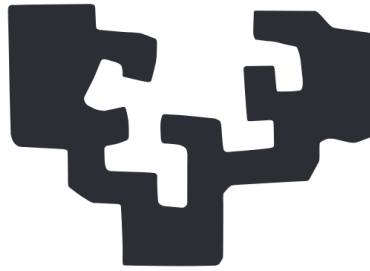


GRADU AMAIERAKO LANA

INGENIARITZA MEKANIKO-KO GRADUA

AEROSORGAILU TXIKI BATEN EGITURAREN DISEINU ETA ANALISI ESTRUKTURALA

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

EGILEA

Alexander Gomez Raya

TUTOREA

Ana Boyano Murillo

Ingeniaritza Mekaniko-ko Departamendua

12/06/2023

LABURPENA

AS bat sorgailu elektrikoa bat da, haizearen energia zinetikoa mugimendu birakarian eraldatuz, azkenik energia elektrikoa sortzeko. Hainbat mota eta tamainako AS-ak daude, ardatz bertikaleko sorgailuak eta ardatz bertikaleko sorgailuak esaterako.

Proiektu honetan AS txiki baten estruktura diseinu proposamena eta analisia garatuko dira Elementu Finituko Metodoaren bidez. Egituraren funtzio printzipala AS haizearen ondorioz sortzen diren kargak jasatea da. Estruktura diseinu egokiak funtzionamendu egokia eta materialaren erresistentzia bermatu behar du, AS-an, eraikinean eta gizakietan kalterik ez egotearen.

Egituraren diseinua UNE-EN 61400-2 araudia jarraituz garatuko da, non AS txikien ezaugarriak eta betebeharrak deskribatzen dira. Proiektua aurrera eramateko, prozedura azpiataletan banatzea ezinbestekoa da.

Lehenengo pausua proiektuaren testuingurua aztertzea da, zergatik jarri nahi den AS txiki bat eta non jarri nahi den. Tokiaren arabera, haizearen ezaugarriak ezberdinak izango dira eta horrek estruktura diseinua baldintzatuko du.

Ondoren, haizeak AS txikian eragiten dituen indarrak kalkulatu dira, software-an estruktura tentsioak simulatzeko eta aurreikusteko. Haizearen kargaren kalkulua aipatutako araudian oinarritzen den karga sinplifikatuen metodologiarekin egingo da.

Hurrengo pausuan softwarean egindako simulazioekin diseinu aproposa aurkituko da diseinu desberdinak probatuz. Azkenik, egitura optimoa aukeratzea izango da azken pausua, proiektuan zehar egindako kalkuluak, simulazioak eta emaitzak konparatuz.

RESUMEN

Un aerogenerador (abreviado como AG) es un generador eléctrico, transformando la energía cinética del viento en movimiento giratorio, para finalmente producir energía eléctrica. Existen diferentes tipos y tamaños de AG, como generadores de eje vertical y generadores de eje horizontal.

En este proyecto se desarrollará una propuesta de diseño y el análisis de una estructura de un pequeño AG mediante el Método de Elementos Finitos. La función principal de la estructura es soportar las cargas derivadas del viento AG. El diseño adecuado de la estructura debe garantizar el correcto funcionamiento y la resistencia del material para evitar daños en el AG, el edificio y los humanos.

El diseño de la estructura se desarrollará siguiendo la normativa UNE-EN 61400-2, donde se describen las características y requisitos de los pequeños AG. Para llevar a cabo el proyecto es necesario desglosar el procedimiento en subapartados.

El primer paso es analizar el contexto del proyecto, por qué se quiere poner un AG pequeño y dónde se quiere colocar. Dependiendo del lugar, las características del viento serán diferentes y eso condicionará el diseño de la estructura.

Posteriormente, se calcularán las fuerzas que el viento provoca en el AG pequeño para simular y prever las tensiones de la estructura en el software. El cálculo de la carga del viento se realizará con la metodología de cargas simplificadas basada en la mencionada normativa.

En el siguiente paso se encontrará el diseño adecuado con las simulaciones realizadas en el software probando los diferentes diseños. Finalmente, el último paso será la elección de la estructura óptima, comparando los cálculos, simulaciones y resultados realizados a lo largo del proyecto.

ABSTRACT

A wind turbine (abbreviated as WT) is an electrical generator, transforming the kinetic energy of the wind into rotating motion, ultimately producing electrical energy. There are different types and sizes of WT, such as vertical axis generators and vertical axis generators.

In this project, a proposal design and analysis of a structure of a small WT will be developed using the Finite Element Method. The main function of the structure is to support the loads derived from the WT wind. The proper design of the structure must ensure the correct functioning and strength of the material to avoid damage to the WT, the building and humans.

The design of the structure will be developed following the UNE-EN 61400-2 standard, where the characteristics and requirements of small WT are described. In order to carry out the project it is necessary to break down the procedure into subsections.

The first step is to analyse the context of the project, the reason for the instalation of a small WT and where to place it. Depending on the location, the wind characteristics will be different and this will condition the design of the structure.

Subsequently, the wind forces on the small WT will be calculated in order to simulate and predict the stresses of the structure in the software. The wind load calculation will be carried out with the simplified load methodology based on the above mentioned standard.

In the next step the appropriate design will be found with the simulations performed in the software by testing the different designs. Finally, the last step will be the choice of the optimal structure, comparing the calculations, simulations and results made throughout the project.

AURKIBIDEA

1	SARRERA	8
1.1	PROIEKTUAREN HELBURUA.....	8
1.2	CBL: CAMPUS BIZIA LAB	8
1.3	METODOLOGIA.....	9
2	TESTUINGURUA	10
2.1	ENERGIA EOLIKOA	10
2.2	EGOERA EUROPAN	10
2.3	AUTOKONTSUMOA.....	12
2.3.1	AUTOKONTSUMO MINIEOLIKOA.....	13
2.3.2	AUTOKONTSUMO FOTOVOLTAIKOA	13
2.3.3	EGOERA ESPAINIAN	14
2.4	AEROSORGAILU TXIKIAK.....	14
2.4.1	MOTAK.....	14
2.4.2	ELEMENTU NAGUSIAK	15
3	PROIEKTUAREN AEROSORGAILUA.....	16
4	HAIZEAREN DATUEN KALKULUA.....	18
5	KARGEN KALKULUA	21
5.1	KARGAK KALKULATZEKO METODOLOGIAK	22
5.1.1	KARGA SINPLIFIKATUEN METODOLOGIA	22
5.1.2	SIMULAZIO MODELOA.....	23
5.1.3	KARGEN NEURKETA ESKALA ERREALEAN	23
5.2	LIMITE EGOERAREN ANALISIA	24
5.2.1	HAUSTURAREKIKO ERRESISTENTZIA ANALISIA.....	24
5.2.2	NEKEAREKIKO ERRESISTENTZIA ANALISIA.....	24
5.2.3	SEGURTASUN KOEFIZIENTEAK.....	24
5.3	DEFORMAZIOAREN ANALISIA.....	25
5.4	KARGEN EMAITZAK.....	25
6	DORREAREN DISEINUA	27
6.1	DISEINUAREN ESPEZIFIKAZIOAK	27
6.2	DORREAREN MATERIALA.....	28
7	DORRE ZILINDRIKOA	29
7.1	SIMULAZIO EREDUAK	30
7.1.1	DISEINU PROPOSAMENA.....	30
7.2	NEKEAREN ANALISIA.....	34
7.3	DEFORMAZIOAREN ANALISIA	35

8	SARETA EGITURA	36
8.1	EGITURAREN DISEINUA	36
8.1.1	LEHEN DISEINU PROPOSAMENA	36
8.1.2	BIGARREN DISEINU PROPOSAMENA	40
8.1.3	HIRUGARREN DISEINU PROPOSAMENA	43
8.2	NEKEAREN ANALISIA.....	46
8.3	DEFORMAZIOAREN ANALISIA.....	47
9	EMAITZEN LABURPENEA	48
10	ONDORIOAK.....	50
11	ERREFERENTZIAK	51
12	ERANSKINAK	52
12.1	KARGA SIMPLIFIKATUEN HIPOTESIAK	52
12.1.1	A HIPOTESI KARGA: OPERAZIO NORMALA	53
12.1.2	B HIPOTESI KARGA: ORIENTAZIOA	53
12.1.3	C HIPOTESI KARGA: ORIENTAZIOAREN ERROREA.....	54
12.1.4	D HIPOTESI KARGA: BULTZADA MAXIMOA	54
12.1.5	E HIPOTESI KARGA: ERROTazio ABIADURA MAXIMOA	55
12.1.6	F HIPOTESI KARGA: ZIRKUITULABURRA KARGAREN KONEXIOAN	55
12.1.7	G HIPOTESI KARGA: DESKONEXIOA (BALAZTATZEA)	56
12.1.8	H HIPOTESI KARGA: HAIZEAREN KARGA EXTREMOA	56
12.1.9	I HIPOTESI KARGA: GELDITZEA HAIZEAREN KARGAREKIN, IKUSGAITASUN MAXIMOA	57
12.1.10	J HIPOTESI KARGA: GARRAIO, MUNTAI, MANTENIMENDU ETA KONPONKETA KARGAK	57
12.2	EGITURAREN GAINEKO KARGEN KALKULUA	58
12.2.1	HIPOTESIEN PARAMETROEN KALKULUA:	58
12.2.2	KARGA SINPLIFIKATUEN METODOAREN KALKULUA	61
12.2.3	INDARREN TRASLAZIOA DORREAREN PUNTARA.....	64
12.2.4	DORREAREN GAINEKO KARGEN EMAITZAK.....	70

IRUDIEN AURKIBIDEA

Fig 8 - AS-ren lokalizazioa	9
Fig 1 - Kapazitate eolikoaren handipena European.....	11
Fig 2 - Energia eolikoaren kontribuzioa herrialde ezberdinen energia-demandan.....	11
Fig 3 - Autokontsumo instalazio baten elementu nagusiak	12
Fig 4 - Ardatz horizontaleko sorgailua	14
Fig 5 - Ardatz bertikaleko sorgailu	14
Fig 6 - AS baten atal nagusiak.....	15
Fig 7 - AS txikien estruktura motak: a) Masta zilindrikoa, b) Sareta Egitura	16
Fig 9 - Bornay WInd13+ AS-ren modeloa	17
Fig 10 - AS-ren modeloa dimentsionatuta.....	17
Fig 11 - AS-ren modeloa proportzionalki eskalatuta	18
Fig 12 - Google Earth-en lortutako Eraikinaren altuera	19
Fig 13 - Haizearen batezbesteko abiadura	19
Fig 14 - Haizeen arrosa	20
Fig 15 - Haizearen abiaduren distribuzioa	20
Fig 16 - Kargen erreferentzi sistema.....	23
Fig 17 - Dorrearen gainean aplikatutako indarrak.....	26
Fig 18 - a)Punteraren plakatxoaren plano b)Dorre Zilindrikoen diametro maximoa	28
Fig 19 - Teilatuan dagoen espazio librea	28
Fig 20 - Dorre zilindrikoaren lehen diseinuaren: a) Eredua b) Mesh-a	30
Fig 21 - Dorre zilindrikoaren lehenengo diseinuaren simulazio eredia.....	31
Fig 22 - Dorre zilindrikoaren lehenengo diseinuaren egoera tentsionala.....	32
Fig 23 - Dorre zilindrikoaren hirugarren diseinuaren egoera tentsionala.....	33
Fig 24 - Dorre zilindrikoaren diseinuaren egoera tentsionala nekeraren analisisan	34
Fig 25 - Dorre zilindrikoaren deformazio egoera.....	35
Fig 26 - Sareta egituraren lehenengo diseinuaren barra diagrama.....	36
Fig 27 - Sareta egituraren lehenengo diseinuaren mesh-a	37
Fig 28 - Sareta egituraren lehenengo diseinuaren simulazio eredia.....	38
Fig 29 - Sareta egituraren lehenengo diseinuaren egoera tentsionala	39
Fig 30 - Sareta egituraren lehenengo diseinuaren egoera tentsionala L 180 15 profilarekin	40
Fig 31 – a)Sareta egituraren bigarren diseinuaren barra diagrama b) Sareta egituraren bigarren diseinuaren simulazio eredia.....	41
Fig 32 - Sareta egituraren bigarren diseinuaren egoera tentsionala	42
Fig 33 - Bigarren diseinuaren egoera tentsionala L 180 15 profilarekin	43
Fig 34 - Sareta egituraren bigarren diseinuaren barra diagrama	44
Fig 35 - Sareta egituraren hirugarren diseinuaren a) Profilen banaketa b)Simulazio eredia.....	45
Fig 36 - Sareta egituraren hirugarren diseinuaren egoera tentsionala	45
Fig 37 - Sareta egituraren hirugarren diseinuaren egoera tentsionala tentsio maximo onargarriaren baldintza betetzen den iterazioan.....	46
Fig 38 - Sareta egituraren egoera tentsionala nekearen analisisan.....	47
Fig 39 - Sareta egituraren deformazio egoera.....	48
Fig 40 – Dorrearen azken diseinuen 3D ereduak. a)Dorre Zilindrikoa b)Sareta Egitura	49
Fig 41 – Bornay Wind13+ AS-ren a)Fitxa teknikoa b)Potentzia kurba.....	58
Fig 42 - Alabearen modelo hurbildua	60
Fig 43 - a)Alabe hurbilduaren dimentsioak b)AS-ren erreferentzi sistemak c)Alabearen iklinazio (pitch) angelua	60

Fig 44 - NX softwareak kalkulaturako inertzi momentua	60
Fig 45 - a)AS-aren erreferentzi sistema eta barra modelo baliokidea b) Dorrearen erreferentzi sistema.....	65
Fig 46 - ABCDFG hipotesien kargak: a)Hasieran b)Lehenengo translazioan	65
Fig 47 - ABCDFG hipotesien kargak: a)2.translazioan b)3. translazioan c)Dorrearen puntan.....	66
Fig 48 - H hipotesiaren kargak: a)Hasieran b)1. Translazioan	67
Fig 49 - H hipotesiaren kargak: a)2.translazioan b)3. translazioan c)Dorrearen puntan	67
Fig 50 - I alboko hipotesiaren kargak: a)Hasieran b)1. translazioan	68
Fig 51 - I alboko hipotesiaren kargak: a)2.translazioan b)3. translazioan c)Dorrearen puntan	69

TAULEN AURKIBIDEA

Taula 1 - Haizearen abiaduren datuen laburpena.....	21
Taula 2 - Karga sinplifikatuen metodarako hipotesien laburpena	22
Taula 3 - Materialaren segurtasun koefizienteak.....	24
Taula 4 - Kargaren segurtasun koefizienteak	25
Taula 5 - Limitearen egoeraren analisirako koefizienteak	25
Taula 6 - Dorrearen gaineko indarren balioak.....	26
Taula 7 - Altzairu Estrukturalaren Propietate Mekanikoak	29
Taula 8 - Altzairu estrukturalen tentsio onargarri maximoa	29
Taula 9 - Dorre zilindrikoaren diseinuaren iterazioak	32
Taula 10 - Lehenengo sareta egitura diseinuaren iterazioen emaitzak profil ezberdinekin	39
Taula 11 - Bigarren sareta egitura diseinuaren iterazioen emaitzak profil ezberdinekin	42
Taula 12 - Hirugarren sareta egitura diseinuaren iterazioen emaitzak profil ezberdinekin	46
Taula 13 - Dorre zilindrikoaren emaitzen laburpena.....	48
Taula 14 - Sareta egituraren emaitzen laburpena.....	49
Taula 15 - Indar koefizientea	57
Taula 16 - Ekuazio sinplifikatuen emaitzak.....	70
Taula 17 - Karga erresultanteak dorrearen puntan.....	71

1 SARRERA

Proiektu honen helburua aerosorgailu (hemendik aurrera AS) txiki baten egituraren diseinu eta analisi estrukturala garatzea da. AS txikia Gasteizko Ingeniaritza eskolaren teiltuan instalatuko da, leku geografiko horren haizearen ezaugarriak eta estrukturak jasan beharreko tentsioak aztertuko dira diseinu apropos bat lortzeko.

Egituraren analisia MSC Apex Elementu Finituen bidezko software-arekin egingo da. Programa honekin egiturak jasango duen tentsio eta deformazioak kalkulatu ditugu, egituraren eremu guztietan materialaren edo araudiaren limite maximoak gainditzen ez direla bermatzeko.

UPV/EHU-ko Campus Bizia Lab-eko parte den AS txiki baten instalazioaren bideragarritasunaren ikerkuntza proiektu baten ondorioz garatzen da lan hau, AS-ak behar duen estrukturaren diseinu egokia bermatzeko.

1.1 PROIEKTUAREN HELBURUA

Proiektu honen helburua AS txikiaren egituraren diseinu proposamena eta analisia burutzea da, honen funtzionamendu egokia bermatzeko. Diseinuan kontsideratu behar diren aspektu guztiei buruzko informazioa, diseinuaren metodologia eta honen ezarpena ikastea ere da proiektu honen helburu.

Esaterako, haizeak eragindako indarrak kalkulatzeko lan konplexua da, hainbat faktore daudelako jokoan, hala nola, tenperatura, turbulentsia, AS-ren geometria etabar... Proiektu honetan, indar horien estimazio baliagarri bat nola egiten den ikastea da helburu bat.

Gainera, diseinu mekanikoan erabiltzen den elementu finituen metodoa erabiltzea da beste helburu inportante bat. Horretarako, sarearen edo mesh-aren ezaugarri inportanteak ikasiko dira, hala nola unitate txikien tamaina aproposa eta elementu mota. Baita ere, emaitzen baliagarritasuna aztertzen ikasiko da, simulazioan lortzen diren emaitzak ez dutelako errealitatea beti adierazten.

Beste modu batean esanda, proiektu honen bidez ingeniari mekanikoan lantzen diren arlo inportanteetan, hala nola estruktura diseinuan, energia berriztagarrietan eta aerodinamikan, esperientzia eta ezagutzak barneratzea da beste helburu garrantzitsu bat.

1.2 CBL: CAMPUS BIZIA LAB

Campus Bizia Lab Programa, Erasmus University Educators for Sustainable Development Proiektutik eratorritako ekimena da. Helburua administrazio eta zerbitzuetako langileen, ikasleen eta irakasleen arteko lankidetzaren prozesu bat sortzea da, unibertsitatearen barruan iraunkortasun-erronkei erantzuteko.

CBL-ren helburua komunitate bat sortzea da, UPV/EHUko campusetan bertan atzematen diren jasangarritasun ezaren erronkak eta arazoak konpontzen dituen modu kooperatiboan lan eginez. Horretarako, UPV/EHUko campusetan iraunkortasunari lotutako eragin handiko ikaskuntza-prozesu arrakastatsuak gauzatzea bilatzen da, helburu hori lortzea ahalbidetuko duten lan-gailuak diseinatuz, garatuz eta ebaluatuz. [1]

CBL-ren barruan, hainbat proiektu daude, hala nola PIZTU eta CIRCURAE. Kasu honetan, proiektu hau "Energia minieolikoaren bideragarritasun integralaren azterketa Gasteizko Ingeniaritza Eskolan"-ren barne dago. CBL-ko proiektu honek Vitoria-Gasteizko Ingeniaritza Eskolaren eraikinean aerosorgailu txiki bat instalatu nahi du, inguru urbanoetara aplikatutako energia eolikoaren berezitasunak analizatu eta aztertu ahal izateko. Horrela, etengabeko jarraipena egin daiteke aerosorgailuaren portaera ebaluatzeko eta energia berriztagarrien integrazio-maila eraikin urbano batean baloratu ahal izateko. Fig 1 Irudian, AS-ren instalazioaren lokalizazioa adierazten da, hau da, Gasteizko Ingeniaritzaren teiltuan. [2]

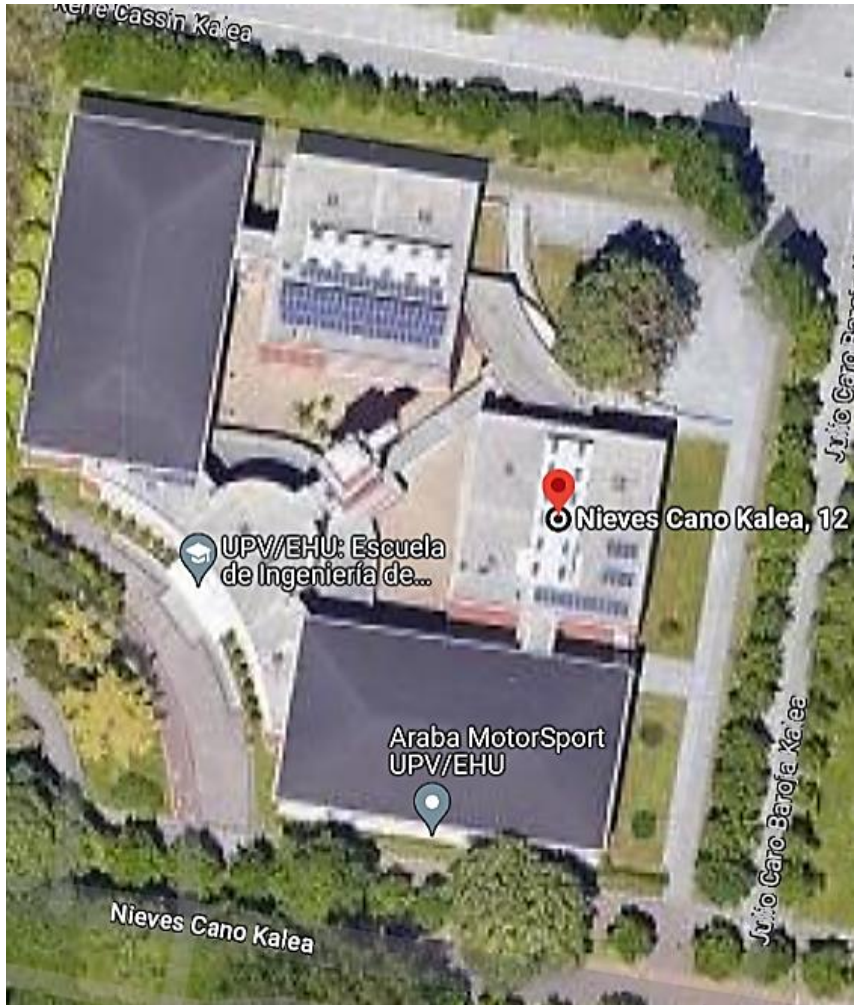


Fig 1 - AS-ren lokalizazioa¹

1.3 METODOLOGIA

Proiektuaren metodologia inportantea da, honen garapenaren erritmoaren adierazlea delako. Lehen esan bezala, proiektua azpiataletan banatzen da denbora era optimoenean banatzeko.

Aurrerago zehatzago azalduko da atal bakoitzeko metodologia, baina laburbilduz, bi atal nagusi daude: Estrukturen gaineko indarren karakterizazioa eta estrukturen diseinuaren baliagarritasuna.

Indarrak karakterizatzeko hipotesi batzuen arabera, aireak eragingo duen karga, konponente desberdinetan banatuko da (makurdura, tortsioa etabar...), egoera kaltegarriena aurkitzeko. Horretarako, UNE-EN 61400-2 [3] araudia jarraituko da, hipotesien espezifikazioak jarraituz.

Hipotesi hauetan airearen ezaugarriak jakitea ezinbestekoa da, eta ezaugarri hauek toki geografikoaren arabera aldatzen dira. Horretarako, badaude atlas moduko web orriak, non lokalizazioa eta AS-ren altueraren arabera, haizearen datuak lortzen diren. Beraz, indarrak kalkulatzeko lehenengo haizearen datuak aurkituko dira.

Behin indarrak karakterizatuta daudenean, bigarren atalera pasatuko da, hau da, egituraren diseinua balioztatzea. Atal honetan, estrukturen geometria elementu finitu bidezko softwarearekin analizatuko da tentsio eta deformazio lokalak ezarritako limitea gainditzen ez duten bermatzeko.

¹ Google Maps

Geometria desberdinak aztertzean erabakiko da zein den egiturarik aproposena proiekturako.

2 TESTUINGURUA

2.1 ENERGIA EOLIKOA

Energia eolikoa energia iturri berriztagarri bat da, non haizearen energia zinetikoa energia elektrikoan bihurtzen den, errota izeneko estrukturak erabiliz. Energia eolikoa energia sorkuntza prozesu agortezin bat da. Hortaz gain, energiaren sorkuntza prozesuan zehar ez da kutsadurarik isurtzen atmosferara. Arrazoi hauengatik azken urteetan ugaritze bat egon da energia sorkuntza metodo honen erabileran, eta baita haize-erroten teknologiaren berrikuntza eman da, energia sorkuntzaren efizientzia lortzeko helburuarekin [4].

Haizearen energia erabiltzea iturri bezala beste abantaila gehiago dauzka. Eguzki-energiarekin alderatuz, energia elektriko berdina sortzeko energia eolikoak lursail gutxiago behar du. Gainera, parke eolikoaren azalera erraz itzuli daiteke aurreko lursaila berreskuratzeko.

Beste alde batetik, turbina eolikoaren operazio eta mantentze lanen kostuak erlatiboki baxuak dira. Ondorioz, haize handia darabilen eremuetan, kostua kW unitateko baxua da. Hortaz gain, beste jarduerekin, hala nola, nekazaritza eta abeltzaintzarekin problemarik gabe elkar bizi dezake. Hortaz, energia eolikoak ez du inpakturik ekonomia lokalean, lursaileko jarduera tradizionala garatzea ahalbidetuz.

Hala ere, energia eolikoak badauzka bere desabantailak. Inportanteena airearen ausazkotasuna da. Haizea iragarrezina denez ez dira beti produkzioaren aurreikuspenak betetzen. Bestalde, energia ezin da biltegitatu, baizik eta sorkuntza momentuan kontsumitu behar da. Badaude sorkuntza potentzia demanda potentzia baino handiagoa den momentuak, adibidez gauean. Kasu hauetan energia alferrik sortzen da edo ez da sortzen, hortaz efizientzia galduz. Arazo hau konpontzeko, energia biltzeko metodoak bilatzen hari dira, hala nola grabitatearen bidez, ur ponpeaketa-sistemak edo hidrogenoaren produkzioa.

Paisaian ere badauka inpaktua energia eolikoak, distantzia handietara ikusgarriak direlako. Batezbesteko altuera 50-80m artean dago, 40m-rainoko alabeak gehituz. Paisaian eragindako inpaktu estetikoak batzuetan biztanlerian haserrea sortzen du. [5]

2.2 EGOERA EUROAPAN

Europak, azkeneko hamarkadan urteko produkzioa %34,8-a handitu du. 2021-en kapazitate instalatua 235GW-koa izan zen, 2020-koan baino 75 gehiago. Gaitasun eolikoa gehien handitu zuten herrialdeak Erresuma Batua, Suedia, Alemania, Turkia eta Herbehereak izan ziren. WindEurope europar asoziazioaren arabera 2021-ean zehar energia eolikoak 437TWh sortu zituen, Europar Batasunaren demanda elektrikoaren %15 hornitzeko.

Nuevas instalaciones eólicas anuales en Europa, 2012-21

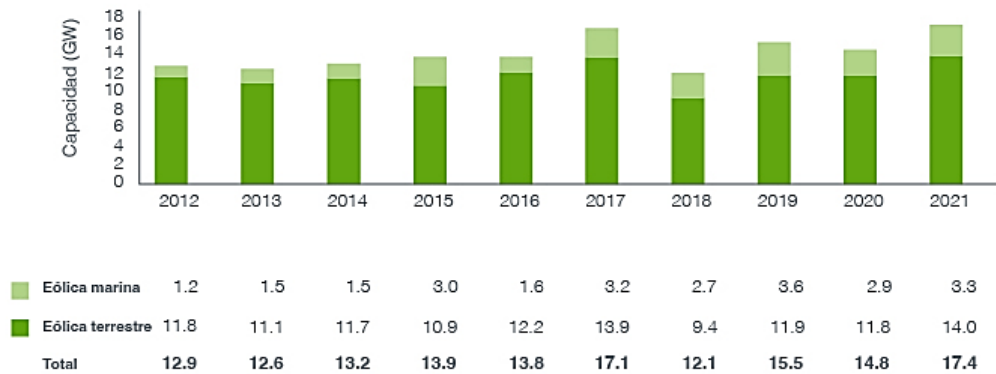


Fig 2 - Kapazitate eolikoaren handipena Europan²

Espanian, produkzio eolikoak energia sorkuntzaren iturri printzipala izan zen 2021-en, AS-ek 60600 GWh sortu zituzten Red Electrica de España-ren arabera. Ondorioz, energia eolikoak energia mix-aren %23,3 izan zen urte horretan. 2020. Urteko datuekin alderatuz, produkzio eolikoak %10.5-eko handipena jasan du.

Europako produkzio eoliko handiena Alemaniak dauka 64 GW-rekin, Espainiak jarraituta (28 GW). Hurrengo herrialdeak Erresuma Batua, Frantzia eta Suedia dira, 27, 19 eta 12 GW-rekin hurrenez hurren.

Porcentaje de la demanda media anual de electricidad cubierta por la energía eólica en 2021

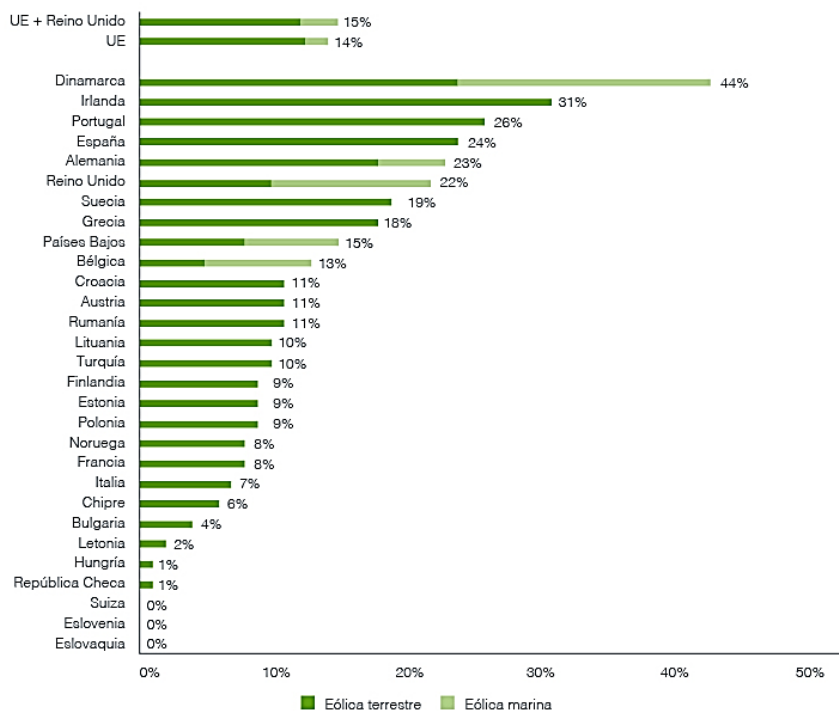


Fig 3 - Energia eolikoaren kontribuzioa herrialde ezberdinen energia-demandan³

² Iturria: WindEurope

³ Iturria: WindEurope

Eremu honetan ere, teknologiak record berri bat bete du, 2021-eko martxoaren 6-ean Danimarkak ia bere demandaren %100-a bete zuen energia eolikoarekin. Egun horretan haize-errotek 98GWh sortu zituzten.

Energía eólica en Europa: perspectivas para 2022-2026, Wind Europe-ren informearen arabera, energia eolikoa funtsezkoa izango da datozen bost urteetan, europar herrialdeei lagunduko bait die ekonomiaren deskarbonizazio prozesuan eta trantsizio energetikoarekin jarraitzea ahalbidetuko du.

Informe honen pronostikoaren arabera, Europar Batasuneko herrialdeek urtero energia eolikoko 26GW instalatu behar dute urtero, demandaren %40 energia berriztagarrien iturrietatik etortzea lortzeko.

Gainera, ikerketa horren arabera kapazitate instalatua urtero batz bestea 17,6 GW handituko da 2022-2026 urteetan zehar. Alemania, Espainia eta Erresuma Batua jarraituko dira potentzia gehien duten herrialdeak izaten, eta AS-en potentzien handipena espero da 4MW-etatik aurrera. [6] [7]

2.3 AUTOKONTSUMOA

Autokontsumo elektrikoa ematen da pertsonak edo enpresek kontsumitzen duten energia, hurbil dagoen sorkuntza instalazioetatik datorrenean, hala nola, eguzki-paneletatik edo AS txikietatik.

Energia kontsumo metodo honek klima-aldaketa gelditzera laguntzeaz gain, beste abantaila batzuk eskaintzen dizkio kontsumitzaileari eta sozietateari.

Lehenik eta behin, energiaren fakturan aurrezpen handia suposatzen du, energia berriztagarriak erabiltzen dituelako etxeko energia kontsumoa asetzeko. Autokontsumoaren garapenak garraioaren elektrifikazioa bultzatzen dezake, kotxe elektrikoa kargatzeko behar den energiaren hornitzean, kosteak mantenduz.

Bestalde, sorkuntza banatuak demandaren kudeaketa hobetzen du, eskaria bera eta distribuzio distantziak txikituz, bai partikulariki zein maila kolektiboan.



Fig 4 - Autokontsumo instalazio baten elementu nagusiak⁴

⁴ Iturria: Iberdrola

2.3.1 AUTOKONTSUMO MINIEOLIKOA

Autokontsumo mini-eolikoak haizearen energia zinetikoa erabiltzen du energia elektrikoa sortzeko, tamaina txikiko haize errotak erabiliz. Gailu hauen bidez sortutako energia kontsumo domestikoak hornitzeko erabiltzen da gehienbat.

Energia eolikoan bezala, AS txikietan haizearen indarrak errotore bat birarazten du, korrante alternoko elektrizitatea sorraraziz. Errota txiki popularrena ardatz horizontaleko motatakoak dira, baina inguru urbanoetan sorturiko beharrek ardatz bertikaleko AS-en garapena bultzatu dute.

Energia minieolikoak eguneko edozein unetan eta urteko edozein sasoiari sor dezake energia, eguzki panelek ez bezala, gauean ez bait zaie erradiazio nahikorik heltzen. Errotaren instalazioa erlatiboki erraza da eta mantenimendu lan handirik ez du behar. Hala ere, kontuan hartu behar da, haizearen indarra aldakorra eta ausazkoa da, energia sorkuntzaren predikzioa egitea lan konplexua bilakatuz.

Autokontsumo minieolikoko instalazio sinple batean zenbait funtsezko elementuak aurkitu daitezke. Lehenik eta behin haize errota txikia, energia sortzaile gailu gisa. Elementu honen potentzia ez da 100kW baino handiagoa, eta alabeek ezin dute 200 m² baino azalera gehiago bete.

Baliteke instalazioak metagailua (bateria) izatea, kontsumorik ez dagoenean soberan dagoen energia metatzeko, eta kontsumitu nahi denean bildutako energia hori erabiltzeko. Prozesu hori kontrolatzeko erreguladore izeneko gailu bat dago. Erreguladoreak sorkuntza elektrikoa kontrolatzen du baterien instalazioaren egoera kontrolpean edukitzeko. Dena den, egoitza-instalazioetan ez da ohikoa metagailurik izatea, monitorizazio sistema batengatik aldatuz.

2.3.2 AUTOKONTSUMO FOTOVOLTAIKOA

Autokontsumo mota honek eguzkiaren erradiazioa erabiltzen du elektrizitatea produzitzeko, eta hortaz, eguzki-panelak behar ditu energia transformazioaren prozesurako. Eguzki-panelak laurogeita hamarreko hamarkadatik aurrera hasi ziren masan ekoizten, Bell laborategietan nahi gabe silizioa ez-purutasun batzuekin dopatua argiarekiko hipersentikorra zela aurkitu zutenean.

Teknologiak aurrera egin ahala panelek prezio eskuragarri bat izatea lortu da, eguzki-panelen erabilera popularragoa bilakatuz. Ondorioz, autokontsumo fotovoltaikoa elementu komun bat bilakatu dira inguru urbano eta landatarretan.

Autokontsumo sistema fotovoltaiko bat sarera dago konektatuta, eta hainbat elementu osatzen dute beharrezko instalazioa. 4. Figuran ikus daitezke autokontsumo instalazioa baten adibide sinplifikatu bat.

Eguzki plakak zelula fotovoltaikoz osatuta dagoen egitura bat da elektrizitatea sortzeko eguzkiaren erradiazioaren eraginpean. Beste ezinbesteko elementu bat inbertsoreak dira. Hauek gailu elektroniko batzuk dira, panelek sortzen duten korrante zuzena sare elektrikoan funtzionatzen duen korrante alternoa sortzeko.

Hortaz gain, instalazioan elementu metatzailerik badaude, energia minieolikoan erabiltzen diren erreguladorea eta metagailua ere aurki daitezke instalazio mota honetan. [8] [9]

Autokontsumo fotovoltaiko-ko instalazioek ezin dute 100kW-ko potentzia gainditu [10]. Hala ere, instalazioaren potentzia ideala 5kW-koa da, etxebizitza batean kontratatutako potentzia normala 4.4 kW delarik. [11]

2.3.3 EGOERA ESPAINIAN

Gaur egun, Espainiako autokontsumo instalazioak nagusiki fotovoltaikoak dira. APPA-ren 2022-ko lehen informearen arabera, urte horretan Espainian 2,6 GW-ko potentzia instalatua du, azken lau urteetan 26-ko handipena izanik. Potentzia horretatik %39-a egoitz-instalazioetan izanik eta beste %61-a instalazio industrialetan. Informearen arabera, 2022-n autokontsumoko instalazioek 4564 GWh-ko energia sortu zuten, urteko eskariaren %1.8-a. [12]

2.4 AEROSORGAILU TXIKIAK

2.4.1 MOTAK

Haize errota txikiak bi mota desberdinetan bereiz daitezke orokorrean, ardatzaren norabide axialaren arabera: ardatz horizontaleko AS-ak eta ardatz bertikaleko AS-ak.

Ardatz horizontaleko AS-a mota tipikoena da, parke eolikoetan aurki daitezkeen erroten antzekotasun handiagatik, baina noski, hauen tamaina askoz txikiagoa da. Sorgailu hauek gutxienez bi alabe dituzte eta haize-orratz bat hauen atzekaldean (lema), haizearen norabidearekin lerrokatzeko.

Sorgailu mota honen adibide bat Fig 5 irudian ikusi daiteke.



Fig 5 - Ardatz horizontaleko sorgailua⁵

Beste alde batetik, ardatz bertikaleko AS-ak daude. Hauek helize forma daukate, eta haien geometriaren formaren simetria dela eta, haien funtzionamendu egokia ez dago haizearen norabidearen menpe. Mota hau ardatz horizontaleko AS bat baino isilagoa da, baina efizientzia, ordea, baxuagoa da. Fig 6 Irudian, ardatz bertikaleko AS baten adibidea ikus daiteke. [13] [14]



Fig 6 - Ardatz bertikaleko sorgailu⁶

⁵ Iturria: Enair SL

⁶ Iturria: Ropatec SrL

2.4.2 ELEMENTU NAGUSIAK

2.4.2.1 ERROTOREA

Errotoreak haizearen energia zinetikoa energia mekanikoan transformatzen duen errotaren elementua da. Zenbat eta handiagoa egin alabeen diametroa, geroz eta haizearen kaptazio handiagoa ahalbidetuko da, gailuak eman dezakeen potentzia handituz.

2.4.2.2 BIDERKATZAILEA

Biderkatzailea engranaje multzo bat da errotorearen abiadura baxua (14-30rpm), sorgailuaren ardatzean abiadura altuago bat lortzeko. [15]

2.4.2.3 ENERGIA SORTZAILEA

Energia sortzailearen helburu nagusia errotorearen energia mekanikoa energia elektrikoan transformatzea da. Sortutako energia hori momentuan instalazioaren inguruan kontsumituko da gailuren batek energia eskatzen badu edo sarera pasako da.

2.4.2.4 GONDOLA

Gondola errotaren karkasa da. Elementu mekaniko printzipalak babesten ditu, hau da, errotorea, biderkatzailea eta sorgailua. Orokorrean beira eta poliesterekin eginda dago eta altzairu herdoilgaitzeko profilekin indartuta dago. Errotek balazta sistema aerodinamiko bat dute instalatuta emergentzia egoera batean gelditzeko. Gondoletan haizearen abiadura neurtzen da alabeen mugimendua ekiditzeko.

2.4.2.5 ALABEAK

Alabeak haizearen energia zinetikoa transmititzen diote ardatzari, sorgailuak elektrizitatea sortzeko. Aerodinamikoki diseinatzen da alabeen geometria ahalik eta energia gehiago sortzeko, hau da, prozesuaren efizientzia maximizatzeko. Alabe modernoak beira-zuntzekoak dira plastikoz eta karbono zuntz-ekin gogortuak. Fig 7 Irudian AS batean aurkitu daitezkeen atalik garrantzitsuenak adierazten dira.

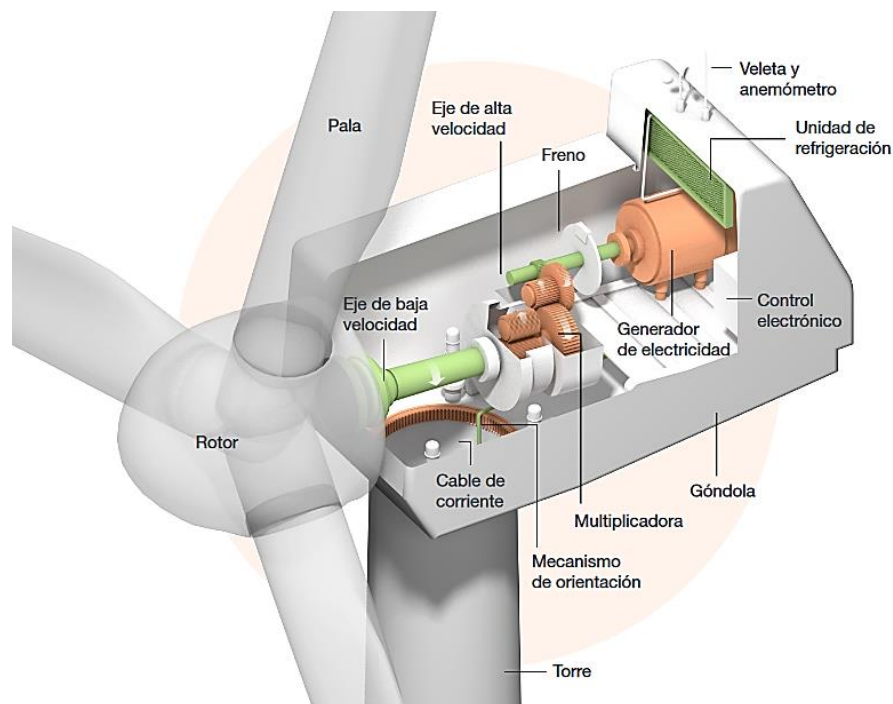


Fig 7 - AS baten atal nagusiak⁷

⁷ Iturria: Iberdrola S.A.

2.4.2.6 MASTA/EUSKARRI-EGITURA

AS-ren mastak haizeak eragiten dituen indarrak jasan behar ditu, eta baita gondolaren eta alabeen pisua. Errota txikietan euskarri egituraren altuera parametro inportante bat da, geroz eta altuago jarri AS txikia, airearen abiadura handiagoa izango da, potentzia sorkuntza handituz. Bestalde, geroz eta egitura altuagoa izan, handiagoak izango dira ere jasan beharreko kargak.

Hainbat motatako egiturak daude, baina komunenak sareta egiturak eta masta zilindrikoak dira. Fig 8 Irudian bi masta moten adibideak ikus daitezke. [15] [16]



Fig 8 - AS txikien estruktura motak: a) Masta zilindrikoa⁸, b) Sareta Egitura⁹

3 PROIEKTUAREN AEROSORGAILUA

Aipatutako CBL proiektuan instalatzeko aerosorgailuaren aukera desberdinak aztertzen ari dira. Hauen artean NE S-800, Bornay Wind13+ eta FLTXNY POWER daude. Aerosorgailu hauek potentzia eta espezifikazio aldetik ezaugarri antzekoak dituzte, hortaz honen aukeraketa egiteko beste faktore batzuk kontsideratuko dira, hala nola prezioa eta beharrezko konponente elektronikoak.

Kasu honetan, kalkuluak egiteko Bornay Wind13+ AS-a erabiliko da AS-ari buruzko informazio teknikoaren eskuragarritasunagatik. AS hau 1000W-koa da, 2 alabe ditu eta erlojuaren orratzen norabidean biratzen du. Fig 9 Irudian, fabrikatzailearen web orrialdean dagoen AS-ren modeloa erakusten da. [17]

⁸ TechnoSpin Inc

⁹ Fiasa

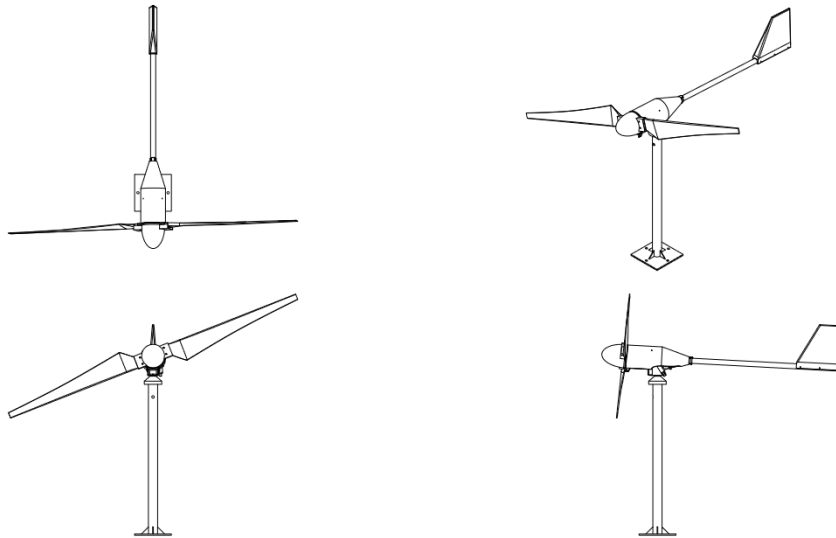


Fig 9 - Bornay WInd13+ AS-ren modeloa¹⁰

12.2 eranskinean azaltzen den bezala, haizearen kargak kalkulatzeko, haizearen norabidearekiko AS-ren proiektatutako azalera beharko da, eta horretarako eskema honetan agertzen diren dimentsioak erabiliko dira. Bestalde, modelo honetan ez da espezifikatzen marrazkiaren eskala, beraz hurbiltasun bat egingo da marrazkian neurtutako dimentsioekin eta fitxa teknikoan jartzen duen alabeen diametroarekin. Fig 10 Irudian, eskeman AutoCAD softwarearekin neurtutako AS-ren modeloaren dimentsioak ikusi daitezke.

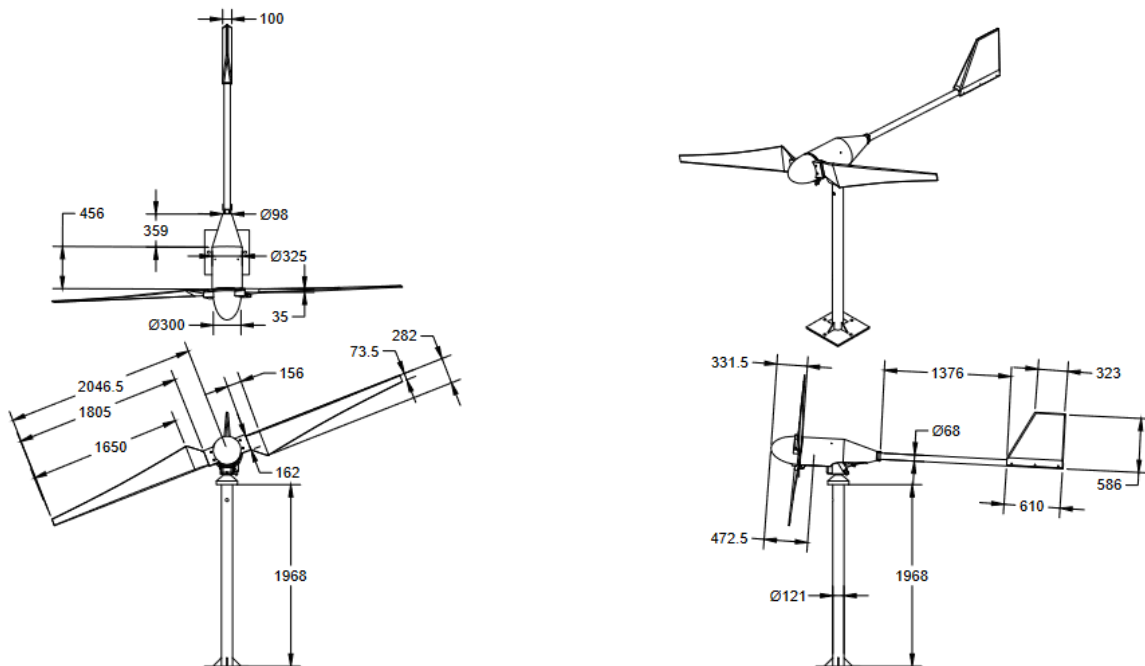


Fig 10 - AS-ren modeloa dimentsionatuta

Bornay Wind 13+ AS-ren alabeen erradioa fitxa teknikoaren arabera 1,43m da, eta eskema horren dimentsioen arabera, dimentsio hori 2,04m da. Ondorioz, dimentsio guztien proportzionaltasuna mantentzen dela suposatuz, ereduaren kota guztiak proportzionalki gutxituko dira. AS-ren dimentsioen hurbilketaren eskema Fig 11 irudian erakusten da.

¹⁰ Iturria: Bornay SL

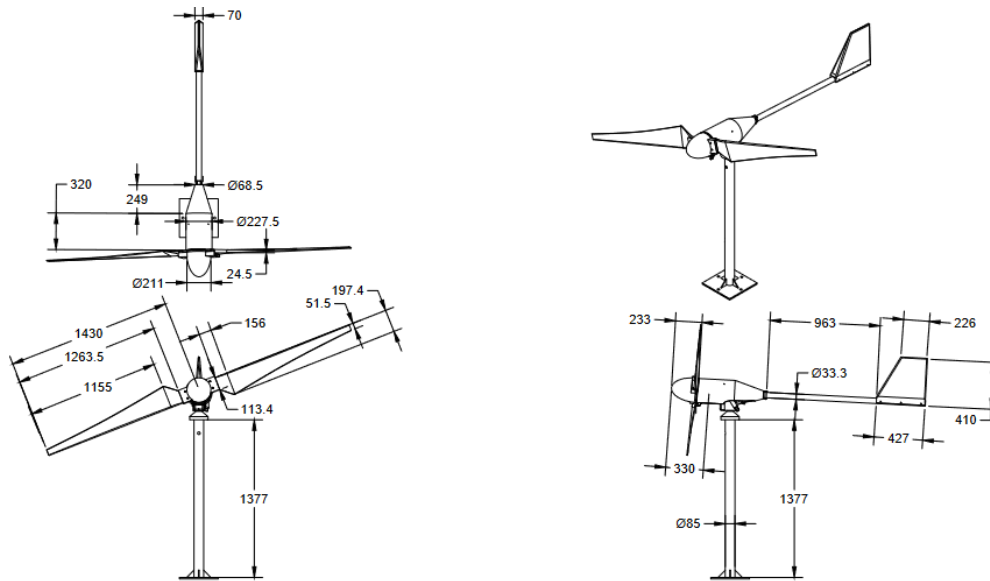


Fig 11 - AS-ren modeloa proportzionalki eskalatuta

Eredu honen antzekotasunaren baliagarritasuna bermatzeko, dimentsio nagusiekiko konparaketa bat egingo da. Kota nagusiak ikusiz, luzera osoa 2085 mm izan beharko zen, modelo hurbilduan ordea 2192 mm da. Beste alde batetik, buztanaren luzera kota nagusien arabera 1585mm da, eta modelo hurbilean 1639mm. Kota hauen errorea %5 eta %3-koa da hurrenez-hurren, beraz esan dezakegu gutxi gora behera eredu erreala dimentsioetara hurbilduko dela.

AS-a eta dorrea, puntera izeneko zutabe batekin daude anklatura. Pieza honen dimentsioak eta marrazki teknikoak fabrikatzailearen web orrialdean eskuragarri dago. Proiektu honetarako ordea, AS-ren ereduaren proportzionaltasuna jarraitzeko, Fig 11 irudian adierazitako dimentsioekin modelatuko da, hau da, 1377mm luze eta 85 mm-ko diametroa duen geometria zilindriko bat bezala.

Beste alde batetik, haizearen kargak kalkulatzeko dorrearen dimentsioak jakitea beharrezkoa da horren azalera proiektatua behar delako, aurrerako ikusiko den bezala. Hori dela eta Avant garde fabrikatzaileak eskaintzen duen 6m-ko dorrearen dimentsioak hartuko dira eredu bezala, hau da, 6m-ko altuera eta 0,9m-ko diametroa duen dorre zilindriko bat. [18]

4 HAIZEAREN DATUEN KALKULUA

Esan bezala, proiektu honetan, Gasteizko Ingeniaritza Eskolan jarri nahi den AS batentzako estruktura proposatu batzuen analisi eta diseinua egingo da. UNE-EN 61400-2 araudian ezarritako hipotesiak erabiliko dira haizeak eragingo dituen indarren kalkulua egiteko, egoera tentsional kaltegarriena kalkulatzeko.

Lehenengo pausua haizearen datuak aurkitzea da, hala nola, haizearen batez besteko abiadura, norabidea eta abiadura maximoa. Horretarako bi gauza jakin behar dira, haize-errota kokatuko den tokia eta errotorean ardatzaren altuera. Kasu honetan, Gasteizko ingeniaritza eskolaren teilatua jarriko da AS-a, eraikinaren altuera Google Earth bidez kalkulatu da.

Fig 12 Irudian ikusten den bezala, Gasteizko Ingeniaritza eskolaren teilatua klik eginez 540m-ko altuera adierazten da. Prozesu berdina lurrean errepikatuz, 524m-ko altuera lortzen da. Bi altuerak kenduz, Google Earth-en arabera eraikinak 16m izango ditu, eta altuera horri dorrearen eta punteraren altuera gehituz, 6m eta 1,37m hurrenez hurren, AS-ren ardatzaren altuera 23,37m-ra egongo da.

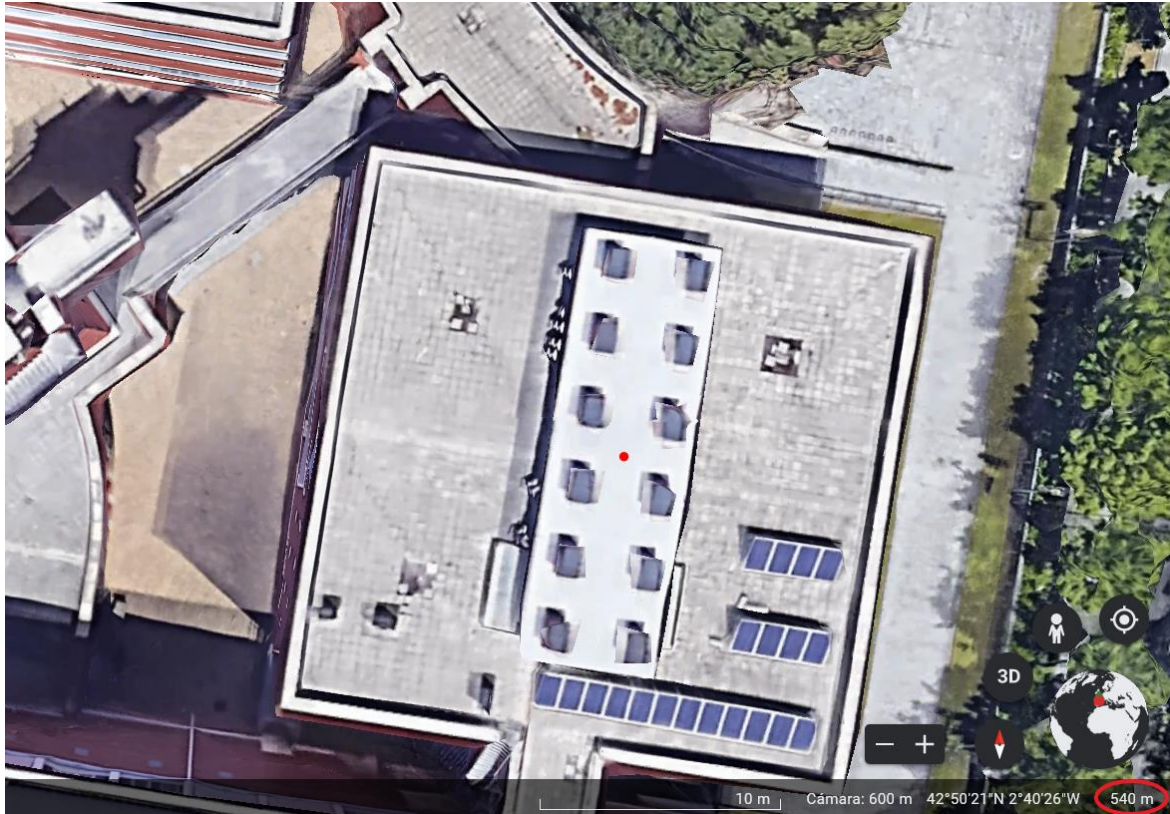


Fig 12 - Google Earth-en lortutako Eraikinaren altuera¹¹

Lehen esan bezala, zonalde baten potentzial eolikoa lortzeko hainbat web orri daude, adibidez globalwindatlas edo enair. Kasu honetan enair web orrialdea erabiliko da kokapen zehatzagoa ezarri daitekeelako. Enair web orrialdean AS-ren ardatzaren altuera, hau da, 23m eta kokapena sartuz, haizearen datuak aurkitu daitezke.

Lehenengo, haizearen batezbesteko abiaduraren datua ikusgarri dago Fig 13 Irudian. Ikusi daitekeen bezala, enair web orrialdeak datuak iturri desberdinetatik hartzen du informazioa, beraien datu basetik (PROPIA), Danimarkako Unibertsitate Teknikotik (DTU) eta MERRA-2-tik, azken hau NASA-k sorturiko analisi atmosferikorako proiektu bat izanik. DTU-k adierazten duen datua da hurbilena proiektu honetarako, batezbesteko abiaduraren datua AS-ren ardatzaren altuera 18m-etan delako, eta gainera 90%-ko konfiantza gradua adierazten delako. Datu hau kontuan hartu beharko da indarren kalkulurako.

Fuente de datos	Altura hub (m)	Velocidad media (m/s)	Grado de confianza
PROPIA	50	4.8	5.0%
DTU	18	4.4	90.0%
MERRA-2	50	4.4	80.0%

Fig 13 - Haizearen batezbesteko abiadura¹²

¹¹ Iturria: Google Earth

¹² Iturria: Enair SL

Beste alde batetik, enair web orrialdetik haizeen arrosaren informazioa ikusi daiteke, haizearen norabidearen frekuentzia jakiteko. Grafika hau, Fig 14 Irudian ikusi daiteke. Argi geratzen da, haizearen norabide nagusia aukeratutako lokalizazioan iparretik etorritako haizea dela. Informazio hau kontuan hartu behar da ekipoak norabide nagusietan oztoporik gabe instalatzeko.

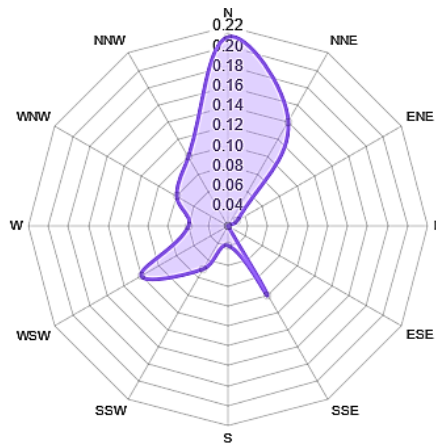


Fig 14 - Haizeen arrosa¹³

Azkenik, beste informazio baliagarri bat haizearen indarren distribuzioa da haizearen abiadura komunetak ikusteko. Fig 15 Irudian, enair web orrialdearen datuekin eraikitako histograma eta MERRA-2 datu basearen arabeko haizearen abiaduren Weibull distribuzioa adierazten da. Ikusi daitekeen bezala, haizearen abiadura 1 eta 8m/s inguruan egoten da. Gainera, diagrama honetan adierazten den abiadura maximoa 39m/s-koa da, nahiz eta frekuentzia ia mespretxagarriarekin. Datu hau, haizearen abiadura maximoa bezala hartuko da.

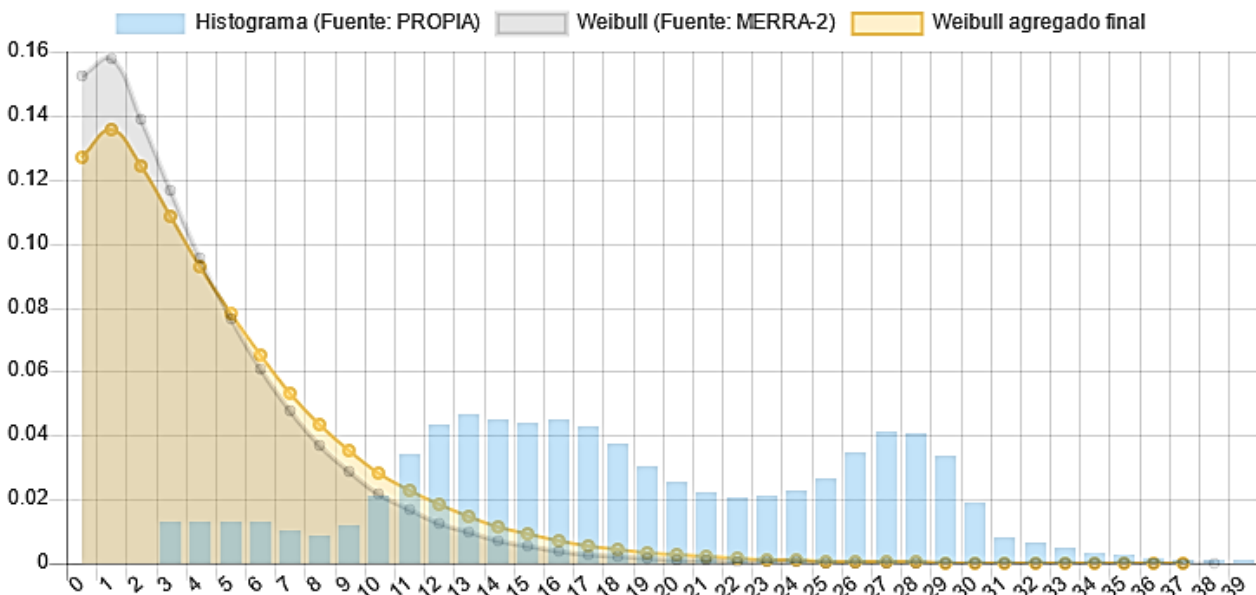


Fig 15 - Haizearen abiaduren distribuzioa¹⁴

¹³ Enair SL

¹⁴ Iturria: Enair SL

Enair web orrialdeko informazioa hartuta, kargen kalkulurako beharrezkoak diren haizearen abiadura deskribatzen dituzten parametroak definitu behar dira.

Lehenik eta behin haizearen batezbesteko abiadura edo V_{ave} da. Ateratako datuen arabera, balio hau 4.4m/s izango da. Ondoren, AS-ren diseinu abiadura edo V_{design} 1,4 aldiz V_{ave} bezala definitzen da. Hortaz erabiliko den diseinu abiaduraren balioa 6,16 m/s izango da.

Gainera, erreferentzia abiadura edo V_{ref} beharrezkoa da, hau 10 minutuz AS-ren ardatzean egongo den haizearen abiadura bezala definitzen da. Informazio faltagatik eta neurketa baliabideen eskuragarritasun ezagatik, parametro hau V_{design} abiadura bezalakoa dela suposatuko da, hau da, 6,16m/s.

Azkenik, batezbesteko haizearen abiadura extremoa 50 urteetan neurtua edo $V_{e,50}$ kalkulatu behar da. Kasu honetan informazio zehatz ezin izan da aurkitu, beraz Fig 15 Irudian erregistratuta agertzen den abiadura hartuko da, hau da 39m/s. [3]

Bestalde, haizearen indarrak kalkulatzeko haizearen abiadura maximoa, hau da, abiadura extremoa, Bornay Wind13+ AS-aren biziraupen abiadurarekin egingo da, segurtasuna bermatzeko asmoz, Hori dela eta, fitxa teknikoan aurkitu daiteke, AS-ak jasan dezakeen abiadura maximoa 60m/s-koa dela, beraz $V_{e,50}$ -ren balio bezala hori hartuko da kargen kalkuluan.

Haizearen abiaduraren datu inportante hauek Taula 1. Taulan laburbiltzen dira.

Taula 1 - Haizearen abiaduren datuen laburpena

Parametroa	Balioa (m/s)	Deskribapena
V_{ave}	4,4	Bataz besteko haizearen abiadura
V_{design}	6,16	Diseinu abiadura
V_{ref}	6,16	Erreferentzia abiadura
$V_{e,50}$	60	Abiadura extremoa

5 KARGEN KALKULUA

AS-ren diseinuan hainbat karga hartu behar dira kontuan. Alde batetik bibrazio kargak, inertzi kargak eta karga grabitazionalak. Beste alde batetik karga aerodinamikoak ere kontsideratu behar dira, hauek airearen fluxuaren eta AS-aren elementuekiko interakzioaren ondorioz sorturiko kargak dira. Bestalde, karga operazionalak badaude, hala nola, balaztatzean, orientazio prozesuan. Azkenik, ingurune berezietako kargak, mantenimendu kargak, garraio kargak etab kontsideratu behar dira.

Diseinuaren ikuspuntutik, AS txiki bat bizitza baliagarria honek esperimeta dezakeen egoera adierazgarrienen multzo batekin irudikatu daiteke. Kargen hipotesiak funtzionamendu moduen, tokiaren araberrako egoeren, muntaiaren eta beste ezaugarrien arabera determinatu behar dira. Kargen hipotesi esanguratsu guztiak kontsideratu behar dira intzidentziaren zentzuzko probabilitate batekin.

Orokorrean, AS txiki baten integritate estrukturala determinatzeko erabiltzen diren karga hipotesiak hurrengo konbinazioetatik kalkula daitezke: hutsegiterik gabeko operazioa eta kanpo egoera normalak, hutsegiterik gabeko operazioa eta kanpo egoera arriskutsuenak (extremoak), hutsegiterik gabeko operazioa kanpo egoera egokiekin eta azkenik, garraio, instalazio, mantentze operazioak kanpo egoera egokiekin.

5.1 KARGAK KALKULATZEKO METODOLOGIAK

UNE-EN 61400-2 araudiaren arabera hiru era daude AS-ren kargak determinatzeko, karga sinplifikatuen metodologia, simulazio modeloa eta kargen neurketa eskala errealean.

5.1.1 KARGA SINPLIFIKATUEN METODOLOGIA

Ezaugarri mota zehatz batzuen AS-etan, karga hipotesi batzuentzat kargak kuantifikatu daitezke ekuazio sinpleekin. Ekuazioak aplikatu ahal izateko, baldintza batzuk bete behar dira. Alde batetik AS-a ardatz horizontalekoa izan behar da eta errotorea helize modukoa izan behar da bi edo alabe gehiagorekin. Bestalde, alabeak irteten egon behar dira (en voladizo), hau da, alde batetik bakarrik finkatuta, haien mugimendua koordinatua izan behar da eta gurpegia zurruna izan behar da (ez artikulatua). AS-ak haizealde edo haizebe konfigurazioan lan egin dezake, eta pitch-aren (alabeen eraso angelua) aldaketa mekanismo pasiboa edo aktiboa izan dezake, mugimendua beti koordinatua izanik.

Taula 2. taulan, karga sinplifikatuen metodologiarako hipotesien laburpena ikus daiteke. Bi motako analisi daude F eta U. F-ak esan nahi du kargen analisia nekearen aurreko erresistentziarekiko egingo dela, eta U-ak aldiz, analisia karga kritikoetan egingo dela, hau da, materialaren erresistentzia limitea, deformazio maximoa eta egonkortasun analisia egingo dela.

Taula 2 - Karga sinplifikatuen metodarako hipotesien laburpena

Situación de diseño	Hipótesis de carga		Flujo del viento	Tipo de análisis	Observaciones
Producción de energía	A	Operación normal		F	
	B	Orientación	$V_{hub} = V_{design}$	U	
	C	Error de orientación	$V_{hub} = V_{design}$	U	
	D	Empuje máximo	$V_{hub} = 2,5 V_{ave}$	U	Rotación del rotor pero puede estar plegándose o aleteando
Producción de energía más ocurrencia de fallo	E	Velocidad de rotación máxima		U	
	F	Cortocircuito en la conexión de carga	$V_{hub} = V_{design}$	U	Par generador en cortocircuito máximo
Parada	G	Desconexión (frenado)	$V_{hub} = V_{design}$	U	
Carga extrema del viento	H	Carga extrema del viento	$V_{hub} = V_{e50}$	U	El aerogenerador puede estar inmovilizado (en ralentí o parada) o regulado. Ninguna intervención manual
Condiciones de inmovilización y de falta	I	Inmovilización con carga del viento y exposición máxima	$V_{hub} = V_{ref}$	U	El aerogenerador es cargado con la exposición más desfavorable
Transporte, montaje, mantenimiento y reparación	J	Deberá estar indicado por el fabricante		U	
Leyenda F análisis de cargas debidas a fatiga. U análisis de cargas críticas.					

5.1.2 SIMULAZIO MODELOA

Kargak kalkulatzeko beste aukera bat simulazio eredu erabiltzea da. Metodologia honetan eredu aerolastikoa erabiltzen da, hau da, egituraren erantzun dinamikoaren azterketa egitea indar aerodinamikoaren aurrean. Analisi hau burutzeko, araudiaren 6.3 puntuan ezartzen dira haizearen ezaugarriak simulazio metodoaren hipotesi bakoitzean erabiltzeko, hala nola haizearen egonera normala (NWC) eta haizearen egoera extremoak (EWC). [19]

5.1.3 KARGEN NEURKETA ESKALA ERREALEAN

Kargak determinatzeko azken aukera, hauek neurketa errealetatik ondorioztatzea da. Neurketa hauek ahalik eta gertuen egon behar dira araudiaren 7.5 sekzioan adierazitako hipotesietara. Ondoren, kargen estrapolazioa IEC/TS 61400-13 araudia jarraituz egin behar da. [3]

Proiektu honetan karga sinplifikatuen metodologia erabiliko da kargak determinatzeko, kontuan hartuta metodologia hau erabiltzeko baldintzak betetzen direla aukeratutako AS-rekin. Simulazio modeloan CFD edo fluido dinamika konputazionalaren softwareak, entsegua fisikoak eta tentsioaren analisi dinamikoa ahalbidetzen duten softwareak erabiltzen dira. Metodologia hau erabiltzeko baliabideak ez daude proiektu honetan, beraz ez da metodologia hau erabiliko. Bestalde, neurketak eskala errealean egitea proiektu honen irismenetatik kanpo dago, hortaz metodologia hau ez da erabiliko.

UNE-EN 61400-2 araudiaren 7.4 puntuan karga sinplifikatuen metodoan erabili behar diren ekuazioak deskribatzen dira, eta F eranskinean ekuazio hauen azalpen zehatza. Memoria honen 12.2 eranskinean aurkitu daitezke ekuazio hauen kalkuluak, eta beharrezko parametroen kalkuluak.

Aipatutako kargak, Fig 16 Irudian azaldutako erreferentzia sistemetan oinarrituta daude.

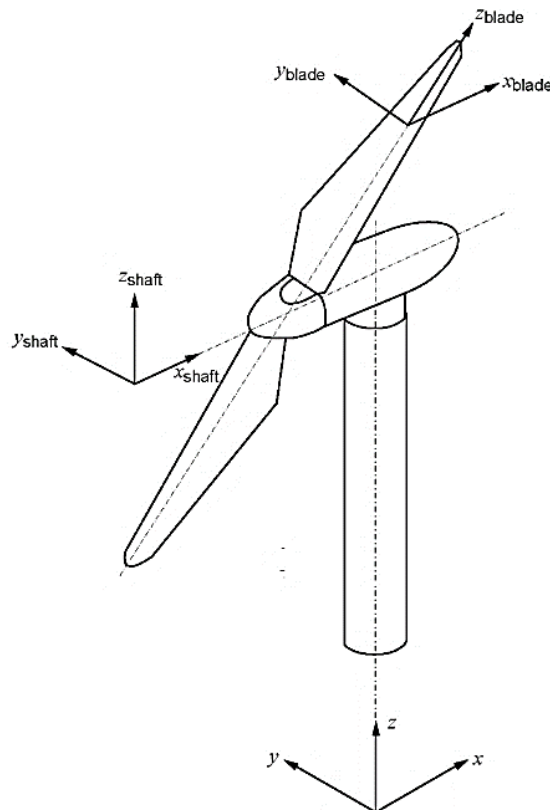


Fig 16 - Kargen erreferentzi sistema¹⁵

¹⁵ Iturria: UNE-EN 61400-2

5.2 LIMITE EGOERAREN ANALISIA

Egituraren segurtasuna bermatzeko limite egoeraren analisia burutuko da mastaren hutsegiterik gertatuko ez dela ziurtatzeko. Lehen esan den bezala, karga hipotesietan bi analisi mota daude, neke limitea eta erresistentzia limitea. Analisi mota bakoitzarentzat esfortzu jasangarri maximoa gainditzen ez dela ziurtatuko da, araudiak ezartutako segurtasun koefiziente egokiak aplikatuz.

5.2.1 HAUSTURAREKIKO ERRESISTENTZIA ANALISIA

Araudiaren arabera, egiturak jasango duen tentsio maximoak ez du hurrengo espresioan ezartutako tentsioa gainditu behar. Egituraren tentsio maximoa MSC Apex elementu finituen bidezko metodoarekin lan egiten duen softwarearekin kalkulatu da, eta ondoren tentsio jasangarri maximoarekin alderatu da.

$$\sigma_d \leq \frac{f_k}{\gamma_m \times \gamma_f}$$

Ek 1 - Tentsio jasangarri maximoa

Non:

- σ_d : Tentsio jasangarri maximoa
- γ_f : Kargaren segurtasun faktorea
- f_k : Materialaren erresistentzia karakteristikoa
- γ_m : Materialaren segurtasun faktorea

5.2.2 NEKEAREKIKO ERRESISTENTZIA ANALISIA

Nekearekiko analisia ezin da burutu MSC Apex softwarearekin, hortaz, ezin daiteke S-N kurba atera. Hori dela eta, araudiak ezartzen duen bezala, nekearen kurbari buruzko informazioa lortzea ezin denean, haustura erresistentziaren formularekin egin daitekeela analisi hau kontuan hartuz materialaren segurtasun koefizientea (γ_m) 10 izan behar dela.

5.2.3 SEGURTASUN KOEFIZIENTEAK

Lehen ikusi den moduan, limite egoeraren analisia burutzeko bi motako segurtasun koefiziente behar dira, materialarena eta kargarena. Araudiaren arabera, Taula 3. taulan adierazten dira aplikatu behar diren kargaren segurtasun koefizienteak, haustura erresistentzia eta nekearen erresistentzia analisietarako.

Taula 3 - Materialaren segurtasun koefizienteak

Caracterización del material	Resistencia a la fatiga, γ_m	Resistencia a limite de rotura, γ_m
Caracterización completa	1,25 ^a	1,1
Caracterización mínima	10,0 ^b	3,0

^a El factor se aplica a la resistencia a fatiga medida del material.
^b El factor se aplica a la resistencia límite de rotura medida del material.

Bi aukera daude, karakterizazio osoko analisia eta karakterizazio minimoaren analisia, kontsideratzen diren faktoreen arabera. Karakterizazio osoaren analisiaren kasuan, fabrikazio prozesuan sortutako irregulartasunak, ingurunekeo efektuak (oxidazioa, irradiazioa etc..) eta geometriaren ondorioz sortutako ahultasuna bezalako faktoreak kontsideratzen dira, erresistentzia analisiarekin batera. Proiektu honetan ordea, karakterizazio minimo bat egingo da, bakarrik erresistentziaren analisia kontsideratzen delako, Hortaz haustura limitearen analisiarentzat $\gamma_m=3$ izango da. Nekearen analisiaren kasuan, aipatu den moduan, S-N kurbei buruzko informaziorik ez izatekotan, araudiaren arabera $\gamma_m=10$ hartu behar da.

Bestalde, araudiaren arabera, Taula 4. taulan adierazten diren balioetatik atera behar da nekearen eta haustura limitearen erresistentzia analisientzako segurtasun koefizienteak. Proiektu honetan kargak ekuazio sinplifikatuen metodoarekin determinatuko direnez, nekearen kargentzat $\gamma_f=1$ eta haustura limitearentzako kargak $\gamma_f=3$. [3]

Taula 4 - Kargaren segurtasun koefizienteak

Método de determinación de las cargas (véase 5.2)	Cargas de fatiga, γ_f	Cargas límite de rotura, γ_f
1. Ecuaciones simplificadas	1,0	3,0
2. Modelo de simulación	1,0	1,35
3. Medición de la carga a escala real	1,0	3,0

Proiektu honetan limite egoeraren analisisian erabiliko diren segurtasun koefizienteak Taula 5. taulan laburtuta adierazten dira.

Taula 5 - Limitearen egoeraren analisisirako koefizienteak

Segurtasun Koefizientea		Balioa
Nekearen Analisia (F)	Materialarentzat, γ_m	10
	Kargarentzat, γ_f	1
Haustura limitearen analisia (U)	Materialarentzat, γ_m	3
	Kargarentzat, γ_f	3

Behin segurtasun koefizienteak zehaztuta, hauen balioak Ek 1 ekuazioan ordezkatu daitezke hurrengo espresioak lortuz.

$$\sigma_{d,F} \leq \frac{f_k}{10} \qquad \sigma_{d,U} \leq \frac{f_k}{9}$$

Ek 2 - Tentsio jasagarri maximoa a) Nekearen analisisian b)Haustura limitearen analisisian

5.3 DEFORMAZIOAREN ANALISIA

Araudiaren arabera, ziurtatu behar da interferentzia mekanikorik ez egotea alabearen eta dorrearen artean. Proiektu honetan, AS-aren geometria ez da kontsideratzen simulazioaren eremuan, hortaz, kontsideratuko da interakziorik ez dela egongo dorrearen eta alabearen artean.

Bestalde, dorreak ziurtatu behar du AS-ren inguruan dauden objetuekin kontaktua ez egotea. Beraz, egituraren zurruntasunaren analisia egingo da, deformazioa maximoa kalkulatzuz MSC Apex softwarearen bidez. [3]

5.4 KARGEN EMAITZAK

5.1 puntuan aipatu den bezala, haizeak eragindako indarrak karga sinplifikatuen metodoarekin determinatuko dira. 12.1. eranskinean adierazten dira metodologia honetan kargak kalkulatzeko erabili behar diren ekuazioak eta hauen kalkuluaren garapena. Bestalde, AS-an sorturiko indar hauek dorrearengan erreakzio indar bat eragingo dute.

MSC Apexen elementu finituen bidezko analisi tentsionala egin aurretik, aipatutako indar hauek dorrera transladatu behar dira. 12.2 eranskinean adierazten translazio prozesu honen garapena. Prozedura hau burutzean dorreak jasango dituen indar erresultanteak adierazten dira Taula 6. taulan, laburpen moduan. Gainera, dorrearen barra diagrama ikus daiteke Fig 17 irudian, indarren aplikazioa era ikusgarrian ikusteko.

Taula 6 - Dorrearen gaineko indarren balioak

HIPOTESIA	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	F_l (N)	F_d (N)	M_x (Nm)	M_y (Nm)	M_z (Nm)
A	101,10		871,52			151,68	6,27	
B			871,52				179,07	
C			871,52				-106,73	
D	238,00		871,52				-106,73	
E			871,52			74,50	-106,73	
F			871,52			152,90	-106,73	
G			871,52			152,90	-106,73	
H	4929,00		871,52	-8335	8335	4224,48	-6440,69	
I: Aurretik			871,52	-333,4	333,4		-32,44	
I: Albotik	13,42	159,35	871,52	-333,4	333,4	8,03	180,84	10,96

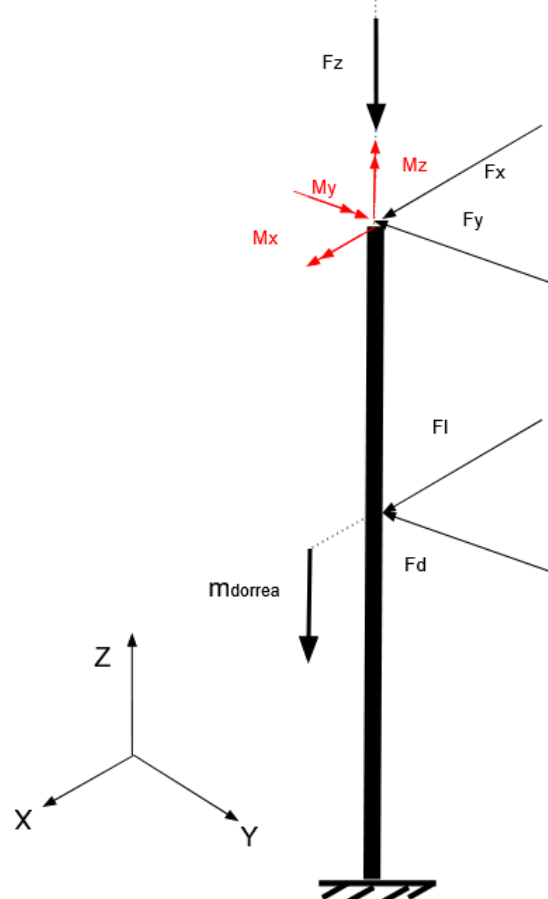


Fig 17 - Dorrearen gainean aplikatutako indarrak¹⁶

Taula 17. taulan ikusi daitekeen bezala, kargarik handienak H hipotesian gertatzen dira. Taula 2. taulan aipatzen den bezala, limite egoeraren analisisan bi azterketa egin behar dira, nekearen analisisa A hipotesiaren kargekin eta hausturekiko erresistentziaren analisisa beste hipotesiekin. H hipotesian

¹⁶ Iturria: Berezkoa

sorrarazten diren kargak handienak direnez, hausturarekiko erresistentziaren analisia hipotesi honetako kargekin egingo da. Bi hipotesien kargen magnitudea ikusita, argi dago hipotesirik mugatzaileena H hipotesia izango dela. Hori dela eta, dorrea dimentsionatzeko erabiliko diren karga hipotesiak H hipotesiarenak izango dira, eta behin dimentsionatuta dagoenean nekearen analisiaren baldintza betetzen dela konprobatuko da.

6 DORREAREN DISEINUA

Behin haizearen kargak AS-ren gainean kalkulatuta eta hauek dorrearen puntara transladatuta, egituraren diseinua zehaztea da hurrengo pausua. Proiektu honetarako bi diseinu proposamen egingo dira, dorre zilindriko hutsa eta sareta egitura bat.

Dorre zilindrikoaren diseinuaren proposamenak egiteko arrazoia Gasteizko Ingeniaritza Eskolatik CBL-ko proiektuaren arduradun baten interesa da, geometria hau bertan eskolan fabrikatzeko bideragarritasuna ikasteko. Sekzio honekin, bai diseinuaren prozesua eta fabrikazioaren prozesua errazagoa da geometria sinpleak direlako, baina kontuan eduki behar da egiturak izango duen pisua handiagoa izango dela zilindro trinkoaren kasuan.

Bestalde, sareta egitura baten diseinua proposatuko da orokorrean egitura arinagoak direlako eta egitura mota hauen diseinuari buruz ikasteko.

6.1 DISEINUAREN ESPEZIFIKAZIOAK

Dorrearen diseinua egiteko dimentsio batzuk finkatuko dira. Lehenik eta behin altuera, 3.2 puntuan aipatu den bezala, haizearen abiaduren kalkulua 6m-ko dorre batekin egingo da, beraz diseinatuko diren AS txikiaren dorreen altuera 6m-koak izango dira. Beste parametro inportantea dorre zilindrikoen kasuan dorrearen kanpo diametroa da. Haizearen kalkulua 0.9m-ko diametroarekin egin dira, hortaz hori izango da jarri daitekeen diametro maximoa.

Bestalde, sareta egituraren altuera ere 6m-koa izan behar da, dorre zilindrikoetan bezala. Egitura honen kasuan, haizeak eragingo dion karga kalkulatzeko prozedura konplexua da. Lehenik eta behin, Fluidoen Dinamika Konputazionalaren software bidez simulazio bat egin beharko zen egituraren arrastre koefizientea kalkulatzeko edo haizeak dorreari eragingo dion indarra kalkulatzeko. Bigarren, kontuan hartu behar da egituraren dimentsioak handiak direla eta asimetriagatik hiru dimentsiotan egin beharko zela simuladorearen eredu. Hori dela eta, simulazio zehatz bat egiteko baliabide konputazional handiak behar dira, beraz sareta egituraren gainean egongo diren haizearen kargak egitura zilindrikoan dauden berdinak direla suposatuko da.

Azken diseinu espezifikazioa dorrearen goiko aurpegiaren dimentsioak izango dira, hor puntera lotu behar delako. Fig 18a) Irudian, Bornay-ren web orrialdean aurkitu daitekeen punteraren marrazki teknikoan ikusi daiteke loturarako punterak 320mmx320mm-ko plakatxo bat duela. Hori dela eta, Fig 18b) dorrearen goiko aurpegiaren plakatxo hori sartzeko dorre zilindrikoen goiko aurpegiaren diametrorik txikiena 450mm izango da, eta sareta egitura aldiz goiko aurpegiak plakatxoaren dimentsioak eduki beharko ditu.

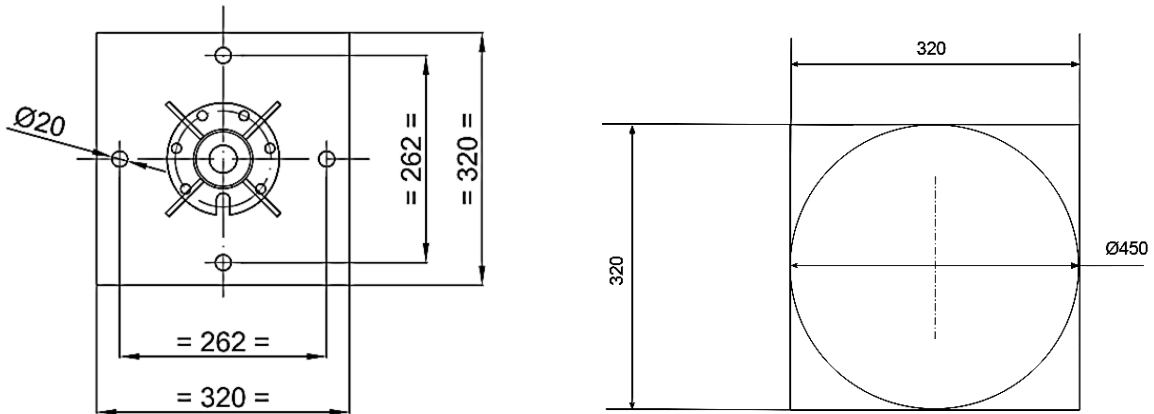


Fig 18 - a)Punteraren plakatxoaren plana¹⁷ b)Dorre Zilindrikoen diametro maximoa¹⁸

Dorreak okupatu dezakeen luzera eta zabalera totala espezifikatu diren dimentsioak baino handiagoak izango dira. Hau balioztatzeko Google Earth bidez neurketa bat egingo da espazio librea kalkulatzeko. Fig 19 irudian ikusi daitekeen moduan, gutxi gora behera 2m libre egongo dira, beraz esandako dimentsioekin esan dezakegu espazio nahikoa daukagula.

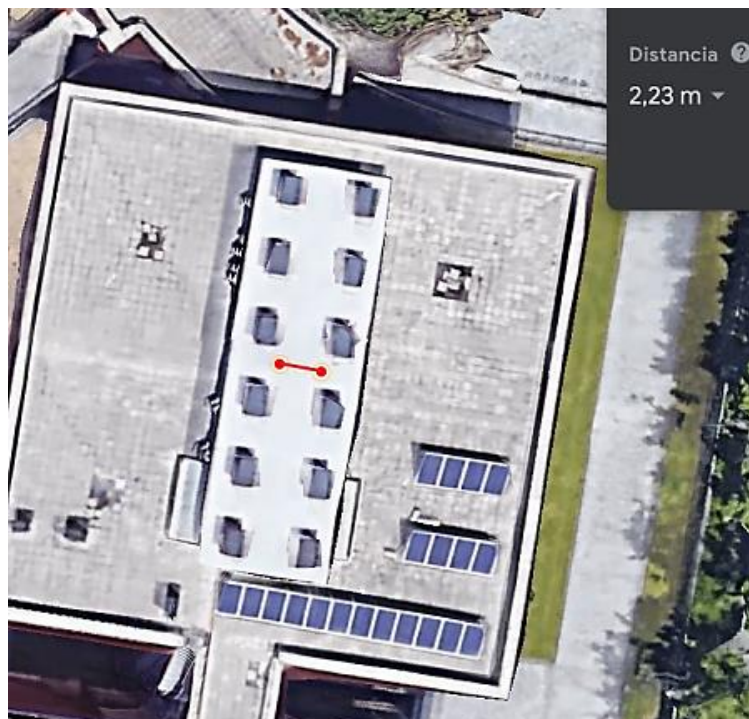


Fig 19 - Teilatuan dagoen espazio librea¹⁹

6.2 DORREAREN MATERIALA

Dorrearen materiala altzairu estrukturala izango da. Hau oinarrizko eraikuntzako materiala da, altzairuzko gradu espezifiko zehatza. Altzairu estrukturalaren graduak hainbat aplikazioetara zuzenduta daude, eta

¹⁷ Iturria: Bornay SL

¹⁸ Iturria: Berezkoa

¹⁹ Iturria: Google Earth

honen arabera konposizio kimiko eta propietate mekaniko zehatz batzuekin diseinatuta daude. Gainera, altzairu estrukturala hainbat sekzio edo profil estandarizatueta fabrikatzen da.

Altzairu estrukturalaren gradurik ohikoenak S235, S275 eta S355 dira, nomenklaturaren <<S>>-ak altzairu estrukturala dela adierazten du eta zenbakiak limite elastikoa N/mm²-etan. Proiektu honetan, elementu bidezko simulazioan lortzen diren emaitzen eta tentsio onargarri maximoaren arabera gradu bat edo beste bat aukeratu da.

Bestalde, MSC Apex softwarean simulazioa aurrera eramateko materialaren propietate mekanikoak ezartzea ezinbestekoa da, hauek Young-en edo elastikotasun modulua, Poisson-en koefizientea eta dentsitatea izanik. Altzairu estrukturalaren Instrukzioaren (EAE) VIII. Kapituluari adierazten duen bezala, material honen propietateentzat Taula 7. taulan adierazten den balioa hartu daiteke.

Taula 7 - Altzairu Estrukturalaren Propietate Mekanikoak

Propietatea	Balioa
Young-en Modulua, E	210 GPa
Poisson-en Koefizientea, ν	0,3
Dentsitatea, γ	7850 kg/m ³

Dorreak jasango duen tentsio maximoa onargarria zenbatekoa den jakiteko Ek 2 Ekuazioan aipatutako ekuazioetan materialaren limite elastikoaren balioa ordezkatu behar da. Taula 8. taulan, gradu ezberdineko altzairu estrukturalen tentsio jasangarri maximoak adierazten dira nekearekiko analisirako eta hausturerekiko erresistentziaren analisirako.

Taula 8 - Altzairu estrukturalen tentsio onargarri maximoa

Altzairuaren Gradua	Limite elastikoa (MPa)	Nekearekiko analisiaren tentsio limitea (MPa)	Hautura erresistentziarekiko analisiaren tentsio limitea (MPa)
S235	235	23,5	26,1
S275	275	27,5	30,5
S355	355	35,5	39,4

7 DORRE ZILINDRIKOA

Proposatuko den lehenengo diseinua dorre zilindriko trinkoa da. Diseinu honen abantaila geometria sinpleak diseinu prozesua errazten duela eta fabrikazioaren ikuspuntutik ere ez zailtasun handirik ez dauka. Gainera, geometria sinpleak ere simulazio prozedura oso azkar egitea ahalbidetze du, nahiz eta kasu honetan analitikoki modu erraz batean egin daitekeen. Gainera, pisuaren aldetik geometria efiziente bat da barruan hutsik dagoelako. Desabantailarik handiena haizearekiko arrastre koefiziente handia duela da, hortaz haizeak indar handia eragingo dio.

6 puntuan aipatu den bezala, geometria hau diseinatzeko arrazoiak, eskolan bertan fabrikatzea posible den ikustea da. Horretarako, determinatutako indarrak jasateko beharrezkoa den dorrearen sekzio eta geometria kalkulatu da simulazioaren bidez.

7.1 SIMULAZIO EREDUAK

7.1.1 DISEINU PROPOSAMENA

Simulazioa burutzeko lehenik eta behin dorrearen eredu egitea da. Prozedura honetan eman behar diren pausuak hurrengoak dira, geometria modelatu MSC Apex Softwarean, mesh-a edo sarea definitu emaitz zehatzak lortzeko eta azkenik indarrak eta mugaketak. Fig Fig 20a) Irudian ikusi daiteke erabili den dorrearen eredu, 7m luze, $\varnothing 90\text{cm}$ -ko kanpo eta $\varnothing 70\text{cm}$ -ko barne diametroak dituen zilindro bat.

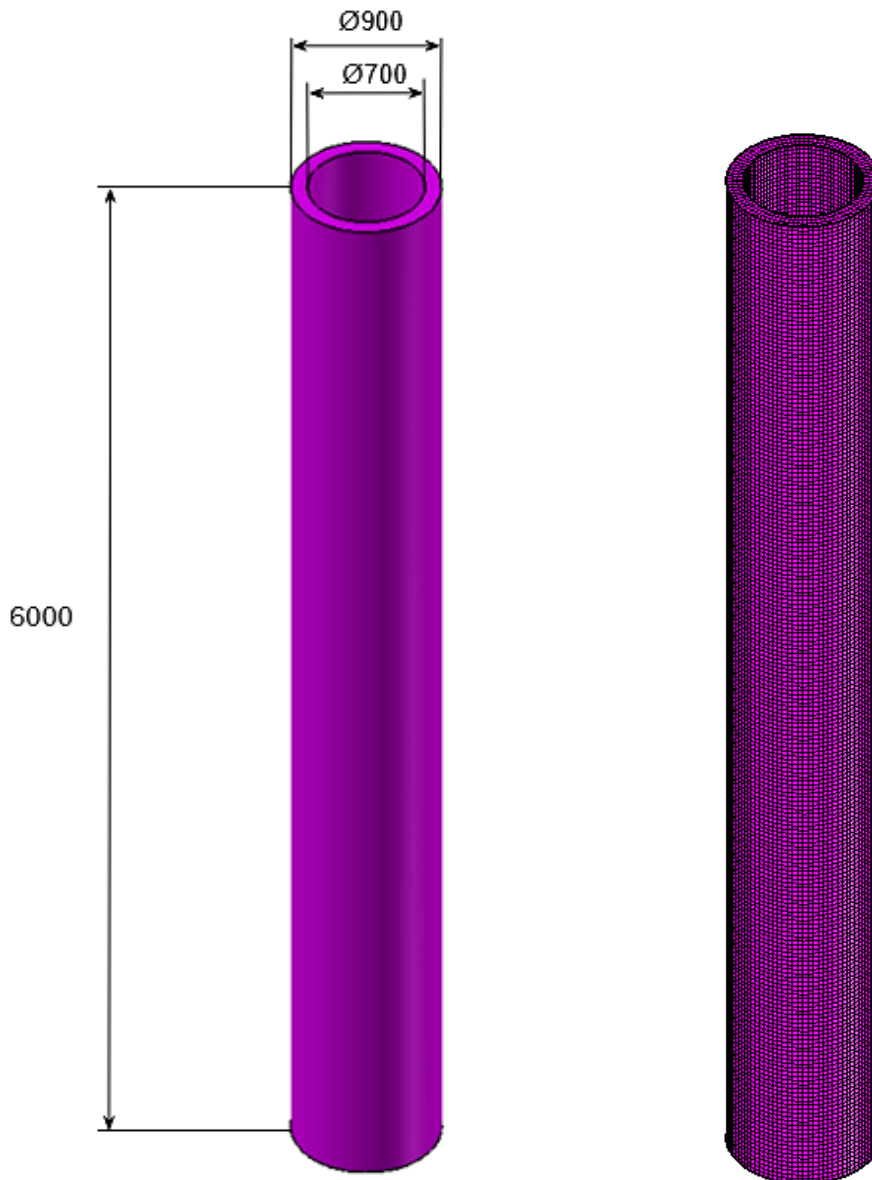


Fig 20 - Dorre zilindrikoaren lehen diseinuaren: a) Eredua b) Mesh-a²⁰

Mesh-a egiteko hainbat mota daude, 1D-ko kurba batekin eta horri sekzioa emanez, 2D-ko azalera sarea eginez, eta 3D-ko sarea elementu hexaedralekin eta elementu tetraedralekin. Kasu honetan geometria sinplea denez, elementu hexaedralekin egingo dugu, ere bai 2.5D-ko mesh-a deitua. Fig 20 b). Irudian erabili den mesh-a adierazten da. Erabilitako unitateen dimentsioa 30mm-koak dira. Esan bezala, simulazio

²⁰ Iturria: Berezkoa

eredua prest izateko indarrak ereduari aplikatu behar dira. Fig 21 Irudian indarren aplikazioa simulazio ereduari adierazten dira.

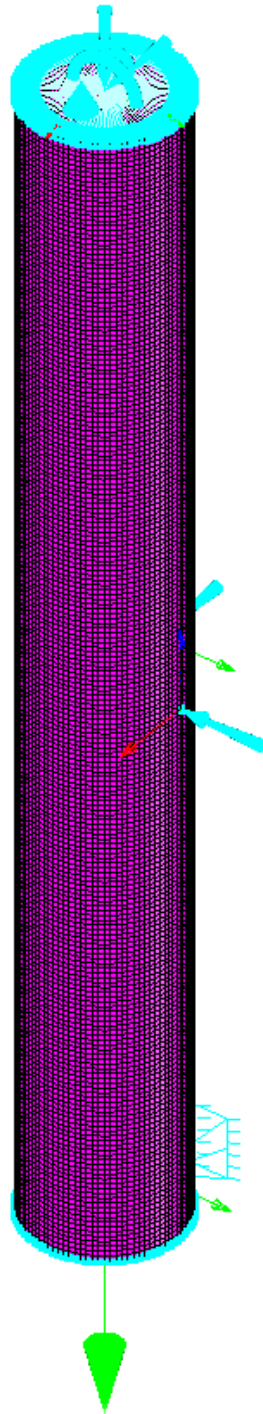


Fig 21 - Dorre zilindrikoaren lehenengo diseinuaren simulazio eredu²¹

Behin simulazio eredu definituta simulazioa egin daiteke. Fig 22 Irudian lehen simulazioaren post-prozesuaren emaitzak adierazten dira. Ikusi daitekeen moduan, simulazioan lortutako tentsio maximoa oso txikia da, 1,4MPa, dorrearen erroan. Tentsio hau hain txikia izanda, dorrearean dimentsioak txikituko dira pisua murriztearen helburuarekin.

²¹ Iturria: Berezkoa

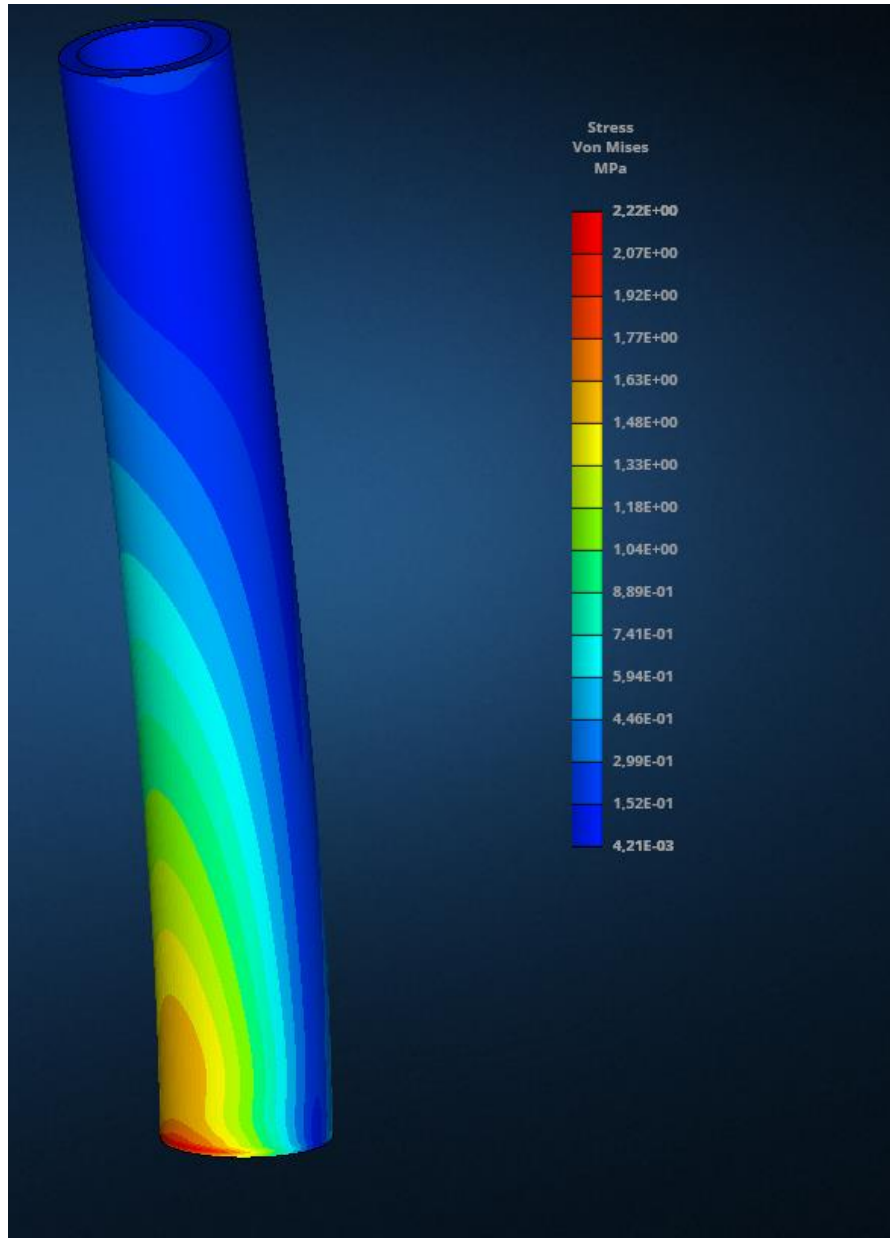


Fig 22 - Dorre zilindrikoaren lehenengo diseinuaren egoera tentsionala²²

Taula 9. Taulan dimentsio ezberdinekin egindako iterazioen emaitzak adierazten dira. Dorre zilindrikoaren barne eta kanpo diametroa txikitu dira iterazio bakoitzean tentsi maximo onargarritik hurbilago egotera arte, materialaren kapazidade erresistiboa ahalik eta gehien aprobetxatzeko.

Taula 9 - Dorre zilindrikoaren diseinuaren iterazioak

Kanpo Diametroa (cm)	Barne Diametroa (cm)	Tentsio Maximoa (MPa)
70	50	2,22
50	30	6,86
45	40	23,3

²² Iturria: Berezkoa

Hainbat saiakera egin ondoren 45cm-ko kanpo diametro eta lodiera desberdinekin, 25mm-ko lodierarekin lortutako emaitzak dorreak beharrezko egonkortasuna izango duela bermatzen dutela ikusi da. Fig 23 Irudian, H hipotesiaren indarrekin lortzen den egoera tentsionala adierazten da. Tentsio maximoa dorrearen erroan 23.3MPa izango dela jakinda eta kontuan hartuta Taula 8. taulan adierazitako tentsio onargarri maximoak, ikus daiteke S275 altzairu estrukturalaren graduarekin U analisi motaren baldintza betetzen duela, hortaz, hurrengo pausua nekearen analisia burutzea izango da.

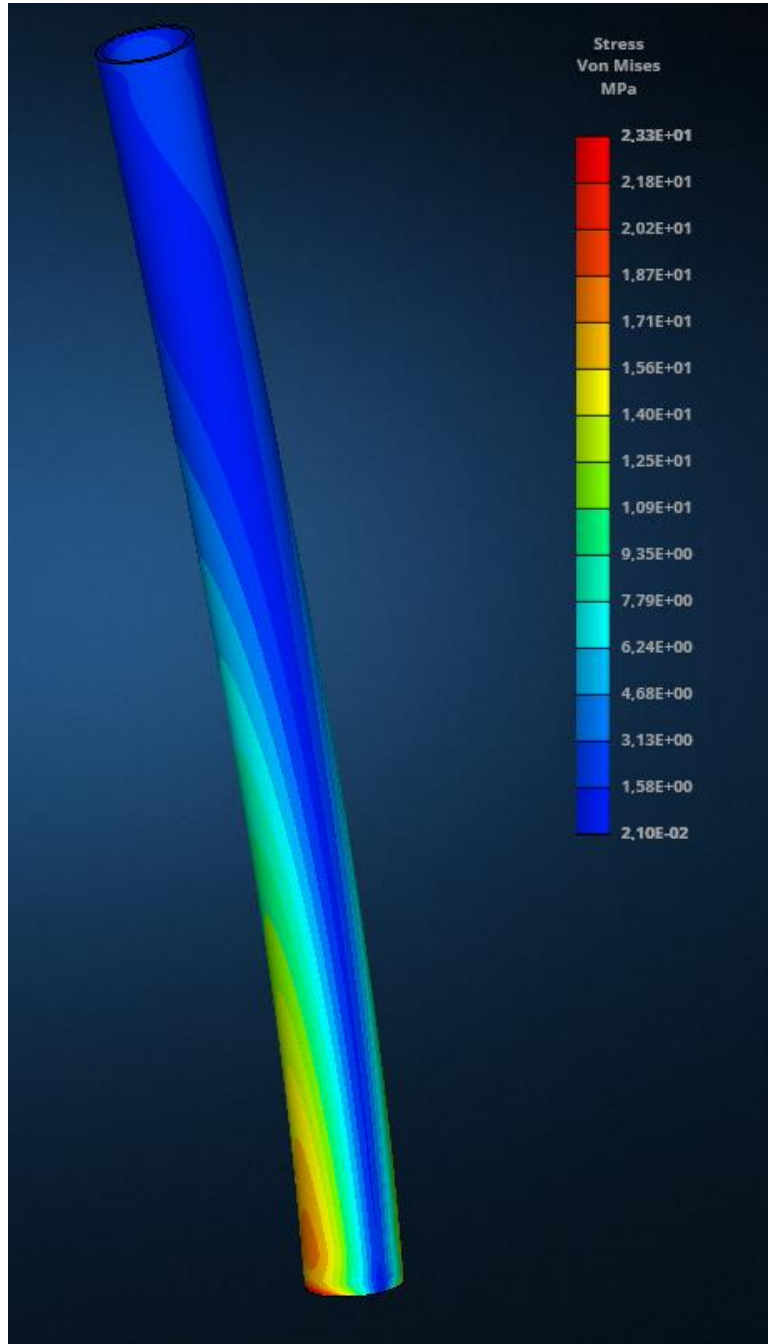


Fig 23 - Dorre zilindrikoaren hirugarren diseinuaren egoera tentsionala²³

²³ Iturria: Berezkoa

7.2 NEKEAREN ANALISIA

Esan bezala, dorre zilindrikoaren azken diseinu proposamenak haustura erresistentziarekiko tentsio limitearen baldintza betetzen du, beraz hurrengo pausua nekearen analisiaren tentsio maximoaren baldintza betetzen duela ziurtatzea da. Horretarako, A hipotesiaren indarrak aplikatuko zaizkio simulazio modeloari. Fig 24 Irudian ikusi adierazten da simulazio eredu indarrekin aplikaturik lorturiko egoera tentsionala.

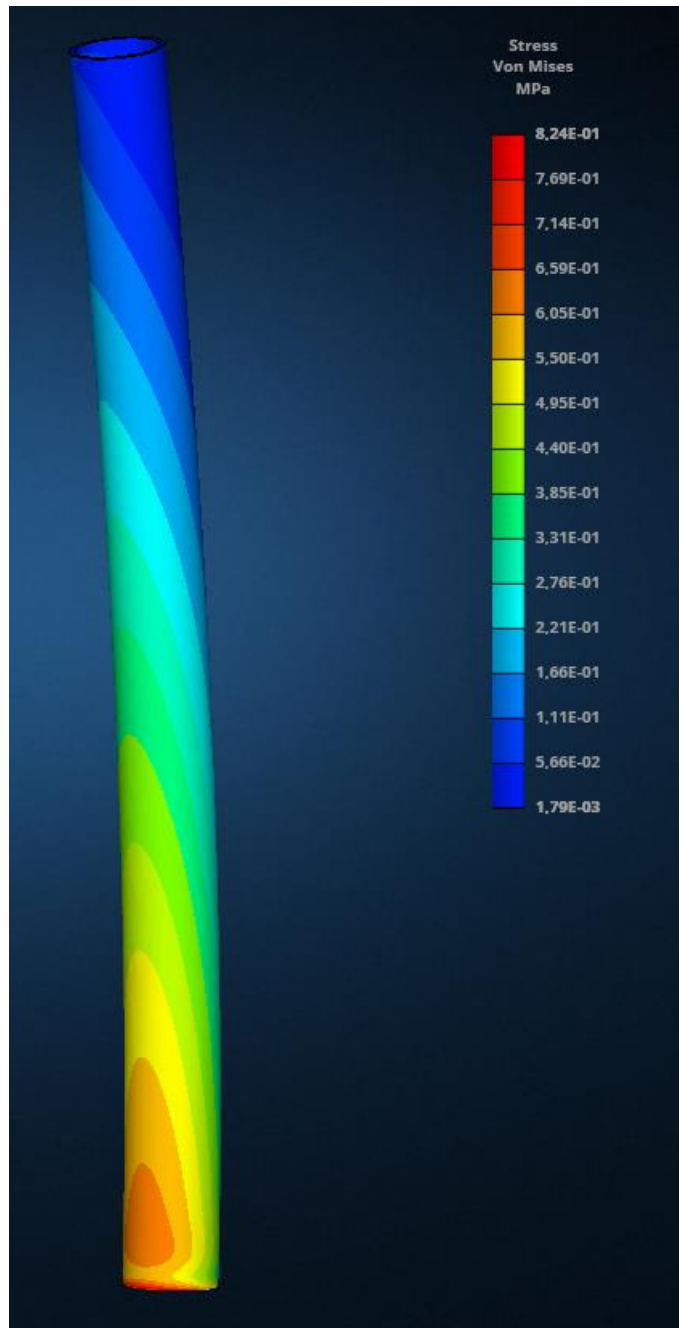


Fig 24 - Dorre zilindrikoaren diseinuaren egoera tentsionala nekeraren analisisian²⁴

²⁴ Iturria: Berezkoa

Ikusi daitekeen bezala, nekearen analisiaren egoeran 0,82 MPa izango da dorreak jasango duen tentsio maximoa. Taula 8. taulako tentsio onargarri maximoekin alderatuz, altzairu estrukturalaren gradu guztiek betetzen dute baldintza hau.

Egitura mota honetarako, altzairu estrukturalaren S275 gradua aukeratuko da, tentsio onargarri maximoarekiko marjin nahikoa uzteko.

7.3 DEFORMAZIOAREN ANALISIA

Dorrearen zilindrikoaren zurruntasuna aztertuz, Fig 25 Irudian sareta dorrearen diseinuaren deformazio maximoaren balioa ikusgarri dago. MSC Apex softwarearen arabera, deformazio maximoa 3,95mm-koa da.

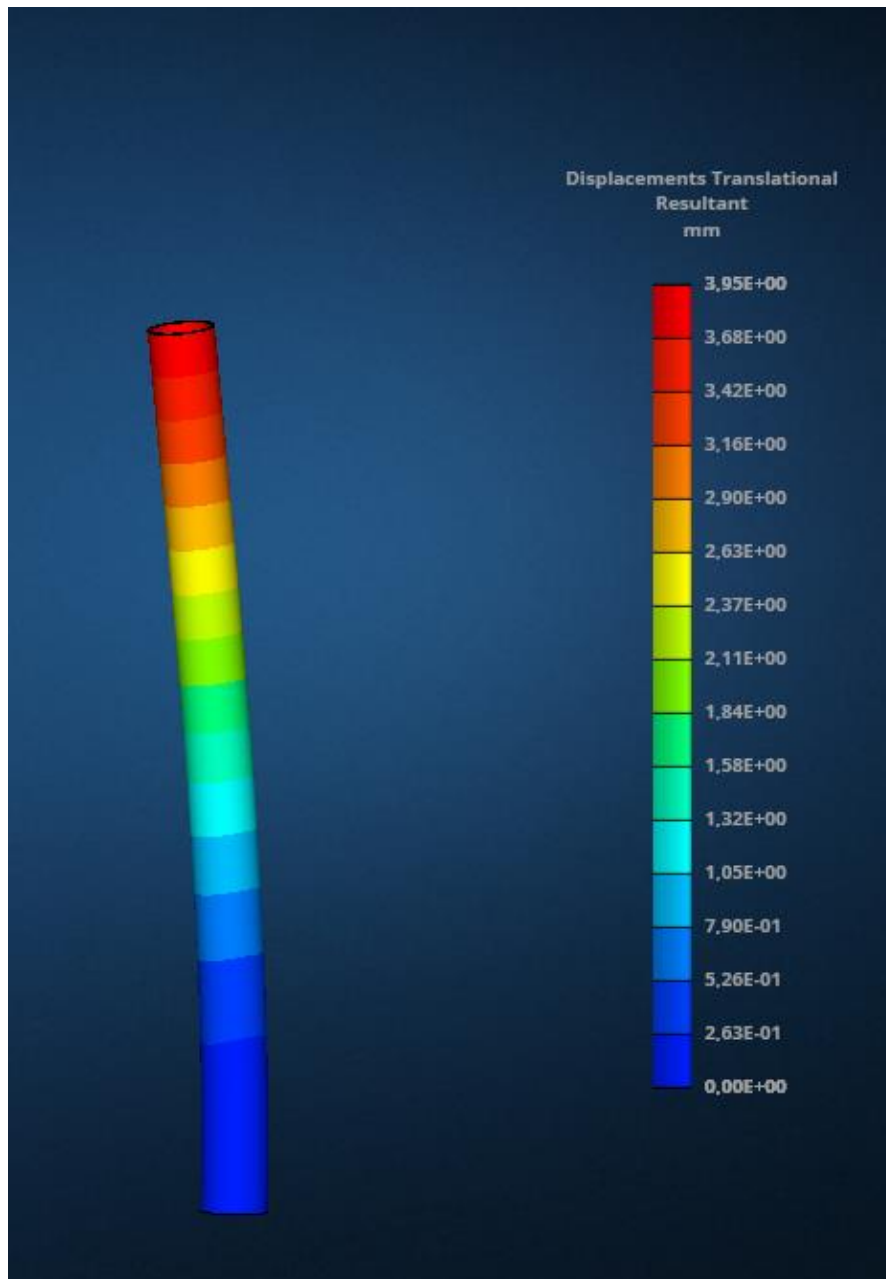


Fig 25 - Dorre zilindrikoaren deformazio egoera²⁵

²⁵ Iturria: Berezkoa

8 SARETA EGITURA

Proposatuko den bigarren diseinu mota sareta egitura batez osatutako dorre bat da. Egitura mota hauek pisuaren aldetik optimizatuagoak daude eta egiturak zurruntasuna lortzen du profil mota ezberdinak erabiliz. Gainera, prezioan ere abantaila daukate orokorrean eta merkatuan profil desberdinak erraz aurki daitezke. Aldiz, muntaketa eta instalazio kostuak handiagoak dira. [20]

8.1 EGITURAREN DISEINUA

8.1.1 LEHEN DISEINU PROPOSAMENA

Lehenengo diseinu proposamena sareta egitura simple bat izango da. Forma karratua osatzen duten lau zutabeekin eta 7 kordioekin altuera ezberdinetan ainguratuta. Fig 26 Irudian egituraren barra diagrama adierazten da. Dorrearen dimentsioak hurrengoak dira, 7m-ko altuera eta zutabeak 0.6m x 0.6m-ko laukia osatzen dute. Kordioak 1m-ko tartearekin daude kokatuta zutabeak inguratuz.

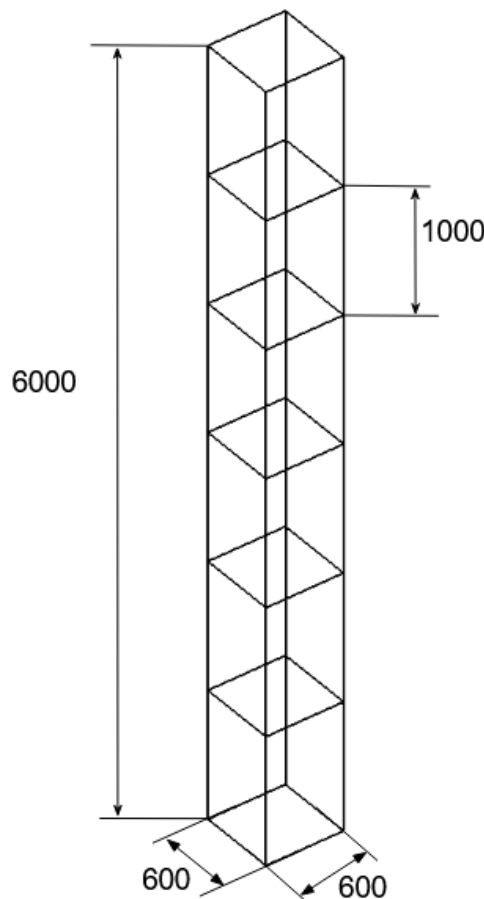


Fig 26 - Sareta egituraren lehenengo diseinuaren barra diagrama²⁶

Sareta egituraren simulazioa martxan jartzeko barrei sekzio bat eman behar zaie. MSC Apex softwarean aukera oso efizientea dago hau egiteko, habeak ezartzeko aukera dagoelako. Horrek esan nahi du sekzioa oso azkar aldatu daitekeela behin barra bakoitzari sekzioa ezartzen zaionean. Lehenengo iterazioa egiteko, L 80 10 profil normalizatua erabiliko da egitura osoan barra bakoitzaren egoera tentsionala ikusteko.

²⁶ Iturria: Berezkoa

Kontuan izanda simulazio mota honetan bakarrik kurbak edo lerroak ditugula modeloan eta bakoitzari sekzio bat ezarriko zaiola, 1D edo kurbaren mesh-a erabili behar da. Simulazio prozesu hau 3D simulazio bat egitea baino efizienteagoa da, sekzio aldakorrak simulatuko direlako eta baita memoria txikiagoa erabili beharko delako. Fig 27 Irudian simulazio eredua ikusi daiteke habeak eta mesh-a egin ondoren.

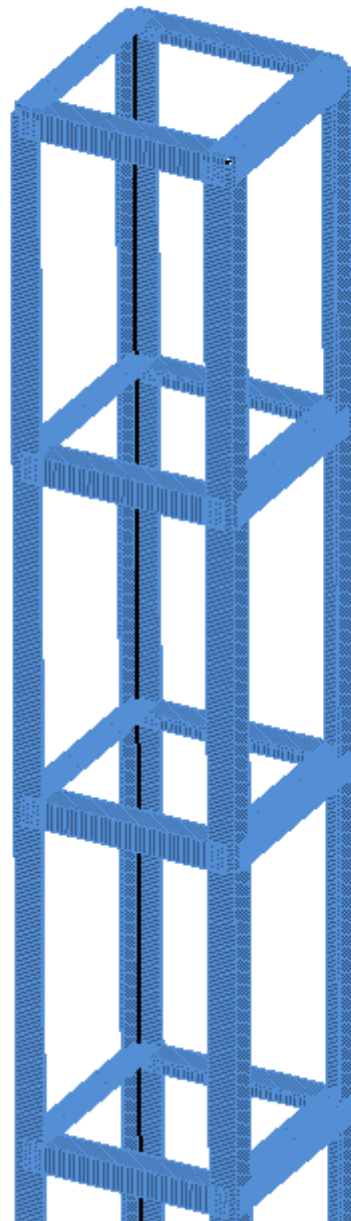


Fig 27 - Sareta egituraren lehenengo diseinuaren mesh-a²⁷

Kargen aldetik, 5.2 puntuan aipatu den bezala, diseinua finkatzeko hausturaren erresistentziarekiko analisia burutuko da, beraz H hipotesiaren indarrak aplikatuko dira simulazio erudian, finkapenak edo mugatzaileekin batera. Fig 28 Irudian, simulazio eredua ikusi daiteke kargekin aplikatuta.

²⁷ Iturria: Berezkoa

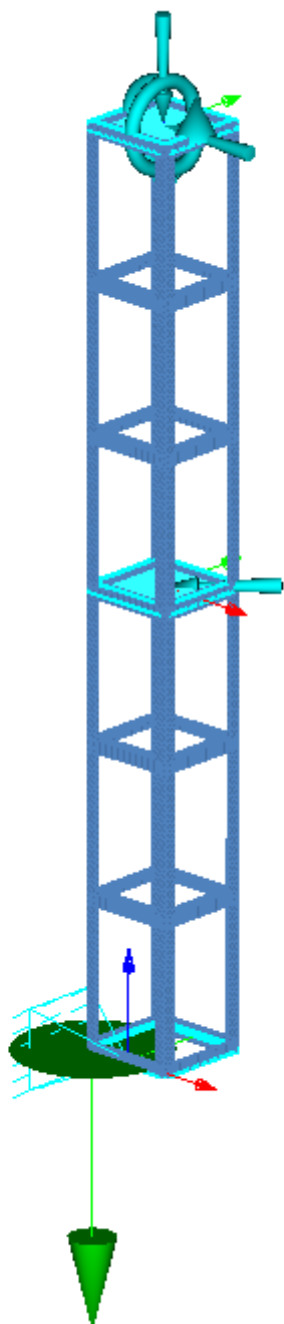


Fig 28 - Sareta egituraren lehenengo diseinuaren simulazio eredu²⁸

Eredua prest egonda simulatzea da hurrengo urratsa. Lehen diseinu honetako egoera tentsionala Fig 29 Irudian adierazten da. Ikusi daitekeen moduan, tentsio maximoa dorrearen finkapenenean ematen da, MPa. Taula 8. taulako altzairu gradu ezberdinen tentsio onargarri maximoa ikusita, ezin daiteke haustura erresistentziaren analisiaren tentsio limitearen baldintza bete. Hori dela eta, beste profilekin iterazioak egingo dira tentsio jasagarri maximoaren baldintza lortu arte. Taula 10. taulan laburbiltzen dira erabilitako sekzioak eta lortutako emaitzak.

²⁸ Iturria: Berezkoa

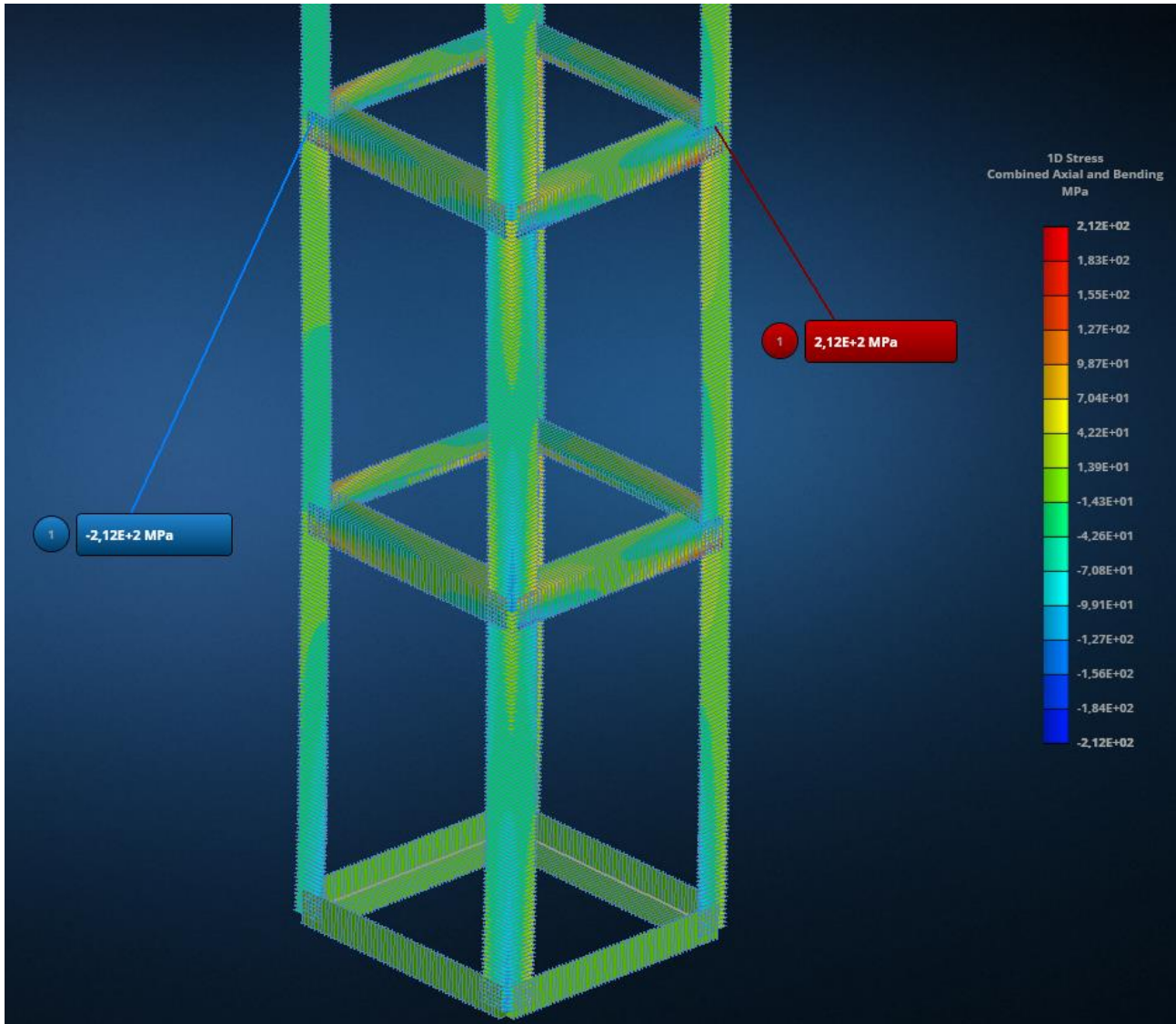


Fig 29 - Sareta egituraren lehenengo diseinuaren egoera tentsionala²⁹

Taula 10 - Lehenengo sareta egitura diseinuaren iterazioen emaitzak profil ezberdinekin

Erabilitako Profila	Tentsio Maximoa (MPa)
L 80 12	212
L 120 12	87.2
L 150 15	43.8
L 150 18	37.4
L 180 15	29.11

Ikusi daitekeen bezala, baldintza betetzen duen bakarra L 180 15 profila da. Kontuan hartuta profil honek dimentsio oso handiak dituela beste diseinu bat saiatuko da.

²⁹ Iturria: Berezkoa

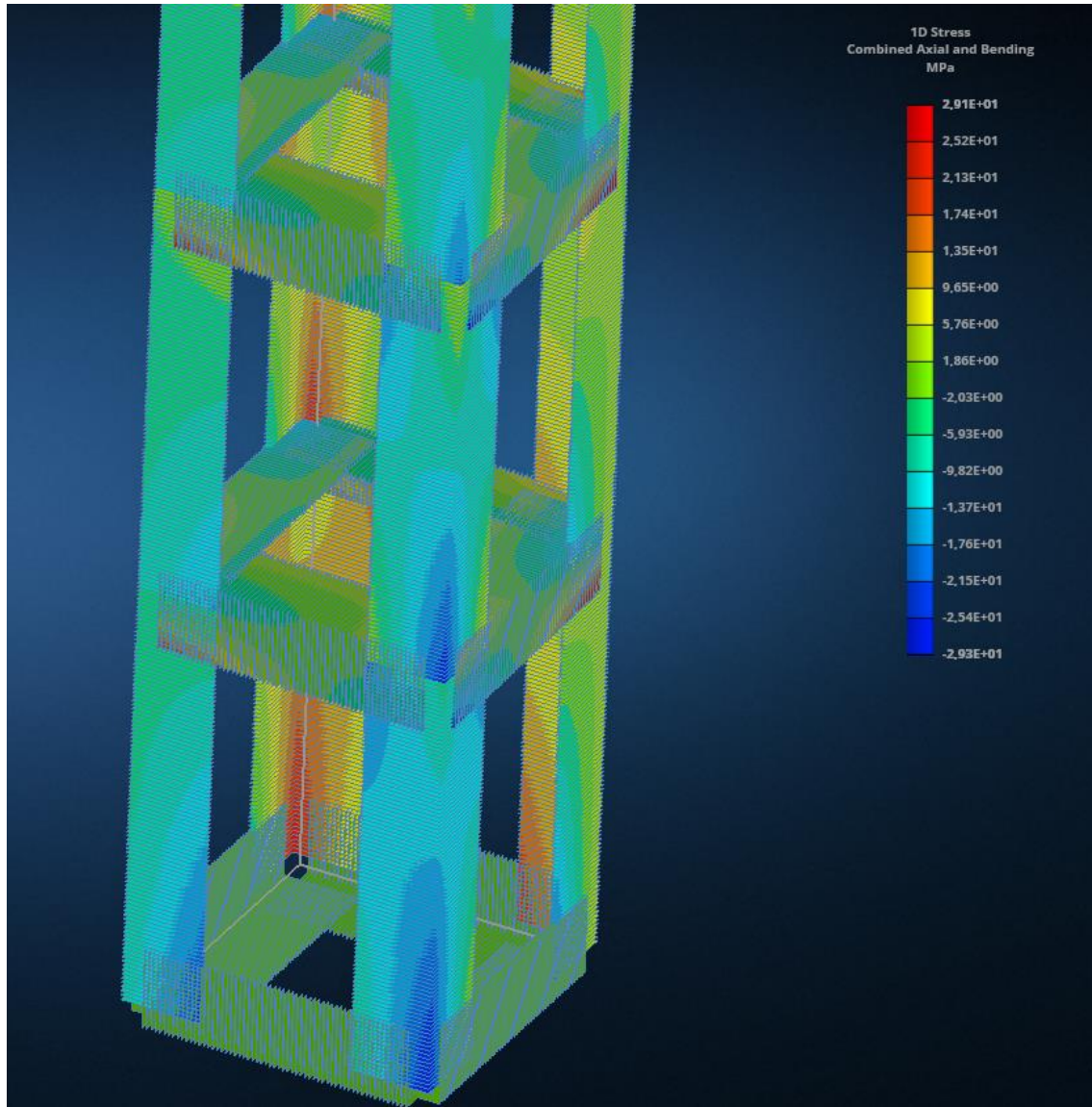


Fig 30 - Sareta egituraren lehenengo diseinuaren egoera tentsionala L 180 15 profilarekin³⁰

8.1.2 BIGARREN DISEINU PROPOSAMENA

Bigarren egituraren diseinuan zutabe nagusiei inklinazio bat emango zaie, barrak diagonalean jarritz, indarrek sorrarazten dituzten momentuak errazago jasateko. Horretarako, egituraren goiko aurpegia dimentsio minimoetara murriztuko da, hau da, 320cmx320cm, eta oinarriko aurpegia 600cmx600cm-ko dimentsioekin mantenduko da. Fig 31a) Irudian diseinu honen barra diagrama adierazten da.

³⁰ Iturria: Berezkoa

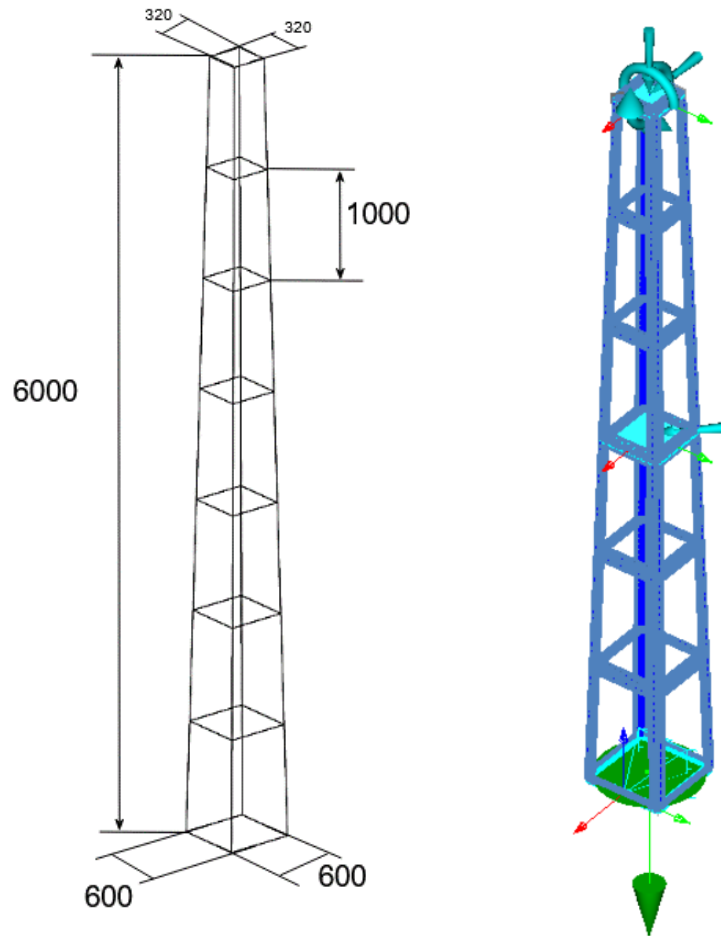


Fig 31 – a) Sareta egituraren bigarren diseinuaren barra diagrama³¹ b) Sareta egituraren bigarren diseinuaren simulazio eredua³²

Kasu honetan bi motatako profilak erabiliko dira, L profilak eta T profilak. L profilak zutabe nagusientzat eta goiko eta beheko kordoientzat erabiliko dira, eta T profilak aldiz, beste kordoientzat. Hasierako iteraziorako L 80 12 eta T 40 5 profilak erabiliko dira. Fig 31.b) Irudian bigarren diseinuaren simulazio eredua ikusgarri dago.

Eredu hau simulatu ondoren, Fig 32 Irudian ereduren tentsio egoera ikus daiteke. Tentsio maximoa 195 MPa da, hau tentsio jasangarri maximoa baino handiagoa izanik. Hori dela eta, beste profil batzuekin egingo dira iterazio batzuk tentsio jasangarri maximora hurbiltzeko asmoarekin.

³¹ Iturria: Berezkoa

³² Iturria: Berezkoa

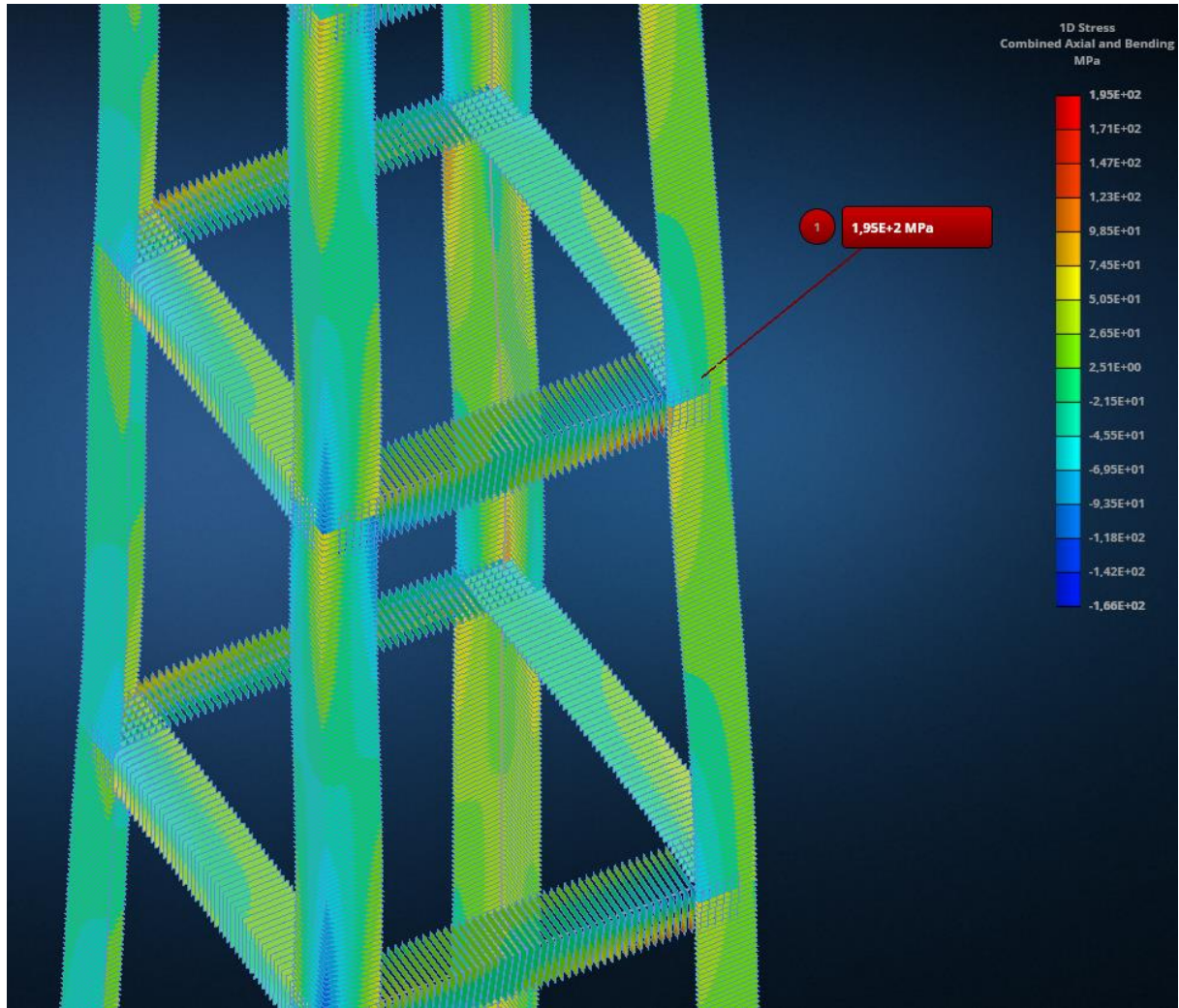


Fig 32 - Sareta egituraren bigarren diseinuaren egoera tentsionala³³

Taula 11. taulan bigarren sareta egituraren diseinuarekin egindako iterazioen emaitzak adierazten dira, bakoitzean erabili diren profilekin batera

Taula 11 - Bigarren sareta egitura diseinuaren iterazioen emaitzak profil ezberdinekin

Erabilitako Profila	Tentsio Maximoa (MPa)
L 80 12	195
L 120 12	75,2
L 150 15	38,2
L 150 18	32,7
L 180 15	26,6

³³ Iturria: Berezkoa

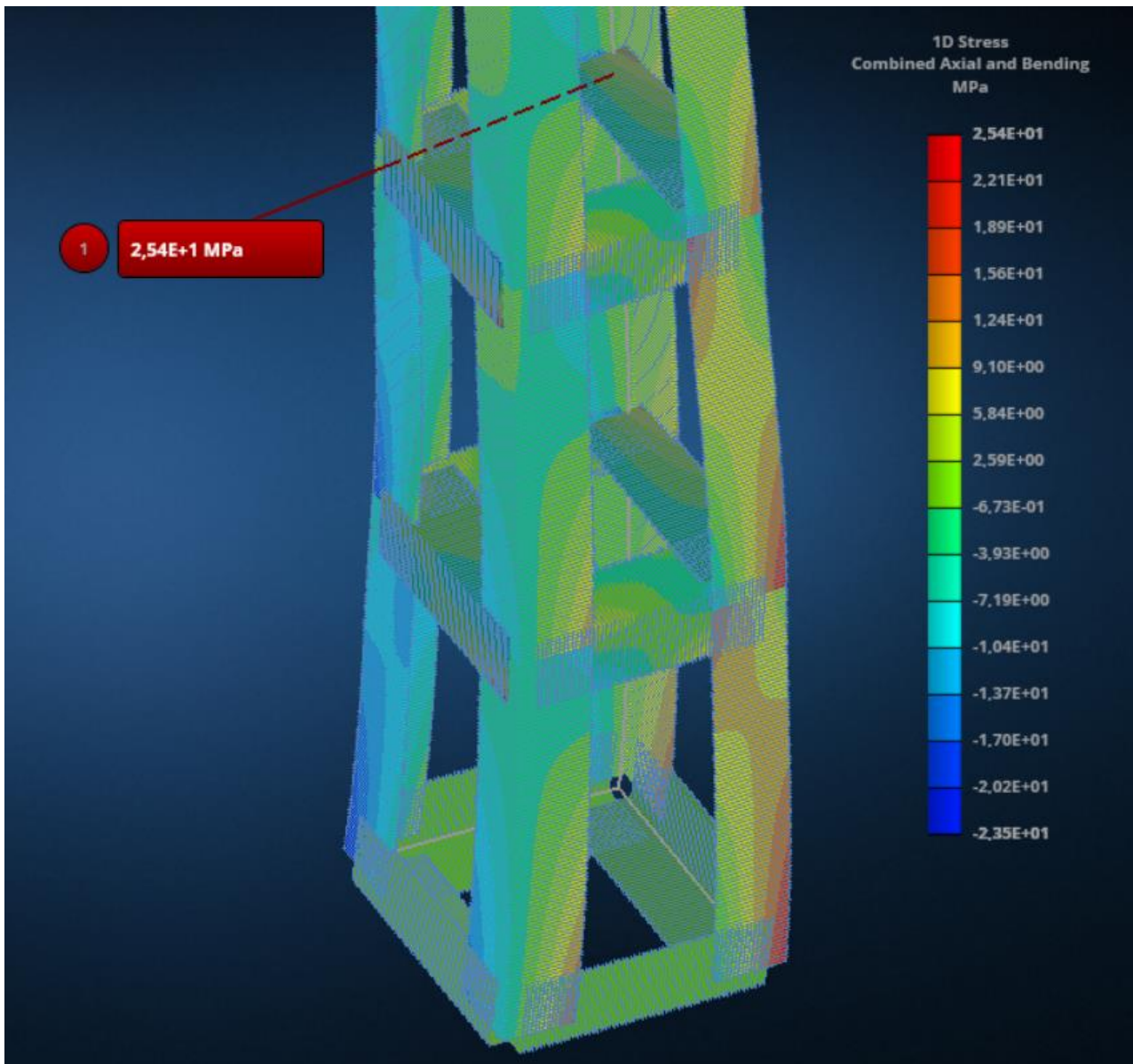


Fig 33 - Bigarren diseinuaren egoera tentsionala L 180 15 profilarekin³⁴

Fig 33 irudian ikusi daitekeen bezala, tentsio jasangarri maximoa baino tentsio gutxiagoko eredian L profil oso handiak erabili behar dira berriz ere. Hori dela eta, beste diseinu bat proposatuko da.

8.1.3 HIRUGARREN DISEINU PROPOSAMENA

Aurreko diseinuen tentsio maximoa ikusita, egituraren diseinuaren hirugarren bertsio honetan barra diagonal batzuk jarriko zaizkio kordoen artan, zurruntasun gehiago emateko. Bi moduetan egingo dute lan egituraren deformazio norabidearen arabera. Saretaren bi aurpegietan barra diagonalek konpresioan egingo dute lan, eta beste bi aurpegietan aldiz trakzioan. Fig 34 Irudian diseinu honen barra diagrama adierazten da.

³⁴ Iturria: Berezkoa

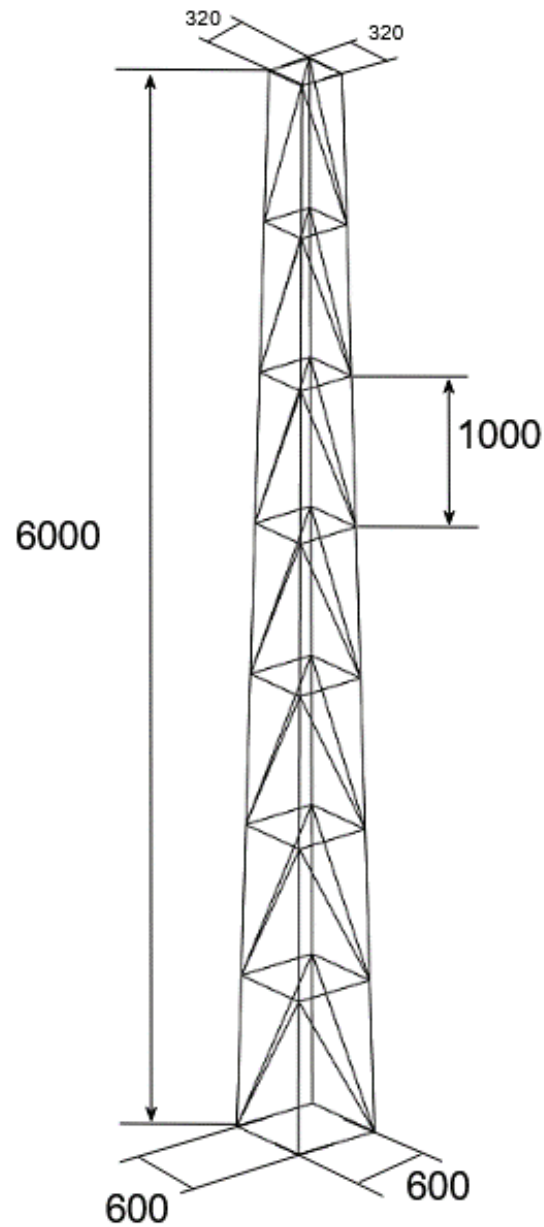


Fig 34 - Sareta egituraren bigarren diseinuaren barra diagrama³⁵

Egitura honetan ere bi profil mota erabiliko dira, L eta T profilak. L profilak zutabe nagusietan, eta goiko zein azpiko kordioetan erabiliko dira. T profilak ordea, beste kordioetan eta barra diagonaletan erabiliko dira, Fig 35a) irudian adierazten den bezala. Kasu honetan ere, lehenengo iterazioan L 80 8 eta T 40 5 profilak erabiliko dira. Mesh-a eta indarrak aplikatu ondoren Fig 35b) Irudian ikusgarri dagoen simulazio eredu lortu da.

³⁵ Iturria: Berezkoa

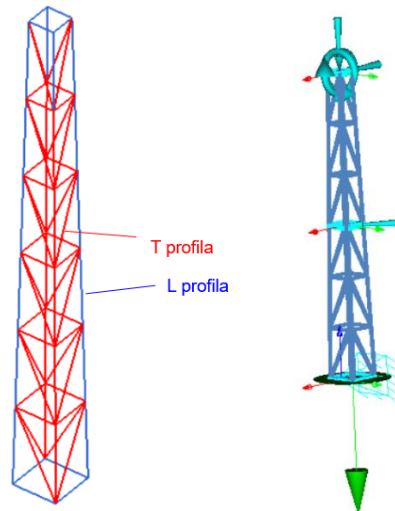


Fig 35 - Sareta egituraren hirugarren diseinuaren a) Profilen banaketa b) Simulazio ereduak³⁶

Simulazioa egin ondoren Fig 36 Irudian adierazten da lortutako egoera tentsionala. Ikusi daitekeen moduan, bigarren diseinu proposamenarekin alderatuz, tentsio maximoa izugarri murrizten da barra diagonalekin, hasierako profil berdinak zutabeetan eta kordoietan erabiliz, L 80 12 eta T 40 5 hurrenez hurren. Hala ere, tentsio maximoa onargarria altzairuaren gradu guztietarako gainditzen da, hortaz, profilak handituz iterazio batzuk egingo dira tentsio jasagarri maximoaren baldintza bete arte.

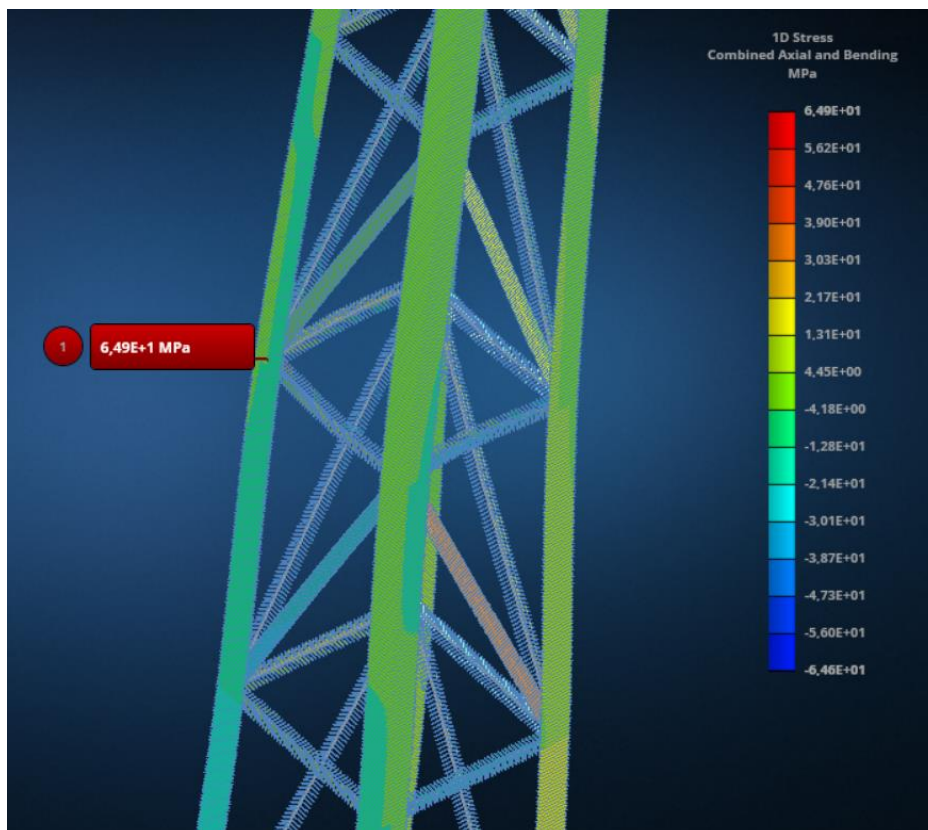


Fig 36 - Sareta egituraren hirugarren diseinuaren egoera tentsionala³⁷

³⁶ Iturria: Berezkoa

³⁷ Iturria: Berezkoa

Taula 12 - Hirugarren saretu egitura diseinuaren iterazioen emaitzak profil ezberdinekin

Erabilitako Profilak		Tentsio Maximoa (MPa)
L 80 12	T 40 5	64,9
L 80 12	T 50 6	34,9
L 80 12	T 60 7	30,3

Fig 37 irudian ikusi daitekeen moduan, azkenengo iterazioan lortu da tentsio maximoaren baldintza betetzea S355 altzairu estrukturalaren graduarekin. Hori dela eta, egitura hau S355 altzairu estrukturalarekin egingo da.

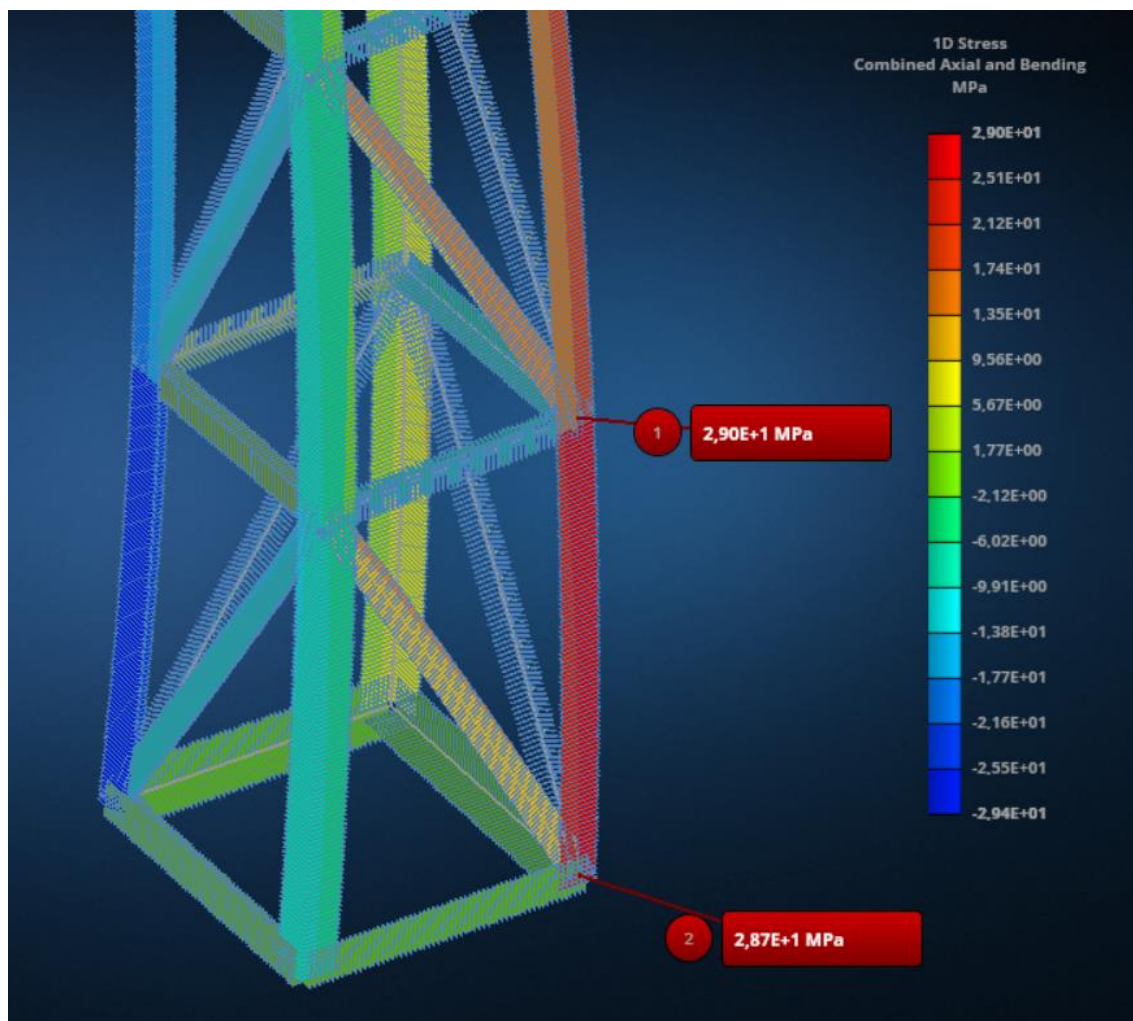


Fig 37 - Saretu egituraren hirugarren diseinuaren egoera tentsionala tentsio maximo onargarriaren baldintza betetzen den iterazioan³⁸

8.2 NEKEAREN ANALISIA

Behin lortuta hausturarekiko erresistentzia limitearen betetzen duen saretu egituraren diseinu aproposa, nekearen analisiaren limitea betetzen duen ziurtatu behar da. Hortaz, dorre zilindrikoarekin egin den bezala, A hipotesiaren kargak aplikatuko dira. Fig 38 Irudian adierazten da egoera honetan dorrearen egoera tentsionala.

³⁸ Iturria: Berezkoa

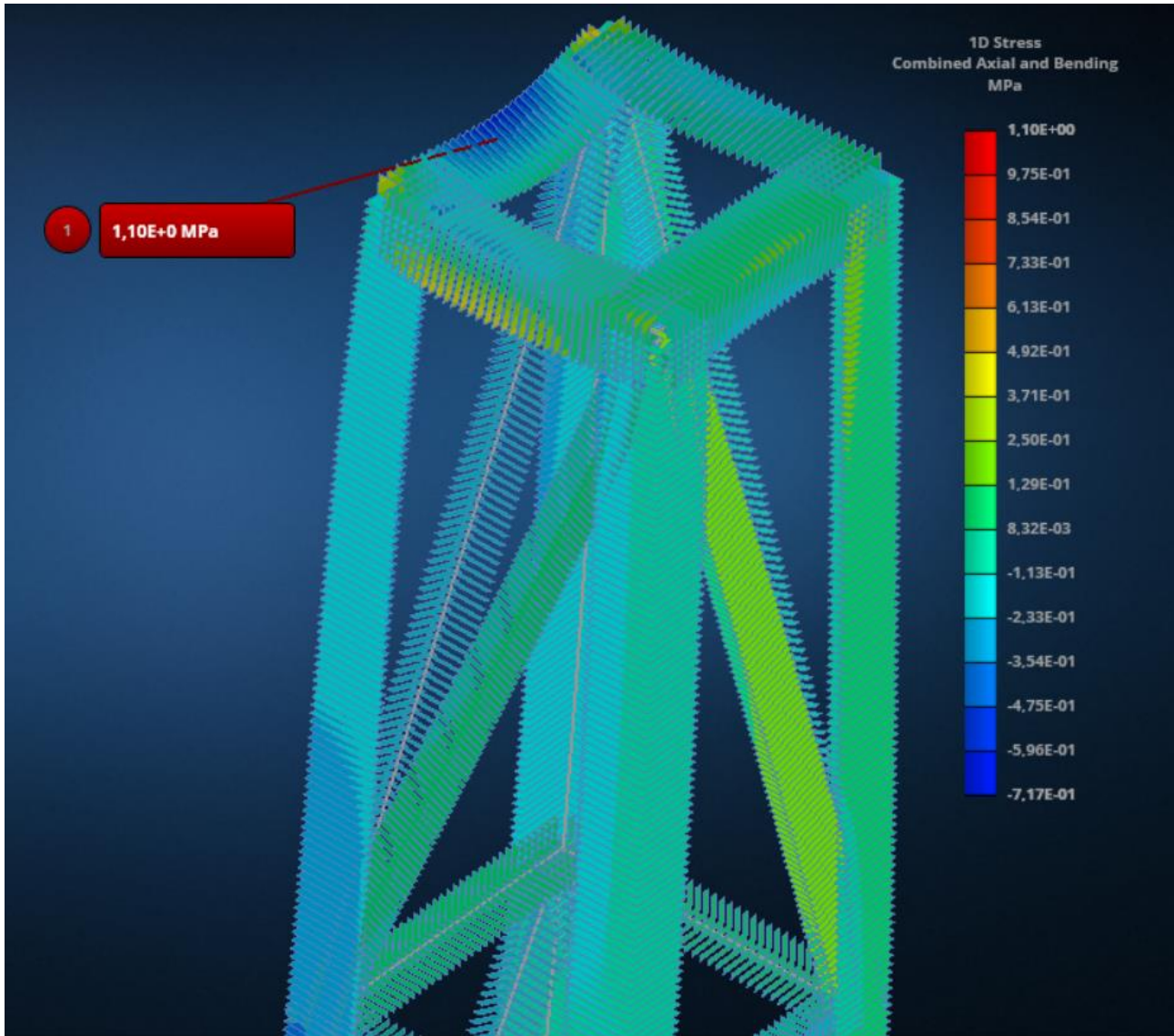


Fig 38 - Sareta egituraren egoera tentsionala nekearen analisisian³⁹

Fig 38 irudian ikusi daitekeen moduan, sareta egituraren tentsio maximoa nekearen analisisirako egoeran 0.93 MPa izango da. Taula 8. taulako tentsio onargarri maximoekin konparatuz, altzairu estrukturalaren gradu guztiek betetzen dute baldintza hau.

8.3 DEFORMAZIOAREN ANALISIA

Dorrearen zurruntasuna aztertzeko asmoarekin, Fig 39 Irudian sareta dorrearen diseinuaren deformazio maximoaren balioa ikusgarri dago. MSC Apex softwarearen arabera, deformazio maximoa 5mm-koa da. Kontuan hartuta goiko aurpegiaren dimentsioen %1,5 dela, esan dezakegu interferentzia mekanikorik ez dela egongo.

³⁹ Iturria: Berezkoa

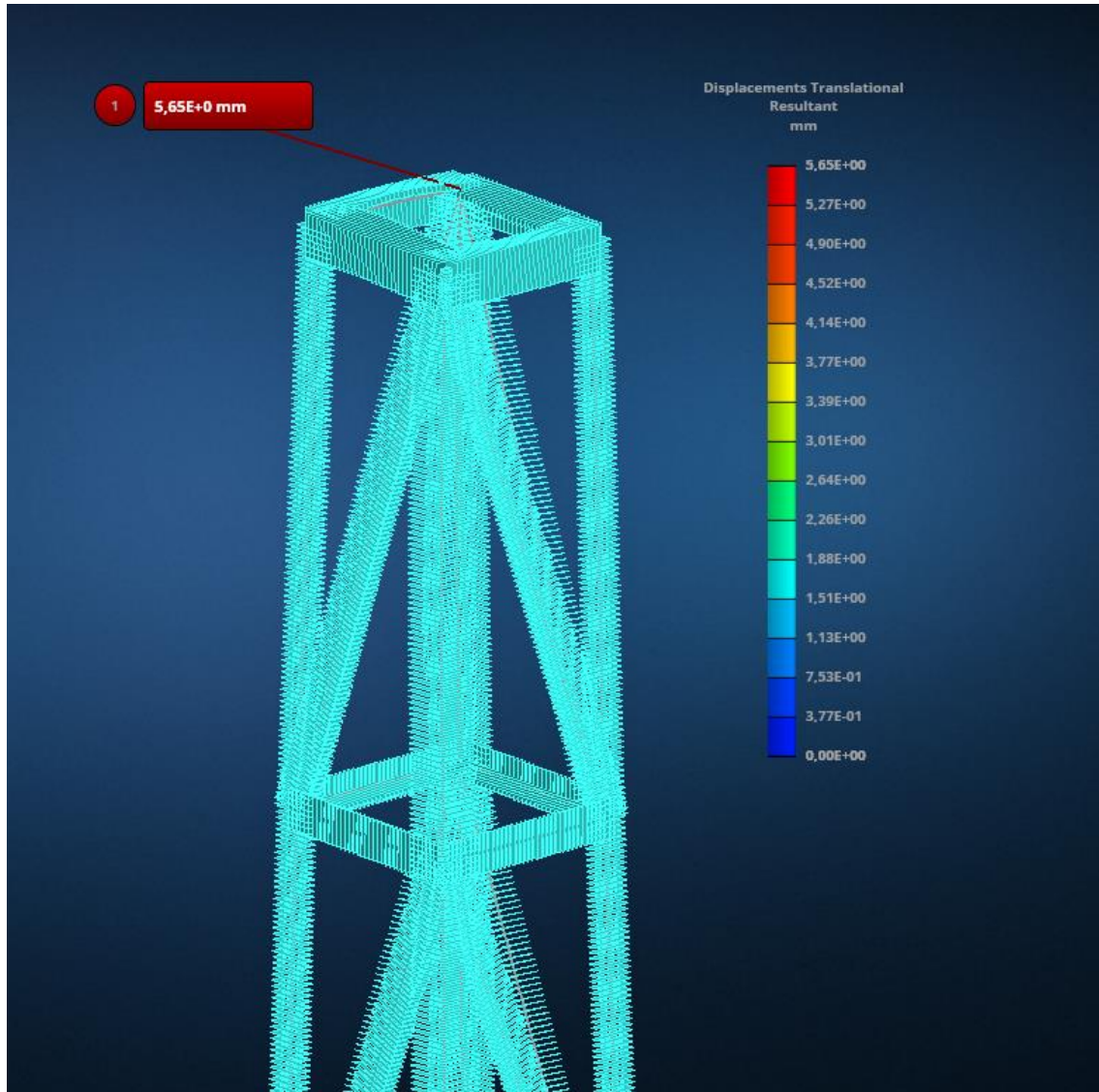


Fig 39 - Sareta egituraren deformazio egoera⁴⁰

9 EMAITZEN LABURPENA

MSC Apex softwarearekin simulazioak egin ondoren eta egitura mota ezberdinek jasango duten tentsio maximoak araudiak agintzen duen tentsio maximo onargarriak baino txikiagoak direla ziurtatu eta gero, AS txikiarentzako dorreen diseinua lortu da. Lortutako diseinuen emaitzak laburtzeko asmoarekin, Taula 13. eta Taula 14. Tauletan nekearen analisi egoeran eta haustura erresistentziaren analisiaren egoeran lortutako tentsio maximoen balioak adierazten dira. Gainera, Fig 40 Irudian dorreen azken diseinuen 3D ereduak erakusten dira.

Taula 13 - Dorre zilindrikoaren emaitzen laburpena

Analisi Mota	Tentsio maximoa (MPa)	Tentsio maximo onargarria (MPa)
Nekea (F)	0,824	27,5
Hausturarekiko erresistentzia (U)	23,3	30,5

⁴⁰ Iturria: Berezkoa

Taula 14 - Sareta egituraren emaitzen laburpena

Analisi Mota	Tentsio maximoa (MPa)	Tentsio maximo onargarria (MPa)
Nekea (F)	1,1	35,5
Hausturarekiko erresistentzia (U)	30,3	39,4

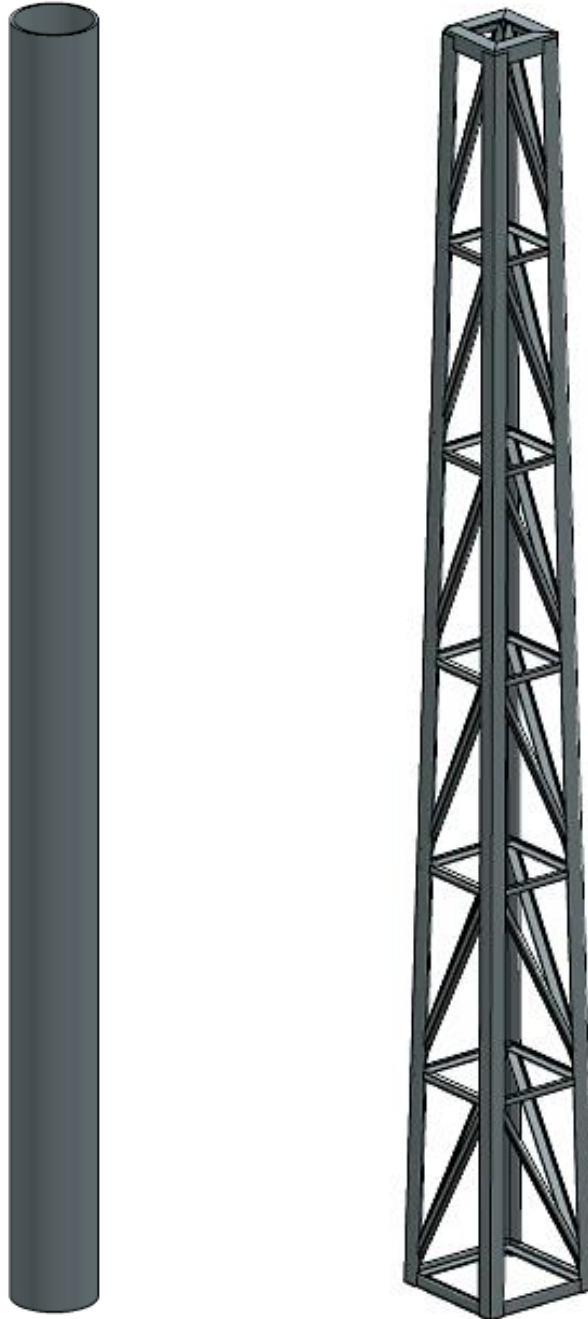


Fig 40 – Dorrearen azken diseinuen 3D ereduak. a)Dorre Zilindrikoa b)Sareta Egitura⁴¹

⁴¹ Iturria: Berezkoa

10 ONDORIOAK

Kapitulu honetan proiektuan burutu diren azpiatal bakoitzaren prozedura birpasatuko da, atera diren ondorioak komentatzen diren bitartean.

Dorrearen diseinuarekin hasteko lehenengo pausua AS txikiak jasango dituen kargak determinatzea zen. Horretarako UNE-EN 61400-2:2015 araudiak kargak determinatzeko adierazten dituen metodologietako bat erabili da, karga sinplifikatuen metodoa. Karga hipotesi ezberdinen ekuazioetarako beharrezko parametro guztiak determinatu dira Bornay Wind 13+ AS txikiaren datuekin, eta Gasteizko Ingeniaritza Eskolako teilatuan egongo den haizearen abiaduraren datuak ordea enair web orrialdean lorturiko infomazioarekin.

Behin kargak determinatuta dorrearen diseinua egitea zen hurrengo pausua. Bi diseinu proposatu dira, sareta egitura eta dorre zilindrikoa. Diseinu optimoa aurkitzeko dorre zilindrikoan sekzio ezberdinekin iterazioak egin dira, eta profil desberdinekin sareta kasuan. Elementu finituen bidezko MSC Apex softwarearekin egitura desberdinen tentsio maximoa aurkitu da.

Azkenik, altzairu estrukturala erabiliko zela erabikita, egitura desberdinek jasango duten tentsio maximoak araudiak adierazten duen tentsio maximo jasangarria gainditzen ez duela bermatu da.

Dorren diseinuaren aldetik, argi ikusi da sareta egituraren kasuan, barra diagonalak jartzeak izugarriko hobekuntza ekartzen duela. Barra hauekin, erabili beharreko profilak tamainaz izugarri murrizten dira, L 180 12 bigarren diseinuaren kasuan eta barra diagonalekin profila L 80 12 ta T 60 7 profilak erabiltzera pasatzen da. Profil txikiagoak erabiliz haizearen karga eta pisua murriztea lortzen da.

Bestalde, dorre zilindrikoaren diseinuarekin ikusi da sekzio zirkularraren inertzi momentu handiak tentsio maximoa asko murrizten duela, azalera txikiarekin diseinua onargarria izatea eginez. Gainera, diseinu hau Campus Bizia Lab proiekturako interesgarria izan daiteke etorkizunean egitura fabrikatzeko aukera badago.

Proiektu honen prozesuan zehar, hainbat gauza ikasi ditut ingeniaritza arloan eta baita arlo pertsonalean. Alde batetik, araudien dokumentuekin trebetasuna hartzen ikasi dut, hortik informazioa bilatzea, ulertzea eta proiektuan inplementatzea. Baita ere, materialaren ezaugarriak bilatzea dokumentu ofizialetan, profil normalizatuen taulekin batera.

Beste alde batetik CAD/CAE erreminten erabilpena hobetu dut. MSC Apex softwarearekin egoera tentsionalak kalkulatzeko mesh-aren egokitasuna inportantea dela ikasi dut, eta baita geometriaren modelatzearen optimizazioa, diseinuan aldaketak egin beharrekotan azkar aldatzeko aukera izateko.

Arlo pertsonalean proiektu hau egiteak nire burua ondo antolatzea bultzatu nau egunero lana aurrera eramateko eta baita ere epe luzerako planifikazioa egiteko.

Laburbilduz, proiektu honetan AS txiki baten dorrearen diseinua egiteko kontuan hartu beharreko parametroak aurkitzea, hala nola haizearen ezaugarriak, karga hipotesiak eta materialaren ezaugarriak eta elementu finitun bidezko simulazioen ikasitako teoria aplikatzea ikasi dut.

11 ERREFERENTZIAK

- [1] UPV/EHU, «¿Qué es Campus Bizia Lab?,»
<https://www.ehu.eus/es/web/iraunkortasuna/campus-bizia-lab-zer-da>.
- [2] UPV/EHU, «Estudio de la viabilidad integral de la energía mini eólica en la EIVG,»
<https://www.ehu.eus/es/web/iraunkortasuna/viabilidad-integral-de-la-energia-mini-e%C3%B3lica>.
- [3] «UNE-EN 61400-2:2015,» 18 Marzo 2015.
- [4] IBERDROLA S.A., «¿Qué es la energía eólica, cómo se transforma en electricidad y cuáles son sus ventajas?,» 2023. <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/energia-eolica>.
- [5] Factor Energia S.A., «Energía eólica. Qué es, cómo funciona, ventajas y desventajas,» 23 07 2018.
<https://www.factorenergia.com/es/blog/eficiencia-energetica/energia-eolica/>.
- [6] WindEurope asbl/vzw , «Wind energy in Europe: 2021 Statistics and the outlook for 2022-2026,» 2022 02 24. <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2021-statistics-and-the-outlook-for-2022-2026/>.
- [7] IBERDROLA S.A., «Evolución de la energía eólica en Europa,» 2023.
<https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/evolucion-energia-eolica-europa>.
- [8] IDAE, «¿Que es el autoconsumo?,» 2020. <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/oficina-de-autoconsumo/que-es-el-autoconsumo>.
- [9] IBERDROLA S.A., «Autoconsumo Electrico,» 2023.
<https://www.iberdrola.com/innovacion/autoconsumo-electrico>.
- [10] C. G. Ruiz, «Normativa para la instalación de placas solares en 2023,» 14 03 2023.
<https://selectra.es/autoconsumo/info/normativa>.
- [11] Techno Sun, «¿Cuál es la potencia activa recomendada de una instalación solar para una vivienda?,» 2019. <https://www.technosun.com/es/blog/cual-es-potencia-activa-recomendada-instalacion-solar-vivienda/>.
- [12] L. Ojea, «El autoconsumo suma 2,6 GW en 2022 en España y genera el equivalente al 1,8% de la demanda eléctrica nacional,» 13 Febrero 2023.
https://www.elespanol.com/invertia/empresas/energia/20230213/autoconsumo-gw-espana-equivalente-demanda-electrica-nacional/741176083_0.html.
- [13] R. Ruiz Nieto, «Diseño mecánico de un aerogenerador eólico,» 27 11 2015.
<https://addi.ehu.es/handle/10810/16217>.
- [14] Kozo Arquitectura, «¿Qué es la energía minieólica?,» 10 10 2019.
<https://www.kozoarquitectura.es/energia-minieolica/>.

- [15] I. Núñez Ayala, «Diseño y cálculo de la torre y la cimentación de un aerogenerador,» 13 04 2015. <https://addi.ehu.es/handle/10810/14945>.
- [16] O. Planas, «Partes de un aerogenerador, características y descripción,» 28 Octubre 2021. <https://solar-energia.net/energias-renovables/energia-eolica/aerogeneradores/partes-de-un-aerogenerador#mastil-del-generator-eolico>.
- [17] BORNAY AEROGENERADORES, SL, «Aerogeneradores Wind+,» <https://www.bornay.com/es/productos/aerogeneradores/wind-plus>.
- [18] Avant Garde Innovations Pvt Ltd, «20 FT GALVANIZED POLE,» 2022. <https://avantgarde.energy/products/towers/20-ft-galvanized-pole/>.
- [19] R. A. H. y. H. H. Bisplinghoff, Aeroelasticidad, Dover Science, 1996.
- [20] A. C. Martínez, Optimizacion de una torre en celosia de 40 metros portadora de antenas, 2009.
- [21] «Made - Endesa AE-30,» 12 Marzo 2023. <https://es.wind-turbine-models.com/turbines/574-made-endesa-ae-30>.

12 ERANSKINAK

12.1 KARGA SIMPLIFIKATUEN HIPOTESIAK

Karga sinplifikatuen metodoak sarrera parametro batzuk erabiltzen ditu, hauek UNE-EN 61400/2 araudiaren 13.2 atala jarraituz. Parametro hauek hurrengoak dira: diseinuaren errotazio abiadura n_{design} , diseinuaren haizearen abiadura V_{design} , diseinu parearen (Torque) ardatzean Q_{design} , orientazio abiadura maximoa $\omega_{\text{yaw máx}}$ eta errotazio abiadura maximoa $n_{\text{máx}}$.

Diseinuaren abiadura $1.4 * V_{\text{ave}}$ bezala definitzen da. Diseinu potentzia P_{design} eta diseinu errotazio abiadura haizearen abiadura n_{design} horretan potentzia nibela eta errotazio abiadura dira. Kasu honetan, Bornay Wind 13+ ASa erabiliko denez, potentzia eta errotazio abiadura nominalak erabiliko dira, 1kW eta 600rpm hurrenez hurren. Araudiak dioen bezala, diseinuaren parearen ardatzean Q_{design} , Ek 3-en erakusten den bezala kalkulatu da. Transmisio trenaren potentzi garraioaren efizientzia ere araudiaren 49. Ekuaziotik kalkulatu da.

$$Q_{\text{design}} = \frac{30P_{\text{design}}}{\eta\pi n_{\text{design}}}$$

$$\eta = 0,6 + 0,005 P_{\text{design}} \text{ para } P_{\text{design}} \leq 20 \text{ kW}$$

$$\eta = 0,7 \text{ para } P_{\text{design}} > 20 \text{ kW}$$

Ek 3 - Diseinu parearen kalkulua

Ek 4 - Transmisio trenaren efizientzia

Orientazio abiadura maximoa kalkulatzeko orientazio sistema mota kontuan hartu behar da. Kasu honetan, orientazio metodo pasiboa da, beraz araudiaren arabera, orientazio abiadura maximoa 27. Ekuazioa erabiliz kalkulatu da, non R, errotorearen erradioa den.

$$\omega_{yaw,max.} = 3 - 0,01 \times (\pi R^2 - 2)$$

Ek 5 - Orientazio maximoaren abiadura

Bestalde, diseinu abiaduraren erlazioa alabearen puntan, λ_{design} , araudiaren 19. Ekuazioarekin kalkula daiteke.

$$\lambda = \frac{V_{tip}}{V_{hub}} = \frac{\omega R}{V_{hub}} \Rightarrow \lambda_{design} = \frac{R}{V_{design}} \frac{\pi n_{design}}{30}$$

Ek 6 - Abiadura erlazioa alabearen puntan

KARGA SINPLIFIKATUEN METODOLOGIA

12.1.1 A HIPOTESI KARGA: OPERAZIO NORMALA

Operazio normalaren diseinu karga, neke karga bat da. Hipotesi honek karga eremu konstante bat suposatzen du alabe eta ardatzarentzat. Tarteak piko-piko balore bezala kontsideratu behar dira.

$$\begin{aligned} \Delta F_{zB} &= 2m_B R_{cog} \omega_{n,design}^2 & \Delta F_{x-shaft} &= \frac{3}{2} \frac{\lambda_{design} Q_{design}}{R} \\ \Delta M_{xB} &= \frac{Q_{design}}{B} + 2m_B g R_{cog} & \Delta M_{x-shaft} &= Q_{design} + 2m_r g e_r \\ \Delta M_{yB} &= \frac{\lambda_{design} Q_{design}}{B} & \Delta M_{shaft} &= 2m_r g L_{rb} + \frac{R}{6} \Delta F_{x-shaft} \end{aligned}$$

Ek 7 - A hipotesiaren kargak: a) Alabeetan b) Ardatzean

Non:

- m_B : Alabearen masa
- R_{cog} : Errotorearen zentroaren eta grabitate zentruaren arteko distantzia erradiala
- $\omega_{n,design}$: Errotorearen diseinu errotazio abiadura
- e_r : Errotorearen grabitate zentrutik biraketa ardatzairainoko distantzia
- m_r : Errotorearen masa (alabeak eta gurpegia barne)
- g : grabitatearen azelerazioa ($9.81m/s^2$)
- B : Alabe zenbakia
- L_{rb} : Errotorearen zentrutik lehenengo errodamendurarteko distantzia
- R : Errotorearen erradioa
- B : Alabe zenbakia

12.1.2 B HIPOTESI KARGA: ORIENTAZIOA

Hipotesi karga honetan momentu eta indar girokopiko limiteak kalkulatzeko kontsideratzen da orientazio abiadura maximoa haizearen diseinu abiadurarekin gertatzen dela. Araudiaren arabera, makurdura momentuak eragindako kargak alabeetan eta ardatzean hurrengo ekuazioen arabera kalkula daitezke.

$$M_{yB} = m_B \omega_{yaw, \max}^2 L_{rt} R_{cog} + 2 \omega_{yaw, \max} I_B \omega_{n, \text{design}} + \frac{R}{9} \Delta F_{x\text{-shaft}}$$

donde $\Delta F_{x\text{-shaft}}$ viene dado por la ecuación (24).

$$M_{\text{shaft}} = 4 \omega_{yaw, \max} \omega_{n, \text{design}} I_B + m_r g L_{rb} + \frac{R}{6} \Delta F_{x\text{-shaft}}$$

Ek 8 - B hipotesiaren kargak

Non:

- L_{rt} : Errotorearen zentrutik orientazio ardatzerainoko distantzia
- $\omega_{yaw, \max}$: Orientazio abiadura maximoa
- R_{cog} : Errotorearen zentroaren eta grabitate zentruaren arteko distantzia erradiala
- I_B : Alaberaren erroaren gilborduraren norabidearen gaineko inerti momentua
- $\omega_{n, \text{design}}$: Errotorearen diseinu errotazio abiadura
- L_{rb} : Errotorearen zentrutik lehenengo errodamendurarteko distantzia

12.1.3 C HIPOTESI KARGA: ORIENTAZIOAREN ERROREA

AS guztiek errore zehatz batekin operatzen dute. Hipotesi honetan suposatutako errorea 30º-koa da.

Orientazioaren erroreak eragindako makurdura momentua flapwise norabidean araudiaren 31 ekuazioekin kalkulatu daiteke.

$$M_{yB} = \frac{1}{8} \rho A_{\text{proj}, B} C_{l, \max} R^3 \omega_{n, \text{design}}^2 \left[1 + \frac{4}{3 \lambda_{\text{design}}} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\lambda_{\text{design}}} \right)^2 \right]$$

Ek 9 - C hipotesiaren kargak

- ρ : Airearen dentsitatea
- $C_{l, \max}$: Sustentazio koefiziente maximoa
- $\omega_{n, \text{design}}$: Errotorearen diseinu errotazio abiadura
- $A_{\text{proj}, B}$: Alabearen azalera proiektatua
- R : Errotorearen erradioa
- λ_{design} : Diseinu abiaduraren erlazioa alabearen puntan

12.1.4 D HIPOTESI KARGA: BULTZADA MAXIMOA

AS txikia bultzada karga altuetara ikusgai egon daiteke. Bultzada karga hauek errotorearekiko norabide paraleloan dute eragina, eta haien balore maximoa araudiaren arabera, 32. Ekuazioaren bidez kalkulatu da.

$$F_{x\text{-shaft}} = C_T 0,5 \rho (2,5 \times V_{ave})^2 \pi R^2$$

Ek 10 - D Hipotesiaren kargak

Non:

- ρ : Airearen dentsitatea
- C_T : Bultzada koefizientea
- R: Errotorearen erradioa
- V_{ave} : Gurpegiaren altueran haizearen urteko batez besteko abiadura

12.1.5 E HIPOTESI KARGA: ERROTAZIO ABIADURA MAXIMOA

Hipotesi karga honek indar zentrifugoaren efektuak eta errotorearen desoreka kontsideratzen ditu. Alabearen erroan sorturiko indar zentrifugoa eta errotorean eragindako makurdura momentua hurrengo ekuazioen biez determina daitezke, araudiaren arabera.

$$F_{zB} = m_B \omega_{n,\text{máx.}}^2 R_{\text{cog}} \qquad M_{\text{shaft}} = m_r g L_{rb} + m_r e_r \omega_{n,\text{máx.}}^2 L_{rb}$$

Ek 11 - E Hipotesiaren kargak

Non:

- m_B : Alabearen masa
- $\omega_{n,\text{máx.}}$: Errotorearen errotazio abiadura maximoa
- L_{rb} : Errotorearen zentrutik lehenengo errodamendura arteko distantzia
- g: grabitatearen azelerazioa (9.81m/s²)
- R_{cog} : Errotorearen zentroaren eta grabitate zentruaren arteko distantzia erradiala
- e_r : Errotorearen grabitate zentrutik biraketa ardatzerainoko distantzia
- m_r : Errotorearen masa (alabeak eta gurpegia barne)

12.1.6 F HIPOTESI KARGA: ZIRKUITULABURRA KARGAREN KONEXIOAN

Zirkuitulabur bat gertatzen bada AS txikiaren irteeran momentu oso handi bat sortzen da errotorearen ardatzean alternadorearen zirkuitulaburraren pareagatik. Hurrengo ekuazioarekin determina daiteke.

$$M_{x\text{-shaft}} = G Q_{\text{design}} \qquad M_{xB} = \frac{M_{x\text{-shaft}}}{B} + m_B g R_{\text{cog}}$$

Ek 12 - F hipotesiaren kargak

Non:

- m_B : Alabearen masa
- B: Alabe zenbakia
- g: grabitatearen azelerazioa (9.81m/s²)
- G: Sorgailuaren zirkuitulaburreko eta diseinu parearen arteko erlazioa

- R_{cog} : Errotorearen zentroaren eta grabitate zentruaren arteko distantzia erradiala

12.1.7 G HIPOTESI KARGA: DESKONEXIOA (BALAZTATZEA)

AS-ak balaztatze sistema mekaniko edo elektrikoa baldin badaukate potentzia-treanean, balaztatze momentua trakzio momentu maximoa baino handiagoa izan daiteke. Kasu hauetan balazta momentua erabili behar da AS-aren diseinurako, hau diseinu pareta eta balaztatze pareta izanik.

$$M_{x\text{-shaft}} = M_{\text{brake}} + Q_{\text{design}} \qquad M_{xB} = \frac{M_{x\text{-shaft}}}{B} + m_B g R_{cog}$$

Ek 13 - G Hipotesiaren kargak

- m_B : Alabearen masa
- g : grabitatearen azelerazioa (9.81m/s^2)
- B : Alabe zenbakia
- M_{brake} : Sorgailuaren balaztatze pareta
- R_{cog} : Errotorearen zentroaren eta grabitate zentruaren arteko distantzia erradiala

12.1.8 H HIPOTESI KARGA: HAIZEAREN KARGA EXTREMOA

Hipotesi karga honetan, AS-ak haizearen abiadura extremoetan egiten du lan diseinuan aurreikusten den moduan. Ikusgai diren ataletan kargak kalkulatu behar dira, haizearen abiadura V_{e50} izanik.

$$M_{yB} = C_{l,\text{máx.}} \frac{1}{6} \rho V_{e50}^2 A_{\text{proj},B} R \qquad M_{yB} = C_d \frac{1}{4} \rho V_{e50}^2 A_{\text{proj},B} R$$

$$F_{x\text{-shaft}} = B C_d \frac{1}{2} \rho V_{e50}^2 A_{\text{proj},B} \qquad F_{x\text{-shaft}} = 0,17 B A_{\text{proj},B} \lambda_{e50}^2 \rho V_{e50}^2$$

$$\lambda_{e50} = \frac{n_{\text{máx.}} \pi R}{30 V_{e50}}$$

Ek 14 - H Hipotesiaren kargak: a) Gelditzen diren AS, b) Biratzen duten AS

Dorrearen eta gondolaren gaineko indarrak kalkulatzeko hurrengo ekuazioa erabili behar da.

$$F = C_f \frac{1}{2} \rho V_{e50}^2 A_{\text{proj}}$$

Ek 15 - H hipotesiaren kargak dorrean eta gondolan

Non:

- $C_{l,max}$: Sustentazio koefiziente maximoa.
- $A_{proj,B}$: Alabearen azalera proiektatua
- V_{ref} : Batez besteko haizearen abiadura 10 min-etan eginda
- ρ : Airearen dentsitatea
- A_{proj} : Azalera proiektatua haizearen norabidean
- C_d : Erresistentzia koefizientea..
- B : Alabe zenbakia
- C_f : Indar koefizientea.
- V_{e50} : Espero den haizearen abiadura extremoa (bataz bestez 3s-etan) 50 urtez errepikakorra.
- λ_{e50} : Abiadura erlazioa alabearen puntan

12.1.9 I HIPOTESI KARGA: GELDITZEA HAIZEAREN KARGAREKIN, IKUSGAITASUN MAXIMOA








Orientazio sistemaren arazoren bat egotekotan, AS norabide guztietatik egon daiteke ikusgai haizearekiko. Horregatik, indar guztiak alabeetan, dorrean, gondolan eta leman kalkulatu behar dira, exposizio (exposicion) guztietarako. Osagai bakoitzaren karga hurrengo ekuazioarekin kalkula daiteke:

$$F = C_f \frac{1}{2} \rho V_{ref}^2 A_{proj}$$

Ek 16 - I hipotesiaren kargak

Konponente bakoitzaren geometriaren arabera, C_f indar koefizientea Taula 15. taularekin kalkulatu da.

Taula 15 - Indar koefizientea

Para todas las secciones la dirección del viento es de izquierda a derecha							
Longitud característica ^a < 0,1 m		1,3	1,3	1,5	1,5	1,5	2,0
Longitud característica ^a > 0,1 m		0,7	1,2	1,5	1,5	1,5	2,0
^a La longitud característica es la dimensión de arriba a abajo (perpendicular al flujo) como se describe aquí, salvo en el caso de una aerodinámica oblicua para la que se debería consultar un cuaderno de datos aerodinámicos.							

Non:

- C_f : Indar koefizientea.
- ρ : Airearen dentsitatea
- A_{proj} : Azalera proiektatua haizearen norabidean
- V_{ref} : Batez besteko haizearen abiadura 10 min-etan eginda

12.1.10 J HIPOTESI KARGA: GARRAIO, MUNTAI, MANTENIMENDU ETA KONPONKETA KARGAK

AS-ren fabrikatzaileak kontuan hartu behar ditu diseinuan garraioan, muntaian, instalazioan eta mantenimenduan sorturiko kargak. Adibide batzuk dira AS-grabitatzeko kargak garraioan zehar posizio bertikala ez den beste posizioetan, instalazioan erabilitako tresna berezien kargak eta mastan eragindako mantentze lanetako kargak. [3]

12.2 EGITURAREN GAINEKO KARGEN KALKULUA

Sekzio honetan kargak kalkulatu dira aurretik azaldutako hipotesiak eta ekuazioak erabiliz.

12.2.1 HIPOTESIEN PARAMETROEN KALKULUA:

Karga sinplifikatuen metodologia eta simulazio modeloen metodologia ikusitako kargak kalkulatzeko, ekuazioetarako beharrezkoak diren parametroak kalkulatu behar dira. AS-ren geometriarekin zerikusia daukatena, Bornay Wind13+ AS-ren fitxa teknikoak ateratzen dira, hala nola, alabeen masa, errotorearen masa, alabe kopurua etab...

Datasheet

Technical specifications	Wind 13+	Wind 25.2+	Wind 25.3+
Number of blades	2	2	3
Diameter	2.86 m	4.05 m	4.05 m
Material	Fiberglass / Carbon Fiber		
Direction of rotation	Counterclockwise		
Electric specifications			
Alternator	Three phases permanent magnet		
Magnets	Neodymium		
Nominal power	1500 W	3000 W	5000 W
Nominal voltage	220 v	220 v	220 v
Nominal RPM	600	400	400
Wind speed			
Operating range	2 - 30m/s		
Turn on	3 m/s		
Nominal power	12 m/s		
Automatic brake system	14 m/s		
Maximum	60 m/s		
Physical specifications			
Wind turbine weight	41 kg	93 kg	107 kg
Package 1 (WT) - Weight	57 kg	135 kg	149 kg
Pack. 1 - Dimensions (cm)	50x77x57 120x80x80		
Pack. 1 (Blades) - Weight	6,8 kg	19 kg	22 kg
Pack. 2 - Dimensions (cm)	153x27x7	220x40x15	260x40x15
Total - Volume	0,23 m ³	0,90 m ³	0,91 m ³
Total - Weight	63,8 kg	154 kg	171 kg
Warranty	3 years		

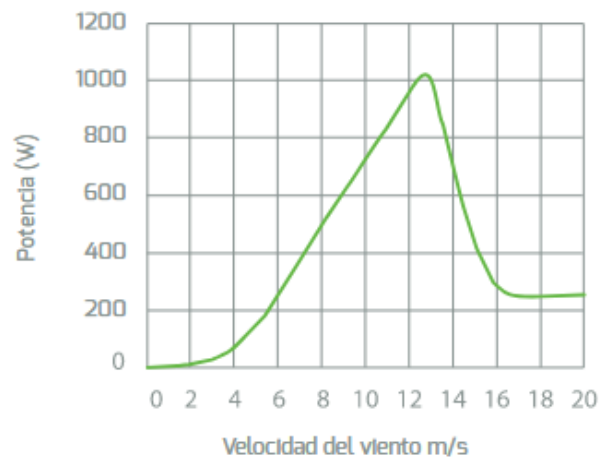


Fig 41 – Bornay Wind13+ AS-ren a)Fitxa teknikoa b)Potentzia kurba⁴²

- P_{design} : AS-ren diseinuaren potentzia. Fitxa teknikoak ateratzen da, diseinu abiadura ematen duen potentzia nominala izanik. Fig 41b irudian ikusi daitekeen moduan, 6.16m/s-ko abiadurarekin 250W emango ditu
- n_{design} : AS-ren diseinuaren biraketa abiadura. Kasu honetan biraketa abiadura ez da ezaguna haizearen diseinu abiadurarekin. Jakinda 1kW-ko potentzia nominalean 600rpm-ko biraketa abiadura duela, proportzionaltasuna suposatuz, 250W ematen dituen AS-k 150rpm-etan biratzen duela suposatuko da.
- η : Transmisio trenaren efizientzia. Arauak esaten duen arabera, hurrengo espresioarekin kalkulatu daiteke, diseinuaren potentzia 0.25kW izanik:

$$\eta = 0,6 + 0,005 P_{design} \text{ para } P_{design} \leq 20 \text{ kW} \quad \eta = 0.6 + 0.005 \times 0.25kW = 0.60125$$

$$\eta = 0,7 \text{ para } P_{design} > 20 \text{ kW}$$

- Q_{design} : Diseinuaren pareta ardatzean. Lehenago esan den bezala, hurrengo ekuazioarekin kalkulatu da.

$$Q_{design} = \frac{30 \times P_{design}}{\eta \times \pi \times n_{design}} = \frac{30 \times 250(W)}{0.60125 \times \pi \times 150(rpm)} = 26.4Nm$$

⁴² Iturria: Bornay SL

- V_{design} : AS-ren diseinu abiadura. Lehen azaldu den bezala 1.4 aldiz V_{design} bezala definitzen da. 6,16 m/s-ko balioa izango du

λ_{design} : Abiadura erlazioa alabearen puntan. Lehenago esan den bezala, araudiaren arabera hurrengo ekuazioarekin kalkulatu daiteke.

$$\lambda_{design} = \frac{R}{V_{design}} \frac{\pi \times n_{design}}{30} = \frac{1.43m}{6.16m/s} \frac{\pi \times 150rpm}{30} = 3.65$$

- R: Errotorearen erradioa. Fitxa teknikitik ateratzen da. $R = 2.86m/2 = 1.43m$
- B: Alabe zenbakia. Bornay Wind13+ AS-ak 2 alabe ditu.
- m_B : Alabearen masa. Fitxa teknikitik ikusi daiteke alabeen masa 6.8kg dela. Beraz alabe bakoitzaren pisua datu horren erdia izango da, hau da, 3.4kg
- m_r : Errotorearen masa (alabeak eta gurpegia (buje) barne). Gurpegiaren pisuari buruzko informazioa ez dago eskuragarri. Hori dela eta suposizio bat egingo da pisu osoa eta alabeen pisua kontuan harturik. Endesaren AE-30 AS handiaren pisu totala 19.5t dira, eta pisu horretatik 7.5t errotoreari dagozkio, hau da, pisuaren %38.4-a. [21] Pisuaren proportzio berdina jarraituz, Bornay 13+ AS-ak 68kg pisatzen dituela jakinda, errotorearen pisua 24.5kg izango da.
- R_{cog} : Errotorearen zentroaren eta alabeen grabitate zentruaren arteko distantzia erradiala. Alabeei buruzko informazioa eskuragarri ez dagoenez, suposatuko da alabearen erdian dagoela. Hortaz distantzia hori $1430/2 \text{ mm} = 715\text{mm}$ izango da.
- $\omega_{n,design}$: Errotorearen diseinu errotazio abiadura. Lehen esan bezala, suposatuko da 150rpm dela.
- e_r : Errotorearen grabitate zentrutik biraketa ardatzerainoko distantzia: Araudiaren arabera balio zehatzik ez egotekotan $0.005 \cdot R$ har daiteke. Kasu honetan $0.00715m$
- g: grabitatearen azelerazioa ($9.81m/s^2$)
- L_{rb} : Errotorearen zentrutik lehenengo errodamendura dagoen distantzia. AS-ren marrazki teknikoak eskuragarri ez daudenez ezin da datu hau era zehatz batean jakin. Lehenengo errodamendua errotorearen zentrutik mastara dagoen distantziaren laurden batera dagoela suposatuz, $L_{rb} = 320/4 = 80\text{mm}$
- L_{rt} : Errotorearen zentrutik orientazio ardatzerainoko distantzia. Eskalatutako AS-ren modeloaren dimentsioak ikusiz, luzera hori 320mm izango da.
- I_B : Alabearen erroaren gilborduraren norabidearen gaineko inerti momentua. Alabearen geometria zehatza ez da ezaguna, beraz ezinezkoa da inerti momentu zehatza kalkulatzeko. Hori dela eta, Fig 42 Irudian adierazitako eskemarekin alabearen geometriaren hurbilketa egingo da.

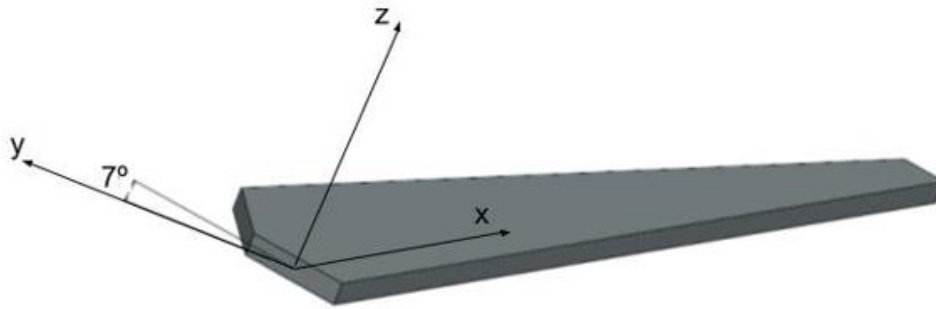


Fig 42 - Alabearen modelo hurbildua

Alabearen lodiera konstantea dela suposatuko da eta aurretiko bistan ikusgarri dagoen geometria izango du. Kontuan hartu behar da, alabeak eraso angelu edo "Pitch" angelu bat daukala, eta horren ondorioz, eskema horretan neurtutako dimentsio bertikalak proiektatuak direla. Alabearen eraso angeluan Fig 42c Irudian adierazten da, hau da, 7°. Eraso angelua jakinda, Fig 43a. irudian alabearen hurbildutako dimentsioak adierazten dira.

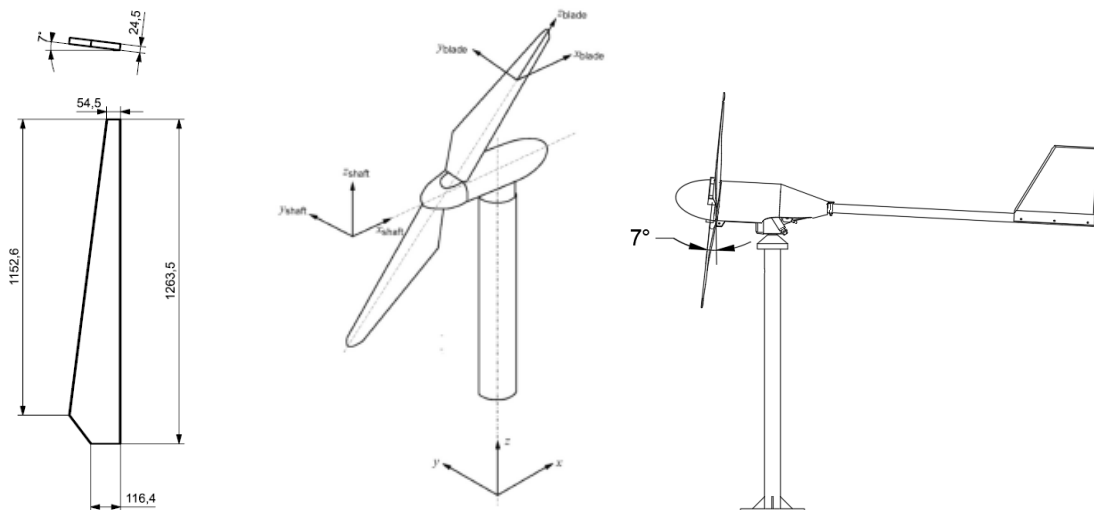


Fig 43 - a)Alabe hurbilduaren dimentsioak b)AS-ren erreferentzi sistemak c)Alabearen inklinazio (pitch) angelua

Behin alabeen geometria finkatuta, inerti momentua kalkulatu behar da gilborduraren norabidean, hau da, Fig 42 Irudian alabearen Y ardatzean (Y_{blade}). NX programan alabearen geometria sortuz eta pisua ezarriz, hau da, 3.4kg, inerti momentua Y ardatzean ateratzen du programak automatikoki. Emaitzak Fig 44 irudian adierazten dira. Jakinda emaitz hauek $kgmm^2$ -etan daudela, $I_B=1.3kgm^2$ izango da.

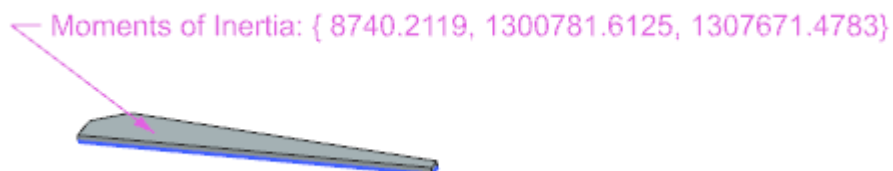


Fig 44 - NX softwareak kalkulaturako inerti momentua

- $\omega_{yaw,max}$: Orientazio abiadura maximoa \rightarrow Ekuaziotik lortu daiteke balio hau.

$$\omega_{yaw,min} = 3 - 0,01 \times (\pi R^2 - 2)$$

$$\omega_{yaw,max} = (\pi \times 1.43m - 2) = 2.97rad/s$$

Ek 17 - Orientazio abiadura maximoa

- $A_{proj,B}$: Alabearen azalera proiektatua
- $C_{l,max}$: Sustentazio koefiziente maximoa. Araudiaren arabera, sustentazio koefizienteari buruzko informazio fidagarririk ez badago, koefiziente honen balioa 2 dela kontsideratu behar da.
- C_T : Bultzada koefizientea. Araudiaren arabera, koefiziente honen balioa 0.5 da. Kontuan izan behar da, 2.5Vave-ko abiaduran funtzionatzen duten AS-etan 8/9-ko balioa hartzea aproposagoa dela
- $\omega_{n,max}$: Errotorearen biraketa abiadura maximoa. Informazioa eskuragarri ez dagoenez, biraketa abiadura nominala hartuko da, hau da, 600 rpm
- G : Sorgailuaren zirkuitulaburreko eta diseinu parearen arteko erlazioa. Araudiaren arabera, erlazio honen balioa 2 izango da, balio zehatzagorik aurkitu ezin izatekotan.
- M_{brake} : Balaztatze momentua da. Parametro honi buruzko informazioa ezin izan da aurkitu AS-ren fitxa teknikoan. Horregatik araudiak esaten duena jarraituz, pare ardatzean 2 balioa duen faktore batekin biderkatu behar da diseinu pare, hortaz $M_{brake} = 2Q_{design} = 52.8Nm$
- C_d : Arrastre-koefizientea: Araudiaren arabera koefiziente honen balioa 1.5 da
- C_f : Indar koefizientea. Geometriaren arabera Taula 15. taulatik atera behar da.
- γ : Materialaren dentsitatea. Altzairu estrukturalaren Instrukzioaren (EAE) VIII. Kapituluaren adierazten bezala, dentsitatearen balioa $7850kg/m^3$ hartu behar da.
- $m_{puntera}$: Punteraren masa. Punteraren masa kalkulatzeko Bornay fabrikatzailearen web orrian dagoen punteraren marrazki grafikoa ikusi behar da. Geometriaren sinplifikazio bat eginez suposatuko da puntera profil zilindriko bat dela eta honen dimentsioak Fig 11 Irudian ikusitako dimentsioak izanik, hau da 1300mm luze eta $\varnothing 85mm$ -ko kanpo diametroa izanik. Marrazki teknikoak adierazten den barne hutsuneko diametroa proportzionalki eskalatuz Fig 11-ko erudia jarraituz, barne hutsuneko diametroa 68mm-koa izango da. Hortaz, punteraren bolumena hurrengoa izango da.

$$V_{puntera} = \pi \times \frac{(D_{kanpo}^2 - D_{hutsune}^2)}{4} \times h = \pi \times \frac{(0.085m^2 - 0.068m^2)}{4} \times 1,3m = 0.00265m^3$$

$$m_{puntera} = \gamma \times V_{puntera} = 7850 \frac{kg}{m^3} \times 0.00265m^3 = 20.84kg$$

12.2.2 KARGA SINPLIFIKATUEN METODOAREN KALKULUA

- **A HIPOTESI KARGA:**

$$\Delta F_z = 2 \times m_B \times R_{cog} \times \omega_{n,design}^2 = 2 \times 3.4kg \times 0.715m \times \left(15.7 \frac{rad}{s}\right)^2 = 47.7N$$

$$\Delta M_{xB} = \frac{Q_{design}}{B} + 2 \times m_B \times R_{cog} \times g = \frac{26.4Nm}{2} + 2 \times 3.4kg \times 0.715m \times 9.81 \frac{m}{s^2} = 60.94Nm$$

$$\Delta M_{yB} = \frac{\lambda_{design} \times Q_{design}}{B} = \frac{3.65 \times 26.4Nm}{2} = 48.18Nm$$

$$\Delta F_{x-shaft} = \frac{3 \lambda_{design} \times Q_{design}}{2R} = \frac{3}{2} \times \frac{3.65 \times 26.4Nm}{1.43m} = 101.1N$$

$$\Delta M_{x-shaft} = Q_{design} + 2 \times m_r \times g \times e_r = 26.4m + 2 \times 24.5kg \times 0.00715m \times \frac{9.81m}{s^2} = 29.8Nm$$

$$\Delta M_{shaft} = 2 \times m_r \times g \times L_{rb} + \frac{R}{6} \times \Delta F_{x-shaft} = 2 \times 24.5kg \times \frac{9.81m}{s^2} \times 0.185m + \frac{1.43m}{6} \times 101.1N = 113Nm$$

- **B HIPOTESI KARGA**

$$M_{YB} = m_B \times \omega_{yaw,max}^2 \times L_{rt} \times R_{cog} + 2 \times \omega_{yaw,max} \times I_B \times \omega_{n,design} + \frac{R}{9} \times \Delta F_{x-shaft} = 3.4kg \times \left(2.97 \frac{rad}{s}\right)^2 \times 0.32m \times 0.715m + 2 \times 2.97 \frac{rad}{s} \times 1.3kgm^2 \times 15.7 \frac{rad}{s} + \frac{1.43m}{9} \times 101.1N = 144.16Nm$$

$$\begin{aligned}
 M_{shaft} &= 4 \times \omega_{yaw,max} \times I_B \times \omega_{n,design} + m_r \times g \times L_{rb} + \frac{R}{6} \times \Delta F_{x-shaft} \\
 &= 4 \times 2.97 \frac{rad}{s} \times 1.3kgm^2 \times 15.7 \frac{rad}{s} + 24.5kg \times 9.81 \frac{m}{s^2} \times 0.08m + \frac{1.43m}{6} \times 101.1N \\
 &= 285.8Nm
 \end{aligned}$$

- **C HIPOTESI KARGA**

$$\begin{aligned}
 M_{YB} &= \frac{1}{8} \times \rho \times A_{proj,B} \times C_{L,max} \times R^3 \times \omega_{n,design}^2 \times \left[1 + \frac{4}{3 \times \lambda_{design}} + \frac{1}{2} \times \left(\frac{1}{\lambda_{design}}\right)^2\right] \\
 &= \frac{1}{8} \times 1.225 \frac{kg}{m^3} \times 0.685m^2 \times 2 \times (1.43m)^3 \times \left(15.7 \frac{rad}{s}\right)^2 \times \left[1 + \frac{4}{3 \times 3.65} + \frac{1}{2} \times \left(\frac{1}{3.65}\right)^2\right] \\
 &= 212.1Nm
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{proj,B} &= \frac{1}{2} \times 1.155m \times (0.1974m - 0.515m) + 1.155m \times 0.545m + \frac{1}{2} \times 0.156m \times (0.1974m - 0.1134m) \\
 &\quad + 0.156m \times 0.1134m = 0.685m^2
 \end{aligned}$$

- **D HIPOTESI KARGA**

$$\begin{aligned}
 F_{x-shaft} &= C_T \times 0.5 \times \rho \times (2.5 \times V_{ave}) \times \pi \times R^2 = 0.5 \times 0.5 \times 1.225 \frac{kg}{m^3} \times \left(2.5 \times 4.4 \frac{m}{s}\right)^2 \times \pi \times (1.43m)^2 \\
 &= 238N
 \end{aligned}$$

- **E HIPOTESI KARGA**

$$F_{zB} = m_B \times R_{cog} \times \omega_{n,max}^2 = 3.4kg \times 0.715m \times \left(62.83 \frac{rad}{s}\right)^2 = 9597.2N$$

$$\begin{aligned}
 M_{shaft} &= m_r \times g \times L_{rb} + m_r \times e_r \times L_{rb} \times \omega_{n,max}^2 = 24.5kg \times 9.81 \frac{m}{s^2} \times 0.08m + 24.5kg \times 0.00715m \times \\
 &\quad 0.08m \times \left(62.83 \frac{rad}{s}\right)^2 = 74.5Nm
 \end{aligned}$$

F HIPOTESI KARGA

$$\begin{aligned}
 M_{x-shaft} &= G \times Q_{design} = 2 \times 26.4Nm = 52.8Nm \\
 M_{xB} &= \frac{M_{x-shaft}}{B} + m_B \times R_{cog} \times g = \frac{52.8Nm}{2} + 3.4kg \times 0.715m \times 9.81 \frac{m}{s^2} = 50.248Nm
 \end{aligned}$$

- **G HIPOTESI KARGA**

Informaziorik ez balaztatze momentuari buruz. Araudiaren arabera, balaztatze momentuaren informaziorik ez badago, bi aldiz momentua ardatzean dela kontsideratu behar da. Ondorioz, AS-an eragingo den karga F hipotesiaren karga berdina izango da.

• H HIPOTESI KARGA

Bornay Wind13+ AS-ak balaztatze sistema automatiko bat dauka haizearen abiadura 14m/s-etatik pasatzen denerako. Hori dela eta, abiadura extremoaren egoeran AS-a geldituta dagoela suposatuko da.

$$M_{YB} = C_d \times \frac{1}{4} \times \rho \times (V_{e50})^2 \times A_{proj,B} \times R = 1.5 \times \frac{1}{4} \times 1.225 \frac{kg}{m^3} \times \left(60 \frac{m}{s}\right)^2 \times 0.685m^2 \times 1.43m = 1620Nm$$

$$A_{proj,B} = \frac{1}{2} \times 1.155m \times (0.1974m - 0.515m) + 1.155m \times 0.545m + \frac{1}{2} \times 0.156m \times (0.1974m - 0.1134m) + 0.156m \times .01134m = 0.685m^2$$

$$F_{l,B} = C_{l,max} \times \frac{1}{2} \times \rho \times (V_{e50})^2 \times A_{proj,B} = 2 \times \frac{1}{2} \times 1.225 \frac{kg}{m^3} \times \left(60 \frac{m}{s}\right)^2 \times 0.685m^2 = 3020.5N$$

$$F_{x-shaft} = B \times C_d \times \frac{1}{2} \times \rho \times (V_{e50})^2 \times A_{proj,B} = 2 \times 1.5 \times \frac{1}{2} \times 1.225 \frac{kg}{m^3} \times \left(60 \frac{m}{s}\right)^2 \times 0.685m^2 = 4531N$$

$$F_{d-puntera} = C_f \times \frac{1}{2} \times \rho \times (V_{e50})^2 \times A_{proj,Puntera} = 1.3 \times \frac{1}{2} \times 1.225 \frac{kg}{m^3} \times \left(60 \frac{m}{s}\right)^2 \times 0.117m^2 = 335.4N$$

$$A_{proj,Puntera} = 1.377m \times 0.085m = 0.117m^2$$

$$F_{d-tower} = C_f \times \frac{1}{2} \times \rho \times (V_{e50})^2 \times A_{proj,Tower} = 0.7 \times \frac{1}{2} \times 1.225 \frac{kg}{m^3} \times \left(60 \frac{m}{s}\right)^2 \times 5.4m^2 = 8335N$$

$$A_{proj,Tower} = 6m \times 0.9m = 5.4m^2$$

$$F_{d-gondola} = C_f \times \frac{1}{2} \times \rho \times (V_{e50})^2 \times A_{proj,Gondola} = 0.7 \times \frac{1}{2} \times 1.225 \frac{kg}{m^3} \times \left(60 \frac{m}{s}\right)^2 \times 0.0406m^2 = 62.6N$$

$$A_{proj,Gondola} = \pi \times \frac{(0.211m)^2}{4} = 0.0406m^2$$

$$F_{d-Lema} = C_f \times \frac{1}{2} \times \rho \times (V_{ref})^2 \times A_{proj,Lema} = 1.5 \times \frac{1}{2} \times 1.225 \frac{kg}{m^3} \times \left(60 \frac{m}{s}\right)^2 \times 0.0131m^2 = 43.33N$$

$$A_{proj,Lema} = \frac{1}{2} \times 0.07m \times (0.41m - 0.033m) = 0.0131m^2$$

• I HIPOTESI KARGA

- Aurretiko haizea

$$F_{d-tower} = C_f \times \frac{1}{2} \times \rho \times (V_{ref})^2 \times A_{proj,Tower} = 0.7 \times \frac{1}{2} \times 1.225 \frac{kg}{m^3} \times \left(6.16 \frac{m}{s}\right)^2 \times 5.4m^2 = 333.4N$$

$$A_{proj,Tower} = 6m \times 0.9m = 5.4m^2$$

$$F_{dB} = C_f \times \frac{1}{2} \times \rho \times (V_{ref})^2 \times A_{proj} = 2 \times \frac{1}{2} \times 1.225 \frac{kg}{m^3} \times \left(6.16 \frac{m}{s}\right)^2 \times 0.685m^2 = 120N$$

$$F_{l,B} = C_{l,max} \times \frac{1}{2} \times \rho \times (V_{ref})^2 \times A_{proj,B} = 2 \times \frac{1}{2} \times 1.225 \frac{kg}{m^3} \times \left(6.16 \frac{m}{s}\right)^2 \times 0.685m^2 = 120N$$

$$A_{proj,B} = \frac{1}{2} \times 1.155m \times (0.1974m - 0.515m) + 1.155m \times 0.545m + \frac{1}{2} \times 0.156m \times (0.1974m - 0.1134m) + 0.156m \times .01134m = 0.685m^2$$

$$F_{d-gondola} = C_f \times \frac{1}{2} \times \rho \times (V_{ref})^2 \times A_{proj,Gondola} = 0.7 \times \frac{1}{2} \times 1.225 \frac{kg}{m^3} \times \left(6.16 \frac{m}{s}\right)^2 \times 0.0406m^2 = 2.54N$$

$$A_{proj,Gondola} = \pi \times \frac{(0.211m)^2}{4} = 0.0406m^2$$

$$F_{d-puntera} = C_f \times \frac{1}{2} \times \rho \times (V_{ref})^2 \times A_{proj,Puntera} = 1.3 \times \frac{1}{2} \times 1.225 \frac{kg}{m^3} \times \left(6.16 \frac{m}{s}\right)^2 \times 0.117m^2 = 13.415N$$

$$A_{proj,Puntera} = 1.377m \times 0.085m = 0.117 m^2$$

$$F_{d-Lema} = C_f \times \frac{1}{2} \times \rho \times (V_{ref})^2 \times A_{proj,Lema} = 1.5 \times \frac{1}{2} \times 1.225 \frac{kg}{m^3} \times \left(6.16 \frac{m}{s}\right)^2 \times 0.0131m^2 = 1.73N$$

$$A_{proj,Lema} = \frac{1}{2} \times 0.07m \times (0.41m - 0.033m) = 0.0131m^2$$

- Albotiko haizea

$$F_{d-tower} = C_f \times \frac{1}{2} \times \rho \times (V_{ref})^2 \times A_{proj,Tower} = 0.7 \times \frac{1}{2} \times 1.225 \frac{kg}{m^3} \times \left(6.16 \frac{m}{s}\right)^2 \times 5.4m^2 = 333.4N$$

$$A_{proj,Tower} = 6m \times 0.9m = 5.4m^2$$

$$F_{dB} = C_f \times \frac{1}{2} \times \rho \times (V_{ref})^2 \times A_{proj,B} = 2 \times \frac{1}{2} \times 1.225 \frac{kg}{m^3} \times \left(6.16 \frac{m}{s}\right)^2 \times 0.282m^2 = 49.75N$$

$$F_{l,B} = C_{l,max} \times \frac{1}{2} \times \rho \times (V_{ref})^2 \times A_{proj,B} = 2 \times \frac{1}{2} \times 1.225 \frac{kg}{m^3} \times \left(6.16 \frac{m}{s}\right)^2 \times 0.282m^2 = 49.75N$$

$$A_{proj,B} = 1.155m \times 0.0245m = 0.0282m^2$$

$$F_{d-gondola} = C_f \times \frac{1}{2} \times \rho \times (V_{ref})^2 \times A_{proj,Gondola} = 1.5 \times \frac{1}{2} \times 1.225 \frac{kg}{m^3} \times \left(6.16 \frac{m}{s}\right)^2 \times 0.0902m^2 = 11.93N$$

$$A_{proj,Gondola} = \frac{1}{2} \times \pi \times \frac{(0.211m)^2}{4} + 0.2275m \times 0.32m = 0.0902m^2$$

$$F_{d-puntera} = C_f \times \frac{1}{2} \times \rho \times (V_{ref})^2 \times A_{proj,Puntera} = 1.3 \times \frac{1}{2} \times 1.225 \frac{kg}{m^3} \times \left(6.16 \frac{m}{s}\right)^2 \times 0.117 m^2 = 13.41N$$

$$A_{proj,puntera} = 1.377m \times 0.085m = 0.117 m^2$$

$$F_{d-Lema} = C_f \times \frac{1}{2} \times \rho \times (V_{ref})^2 \times A_{proj,Lema} = 1.5 \times \frac{1}{2} \times 1.225 \frac{kg}{m^3} \times \left(6.16 \frac{m}{s}\right)^2 \times 0.261m^2 = 34.5N$$

$$A_{proj,Lema} = \frac{1}{2} \times 0.41m \times (0.427m - 0.226m) + 0.41m \times 0.427m = 0.261m^2$$

$$F_{d-Buztan} = C_f \times \frac{1}{2} \times \rho \times (V_{ref})^2 \times A_{proj,Buztan} = 1.3 \times \frac{1}{2} \times 1.225 \frac{kg}{m^3} \times \left(6.16 \frac{m}{s}\right)^2 \times 0.032m^2 = 3.7N$$

$$A_{proj,Lema} = 0.033m \times 0.963m = 0.032m^2$$

12.2.3 INDARREN TRASLAZIOA DORREAREN PUNTARA

Dorrearen diseinua elementu finituen bidezko simulazioekin egin aurretik, haizeak eragindako kargak hipotesi ezberdinetan dorrearen puntara trasladatu behar dira. Hau barra egitura sinplifikatu baten bidez egingo da. Fig 45a Irudian, AS-ren eta punteraren barra eredu sinplifikatua adierazten da, eskema horren gainean indarrak adieraziko dira. Indarrak alabeen erreferentzia sistemaren arabera izendatuko dira, aipatutako irudian ikusten den bezala. Ondoren, dorrearen puntan egongo diren indar erresultanteak, dorrearen erreferentzi sisteman deskonposatuko dira.

Eredua sinplifikatzeko asmoz, konponenteen indarrak honen zentruan aplikatuta daudela suposatuko da. Hortaz, kargak traspasatzerako orduan hurrengo distantziak erabiliko dira Fig 45b Irudiko modeloaren dimentsioak kontsideratuz: $L_{lema}=0.205\text{m}$, $L_{gondola}=0.32\text{m}$, $L_{buztan}=1.425\text{m}$, $L_{GZ}=0.16\text{m}$ eta $L_{puntera}=1.377\text{m}$.

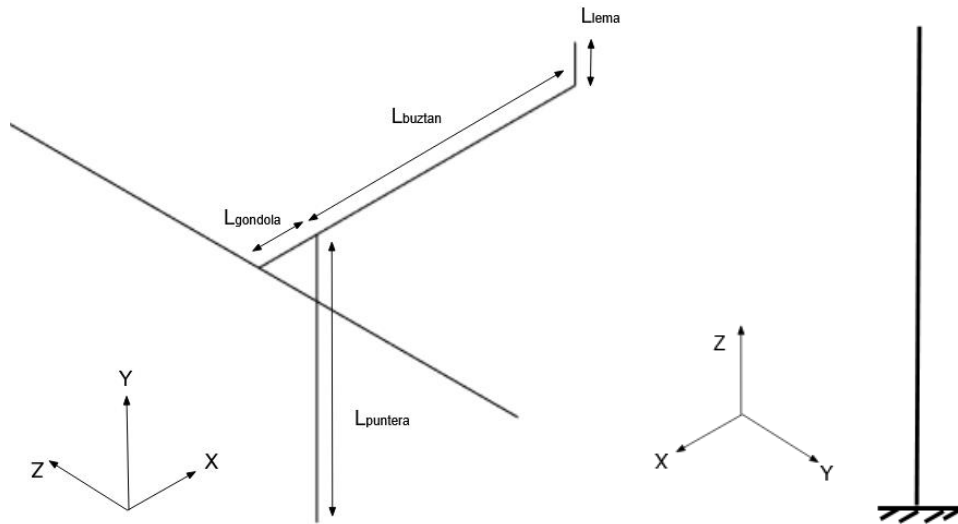


Fig 45 - a) AS-aren erreferentzi sistema eta barra modelo baliokidea b) Dorrearen erreferentzi sistema

- A,B,C,D,E,F,G HIPOTESIAK**

Hipotesi hauen kasuan, indarrak hurrengo irudiaren arabera egongo dira kokatuta. Kargek sortzen duten momentuak kontuan hartuz trasladatuko dira dorrearen puntara.

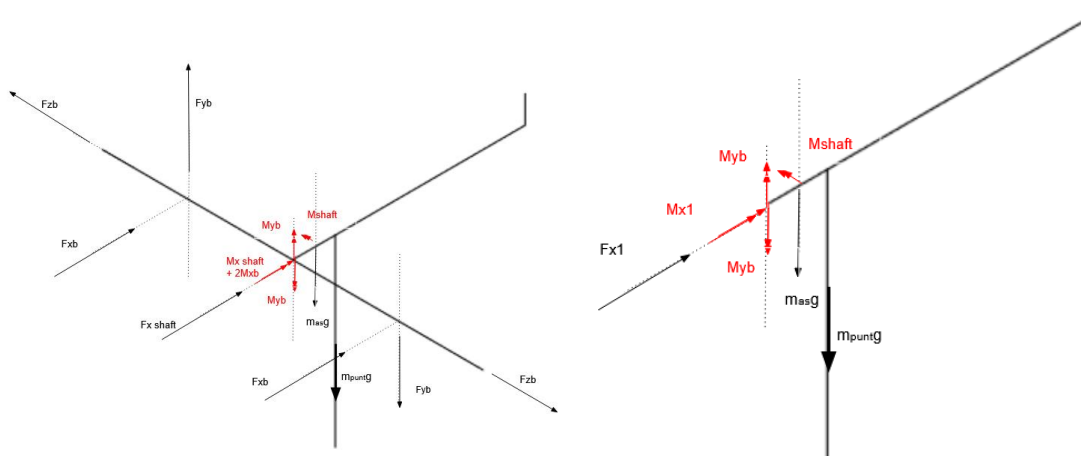


Fig 46 - ABCDFG hipotesien kargak: a) Hasieran b) Lehenengo translazioan

1. egoeran indarrek hurrengo balioak izango dute.

$$F_{x1} = F_{x,shaft} + 2 \times F_{x,B}$$

$$M_{x1} = M_{x,shaft} + 2 \times M_{x,B}$$

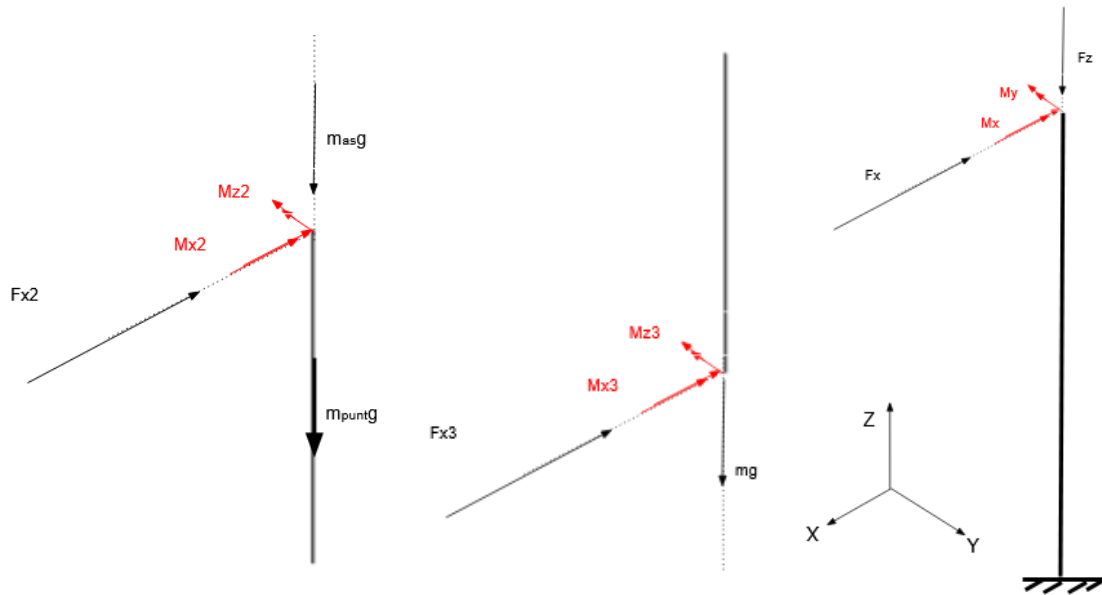


Fig 47 - ABCDFG hipotesien kargak: a)2.translazioan b)3. translazioan c)Dorrearen puntan

2.Egoeran:

$$\begin{aligned}
 F_{x2} &= F_{x,1} \\
 M_{x,2} &= M_{x,1} \\
 M_{z,2} &= M_{shaft} - m_{as} \times g \times L_{GZ}
 \end{aligned}$$

3.Egoeran:

$$\begin{aligned}
 F_{x3} &= F_{x,2} = F_{x,1} \\
 M_{x,2} &= M_{x,1} \\
 M_{z,3} &= M_{z,2} - F_{x,2} \times L_{puntera}
 \end{aligned}$$

Indarrak dorrearen erreferentzia sisteman:

$$\begin{aligned}
 F_x &= F_{x,shaft} + 2 \times F_{x,B} \\
 F_z &= m_{as} \times g + m_{puntera} \times g \\
 M_x &= M_{x,shaft} + 2 \times M_{x,B} \\
 M_y &= M_{shaft} - m_{as} \times g \times L_{GZ} - (F_{x,shaft} + 2 \times F_{x,B}) \times L_{puntera}
 \end{aligned}$$

- H Hipotesia

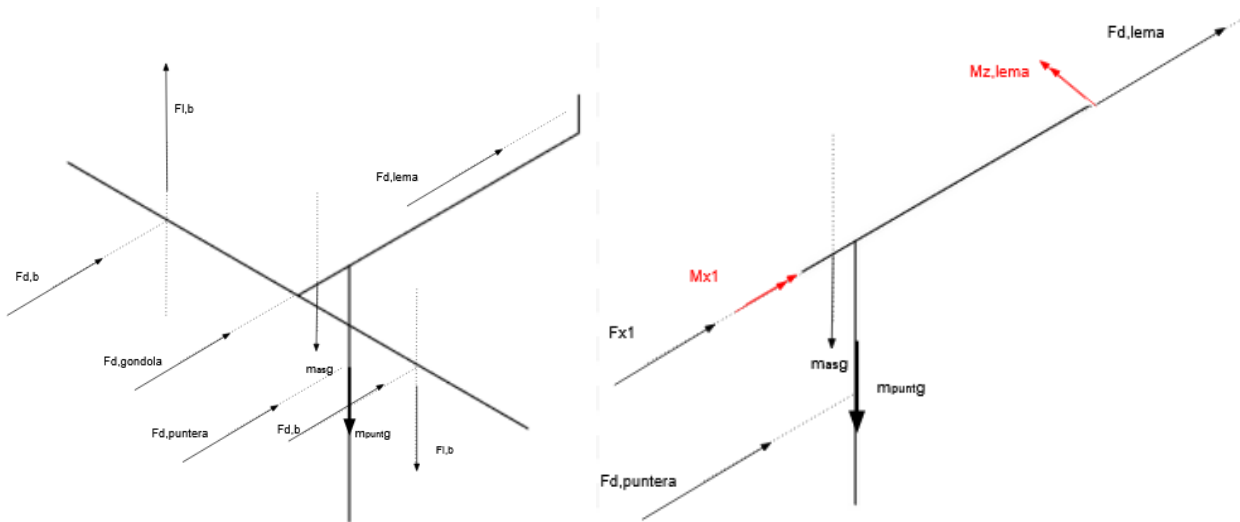


Fig 48 - H hipotesiaren kargak: a)Hasieran b)1. Translazioan

1. egoeran:

$$F_{x,1} = F_{d,gondola} + 2 \times F_{d,B}$$

$$M_{x,1} = 2 \times F_{l,B} \times \frac{R}{2}$$

$$M_{z,Lema} = F_{d,Lema} \times L_{lema}$$

2. egoeran:

$$F_{x,2} = F_{x,1} + F_{d,Lema}$$

$$M_{x,2} = M_{x,1}$$

$$M_{z,2} = m_{as} \times g \times L_{GZ} + M_{z,lema}$$

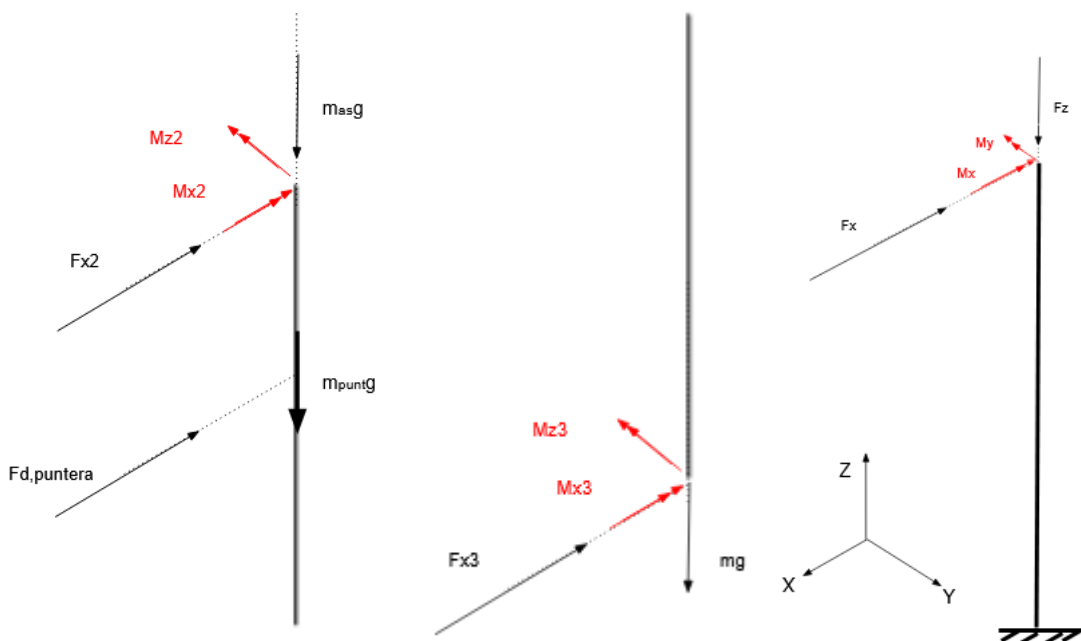


Fig 49 - H hipotesiaren kargak: a)2.translazioan b)3. translazioan c)Dorrearen puntan

3. Egoeran:

$$F_{x,3} = F_{x,2} + F_{d,puntera} = F_{x,1} + F_{d,Lema} + F_{d,puntera}$$

$$M_{x,2} = M_{x,1}$$

$$M_{z,3} = M_{z,2} - F_{x,2} \times L_{puntera} - F_{d,puntera} \times \frac{L_{puntera}}{2}$$

Indarrak dorrearen erreferentzia sisteman:

$$F_x = F_{d,gondola} + 2 \times F_{x,B} + F_{d,Lema} + F_{d,puntera}$$

$$F_z = m_{as} \times g + m_{puntera} \times g$$

$$M_x = 2 \times F_{l,B} \times \frac{R}{2}$$

$$M_y = m_{as} \times g \times L_{GZ} + F_{d,Lema} \times L_{lema} - \left(F_{d,gondola} + 2 \times F_{d,B} + F_{d,Lema} + \frac{F_{d,puntera}}{2} \right) \times L_{puntera}$$

- I HIPOTESIA

- Aurretik: H-ren egoera berdina denez indarren translazioa berdina izango da.

- Albotik:

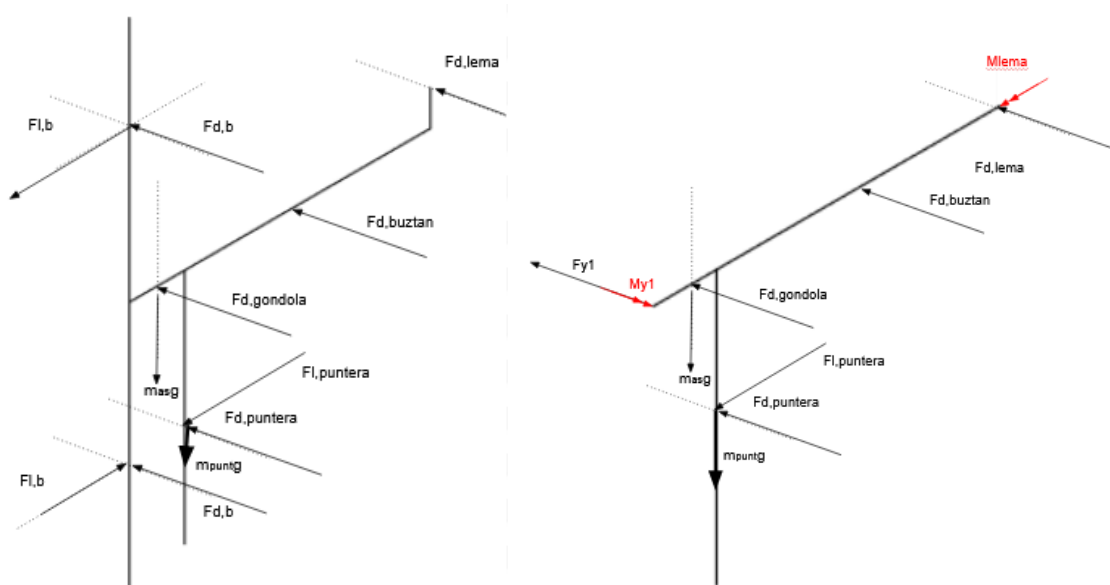


Fig 50 - I alboko hipotesiaren kargak: a)Hasieran b)1. translazioan

1. egoeran indarrek hurrengo balioak izango dute.

$$F_{y,1} = 2 \times F_{d,B}$$

$$M_{y,1} = 2 \times F_{l,B} \times \frac{R}{2}$$

$$M_{Lema} = F_{d,Lema} \times L_{Lema}$$

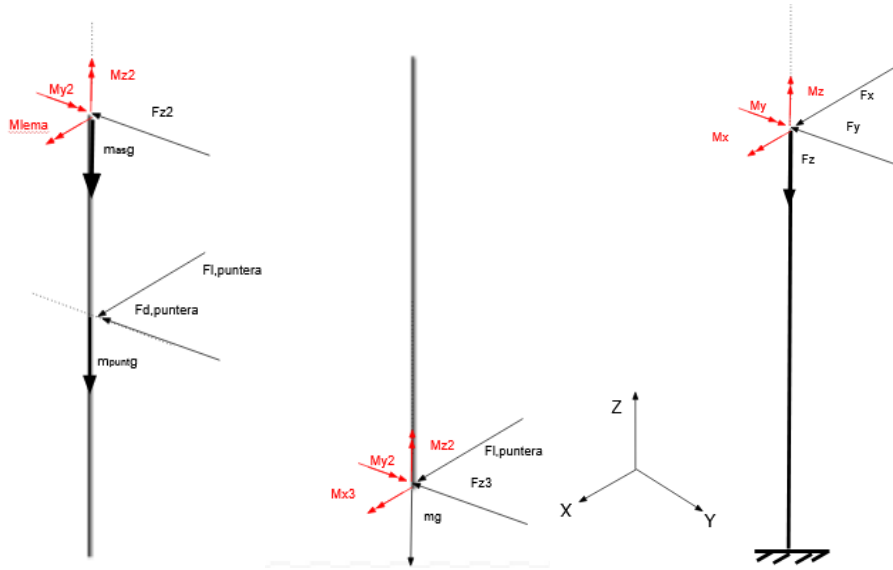


Fig 51 - I alboko hipotesiaren kargak: a)2.translazioan b)3. translazioan c)Dorrearen puntan

2.Egoeran:

$$F_{y,2} = F_{y,1} + F_{d,gondola} + F_{d,Lema} + F_{d,Buztan}$$

$$M_{x,2} = M_{Lema}$$

$$M_{y,2} = M_{y,1} + m_{as} \times g \times L_{GZ}$$

$$M_{z,2} = F_{d,Lema} \times L_{buztan} + F_{d,buztan} \times \frac{L_{buztan}}{2} - F_{y,1} \times L_{gondola} - F_{d,gondola} \times \frac{L_{GZ}}{2}$$

3.Egoeran:

$$F_{y,3} = F_{y,2} + F_{d,puntera}$$

$$M_{x,3} = M_{x,2} + F_{d,gondola} \times \frac{L_{puntera}}{2}$$

$$M_{y,3} = M_{y,2} + F_{l,puntera} \times \frac{L_{puntera}}{2}$$

$$M_{z,3} = M_{z,2}$$

Indarrak dorrearen erreferentzia sisteman:

$$F_x = F_{l,puntera}$$

$$F_y = F_{d,gondola} + 2 \times F_{d,B} + F_{d,Lema} + F_{d,puntera} + F_{d,Buztan}$$

$$F_z = m_{as} \times g + m_{puntera} \times g$$

$$M_x = F_{d,Lema} \times L_{lema} + F_{d,gondola} \times \frac{L_{GZ}}{2}$$

$$M_y = 2 \times F_{l,B} \times \frac{R}{2} + m_{as} \times g \times L_{GZ} + F_{l,puntera} \times \frac{L_{puntera}}{2}$$

$$M_z = F_{d,Lema} \times L_{buztan} + F_{d,buztan} \times \frac{L_{buztan}}{2} - 2 \times F_{d,B} \times L_{gondola} - F_{d,gondola} \times \frac{L_{puntera}}{2}$$

12.2.4 DORREAREN GAINEKO KARGEN EMAITZAK

Ekuazio sinplifikatuak ebazteko beharrezkoak diren parametro guztiak determinatu ondoren indarren kalkulia egin da. Kargen emaitzak Taula 16. taulan adierazten dira. Indar horien eragina dorrearen puntan transladatuta 12.2.3 puntuan ikusitako ekuazioekin, indar erresultanteak dorrearen puntan Taula 17. taulan ikusi daitezke.

Taula 16 - Ekuazio sinplifikatuaren emaitzak

	$F_{x,B}$ (N)	$F_{y,B}$ (N)	$F_{z,B}$ (N)	$F_{x-shaft}$ (N)	$M_{x,B}$ (Nm)	$M_{y,B}$ (Nm)	$M_{x-shaft}$ (Nm)	$M_{y-shaft}$ (Nm)
A			47,7	101,1	60,94	48,18	29,8	113
B						144,16		285,8
C						212,1		
D				238				
E			9597,2				74,5	
F					50,148		52,6	
G					50,148		52,6	

	$M_{y,b}$ (Nm)	$F_{l,b}$ (N)	$F_{x-shaft}$ (N)	$F_{d,gondola}$ (N)	$F_{d,dorrea}$ (N)	$F_{d,puntera}$ (N)	$M_{x-shaft}$ (Nm)	$M_{y-shaft}$ (Nm)
H	1620	3020,5	4531	62,6	8335	335,4		

	$F_{d,B}$ (N)	$F_{d,gondola}$ (N)	$F_{d,dorrea}$ (N)	$F_{d,puntera}$ (N)	$F_{d,Lema}$ (N)	$F_{d,Buztan}$ (N)
I Aurretik	120	120	2,54	259,3	13,415	
I Albotik	49,75	120	11,93	333,4	13,415	3,7

Taula 17 - Karga erresultanteak dorrearen puntan

HIPOTESIA	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	M_x (Nm)	M_y (Nm)	M_z (Nm)
A	101,10		871,52	151,68	6,27	
B	0,00		871,52	0,00	179,07	
C	0,00		871,52	0,00	-106,73	
D	238,00		871,52	0,00	-106,73	
E	0,00		871,52	74,50	-106,73	
F	0,00		871,52	152,90	-106,73	
G	0,00		871,52	152,90	-106,73	
H	4929,00		871,52	4224,48	-6440,69	
I: Aurretik	0,00		871,52	0,00	-32,44	
I: Albotik	13,42	159,35	871,52	8,03	180,84	10,96