biskositate zinematikoaren aldaketa temperaturarekiko

Aipatzekoa da, gaur egun, haize tunel berezi batzuk daudela, zeintzuk tenperatura erregulatu dezaketenak, honela biskositate zinematikoa aldatuz, eta modu honetan, Reynolds zenbakia aldatzea edo egiazkora moldatzea ahalbidetuz.

Horrez gain, gaur egun honi buruzko bilatzaile matematikoak daude, hala nola, Wolfram Alpha programa, non tenperaturaren balioa sartuz, biskositate zinematikoaren balioa automatikoki aurkezten den. Bilatzaile hau aztertzeko, *link*-a bibliografian gehituko da [23] bezala.

Reynolds zenbakia egokitu ostean, beste datuak zuzentzeko formulak aplikatu daitezke. Honi buruz, azterketa esperimental eta zenbakizko asko egin dira, batzuk besteak baino zehatzagoak. Pope eta Harper zientzialariei dagokionez, sekzio itxi baten f -a hurrengo formularen bidez kalkula daiteke:

$$f = \frac{1}{4} \left(\frac{\text{modeloaren azalera frontala}}{\text{haize tunelaren sekzioaren azalera}} \right)$$

Gainera, zientzialari hauen teoriarekin jarraituz, beste parametroak honela zuzenduko lirateke: [17]

$$V^* = V(1 + f)$$

$$Cp^* = \frac{P_{turbine}^*}{P_{available}^*}$$

$$P_{available}^* = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^{*3}$$

$$P_{turbine}^* = \frac{2 \cdot \pi \cdot N^* \cdot (F^* \cdot r_p)}{60}$$

$$C_T^* = \frac{(F^* \cdot r_p)}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^{*2} \cdot R}$$

$$TSR = \frac{2 \cdot \pi \cdot N^*}{60} \cdot \frac{R}{V^*}$$

Non, V: haize abiadura korronte askean [m/s]

A: turbinaren azalera [m²]

N: turbinaren biraketa abiadura [rpm]

F: turbinara aplikatutako karga [N]

r_p: biratzen dagoen palaren erradioa [m] diren.

Hala ere, eraiki den prototipoa haize tunel handiago batean sartzen bada, *blockage ratio* txikiagoa lortuko litzateke. Esperimentu honetan zehar, ez da izan haize tunel handiago bat erabiltzeko aukerarik, eta ondorioz, erantzun zehatzak lortzeko, atal honetan azaldutako zuzenketak erabili beharko dira. Hala ere, Roseo enpresak Arrasateko haize tunel handi batean hasiko da testak egiten, Eibarko Ingeniaritza Eskolako haize tunela baino handiagoa dena. Ondorioz, haize tunel berri honetan BR hobeago bat lortuko da modelo berri bat erabili edo eraiki behar barik, eta ondoren egingo diren saiakeretan erantzun zehatzagoak lortuko dira.

8. BIBLIOGRAFIA

[1]

Garcia, O., Ulazia, A., del Rio, M., Carreno-Madinabeitia, S., & Gonzalez-Arceo, A. (2019). An Energy Potential Estimation Methodology and Novel Prototype Design for Building-Integrated Wind Turbines. *Energies*, 12(10), 2027.

[2]

https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_335

[3]

Bogle, I. (2011). Integrating wind turbines in tall buildings. *CTBUH Journal*, 4, 30-33.

[4]

Balduzzi, F., Bianchini, A., & Ferrari, L. (2012). Microeolic turbines in the built environment: Influence of the installation site on the potential energy yield. *Renewable Energy*, 45, 163-174.

[5]

Balduzzi, F., Bianchini, A., Gentiluomo, D., Ferrara, G., & Ferrari, L. (2017, June). Rooftop siting of a small wind turbine using a hybrid BEM-CFD model. In *Research and Innovation on Wind Energy on Exploitation in Urban Environment Colloquium* (pp. 91-112). Springer, Cham.

[6]

Toja-Silva, F., Lopez-Garcia, O., Peralta, C., Navarro, J., & Cruz, I. (2016). An empirical-heuristic optimization of the building-roof geometry for urban wind energy exploitation on high-rise buildings. *Applied energy*, 164, 769-794.

[7]

Dilimulati, A., Stathopoulos, T., & Paraschivoiu, M. (2018). Wind turbine designs for urban applications: A case study of shrouded diffuser casing for turbines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 175, 179-192.

[8]

Ohya, Y., Karasudani, T., Sakurai, A., Abe, K. I., & Inoue, M. (2008). Development of a shrouded wind turbine with a flanged diffuser. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 96(5), 524-539.

[9]

Arteaga-López, E., Ángeles-Camacho, C., & Bañuelos-Ruedas, F. (2019). Advanced methodology for feasibility studies on building-mounted wind turbines installation in urban environment: Applying CFD analysis. *Energy*, 167, 181-188.

[10]

García, O. (2018). Integración de turbinas eolicas en edificios I. UPV/EHU

[11]

Chen, T. Y., & Liou, L. R. (2011). Blockage corrections in wind tunnel tests of small horizontal-axis wind turbines. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35(3), 565-569.

[12]

Ragheb, M., & Ragheb, A. M. (2011). Wind turbines theory-the betz equation and optimal rotor tip speed ratio. *Fundamental and advanced topics in wind power*, 1(1), 19-38.

[13]

Ross, I., & Altman, A. (2011). Wind tunnel blockage corrections: Review and application to Savonius vertical-axis wind turbines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99(5), 523-538.

[14]

Eltayesh, A., Hanna, M. B., Castellani, F., Huzayyin, A. S., El-Batsh, H. M., Burlando, M., & Becchetti, M. (2019). Effect of Wind Tunnel Blockage on the Performance of a Horizontal Axis Wind Turbine with Different Blade Number. *Energies*, 12(10), 1988.

[15]

Jeong, H., Lee, S., & Kwon, S. D. (2018). Blockage corrections for wind tunnel tests conducted on a Darrieus wind turbine. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 179, 229-239.

[16]

Sarlak, H., Nishino, T., Martínez-Tossas, L. A., Meneveau, C., & Sørensen, J. N. (2016). Assessment of blockage effects on the wake characteristics and power of wind turbines. *Renewable Energy*, 93, 340-352.

[17]

Roy, S., & Saha, U. K. (2014). An adapted blockage factor correlation approach in wind tunnel experiments of a Savonius-style wind turbine. *Energy Conversion and Management*, 86, 418-427.

[18]

Ren, Y., Suganthan, P. N., & Srikanth, N. (2014). A novel empirical mode decomposition with support vector regression for wind speed forecasting. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, 27(8), 1793-1798.

[19]

Foley, A. M., Leahy, P. G., & McKeogh, E. J. (2010, May). Wind power forecasting & prediction methods. In *2010 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering* (pp. 61-64). IEEE.

[20]

Miller, A., Chang, B., Issa, R., & Chen, G. (2013). Review of computer-aided numerical simulation in wind energy. *Renewable and sustainable energy Reviews*, 25, 122-134.

[21]

Uchida, T. (2018). Computational fluid dynamics approach to predict the actual wind speed over complex terrain. *Energies*, 11(7), 1694.

[22]

Hu, J., & Wang, J. (2015). Short-term wind speed prediction using empirical wavelet transform and Gaussian process regression. *Energy*, 93, 1456-1466.

[23]

<https://www.wolframalpha.com/>