

GIPUZKOAKO INGENIARITZA ESKOLA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE GIPUZKOA

EIBAR

ERRESONANTZIA BIDEZKO AEROSORGAILUA

1 DOKUMENTUA: MEMORIA

Gradua: Energia Berriztagarrien Ingeniaritzako Gradua

Ikasturtea: 2019 – 2020

Egilea: Aitor Plazaola Iguaran

Zuzendaria: Beatriz Aleman Astiz

AURKIBIDEA

AURKIBIDEA.....	1
1 SARRERA.....	3
2 PROIEKTUAREN OINARRIA	4
2.1 AURREKARIAK.....	4
2.2 IDEIAREN HAZIA.....	6
3 OINARRI TEORIKOAK	8
3.1 AEROSORGAILUA.....	8
3.1.1 Egitura	8
3.1.2 Sintonizazioa.....	10
3.1.3 Sorgailua	12
3.2 OSZILAZIOAK ETA ERRESONANTZIA	13
3.2.1 Higidura Harmoniko Simplea.....	13
3.2.2 Oszilazio Indargetuak	15
3.2.3 Oszilazio Bortxatuak	16
3.3 MATERIALEN ERRESISTENTZIA	19
3.3.1 Deformazioak	19
3.3.2 Makurdura.....	21
3.4 EREMU ELEKTROMAGNETIKOA.....	22
3.4.1 Eremu Magnetikoa	22
3.4.2 Indukzio Elektromagnetikoa.....	23
3.5 FLUIDOEN MEKANIKA.....	25
3.5.1 Parametro adimentsionalak	25
3.5.2 Fluxu laminarra/turbulentua	27
3.5.3 Mugalde geruza.....	28
3.5.4 Fenomeno aeroelastikoak	30
3.5.5 Erresistentzia eta esekidura indarrak.....	32
4 SAIAKERA	36
4.1 OINARRIAK.....	37
4.1.1 Analisi Dimentsionala	37
4.1.2 Egitura	38
4.2 SOFTWARE.....	39

4.3 SARETA	41
4.3.1 Geometria.....	41
4.3.2 Sareta.....	45
4.3.3 Eremua	47
4.4 KASUA.....	48
4.4.1 Eredu laminarra.....	48
4.4.2 Eredu turbulentua	48
4.5 KONTROLA.....	51
4.5.1 Courant zenbakia.....	51
5 EMAITZA	52
5.1 GERTAERAK.....	57
6 ONDORIOAK	60
7 ITURRIAK.....	61

1 SARRERA

Teknologia inoiz baino zabalduago eta aurreratuago dagoen garai honetan, herrialde ezberdinek haien betebeharrak asetzeko kontsumitu behar duten energia kantitatea hazi besterik ez da egiten urtez urte. Hau, besteak beste, demografiaren hazkunde etengabeari dagokio, izan ere 1970. urteaz geroztik, geure planetako biztanle kopurua bikoiztu egin da datuek diotenez [1]. Esate baterako, 2018. urtean bertan mundu mailako energia eskaria % 2,35 hazi zen [2], hau azken hamarkada honen hasieran genuen hazkundearen ia bikoitza izanik

Energia eskariaren hazkunde honek talka egiten du estatuen artean ezarririko klima helburuekin. Izan ere espainiar estatuan bertan, 2019. urteko datuei erreparatuz gero ohartzen gara jatorri ez-berriztagarriko energiak sorkuntza osoaren % 62.5 ordezkatzen dutela [3], eta portzentaia honek ez du aldaketarik jasan azken bost urteotan . Aurrez adierazi den energia eskariaren igoeren aurrean beraz, geroz eta karbono dioxido (CO₂) kopuru handiagoak isurtzen dira atmosferara urtez urte. Hortzi mugan 2030. urterako Europar Batasunak negutegi efektuko gas isurpenaren % 40ko murrizketa hartuz gero (1990. urteko isurpen maila oinarritzat harturik), bertara iristeko aurreikuspenak ez dira batere positiboak.

Klima, energia eta isurpenei dagozkien helburu hauek betetzeko bidean bultzada bat emateko asmoz, ikertzaile, zientzialari eta erakunde asko energia sorkuntzarako metodo alternatibo eta iraunkorren garapenean dabilta buru belarri. Nahiz eta energia honen sortzaile izan daitezkeen iturri nagusiak jada identifikatuak izan diren, besteak beste eguzkia, haizea, ura... hauen bidez energiaren sorkuntzarako metodo berri asko aurkitzen dira oraindik ere, erabilera eta egoera anitzetara moldatuak hauek denak.

2 PROIEKTUAREN OINARRIA

2.1 AURREKARIAK

Azken urteotan gehien garatu diren energia berriztagarri iturrien artean, eolikoa aipatu beharra dago dudarik gabe. Energia sortzeko iturri hau antzinatek erabilia izan da VII. mendean Persian hasi (orain Afganistan dena) eta XII. mendean Europara heldu arte. Azken mende erdian aldiz, petrolioak izan dituen krisiak eraginda [4], arlo eolikora zuzenduriko ikerketak areagotu dira potentzia eta dimentsio handiko sorgailuak garatuz. Honi gehitu beharra dago, fluidoaren mekanika eta aerodinamikan egin diren aurrerapenei esker ere sorgailu hauen eraginkortasuna areagotzen joan dela denboran zehar.

Denboran zehar hainbat ezaugarri ezberdin dituzten aerosorgailuak diseinatu dira; ardatzaren arabera bereiziz gero bi motatako sorgailuak aurki daitezke [5]:

- **Ardatz bertikala:** zutikako ardatz baten inguruan biratzen duten palez osaturiko aerosorgailuak. Ez dute orientaziorako sistemarik behar. Aldiz, beraien efizientzia eta energia sortzeko ahalmena baxuagoak dira abiatzeko energia iturri bat behar baitute. Haien artean Savonius, Giromill eta Darrieus motako aerosorgailuak daude.
- **Ardatz horizontala:** dorre eta gondolaz osaturiko egiturak dira. Pala kopuruaren arabera ere sailka daitezke. Biraketa ardatza haizeari paralelo dagoenez, orientazio sistema aktibo zein pasibo bat behar dute funtzionamendu egokirako. Efizientzia eta potentziarako ahalmen handiena erakusten dutenak hiru palakoak dira.

Dudarik gabe zabalduen dauden aerosorgailuak hiru pala eta ardatz horizontala dutenak dira. Hauek haizean oinarrituriko energia sorkuntzaren optimizazioa pausu bat haratago eramatea lortu dute profil aerodinamiko, pitch eta yaw angeluen kontrola, etab. bitartez. Era honetan potentzia eta efizientzia oso altuko aerosorgailuak eraiki dira, eraikuntzen mugak lurrazalera zein itsasora bertara zabalduz. Esaterako General Electric konpainiak oraintxe eskuartean du 220 [m] ko diametroa duen eta 12 [MW] sortzeko gai den Haliade-X aerosorgailuaren proiektua[6].

Dena den, teknologia eolikoaren aurrerapen honek guztiak zenbait eragozpen eta ezinegon ere sortu ditu. Inoiz ez baita ezer erabat arrosa kolorekoa izaten. Hain zabalduak dauden hiru palako aerosorgailuen desabantaila nagusiak honakoak lirateke [7]:

- Oso epe luzeko proiektuak dira. Ohizko parke eoliko baten eraikuntzatik, bertako errotek energia sortzen hasteko unera artean urteak igaro daitezke, bitarte guzti horretan kostuak sortuz.
- Ingurunearekiko ere inpaktu itzelak dituzte egitura hauek, parke eta erroten dimentsioak direla eta. Besteak beste, inguruko hegaztien istripuak eta hauen migrazioa eragiten dituzte. Zenbaitetan baita inguruko baso zati batzuen desagertzea ere, parkea eraiki ahal izateko. Aldi berean aurrez naturala zen esparru batean material artifizialak integratzea ekartzen du, hormigoia...

- Erroten dimentsioak direla eta, biraketa abiadura baxuak izan arren (10 – 20 [rpm] bitartean) biratzean palen muturrak hartzen duten abiadura lineala oso altua da, kasu batzuetan 280 [km/h] ingurura ere iritsiz. Honek presio aldaketak sortzen ditu airean, soinu uhin moduan transmititzen direnak. Soinu honek aerosorgailuak etxebizitzetatik distantzia jakin batera kokatzea eragiten du kontaminazio akustikoa eragoztearren. Hau dela eta eremu urbano eta inguruetako potentzial eolikoa ustiatzea ezinezkoa da (ohizko hiru palako erroten kasuan).
- Beharrezko distantzia honek, energia sorrera eta kontsumo puntuen arteko aldentzea sortzen du. Energiaren garraioa egiteko tentsio altuko linea elektrikoaren eraikuntza, transformazio estazioak eta bestelakoen beharra osatuz.
- Gainera, haizearen energia ustiapenaren optimizaziorako, haize errotek bi angelurekin jokatzeko pitch angelua, palaren eraso angelua haizearekiko, eta yaw angelua gondolak haizearen norabidearekiko duena. Sistema honek pieza mugikor asko dakartza, aldi berean kontuan izanda, errota, bira eginez lan egiten duela. Lan egiteko metodo honek matxurak izateko aukerak areagotzen ditu.

2.2 IDEIAREN HAZIA

Jada ohikotzat hartzen den hiru palako aerosorgailu honen aurrean aukera ezberdinak emateko asmoz, hainbat ekimen jarri dira martxan azken urteotan. Hauetako gehientsuenak, hiru palako errotekin lehiatu ordez, hauentzat ezinezko diren eremuetan haizearen aprobetxamendua bideratzea dute helburutzat.

Aukera hauen artean topatzen da Vortex Bladeless S.L. konpainia Madrildarrak proposaturiko sorgailua [8]. Ekimenaren bultzatzaileak ohartu ziren, gaur egun energia berriztagarrien iturri sinple eta eraginkorrenetako bat fotovoltaikoa zela; lekuan lekuko energiaren ustiapena ahalbidetzen baitu konplexutasun mekanikoak sortzen dituzten pieza mugikorren erabilerarik gabe. Beraz, printzipio berak energia eolikora aplikatzeko asmoz, beren aerosorgailu propioaren diseinuari ekin zioten.

Vortex Bladeless S.L. enpresak diseinaturiko aerosorgailuak, haizeak bere ingurutik igarotzean sortzen dituen efektu aerodinamikoaren bidez funtzionatzen du. Zehazki Vortex Induced Vibration (VIV) izeneko fenomenoaren bitartez. Haizeak, izan ere, mugimendu oszilakorra sor dezake fluxuaren lortzean zeharreko zurrunbiloen eraketaren maiztasuna eta gorputzaren maiztasun naturala bat datozenean. Fenomeno honek erresonantzia izan hartzen du eta oszilazio bat mugimendu periodiko batez indartua denean gertatzen da.

Beraz, aerosorgailuak masta oszilakor baten itxura hartzen du, bere sekzioa zilindrikoa izanik. Diseinu honen bitartez aurrez aipatu diren arazo askori aurre egiten zaie: hegaztien inpaktua, komunikazio uhinetan sorturiko interferentziak, soina... Honetaz gain aerosorgailuaren gainazalak zilindro itxura duenez, haizearen norabide aldakorrari aurre egiten dio, orientaziorako inongo elementu mugikorren beharrik izan gabe.

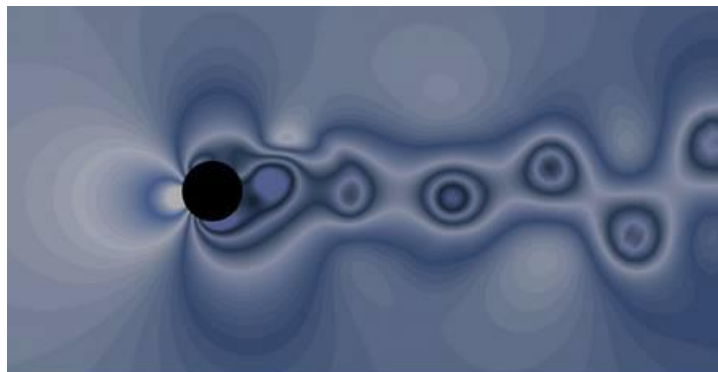
Bestalde masta, definizioz lurrazalaren plano lauarekiko bertikalki hedatzen den zilindro bat da. Honek haizearen profila hobeki aprobetxatzea ahalbidetzen du, marruskadura fenomenoari aurre eginaz ahal den neurrian.



Irudia 2-1. Vortex Bladeless aerosorgailua [9].

Honez gain, ohartu beharra dago aerosorgailuek turbulentsiak eta lorratzak dituztela. Ondorioz, multzo baten kokapena zehaztean kontuan izan behar dira sorgailu batetik bestera dauden distantziak, bai fluxuaren norabidearekiko perpendikular zein paraleloan. Pala luze dun errota altuek izugarrizko lorratzak sortzen dituzte eta beraien artean utzi beharreko distantzia, beraz, oso luzeak bilakatzen dira. Vortex Bladeless sorgailuak azalera murriztua du, honen eraginez sortzen dituen turbulentsia eta lorratzaren efektuak gutxiagotuz.

Vortex Bladeless S.L. enpresak zabalduko Green Paper dokumentuan, adierazten da lorratz aerodinamikoak hurrengo aerosorgailuan izango duen eragina deuseztatzeko nahikoa dela bi sistemaren arteko distantzia sorgailuaren altueraren berdina izatea. Dena den onartzen dute, adierazpen hau ez dela erabat zehatza eta kasuistika hau sakonago aztertu beharra dagoela. Ondorioz Gradu Amaierako Lan honen funtsa arlo honen inguruan biltzea erabaki da, Computational Fluid Dynamics (CFD) metodoak erabiliz simulazio burutzeko; helburua sorgailu batek sorturiko lorratzak hurrengoan duen eraginari buruzko azterketa egitea izanik.



Irudia 2-2. CFD bidez lorturiko VIV fenomeno batean presioaren 2D profila [8].

3 OINARRI TEORIKOAK

Atal honetan proiektuaren nondik norakoak ulertzeko beharrezkoak diren oinarri teorikoak azalduko dira. Oinarri hauek multzo ezberdinetan banaturik egongo dira, azterketan gaiaren arabera zientziaren arloka banatuz.

Lehenik eta behin proiektuaren ardatza aurkeztuko da, hau da Vortex Bladeless aerosorgailua, haren egitura eta funtzionamendua azalduz. Jarraian arlo zehatzagotan murgilduz sistema honetan eragiten duten faktore guztiak zehaztasunez arakatzeko. Horretarako sorgailuaren ardatzaren mugimendua deskribatzen duten oszilazioak, egituraren ezaugarriei dagokion materialen erresistentzia eta sisteman eragiten duen jariakinen mekanikako fenomenoak azalduko dira.

3.1 AEROSORGAILUA

Atal honetako azalpenak Vortex Bladeless S.L. enpresak diseinaturiko aerosorgailuan oinarrituak izango dira, hori baita egilearen iritziz interesgarriena. Dena den jakin, hau ez dela modu honetan lan egiteko diseinatua izan den sorgailu bakarra. Hau da eredu gehiago ere badirela garatzeko bidean.

Vortex Bladeless aerosorgailuaren ideia, soiltasunean oinarritzen da. Helburua, sistemaren egituratik pieza mugikor eta monitorizatu beharreko guztiak ezabatzea baita. Emaitza bezala sistema pasibo bat lortuz mugimendu eta kontrol minimo batekin energiaren ustiapena maximizatzea bilatzen duena.

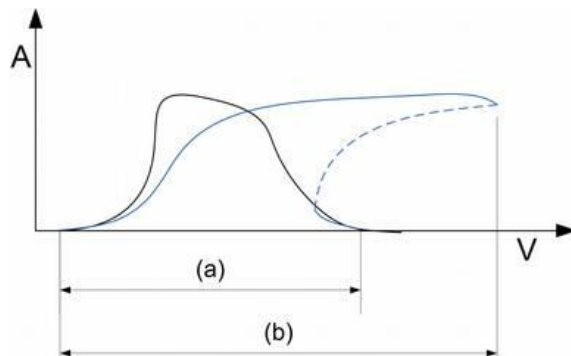
3.1.1 Egitura

Sorgailua bi zati ezberdinetan antolaturik dagoela esan daiteke. Batetik masta dago, kanpoaldeko zilindro zurruna, oszilatzeke egina dagoena. Bestetik nukleoa, masta eusten du goiko aldetik eta aldiz azpialdea oinarrira loturik dago. Vortex Bladeless sorgailuak karbono eta beirazko zuntzak erabiltzen ditu, material arinak eta, aldi berean, nekaturari erresistentzia handikoak. Dimentsioak ere nahiko neurrikoak dira, Vortex Tacoma modeloak 2,75 [m]ko altuera du, eta beraz oinarriaren zimenduak asko murrizten dira.



Irudia 3-1. Vortex Bladeless sorgailuaren [8].

Aurrez aipaturiko moduan sistemaren aldaketaren helburua lock-in maiztasunen tartea handitzea izan da, aerosorgailua haizearen abiadura gehiagorekin lan egiteko gai izan dadin. Ondorengo grafikoan (a) sistema sinplea eta (b) imanak dituenaren lock-in tartea adierazten da, v haizearen abiaduran zehar. Bistakoa denez sistemak irabazi duen gaitasuna nabaria da.

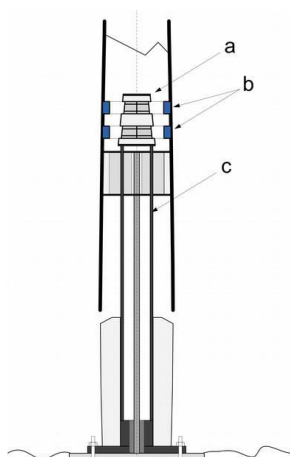


Grafikoa 3-1. Oszilazioen anplitudea haize abiaduraren menpe [8].

3.1.3 Sorgailua

Sorgailuaren helburua, sistemak oszilatzean duen energia elektrizitate bihurtzea da. Horretarako, gaur egun VIV sorgailuetan zabalduen dagoen sistema, iman egonkordun alternadoreak erabiltzea da. Proiektu osoaren helburua pieza eta ardatz mugikorrek ekiditea izanik, sorgailu honetarako alternadore baten diseinua ez da erraza.

Lehen ideia harilen eta imanen arteko interakzioa masta egoera erabat bertikalean dagoenean ematea da. Oszilazioen fisikaren teoriarekin bat, posizio hori izango da mastaren abiadura maximoa izango den unea. Enpirikoki frogatua izan den moduan estrategia hau erabiliz, oszilazioek ibilbide zirkular bat hartzen dute, indarra galduz eta zenbaitetan baita erabat geratuz ere. Hori sistemak energia gutxieneko ibilbidea bilatzen duelako gertatzen da. Aldiz, baliozko aukera da bobina eta imanen arteko interakzio hau, oszilazioen anplitude maximo eta minimoetan ematea.



Irudia 3-7. Alternadorearen eskema [8].

Aurreko irudiak erakusten duen moduan imanak mastari loturik daude, eta oszilatzean nukleoan kokaturik dauden iman estatiko eta harilekin elkarreragiten dute. Non *a* estatoreko imanak, *b* mastako imanak eta *c* nukleoan kokaturiko harilak diren.

3.2 OSZILAZIOAK ETA ERRESONANTZIA

Oszilazioa, definizioz periodikoki errepikakorra den higidura bat da, hau betiere kanpoko indar batek eragina egongo da.

Higidura Harmoniko Sinplearen (HHS) azalpenarekin hasita, oszilazio indargetu eta bortxatuak deskribatuko dira ondoren, baita erresonantziaren kontzeptua eta indar periodiko batekiko erantzuna ere [13].

3.2.1 Higidura Harmoniko Sinplea

Higidura Harmoniko Sinple batean partikula ibilbide berean higitzen da periodikoki. Hau egitean jasaten dituen indarrak Hookeren legearen bidez adierazten dira. Hookeren legeak azaltzen du malguki bat zapaldu edo tiratzean malgukiari x desplazamenduarekiko proportzionala den indar bat egin behar zaiola. Era honetan eragin edo jasan beharreko indarra berreskuratzailea da, hau da beti posizioaren aurka eragindakoa.

Hookeren legeak adierazten duen indar ekuazioa Newtonen bigarren legearekin alderatuz argitzen da azelerazioak ere portaera bera izango duela, hau da, posizioaren aurkakoa.

$$F = -x \cdot k$$

$$F = m \cdot a$$

Ekuazioa 3-4 eta 3-5. Hookeren legea, Newtonen bigarren legea.

k : proportzionaltasun konstantea, malgukiaren berezko ezaugarria.

Partikula batek HHS duela esaten da ardatz batean zehar mugitzen bada periodikoki, ardatzean zeharreko bere posizioa x parametroak adierazten du t denboraren menpe dagoen hurrengo ekuazioaren bitartez.

$$x = A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

Ekuazioa 3-6. Posizioa HHS sistema batean [13].

A : anplitudea, oreka puntutik desplazamendu handieneko puntura dagoen distantzia.

$\omega t + \varphi$: fasea (rad).

φ : hasierako fasea, oszilazioak hastean partikulak duen egoera (rad).

HHS deskribatzeko beste hiru parametro ere erabiltzen dira, batetik ω dugu, maiztasun angeluarra ala pultsazio moduan ezagutzen dena. Bestetik periodoa eta maiztasuna, elkarren alderantzizko direnak. Periodoak oszilazio oso bat burutzeko behar den denbora adierazten du, aldiz maiztasunak, denbora unitate batean (segundua) zenbat oszilazio burutzen diren.

$$\omega \cdot T = 2\pi$$

$$\omega \left[\text{rad/s} \right] = \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{2\pi}{T}$$

$$T \left[\text{s} \right] = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = \frac{2\pi}{\omega}$$

$$f \left[\text{Hz} \right] = \frac{1}{T}$$

Ekuazioak 3-7, 3-8 eta 3-9. HHS baten pultsazio, periodo eta maiztasuna [13].

Partikularen posizioa adierazten duen ekuazioa denborarekiko deribatuz, oszilazioan zehar partikularen abiadura ekuazioa lortzen da. Beste behin, abiaduraren ekuazioa denborarekiko deribatuz aldiz, azelerazioaren ekuazioa eskuratzen da.

$$v = \frac{dx}{dt}$$

$$v [m/s] = A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$

$$v [m/s] = \pm \omega \sqrt{A^2 - x^2}$$

Ekuazioa 3-10. HHS baten abiadura [13].

$$a = \frac{dv}{dt}$$

$$a [m/s^2] = -A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

$$a [m/s^2] = -\omega^2 \cdot x$$

Ekuazioa 3-11. HHS baten azelerazioa [13].

Azkenik, malgukiz osaturiko sistema batean oszilatzeko partikula baten energia, bi osagai ezberdinetan deskonposatzen da. Batetik energia potentziala eta bestetik energia zinetikoa. Esatekoa da ibilbide guztian zehar partikularen energia konstantea izango dela.

Partikula $x = 0$, edo oreka puntutik igarotzean, malgukiak ez du indarrik egingo beraz partikularen energia potentziala (E_p) hutsa izango da, duen energia guztia zinetikoa (E_k) delarik. Aldiz anplitude osora heltzen denaldiunean partikularen abiadura eta beraz energia zinetikoa, hutsak izango dira, aldiz energia potentziala maximoa delarik.

$$E = E_k + E_p = kx^2$$

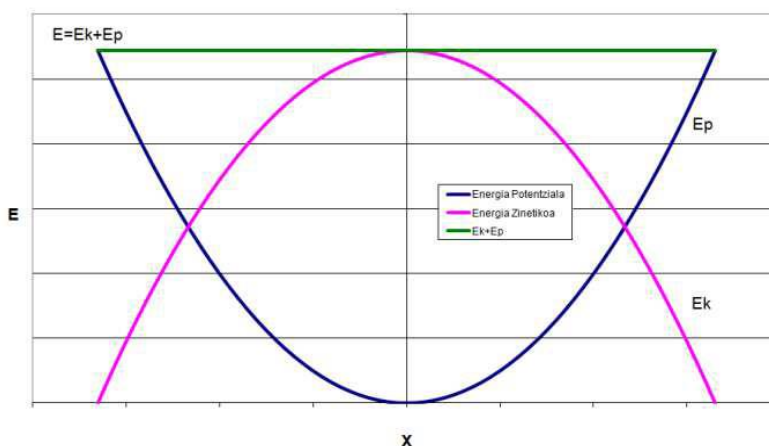
$$E [J] = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \omega^2 \cdot A^2$$

$$E_k [J] = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$$E_p [J] = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x^2$$

Ekuazioa 3-12. HHS sistema baten energia [13].

Beraz oszilazio batean zehar partikula batek duen energia deskonposaketa ondorengo grafikoaren bidez adierazi daiteke.



Grafikoa 3-2. HHS baten energiaren deskonposaketa eta kontserbazioa [13].

3.2.2 Oszilazio Indargetuak

Oszilazio indargetua duen sistema batek, oszilazioa bera eragiten duen indar elastikoa izateaz gain, abiaduraren aurka eragingo duen beste indar bat du. Oszilazio indargetuak dituen partikula ala pendulu baten mugimendua gutxitzen joango da erabat desagertu arte.

Aerosorgailuaren kasuan esaterako, erregimen laminarra duen jariakin baten baitan oszilatzen duen gorputz orok, abiadurarekiko proportzionala den marruskadura indar bat jasaten du. Honakoak dira beraz sistema motan honetan aurkituko diren indarrak, non λ sistema fisiko jakinaren araberakoa den.

$$\begin{aligned} F [N] &= -k \cdot x \\ F [N] &= -\lambda \cdot v \\ F[N] &= m \cdot a = -kx - \lambda v \end{aligned}$$

Ekuazioa 3-13. Oszilazio indargetuetan eragiten duten indarrak [13].

Hau dela eta, mugimenduaren ekuazioa, ekuazio diferentzial moduan azaltzen da; jakinaenez posizioaren lehen deribatua denborarekiko abiadura dela eta bigarren deribatua azelerazioa. Non γ indargetze konstantea den eta ω_0 partikularen maiztasun angeluar naturala.

$$\begin{aligned} \frac{d^2x}{dt^2} + 2\gamma \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x &= 0 \\ \omega_0 &= \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \gamma = \frac{\lambda}{2m} \end{aligned}$$

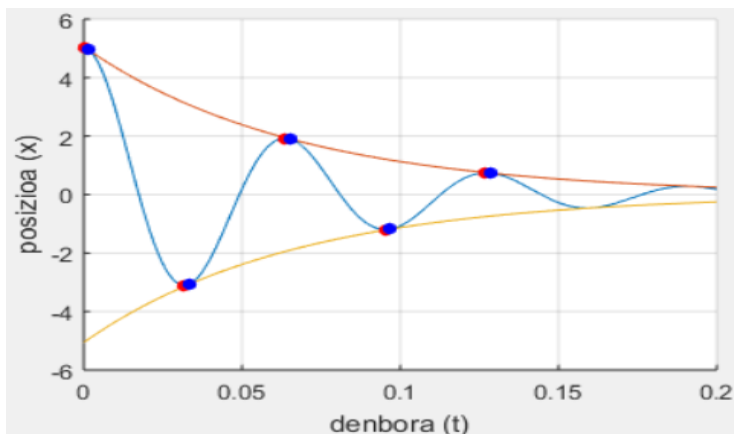
Ekuazioa 3-14. Mugimenduaren ekuazio diferentziala [13].

Beraz hasieran oszilazio natural bat zena, abiaduraren aurkako indarra gehitzean, oszilazio indargetu bihurtzen da. Sistema berri honen maiztasuna, sistemak naturalki oszilatzean zuen maiztasuna eta indargetze konstantearen menpe egongo da. Jarraian oszilazio indargetuen posizio ekuazioa aurkezten da eta sistema berriak izango duen maiztasuna.

$$\begin{aligned} \omega &= \sqrt{\omega_0^2 + \gamma^2} \\ x &= A \cdot e^{-\gamma t} \sin(\omega t + \varphi) \end{aligned}$$

Ekuazioa 3-15. Maiztasun angeluarra eta posizioa [13].

Ondorengo grafikoko funtzio urdinak, oszilazio indargetuen adibide baten posizioa adierazten du denboran zehar. Aldiz funtzio gorriak indargetze faktorea $e^{-\gamma t}$.



Grafikoa 3-3. Oszilazio indargetua, posizioa vs denbora.

3.2.3 Oszilazio Bortxatuak

Sistema indargetuan, lehenago edo beranduago partikularen higidura erabat gelditzen da egoera egonkorra bihurtuz. Hori ekidin eta sistema oszilatzen mantentzeko, kanpoko indar eragile denboran zehar sinusoidal baten beharra dago sistemari energia emateko. Oszilazio mota honi bortxatua deritzo eta sistema honetan, partikula oszilatzailea hiru indarren menpe dago:

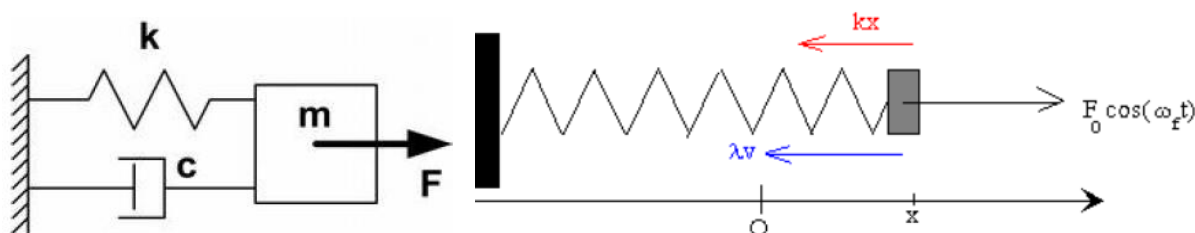
1. Malgukiak eragindako indarra: $-k \cdot x$
2. Eragile indargetzailea, abiadurarekiko proportzionala eta aurkako norabidea duen indarra: λv
3. Indar oszilakorra, ω_f maiztasuna duena: $F_0 \cdot \cos(\omega_f t)$

Beraz, partikularen mugimendua eragiten duten indarren ekuazio osoa honakoa da:

$$F [N] = m \cdot a = -kx - \lambda v + F_0 \cdot \cos(\omega_f t)$$

Ekuazioa 3-16. Oszilazio bortxatuaren indarren ekuazioa [13].

Eredu hau izango da VIV aerosorgailuetan aurkituko dena. Haizeak, lorratzean sorturiko zurrunbiloak izanik sisteman kanpotik eragiten duen indarra.



Irudia 3-8, 3-9. Oszilazio bortxatuen eskema[8][13].

Partikularen mugimendua ekuazio diferentzial moduan azalduz:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\gamma \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = F_0 \cdot \cos(\omega_f t)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \gamma = \frac{\lambda}{2m}$$

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 + \gamma^2}$$

Ekuazioa 3-17. Oszilazio bortxatuak adierazten dituen ekuazio diferentziala [13].

Ekuazio diferentzial osoaren emaitza, ekuazio homogeenaren emaitza orokorra eta emaitza partikularraren baturaren bidez lortzen da: $x = x_1 + x_2$ Hasierako egoerari dagokion ekuazioa honakoa da, $t=0$, $x=x_0$, eta $dx/dt=0$.

$$x_1 = (C \cos(\omega t) + D \sin(\omega t) \cdot e^{-\gamma t})$$

$$C = x_0 - A$$

$$D = \frac{1}{\omega} (v_0 + \gamma C - \omega_f B)$$

Ekuazioa 3-18. Oszilazio bortxatuen hasierako egoera [14].

Aurrez aipaturiko hasierako baldintzak ordezkatur, C eta D parametroen balioak lortzen dira.

$$C = -\frac{F(\omega_0^2 - \omega_f^2)}{m((\omega_0^2 - \omega_f^2)^2 + 4\gamma^2\omega_f^2)} \quad D = -\frac{F\gamma(\omega_0^2 + \omega_f^2)}{m\omega((\omega_0^2 - \omega_f^2)^2 + 4\gamma^2\omega_f^2)}$$

Ekuazioa 3-19. C eta D parametroak oszilazio bortxatuetan [14].

Aldiz, ekuazio diferentzialaren soluzio partikular batek honako itxura du eta A eta B parametroen balioak lortzeko ekuazio diferentzial linealeko baldintzak betearazten zaizkio.

$$x_2 = A \cos(\omega_f t) + B \sin(\omega_f t)$$

$$A = \frac{F(\omega_0^2 - \omega_f^2)}{m((\omega_0^2 - \omega_f^2)^2 + 4\gamma^2\omega_f^2)}; \quad B = \frac{2\gamma\omega_f F}{m((\omega_0^2 - \omega_f^2)^2 + 4\gamma^2\omega_f^2)}$$

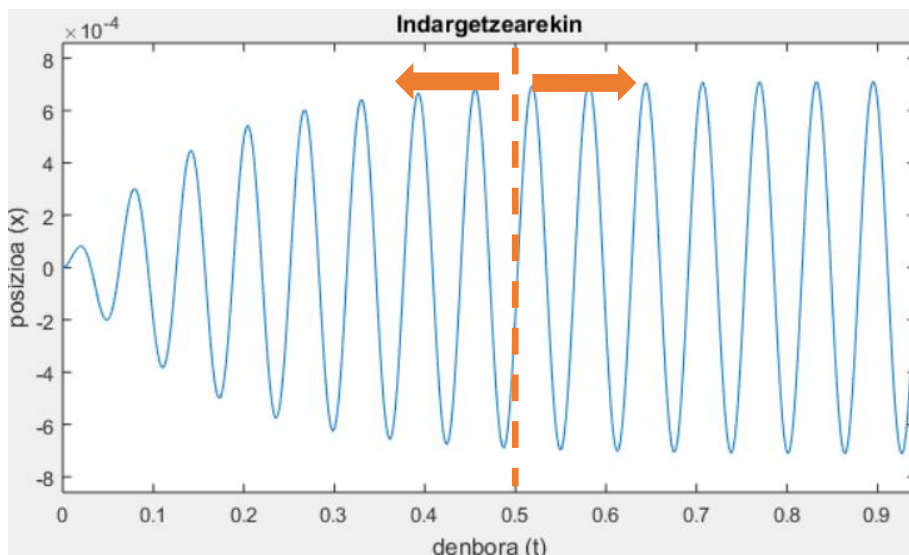
Ekuazioa 3-20. Soluzio partikularrerako A eta B parametroak [14].

Orain arteko ekuazio eta parametroak kontuan izanik, ekuazio diferentzial osoa honako litzateke.

$$x = (C \cos(\omega t) + D \sin(\omega t))e^{-\gamma t} + A \cos(\omega_f t) + B \sin(\omega_f t)$$

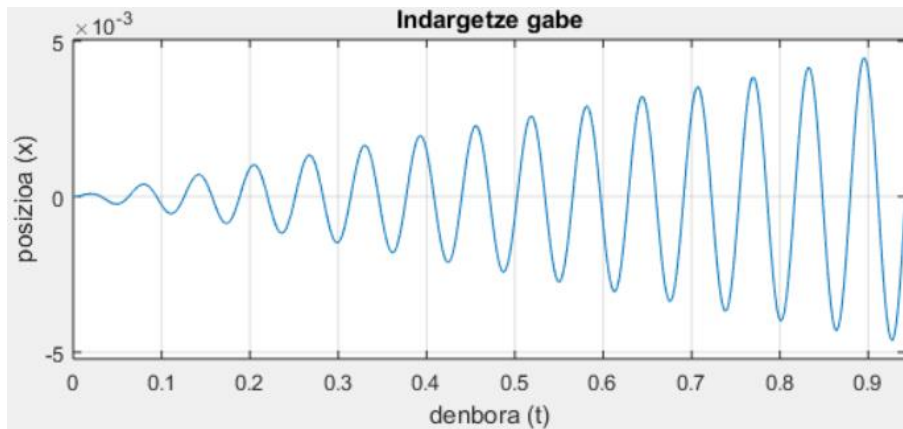
Ekuazioa 3-21. Oszilazio bortxatuen ekuazio diferentzial osoa [14].

Ekuazio diferentzial oso honen lehen atalak, x_1 eri dagokiona hain zuzen egoera iragankorra adierazten du. Egoera iragankor hau, desagertu egingo da zenbait denboraren buruan, denbora hau hasierako baldintzen menpe dagoelarik. Hau gertatzean, ekuazioaren x_2 atalari dagokion egoera iraunkorra soilik geratuko da. Atal hau hasierako egoerekiko erabat independentea baita. Ondorengo grafikoan ikusta daiteke nola oszilazioak balio konstante baterantz handitzen diren.



Grafikoa 3-4. Egoera iragankor eta iraunkorra.

Oszilazio bortxatuen kasu berezietako bat, marruskadurarik edo indargetzerik ez dagoeneko da. Kasu honetan γ hutsa izango da eta kanpoko indarrak eragiten duen bitartean oszilazioen anplitudea muga gabe handituko da denboran zehar.

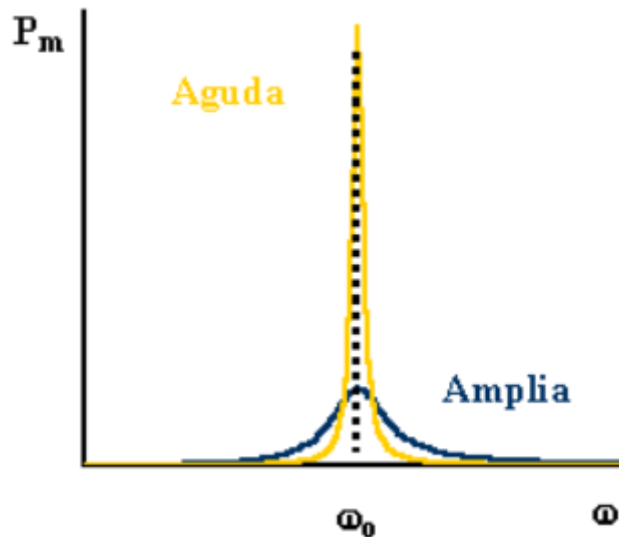


Grafikoa 3-5. Oszilazio bortxatuak $\gamma=0$.

3.2.3.1 Erresonantzia

Oszilatzaileen beste kasu berezi bat erresonantzia da. Oszilazio bortxatu batean, partikula oszilatzailearen maiztasuna eta indar eragilearen maiztasunak bat egiten dutenean ($\omega_f = \omega_0$) sistema erresonantzia egoeran sartzen da. Hau da hain zuzen aerosorgailuaren VIV sisteman gertatzen dena, mastaren oszilazio maiztasuna eta lorratzeko zurrunbiloena bat datozenean.

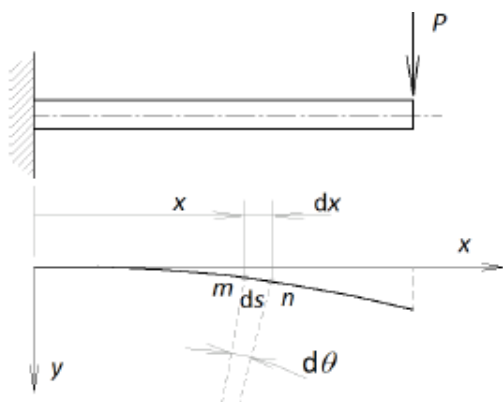
Sistema oszilatzailea erresonantzian sartzen den kasuetan, abiadura fasean dago aplikaturiko indar eragilearekin eta egoera horretan indarrak sistemarekiko duen energia transferentzia maximoa da.



Grafikoa 3-6. Potentzia mekanikoa indar eragilearen maiztasunaren arabera [15].

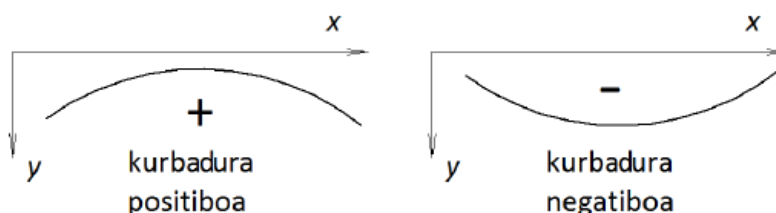
3.3.2 Makurdura

Makurdura efektua habe batek luzetarako ardatzarekiko perpendikularrak diren kargak jasatean agertzen da. Makurduren ondorioz habearen deformazioa ematen da.



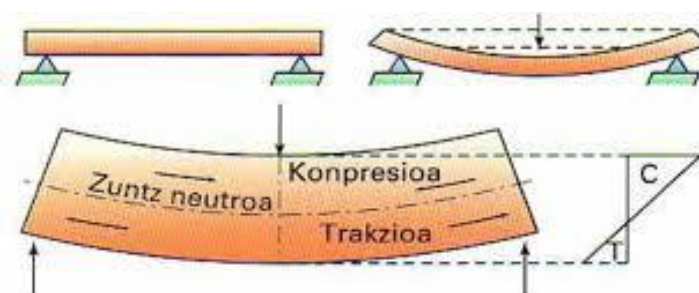
Irudia 3-11. Habe baten makurdura kargaren ondorioz [16].

Adartzak hartzen duen kurbadurari, habearen makurdura-kurba ala kurba elastikoa deitzen zaio. Kurba hau era egokian deskribatzeko zeinu irizpide bat dago ezarririk. Honen arabera makurdura-momentu negatiboak kurbadura positiboa sortzen du, eta alderantziz.



Irudia 3-12. Makurduraren zeinu irizpidea [16].

Makurdura deformazio batek trakzio eta konpresioa eragiten ditu habearen zehar. Izan ere deformazioa posible izateko habearen alde bat uzkurto eta bestea luzatu egin behar da. Honek bi estres mota ezberdin sortuko ditu, eta habearen izango duen eragina aurreikusi ahal izatek, material berdinarekin bi lagin, bata trakzioa eta bestea konpresioan frogatu beharko dira.



Irudia 3-13. Makurduraren deskonposaketa, trakzio eta konpresioa.

Aerosorgailuaren masta, oinarrian finkaturik dagoen habe gisara marraz daiteke. Beraz, oszilazio bakoitza gertatzean, mugimendua ahalbidetzeko, habeak era positibo zein negatiboan jasango du makurdura. Era honetan oszilazioen periodo bat burutzen den aldi bakoitzeko habearen alde bakoitzak trakzioa zein konpresioa biak jasango ditu.

3.4 EREMU ELEKTROMAGNETIKOA

Aerosorgailu guztiek sorgailu elektriko bat dute diseinuaren baitan, haizearen abiadura energia elektriko bihurtzeko asmoz. Sorgailu honen diseinua, hainbat eratakia izan daiteke.

Dena den Vortex Bladeless aerosorgailuak jada baditu bi iman iraunkor atxikirik, sistemaren sintonizazio ahalbidetzeko. Beraz, diseinuak, elementu hauek aldi berean energia elektrikoaren sorkuntzarako erabiliak izatea ahalbidetzen du. Hain zuzen imanek sorturiko eremu magnetikoaren bitartez induzituko da elektrizitatea nukleoan kokaturiko espiran. Era honetara, beste behin elementu mugikorrek ekidingo dira sisteman.

3.4.1 Eremu Magnetikoa

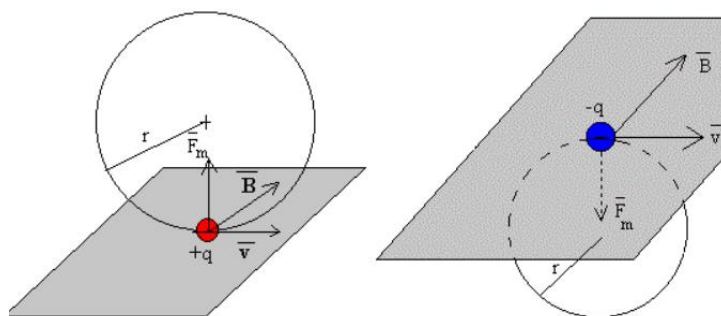
Eremu magnetikoa, iman edo korrante elektriko bat duen eroalearen inguruan eratzen den eremu bektorial bat da, eta bertan indar magnetikoak igarri daitezke. Eremu magnetikoa B hizkiaren bidez adierazten da eta Tesla [T] unitatea da eremu magnetiko baten intentsitatea deskribatzeko erabiltzen dena Sistema Internazionalan (SI). Ezaugarri bera adierazteko beste unitate bat gauss (10^{-4} tesla), nahiz eta ez den unitate estandarra kontsideratzen [17].

Eremu magnetiko baten existentziaren frogia, karga elektriko higikorren sortzen duen indarra da. Indarra hau, bai eremu magnetikoaren bektorearen zein abiadura bektorearen norabideekiko perpendikularra izango da, noranzkoa partikularen kargaren zeinuak determinatuko duelarik. Ondorioz indar honek norabide aldaketa bat eragingo du partikula kargatuan, bere abiaduran eraginik izan gabe [18].

Indar magnetiko honen modulua partikularen karga, honen abiadura eta eremu magnetikoaren intentsitatearen biderketa bektorialaren bidez lortuko da.

$$\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Ekuazioa 3-22. Partikula kargatu higikorra eremu magnetikoan [18].



Irudia 3-14. Partikularen kargaren zeinua indar magnetikoan [18].

Iman iraunkorrek bi polotan antolaturik egoten dira ipar eta hego polo izenak hartzen dituztelarik. Aurkako poloen arteko indarrak erakarpena adierazten dute, aldiz polo berdinak aldentu egiten dira. Elementu magnetiko batek sortzen dituen eremu lerroak ipar polotik irten eta hego poloan sartzen dira. Ipar poloa, positibo gisara ere ezaguna da, ere berean hego poloa, negatiboa izanik.

Bi iman egonkorren arteko elkarrekintza deskribatzen duten indarrak kalkulatzeko garaian bi bide daude.

Lehen kasua bi poloak puntu moduan sinplifikatuak izateko nahikoa txikiak ala elkarrengandik nahikoa urrun daudenean erabiltzen da. Era honetan imanak karga magnetiko puntual gisara deskribatu ahal izango dira, eta beraien arteko indarra ondorengo ekuazioen bidez azal daiteke.

$$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \frac{1}{z^3}$$

$$F_m = \frac{dU}{dz} = -3 \frac{\mu_0 \mu^2}{2\pi} \frac{1}{z^4}$$

Ekuazioa 3-23. Bi iman egonkorren arteko indarra [19].

F_m : indar magnetikoa, Newtonetan [N].
 μ : medioaren permeabilitatea, kasu honetan airea. [T·m/A]
 z : bi puntuen arteko distantzia, metrotan [m].

Aldiz bi gainazal magnetizatuen arteko indarra beste bat da. Ondorengo ekuazioa soilik gainazal magnetizatuen azalera bien arteko espazioa baina askoz handiagoa denerako da erabilgarria. Non A gainazal bakoitzaren azalera den [m²], H haien eremu magnetikoa [A/m] eta B fluxu magnetikoaren dentsitatea [T].

$$F_m = \frac{\mu_0 H^2 A}{2} = \frac{B^2 A}{2\mu_0}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [T \cdot m/A]$$

Ekuazioa 3-24. Bi gainazal magnetizatuen arteko indarra [19].

3.4.2 Indukzio Elektromagnetikoa

Indukzio elektromagnetiko moduan izendaturiko fenomenoaren eremu magnetiko aldakorren eraginetako bat da. Fenomeno hau 1830. urtean H. M. Faraday eta J. Henry-k aurkitu zuten ia aldi berean, elkarren lanari buruz ezertxo ere jakin gabe. Indukzio elektromagnetikoan oinarriturik daude besteak beste sorgailu eta motor elektrikoak.

Fluxu magnetikoa, eremu magnetiko batean kokaturiko azalera bat zeharkatzen duen "bektore kopurua"-ren adierazle da, nolabait adierazteko. Bere balioa eremu magnetikoaren eta azaleraren bektoreen arteko biderketa bektorialaren emaitza da. Aldi berean eremu magnetikoaren balioa ala gainazalarena aldakorrak izanez gero, integratuz lortuko da fluxuaren balioa. Magnitude honen unitatea weberrak [Wb = T·m²] dira.

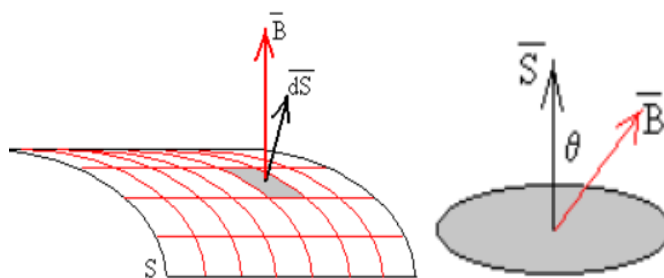
Kontuan izan beharrekoa da \vec{S} azalera-bektorearen norabidea S -rekiko perpendikularra dela, eta modulua aldiz azalera bera.

$$\Phi_{mag} = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos\theta$$

$$\Phi_{mag} = \int \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

$$\Delta\Phi_{mag} = \Delta(\vec{B} \cdot \vec{S})$$

Ekuazioa 3-25. Fluxu magnetikoaren definizioa [18].



Irudia 3-15. Eremu magnetikoa eta azaleraren bektoreak [18].

Eroale elektriko bat, espira moduan, eremu magnetiko baten baitan ezartzen da. Espira igarotzen duen fluxu magnetikoa denborarekiko aldakorra bada, zirkuitu elektrikoan korrrontea neur daiteke fluxu magnetikoan aldaketa gertatzen den bitartean.

Korronte elektrikoaren indukzioa, orokorki bi lege fisikoren bidez deskribatzen da:

- **Faraday-Henry legea:**

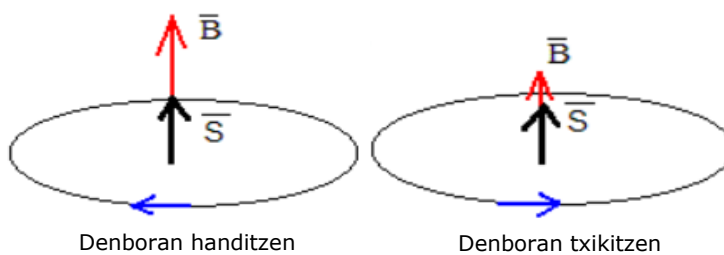
Denboran zeharreko fluxu magnetikoaren aldaketak, indar elektroeragilea sortuko du. Indar elektroeragile horrek korronte elektriko induzitu dezake eroalean. I , korronte elektriko hori, beti sortu duen kausen aurkakoa izango da, hau da, aurka egiteko noranzkoa izango du. Fenomeno hau da indukzio magnetiko moduan ezaguna dena.

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Ekuaioa 3-26. Indar elektroeragilea (iee) [18].

- **Lenzen legea:**

S gainazala zeharkatzen duen fluxua txikituz gero, ibilbide itxian sorturiko I korrontearen noranzkoa eskuin eskuaren erregelaz adieraziko da. Aldiz, fluxu magnetikoa handitzen ari bada, aurkako noranzkoa izango du, 3-16 irudian adierazten den moduan.



Irudia 3-16. Korrontearen noranzkoa Lenzen arabera [18].

Indukzio magnetiko fenomeno gertatzeko beharrezkoa den fluxu aldaketa hainbat magnitudek eragin dezaketenez, kasu espezifiko asko daude aztergai. Dena den, guztietatik helburu dugun aerosorgailua definitzeko egokiena, eremu magnetiko batean v abiaduraz higitzen den zirkuituaren kasua da.

Eredu honetan nahiz eta eremu magnetikoa ez da konstantea, eta beraz zirkuitua bertan translazioz higitzean, fluxu magnetikoaren balioa etengabe aldatzen da. Era honetara, indar elektroeragilea sortuko da, zirkuituan bertan tentsio diferentzia bat (ΔV) adieraziko duena R erresistentzia [Ω].

$$\varepsilon = \Delta V = I \cdot R$$

Ekuaioa 3-27. Indar elektroeragileak sorturiko tentsio diferentzia.

3.5 FLUIDOEN MEKANIKA

Fluidoek mekanika, jariakinen portaera aztertzen duen zientziaren alorra da. Ereku honetan aztergai asko daude, gure ingurunean jariakinekin gertatzen diren elkarrekintzak etengabeak baitira.

Jariakin batean zehar higitzen den gorputz orok, jariakin honek eragindako indarrak jasaten ditu. Indar hauek gehienbat bi motatan bana daitezke esekidura eta erresistentzia indarra. Proiektuak duen helburuaren arabera hauetako indar bat edo beste maximizatu eta erabiltzeko diseinatzen dira elementuak. Adibide gisara, hegazkinen hegalek esekidura indarra optimizatzeko diseinaturik daude.

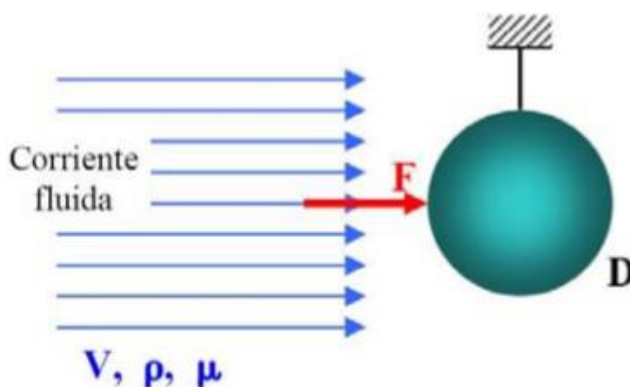
Gorputz bat fluxu batean kokatzean, gorputz honek fluxua ebaki behar du hau bere inguruan higitu dadin. Hau horrela izanik gorputza eta jariakinaren interakzioak fenomeno aeroelastiko ezberdinak sor ditzake fluxuaren lortatzean, ezagunenak ziurrenik zurrumbiloak izango dira.

Zilindro baten inguruko fluxua oso fenomeno konplexua da eta hainbat ikerkuntza eta saiakeraren funtsa izan da. Zilindroaren forma batere aerodinamiko ez denez, fluxu lerroak ez dira gai bere itxura jarraitzeko eta zurrumbiloak sortzen dira ondorioz. Zilindroa nahikoa malgua bada, zurrumbilo hauek oszilazioa sor dezakete zilindroan [20].

3.5.1 Parametro adimentsionalak

Parametro adimentsionalak haien dimentsioa 1 bihurtzen duten aldagai fisikoen multzoak dira, hau da dimentsio gabeak. Fluidoek mekanikan analisi dimentsionalak bideragarri egiteko erabiltzen dira. Analisi dimentsionalak fenomeno fisiko batean parte hartzen duten hainbat aldagai parametro adimentsionaletan elkartzea bideratzen du, aldagai hauen arteko erlazioak sortuz.

Esterako ρ dentsitatea eta μ biskositatea duen fluxu batek, v abiaduraz mugitzean D diametroa duen zilindro batean sorturiko F erresistentzia indarra aztertu nahiko balitz, hori egiteko erabili beharreko funtzioak honako itxura izango luke: $F = f(\rho, \mu, v, D)$. Funtzio hau espermentalki aztertzeko bidea, txandaka aldagai bakoitzaren eragina ebaluatzea litzateke hiru aldagaiak konstante utziz saiakera bakoitzean eta hautaturiko aldagaiaren balioa 10 aldiz aldatuz. Honek funtzioaren azterketa egokirako 10.000 frogak egin beharko liritekeela adierazten du [21].



Irudia 3-17. Zilindro eta fluxuaren arteko elkarrekintzaren eskema [21].

Aldiz analisi dimentsionalaren bitartez, elkarrekintzarekin erlazonaturiko aldagai fisikoak, parametro adimentsionaletan multzokatzen dira. Aurrez deskribaturiko kasuan soilik bi parametro adimentsional lortzerik daude. Honela haien arteko erlazioa honela deskribatu daiteke.

$$\frac{F}{\rho v^2 D^2} \text{ eta } \frac{\rho v D}{\mu}$$

$$\frac{F}{\rho v^2 D^2} = f\left(\frac{\rho v D}{\mu}\right)$$

Ekuzioa 3-28. Aldagaien multzokatzea parametro adimentsionaletan [21].

Ekuzio honen jokamoldea ere esperimentalki aztertu beharra dago, baina horretarako nahikoa da soilik bi parametro adimentsionaletako bat aldatzea. Aldi berean, hori egiteko soilik aldagai fisiko bat aldatu beharra dago beste guztiak konstante mantenduz. Ondorioz, aurrez egin beharreko 10.000 saiakerak soilik 10 izan arte murriztea lortu da.

3.5.1.1 π Teorema

Problema jakin batek duen parametro adimentsional kopuru independentea, finkatua dela dio Buckingham π teorema.

Problemaren espazioak n aldagai badauzka (q_1, q_2, \dots, q_n), oinarritzko dimentsioak hiru direnez (M, L, t), eratorritako magnitude adimentsionalak $n-3$ izango dira. Horrez gain magnitude adimentsional bakoitza, lau aldagai fisikoren menpe egongo da gehienez. Aldi berean Buckingham teorema aitortzen du, ezinezkoa dela simulazio perfektuak lortzea.

$$f(q_1, q_2, \dots, q_n) \rightarrow \text{sinplifikatuta} \rightarrow (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-3}) = 0$$

Ekuzioa 3-29. Buckingham teorema [21].

VIV aerosorgailu baten simulazioa egiterako garaian bi dira garrantzia gehien izango duten parametro adimentsionalak, nahiz eta beste asko oso ezagunak diren maiz gertatzen diren fenomenoak deskribatzeagatik (Webber, Froude...).

- **Reynolds (Re):**

Reynoldsek aurkitu zuen parametro adimentsionalak, inertzia indarra eta biskositate indarren arteko erlazioa adierazten du. Fluxu mota deskribatzeko erabiltzen da. Indar biskosoak badira nagusi fenomenoan, Re zenbakia baxua izango da, fluxu laminar bat adieraziz. Aldiz indar zinetikoak badira nagusi, Re zenbakia handia izango da fluxu turbulentu bat adieraziz.

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

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Ekuzioa 3-30. Reynoldsen zenbaki adimentsionala [21].

U :	fluxuaren abiadura askea [m/s].
μ :	jariakinaren biskositate dinamikoa [kg/(m·s)].
ν :	jariakinaren biskositate zinematikoa [m ² /s].
L :	gorputzaren luzera karakteristikoa [m].
ρ :	jariakinaren dentsitatea [m ³ /kg]

- **Strouhal (St):**

Zenbaki adimentsional hau gorputz bat igarotzean fluxuak sortzen dituen zurrunbiloen maiztasuna bilatzeko osagaia da. Non f_s zurrunbiloen maiztasuna den.

$$St = \frac{f_s \cdot L}{U} \rightarrow f_s = \frac{St \cdot U}{L}$$

Ekuzioa 3-31. Strouhal zenbaki adimentsionala [8].

- **Roshko (Ro):**

Anatol Roshko fisikari kanadiarrak ezarri zuen zenbaki adimentsional hau. Fluxu oszilakorreko mekanismoak deskribatzen ditu Reynolds eta Strouhal zenbakien arteko erlazio bat ezarriz $60 < Re < 2000$ tartarako.

$$Ro = \frac{f_s \cdot L^2}{\nu} \rightarrow Ro = St \cdot Re$$

Ekuzioa 3-32. Roshko zenbaki adimentsionala [22].

Aldi berean, zilindro baten inguruko fluxuari buruz egindako esperimenduetan oinarrituz, bi korrelazio ezarri zituen Roshkok.

$$\begin{aligned} Ro &= 0.212 \cdot Re - 4.5 & 50 \leq Re < 200 \\ Ro &= 0.212 \cdot Re - 2.7 & 200 \leq Re < 2000 \end{aligned}$$

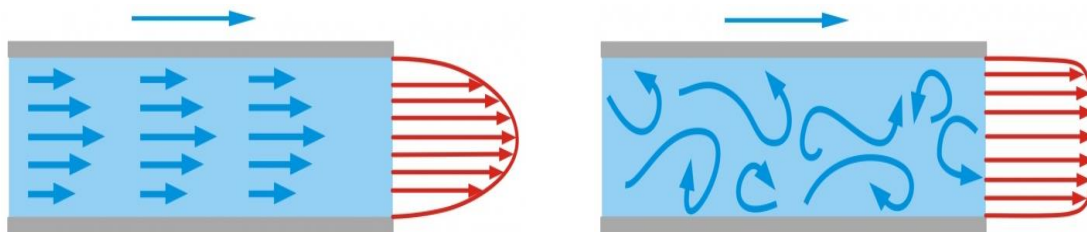
Ekuzioa 3-33. Roshko zenbakiaren korrelazio lineala [22].

3.5.2 Fluxu laminarra/turbulentua

Fluxu mota jariakinak mugitzean hartzen duen portaeraren arabera definitzen da. Bi fluxu mota bereizten dira laminarra eta turbulentua. Izaera hau Reynolds zenbaki adimentsionalaren bidez definitzen da, indar biskoso eta zinetikoak erlazionatzen dituen.

Fluxua laminarra den kasuetan, era antolatuan gertatzen da higidura eta biskositate indarrak gailentzen dira. Jariakina geruzatan mugitzen da, bata bestean labainduz; eta geruza hauen artean momentua trukutzen da paraleloki. Era honetan karga galerak minimizatzen dira. Orokorrean $Re < 2000$ denean fluxu bat laminarra kontsideratzen da. 3-18 irudian geruza antolakuntzako mugimendu honen eskema ikus daiteke.

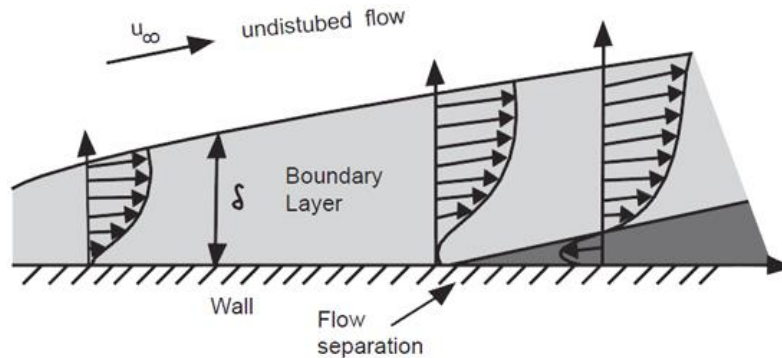
Aldiz, fluxua turbulentua denean eta indar zinetikoak nagusitzen direnean, partikulen mugimendua ez da antolatua, kaotikoa baizik. Hau dela eta momentuen elkartrukea zeharka, geruzen egitura hautsiz gertatzen da. $2000 < Re < 4000$ tartea trantsizio gisara hartzen den bitartean $4000 < Re$ denean fluxuan turbulentiak erabat garaturik daudela kontsideratzen da, ikus 3-18 irudia.



Irudia 3-18. Fluxu laminarra eta turbulentua.

3.5.3 Mugalde geruza

Solido bat jariakin batekin elkarrekintzan ari denean, bi eremu sortzen direla kontsideratzen da: mugalde geruza eta beste guztia. Mugalde geruza, jariakinak kanpo abiaduraren (oztopo gabekoa U_∞) %99a lortzen duen puntuez osaturiko lerroa da. Geruza hau elkarrekintzako solidoaren inguruan eratuko da.



Irudia 3-19. Mugalde geruza.

δ sinboloak, mugalde geruzaren lodiera adierazten du. Hau, objektu solidoaren profil geometrikoaren eta fluxuaren erregimenaren arabera aldatzen da. Orokorrean bai airean zein uretan, mugalde geruzak soilik mikra batzuetako lodiera du.

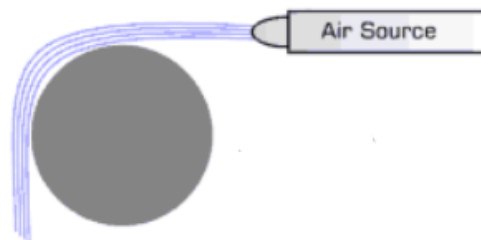
$$grad U = \frac{U_\infty}{\delta}$$

Ekuzioa 3-34. Mugalde geruzaren abiadura gradientea.

Haizearen abiadura teorikoa gainazal batekin kontaktuan zero da. Eta gainazaletik aldenitu ahala abiadura handitu egiten da, kanpo abiadurarena berdindu arte. Mugalde geruzaren, jaregite fenomeno gertatzen bada haizearen abiadura alderantzikatu egingo da solidoaren azaleratik gertu, lorratza sortuz.

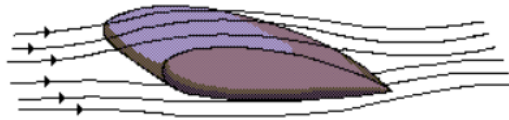
3.5.3.1 Coanda efektua

Coanda efektuak adierazten du, jariakin baten fluxu lerroak, gainazal solido batekin kontaktuan jartzean, gainazal lerro hauek solidoaren profila jarraitzeko joera dutela "itsatsi" izan balira bezala. Jariakinaren fluxu lerroek solidoaren gainazala jarraitzeko duten gaitasuna bi faktorek determinatzen dute: batetik fluxuaren erregimena, eta bestetik solidoaren geometria zenbaterako den latza ala leuna.



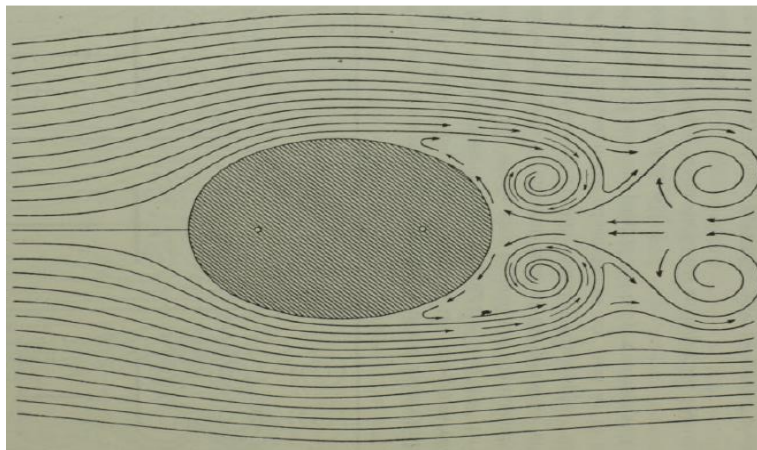
Irudia 3-20. Coanda efektuaren adierazpena.

Coanda efektuaren bidez, fluxu lerroak gorputz solidoaren geometria osoa jarraitzeko gai diren kasuetan, gorputz solidoak jasango duen erresistentzia indar bakarra marruskadurak eragindakoa izango da [23]. Kasu hau objektu aerodinamikoena izango da.



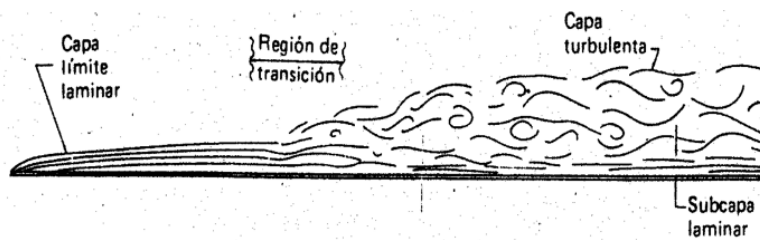
Irudia 3-21. Mugalde geruza, gorputz aerodinamikoan.

Aldiz, objektuak haizebera duen zatia era malkartsuan amaitzean edo erabat laua denean, mugalde geruza solidoaren gainazaletik aldentzen da lorratz bat sortuz. Honi mugalde geruzaren jaregitea deritzo. Lorratz hau zirimola sistema konplexu batez osaturik egoten da, eta sorturiko erresistentzia karga bat arrastan eramateak adieraziko luke, aurrez aipaturiko marruskaduraz gain.



Irudia 3-222. Gorputz malkartsuak sorturiko mugalde geruzaren jaregitea [23].

Mugalde geruzaren jaregite fenomenoaren ondorioz hiru erregimen sortzen dira aurrez deskribaturiko egoeran, erregimen laminarra, haizealdera, fluxuaren izaera egonkorra deneko tartea da; trantsizioa, zirimolen garatze tartean; eta azkenik fase turbulentua behin zurrunbiloak erabat garaturik daudenean.



Irudia 3-23. Mugalde geruzaren jaregitea.

3.5.4 Fenomeno aeroelastikoak


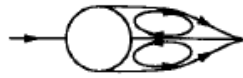


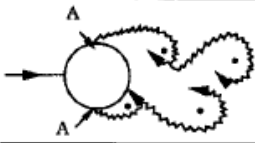
Aireak, jariakin moduan dituen biskositate propietateen ondorioz, solidoekin elkarrekintzak gertatzean hainbat fenomeno ikusgarri garatzen dira. Hauek dira, proiektuarekiko lotura nabaria dutenak.

3.5.4.1 Vortex Shedding

Vortex shedding fenomenoaren izen ingelesa, zurrumbilo isurketa izango litzateke euskara jatorrean. Honek haizeak gorputz malkartsu batekin duen elkarrekintzan lortatzen sortzen diren zirimolak adierazten ditu. Gorputz ez aerodinamiko bat haize fluxu baten barnean finkatzean, fluxu lerroak ez dira gai gorputzaren gainazala jarraitzeko eta ondorioz mugalde geruza solidoaren azaletik aldentzen da.

Gainazal leuneko gorputz zilindriko bat murgiltze dugunean fluxu batean, zurrumbilo isurketaren fenomeno gertatuko da. Zurrumbilo edo zirimola hauek, azken finean, biraka dabiltzan partikulen kontzentrazioak dira, eta *Strouhal vortices* moduan ere ezagunak dira ingelesez.

Reynoldsen zenbaki txikietan ($5 < Re < 40$), mugalde geruzaren jaregitea gertatzen hasten denean, fluxuak portamolde egonkorra izaten jarraitzen du. Egoera honetan, zirimola bikote bat sortuko da haizebera, presio baxuko zonaldeak sortuz. Reynoldsen zenbakia handitzen joan ala, une kritiko batean bi zurrumbilo hauek alternantzia izurtzen hasiko dira ($40 < Re < 200$). Bi geruza hauek elkarrekin interakzio ez lineal bat izango dute, periodikoki erregularra den zirimola egitura bat sortuz zilindroaren lortatzean [24]. Reynoldsen zenbakiak handitzen jarraituz gero, sorturiko zurrumbiloen geruzak erregimen turbulenterako trantsizioa jasaten hasiko dira ($200 < Re < 300$), turbulenzia hauek erabat garatzea lortu arte ($300 < Re < 3 \cdot 10^5$).

	No separation. Creeping flow	$Re < 5$
	A fixed pair of symmetric vortices	$5 < Re < 40$
	Laminar vortex street	$40 < Re < 200$
	Transition to turbulence in the wake	$200 < Re < 300$
	Wake completely turbulent. A: Laminar boundary layer separation	$300 < Re < 3 \times 10^5$ Subcritical

Irudia 3-24. Reynolds zenbakiaren eragina zilindro baten lortatzeko zurrumbilo isurketan [25].

Zurrunbilo egitura hauek, bi lerrotan antolatzen dira, elkarren aurkakoak diren errotazio noranzkoekin. Zurrunbilo bakoitza aurkako lerroan gertuen dituen bi zurrunbiloen artean dagoen distantziaren erdian kokatzen da. Egitura zoragarri hau Karman zurrunbilo kale gisara ezaguna da, hura izendatu zuen Theodore von Karman aerodinamikan adituaren omenez.



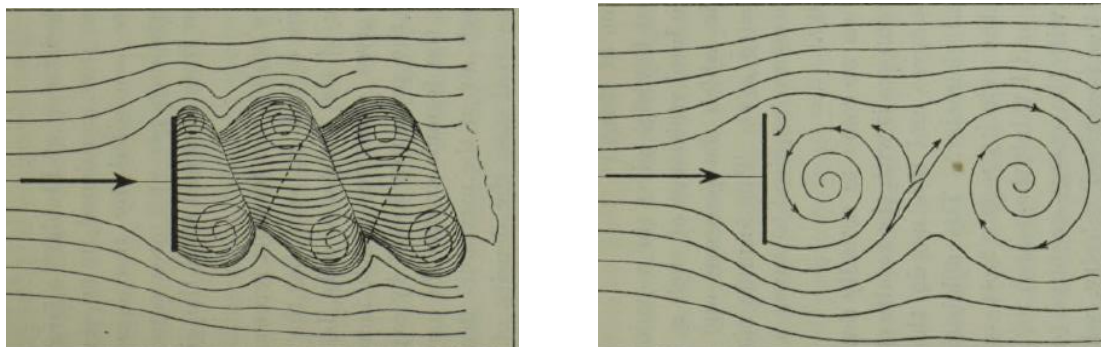
Irudia 3-25. Karman zurrunbilo egitura, zilindro baten lorratzean.

Fenomeno honen gertaera emateko behar diren baldintzak medio, ohikoa da naturan ere egitura hauek hauteman ahal izatea. Hala nola, irletan baldintza meteorologikoak egokiak direnean, irlaren gorputz malkartsuak sortzen duen lorratzaren egitura lainoen bidez plasmaturik geratzen da.



Irudia 3-26. Karman egitura Kanariar irlek sorturiko lorratzean [NASA].

Zurrunbiloen isurpenaren bitartez, esekidura eta erresistentzia indar aerodinamikoak sortzen dira aztergai diren objektuan. Esekidura indarrak zurrunbiloak sortzean eraginak izango dira eta zero ardatzaren inguruan oszilatuko dute, zurrunbiloek isurtzean duten maiztasun berarekin.



Irudia 3-27. 3D eta 2D kasuetako zirimola egiturak [23].

3.5.4.2 Wake Galloping

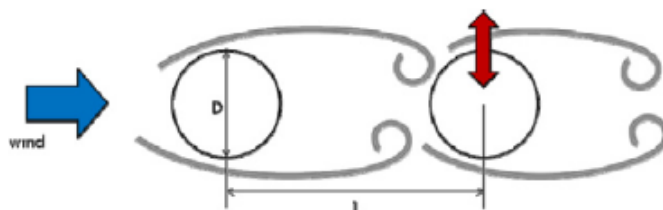
Wake galloping moduan ezaguna den fenomenoa bi zilindro haizearen norabidean elkarri paralelo jartzen direnean lortzen da. Era honetara oszilazio indartsuagoak eragiten dira haizebera kokaturik dagoen bigarren zilindroan.

Fenomeno hau dimentsio espazialen bitartez mugaturik dago. Matsumoto jaunari jaramon eginaz [26] bi zilindroen arteko espazioa sei aldiz haien diametroa baina handiagoa bada, fenomeno hau ez da gertatuko. Honetaz gain, bi zilindroek diametro bera izan beha dute. Hortaz *wake galloping* fenomenoa agertzeko parametririk garrantzizkoena zilindroen arteko espazioa dela esan liteke. Espazio hau $3 \cdot D$ eta $6 \cdot D$ bitartean dabilenean izango da efektiboena fenomenoa.



Irudia 3-28. Wake galloping fenomenoaren betetzeko espazio dimentsioak [26].

Fenomenoaren mekanismoa honakoa da, fluxuak lehen zilindroarekin elkarrekintza izatean, haizebera zurrunbiloak isurtzen dira aurreko atalean azaldu den moduan. Zirimola hauek, haien ibilbidean esekidura indarrak induzituko dituzte bigarren zilindroan. Esekidura indar hauek haizearen norabidearekiko era perpendikularrean eragingo dute eta periodikoki, oszilazioak indartuz.

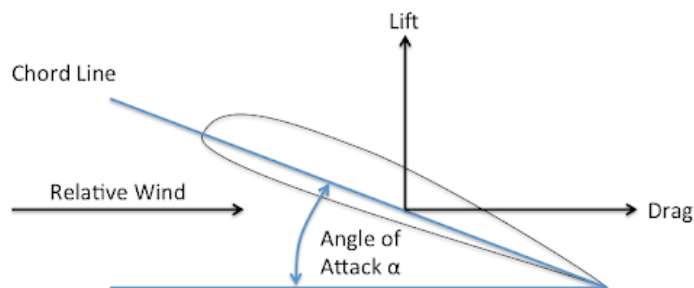


Irudia 3-29. Wake galloping fenomenoaren induzituriko oszilazioak [26].

Wake galloping fenomenoaren bitartez sorturiko oszilazioak energia maila oso handia dute, ondorioz arriskutsuak dira, aerosorgailuaren egituraren kalteak sor baititzakete.

3.5.5 Erresistentzia eta esekidura indarrak

Fluxu batean zehar higitzen den edozein objektuk, jariakinak eragindako indarra jasaten du. Gorputza haizearen norabidearekiko simetrikoa den kasuan, zilindroa adibide, soilik erresistentzia indarra (drag, F_D) jasan beharko luke oinarrizko ikuspegi batetik. Aldiz, gorputza haizearen norabidearekiko simetrikoa ez den kasuetan, esekidura indarra (lift, F_L) ere azalduko da. Azken honen noranzkoa fluxuaren norabidearekiko perpendikularra izanik [27].

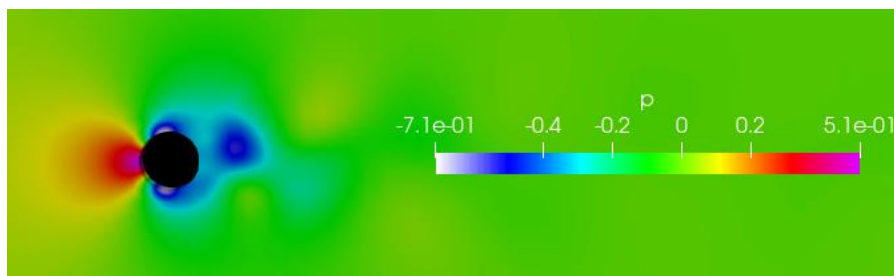


Irudia 3-30. Esekidura eta erresistentzia indarren eskema.

3.5.5.1 Erresistentzia indarra, F_D

Gorputzek jasaten duten erresistentzia indarra bi osagaiak eratzen dute. Lehena, eta ulertzen errazena, jariakinak gorputzarekin elkarrekintzan eragiten duen marruskadura indarra da, erresistentzia bat eragingo duena.

Bigarren osagaia, erresistentzia presioa, zertxobait konplexuagoa da. Aurrez azaldu den moduan, gorputz malkartsuetan mugalde geruzaren jaregitea gertatzen da; eragin eta fenomeno hainbat barneratzen dituen lortatz bat sortuz. Eragin horietako bat, haizebera gorputzaren oinarrian dagoen presioa, fluxu askearena baina txikiagoa izatea da [28].



Irudia 3-31. Zilindro batean haizealde eta haizebera arteko presio aldaketa.

Fluxu askearen eta haizebera gorputzaren oinarriaren arteko presio diferentzia honek indar bariko bat sortzen du, erresistentzia indarra handituko duena. Indar barikoak, presio gradientearen aurka eragiten duten indarrak dira, presio handitik txikira noranzkoan. Hurrengo ekuazioek indar barikoa adierazten dute non ρ [kg/m^3] jariakinaren dentsitatea den eta dA gainazalaren azalera.

$$F = -\frac{dP}{dA}$$

$$\frac{F_x}{m} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta x}$$

$$\frac{F_y}{m} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta y}$$

$$\frac{F_z}{m} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta z}$$

Ekuazioa 3-35. Indar barikoaren ekuazioa.

Dena den, orokorrean, indarra osatzen duten bi elementu hauek determinatzea oso konplexua denez ekuazio sinplifikatu bat erabiltzen da erresistentzia indarra kalkulatzeko. Non ρ [kg/m^3] jariakinaren dentsitatea den, U fluxuaren abiadura askea eta A gainazalaren azalera. Ekuazio sinplifikatu hau erresistentzia (drag) koefizientearen oinarritzen da C_D , koefiziente hau esperimentalki determinatzen da eredu aerodinamiko bakoitzerako.

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A \cdot U^2$$

Ekuazioa 3-36. Erresistentzia indarraren ekuazio sinplifikatua.

3.5.5.1 Esekidura indarra, F_L

Esekidura (lift) indarra haizearen norabidearekiko plano normalean ematen den indarra da. Hauxe da hegazkinen hegan egin eta haize errota modernoak mugitzeko arrazoia. Azken urteetan haizearen esekidura indarraren erabilera ikerketa ezberdinak jorratu dira, eta higitzeko modu gisara esekidura indarra erabiltzen duten belaontziak ere diseinatu dira.

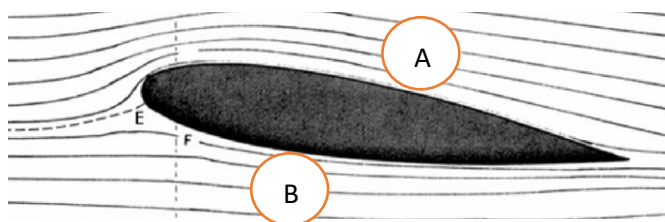
Indar hau agertzeko mekanismoaren azalpena ematerako garaian, hegazkin hegalean ala aerosorgailuen palen profil aerodinamikoak hartzen dira eredutzat. Orokorrean, profil hauek asimetrikoak izaten dira haizearen norabidearekiko. Kordarekiko (ardatza) simetrikoak diren profilen kasuan haizearekiko eraso angelu bat ematen zaie, ingelesez *pitch* angelu moduan ezagutzen dena, simetria hori hausteko.

Asimetria honen arrazoi soila da, esekidura indarra ager dadin, haizeak gorputza zeharkatzean alde batetik eta bestetik duen ibilbidearen luzera ezberdina izan beharra duela. Luzera honek eragiten du, haizeak gorputza inguratzean abiadura ezberdina izan behar duela bi aldeetan.

Honek Bernoulliren ekuazio orokorrera zuzentzen du ikusmira. Bernoulliren ekuazioan adierazten da, fluxu baten energia hiru osagai ezberdinetan deskonposa daitekeela: altuera (z), presioa (P) eta abiadura (v). Non g azelerazio grabitazionala den eta ρ jariakinaren dentsitatea.

$$E = \frac{P}{\rho g} + \frac{v}{2g} + z$$

Ekuazioa 3-37. Bernoulliren ekuazio orokorra.



Irudia 3-32. Fluxu leeroak profil aerodinamiko batean.

Gorputza inguratzen duen fluxu beraren parte direnez, aurreko irudiko A eta B puntuek duten energia maila, bera da. Beraz puntu horietako Bernoulliren ekuazioak berdinduz lortzen da esekidura indarraren agerpenaren mekanismoa.

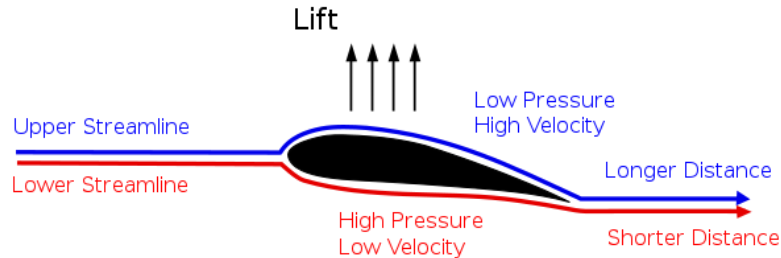
Hasteko ohartu beharra dago profil aerodinamiko baten zabalera murriztua dela. Beraz, A eta B puntuen arteko kota diferentzia mespretxagarritzat hartzen da. Hau dela eta, altueraren elementua desagertu egiten da ekuaziotik.

Horretaz gain, aurrez ebatzi den moduan A puntuan abiadura azkarragoa izango da B puntuan baino. Energiaren ekuazioan oreka mantentzeko bada, jada jakina da presioa A puntuan jaitsi egin beharko dela, eta aldiz B puntuan igo.

$$\begin{aligned} \frac{P_A}{\rho g} + \frac{v_A}{2g} + z_A &= \frac{P_B}{\rho g} + \frac{v_B}{2g} + z_B & z_A &= z_B \\ \frac{P_A}{\rho g} + \frac{v_A \uparrow}{2g} &= \frac{P_B}{\rho g} + \frac{v_B \downarrow}{2g} \\ \frac{P_A \downarrow}{\rho g} + \frac{v_A \uparrow}{2g} &= \frac{P_B \uparrow}{\rho g} + \frac{v_B \downarrow}{2g} \end{aligned}$$

Ekuazioa 3-38. Bernoulliren ekuazioaren garapena.

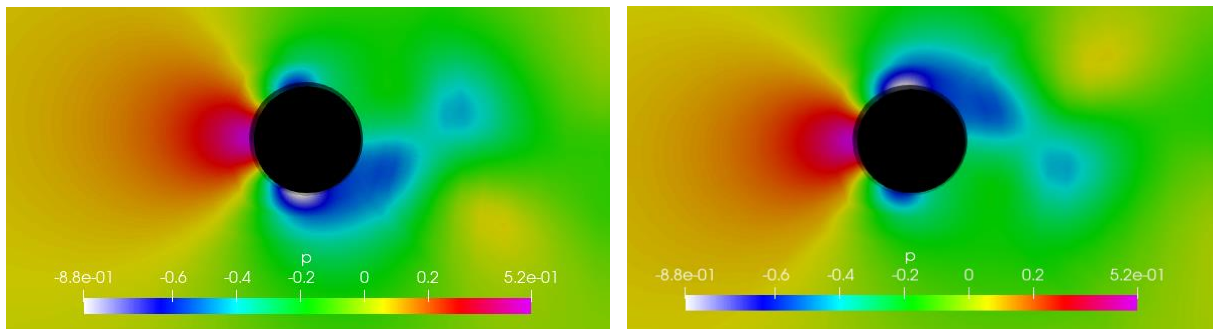
Hau horrela, presio ezberdintasun bat agertuko da profil aerodinamikoaren goiko eta beheko aldean artean. Izan ere Bernoulliren ekuazioaren bitartez $P_A < P_B$ dela argitu da. Ondorioz, $B \rightarrow A$ noranzko eta norabidea izango duen indar bariko bat agertuko da sisteman, esekidura indarraren izena hartuko duena.



Irudia 3-33. Abiadura eta presioen banaketa.

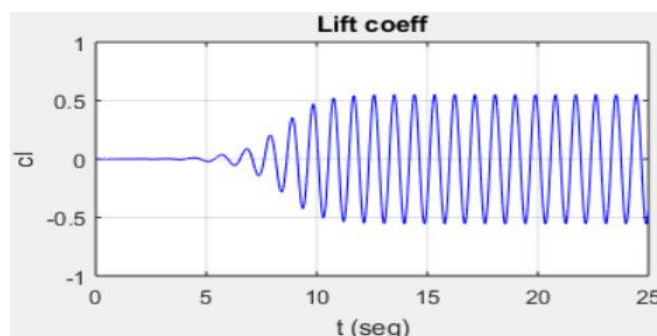
Dena den, hau ez da era berdinean gertatzen gorputz simetrikoetan. Izan ere, gorputza simetrikoa izatean ez dago ezberdintasunik ibilbidearen luzeran fluxuak gorputza inguratzean. Beraz, ez da presio ezberdintasunik sortzen profilaren bi aldean artean kausa honen ondorioz behintzat.

Bestalde, jada azaldu den bezala, *vortex shedding* fenomenoaren bitartez, zurrunbiloak isurtzen dira gorputz malkartsuen lortzean era periodiko batean (zilindroak kasu). Zurrunbilo hauek duten ezaugarri bat da, osatzen direnean presio baxuko gune bat osatzen dela haien zentroan. Hau periodikoki gertatzen bada 2D profilaren alde banatan zirimolak eratzearekin batera, presio ezberdintasun bat izango dugu gorputzaren aldean artean, periodikoki noranzkoa aldatuko duena.



Irudia 3-34. Presio baxuko gunean zilindroaren bi aldeetan zurrunbilo eraketarekin bat.

Honek sortzen duen esekidura indarra (barikoa) ere oszilakorra izango da. Horren adierazgarri da *lift* koefizienteak (C_L) zero ardatzaren inguruan oszilatzen duela balio positibo eta negatiboen anplitudeak konstante mantenduz.



Grafikoa 3-8. Zilindro batean induzituriko esekidura indar oszilakorra.

4 SAIAKERA

Saiakera edo proiektu honen helburua VIV aerosorgailuei buruz dagoen jakintzan sakondu eta ahal izanez gero hura osatu eta hobetzea da. Gaiari buruz egin den informazio bilketan zehar erakunde ezberdinek egiten dituzten analisietan hutsune edo ahulezia bat topatu da.

Topatu den informazio falta hau, hainbat aerosorgailuko egiturak osatzerakoan dator. Aerosorgailu bakarrak duen portamoldea, bertan eragiten duten fenomeno fisikoak, energia ustiapena, etab. oso sakonki analizatuak izan dira. Baina bi aerosorgailuren arteko interakzioari buruz, oso informazio gutxi dago eskuragarri.

Gai honetan sakontzea beharrezko gisara jotzen da. Izan ere Vortex Bladeless SL enpresak bere produktuaren defentsan erabiltzen duen argudioetako bat da, hainbat aerosorgailuko instalazioa burutzeko ohizko hiru palako dorreekin erabili beharrekoa baina espazio askoz murriztagoarekin nahikoa dela. Baina inongo unetan ez da zehazten aerosorgailu baten lortzak ondoren sorgailuan izango duen eragina, ezta hauek ekiditeko bi egituren artean utzi beharreko espazioak ere. Datu orokor gisara aipatzen da mastaren altuera bi aerosorgailuren arteko espazio gisara utzita, batak bestean duen eragina mespretxagarria dela.

Kasuistikaren analisi sakonago bat egitea da beraz saiakera honen xedea. Berau burutzeko, hainbat simulazio burutuko dira Computational Fluid Dynamics (CFD) teknikak erabiliz, egoera ezberdinen artean aerosorgailu soil batek eta beste egitura baten lortzearan ezarritako sorgailu batek lituzketen portaerak aztertzeke.



Irudia 4-1. Vortex Bladeless aerosorgailuen egitura bat.

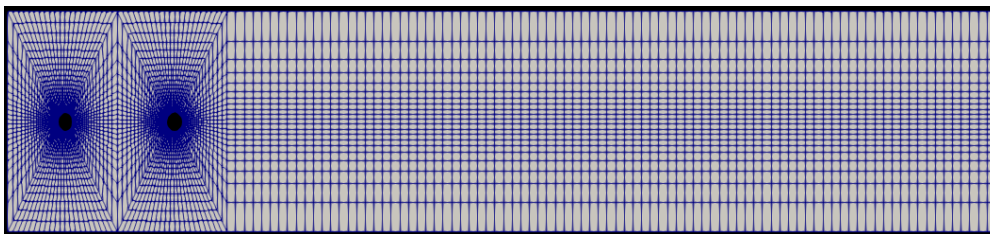
4.1 OINARRIAK

4.1.1 Analisi Dimentsionala

Simulazioa burutzeko sistema bat sortu behar da, eta bertako parametrok aldatuz egoera ezberdinak ezartzen dira sistemaren portaera aztertzeko.

Parametro adimentsionalen atalean azaldu den moduan, analisi dimentsionala egitean, sistema bat osatzen duten aldagaiak multzokatu egiten dira analizatu beharreko parametro kopurua ahalik eta gehien murrizteko.

Geure sistema haize fluxu batean finkaturiko bi zilindrok osatuko dute. Bi zilindro hauek elkarren segidan ezarriko dira fluxuaren norabidean. Simulazioa sinplifikatzeko helburuz, errekurtsio faltagatik, bi dimentsiotan (2D) ezarriko da sistema, zilindroen sekzio horizontal modura bi zirkunferentzia ezarriz. Sistema honetan, zilindroen gorputz ez-aerodinamikoak eragindako *vortex shedding* fenomeno aeroelastikoa aztertu nahi da, honek sorturiko lorratza, lorratz hauek bi zilindroen gainean eragindako indarrekin batera. Hona hemen, beraz sisteman eragingo duten aldagaiak eta haien unitateak:



Irudia 4-2. Bi zilindroz osaturiko egitura.

U :	haize fluxuaren abiadura askea [m/s].
ρ :	jariakinaren dentsitatea [m^3/kg].
μ :	jariakinaren biskositate dinamikoa [$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$].
ν :	jariakinaren biskositate zinematikoa [m^2/s].
f_s :	zurrumbiloen eraketa maiztasuna [Hz].
D :	gorputzaren berezko luzera, zilindroen diametroa [m].
L :	bi zilindroen zentroen arteko distantzia [m].

Aurkezturiko aldagai guztiak, L zilindroen zentroen arteko distantzia izan ezik, bi parametro adimentsionalen bitartez elkar erlazionatu daitezke. Reynoldsen zenbakia eta Strouhal zenbaki adimentsionalak.

$$Re = \frac{U \cdot D \cdot \rho}{\mu} \rightarrow Re = \frac{U \cdot D}{\nu}$$

$$St = \frac{f_s \cdot D}{U} \rightarrow f_s = \frac{St \cdot U}{D}$$

Ekuaioa 4-1. Reynolds eta Strouhal parametro adimentsionalak.

Bestalde, aurrez Oinarri Teorikoen atalean azaldu den moduan, Anatol Roshko zientzialari kanadiarrak, bi parametro adimentsional hauek elkar erlazionatzea lortu zuen bere izena jarri zion hirugarren parametro adimentsional baten bidez. Gainera, esperimenduetan oinarrituz ondorengo korrelazioak ezarri zituen:

$$Ro = \frac{f_s \cdot L^2}{\nu} \rightarrow Ro = St \cdot Re$$

$$Ro = 0.212 \cdot Re - 4.5 \quad 50 \leq Re < 200$$

$$Ro = 0.212 \cdot Re - 2.7 \quad 200 \leq Re < 2000$$

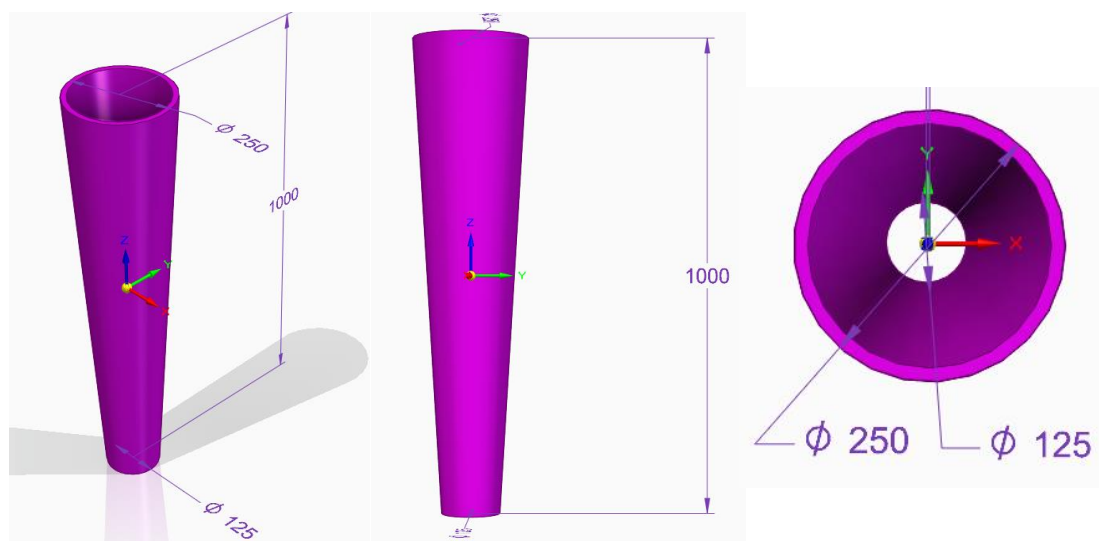
Ekuaioa 4-2. Strouhal eta Reynoldsen arteko erlazioa Roshkoren bidez.

Hau dela eta uler daiteke, sistemaren analisia egitean kontuan izan beharreko parametroak, soilik bi direla: Reynoldszen zenbakia (Re) eta zilindroen zentroen arteko distantzia (L).

4.1.2 Egitura

Aerosorgailuaren portaera simulatzeko haren egitura eredu bat hartu beharra dago. Iturri ezberdinek hainbat deskribapen egiten dituzten arren, gutxik zehazten dituzte aerosorgailuaren dimentsioak.

Artikulu zientifiko ezberdinen irakurketa burutu ondoren, egituraren hurbilketarik zehatzena S. Sarkar eta A. Agrawal ikerlariak haien artikuluan [29] emandakoa dela dirudi. Haiak bi diametro ezberdin dituen zilindroa proposatzen dute. Nukleoaren altueran kokatuta egonik diametro txikiena eta aldiz mastaren puntan handiena. Egituran zehar mastaren zabaltze hau era linealean ematen da. Mastak duen altuera bertikala ere, metro betekoa dela adierazten da.



Irudia 4-3. Proposaturiko egituraren dimentsioak milimetrotan [mm] [29].

Nahiz eta aurrez aipatu diren VIV aerosorgailuen zenbait ezaugarri alde batera uzten diren (mastaren gainkaldea esterako) egitura hau eredutzat hartzean, garrantzi gutxiko aldaketa dela iritzi da. Izan ere, aurrez aipatu den moduan simulazioak bi dimentsiotan egitea da helburua, eta ondorioz hurrengo ataletan azalduko den moduan zilindroaren egitura tridimentsionala sinplifikaturik geratzen da. Hau dela eta ez da beharrezkoa egitura erreal oso baten optimizaziorako ematen diren diseinu aldaketa guztiak gehitzea.

4.2 SOFTWARE

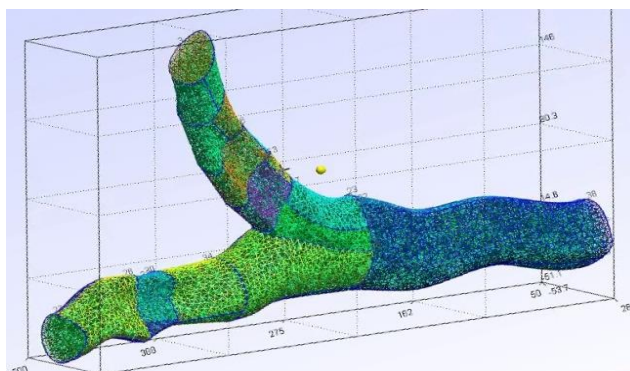
Simulazioa aurrera eramateko orduan hainbat atal bete beharra dago, horretarako egokiena, behar guztiak bete eta aukera guztiak eskura jarriko dituen tresna kutxa batez hornitzea da. Honela tresna bakoitza gehien egokitzen zaion arloa asetzeko erabiltzerik izango da.

Kasuistika honen programazioa aurrera eramateko hainbat software ezberdin erabili dira, haietako batzuk ezagunak dira, besteak aldiz ez hainbeste. Hemen doa haiei buruzko azalpen labur bat.

4.2.1.1 Gmsh

Software hau iturri askeko, 3D sareta sortzaile bat da. Elementu finituetan oinarriturik dago; ordenagailu bidezko diseinurako (CAD) motore bat eta ondorengo prozesamendua ere gehitzen ditu. Programara datuak sartzerako garaian, erabiltzailearentzako interfaze grafiko (GUI) bat izateaz gain, datuak ASCII testu artxiboetan gordetzen dira, hauek datuak sartzeko ala aldatzeko erabili daitezkelarik.

Gmsh bidez sorturiko sareta antolatua ala kaotikoak izan litezke, sareta gelaxka kopurua, haien itxura geometrikoa, etab. moldatu daitezkelarik. Programaren ezagutza sakon batekin lor litezkeen sareta ikusgarriak dira. Giza arteriak eta antzeko kasuistika konplexuak simulatzeko ere erabiltzen delarik.



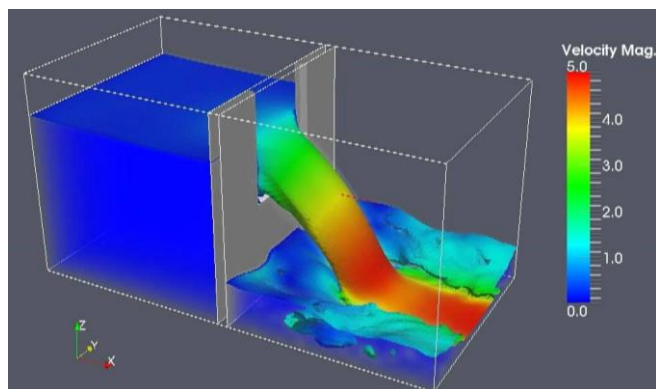
Irudia 4-4. Giza arteria simulatzen duen sareta, Gmsh bidez egina.

Gmsh programaren bitartez hautaturiko zilindroen kasua simulatuko lukeen sareta bat sortu da, era antolatuan ondoren CFD programa bat, hura ireki eta bertan ezarritako kasua ebazteko gai izan dadin.

4.2.1.2 OpenFoam

Programa hau, iturri irekiko *Computational Fluid Dynamics* programa bat da. Hau da, fluidoaren dinamikako simulazio informatikoak burutzen dituen tresna bat. Ereku komertzial zein akademikoan oso erabilia da. Zientziaren hainbat jakintza eremurik planteaturiko arazoak ebazteko gaitasuna du. Besteak beste erreakzio kimikoak barneratzen dituzten fluxu konplexuak, turbulentsiak, bero transferentzia, gorputz zurrunen mekanika...

OpenFoamek hainbat ebazpen mota ezberdin ditu sistemaren ezaugarri fisikoen arabera, eta aurrez ezarritako kasuen liburutegi bat ere badu. Dena den ez du erabiltzaile interfazerik, eta C++ lengoaiarekin lan egin behar da bertan. Honek oso konplexu eta astuna egiten du, hasiberrientzat muga handia bihurtzen dena.



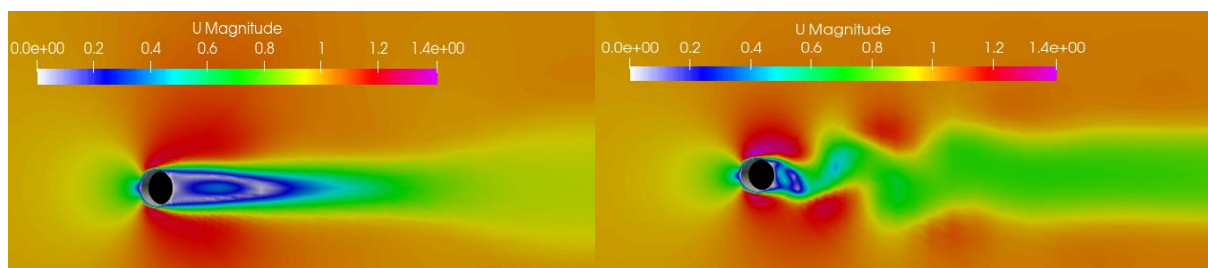
Irudia 4-5. OpenFoam bidez simulaturiko ur jauzia.

OpenFoam tresna erabiliaz, aurrez sorturiko saretan, hautaturiko egoeraren ingurune baldintzak zehaztu dira aldagai fisikoak definituz. Ondoren ebazpen motorea eta kontrol parametroak hautatuko dira eta simulazioa abiaraziz emaitzen datuak jaso.

4.2.1.3 ParaView

ParaView iturri askeko plataforma bat da, datuen analisi eta bistaratzeko diseinaturik dagoena. Datuak interaktiboki hiru dimentsiotan (3D) esploratu daitezke programa honen bitartez, baita denboran zeharreko bistaratzekak egin ere.

Tresna honen bidez, aurrez simulazioan lorturiko datuak bistaratuko dira. Denboran zehar sortzen diren fenomeno aeroelastikoak era grafikoan aztertzea ere ahalbidetzen da.



Irudia 4-6. ParaView bidez bistaraturiko zilindro baten inguruko fluxua.

4.2.1.4 Matlab

Simulazioetan lortu eta jaso diren datuak era analitikoago batean tratatzeko erabiliko da *Matrix Laboratory* programa. OpenFoamek, komandu egokiak emanaz gero, denbora urrats bakoitzeko fluxuak sorturiko indarren eta hauen koefizienteen balioak kalkulatzeko dituzte. Hauek guztiak makro-taula batean almagaztatzen dira.

Fitxategi hau *Matlab* programan kargatu eta datuen tratamendua egin ondoren, indarren portaera adierazten duten grafikoak lortzen dira, haien koefizienteak marraztuz.

4.3 SARETA

Sareta CFD simulazio bateko oinarritzko ezaugarrietako bat da. Haren kalitatea eta zuzentasuna garrantzi handikoak dira, ondoren definitu ahalko diren ezaugarri guztiak saretari loturik egongo baitira.

Sareta diseinatzeko orduan Gmsh iturri askeko programa informatikoa hautatu da, aurrez aipatu den moduan. Hau batez ere softwareak erabiltzailearentzat interfaze grafiko eta simple bat dakarrelako da. Ezaugarri honek askoz errazagoa bihurtzen baitu tresna eta diseinu fase ezberdinen artean nabigatzea.

Egitura honen diseinua eta sorkuntza bi atal ezberdinetan bana daiteke, lehenik geometria bat definitu beharra dago eta, ondoren sareta osatu, antolatu eta egokitu.

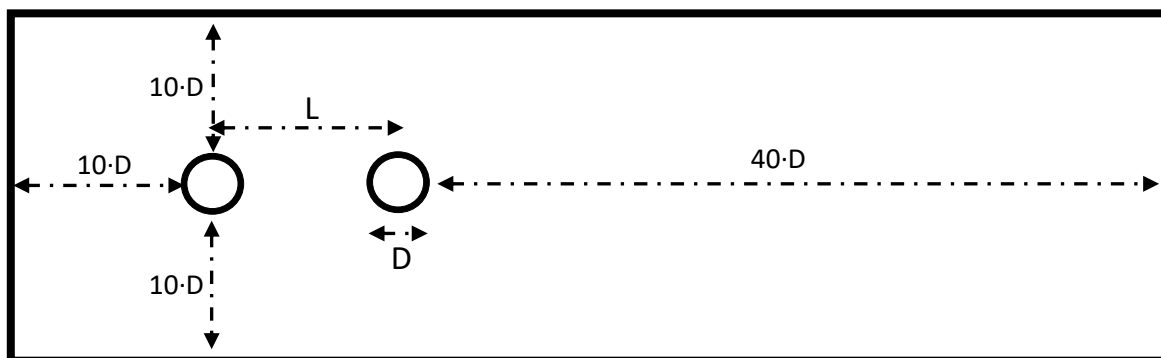
4.3.1 Geometria

Aztertu nahi den sistema fisiko erreala ahalik eta zehatzen deskribatzen duen geometria osatzeak berebiziko garrantzia du. Izan ere, baliozko simulazio bat osatu nahi bada, elementuek errealitatea ahalik eta zuzenen islatu behar dute.

Lan hau tentuz hartzeko arrazoi nagusietako bat, hurrengo urratsek oinarri honetan duten dependentzia da. Simulazioa definitzerako garaian mugalde baldintzak zehaztu beharko dira, eta hauek sorturiko geometriarekin bat etorri behar dute. Nolabait esateko, urrats honetan, saretarekin batera, simulazioa gertatuko den ingurunea sortzen da eta ondoren ingurune honetako elementu, horma, muga... bakoitzak zein portaera izango duen definitu.

Aldi berean prozesu oso hau software bidez emango denez, aurkitzen den muga bakarra denbora eta ekipoa bezalako errekursoak dira. Espazio ala material mugarik ez dagoenez, funtsezkoa da geometria errealitatearen isla izatea. Ez dago sistema eskalatu beharrik eta beraz, elementu guztiak dimentsio errealekin osatu daitezke.

Lehen urratsa era eskematikoan geometriaren bozeto bat osatzea da. Kasu honetan bi zilindro irudikatu nahi dira haize fluxu batean murgildurik, zilindroak elkarren segidan kokaturik egongo dira fluxuaren norabidean. Nahiz eta egoera erreala eremu aske batean gertatzen den, geometria sortzerakoan muga batzuk ezarri beharra dago. Horregatik egiturak kanal itxura izatea erabaki da, laukizuzen forma hartuz. Bi zilindroetatik haizebera utziko den espazioa, haizealdera utzitakoa baina handiagoa izango da. Honela eremu honetan lortzaren portaera ikusi ahalko da [25].



Irudia 4-7. Geometriaren irudikapen eskematikoa [25].

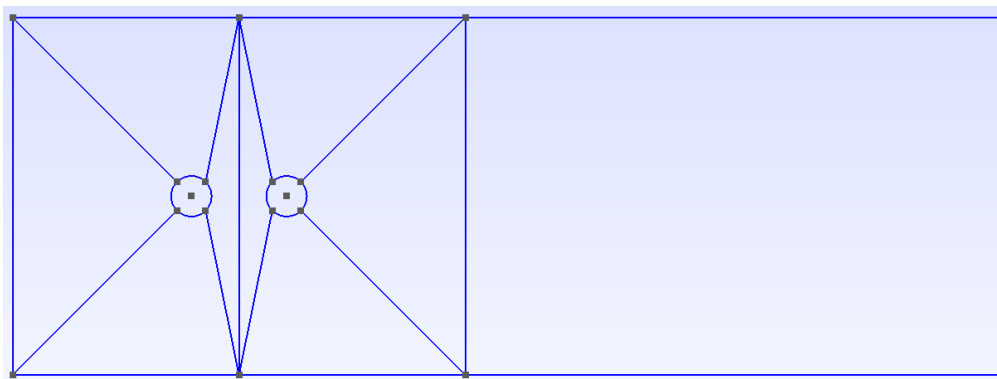
Jarraian puntuak definitu eta koordinatu moduan definitzen dira Gmsh programan. Prozesuan zehar beharrezko izango diren zenbait urrats ahalbidetzeko asmoz, aurreko geometria sinplea marrazterako garaian puntu gehiago definitzen dira elementuek berez behar dituztenak baino.



Irudia 4-8. Geometriaren puntuen kokapena.

Hurrengo urratsa puntu hauek lerroen bidez batzea izango da. Bi zilindroko haize kanal bat sortzeko erabiltzen den sistema konplexuago honek bere zentzua du. Simulazioa burutzerakoan, funtzionamendu egokirako, saretak antolatuak izan behar dute. Hau da, ez amorfoak. Horrek adierazi nahi duena da, saretako nodo edo sekzio bakoitza 6 alde osaturiko bolumen mugatu bat izan behar dela, bestela programak ezingo du ingurune fisikoa ebatzi eta nodoetan eragiketarik egin.

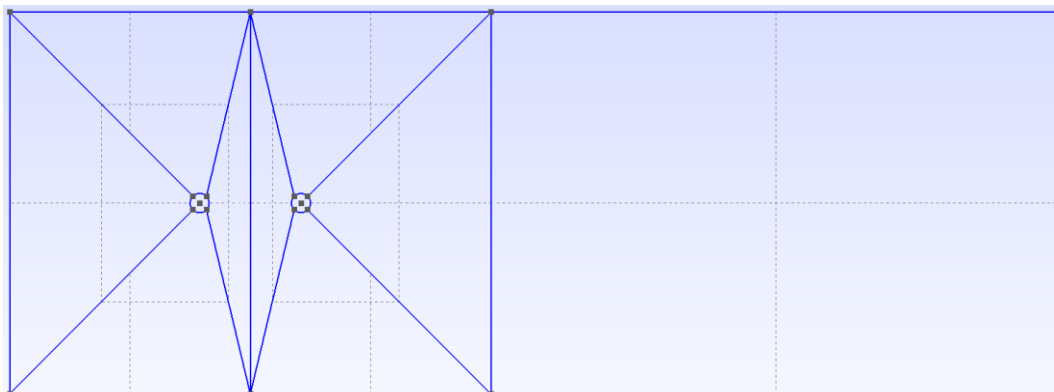
Azaldu berri den baldintza hau betetzeko 2D geometria osatzerakoan ingurune fisikoa lau aldeko poligonoz osaturiko sekziotan banatzen da. Ondoren egitura honi z ardatzean balioa ematean aurrez definitu diren moduko bolumenak sortzeko gai izateko.



Irudia 4-9. Puntuak lerroen bidez elkartuak.

Jarrian, lau zuzenen bidez mugaturiko azalera bakoitza plano lau moduan definitzen da programan. Bi zilindroen zentroek adierazten duten azalera ez da plano moduan definitzen beste sekzioekin egin den moduan. Izan ere, egiturako sekzio hauek hutsa, ala oztopo gisara errepresentatu nahi dira.

Apunte gisara aipatu, orain arte 4-9 eta 4-8 irudietan azaldu diren zilindroen diametroak ez datozela bat eskeman azalduko dimentsioekin, helburua bistaratzea eredugarria izatea izan baita.



Irudia 4-10. Planoen definitzea 2D geometrian.

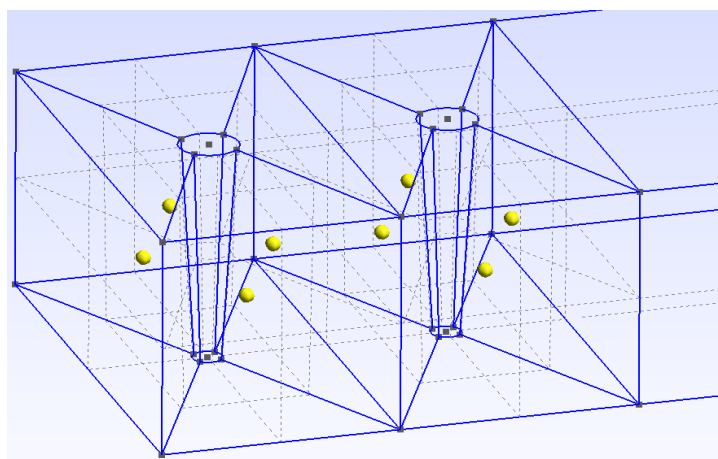
Geometria erabat definitzeko eman behar den azken urratsa hiru dimentsiotara bihurtzea da. Horretarako geometria z ardatzean garatu behar da. Aurrez plano ziren eremuek orain bolumenak mugatuko dituzte. Bolumen bakoitza sei planoz mugaturik egongo da eta bilatxo hori baten bidez adierazita.

Geometriari ardatz espazial berri bat atxikitzean hiru emaitza ezberdin lortzerik dagoela ikusi da. Hauek dira haien abantaila eta desabantailak.

4.3.1.1 Eredu erreala

Eredu errealean zilindroak ez dira zuzenak. Hau da, aurrez deskribatu den moduan, oinarrian duten diametroa mastaren puntan duten baina txikiagoa da. Honela eredutzat hartu den modeloari ahalik eta leialen izatea lortuko litzateke.

Mastaren diametroaren zabalkunde lineal hau, oinarri teorikoetan aipatu den haizearen profil bertikalarekin bat dator. Era honetan naiz eta mastaren altueran zeharreko haizearen abiadura bera ez izan, altueran zehar lortatzean sortzen den zurrumbilo isurpenaren maiztasuna bai izango dela berdina.



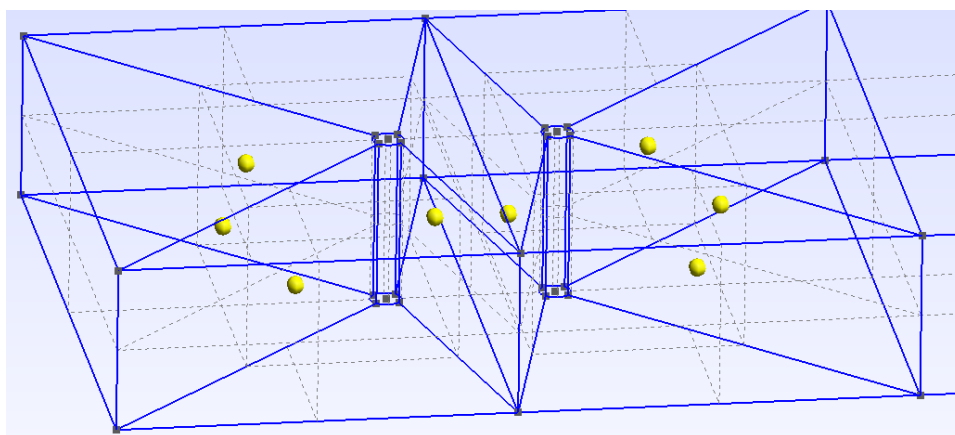
Irudia 4-11. Eredu errealaren hurbilketa den 3D geometria.

Mastaren hazkunde honek, dena den eragozpenak ere baditu. Simulazioa osatzean, kanaleko fluxuaren abiadura uniformea izango da z ardatzean zehar, beraz jada ez du zentzurik diametroaren hazkunde bat izateak altueran zehar.

Gainera fluxuaren abiadura simulazioan altuerarekiko gradiente bat izatea lortuko balitz ere, honek asko zailduko luke simulazioko parametro fisikoen kalkulua. Izan ere Reynolds zenbakia (aldagaia) altueraren eta oztupoaren luzera karakteristikoaren mende dago; eta ondorioz altueran zehar aldakorra izango litzateke. Honek ezinezkoa bihurtuko luke era zehatzean, simulazioa aldagaiaren zein baliotan egin den zehaztea.

4.3.1.2 Hurbilketa tridimentsionala

Kasu honetan alde batera uzten da diametroaren aldaketa eta bere balioa finko mantentzen da z ardatzean zehar. Baita fluxu askearen sarrera abiadura ere. Era honetara simulazio bakoitzaren kasu eta parametroetarako Reynolds zenbaki jakin bat lortzen da, kasuak haien artean alderatzea baimenduko duena.

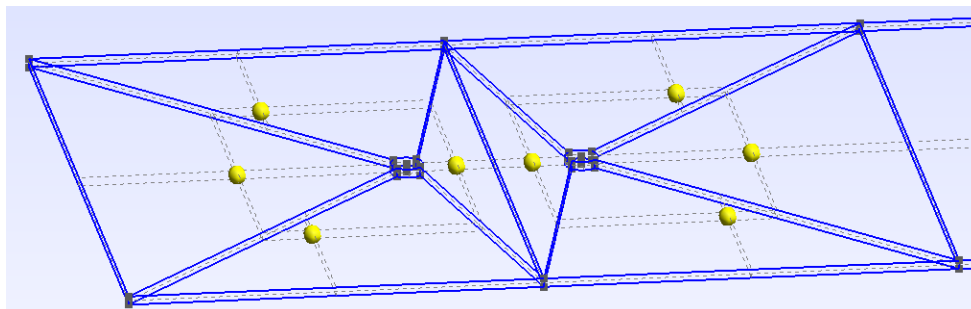


Irudia 4-12. Diametro finkodun bi zilindro.

4.3.1.3 Hurbilketa bidimentsionala

Azken aukera eta oinarritzkoena zilindroaren diametroa finkoa mantendu eta geometriari deskribapenean [29] dituen dimentsio osoak eman beharrean altuera mugatu bat ezartzea da. Simulazioak egiteko erabiltzen den OpenFoam programak soilik 3D simulazioak burutzen ditu. Beraz egitura bi dimentsiotara mugatu nahi izanez, gero z ardatzean altuera mugatu bat hautatu eta hau eragiketetan mespretxatzea da egin beharrekoa. Era honetara geometria xafla moduan hartuko da.

Behin diametroa eta haizearen abiadura gradientea finko gisara hartuta, soilik altueraren sekzio bat aztertzea oso erabilgarria gertatzen da simulazioak egiteko eskuragarri diren hardware eta denbora errekurtsioak mugatuak badira.



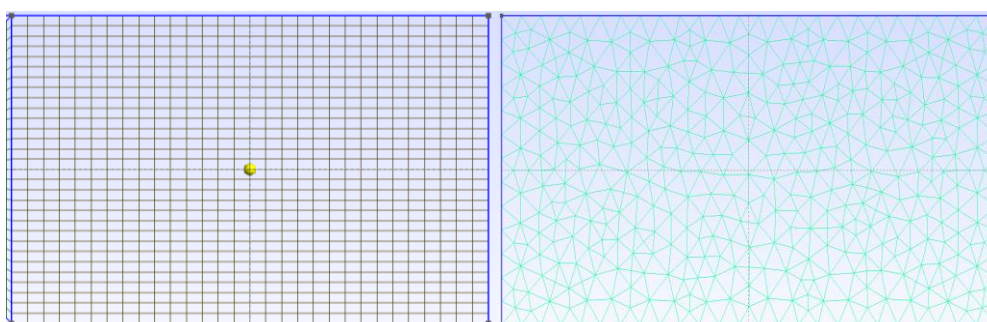
Irudia 4-13. Xafla itxurako geometria.

4.3.2 Sareta

Saretaren bidez lortzen dena sorturiko geometria erabiltzaileak desio haina zatitan banatzea da. Simulazioa burutzen duen programak saretaren nodo bakoitzerako kalkuluak egiten ditu. Beraz egindako simulazioaren zehaztasuna, besteak beste, egitura fisikoa banaturik dagoen gelaxka kopuru eta hauen tamainan oinarriturik egongo da.

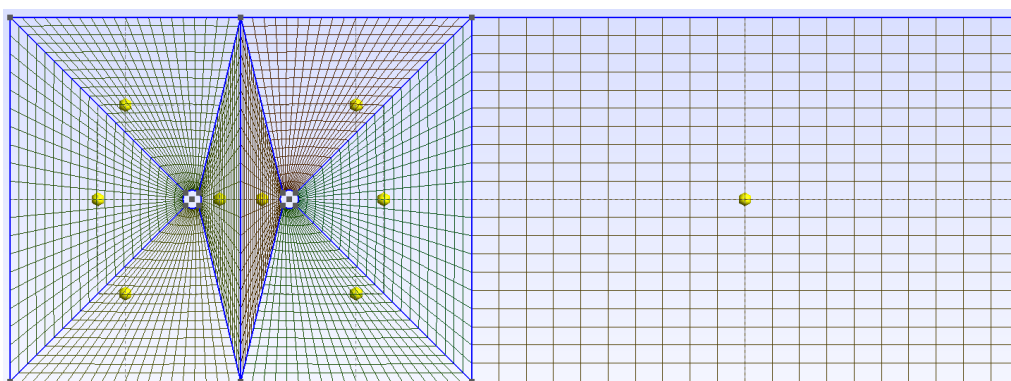
OpenFoam CFD simulazio tresnak sortu berri dugun geometria egoki irakurri dezan, ezaugarri bat bete behar du. Sorturiko gelaxka guztiak 6 aldez mugaturiko bolumenak izan behar dute 3D egituren kasuan, eta lau aldez mugaturiko azalerak 2D geometrien kasuan. Honi sareta egituratua deitzen zaio.

Gmsh programak geometriaren zuzen bakoitza zenbat aldiz zatikatu nahi den aukeratzea ahalbidetzen du. Ardatz berdineko zuzenei definituriko zatikatze kopuruak bat etorri beharko du, bestela sorturiko sareta amorfoa izango baita.



Irudia 4-14. Sareta egituratua eta amorfoa.

Beraz, hautaturiko geometriari sareta egituratu orokor baten ezaugarriak ematen bazaizkio, 4-15 irudian erakusten den itxura izango du. Dena den sareta honek zer desio uzten simulazio bati begira. Besteak beste gelaxkak era uniformean banaturik daude y ardatzean zehar, nahiz eta jakina den hurbiletik aztertu beharreko gunea zilindroen ingurukoa dela, hau da $y=0$ ardatza. Gelaxken tamaina bezalako ezaugarriak aldiz, simulatzeko behar dugun denbora eta konputagailuaren gaitasunaren arabera moldatu beharko dira.



Irudia 4-15. Bi zilindroen kasua azaltzen duen sareta orokortua.

4.3.2.1 Optimizazioa

Esan berri bezala, 4-15 irudian azaltzen den sareta, eredu orokortu bat da eta haren kalitatea hobetzeko xedearekin. Manipulazio hauen helburua gelaxka konzentrazioa zilindroen inguruan eta $y=0$ ardatzean ematea da, zilindroek sorturiko fluxuaren lortzeta, fenomeno aeroelastikoak, indarrak, etab. bertan garatuko baitira.

Saretan aldaketa hauek egiteko modu eraginkorrena Gmsh programak sortu duen .geo artxibora sartu eta bertatik artxiboaren *script* edo komandoak manipulatzeko izango da. Artxiboa ere antolatu eta ulertzen errazago batean mantentzeko ideia ona da aldagaiak parametrizatzea. Hala nola, lerro bakoitza banatu behar den zati kopurua eta gelaxken konzentrazioa adierazten duten aldagaiak.

```

3 Nx1 = 21; Rx1 = 1.00; 38 Line(1) = {2, 9};Transfinite Curve {1} = Nx1 Using Progression Rx1;
4 Nx2 = 21; Rx2 = 1.00; 39 Line(2) = {9, 17};Transfinite Curve {2} = Nx1 Using Progression Rx1;
5 Ny = 21; Ry = 1.00; 40 Line(3) = {17, 16};Transfinite Curve {3} = Nx2 Using Progression Rx2;
6 Nb = 21; Rb = 1.00; 41 Line(4) = {1, 8};Transfinite Curve {4} = Nx1 Using Progression Rx1;
7 Nc = 21; Rc = 1.00; 42 Line(5) = {8, 18};Transfinite Curve {5} = Nx1 Using Progression Rx1;
43 Line(6) = {18, 15};Transfinite Curve {6} = Nx2 Using Progression Rx2;

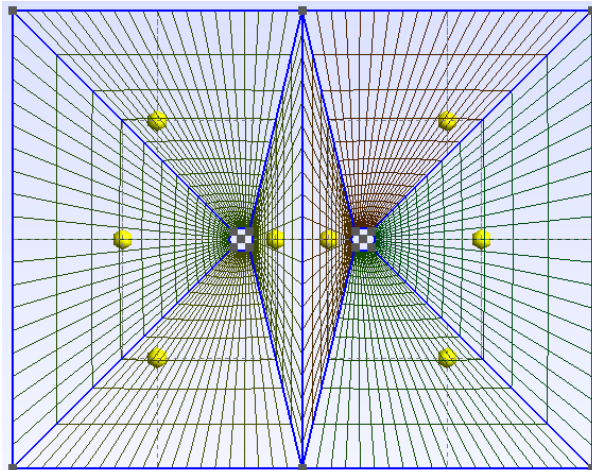
```

Irudia 4-16. Komandoen parametrizazioa.

4-16 irudiak azaltzen dituen komando lerroetan lerro bakoitzaren zatitzailea $Nx1$, $Nx2...$ parametroek adierazten dute, eta aldiz haien konzentrazioa determinatzeko $Rx1$, $Rx2...$ parametroak erabiltzen dira. Egitea komeni den aldaketa nagusiak bi dira.

- **$Rb < 1$:**

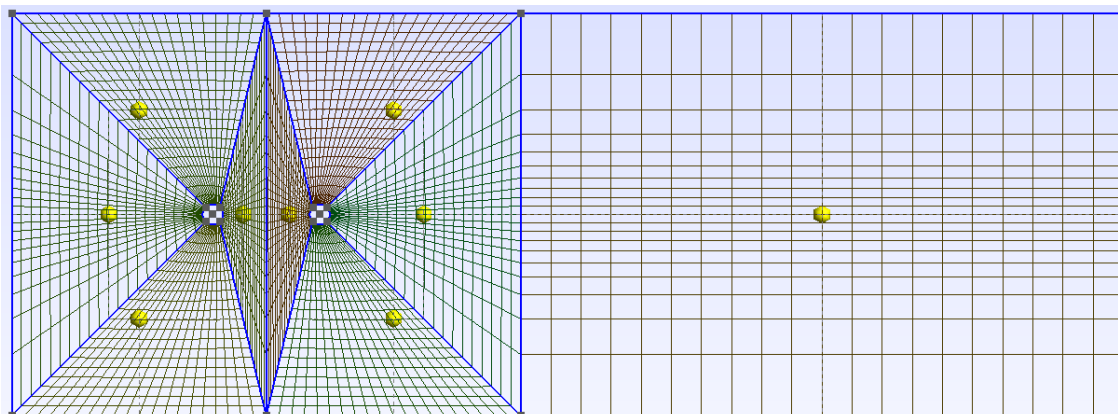
R parametroari 1 baina balio txikiagoa emanez, zuzenaren zati konzentrazioa uniformea izan beharrean, lerroaren alde batera orekatzen da. Rb parametroak zentroetatik inguruko laukizuzenera luzatzen diren lerro diagonalen konzentrazioa kontrolatzen du. Beraz parametro hau erregulatuz saretaren nodoak zilindroen inguruan kontzentratzea eragiten da, haien azalera murriztuz eta ingurune honetan kalkuluak zehatzago bihurtuz.



Irudia 4-17. Nodoen konzentrazioa zilindroen inguruan.

- **$Ry > 1$:**

Aldiz R parametroari 1 baina handiagoa den balio emanez gero, berriz ere gelaxken konzentrazioak uniformea izateari uzten dio. Kasu honetan aldiz gelaxkak zuzenaren zentroan kontzentratzen dira. Ry parametroak geometriari y ardatzean bertikalki kokatzen diren lau zuzenak kontrolatzen ditu. Beraz $Ry > 1$ eginaz saretako gelaxkak $y=0$ ardatzean batzen dira, ingurune honetako simulazioaren kalitatea areagotuz.



Irudia 4-18. Nodoen konzentrazioa $y=0$ ardatzean.

Optimizazioa eta aldi berean eskura dauden errekurtsoak kontuan izanik, ondorengo simulazioetarako lerro bakoitza 31 zati ezberdinetan banatzea erabaki da ($Nx1$, $Ny...$), $Nx2$ parametroa izan ezik 41 balioa hartuko duena. Konzentrazioei dagokienez $Rb=0.95$ eta $Ry=10.00$ balioak erabiltzea hautatu da. Konfigurazio honek z ardatzeko geruza bakoitza 17302 nodo edo gelaxkaz osaturik egotea eragingo du.

4.3.3 Eremua

Sareta sortu eta simulazio programara kargatu denean, bertan geometriako egitura bakoitzak izango dituen ezaugarriak definitu behar dira. Geometriaren egiturak sei multzo ezberdinetan banatzen dira:

- **Zilindroak:**

Sistemako oztopoak dira. Beraz, zilindroen gainazal osoan zeharreko fluxuaren abiadura hutsean finkatzen da. Honek mugalde geruzaren azalpenekin bat egiten du. Aldi berean, zilindroen gainazaleko presioa hutsean ezartzen da hasierako aldiunean, eta denboran zehar kalkulatzeko beharra adierazten da.

- **Sarrera:**

Sarrerako planoan haize abiadura konstante bat finkatzen da simulazioak irauten duen denbora tarte osorako. Konstante honen balioa jariakinari ezartzen zaion biskositatearen arabera izango da, helburua Reynolds zenbaki jakin bat finkatzea baita. Presioa aurreko kasuan bezala, hasierako 0 balioa ematen zaio eta ondoren kalkuluen arabera.

- **Irteera:**

Irteerako geruzan hasierako aldiunean hutsean ezartzen da haizearen abiadura, eta handik aurrera kalkulatu beharrekoa. Aldiz presioaren balioa hutsean finkatzen da geruza osoan simulazioak iraungo duen bitarte osorako.

- **Gainkalde eta azpialdea:**

Geruza hauek "labainkor" moduan ezartzen dira. Hau da hauekin kontaktuan fluxuak ez du erresistentziarik topatzen eta abiadura askez jarduten du. Aldi berean presioaren kalkulua burutzen da hasierako 0 balio batetik abiatuz.

- **Alboak:**

Geometriaren alboetako azalerak huts moduan izendatzen dira. Honek adierazten du sistemarentzat bertan ez dagoela hormarik.

4.4 KASUA

Sistemaren ezaugarri fisikoen arabera, fluxuaren izaera, geometria... simulazioaren prestakuntza era ezberdinean egiten da. Ebazpenerako modelo fisiko eta parametro eta aldagai fisiko ezberdinak erabiliz.

Aldaketa hauek, gehienbat fluxuaren izaera laminar ala turbulentuaren arabekoak dira. Ezarri den aldagai nagusienetako bat Reynolds zenbakia denez, haren espektra bi eremutan banatzen da eta bakoitzerako eredu ezberdin bat erabili.

Oinarri teorikoetan aztertu den moduan Reynolds zenbakiaren arabera zurrumbiloez izaera ezberdinak dituzte. Hau dela eta 3-24 irudian oinarriturik [25] eredu laminarra erabiliko da $40 < Re < 200$ tarterako eta aldiz turbulentiak kontuan hartzen dituen beste eredu bat $200 \leq Re$ eremurako.

4.4.1 Eredu laminarra

Fluxuak izaera antolatua duen kasua simulatzen du, non jariakinak geruzetan antolatutik jarduten duen. Eredu honen ebazpenerako *icoFoam* ebaztailea erabiltzen da honek fluxu laminar, isotermo eta konprimaekin simulatzen ditu.

icoFoam kasu baterako zehaztu behar den propietate fisiko bakarra Reynolds zenbakia da. Horretarako sorturiko geometriaren luzera karakteristikoaz gain, simulazioaren karpetan, fluxuaren abiadura (U) eta jariakinaren biskositate zinematikoa (ν) definitu behar dira 0 eta *transportProperties* artxiboetan.

4.4.2 Eredu turbulenta

Aldiz kasu turbulentuak partikulen mugimendu kaotiko bat aurkezten duen eredu simulatzen du. Reynolds zenbaki altuetarako sortua izan den *pisoFoam* ebaztailea erabiltzen da kasu hauen ebazpenerako. Tresna hau fluxu turbulentu, adiabatiko eta konprimaekin simulatzeko pentsatua dago eta denboraren menpeko problemak askatzen ditu.

Simulazioak butzean turbulentzia denboran eta espazioan zehar, eremuko balioen aldaketa kaotiko moduan definitzen da.

Eredu turbulentu batean eta *pisoFoam* tresna erabiliz bi ekuazio ezberdin dira ebazten direnak. Jarraitasun ekuazioa da lehena, honek fluxua konprimaekin dela adierazten du, abiaduraren dibergentzia zero eginaz. Aldiz bigarrena momentuen ekuazioa da, denboran zehar sortzen diren indarren momentuak deskribatzen dituena eta osagai turbulenta ere atxikirik duena [30].

$$\nabla \cdot U = 0$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot (UU) = -\frac{1}{\rho} \nabla \bar{p} + \nabla \cdot \nu [2S] + F_t$$

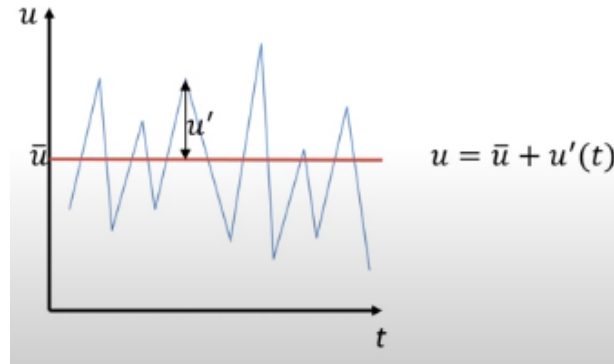
Ekuazioa 4-3. Jarraitasun eta momentuen ekuazioak [30].

Fluxu turbulentuaren problema ebazterakoan hurbilketa fisiko bat baina gehiago daude. Hurbilketa hauen guztien arteko ezberdintasuna biskositatearen kalkuluan datza.

4.4.2.1 RANS modeloa

Hurbilketa fisiko honek *Reynolds Averaged Navier Stokes* (RANS) du izen osoa.

Eredu honetan denboran zehar espazioko puntu batean izan daitezkeen abiadura balioen oszilazioak mespretxatzen dira eta puntu horretako abiaduraren balioa konstante gisara hartzen da.



Grafikoa 4-1. Denboran zeharreko abiadura oszilazioak puntu batean [30].

Oszilazioa hauek mespretxatzean errore bat sortzen da. Errore hori beste elementu bat kontuan izanik orekatzen da RANS modeloan. Elementu berri hau biskositate turbulentua da. Hau ez da magnitude fisiko erreal bat, simulazioko modeloan sortzen dena baizik. Biskositate turbulentuak, abiadura oszilazioak alde batera uztean ezabatzen diren energia garraio eta disipazioak modelizatzen ditu.

Elementu berri honen gehikuntza dela eta biskositate efektibo bat erabiltzen da simulazioak burutzeko, biskositate zinematikoa eta turbulentuaren arteko gehiketa bat dena.

$$\nu_{eff} = \nu + \nu_t$$

Ekuaioa 4-4. Biskositatearen osagai fisikoa eta turbulentua.

Biskositate turbulentua $k-\varepsilon$ ereduaren bidez kalkulatu da. Horretarako hasierako aldiunean bi parametro gehitzen zaizkie abiadura eta presioari. Lehena k energia zinetiko turbulentuaren adierazle da eta bigarrena ε disipazio turbulentuaren erakusle.

$$\nu_t = 0.09 \cdot \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Ekuaioa 4-5. Biskositate turbulentuaren kalkulua.

4.4.2.2 LES modeloa

Bestalde *Large Eddy Simulation* (LES) ereduaren ez dira abiaduraren oszilazio guztiak mespretxatzen, baizik eta paso baxuko iragazki bat ezartzen dela.

Era honetara eskala handiko dibergentziak simulatu egiten dira eta aldiz eskala baxuak modelizatu. Horretarako luzera eta denbora muga batzuk ezartzen zaizkio iragazkiari. Iragazkiaren luzera iragazkia Δ eta denbora iragazkia τ_c dira.

$$\overline{\Phi(\mathbf{x}, t)} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\mathbf{x}', t') G(\mathbf{x} - \mathbf{x}', t - t') dt' d\mathbf{x}'$$

Ekuaioa 4-6. Eskala baxuko modelizazioa [30].

Kasu honetan ere biskositate fisiko eta modelizaturaren batura den biskositate efektibo bat erabiltzen da. Biskositate berri honi *Sub Grid Scale* deritzo. Haren kalkulua k turbulentiaren energia zinetikoa erabiliz burutzen da.

$$\begin{aligned} v_{eff} &= \nu + \nu_{sgs} \\ \nu_{sgs} &= 0.094 \cdot \Delta \cdot \sqrt{k} \end{aligned}$$

Ekuazioa 4-7. Biskositate eraginkorra LES modelorako [30].

4.4.2.3 k - ϵ modeloa

k - ϵ modeloa CFD simulazioetan turbulentiak deskribatzeko erabiltzen den modelorik ohikoena da. Bi ekuaziodun eredua da, adieraziz bi garraio ekuazio gehiago atxikiri dituela fluxuaren ezaugarri turbulentuak deskribatzeko helburuz. Honek, k - ϵ modeloari energia turbulentuaren konbekzio eta difusioa bezalako fenomenoak deskribatzea ahalbidetzen dio.

Beste eredu batzuk ez bezala, hau energia zinetiko turbulentuari dagozkion mekanismoetan zentratzen da. k - ϵ modeloa osatzen duten ekuazioek hainbat parametro ezezagun eta neurtu ezin barneratzen dituzte. Hori dela eta, helburu praktikotarako k - ϵ modelo estandarra deiturikoa erabiltzen da, Launder eta Spaldingek 1974. urtean zehaztua. Era honetara ezezagunak murriztu eta hainbat aplikazio dituen eredu bat lortzen da.

Hona hemen hurrenez hurren, k energia turbulentu zinetikoa eta ϵ disipazioa deskribatzen dituzten garraio ekuazioak:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \epsilon \\ \frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \\ \mu_t &= \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \end{aligned}$$

Ekuazioa 4-8. k eta ϵ aldagaien ekuazioak [31].

u_i : fluxuaren abiadura dagokion norabidean.
 E_{ij} : deformazio abiaduraren adierazle.
 μ_t : biskositate turbulentu

Ekuazioetan agertzen diren konstanteen balioak hainbat egoera ezberdinetan konstanteen moldaketa eta iterazioen bidez lortu dira.

$$C_\mu = 0.09 \quad \sigma_k = 1.00 \quad \sigma_\epsilon = 1.30 \quad C_{1\epsilon} = 1.44 \quad C_{2\epsilon} = 1.92$$

Ekuazioa 4-9. Konstanteen balioak [31].

4.5 KONTROLA

OpenFoam programan simulazioaren kontrola *controlDict* izeneko fitxategiaren bitartez egiten da. Artxibo hau behar bezala definitzea berebizikoa da simulazioaren zehaztasuna eta zein emaitza jasoko diren zehazten bait ditu.

Zein gainazalen indar eta indarren koefiziente kalkulatu nahi diren ere, atal honetan adierazten da, aurrez sortu diren gainazalen denominazioak erabiliz. Indarrak emaitzaren *output* gisara eskatzean programak kalkuluetan erabili behar dituen azalera eta luzera karakteristikoak ezartzen dira.

Simulazioaren denbora kontrolatzeko zenbait parametroren balioak erabiltzen dira, hauetako gehienak izenaren bidez ulertzeko moduak dira eta helburua talde osoaren egokitzapena da eta ez indibiduala:

startTime: simulazioa zeinaldiunetatik hasi nahi dugun adierazten du. Zenbaitetan aurrez datuak bildurik egoten dira ala simulazio zatikatzen da konputagailuaren gaitasuna dela eta. Kasua hasieratik ebatzi nahi bada (ohikoena) 0 izango da balioa.

endTime: simulazioa amaitzea nahi dugun aldiunea.

deltaT: iterazioen artean uzten den denbora, parametro hau giltzarria bilakatzen da askotan. Simulazioaren zehaztasunaren adierazle garbia da.

writeInterval: iterazioen bidez lortu den informazioa zenbateko maiztasunaz grabatu nahi den simulazioaren fitxategietan. Datuen bistaratzeak izango duen zehaztasuna adierazten du.

maxCo: onartuko den Courant zenbakiaren balio maximoa, iterazioen batean Courant zenbakiaren balio hau gainditzen bada, simulazio geldituko da, emaitza baliogabetuz.

4.5.1 Courant zenbakia

Courant zenbakia, Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) baldintzatik eratorritako parametroa da. Uhin fenomenoak modelizatzen dituzten metodo numeriko ezegonkorren egonkortasunerako baldintza da. Nahiz eta lehen aldiz 1928. urtean argitaratutako artikulu batean aipatu izan, gaur egun ere CFD tekniketarako influentzia gehien izan duen lanetako bat kontsideratzen da.

CFL baldintzak adierazten duena da edozein informaziok (uhin) iterazio batean bidaiatzen duen distantziak, saretako nodo batek adierazirik distantzia baina baxuagoa izan behar duela. Beste modu batera adierazirik iterazio batek irauten duen denboran, informazioa soilik nodo batetik haren alboan daudenetara igaro daitekeela eta ez haratago [32].

Iterazioaren denbora uhinak zelda hori igarotzeko behar duena baina luzeagoa bada, simulazioan lorturiko informazioa okerrekoa izango da, kalkuluak burutzean uhina, eta harekin informazioa, jada ez bait zegoen helburuko zeldan. Beraz edozein uhin fenomeno simulatzen den kasurako Couranten zenbakiak $Co \leq 1$ izan beharko du.

$$Co = U \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x}$$

Ekuazioa 4-10. Courant zenbakiaren ekuazioa [32].

Non U uhinaren abiadura den eta, Δt eta Δx denbora eta posizio aldaketak.

5 EMAITZA

Atal honetan simulazioen bitartez lorturik datuak aurkeztuko dira, horretarako simulazioen argazkiak eta datuen grafikak erabiliz. Helburu hau betetzeko ParaView eta Matlab softwareak baliatu dira. Simulazioak garatzerako orduan datu zehatzak eman behar izan zaizkio OpenFoam programari.

Altuera:

Mastaren altuerari dagokionez 0,05 [m]ko altuera mugatzea erabaki da, honek y ardatz osoaren sekzio minimo bat simulatzea ahalbidetzen du, kasua soilik bi dimentsiotara bihurtuz. Erabaki hau konputagailuaren gaitasunagatik hartua izan da, errekurtsioak gehiago izanez gero, simulazio konplexuagoak burutu ahalko lirateke.

Dimetroa:

Egitura zilindrikoaren diametroa 0,1875 [m]tan ezartzea erabaki da. Balio hau Sarkar eta Agrawak [29], haien ikerkuntza artikuluan proposaturiko ereduaren batz besteko diametroa da, mastaren altueraren erdibidean topatzen dena. Diametro hau konstante mantenduko da eredu guztietan.

Dentsitatea:

Jariakinaren dentsitatea zehazteko, urte oso batean (2018) zeharreko datu meteorologikoak bildu dira, Donostiko aireportuan dagoen estazioak bildutakoak. Datu hauen batz-besteko bat eginaz urtean zeharreko airearen dentsitatearen hurbilketa lortu da 1,235 [kg/m³].

Reynoldsen zenbakia:

Reynoldsen parametroa zehazteko soilik bi parametro geratzen dira beraz, biskositatea eta haizearen abiadura. Honetaz, haizearen sarrera abiadura kasu guztietan konstante mantentzea erabaki da 1 [m/s] eta aldiz biskositatea baliatuko da desio den Reynolds zenbakia definitzeko.

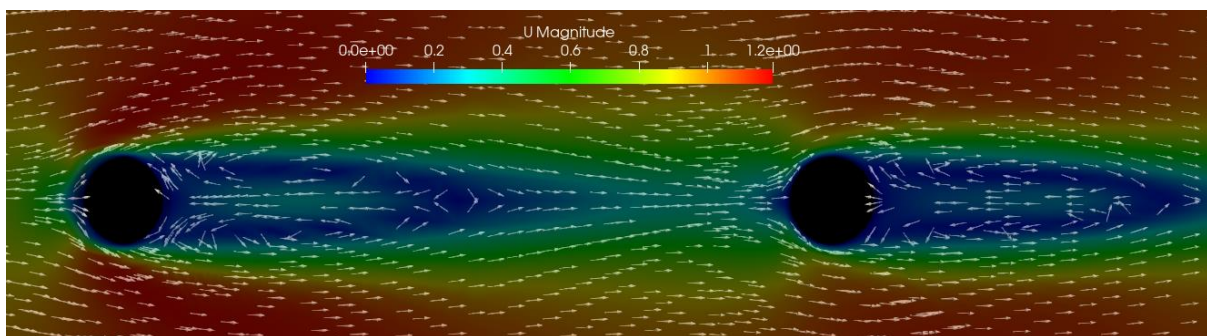
Beraz, 4.1.1 atalean azaldu den moduan, Reynoldsen zenbakia eta bi zilindroen zentroen artean utziriko distantzia izango dira kasu ezberdinak ezartzeko aldagaiak. Hainbat egoera ezberdin simulatuko dira *wake galloping* fenomenoaren eragina ikusi eta fluxuaren izaera laminarra eta turbulenta deneko kasuak aztertzea interesgarria baita. Honako taula jarraituko da beraz simulazioak egitean.

Luzera/Reynolds	60	100	200	300
4·D				
5·D				
6·D				
7·D				
8·D				
10·D				
15·D				
20·D				
25·D				

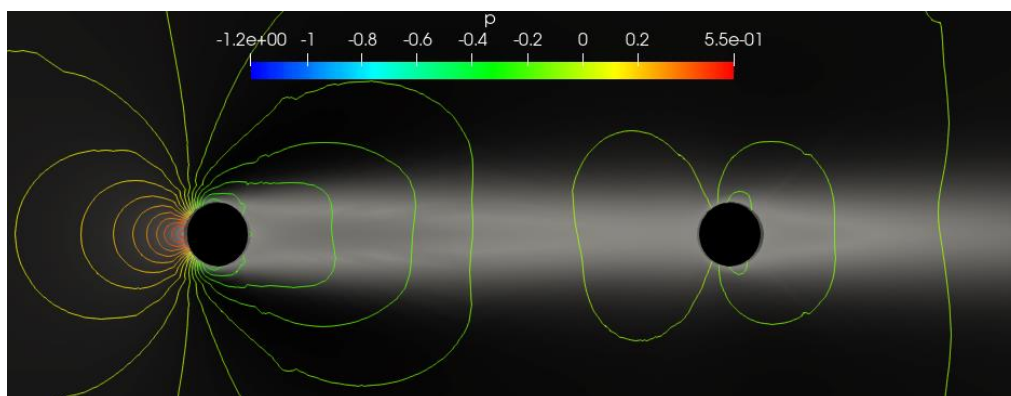
Taula 5-1. Simulazioen balio eskema.

Proiektua burutzerako garaian, nahikoa datu eta kasu aztergai izateko helburuarekin, 36 simulazio ezberdin burutu dira, bakoitza bere ezaugarriekin. Kontuan izanez gero kasu bakoitzaren simulazioak 90 bat minutu hartzen dituela, guztira 3240 minutu behar izan dira simulazio guztiak burutzeko. Zehaztasun handiagoko emaitzak nahi izanez gero, konputagailuaren lan denbora asko handitu beharko litzateke.

Simulazioen emaitzak bi erataria lortzen dira. Batetik, *ParaView* softwarearen bidez ireki eta landu daitezkeen artxibo bisualak daude. Nolabait esaterako hauek simulazioaren iterazio bakoitzean lortzen diren saretaren argazkiak dira, fluxuaren ezaugarri ezberdinak geometrian duten banaketa era grafiko batean adieraziz. Programa honen bitartez, presio altu eta baxuko puntuak identifika daitezke baita mugalde geruzaren portaera ere denboran zehar. Gainera, saretako nodo bakoitzean fluxuak duen norabide eta noranzkoa (5-1 irudia) ala iso ezaugarri lerroak (5-2 irudia) ebazteko gai da.



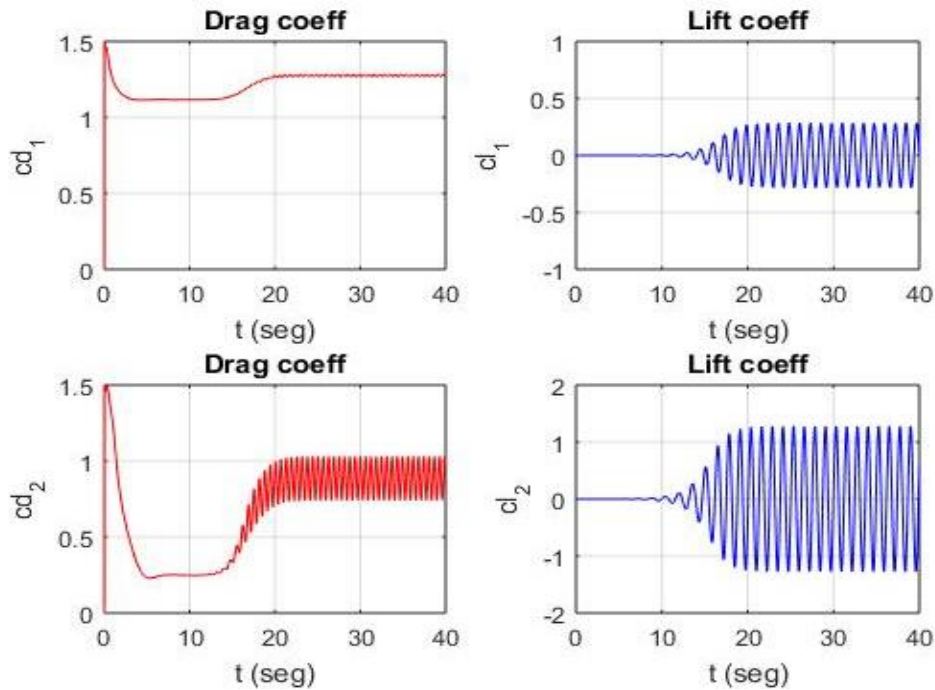
Irudia 5-1. Fluxuaren norabidea adierazten duten bektoreak.



Irudia 5-2. Lerro isobaroak geometriaren saretan.

Bestalde, *OpenFoam* programak, hala agindu zaionez, iterazio bakoitzean bi zilindroen gainazalek jasaten dituzten indarrak eta haien koefiziente aerodinamikoak jaso ditu datu artxibo batean. Datu hauek eskala oso handian metatuak direnez, *Matlab* softwarearen bidez tratatzen dira denboran zeharreko grafikoak sortuz. Indar aerodinamikoak, hainbat faktoreren menpe daudenez, 3-36 ekuazioan adierazten den moduan, esanguratsuagoa da koefiziente aerodinamikoaren grafikoak egitea.

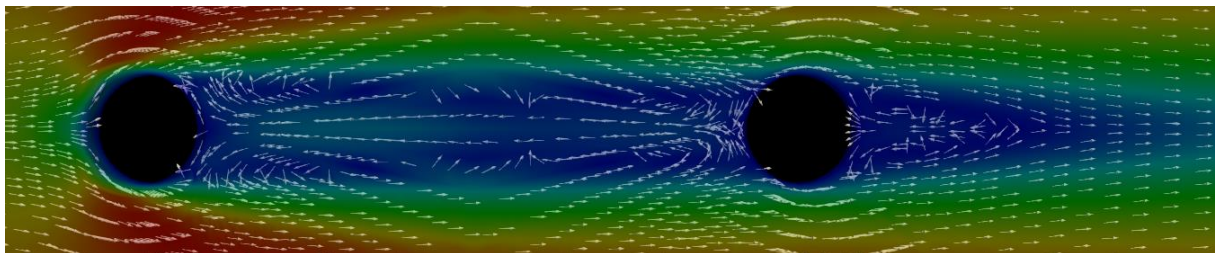
5-1 grafikoak simulazioak irauten duen denboran zehar bi zilindroek jasan dituzten indar aerodinamikoaren koefizienteak azaltzen ditu, lehen lerroan haizealdera dagoen egiturarenak eta bigarren lerroan aldiz, haizebera kokaturiko zilindroarenak. 5-1 grafikoak elkarrekiko 6 diametroko distantziara dauden zilindroak eta 100eko Reynoldsen balioa duen kasua deskribatzen du.



Grafikoa 5-1. $L=6D$, $Re=100$. Kofiziente aerodinamikoak.

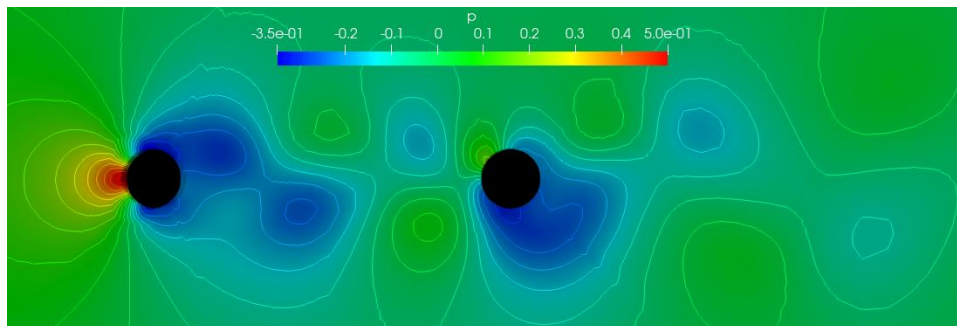
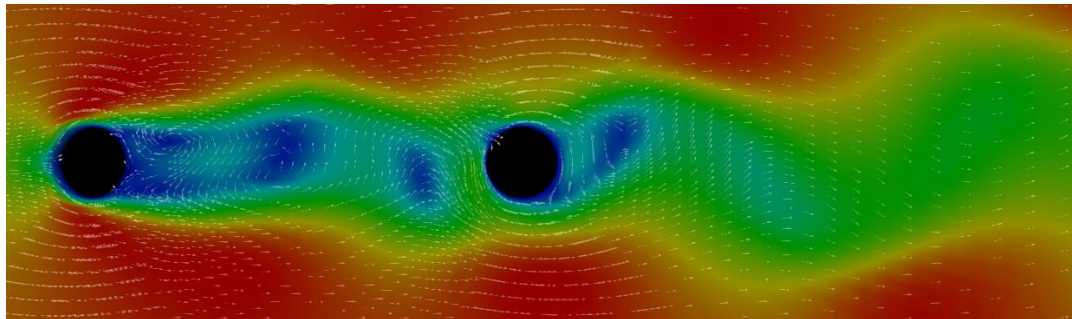
Grafikoaren lehen segunduak, mespretxagarritzat hartzen dira. Izan ere, segundo gutxi horietan, *drag* kofizienteak oraindik egonkoratu ez denean, fluxuaren abiadura oraindik saretan zehar zabaltzen ari da eta honek ez du egoera erreal bat adierazten.

Hortik haratago grafikoa hiru eremu ezberdinetan bana daiteke, haietan sistemak hartzen duen portaeran oinarrituz. Lehen tartean ez dago esekidura indarrik eta erresistentzia indarra balio minimoan mantentzen da era egonkorrean. Honen arrazoia zilindroen haizebera bi zurrumbilo simetrikoko eta egonkor sortzen direla da, honen ondorioz presio banaketa $x=0$ ardatzarekiko simetrikoa da eta ez dago esekidura indarra sortuko duen indar barikorik.



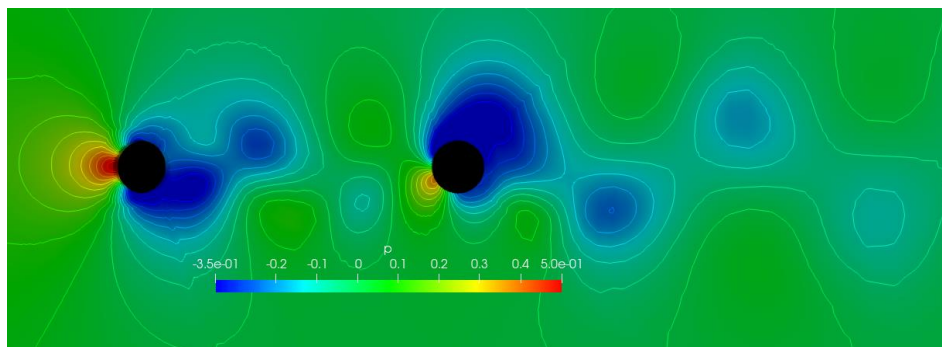
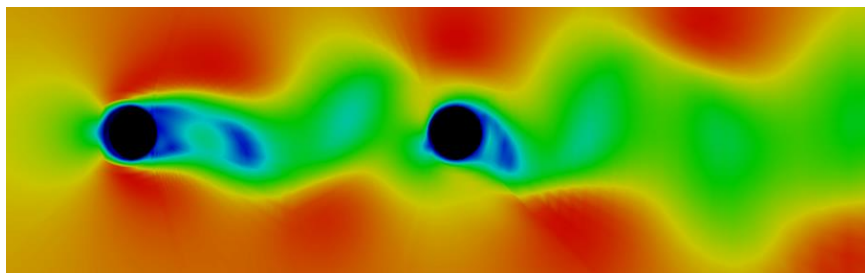
Irudia 5-3. $L=6D$, $Re=100$ fluxuaren noranzkoa eta presio banaketa $t=10$ aldiunean.

Jarraian, une jakin batean zilindroek haizebera dituzten zurrunbiloak desorekatzen hasten dira apurka. Honek zurrunbiloen jaregitea eragiten du, geroz eta presio ezberdintasun handiagoak sortuz zilindroen bi aldeetan. Ondorioz, esekidura indarrak era gradual batean azaltzen hasiko dira, *lift* koefizientea 0 ardatzaren inguruan oszilatzen hasten delarik. Modu berean, erresistentzia indarra ere handitzen hasiko da.



Irudia 5-4. $L=6D$, $Re=100$ fluxuaren abiadura eta presio banaketa $t=16$ aldiunean.

Azkenik, zurrunbiloak era konstante batean jaregingo dira. Honela, esekidura koefizienteak balio positibo eta negatibo simetriko eta konstante batzuen artean oszilatuko du. Antzeko zerbait gertatuko da erresistentzia indarrarekin, balio konstante baten inguruan oszilatuko baitu tarte honetan.



Irudia 5-5. $L=6D$, $Re=100$ fluxuaren abiadura eta presio banaketa $t=23$ aldiunean.

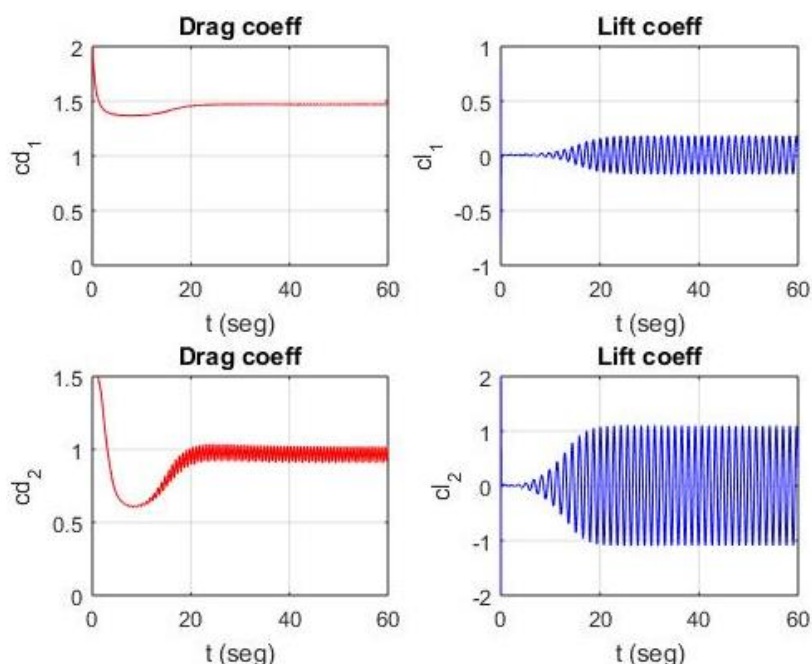
Aztertu berri den kasuan, lehen eta bigarren zilindroen koefiziente irakurketen artean aldea egoteko arrazoia saretan duten kokapena da. Bigarren zilindroa lehenaren lorratzean kokaturik dago, haizebera. Beraz, lehenaren lorratzean sorturiko formazio aeroelastiko guztiek bigarren zilindroaren gainazalean eragina dute.

Hasteko eta behin, lehen zilindroaren lorratzak, bigarrenaren haizealdean presioa nabarmen baxuagoa izatea eragiten du. Ondorioz 3.5.5 atalean azalduko erresistentzia presioa baxuagoa da, lehen zilindroarekin alderatuz erresistentzia koefizientearen jaitiera bat eraginaz. Gainera, azaldu berri den 5-1 grafikoak hirugarren eremu honetan, lehen zilindroaren lorratzean jaregindako zurrumbiloez presio aldaketa periodikoak sortzen dituzte bigarren zilindroaren gainazalean, erresistentzia koefizientearen oszilazioak eraginaz.

Bestalde, 3.5.4 atalean azaldu moduan, lehen zilindroaren lorratzean jaregindako zurrumbiloez, bertan partikulen abiadura altuagoa denez, presio baxuko gune gisara jarduten dute. Zurrumbilo hauek bigarren zilindroaren ingurutik igarotzean, presio ezberdintasun are eta bortitzagoak sortuko dituzte bigarren zilindroaren y ardatzean, esekidura indarren oszilazioak lehenengo zilindroaren kasuan baina handiagoak izatea eraginaz. Fenomeno hau, oinarri teorikoetan azaldu moduan, *wake galloping* moduan ezaguna da eta zilindroen artean $3\cdot D$ eta $6\cdot D$ arteko distantzia dagoenean agertu beharko luke.

5.1 GERTAERAK

Dena den, burutu diren simulazio guztien emaitza gisara, bistakoa da *wake galloping*aren fenomenoa ez dela soilik oinarri teorikoetan azalduko bi zilindroen arteko distantzia horietara mugatzen, baizik eta espektrio zabalago batean lan egiten duela. Horren argibide da elkarrekiko 10 diametroko distantziara kokaturiko bi zilindroen indar koefizienteak azaltzen dituen 5-2 grafikoa.



Grafikoa 5-2. $L=10D$, $Re=60$. Koefiziente aerodinamikoaren grafikoa.

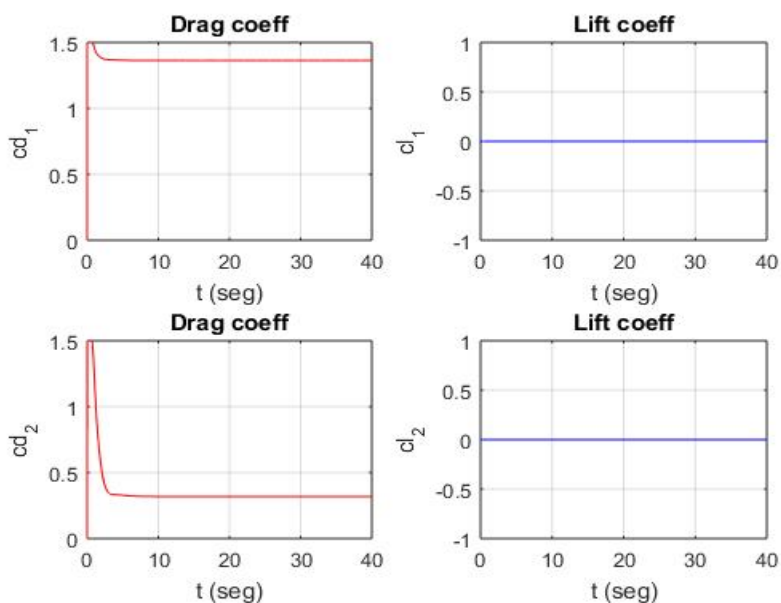
Nahiz eta 5-2 grafikoan azaltzen diren bi zilindroen zentroak elkarrekiko 1,875 [m] tara kokaturik egon, bigarren zilindroak aurkezten duen esekidura koefizientearen oszilazioek, anplitude handiagoa dute lehen zilindroaren kasuan baino. Hau lehen zilindroak sorturiko zurrunbiloek adierazten dituzten presio baxuko guneek, bigarren zilindroko zurrunbilo jaregitearen efektua areagotzen dutelako gertatzen da.

Topatu den beste gertaera bat da, bi zilindroen zentroak elkar aldentzean, zilindroen lortatzean agertzen diren zirimolen arteko desorekak lehenago gertatzen direla, jaregite fenomeno eta indarren oszilazioak azkarrago emanez.

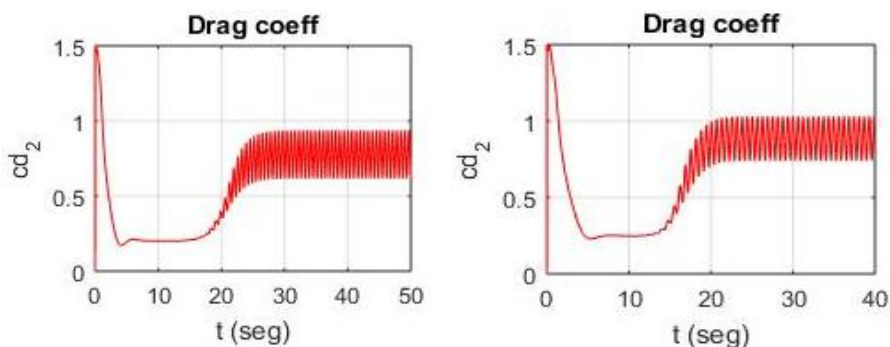
Era berean, $L=5D$ $Re=60$ (ikus 5-3 grafikoa) kasuan ez da oszilaziorik ematen; aldiz $L=10D$ $Re=60$ (ikus 5-2 grafikoa) koefiziente aerodinamikoaren oszilazioak agertzen dira. Kontuan harturik kasu batetik bestera Reynoldsen zenbakia mantentzen dela, ebatzi daiteke oszilazioen agerpena eragiten duen faktorea zilindroen zentron arteko distantzia dela.

Horretaz gain, L parametroa handitzean, bigarren zilindroaren gainazalean neurtzen den erresistentzia indar aerodinamikoaren igoera bat espero zen. Lehen zilindroak sorturiko lortatza geroz eta urrunago izatean, bigarren zilindroaren haizealdera presioak geroz eta handiagoa izan beharko luke, erresistentzia presioaren balioa geroz eta nabarmenagoa bihurtuz.

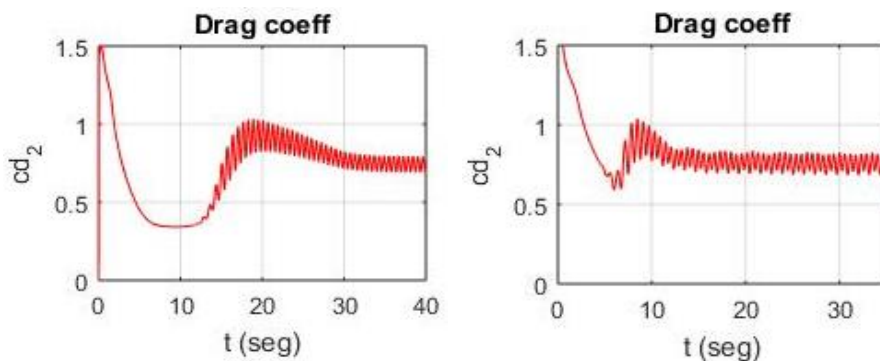
Espero zenaren aurka soilik $5D \rightarrow 6D$ kasuen artean ageri da erresistentzia presioaren gorakada bat 5-4 grafikoan erakusten den moduan. Eta hortik aurrera L distantzia handitzean erresistentzia indarraren balioa berriz ere jaisten da 5-5 grafikoak adierazten duen bezala.



Grafikoa 5-3. $L=5D$, $Re=60$. Koefiziente aerodinamikoaren grafikoa.

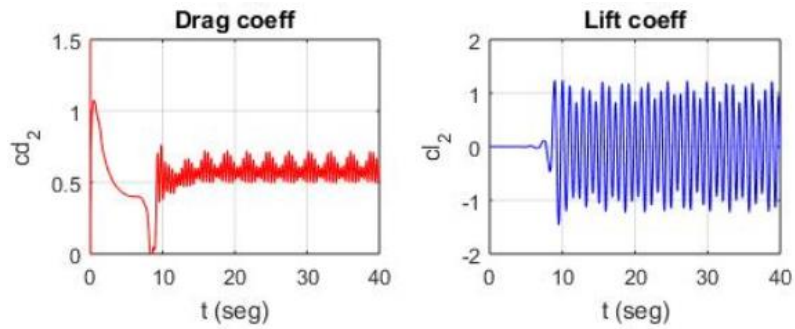


Grafikoa 5-4. $L=5D$ eta $L=6D$, $Re=100$. Kasuetan bigarren zilindroak jasandako erresistentzia koefizienteak.

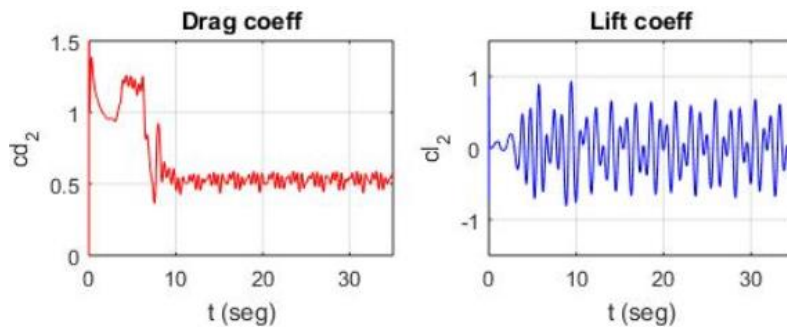


Grafikoa 5-5. $L=8D$ eta $L=10D$, $Re=100$. Kasuetan bigarren zilindroak jasandako erresistentzia koefizienteak.

Horretaz gain, zenbait kasutan esekidura koefizientearen oszilazio ezegonkorak antzeman dira bigarren zilindroaren gainazalean. Desbideratze hau, lehen aldiz zentroen arteko distantzia $7D$ eta Reynolds zenbakia 300 den kasurako antzeman da, desbiderapenak nahiko txikiak (ia mespretxagarriak) direlarik. Kasu hau 5-6 grafikoan agertzen dena da. Aldiz, oszilazioen anplitude artean topatu diren alderik bortitzenak $20D$ ko distantzia eta Reynolds zenbakia 300 duen kasuan agertu dira, 5-7 grafikoan adierazia.

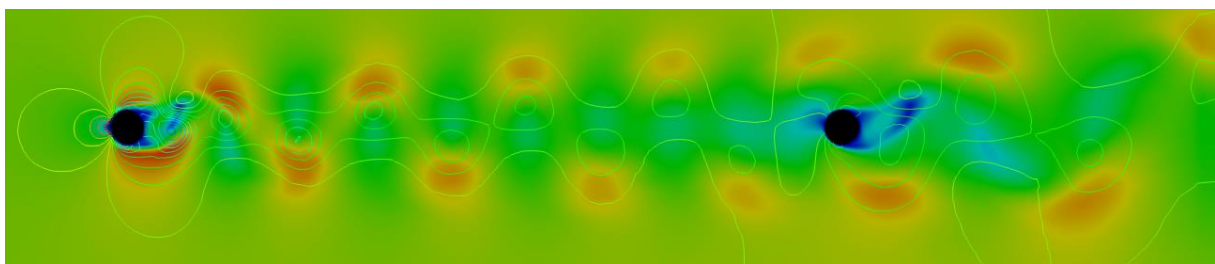


Grafikoa 5-6. $L=7D$, $Re=300$. Oszilazio ezegonkorak.



Grafikoa 5-7. $L=20D$, $Re=300$. Oszilazio ezegonkor nabariak.

Bistakoa denez, bi kasu hauek ez dira isolatuak. Zilindroen arteko distantzia eta Reynolds zenbakiaren balio handitzean, oszilazioen anplitudeen arteko aldeak ere handitzen dira. Gainera, ez da soilik esekidura indarrari eragiten dion zerbait, baizik eta erresistentzia indarraren koefizientearen ere eragina duela. 5-6 grafikoari erreparatuz, badirudi erresistentzia koefizientearen anplitude balioa periodikoki handitu eta txikitzen dela.



Irudia 5-6. $L=20D$, $Re=300$. Abiaduraren banaketa eta lerro isobarikoak.

Nahiz eta oinarri teorikoek lortzaren eragina soilik distantzia tarte batera mugaturik dagoela adierazten duten, 5-6 irudiak frogatzen du, zilindroen arteko distantzia $20D$ den kasuetan ere, lehen egituraren lortzak bete-bete harrapatzen duen bigarren zilindroa.

6 ONDORIOAK

Proiektu honetan burutu diren saiakera eta simulazioetan lorturiko emaitzak ez dira inondik inora esperotakoak izan. Kasu ezberdinetan neurtu diren indarrek eta datuek harturiko portaerak intuizioaren aurkakoak direla esan daiteke.

Batetik, zentzuduna dirudi, fluxuaren norabidean bata bestearen atzean jarritako bi zilindroetariko bigarrenak erresistentzia koefiziente baxuagoa azaltzea espero izatea. Era berean eta pentsamolde berarekin jarraituz, erresistentzia indarraren adierazle den koefizientearen balioa handitu beharko litzatekeela dirudi zilindroen arteko distantzia handitzean. Izan ere pentsatzen da distantzia handiagoa izatean haien artean, lehen zilindroaren lorratzak bigarrenaren gainazalean duen eragina murriztu beharko litzatekeela.

Aldiz, simulazioen emaitzek ez dute logika hau jarraitzen inongo unetan. Bigarren zilindroak jasaten dituen erresistentzia indarrak ez dira inongo unetan lehenak jasaten dituenaren parekoak. Balio oso baxuetan mantentzen da beti eta nahiz eta sareta eredu berriak eratzean, zilindroen arteko distantzia handitu; ez dirudi inongo kasutan bi zilindroen erresistentzia koefizientearen balioa berdinduko denik.

Esekidura indarraren azterketa egitean, emaitzak espero zirenak ez oso bestelakoak izan dira. Zilindro baten lorratzak bestean duen eragina simulatzen denez, *wake galloping* fenomenoaren agerpena espero zen. Dena den, fenomeno honen agerpena Matsumotok [26] adierazten duen $3D \rightarrow 6D$ distantzia tartera mugatzea espero zen. Horren ordez, $20D$ kasuan ere bigarren zilindroak aurkezten duen esekidura koefizientea lehenak duena baina askoz handiagoa da, haizealdera duen zilindroaren lorratzak eraginda.

Gainera, esekidura koefizientearen anplitudearen balioa murriztu dela dirudienean, are eta emaitza okerragoa da jasotzen dena. Oszilazioak ezegonkortu egiten dira kasu horietan, indarren anplitudeak aldatu egiten baitira denboran zehar. Oszilazio bortxatuen eskema jarraituz, honek sistemaren oszilazioetan anplitude aldakor bat izatea eragingo du.

Nahiz eta energia sorkuntzaren ikuspuntutik, hauek berri onak diruditen, ez da ematen duen bezain arrosa kolorekoa. *Wake galloping* fenomenoak eragindako esekidura koefizientearen anplitude handiago batek, oszilazio bortitzagoak adierazten ditu, batetik haizetik energia gehiago xurgatuz, baina bestetik, materialaren nekadura handiagoa sortuz eta bide horretan egituraren bizi iraupena laburtuz.

Ez da lortu proiektuaren helburua zen zilindroen arteko distantzia egoki bat definitzea. Simulazioen emaitzek adierazten baitute haizealdera dagoen egituraren lorratzak duen eragina ez dela distantzia arrazoidun baten barnean murrizten.

Baliteke emaitza hauen arrazoia simulazioen zehaztasun falta izatea. Bai eredu zientifikoa gaizki hautatu delako; zein, errekurtsio faltagatik sareta sinplifikatzean ezinbestekoak diren ezaugarriak ezeztatu direlako. Dena den, proiektu hau burutzean, 36 kasu ezberdin simulatu dira, honek esan nahi du guztira konputagailuak 3.240 minutu inguru igaro dituela simulazio hauek prozesatzen.

7 ITURRIAK

- [1] "World Population: Past, Present, and Future". Worldometer. Web orria: <https://www.worldometers.info/world-population/> (eskuratuta 2020ko Martx. 25).
- [2] "La edición número 21 del Observatorio Mundial de los Mercados de la Energía profundiza en los mercados de electricidad y gas de Norte América, Europa, Australia, sudeste de Asia, India y China". World Energy Markets Observatory (WEMO). Web orria: <https://www.capgemini.com/es-es/world-energy-markets-observatory-2019/> (eskuratuta 2020ko Martx. 25).
- [3] "Evolución de la generación renovable y no renovable". Red Eléctrica de España (REE). Web orria: <https://www.ree.es/es/datos/generacion/evolucion-renovable-no-renovable>
- [4] "Historia de la energía eólica". Ekidom. Web orria: <http://www.ekidom.com/historia-de-la-energia-eolica> (eskuratuta 2020ko Martx. 25).
- [5] "Aerogenerador vertical". Renovables Verdes. Web orria: <https://www.renovablesverdes.com/aerogeneradores-verticales/> (eskuratuta 2020ko Martx. 25).
- [6] "Haliade-X 12 MW offshore wind turbine platform". GE Renewable Energy. Web orria: <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/offshore-wind/haliade-x-offshore-turbine> (eskuratuta 2020ko Martx. 25).
- [7] "Desventajas de la energía eólica: ¿qué aspectos inciden en ella?". Twenergy. Web orria: [https://twenergy.com/energia/energia-eolica/desventajas-de-la-energia-eolica/#Desventajas de la energía eólica que aspectos inciden en ella](https://twenergy.com/energia/energia-eolica/desventajas-de-la-energia-eolica/#Desventajas%20de%20la%20energia%20eolica%20que%20aspectos%20inciden%20en%20ella) (eskuratuta 2020ko Martx. 25).
- [8] D. Yáñez, "Vortex green paper". 2018/06/07. Vortex Bladeless SL. Web orria: <https://vortexbladeless.com/es/?s=green+paper>
- [9] Vortex Bladeless SL. Web orria: <https://vortexbladeless.com/es/> (eskuratuta 2020ko Martx. 28).
- [10] M. A. Sánchez eta R. Atienza, "Nuevo concepto de generación eólica. Aerogenerador sin palas por vorticidad". 2017. Universidad Alfonso X El Sabio (UAX). Web orria: https://revistas.uax.es/index.php/tec_des/article/view/1182/970
- [11] E. Azadi Yazdi, "Nonlinear model predictive control of a vortex-induced vibrations bladeless wind turbine". 2018. Web orria: <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aac0b6>
- [12] J. Kim Vandiver, "Damping Parameters for flow-induced vibration". 2012. Massachusetts Institute of Technology (MIT).
- [13] A. Franco, "Física, Oscilaciones". Euskal Herriko Unibertsitatea (EHU), Gipuzkoako Ingenieritza Eskola (GIE), Eibarko Atala. Web orria: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/oscilaciones/portada.html>

- [14] I. Leiaristi Egaña, "Energiaren Ekoizpen-Sistemak Erresonantziaren Eskutik", GRAL. Euskal Herriko Unibertsitatea (EHU), Gipuzkoako Ingenieritza Eskola (GIE), Eibarko Atala. 2019.
- [15] "Oscilador Forzado y Resonancia". Euskal Herriko Unibertsitatea (EHU). Web orria: <http://www.ehu.eus/acustica/espanol/basico/osfoes/osfoes.html>
- [16] J. L. Osa Amabilia, "Estatika eta Materialen Erresistentzia". 2019. Euskal Herriko Unibertsitatea (EHU), Gipuzkoako Ingenieritza Eskola (GIE), Eibarko Atala. Web orria: <https://web-argitalpena.adm.ehu.es/listaproductos.asp?IdProducts=UCPDF190662&titulo=Estatika%20eta%20materialen%20erresistentzia>
- [17] S. B. McGrayne, E. Kashy, B. Bleaney, H. Neville, F. Robinson eta E. E. Suckling, "Magnetism (Physics)". Encyclopaedia Britannica. Web orria: <https://www.britannica.com/science/magnetism> (eskuratuta 2020ko Api. 4).
- [18] A. Franco, "Física, Campo Magnético". Euskal Herriko Unibertsitatea (EHU), Gipuzkoako Ingenieritza Eskola (GIE), Eibarko Atala. Web orria: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/magnetico/portada.html> (eskuratuta 2020ko Api. 4).
- [19] "Force between two magnets, Physics". Stack Exchange Network. Web orria: <https://physics.stackexchange.com/questions/478810/force-between-two-magnets> (eskuratuta 2020ko Api. 5).
- [20] S. Piñol eta F. X. Grau, "Flujo alrededor de un cilindro: efecto de la condición de contorno en la pared y de la anchura del dominio". 1996. Departament d'Enginyeria Eléctrica i Mecànica, Universitat Rovira i Virgili.
- [21] "Análisis dimensional y semejanza en mecánica de fluidos". Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de la Plata. Web orria: <file:///C:/Users/aitor/Desktop/Analisis%20Dimensional.pdf> (eskuratuta 2020ko Api. 6).
- [22] D. Papamoschou eta M. Gharib, "Anatol Roshko, 1923-2017, Annual Review of Fluid Mechanics". University of California & California Institute of Technology. Web orria: <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010719-060122> (eskuratuta 2020ko Api. 7).
- [23] A. Mallock, "On the resistance of Air". 1907. 262-273 orrialdeak.
- [24] K. Y. Billah eta R. H. Scanlan, "Resonance, Tacoma Narrows bridge failure, and undergraduate physics textbooks". 1991. Web orria: <http://dx.doi.org/10.1119/1.16590>
- [25] M. Einarsve, "CFD simulations of laminar vortex shedding with OpenFoam". 2015. Web orria: <https://github.com/meinarsve/CFDwOpenFoam/tree/master/LaminarVortexSheddingInOpenFoam>
- [26] H. J. Jung eta S. W. Lee, "The experimental validation of a new energy harvesting system based on the wake galloping phenomenon". ResearchGate. Web orria: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-wake-galloping-phenomenon_fig11_253655167 (eskuratuta 2020ko Api. 11).
- [27] A. Bellei Pardo, "Estudio experimental de un sistema tipo Wake Galloping para distintas geometrías generadoras de vórtices", GRAL. Univesidad de Chile, Departamento de Ingeniería Mecánica. 2017.

[28] A. Roshko, "On the drag and shedding frequency of two-dimensional bluff bodies". 1954. National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), California Institute of Technology.

[29] S. Sarkar eta A. Agrawa, "Research paper on bladeless windmills based on the principle of vibration". 2017. Bavaria Institute of Technology.

[30] J. Nagy, Technische Universität Wien, Austria. Introduction to transient turbulence modeling (RAS, LES). 2014ko Urr. 18. [Online bideoa]. Web orria: <https://www.youtube.com/watch?v=l8jDBPN4rXo>

[31] "k-epsilon models". CFD Online. Web orria: https://www.cfd-online.com/Wiki/K-epsilon_models (eskuratuta 2020ko Mai. 3).