

1.1. SARRERA

ABANTAILAK	DESABANTAILAK
-CO ₂ EZ! -Meatzaritarik ez -Ingurugiroko kalteak "txikiak" -EROI ona (Energy Return On Investment) $\text{EROI} = \frac{\text{Sortzen duen energia}}{\text{Eraikitzekeko behar izan zena}}$	-Inpaktu bisuala, "paisajistikoa" -Lurraren okupazioa: LORRATZA (3-5D tartean; 5-10D lerroan) -Haizea zorizkoa da: "mix" (termo, hidro, nuklear...) "Sareko integrazioa"

1.2. POTENTZIA EOLIKOA

$$\text{Pot [W]} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot u^3$$

1.2.1. POTENTZIA EOLIKOAREN DENTSITATEA

$$\frac{P}{A} [\text{W/m}^2] = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^3$$

Tokien sailkapena PE dentsitatearen arabera:

- <100 [W/m²] txarra
- =400 [W/m²] ona
- >700 [W/m²] oso ona

Zein potentzial dago munduan? WEC (World Energy Council)

5 irizpide planetarako: (Potentzial meteorologikoa, potentzial lokala, restriktzio teknologikoak [turbinarik onena: haizearen %45a xurgatzea iristen da. Limite fisiko bat dagoelako → BETZ], ekonomia eta inplementazio estatistikoa.

Guzti hau aztertuta, estimazio hauetara iritsi dira:

10¹⁵ kW·h/urte =100·[kontsumo elektrikoa mundiala → 10¹³] → Dugun haizearekin lortuko genukeen energia

1.3. AEROSORGAILU MOTAK (Irizpideak → MANWELL, Wind energy explained)

ARDATZA	-Horizontala ("lift" indarraren bidez) -Bertikala ("drag" indarraren bidez)
PALA KOPURUA	1, 2, 3, multipala (turbinaren motelak)
ERROTOREAREN ABIDURA	Konstantea, aldakorra (2,3 v "kanbioak")
KONTROLA ETA ERREGULAZIOA	-Freno aktiboa: "Pitch control" -Freno pasiboa: "Stall control"
SORGAILUA	-Sinkronoa (kaxa biderkatzailea aurreztu) -Asinkronoa
LEKUA	-Onshore, offshore
HAIZE MOTA	I,II,III,IV (haizearen BB abiad, turbulentsiak)

SARERATZEA	-Isolatua -Sarerratua
POTENTZIA NOMINALA	Mikro: <5 Kw Mini: 5-100 kW Ertaina: 100-1.000 kW Mega: 1-6 MW

*Turbina motela bada, datorren energia gutxiago aprobeztatzen du. Makina maiztasun naturalarekin akoplatzen bada, errotorearen biraketa abiadurarekin adibidez, balaztatu egin behar da. Profil aerodinamikoak sortu zen C_L maximora iristean balaztatzeko: "Stall" Pitcharen bidez pala mugi daiteke balaztatzeko.

1.3.1. IRIZPIDE KUANTITATIBOA

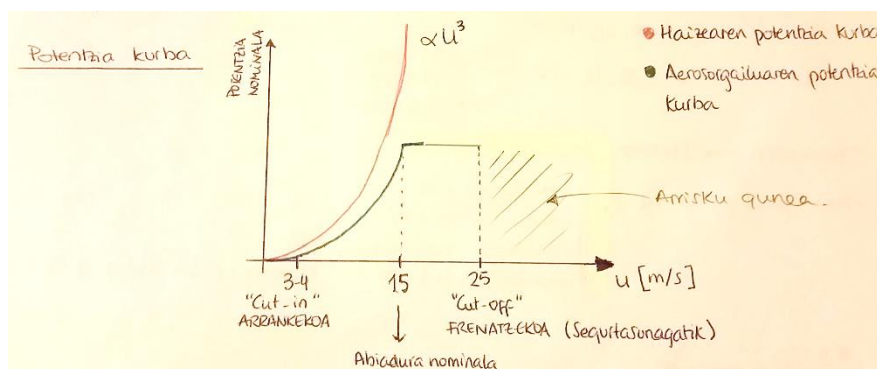
"Tip speed ratio" = punta abiadura ratioa = velocidad específica de la turbina

$$\lambda = \frac{\text{palaren puntaren abiadura lineala [m/s]}}{\text{haizearen abiadura [m/s]}}$$

-Makina motelak: $\lambda \approx 3$ multi-palak (indarra lortzeko, errendimendu baxua, $P=T(+)\Omega(-)$)

-Makina azkarrak: $\lambda \approx 7$ (elektrizitatea sortzeko)

1.4. POTENTZIA NOMINALA (maximoa)



1.5. FUNTZIONAMENDU PARAMETROAK

(PE) POTENTZIA ESPEZIFIKOA: Palek barreiaturiko azalera unitateko potentzia nominala (0.4-0.5 [kW/m²]).

(EPE) ENERGIA PRODUKZIO ESPEZIFIKOA: Urtean sortutako energia barreiaturiko azalera unitateko (800-1.500 [kW·h/m²]).

(KF) KARGA FAKTOREA: Urteko produkzioaren eta potentzia nominalean ariko balitz sortuko lukeen potentziaren arteko arrazoia.

$$KF = \frac{\text{Urteko energia produkzioa}}{\text{P nominalean sortuko lukeena}} \sim \%20 - 30$$

$$EPE = KF \cdot PE \cdot 365,25 \cdot 24$$

2.1. SARRERA

Atmosferaren konposizioa: N₂(%78), O₂(%20)

M(aira)=28,96 g/mol=29 g/mol

$\rho = \frac{M \cdot P}{R \cdot T}$ Neguan potentzia gehiago sortuko du turbina berdinak aira dentsuagoa delako.

Ehuneko zenbatekoa izango da?

$$1) \text{ Udako borraska (harana)} \rightarrow \rho = \frac{29 \cdot 950 \cdot 10^2}{8314 \cdot (30 + 273)} = 1,094 \text{ kg/m}^3$$

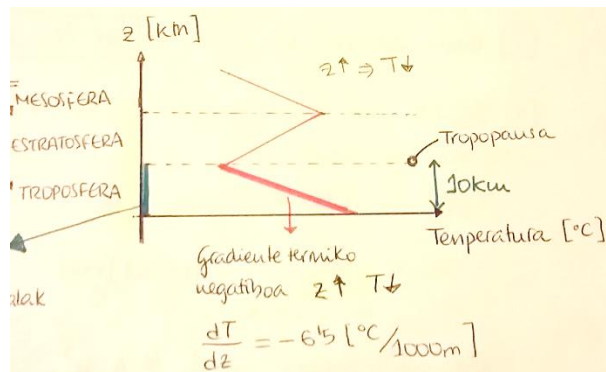
$$2) \text{ Neguko antizikloia (mendia)} \rightarrow \rho = \frac{29 \cdot 1030 \cdot 10^2}{8314 \cdot (0 + 273)} = 1,32 \text{ kg/m}^3$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{1,32}{1,094} = 1,2 \rightarrow \%20 \text{ gehiago}$$

2.2. GRADIENTE TERMICO BERTIKALA

Atmosfera hirutan banatzen da: Mesosfera, Estratosfera eta Troposfera.

Troposferan gertatzen dira fenomeno atmosferikoak (atmosfera lehen 10 km-ak). Estratifikazio adiabatikoa ematen da eta mugimendu bertikalak ematen dira.



2.3. ATMOSFERA ESTANDARRA (Troposferan kokatua)

Altueraren araberako portaera jakin bat izango dugu.

Baldintza normaletan (Itsas mailan): P=1013,25mb; T=15°C; ρ=1,2257kg/m³

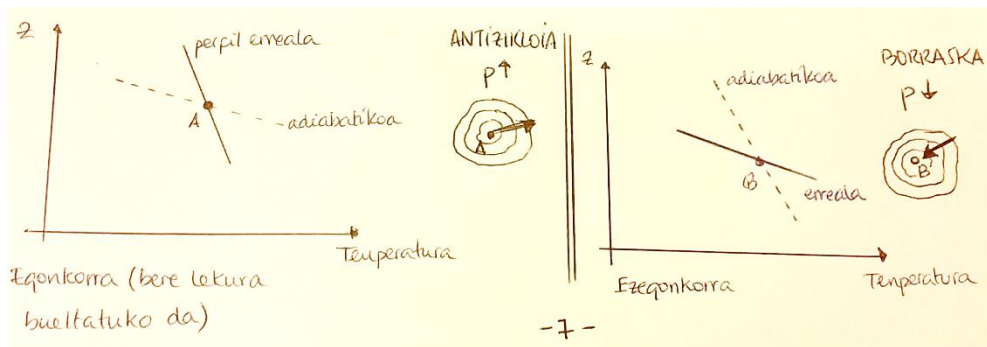
0<z<10km: →TENPERATURA: T[°C]=15-0,0065·z

→ PRESIOA: P[mbar]=1013,25(1-2,257·10⁻⁵·z)^{5,256}

GOGORATU!! Hezetasuna (+) dentsitatea (-)

2.4. ATMOSFERAREN EGONKORTASUNA

Egonkorra izateak mugimendu bertikalik ez izatea suposatzen du, honela ez da desokupaziorik sortzen, hortaz ez dago presio aldaketarik eta beraz ez dago airearen mugimendu horizontalik. Gainera, prozesu adiabatikoa da, bero trukerik ez da ematen.



An dagoen partikula bat gora badoa adiabatikoki, bere tenperatura tenperatura erreala baino baxuagoa izango da → gorago (gauetz egonkorra; egunez ezegonkorra). Lurruna eta geruzak nahastuko dira LAINOAK sortuz.

-GAUEAN (egonkorra): A puntuaren inguruan pendulatu A-ra bueltatzen da nahiz eta energia eman. T baxutan profil adiabatiko lehorrean zehar mugitzen da → dentsitatea baxuagoa beraz A puntura bueltatzen da.

-EGUNA (ezegonkorra): Ez da puntura bueltatzen. Partikulek energia hartzen dute. T baxutan profil errealean zehar mugitzen da → dentsitatea altuagoa, beraz ez da A puntura bueltatzen eta lainoak sortzen dira haizeladengatik.

Laburbilduz, atmosfera egunean zehar ezegonkorra da. Profil adiabatiko lehorrean zehar ez du eraginik. Gauean, aldiz, egonkorra da. Profil adiabatiko lehorrean zehar mugitzen baita eta beraz atmosferako profil errealerara bueltatzen da inguruko aireak baino dentsitate baxuagoa duelako.

2.5. ZIRKULAZIO ATMOSFERIKO OROKORRA

Zerk sortzen ditu?

-Eguzki erradiazioa, errotazioa (coriolis), presio diferentziak.

Sailkapena: Zelula konbektiboak: lurlean zehar gelaxka desberdinak ezartzen dira λ : latitudea

-HADLEY $0^\circ < \lambda < 30^\circ$

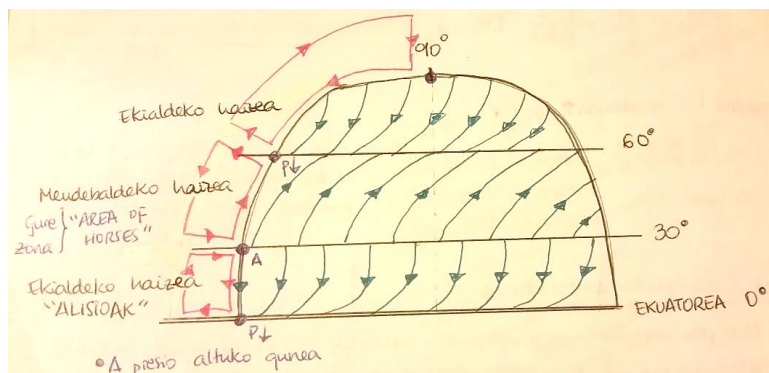
30^oko latitudea: Hadley gelaxkak jaitsi eta presioa igoko da. (Egonkortasuna: haizerik eta euririk ez dagoenean.) Adibidez Alisio haizeak: ekuatorearen beroarengatik hau xurgapen gune bihurtzen da, airea erakarri eta Ekialderaino haizea sortuz.

-FERREL $30^\circ < \lambda < 60^\circ$

Eremu epelak (30^o-60^o) Mendebaldeko haizeak nagusi, Iberiar Penintsulan "galizi haizea".

-POLARRA $60^\circ < \lambda < 90^\circ$

Eremu polarrak: poloan konbektzio masa jaisten da eta presioa igotzen da. Honela, fluxua ekialdetik 60^o-ko presio baxuko gunerantz.



*AREA OF HORSES: 30°-38° latitudeen artean dagoen presio altuko eremua da, zeinak prezipitazioa eta hodeien eraketak kentzen (suprimir) duen. Antizikloi gunea da.

*CORIOLIS EFEKTUA: Errotazio lurarrak sorturiko efektua da, zeinak mugimenduan dagoen edozein fluidoren norabidea lurrazaletik desplazatzen duen. IH: eskubirantz; HH: ezkererantz.

*ALISIO HAIZEAK: Presio altuko gune subtropikaletatik presio baxuko eremu ekuatorialetara doazen haizeak dira. Ekuatorearen beroarengatik hau xurgapen gune bihurtzen da airea erakarri eta ekialderaino haizea sartuz (30°-35°).

2.6. HAIZE ESKALAK ETA MUGIMENDUA

HAIZEA: Indar barikoengatik eta Coriolisen efektuagatik sortzen den fenomeno da.

INDAR BARIKOA: Fluido batean gertatzen den presio diferentzia da (adib.: atmosfera). Indar hauek isobararekiko perpendikularki jarduten dute gradiente bat sortuz. Presio-diferentziaren araberakoak dira:

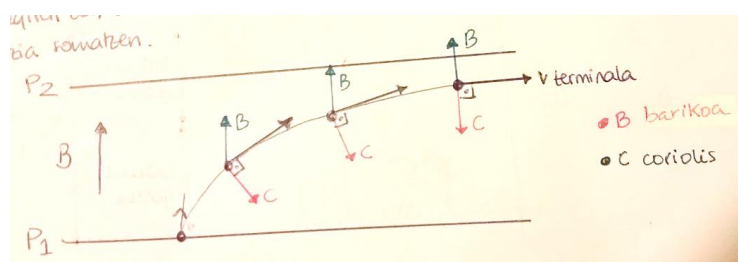
-Antizikloia (presio altuko zentroa): $P_{atm} > P_{zirkulazioko\ airea}$

-Borraska (presio baxuko zentroa): $P_{atm} < P_{zirkulazioko\ airea}$

ESKALA	DIMENTSIOA (km)	IRAUPENA	FENOMENOA
Planetarioa	5000	Beti	Hadley
Sinoptikoa (meteorologian)	1000	Egunak	Antizikloia
Mesoeskala	100	Orduak	Ekaitzak, brisak
Mikro	5-10	Segundotako bibrazioak	Orografiaren turbulentziak

HAIZE GEOSTROFIKOA: Marruskadura igarri gabe zirkulatzen duen haize garaia da (10km-tan gutxi gora behera). Haizean beraz eragina dauka Coriolis efektuak eta indar barikoak. Coriolis beti da haizearekiko perpendikular. Biak orekatuko dira troposferan, bertan marruskadura ez da igartzen eta haize geostrofikoa dugu.

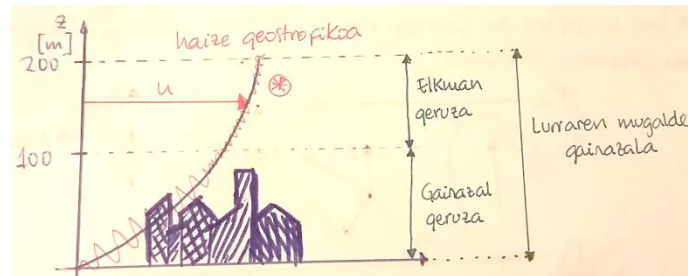
Ipar hemisferioan depresioaren inguruan erlojuaren orratzen zentzuan jotzen du aireak eta antizikloiaren inguruan kontrako norabidean, hego hemisferioan alderantziz egiten du.



2.7. HAIZEAREN PROFIL BERTIKALA

2.000 metrora haizeak ez du igartzen lurraren eragina, bertan bukatzen da hain zuzen ere mugalde geruza. Mugalde geruza gainazal geruzan (aldaketa handia) eta Elkman geruzan (aldaketa txikiagoa) banatzen da. Mugalde geruzan lurraren erliebeak eta zimurdurak ezartzen du haizearekiko marruskadura.

Erliebeak, orografiak edo lur-eremu lokala adierazten dira. Zimurdura bat ezartzen du, eta horren arabera da profil bertikal hazkorra.



$0 < z < 100\text{m}$: Lurraren zimurdurak asko eragiten du, bai U-ren moduluan eta baita bere norabidean ere gorabehera handiak sortzen ditu. TURBULENTIA da gune hau.

$100 < z < 2000\text{m}$: Elkman geruza, bertan aldaketa leunak daude eta gune hau LAMINARRAGOA da.

[MARRUSKADURA INDARRA ETA ELKMANEN ESPIRALA: Haizearen marruskadura lur geruzarekin bere mugimenduan eragin handia izango du, marruskadurak haizearen abiadura murriztuko baitu, balio geostrofikoren azpitik. Marruskadura indarrak bere mugimenduaren aurka egingo du. Eragin hau altuerarekin murriztu egingo da eta haize geostrofikotara iritsiko gara. Marruskadura indar honen ondorioz, haizeak mugimendu espiral bat egingo du, Elkmanen espirala bezala ezagutzen dena.]

Hortaz hasiera batean turbulentsiak oso handiak dira eta zimurduratik urruntzen goazen heinean, turbulentsia hauek lasaitzen joango dira.

$$\frac{U(z)}{U(z_r)} = \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_r/z_0)} \quad (1)$$

$$\frac{U(z)}{U(z_r)} = \left(\frac{z}{z_r}\right)^\alpha \quad (2)$$

$\alpha \rightarrow$ zimurduraren arabera (terreno urbanoan 0,7)

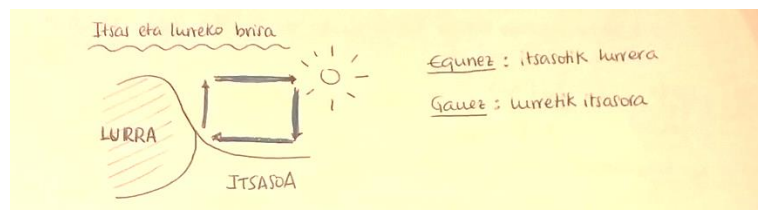
$Z_r \rightarrow$ Altuera erreala

$U(Z_r) \rightarrow$ haizearen abiadura bertan

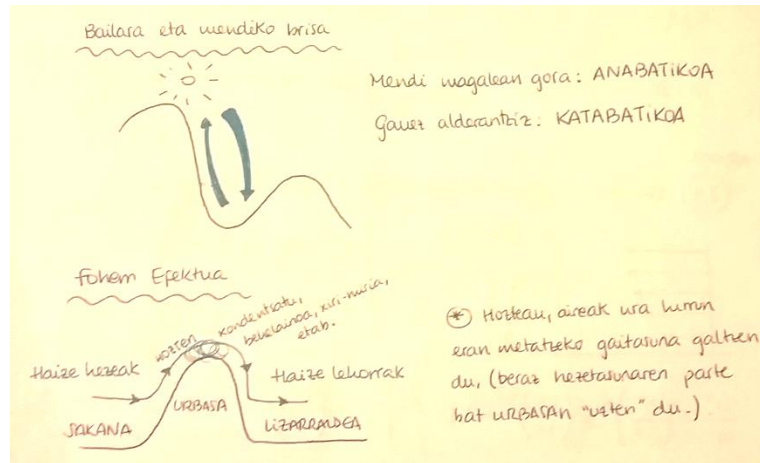
$Z_0 \rightarrow$ Zimurdura, terreno bakoitzerako balio bat (2.2 taula)

2.8. HAIZE LOKALAK

Itsas eta lurko brisa: egunean lurra beroago dago, haizeak gora egingo du. Gauean alderantziz. Leku batzuetan (California) nahikoa izaten da turbinak martxan jartzeko (cut-in abiadura: potentzia sorrarazteko turbina eoliko bat akzionatzen dugun abiadura minimoa da).



Ibar eta mendiko brisa: Goizean ibarraren behean ez dago eguzkirik (anabatiko), bestea gauean (katabatiko).



PENINTSULAKO HAIZE LOKALAK:

- Galizia/Mendebal haizea: IM haize nagusia da. Hortik sartzen dira fronteak.
- Tramontana: Haize hotza Pirinotatik behera (I,IE) Katalunian.
- Ziertzoa: Ebro bailaran zeharreko IM.ko haizea, Nafarroa/Aragoi.
- Sirokoa: Haize epel eta lehorra Afrikako iparraldetik, Saharatik.

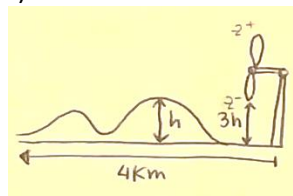
2.9. BEAUFORTEN ESKALA

Haizea klasifikatzeko eskala kualitatiboa da, itsasoaren egoeran oinarrituta. (Apunteetan 15.orr.)

2.10. LUR EREMUAREN ERAGINA

EREMU LAUA

- 1) Turbinaren altuera (h_H) eta inguruaren arteko diferentzia $\leq 60\text{mm}$ (11,5 km barruan)
- 2) Haizearen norabidean 4 km-tan mendirik ezin da egon mendirik $\frac{\text{ALTUERA}}{\text{ZABALERA}} > \frac{1}{50}$ duenik.
- 3) Errotorearen puntu baxuenaren (h) eta muinorik handienaren arteko diferentzia $> 3h$ izan behar da. (4 km barruan, haizealdea).

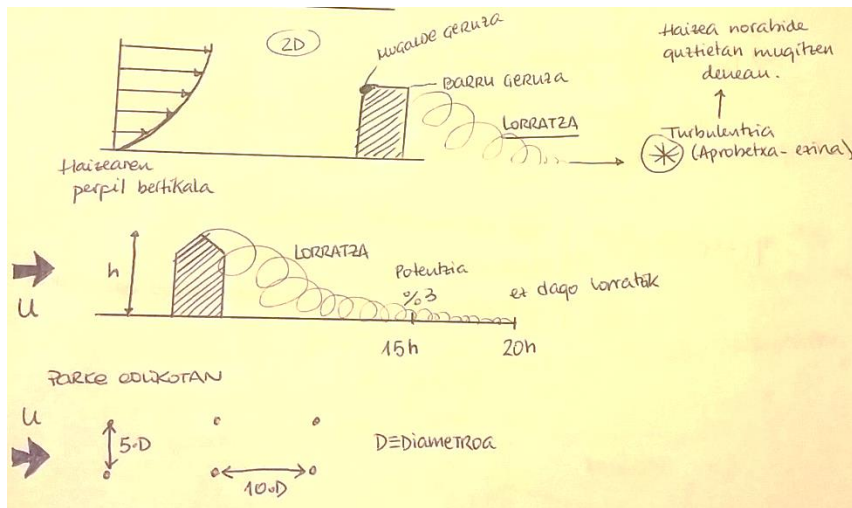


OZTOPOAK (minieolikan "Bornay")

Oztopoak daudenean, gainontzeko gorputzekin bezala, mugalde geruzaren jaregitea gertatzen da eta ondorioz, lorratza.

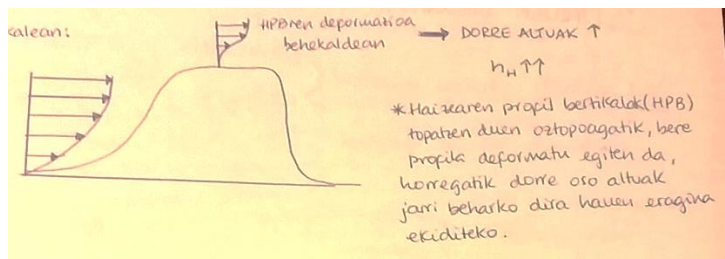
→Lorratzaren kalteak:

- Energiaren produkzioan galerak egongo dira → aurrealdetik jada haizea moteldua baitago (Dorre altuak)
- Karga dinamikoak haziko lirateke, honek turbulentsiak sortuko lituzke eta honela biziraupena murriztu.

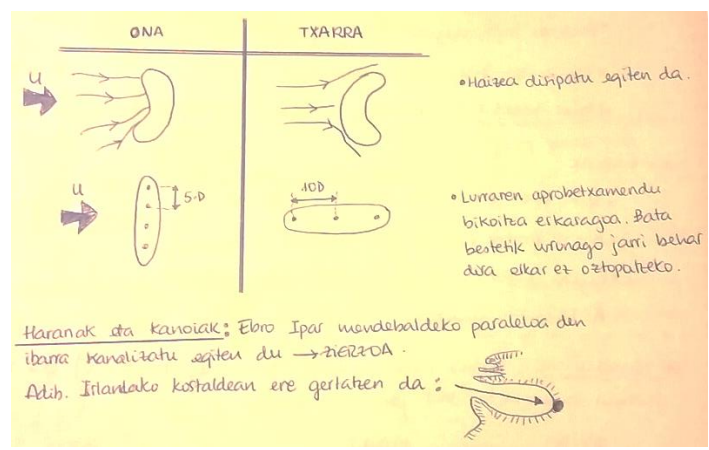


→Mendilerroak

-Plano horizontalean: badirudi mendilerro altuak baditugu kokapen hobeak izango direla, baina KONTUZ!



-Plano bertikalean: aerosorgailuak lerroan jartzen direnean airearen norabidearen zentzu berean, lorratza sortzen da. Haranak paralelo egon behar dira haizeak ondo kanalizatzeko.



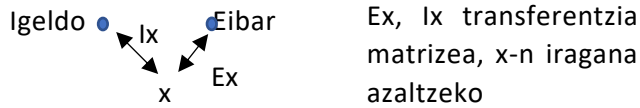
3.GAIA DATUEN NEURKETA ETA TRATAMENDUA

3.1.SARRERA

Haizean kontuan izan beharrekoak: analisi estatistikoa (abiadura eta norabidearena: maximo, minimo...), abiadura eta norabidearen banaketa tenporala, baldintza meteorologikoak (Tº, presioa, hauen eragina...)(azken biekin potentzia lortu), turbulntziak eta haize-boladak (hauek turbulenzia indizeaz adierazi).

Bestalde, arazoak ere existitzen dira. Urte asko behar dira datuekin simulazioak, triangulazioak egiteko (10 urte inguru), haize hauek oso aldakorrek baitira (aldakortasun hauek salbatzeko egiten dira triangulazioak). Gainera, efektu lokalak ere kontua hartu behar dira, orografia, zimurdura, bertako oztopoak... Profil bertikala extrapolatu egiten da, $h=10m$ -tik aurrera lege logaritmikoz egiten dira kalkuluak.

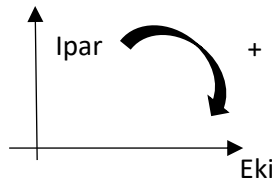
TRIANGULAZIOAK: Estazio meteorologikoak ditugu (Igeldo, Eibar) eta x puntuan anemometro bat jarri nahi dugu.



3.2. HAIZEAREN ABIADURA

$\mathbf{v}=(v_x, v_y, v_z)$ $v_z=0$ hortaz soilik osagai horizontalak izango ditu abiadurak.

GOGORATU!!



Intentsitatea [txiripa/s]: abiaduraren modulua [m/s] \rightarrow 1 txiripa=0,51 m/s

3.3. TRATAMENDU ESTADISTIKOA

Turbulentsiak haizearen aldaketa azkarrak dira, bai norabidean (haize orratzak edo beletak neurtuta) eta bai intentsitatean (anemometroak neurtuta). Aldaketa hauek 2 segunduro neur daitezke (0,5Hz), abiadura instantaneo neurtuz, 10 minututako denboran zehar, metodo hau erabiltzen dute meteorologian. Aldiz, 2 minuturo dauden aldaketak neurtzen dira aeronautikan.

Batez bestekoa: $\bar{u} = \int_0^{\infty} u(t) \cdot f(u) du$

Desbideratze estandarra: $\sigma = \int_0^{\infty} (u(+)-\bar{u})^2 \cdot f(u) du$ (turbulentsiak mediarekiko zenbat aldentzen diren)

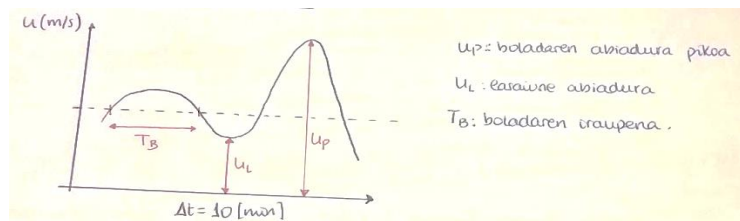
Turbulentsia intentsitatea: $It = \frac{\sigma}{\bar{u}}$

Turbulentsiak zertarako ekidin?

-Kontrol eta erregulazioa errazteko, nekadurak ekiditeko eta sare elektrikoan harmoniko altuak ekiditeko.

Turbulentsien frekuentzia palen frekuentzia naturalera akoplatzen bada, hauek apurtzera irits daitezke.

3.4. HAIZEAREN ALDAKETAK



Periodo laburreko HAIZE-BOLADAK:

$u = \bar{u} \pm (5 - 8)m/s$ (ohikoa)

$u = \bar{u} \pm (8 - 15)m/s$ (indartsua)

$u = \bar{u} \pm > 15m/s$ (bortitza \rightarrow muturreko gertaera estatistika "Gumbell")

3.5. ANEMOMETROAK

-Mekanikoak: errotazioa ardatz bertikalean kokatzen da, koilara semiesferikoa edo konikoa izan daiteke.

-Hari beroaren hozkuntza bidezkoa (Artikoan)

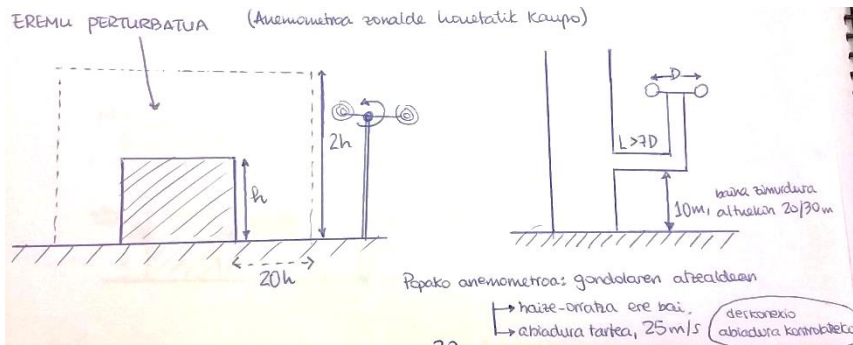
-Ap: pitot hodia, toki zehatzetan instalatzen da (aire korranteak daudenean). Presio dinamikoarekin abiadura neurtzen da.

-SODAR (Sonic detection and ranging): Turbulentzia atmosferikoaren bidez ultrasoinuen dispersioa neurtzeko erabiltzen da. Doppler efektua neurtzeko. Honekin abiadura profila lortzen da, hortaz haizearen altuera desberdinetako abiadura neur daiteke.

*Lasaitasun gune bat dago 0,3 m/s ingurukoa

*Zehaztasuna oso garrantzitsua da, errore erlatiboa: $A_v = \%10 = 1,1 \rightarrow A_p = (1,1)^3 = 1,331 \rightarrow \%33$

NON KOKATUKO DIRA ANEMOMETROAK? (Beti alde perturbatutik urrun)



3.6. HAIZE MOTAK (Taula, apunteetako 21.orr.)

3.7. WEIBULLen BANAKETA

$F(u) = 1 - e^{-\left(\frac{u}{c}\right)^k}$ denboraren zein zati dugun u abiadura azpitik

$f(u) = -\frac{dF(u)}{du}$ u abiadura izateko probabilitatea

Batez bestekoa: $\bar{u} = \int_0^{\infty} u(t) \cdot f(u) du = c \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$

!!! Potentziarentzat $\rightarrow \bar{P} = \eta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c^3 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)$

***Rayleigh-ren banaketa \rightarrow Weibullen berdina, $k=2$.

4. GAIA_AERODINAMIKA

4.1. SARRERA

Errotoreko haizearen abiadurak bi osagai nagusi ditu: konstanteak diren indar nagusien eraginezko BB-ko abiadura (aerodinamika geldikorra) eta turbulentziak (haizearen profila, errotazioa: lorratz birakaria, efektu dinamikoak...) (aerodinamika ez geldikorra).

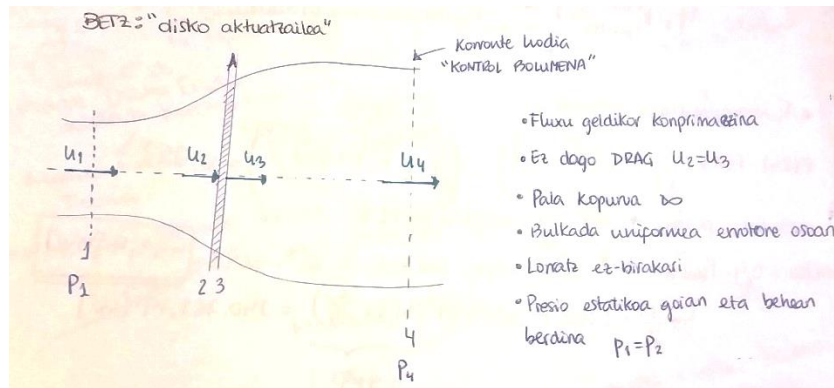
Azken hauek indar aerodinamiko periodikoak dira, oszilanteak, kargak eta nekaturak sortzen dizkigute, hortaz garrantzitsua da hauek aztertzea.

AZTERKETA GELDIKORRA (korrante lerroak geldikorrak)	AZTERKETA GELDIKORRA
-AIRFOIL: profil aerodinamikoa (diseinua eta optimizazioa)	-Haizearen profil bertikala (ez da berdina haizea behean edo goian)

-“Errore disko eredu” BETZ (ideala); ardatz horizontalekoak: Momentuaren teoria eta BEM teoria (elementuz elementu)	-Errotazioa: erresonantzia -Aeroelastikotasuna: indar aerodinamiko periodikoak (kargak eta nekadura)
---	--

4.2. BETZEN TEORIA (1926)

Esplikazio orokorra hau litzateke: “Aire fluxu bat perturbazio batera gerturatzea eta perturbazio ondoren energia galtzen du, ondorioz abiadura murriztuz. Fluxuaren emaria mantendu behar denez, fluxuaren diametroa handitzen doa.” Suposizio hauek egiten dira: ez dago drag indarririk ($u_2=u_3$), infinitu pala daude, fluxua estazionarioa da, bulkada konstantea ematen da errore guztian, lorratz ez birakaria.



FROGAPENA:

Bultzada indarra: $T = \text{Thrust}$

Momentu linealaren aldakuntza: $T = \frac{dp}{dt}$; $p = m \cdot u \rightarrow \dot{p} = \dot{m} \cdot u = \rho \cdot Q \cdot u$

$$(1) T_{\text{tot}} = T_1 - T_4 = \dot{m}_1 \cdot u_1 - \dot{m}_4 \cdot u_4 = \dot{m} \cdot (u_1 - u_4) = (\rho \cdot A \cdot u_2) \cdot (u_1 - u_4)$$

*Honek adieraziko digu zenbateko momentua jan diogun haizeari

$$\text{Bernoulli: } 1 \rightarrow 2: p_1 + \frac{1}{2} \rho u_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho u_2^2$$

$$3 \rightarrow 4: p_3 + \frac{1}{2} \rho u_3^2 = p_4 + \frac{1}{2} \rho u_4^2$$

*2tik 3ra energia galera dago: $u_2 = u_3$; $p_1 = p_4 = p_{\text{atm}}$

$$p_2 - p_3 = \frac{1}{2} \rho (u_1^2 - u_4^2)$$

$$(2) T_{\text{tot}} = A(p_2 - p_3) = \frac{1}{2} \rho A (u_1^2 - u_4^2)$$

Hortaz, (1)=(2) direnez,

$$\boxed{(\rho \cdot A \cdot u_2) \cdot (u_1 - u_4) = \frac{1}{2} \rho A (u_1^2 - u_4^2)}$$

ONDORIOAK:

1.

$$u_2 = \frac{\frac{1}{2} \rho A (u_1^2 - u_4^2)}{\rho \cdot A \cdot (u_1 - u_4)} = \frac{\frac{1}{2} \rho A \cdot (u_1 - u_4) \cdot (u_1 + u_4)}{\rho \cdot A \cdot (u_1 - u_4)} = \frac{(u_1 + u_4)}{2}$$

2. Indukzio faktore axiala (Haizearen sarrerako abiaduraren eta erroreak induzituriko abiaduraren erlazioa da. Bere maximo teorikoa 1/3 izango da. $U_1^* a$: induzitutako abiadura $u_2 = u_1^* (1-a)$ erroreak induzitutako abiadura):

$$a = \frac{u_1 - u_2}{u_1} \rightarrow u_2 = -(u_1 \cdot a - u_1) \rightarrow \boxed{u_2 = u_1(1 - a)}$$

“1→2ra bidean galdu den abiaduraaren proportzioa” Hemendik aurrera $u_1 = u$; abiadura librea.

$$\left. \begin{array}{l} a = \frac{u_1 - u_2}{u_1} \\ u_2 = \frac{(u_1 + u_4)}{2} \end{array} \right\} a = \frac{u_1 - \frac{(u_1 + u_4)}{2}}{u_1} = \frac{u_1 - u_4}{2u_1} \rightarrow u_4 = -(2u_1 \cdot a - u_1) \rightarrow \boxed{u_4 = u_1(1 - 2a)}$$

“Ua”→“INDUZITUTAKO ABIADURA”: $u_2 = u_1(\text{sarrerakoa}) - u_a(\text{bidean galdutakoa})$

a-ren existentzia eremua: [0,1/2] Betzen eredu.

- ➔ $a < 0$ bada, $u_2 > u \rightarrow$ absurdoa da haize errota batean
- ➔ $a > 1/2$ bada, $u_4 < 0 \rightarrow$ absurdoa da haize errota batean

POTENTZIA BETZEN EREDUAN

$$\begin{aligned} P &= \text{Bultzada} \times \text{abiadura} \rightarrow P = T \cdot u_2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot (u_1^2 - u_4^2) \cdot u_2 = \\ &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot (u_1 - u_4) \cdot (u_1 + u_4) \cdot u_2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot 2au \cdot u(2 - 2a) \cdot u(1 - a) = \\ &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot u^3 \cdot 4a(1 - a)^2 \end{aligned}$$

$$4a(1-a) \rightarrow \text{Potentzia koefizientea } C_p = \frac{\text{Turbinaaren potentzia}}{\text{Haizearen potentzia}} = 4a(1 - a)^2$$

$C_{p, \max} \rightarrow$ Haizeari fisikoki zein energia xurgatzeko gai gara gehienez?

$$\frac{dC_p}{da} = 0 \rightarrow \frac{d(4a(1 - 2a + a^2))}{da} = \frac{d(4a - 8a^2 + 4a^3)}{da} = 4 - 16a + 12a^2 = 0$$

$$a = 1; \frac{1}{3} \rightarrow a = \frac{1}{3} \text{ izango da balio egokia}$$

$$C_{p, \max} = 4 \cdot \frac{1}{3} \cdot \left(1 - \frac{1}{3}\right)^2 = \frac{16}{27} = 0,59 \rightarrow \%59 \text{ Betzen limitea}$$

BULTZADA KOEFIZIENTEA

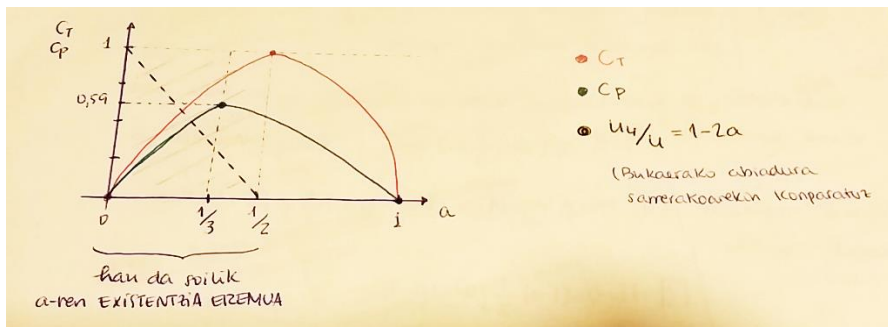
$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A u^2} = 4a(1 - a)$$

$$T = \frac{1}{2} \rho A u^2 \cdot 4a(1 - a)$$

$$C_{T, \max} = \frac{dC_T}{da} = \frac{d(4a(1 - a))}{da} = 4 - 8a = 0 \rightarrow a = \frac{1}{2} \neq \frac{1}{3} \text{ (ideala)}$$

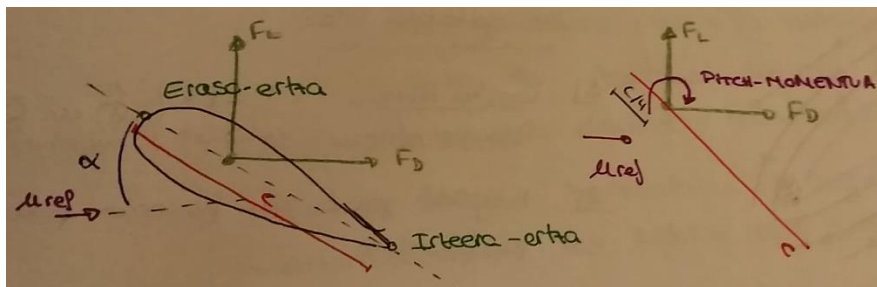
$$C_{T, \max} \text{ (bulakada osoa xurgatzen du makinak)} = 4 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{2}\right) = 1$$

Grafikoki:



ERRENDIMENDU TOTALA (ardatz horizontaleko turbinetan): $\eta_T = C_{p,betz} \cdot \eta_{elek} \cdot \eta_{mek}$

4.3.AERODINAMIKAKO KONTZEPTU OROKORRAK



EZAUGARRIAK: $\alpha \rightarrow$ eraso-angelua (kordaren eta haizearen abiad.erlat.-ren arteko angelua)

$F_L \rightarrow$ Lift edo esekidura indarra (c-rekiko perpendikular)

$F_D \rightarrow$ Drag edo arrastre indarra (haizearen norabidean u rekiko paralelo)

c \rightarrow korda, eraso-ertzetik irteera ertzera dagoen luzera.

KOEFIZIENTE GARRANTZITSUAK:

\rightarrow Lift koefizientea: $C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot u^2}$ non $A = c \cdot l$ (c korda; l luzera)

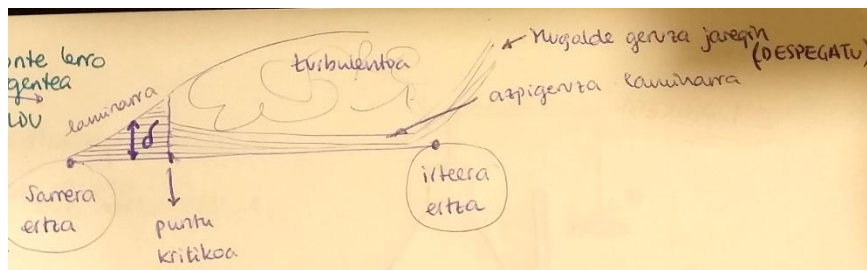
Profil simetrikoetan α txikiak daude eta $C_L = 2\pi \cdot \sin\alpha$ gisa kalkulatzen da.

\rightarrow Drag koefizientea: $C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot u^2}$

Profil aerodinamiko ona: $\frac{F_L}{F_D} \approx 100$

Reynoldsen koefizientea: $Re = \frac{\mu \cdot c}{\nu}$; $\nu_{airea} = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

FL eta FD perpendikularrak!



HELBURUA:

$F_D \downarrow$ eta $F_L \uparrow$ arrazoi aerodinamikoak maximizatu, honela $\left(\frac{C_L}{C_D}\right)_{\max} \rightarrow \alpha \approx 7^\circ$

MUGALDE GERUZA [1mm-10cm]

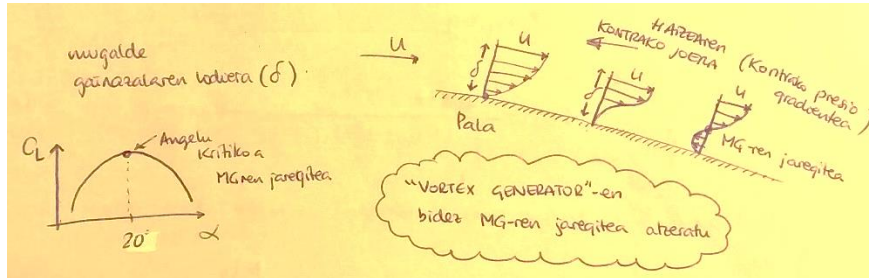
Goiko aldean: $v \uparrow \Rightarrow p \downarrow$ (dibergitu)

Beheko aldean: $v \downarrow \Rightarrow p \uparrow$ (konbergitu)

Mugalde geruza du fluidoak palaren profilarrekiko.

Dibergentearen mugalde-geruzaren azterketa:

→ Abiadura gradientea: Mugalde geruzan turbulenzia gertatzen dira eta banatzen dira, JAREGITEA.



4.4. POTENTZIAREN KONTROLA

STALL CONTROL: Erregulazio pasiboko aerosorgailuetan, balazta kontrola dutenak, palak u handietan α kritikoa gainditu eta berez balazta dezan diseinatuta daude (turbulenzia sortzen da eta sorturiko galerak balaztatuko du).

Abantailak: zati higikorak eta kontrol sistema zailak saihesten dira.

Desabantailak: diseinua konplexua da.

PITCH CONTROL: Erregulazio aktiboko aerosorgailuetan, α angeluaren erregulazioa egiten da segundoan hainbat aldiz sortutako potentzia kontroladore elektronikoko baten bidez konprobatua. Balio oso handia duenean, kontroladoreak α angelua aldatuko duen mekanismoari seinale bat bidaliko dio. Honek, erroreko palak bere ardatz longitudinalaren inguruan arintasunez biratuko dute. Mekanismo hidraulikoa da.

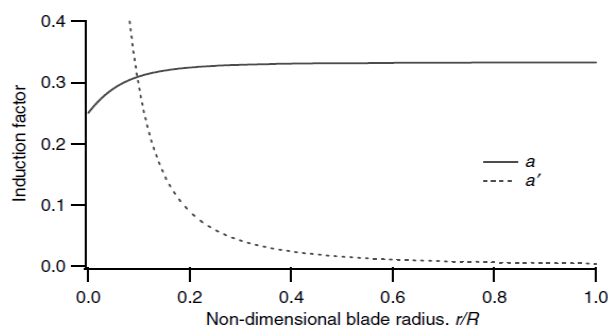
4.5. TURBINA IDEALA LORRATZ BIRAKARIAZ:

W airearen biraketa abiadura lorratz birakarian, eta Ω errorearen abiadura angeluarra.

$$\text{Indukzio faktore angeluarra: } a' = \frac{w}{2\Omega} = \frac{1-3a}{4a-1}$$

a eta a'-ren aldaketak r/R erlazioaren arabera: a' askoz altuagoa da errorearen zentroan (r=0), bertan haizeari indar gehiago transmititzen zaio (momentuarekin gertatzen den bezala), et ondorioz w altuagoa lortzen du. a aldiz, bere balio idealera gerturatzen da palaren puntatik gertuago.

a=1/3 baliora joango da palaren bukaerara iristen goazen heinean, a' justu kontrakoa 0 izango da bukaeran.



INDAR GIROSKOPIKOA: Indar hau palen abiadura angeluarraren eta beraz, haizearen abiaduraren menpekoea da, hauek errotoreari eta ardatzari eginiko indarra da hain zuzen ere. Garrantzitsua da kontuan hartzea errotoreak jasan beharreko estrukturan izango diren indar eta momentu guztiak.

Gurpil bat adibide gisa. Efektu girooskopikoa ω konstante batez bere ardatzaren inguruan dabilen gurpilak beste ardatzean Ω abiadura konstantean biraraztea behartzen zaionean gertatzen da. M_G momentu girooskopikoa gurpilak beste bi ardatzekiko perpendikularki biraraztean sortzen da. $M_G = J \cdot \omega \cdot \Omega$ [N·m] non $J = \frac{\pi d^4}{32}$

Gainera, errotorearen biraketa abiaduraren eta orientatzeko biraketa abiaduraren menpekoea da, errotorearen inertzia momentuarekin batera. Hiruekiko proportzionala da. Indar hau bi abiadurek sortutako planoarekiko perpendikularra denez, errotorearen pisuarekin batu daiteke eta errotorearen ardatzeko erresistentzia areagotu dezake.

ERRESONANTZIA MEKANIKOA: Erresonantzia gorputz batek indar periodiko bat jasatean bibraraztean sor daitekeen efektua da. Bibrazio periodoa gorputzaren bibrazio periodo karakteristikora iristen bada, indar txiki batek aplikazio errepikakorrek sistema oszilatzailaren anplitudea oso handia egitea dakar. Teorian, indar errepikakor txiki horrek gorputzaren edo sistemaren frekuentzia naturalera eramaten badu, anplitudea indeterminatua izango da eta efektu gisa material zurruntan hau haustea da (Takomako zubia).

→ **Muellearen erresonantzia** sistemaren (motor elektrikoa: erregai aldaketa) barne-erresonantziara akoplatzen bada, anplitudea asko handitzen da, hausteraino iritsiz.

→ **Arbelezko planoaren erresonantzia:** Arbelaren gainean gatza botatzen da zeina estrukturaren gainean akoplatzen den. Arbela bibratzen hasten denean, haran eta mendien arabera, nodoa geldirik daude eta bertan gatza gelditzen da. Okerrena 1.harmonikoa da zeinak estruktura apur dezakeen.

→ **Pendulua:** Sokarekiko menpekoea denak periodo inbariantza du anplitude txikia eskaintzen diona. Horregatik ona da erlojuak egiteko.

MALGUKI BANDA EREDUA OFFSETAREKIN: Offseta zerbaitek osatzen duen lerrotik at duen desplazamendua da. Malguki banda eremua definitu ahal izateko, lehenik flapping-a definitu behar da: ingelesetik flap hitzak astintzea esan nahi du, beraz, ondoriozta dezakegu aerosorgailuen palen kasuan, malgutasuna dela eta astindu daitezkeela.

Hainbat parametro garrantzitsu:

→ Flapping angelua (osilazio harmoniko gisa): $\ddot{\beta} = -(k\beta/I_b) \cdot \beta$

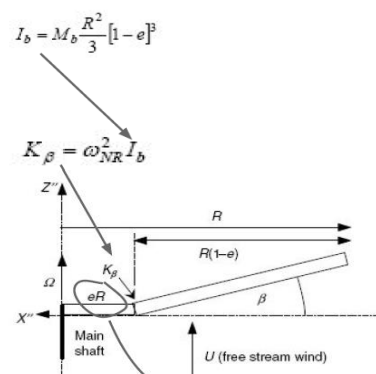
→ Flapping maiztasun naturala, ez birakaria: $\omega_{NR} = \sqrt{k\beta/I_b}$; non $I_b = m_B R^2/3$ palaren inertzia momentua sekzio konstantea duela suposatuz.

→ Makinaren errotazioa ω berri bat sortzean offset gabe: $\ddot{\beta} + \left(\frac{k\beta}{I_b} + \Omega^2\right) \cdot \beta = 0$

$\omega_R^2 = \frac{k\beta}{I_b} + \Omega^2 = \omega_{NR}^2 + \Omega^2$ Baina errealitatean offseta izango dugu hortaz $\omega_R^2 \neq \omega_{NR}^2 + \Omega^2$; palaren zati bat desbideratu gabe geldituko da: $e = \frac{2(z-1)}{3+2(z-1)}$ non $z = \frac{\omega_R^2 - \omega_{NR}^2}{\Omega^2}$; beraz,

$k\beta = \omega_{NR}^2 \cdot I_b$ non $I_b = m_B \frac{R^2}{3} (1 - e)^3$.

MOMENTU GUZTIEN BATURA=0:



Indar bakoitzak bere momentu sortuko du:

- (1) $M_c = r \sin(\beta) [r \cos(\beta) \rho^2 dm]$
- (2) $M_g = r \sin(\beta) [g \cos(\psi) dm]$
- (3) $M_s = k_p \beta$
- (4) $M_f = r^2 \beta^2 dm$

$$\sum M = M_c + M_g + M_s + M_f = 0$$

Honek, flapping angelua determinatzen du eta 3 soluzio daude:

- Erantun kolektibaren koefiziente: $\beta_0 = \frac{\gamma A}{2k}$
 flapping angelu kex desbideratzen da pila kero bat sortuz.
- Kosinus zilindrikoaren erantun koefiziente (β_c)
 Errotazio planoa haizearekiko duteko da pila behar duen dagoenean (0°) eta haizearekiko pila gaildean dagoenean (180°)
- Sinus zilindrikoaren erantun koefiziente (β_s)
 Errotazio planoa haizearekiko duteko da pila gora doanean (90°) eta haizearekiko pila beherantz doanean (270°)

LIFT VS DRAG:

Arrastre makinetan punta abiadura ratioa ezin da 1 baino handiagoa izan, izan ere, makinaren punta ezin da joan haizea baino azkarrago, honek ematen baitio energia.

Drag makinek potentzia maximoa dute $\lambda=1/3$ denean, eta c_p max oso txikia dute.

U erlatiboa lift makinetan ikusten da landarekin handitzen dela, beraz, F liftek ez du mugarik, λ zenbat eta altuaoa izan, orduan eta lift indar handiagoa izano dugu. Hau drag makinetan ezinezkoa da (F_d -rekin, noski), λ 1 baino txikiagoa baita.

SOLIDOTASUNA:

$$\sigma = \frac{B \cdot c}{2\pi r} \rightarrow \text{solidotasun lokala}$$

Aerosorgailuko palen azaleraren eta errotorearen arteko erlazioari esaten zaio. Erlazio optimo bat dago beti eta nolabaiteko muga bat, gehienez haizearen potentziaren %59,3a xurga dezake aerosorgailu batek. (Betzen limitea).

YAW CONTROL:

Yaw gondolaren ardatz bertikalaren biraketa angeluarra da. Honen kontrol egoki bat beharrezkoa da aerosorgailuak beti haizera zuzenean begira dezan bermatzeko. Gondola: aerosorgailuko elementu klabeak babesten dituen karkasa.