

Grau en Enginyeria Mecànica

**Disseny d'una turbina eòlica pel subministrament energètic d'un poble
petit**

Memòria final

Raúl González López

PONENT: Klara Vekony

PRIMAVERA 2023

Resum

En aquest projecte es dissenya una turbina eòlica per al subministrament energètic d'un poble petit. On es fa una recerca de les condicions òptimes d'instal·lació de la turbina eòlica i les demandes energètiques d'un poble d'uns 2.000 habitants. Es realitza el dimensionament aplicant la teoria esmentada sobre fonaments aerodinàmics i mecànica de fluids, el disseny de les aspes i l'estructura de la turbina eòlica mitjançant el programa QBlade. Per posteriorment fer les comprovacions i validacions del projecte analitzant les gràfiques obtingudes.

Resumen

En este proyecto se diseña una turbina eólica para el suministro energético de un pequeño pueblo. Donde se realiza una búsqueda de las condiciones óptimas de instalación de la turbina eólica y las demandas energéticas de un pueblo de unos 2.000 habitantes. Se realiza el dimensionamiento aplicando la teoría expuesta sobre fundamentos aerodinámicos y mecánica de fluidos, el diseño de las aspas y la estructura de la turbina eólica mediante el programa QBlade. Para posteriormente realizar las comprobaciones y validaciones del proyecto analizando las gráficas obtenidas.

Abstract

In this project, a wind turbine is designed for the energy supply of a small town. Where a search is made for the optimal installation conditions of the wind turbine and the energy demands of a town of about 2,000 inhabitants. The dimensioning is carried out applying the exposed theory on aerodynamic fundamentals and fluid mechanics, the design of the blades and the structure of the wind turbine through the QBlade program. To later carry out the checks and validations of the project by analyzing the graphs obtained.

Índex.

Índex de figures.....	V
Índex de taules.....	VII
Glossari de termes.	IX
1. Objectius.	1
1.1. Propòsit.....	1
1.2. Finalitat.....	1
1.3. Objecte.....	1
1.4. Abast.....	1
1.5. Context en les línies de recerca i transferència de coneixement del Tecnocampus. ...	1
2. Introducció a la producció d'electricitat mitjançant aerogeneradors	3
2.1. Antecedents	3
2.2. Tipus de turbines eòliques	5
2.2.1 Turbines eòliques d'eix horitzontal	5
2.2.2 Turbines eòliques d'eix vertical.....	6
2.3. Components d'un aerogenerador d'eix horitzontal	8
2.3.1 Rotor	8
2.3.2 Naveta	9
2.3.3 Torre.....	9
2.3.4 Fonaments	9
2.4. Normativa, patents i propietat intel·lectual	10
3. Fonaments aerodinàmics i mecànica de fluids	11
3.1. Càlcul de potència en turbines eòliques	11
3.1.1 Teoria del disc actuator	12
3.1.2 Model de Betz	13
3.2. Forces aerodinàmiques en les aspes	15
3.3. Mètode BEM: 'Blade Element Momentum'	19
4. Objectius i especificacions tècniques.....	21
5. Estudi i selecció de les condicions òptimes d'instal·lació.....	23
5.1. Anàlisi de l'impacte de diferents velocitats del vent en el rendiment d'una turbina eòlica	23

5.2. Anàlisi de les necessitats energètiques d'un poble petit d'uns 2000 habitants	23
5.3. Recerca d'un poble per instal·lar la turbina eòlica	25
6. Dimensionament de la turbina eòlica.....	31
6.1 Càlculs preliminars del disseny d'una turbina eòlica	31
6.1.1 Velocitat nominal i potència nominal	31
6.1.2 Velocitat específica λ	34
6.1.3 Coeficient de potència.....	35
6.1.4 Àrea i diàmetre del rotor	36
6.1.5 Àrea i diàmetre del rotor en hivern i estiu	36
6.1.6 Velocitat de rotació del rotor	38
6.1.7 Parell desenvolupat al motor.....	38
6.1.8 Àrea mínima d'una aspa	39
6.1.9 Massa d'una aspa	40
6.1.10 Corba de potència	41
6.1.11 Comprovació de les característiques de l'aerogenerador	42
6.1.12 Selecció alternador òptim	43
6.2 Especificacions de l'aerogenerador	44
6.3 Selecció del perfil Alar òptim.....	45
6.3.1 NACA 0012	46
6.3.2 NACA 4412	46
6.3.3 NACA 2412	47
7. Disseny de les aspes i de l'estructura de la turbina eòlica.....	49
7.1 Disseny de l'aspa	53
7.2 Disseny de l'estructura	54
7.3 Disseny del camp de vent	56
8. Simulacions numèriques per verificar els resultats	59
8.1 Simulació BEM del rotor.....	59
8.2 Simulació BEM de múltiples característiques.....	61
8.4 Simulació de la turbina eòlica	64
8.5 Simulació tensió	66
8.6 Simulació soroll.....	68
9. Anàlisi del producte final.....	69

10. Perspectiva de gènere.....	71
11. Impacte mediambiental.....	73
12. Planificació	77
13. Conclusions	81
14. Referències.	83

Índex de figures.

Fig. 2.1: Efecte Coriolis [1].....	4
Fig. 2.2: Weibull [2].....	4
Fig. 2.3: Turbina eòlica d'eix horitzontal [5].....	6
Fig. 2.4: Rotor Darrieus i Rotor Savonius [5].....	7
Fig. 2.5: Components d'un aerogenerador d'eix horitzontal [6].....	8
Fig. 3.1: Flux d'aire a través del disc actuator [8].....	12
Fig. 3.2: Funció de densitat de potència, eix X:m/s eix Y: W/m ² [9].....	15
Fig. 3.3: Parts d'un perfil alar [11].....	16
Fig. 3.4: Perfil asimètric i efecte Magnus [14].....	16
Fig. 3.5: Conceptes i variables en una pala [16].....	18
Fig. 5.1: Gràfica del consum elèctric mensual.....	24
Fig. 5.2: Mapa eòlic de Europa occidental [20].....	25
Fig. 5.3: Energies renovables en Aragó [21].....	26
Fig. 5.4: Velocitat mitjana en Alfamén [22].....	27
Fig. 5.5: Direcció del vent en Alfamén [22].....	27
Fig. 5.6: Velocitat mitjana en Belchite [22].....	28
Fig. 5.7: Direcció del vent en Belchite [22].....	28
Fig. 5.8: Velocitat mitjana en Albalate del Arzobispo [22].....	29
Fig. 5.9: Direcció del vent en Albalate del Arzobispo [22].....	29
Fig. 5.10: Ubicació per satèl·lit de l'aerogenerador [29].....	30
Fig. 5.11: Mapa del relleu [29].....	30
Fig. 6.1: Potència nominal segons el diàmetre del rotor [30].....	31
Fig. 6.2: Evolució de la velocitat del vent segons l'altura.....	32
Fig. 6.3: Distribució de Weibull.....	33
Fig. 6.4: Geometria de l'aspa segons la velocitat específica [33].....	34
Fig. 6.5: Valors de Cp segons tipus d'aerogeneradors [33].....	35
Fig. 6.6: Coeficient de potència per aerogeneradors ràpids [33].....	35
Fig. 6.7: Coeficient del parell per turbines eòliques ràpides (esquerra) i lentes (dreta) [33]...	38
Fig. 6.8: Relació entre el factor de solidesa i la velocitat específica [33].....	39
Fig. 6.9: Massa d'una aspa en funció el radi del rotor [33].....	40
Fig. 6.10: Potència generada segons la velocitat del vent.....	41
Fig. 6.11: Àbac de màquines eòliques ràpides[33].....	42
Fig. 6.12: Relació entre coeficients de lift & drag i angle d'atac en la NACA 0012 [34].....	46
Fig. 6.13: Relació entre coeficients de lift & drag i angle d'atac en la NACA 4412 [34].....	46
Fig. 6.14: Relació entre coeficients de lift & drag i angle d'atac en la NACA 2412 [34].....	47
Fig. 6.15: Comparativa dels perfils alars.....	47
Fig. 6.16: Paràmetres Simulació de la Pressió Dinàmica.....	48
Fig. 6.17: Simulació de la Pressió Dinàmica en la NACA4412.....	48
Fig. 7.1: Paràmetres d'una aspa [37].....	49
Fig. 7.2: Diagrama de Blocs càlculs Qblade [37].....	50

Fig. 7.3: Paràmetres per optimitzar	53
Fig. 7.4: Model 3D del rotor i aspes.....	54
Fig. 7.5: Model 3D de la turbina eòlica.....	55
Fig. 7.6: Paràmetres de l'estructura de la Turbina	56
Fig. 7.7: Paràmetres del camp de vent	57
Fig. 7.8: Model 3D del camp de vent	57
Fig. 7.9: Model 3D del camp de vent en l'estiu.....	58
Fig. 7.10: Model 3D del camp de vent en l'hivern	58
Fig. 8.1: Paràmetres simulació BEM	59
Fig. 8.2: Coeficient de potència envers TSR.....	59
Fig. 8.3: Coeficient d'empenta envers TSR.....	60
Fig. 8.4: Potència envers TSR.....	60
Fig. 8.5: Parell motor envers TSR.....	61
Fig. 8.6: Potència generada segons la velocitat del vent amb diferents velocitats de gir	62
Fig. 8.7: Empenta generada segons la velocitat del vent amb diferents velocitats de gir	63
Fig. 8.8: Parell generat segons la velocitat del vent amb diferents velocitats de gir.....	63
Fig. 8.9: Paràmetres de la simulació final	64
Fig. 8.10: Model 3D de la simulació final.....	64
Fig. 8.11: Potència generada en diversos casos	65
Fig. 8.12: Velocitat del vent en diversos casos	66
Fig. 8.13: Paràmetres de la simulació de tensió	66
Fig. 8.14: Càrregues en una aspa.....	67
Fig. 8.15: Simulació de Von Mises	67
Fig. 8.16: Paràmetres de la simulació de Soroll.....	68
Fig. 8.17: Simulació del Soroll.....	68
Fig. 9.1: Geometria final turbina eòlica	69
Fig. 9.2: Rotor turbina eòlica	69
Fig. 9.3: Potencia nominal envers velocitat del vent.....	70
Fig. 11.1: Nivells acústics en dB.....	73
Fig. 12.1: Planificació de les activitats del projecte	78
Fig. 12.2: Diagrama de Gantt del projecte	79
Fig. 12.3: Planificació de les activitats del projecte amb desviacions	80
Fig. 12.4: Diagrama de Gantt del projecte amb desviacions.....	80

Índex de taules.

Taula 6.1: Especificacions de l'aerogenerador	44
Taula 6.2 Especificacions de les NACA	47
Taula 7.1: Chord i Twist dels segments de l'aspa	53
Taula 9.1: Valors finals	70
Taula 9.2: Costos d'inversió	70
Taula 12.1: Planificació de les activitats i la seva duració	77

Glossari de termes.

A	Àrea de secció transversal	[m]
a	Factor d'inducció axial	[-]
a'	Factor d'inducció tangencial	[-]
B	Nombre de pales	[-]
CP	Coefficient de potència	[-]
CT	Coefficient d'empenta	[-]
CL	Coefficient de sustentació	[-]
CM	Coefficient de moment	[-]
CN	Coefficient normal	[-]
CT	Coefficient tangencial	[-]
Lc	Corda	[m]
Q	Parell	[Nm]
G	Acceleració de la gravetat	[m/s ²]
K	Factor de forma Weibull	[-]
mB	Massa de l'aspa	[kg]
P	Potència	[W]
R	Radi	[m]
Ri	Posició radial	[m]
T	Força d'Empenta	[N]
Vm	Velocitat mitjana del vent	[m/s]
Vn	Velocitat nominal	[m/s]

X

α	Angle d'atac	[°]
β	Angle de torsió	[°]
θ	Angle de pitch o pas	[rad]
θ_T	Angle de torsió	[rad]
λ	Velocitat específica en la punta aspa	[-]
μ	Viscositat	[kg/ms]
ν	Viscositat cinemàtica	[m ² /s]
ρ	Densitat de l'aire	[kg/m ³]
σ	Solidesa	[-]
ϕ	Angle de flux	[rad]
Γ	Funció Gamma	[-]

1. Objectius.

1.1. Propòsit.

Garantir el subministrament energètic d'un poble petit mitjançant una font d'energia renovable i sostenible.

1.2. Finalitat.

Dissenyar una turbina eòlica que produirà l'energia necessària per al poble seleccionat amb la metodologia necessària per fer-ho.

1.3. Objecte.

Cercar un lloc òptim per la instal·lació d'una turbina eòlica per al subministrament energètic d'un poble i el posterior disseny aerodinàmic de la turbina eòlica, mitjançant la selecció del perfil alar òptim i l'ús del software de simulació QBlade.

1.4. Abast.

S'especifica la metodologia i el desenvolupament per la realització d'una turbina eòlica que pugui subministrar un poble de 2.000 habitants. Obtenint les característiques més importants de l'aerogenerador juntament amb un model 3D d'aquest. No es realitza la part estructural, la part electrònica i de control de l'aerogenerador. Recopilant el treball en una memòria final, l'estudi econòmic, els plànols i els annexos.

1.5. Context en les línies de recerca i transferència de coneixement del Tecnocampus.

La temàtica i el camp de treball del present projecte engloba diverses àrees de coneixement que es poden trobar dins del Grau en Enginyeria Mecànica, concretament en assignatures com Enginyeria de Fluids o Enginyeria Tèrmica i Sostenibilitat. Per tant, l'elaboració del projecte, fomenta el pensament i la utilització dels recursos i habilitats, tant teòrics com pràctics, apresos durant el Grau.

2. Introducció a la producció d'electricitat mitjançant aerogeneradors

Les turbines eòliques o aerogeneradors són màquines que amb la velocitat del vent, fent girar un rotor, transformen l'energia mecànica en energia elèctrica.

2.1. Antecedents

La utilització del vent per la producció d'energia és una pràctica que la humanitat va implantar fa milers d'anys, al principi amb molins de vent per moldre el gra i avui en dia amb aerogeneradors per la producció d'energia elèctrica.

Aquesta tecnologia va perdre el protagonisme amb l'entrada de la màquina de vapor i els combustibles fòssils, sent més productius i rentables. Però el paradigma actual està canviant, amb els problemes de contaminació i canvi climàtic, les energies renovables, com l'energia eòlica, estan adquirint protagonisme de nou amb aerogeneradors que poden ajudar a reduir la dependència d'energies contaminants i no renovables. Degut a que cada vegada són més sofisticats i eficients, gràcies a la implantació de nous materials i avenços en aerodinàmica per físics com Albert Betz.

Una turbina pot produir energia amb el moviment d'un fluid (vent o aigua) transformant l'energia cinètica i potencial en energia cinètica rotacional que aquesta mateixa es transforma en energia elèctrica. Per generar energia a través d'una turbina eòlica, s'obté a partir de l'energia cinètica produïda pel vent per els efectes dels corrents d'aire. Amb aquesta energia rotacional es transfereix de la turbina a l'alternador on aquest genera l'energia elèctrica.

El fluid utilitzat en una turbina eòlica és el vent, que és una gran massa d'aire que es mou en l'atmosfera, aquest fenomen és a causa de la diferència de pressió atmosfèrica entre dos punts geogràfics.

El vent és un fluid compost per aire que aquest mateix és un gas, per tant, la pressió d'un gas varia amb la temperatura. Les zones més properes als pols són les més fredes degut que tenen menor incidència dels raigs solars, llavors la densitat de l'aire és major i també la pressió atmosfèrica, en el cas oposat com més a prop de a l'equador hi ha una temperatura més alta per tant, la densitat de l'aire i la pressió atmosfèrica són inferiors. En conseqüència, els corrents d'aire calent tendeixen a elevar-se recorrent l'atmosfera, on en arribar als pols es barregen amb

les masses d'aire fred i per tant tornen a l'equador. En el moviment de les masses d'aire es veuen afectades per l'efecte Coriolis. Tot i això, el moviment del vent depèn de diversos factors sent incert el seu comportament. En la següent imatge es poden observar els diferents corrents dels vents. [1]

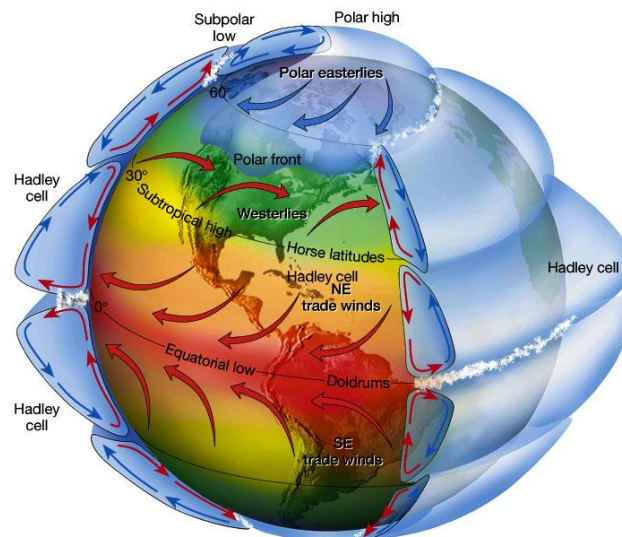


Fig. 2.1: Efecte Coriolis [1]

La zona geogràfica és molt important a l'hora d'instal·lar una turbina eòlica havent de tenir en compte factors externs. Principalment accidents geogràfics com valls o muntanyes, vegetació o canvis de temperatura. Degut abans de realitzar una inversió s'ha de tenir certesa que hi haurà unes condicions òptimes per el desenvolupament d'aquesta font d'energia. Aquestes aproximacions es duen a terme normalment amb el mètode estadístic de Weibull per aconseguir el potencial eòlic. On ens indica les freqüències de les diferents velocitats del vent. [2]

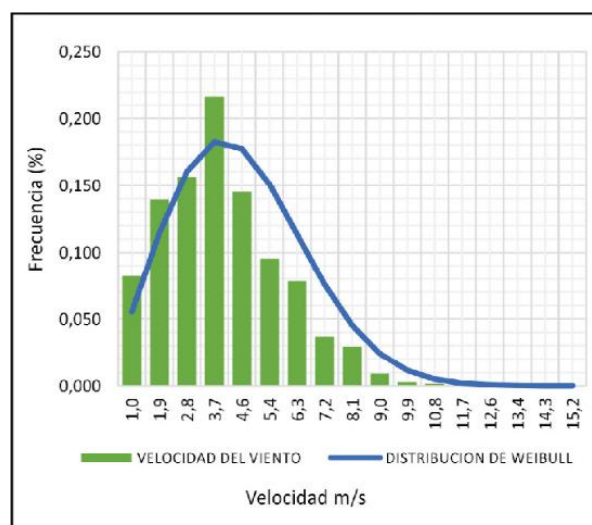


Fig. 2.2: Weibull [2]

2.2. Tipus de turbines eòliques

Una turbina eòlica o aerogenerador és una turbomàquina motora que s'acciona amb el moviment del vent, fent girar un rotor. En aquesta tecnologia, és produeix l'energia mecànica gràcies a l'energia cinètica del moviment del vent que acciona un rotor amb un sistema de transmissió mecànic, on farà girar un generador o alternador, transformant l'energia mecànica en energia elèctrica.[3]

Els primers dissenys utilitzats en la indústria van ser turbines eòliques d'eix horitzontal, aquest han sofert un augment progressiu en la seva eficiència i potència generada, augmentant la mida de l'altura de la torre i el diàmetre del rotor. La turbina eòlica més gran construïda arriba fins als 242 m d'altura i un diàmetre del rotor de 236 m.[4]

Els aerogeneradors es classifiquen segons l'orientació de l'eix del rotor en horitzontals i verticals.

2.2.1 Turbines eòliques d'eix horitzontal

Les turbines eòliques d'eix horitzontal o HAWT (en anglès) són les més populars en la indústria. Es localitza en la part superior de la torre el seu eix principal de rotació. Usualment, la velocitat de gir de les aspes és molt baix, per aquesta raó s'utilitza una caixa multiplicadora que augmenta la velocitat de gir que transmet a l'alternador. La gran majoria compten amb 3 pales, una alta eficiència i estan controlades per ordinadors. Aquest grup es pot classificar en 2 subgrups: [5]

Rotors múltipala o aeroturbines lentes: són aerogeneradors entre 6 i 24 pales, on no solen disposar de pales de gran mida, per tant, la velocitat incident en les pales i la velocitat de la punta de les pales és similar. Llavors no es fa servir per la generació elèctrica, s'utilitza normalment per al bombeig d'aigua.

Rotor tipus hèlix o aeroturbines ràpides: són els aerogeneradors fets servir per la producció d'energia elèctrica, pel fet que la velocitat en la punta és molt superior a les velocitats d'incidència, entre 6 i 14 vegades major. Compten amb un parell d'engegada molt baix que permet que s'activi amb velocitats del vent baixes.

Avantatges:

- S'utilitzen per generar grans quantitats d'energia elèctrica, segons la mida de les aspes i l'altura de la torre.
- Gran eficiència.
- Aprofitar vents de major altura, que usualment són més ràpids.

Inconvenients:

- Dificultat per funcionar correctament a altures baixes per problemes amb turbulències.
- Instal·lació i transport difícil a causa de les grans dimensions.
- Impacte visual en l'entorn, tan mediambiental com en el paisatge.
- Altera el funcionament de radars d'aeroports.
- Necessiten un control exhaustiu i orientar-se cap al vent per al correcte funcionament.

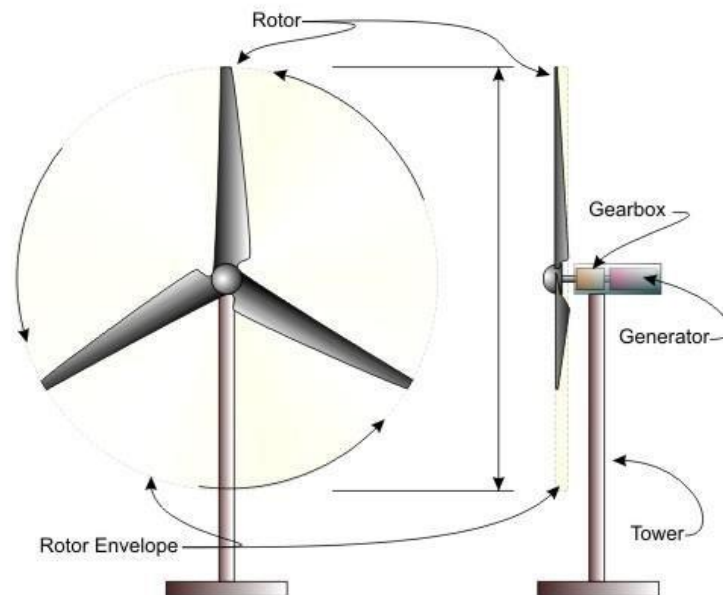


Fig. 2.3: Turbina eòlica d'eix horitzontal [5]

2.2.2 Turbines eòliques d'eix vertical

Les turbines eòliques d'eix vertical o VAWT (en anglès) destaquen principalment per no necessitar un mecanisme d'orientació, degut al seu disseny poden aprofitar el vent sense importar la seva direcció. Funcionen principalment per la diferència del coeficient d'arrossegament entre seccions o per la força de sustentació que experimenten els perfils aerodinàmics a l'interactuar amb els corrents d'aire. Aquest grup es classifica en tres subgrups:

Rotor Savonius: és un rotor que aprofita la força del vent per transformar-la en torsió sobre un eix rotatori, el principi de funcionament és la força d'arrossegament entre dues superfícies. Una curiositat és que té menys resistència al vent quan gira en sentit contrari al vent que a favor. També són les més econòmiques i poden funcionar amb velocitats baixes.

Rotor Darrieus: és un rotor format per dues pales biconvexes que estan unides a l'eix vertical pels dos extrems. Compten amb un bon rendiment i capacitat d'operar a altes velocitats del vent. Però necessiten assistència per arrancar el rotor i col·locar tensors per assegurar l'estabilitat degut a les tensions generades per l'efecte ombra.

Rotor Giromill: és el rotor menys conegut i consisteix en un conjunt de pales verticals unides per dues barres a l'eix vertical. Produeixen potències de 10 a 20 kW.

Avantatges:

- No necessiten orientar-se a la direcció del vent.
- Necessiten una menor velocitat del vent.
- Més resistents davant vents forts.
- Instal·lació i manteniment més senzill degut que estan més propers al terra.
- Menys intrusives amb els ocells, són més fàcil d'evitar.

Inconvenients:

- Produeixen energia amb una eficiència del 50% menor a les turbines horitzontals.
- Les velocitats dels vents més properes al terra són més baixes que en una torre.

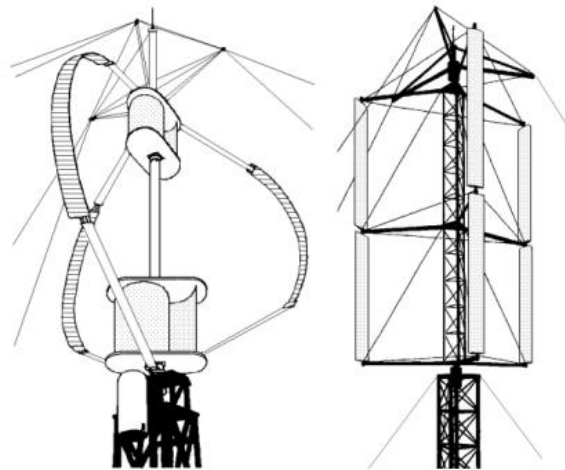


Fig. 2.4: Rotor Darrieus i Rotor Savonius [5]

2.3. Components d'un aerogenerador d'eix horitzontal

Els aerogeneradors d'eix horitzontal, més concretament els de tres aspes, són els més utilitzats alhora de la generació d'electricitat mitjançant turbines eòliques i també l'utilitzat en aquest treball, per tant, per comprendre el seu funcionament cal identificar i explicar cada un dels seus components principals. [6]

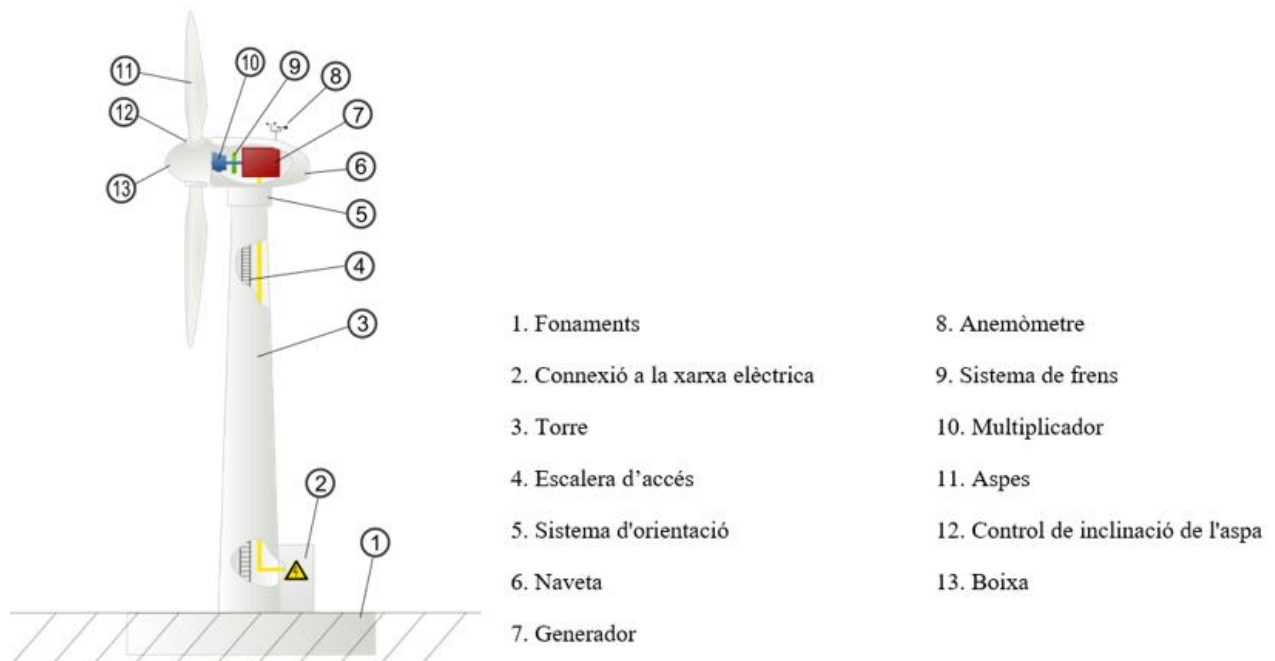


Fig. 2.5: Components d'un aerogenerador d'eix horitzontal [6]

2.3.1 Rotor

És la part més important d'un aerogenerador degut que és on es transforma l'energia cinètica del vent en un moment torçor. Aquest mateix component consta de tres parts:

- Aspes: suporten tota la força del vent i transformen el moviment lineal en moviment rotacional. Han de ser resistents, lleugers i forts. La tendència és fabricar-les més grans i tenen forma de perfil aerodinàmic.
- Boixa: element on se subjecten les aspes i el rotor. Poden fer girar les aspes fins a 90° per posar-les en posició de bandera, per seguretat quan hi ha climatologia adversa.
- Nas: és la part aerodinàmica del rotor que té forma de punta on és col·loca la boixa. Serveix per evitar turbulència degut que redirigeix el vent del front del rotor.

2.3.2 Naveta

La naveta o góndola, és un sistema electromecànic que es podria considerar la sala de màquines de la turbina eòlica. Està situada en la part més alta de la torre, darrere del rotor. Dins hi ha diferents elements:

- **Multiplicador:** serveix per adequar la velocitat de la rotació de l'eix a la que necessita el generador. Incrementant les revolucions usualment a 1:50.
- **Generador o Alternador:** és l'element encarregat de transformar l'energia cinètica de rotació en energia elèctrica.
- **Sistema de fre:** per assegurar el correcte funcionament al llarg de la seva vida útil que està al voltant dels vint anys, tots els elements han d'estar protegit envers situacions climàtiques adverses. Per tant, mitjançant un sensor de vibracions, en detectar vibracions considerables la turbina es parerà. Mitjançant el fre aerodinàmic on les aspes giraran 90°, i deixaran de girar en poques voltes sense un desgast important degut que s'acciona mitjançant un sistema hidràulic.
- **Sistema de control:** serveix per mantenir totes les variables monitorades en tot moment per garantir el correcte funcionament i evitar problemes externs que afectin la turbina eòlica. Compta amb sistemes mecànics, vàlvules, motors, interruptors, sensors i bombes hidràuliques.
- **Sistema d'orientació:** com que la direcció del vent no sempre es desplaça en la mateixa direcció i varia, és necessari la instal·lació un dispositiu que giri la naveta i el rotor per encarar-la a la direcció del vent. Es realitza mitjançant un sistema d'engranatges, motors i frens que permet girar la naveta. També ajuda a reduir la fatiga per esforços en les aspes al només patir esforços de compressió i flexió en una única direcció.

2.3.3 Torre

És l'element que subjecta la naveta i el rotor, generalment fabricada amb acer. La torre representa al voltant del 20% del preu de l'aerogenerador per aquest motiu es tracta d'optimitzar al màxim, fent seccions tronco-còniques on la secció inferior és més gruixuda que la superior.

2.3.4 Fonaments

Part molt important que subjecta tot el pes i els esforços generats per la turbina eòlica, generalment està fabricat amb formigó armat.

2.4. Normativa, patents i propietat intel·lectual

En el sector de la producció d'energia elèctrica mitjançant aerogeneradors està regulat per diferents normatives en el territori de l'estat espanyol. La normativa **UNE-EN IEC 61400-1**, *Sistemas de generación de energía eólica*, és la referent per aquest sector, coordinada a través del *CTN 206/SC 88* de UNE. On engloba els requisits de disseny d'aerogeneradors i parcs eòlics. Juntament amb altres factors com la fabricació, la instal·lació, l'operació i el manteniment d'aquests aparells i també el procés de control de qualitat. Per tant, és essencial i utilitzada per tots els fabricants i empreses del sector eòlic. Aquesta normativa també especifica els requisits per garantir la seguretat dels aerogeneradors, englobant tots els components i sistemes relacionats, des de, components estructurals de l'aerogenerador, sistemes mecànics i elèctrics i funcions de control i protecció. [6]

L'àmbit de les patents dins d'aquest sector és ampli, degut a les múltiples i possibles variacions del disseny d'un aerogenerador segons les necessitats i limitacions imposades per les condicions geogràfiques i meteorològiques. S'ha realitzat una cerca en la pàgina web Espacenet on es recopilen les principals patents dins d'aquesta indústria. Es poden observar diferents modificacions als models fets servir en el sector, com millores en els sistemes de seguretat, modificacions en el disseny dels diferents components per millorar el rendiment i el seu funcionament. A l'observar les diferents patents la realització d'aquest projecte no entrarà en conflicte amb les diferents patents d'aquest sector.

Respecte de la propietat intel·lectual del present projecte s'ha classificat segons *Creative Commons* com a projecte amb llicència **CC BY-NC-SA** (Reconeixement-NoComercial-CompartirIgual). [10]

Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International Public License



3. Fonaments aerodinàmics i mecànica de fluids

Per poder comprendre la teoria aplicada en aquest projecte i els procediments desenvolupats, és necessari introduir i explicar els conceptes més importants en els camps de la mecànica de fluids i conceptes aerodinàmics, coneixements indispensables per entendre el funcionament de les turbines eòliques.

Cal tenir en compte un concepte de relació de magnituds anomenat nombre de Reynolds, serveix per mesurar la importància de les forces de viscositat del fluid respecte les forces inercials o de pressió. Format per la densitat del fluid, la seva velocitat, la longitud característica del sistema i la viscositat dinàmica del fluid. El resultat es pot classificar en tres subgrups:

- Reynolds ≤ 2100 : Flux laminar, on el fluid es comporta com si estigués format per làmines, presenta un comportament relativament ordenat.
- $2100 < \text{Reynolds} < 4000$: Zona de transició, on hi ha certes desestabilitzacions en el fluid en forma d'ondulacions.
- Reynolds ≥ 4000 : Flux turbulent, el fluid es mou de manera desordenada i no estacionària.

3.1. Càlcul de potència en turbines eòliques

Per poder avaluar la potència que un aerogenerador és capaç de produir a través del vent, s'ha de quantificar l'energia cinètica que es pot extraure d'una massa d'aire determinada, en travessar una secció, determinada per la mida de les aspes en un temps establert. Es pot reproduir mitjançant l'equació 3.1: [8]

$$\text{Potència del vent} = \frac{E_{\text{cinètica}}}{t} = \frac{1}{2} * m * \frac{v^2}{t} \quad (3.1)$$

La massa de l'aire que travessa el rotor es pot expressar amb el volum del cilindre que té el mateix diàmetre que el rotor multiplicat per la densitat de l'aire, on la longitud del cilindre es pot expressar com la velocitat del vent multiplicat per al temps que tarda el vent en recorre el cilindre.

$$m = \rho * Vol = \rho * A * L = \rho * A * v * t \quad (3.2)$$

Amb aquestes dues equacions obtenim la següent equació de la potència del vent, afegint també una nova variable el coeficient de potència, degut que l'aerogenerador no podrà aprofitar la totalitat de l'energia cinètica del vent.

$$\text{Potència del vent} = C_p * \frac{1}{2} * m * \frac{v^2}{t} = C_p * \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 \quad (3.3)$$

Observant aquesta última equació es mostra la importància de la velocitat pel fet que està elevada al cub, fent que en altes velocitats es puguin produir avaries en els components.

El coeficient de potència (C_p), és el que es coneix com el "Límit de Betz". Aquest coeficient reproduïx que no tot l'aire que travessa el rotor es pot convertir en potència.

3.1.1 Teoria del disc actuator

Aquesta teoria serveix per explicar com i per què es produeix un intercanvi d'energia quan el vent travessa una turbina eòlica, simplificant el model on es considera el rotor com un disc pla, per tant, una turbina eòlica amb un nombre infinit d'aspes. Amb unes condicions inicials d'un flux ideal, incompressible i homogeni, un moviment estacionari, una estela no giratòria, un fluid no viscos i una velocitat uniforme i unidimensional.

Es considera un flux d'aire que es desplaça a través d'un tub que conté el disc actuator, on la secció d'entrada és menor a la de sortida. On a mesura que es desplaça el fluid per velocitat però envers guanyar mida en la secció. Per tant, es pot aplicar la llei de conservació de masses en els diferents punts del tub. En la imatge següent es pot observar una representació gràfica del model explicat amb les variables de velocitat, densitat i àrea.

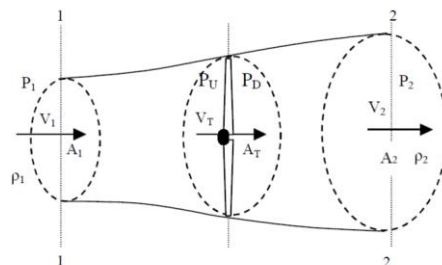


Fig. 3.1: Flux d'aire a través del disc actuator [8]

On l'equació de la conservació de la massa sobre el disc actuator és:

$$G = \rho_1 * A_1 * v_1 = \rho * A * v = \rho_2 * A_2 * v_2 \quad (3.4)$$

3.1.2 Model de Betz

El límit de Betz indica que només es pot convertir el 59% de l'energia cinètica en energia mecànica, utilitzant un aerogenerador. Aquesta afirmació es pot demostrar mitjançant les següents equacions sostingudes per la teoria del disc actuator. [9]

A l'hora de poder calcular la potència útil que l'aerogenerador pot extraure del vent s'han de tenir en compte l'energia cinètica per unitat de temps i el treball generat per unitat de temps sobre la secció A determinada per l'hèlix.

Amb la variació de l'energia cinètica del vent en la unitat del temps:

$$P_{\text{útil}} = \frac{E_{\text{cinètica}}}{\Delta t} = \frac{Ec1 - Ec2}{\Delta t} = \frac{G}{2} * (v1^2 - v2^2) = \frac{\rho * A * v}{2} * (v1^2 - v2^2) \quad (3.5)$$

Amb el treball generat per unitat de temps:

$$P_{\text{útil}} = F * v = \frac{\rho * A * (v1 - v2)}{\Delta t} * v = \rho * A * v * (v1 - v2) \quad (3.6)$$

A l'igualar les dues equacions s'obté el valor de la velocitat v , on és la velocitat en el pla mitjà que se situa el rotor i la mitjana de les dues velocitats. Aquesta consigna segueix el model de Betz.

$$\frac{\rho * A * v}{2} * (v1^2 - v2^2) = \rho * A * v * (v1 - v2) \rightarrow v = \frac{v1 + v2}{2} \quad (3.7)$$

Per tant, a l'observar l'equació resultant el valor de $v2$ depèn del valor de $v1$. Degut que $v1$ és la velocitat del vent abans de travessar el rotor. On s'obté la següent equació, on el valor de b fluctua entre 0 i 1:

$$v2 = v1 * b \quad (3.7)$$

Tot seguit, es substitueix l'equació 3.7 en l'equació 3.5 de la variació de l'energia cinètica per obtenir:

$$P_{\text{útil}} = \frac{\rho * A * v}{4} * v1^3 * (1 + b) * (1 - b^2) \quad (3.8)$$

Llavors ara s'han de calcular els valors exactes del coeficient de b, amb l'equació de la potència útil. Això s'aconsegueix al derivar la fórmula de la potència útil respecte el coeficient de b i igualar-la a 0.

$$\frac{dP_{\text{útil}}}{db} = 0 \quad (3.9)$$

Per tant al desenvolupar l'equació s'obté:

$$\frac{\rho * A * v}{4} * v1^3 * (1 - 2 * b - 3 * b^2) = 0 \rightarrow -3 * b^2 - 2 * b + 1 = 0 \quad (3.10)$$

Els càlculs resultant de l'equació de segon grau són $b=-1$ i $b=1/3$. El valor negatiu es descarta perquè no té sentit físic que el vent canviï de direcció al passar per al rotor. Per tant el valor de b és de 1/3, i per tant el valor de v_2 serà 1/3 multiplicat per v_1 . Llavors es pot substituir el valor de b en la fórmula 3.3 de la potència útil que conté el coeficient de potència:

$$P_{\text{útil}} = C_p * \frac{1}{2} * m * \frac{v^2}{t} = \frac{(1 + b) * (1 - b^2)}{2} * \frac{1}{2} * \rho * A * v1^3 \quad (3.11)$$

On el coeficient de potència seria el límit de Betz:

$$C_p = \frac{(1 + b) * (1 - b^2)}{2} = \frac{16}{27} = \mathbf{59,3\%} \quad (3.12)$$

Aprofitant els càlculs també s'obté el parell motor i el coeficient de parell o força:

$$T_t = \frac{1}{2} * \rho * A * v1^2 * C_T * radi \quad (3.13)$$

$$C_T = \frac{C_p}{\lambda} \quad (3.14)$$

Aquest valor no té en compte factors com la resistència aerodinàmica de les aspes, la compressió del fluid, la pèrdua d'energia per l'estela generada pel rotor o la interferència de les aspes. A l'hora d'obtenir el càlcul de la potència s'haurien d'haver tingut en compte diversos factors mecànics dels components de l'aerogenerador, com serien els següents rendiments:

- Rendiment de l'hèlix: 85%
- Rendiment del multiplicador: 98%

- Rendiment de l'alternador: 95%
- Rendiment del transformador: 98%

En tenir en compte tots aquests rendiments amb el límit de Betz, s'obté un rendiment total de l'aerogenerador del 47%. Encara que en la pràctica el rendiment seria encara menor. Amb l'expressió aconseguida de la potència produïda per un aerogenerador, es pot calcular la distribució d'energia eòlica a diferents velocitats amb el mètode de Weibull. On es representa els tres tipus de potència segons el rendiment aplicat en cadascun, la màxima eficiència produïda per una turbina eòlica és al voltant dels 9 m/s. Es necessiten unes velocitats mínimes de 3-5 m/s per poder aprofitar l'energia del vent i amb grans velocitats l'aerogenerador evita el funcionament per prevenir avaries per mal funcionament.

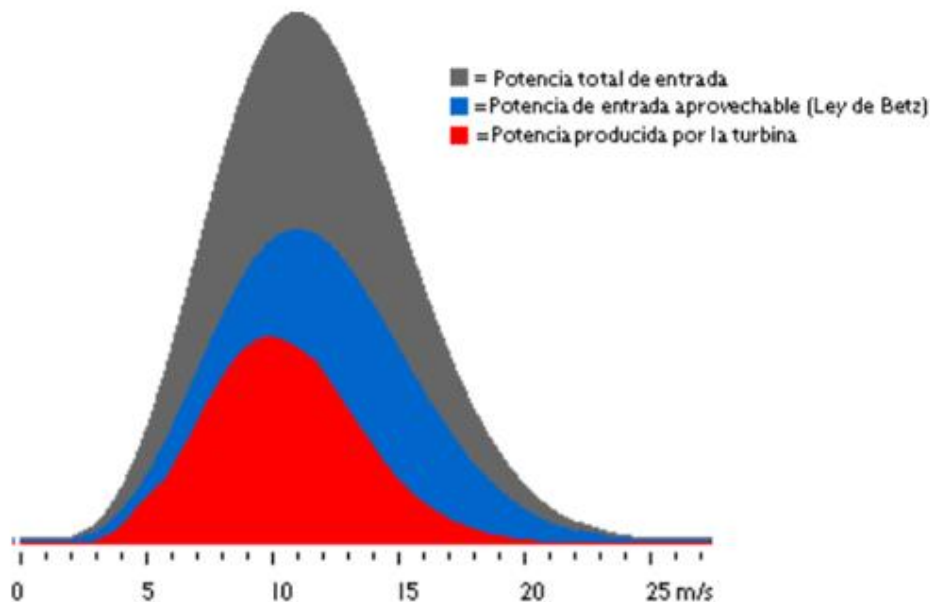


Fig. 3.2: Funció de densitat de potència, eix X:m/s eix Y: W/m^2 [9]

3.2. Forces aerodinàmiques en les aspes

Una aspa està dissenyada per un perfil alar, que és la forma de l'àrea transversal d'un element, on en desplaçar-se a través d'un fluid, es produeix al voltant una distribució de pressions que generin forces aerodinàmiques. Per tant, un cos sòlid que es mou a través d'un fluid produeix forces aerodinàmiques, on la força perpendicular a la velocitat relativa del flux lliure és la força de sustentació i la força paral·lela és la força d'arrossegament. En la següent imatge es pot observar les diferents parts d'un perfil alar. [11]

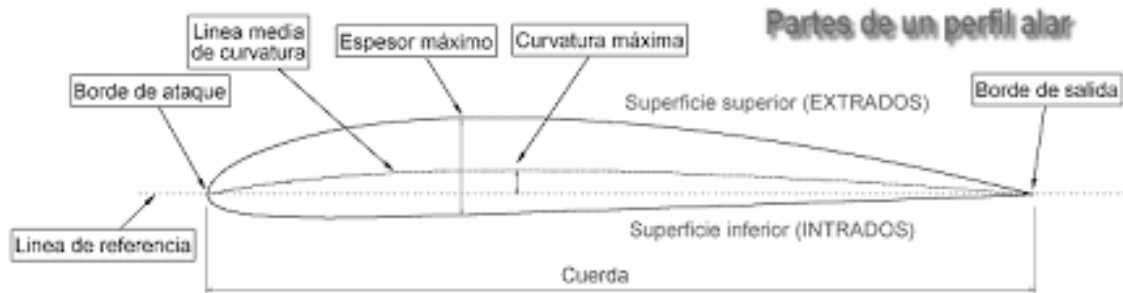


Fig. 3.3: Parts d'un perfil alar [11]

3.2.1 Força de sustentació i força d'arrossegament

La força de sustentació ve donada, ja que qualsevol cos que es desplaça a través d'un fluid, pot experimentar aquest fenomen. Com s'ha explicat anteriorment gràcies a l'efecte Bernoulli on en augmentar la velocitat d'un fluid, disminueix la pressió. Hi ha tres principals casos que pot aparèixer aquest fenomen. [12] [14]

-Perfil asimètric i angle d'atac igual a 0: A l'entrar les partícules del fluid en el perfil alar, es divideixen en dos, una per la part d'adalt on serà més ràpida degut que hi ha més distància a recórrer i un a la part d'abaix, on a l'unir-se de nou es crearà una diferència de pressions i sorgirà una força vertical ascendent.

-Perfil simètric i angle d'atac diferents de 0: Pràcticament igual al cas anterior.

-Efecte Magnus: La superfície en contacte amb el fluid està en rotació sobre si mateixa i depenen del sentit de gir una de les cares s'accelera i l'altre es frenarà. Fenomen produït principalment en esport amb pilota.



Fig. 3.4: Perfil asimètric i efecte Magnus [14]

La força d'arrossegament actua en sentit contrari al moviment del cos. A l'entrar en contacte amb la viscositat del fluid sorgeix fricció en el sistema que frenarà el moviment del cos que travessi. Aquesta força té un impacte negatiu en la generació de potència en aerogeneradors,

per aquesta raó, és de vital importància el disseny de les aspes amb una forma aerodinàmica molt optimitzada per minimitzar aquest fenomen.

Hi ha uns coeficients aerodinàmics principals que permeten determinar la magnitud de les forces que actuen sobre els perfils alars i la totalitat de l'aspa.

El coeficient de sustentació, és dependent de l'angle d'atac en el perfil alar. On el valor del coeficient augmenta linealment amb l'angle d'atac fins a arribar a un angle crític, on el perfil alar comença a perdre força de sustentació a mesura que s'augmenta l'angle d'atac.

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} * \rho * v^2 * A} \quad (3.15)$$

El coeficient d'arrossegament es busca que sigui el més petit possible, per minimitzar el seu efecte. Per tant, si l'angle d'atac és més baix aquest coeficient també ho serà.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} * \rho * v^2 * c} \quad (3.16)$$

Per últim s'obté un coeficient que relaciona els coeficients anteriors, per avaluar la qualitat aerodinàmica d'aquest. Buscant un $\varepsilon=0,01$ en els perfils alars bons.

$$\varepsilon = \frac{C_D}{C_L} \quad (3.17)$$

3.2.2 Tipus de perfils alars i angle d'atac

A l'hora de fer el disseny d'un perfil alar i decidir la geometria òptima per al sistema, el que es fa normalment és agafar diversos models ja estandarditzats i observar el rendiment més eficient. A l'hora de decidir aquests models estandarditzats és fa una primera aproximació segons el càlcul de nombre de Reynolds, el coeficient de sustentació i arrossegament.

En general, els tipus de perfils utilitzats a la indústria són de la sèrie NACA (National Advisory Committee of Aeronautics), i estan determinats per un conjunt de xifres que defineixen la seva geometria. En les NACA de quatre xifres, la primera xifra significa la màxima fletxa de la línia mitjana de la corda en percentatge, proporcionant la màxima curvatura. La segona xifra indica

la distància des de la vora d'atac fins a la màxima curvatura i l'última dues xifres indica el màxim gruix. També existeix NACA amb 5 xifres però s'usen en altres indústries. [15]

En un perfil alar fer servir un angle d'atac correcte és molt important, pel fet que és determinant a l'hora de produir l'efecte de sustentació. L'angle d'atac és l'angle entre la línia de referència del sistema i el vector que representa el moviment relatiu entre el cos i el fluid a través del qual es mou.

3.2.3 Teoria de l'element de la pala

La teoria de l'element de pala es basa en avaluar les forces i moments aerodinàmics que actuen sobre una part de la pala, per posteriorment obtenir la resultant d'aquestes accions mitjançant la suma al llarg de la pala. On únicament es té en compte les forces determinades per els coeficients de sustentació i arrossegament i que no existeixen interacció entre els diferents elements de l'aspa. Amb aquests conceptes és desenvolupen les principals fórmules i en la següent imatge es veu totes les variables mencionades. [13] [16]

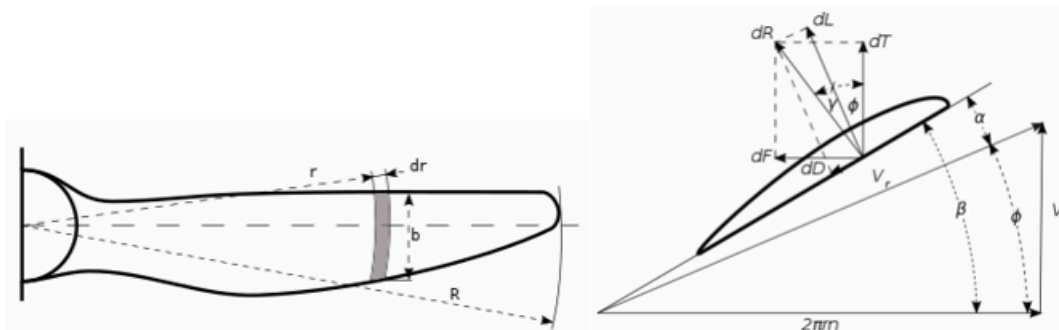


Fig. 3.5: Conceptes i variables en una pala [16]

La força de sustentació al element.

$$dL = \frac{V_r^2 * C_L * b * dr}{2} \quad (3.18)$$

La força àrea resultant sobre element i la força d'empenta.

$$dR = \frac{V_r^2 * C_L * b * dr}{2 * \cos(\arctg \frac{D}{L})} \quad (3.19)$$

$$dT = \frac{V_r^2 * C_L * b * dr * \cos(\phi + (\arctg \frac{D}{L}))}{2 * \cos(\arctg \frac{D}{L})} \quad (3.20)$$

El parell total de l'element i la potència de parell.

$$dQ = d * R * \sin(\phi + (\arctg \frac{D}{L})) \quad (3.21)$$

$$Q_{HP} = \frac{2\pi * n * Q}{550} \quad (3.22)$$

3.3. Mètode BEM: 'Blade Element Momentum'

A l'hora de calcular les especificacions tècniques d'un aerogenerador, el mètode més utilitzat és el BEM on combina la teoria de l'element de la pala i la teoria del disc actuator. On gràcies a aquest, es pot calcular les forces que apareixen sobre una aspa d'un aerogenerador. Aquestes dues teories permeten simplificar els càlculs en les velocitats induïdes al rotor. [17]

La teoria de l'element de pala assumeix que al moment de forces, causants del gir del rotor, només hi contribueix el flux d'aire que travessa les pales a la direcció axial i no participa, per tant, la massa d'aire que circula a la direcció radial. Així, cadascun dels elements o perfils bidimensionals, en què es divideix la pala, contribuirà al parell de gir de manera independent.

Les condicions aerodinàmiques a la pala són molt diferents al llarg de tota la seva envergadura, per tant, si es vol optimitzar la potència de la turbina; la forma, la mida i la posició dels seus perfils haurà de variar també amb el radi. El mètode BEM divideix la longitud total de la pala en una sèrie d'elements i, de manera iterativa, permet obtenir la forma adequada de cada perfil perquè el total de la pala sigui el més eficient possible.[18]

En utilitzar aquest mètode poden sorgir diferents errors a causa de les seves limitacions, que s'han de tenir en compte i pensar una solució per prevenir-los i corregir-los. Aquesta correcció pretén salvar els errors comesos en haver contemplat el rotor eòlic com un conjunt infinit de pales. L'estela que desprèn un rotor de nombre finit de pales és molt diferent de l'estudiada mitjançant la teoria del disc actuator. D'altra banda, de la teoria de la sustentació se sap que la

pressió del fluid a la part inferior de la pala és més gran que a la part superior, però, a la zona propera a la punta el fluid s'escapa per la vora i les pressions tendeixen a igualar-se. Amb la intenció de corregir la trajectòria de les partícules d'aire que travessen el rotor, i en definitiva, modelitzar l'estela de la turbina de manera que la seva forma s'aproximi encara més a la realitat, Prandtl va introduir un factor (F) conegut com a factor de pèrdues a la punta de pala. Aquest s'inclou directament a les equacions d'empenta, parell i potència, per a d'alguna forma caracteritzar la disminució de la força que experimenta cada secció de la pala a causa de la finitud en el nombre de pales i les pèrdues a la punta.

Una altra correcció és on el rotor està massa carregat, llavors es contempla la situació en què la velocitat induïda axial supera valors de $a = 0.4$, en aquest cas el model del disc actuator manca de validesa pel fet que la velocitat de l'aire després de travessar el rotor és molt petita i l'àrea en la secció de sortida del tub de corrent es fa massa gran. Es considera que una turbina es troba molt carregada quan $a > 0.5$, ja que si es donés aquesta situació la velocitat a la sortida del tub seria negativa i el rotor actuaria com un disc sòlid i impediria una circulació lliure del fluid a través seu.

4. Objectius i especificacions tècniques

En aquesta secció s'abordan els principals objectius i les respectives especificacions tècniques per a cadascun que es pretenen assolir en aquest projecte. L'objectiu principal és subministrar energia a un petit poble mitjançant el disseny d'una turbina eòlica d'eix horitzontal.

L'objectiu primordial d'aquest projecte és dissenyar una turbina eòlica de tres aspes amb eix horitzontal. Per assolir aquest propòsit, es valoren els objectius següents i les respectives especificacions per al funcionament òptim. S'escullen les especificacions que més afavoreixen l'usuari per tal de presentar un producte competitiu al mercat, adaptat a les necessitats del consumidor.

Objectiu 1: Recerca de les condicions òptimes físiques per la instal·lació d'una turbina eòlica

El primer objectiu englobaria la primera part del treball on es fa una cerca exhaustiva amb l'objectiu de recopilar tota la informació necessària per al desenvolupament del treball. Començant amb conèixer els principis bàsics d'aquesta tecnologia com els fonaments teòrics de com funcionen, juntament amb els requisits necessaris per a la instal·lació en un lloc determinat segons les seves condicions físiques, com la velocitat o direcció del vent. Amb tot això adaptar aquests coneixements a les necessitats energètiques d'un poble petit.

- 1.1 Anàlisi de l'impacte de diferents velocitats del vent en el rendiment d'una turbina eòlica.
- 1.2 Anàlisi de la direcció del vent idònia per un correcte funcionament.
- 1.3 Anàlisi de les necessitats energètiques d'un poble petit d'uns 2000 habitants.
- 1.4 Calcular la mida de la turbina eòlica a partir de les demandes energètiques.
- 1.5 Recerca d'un poble per instal·lar la turbina eòlica, on estudiar la meteorologia i geografia del terreny.

Objectiu 2: Disseny de les aspes i estructura d'una turbina eòlica

El segon objectiu englobaria el desenvolupament dels diferents càlculs mitjançant el mètode BEM, on s'apliquen fonaments aerodinàmics, per tal d'obtenir les diferents característiques de la turbina eòlica, com els perfils alars, les dimensions i els números d'aspes que conformaran l'aerogenerador i la forma geomètrica adequada a les condicions del terreny seleccionat.

2.1 Procés de dimensionament teòric de les característiques de la turbina eòlica.

2.2 Procés de modelització per trobar el perfil alar ideal de la turbina eòlica i la posterior comprovació del mateix amb SolidWorks.

2.3 Disseny de les aspes i l'estructura amb les dades calculades anteriorment mitjançant el software de Qblade.

Objectiu 3: Comprovació i validació del funcionament correcte de la turbina eòlica mitjançant simulacions numèriques

El tercer objectiu englobaria la verificació i comprovació dels diferents càlculs i seleccions dels components que conformen l'aerogenerador, on s'observa el correcte funcionament en les condicions geogràfiques i meteorològiques escollides en el primer objectiu. Mitjançant el programa QBlade.

3.1 Anàlisi numèric dels diferents components de la turbina eòlica amb Qblade en diferents escenaris per verificar el correcte funcionament.

3.2 Anàlisis d'elements finits en Qblade per verificar que suporta els esforços mecànics que estarà sotmès en diferents escenaris.

3.3 Anàlisis dels resultats i extreure una conclusió final respecte tot el treball desenvolupat.

5. Estudi i selecció de les condicions òptimes d'instal·lació

5.1. Anàlisi de l'impacte de diferents velocitats del vent en el rendiment d'una turbina eòlica

Segons la teoria esmentada anteriorment per la llei de Betz, es pot extreure mitjançant la distribució de Weibull una gràfica on s'observi la potència d'entrada, la potència d'entrada aprofitable segons la llei de Betz i la potència generada per l'aerogenerador, segons la velocitat mitjana al llarg de l'any de la localització de l'aerogenerador. Per tant, el vent fa girar les pales, que es comencen a moure amb velocitats de vent que comencen entre els 3 m/s i 4 m/s i es proporciona la màxima potència amb uns 11 m/s. Amb vents molt forts, que superin els 25 m/s, les pales es col·loquen en bandera i l'aerogenerador es frena per evitar tensions excessives. [19]

En l'impacte del vent en un aerogenerador a part de la velocitat s'ha de tenir en compte la direcció del vent, on si el vent té unes direccions irregulars s'haurà d'instal·lar un mecanisme d'orientació. Per tal de executar un projecte més econòmic, se cercarà un lloc que tingui una direcció del vent predominant per evitar la seva instal·lació. També un factor a tenir en compte és l'altura de l'aerogenerador com més alt estigui el rotor de la turbina eòlica, més electricitat produirà degut a la presència de vents més ràpids.

5.2. Anàlisi de les necessitats energètiques d'un poble petit d'uns 2000 habitants

Per poder fer el disseny de l'aerogenerador i la selecció del lloc òptim s'han de saber les necessitats energètiques del poble on estarà instal·lada, sabent el consum elèctric del poble segons l'època de l'any, per saber quina quantitat d'electricitat podrà l'aerogenerador.

En zones temperades, els vents d'estiu són generalment més febles que els d'hivern. El consum d'electricitat és generalment més gran a l'hivern que a l'estiu en aquestes regions. Per tant, a zones més fredes del planeta la calefacció elèctrica és perfecta en combinació amb l'energia eòlica, ja que el refredament de les cases varia amb la velocitat del vent de la mateixa manera que la producció d'electricitat als aerogeneradors varia amb les velocitats del vent.

Es coneix que la mitjana nacional és de 2,5 habitants per llar, per tant, en un poble de 2000 habitants hi haurà 800 llars a les quals subministrar electricitat, també es té en compte una botiga, un restaurant, un centre d'atenció primària i una petita escola.[23]

El consum elèctric mitjà mensual d'una llar en Espanya és de 270 kWh, uns 3.240 kWh a l'any. On els mesos d'hivern com desembre i gener tenen un consum d'uns 350 kWh, lideren el consum elèctric seguit per el febrer amb uns 300 kWh, la resta de mesos va disminuint encara que en els mesos de calor com l'agost repunta fins als quasi 300 kWh. Considerant les 800 llars hi haurà un consum mitjà anual de 2.592.000 kWh. Una petita escola pot consumir uns 5 kWh per alumne en un dia. Considerant uns 60 alumnes i 175 dies lectius. Hi haurà un consum elèctric anual de 52.500 kWh. Una botiga té un consum elèctric anual d'uns 250 kWh/m². Considerant una dimensió de 100 m². Uns 2.500 kWh. Un restaurant té un consum elèctric anual d'uns 300 kWh/m². Considerant una dimensió de 100 m². Uns 3.000 kWh. Un centre d'atenció primària de 500 m² pot tenir un consum elèctric anual de 14.000 kWh. [24] [25] [26] [27] [28]

Per tant en total el consum elèctric anual seria de 2.664.000 kWh (2.664 MWh). On els mesos de més d'hivern on el consum és més elevat degut l'ús de la calefacció. Els mesos d'estiu on el consum elèctric és també considerable degut a la utilització d'aire condicionat i els mesos de l'any de la tardor i primavera amb climes més temperats són els que menys consum elèctric tenen. El consum en les llars són el grup amb més pes en el consum elèctric total.

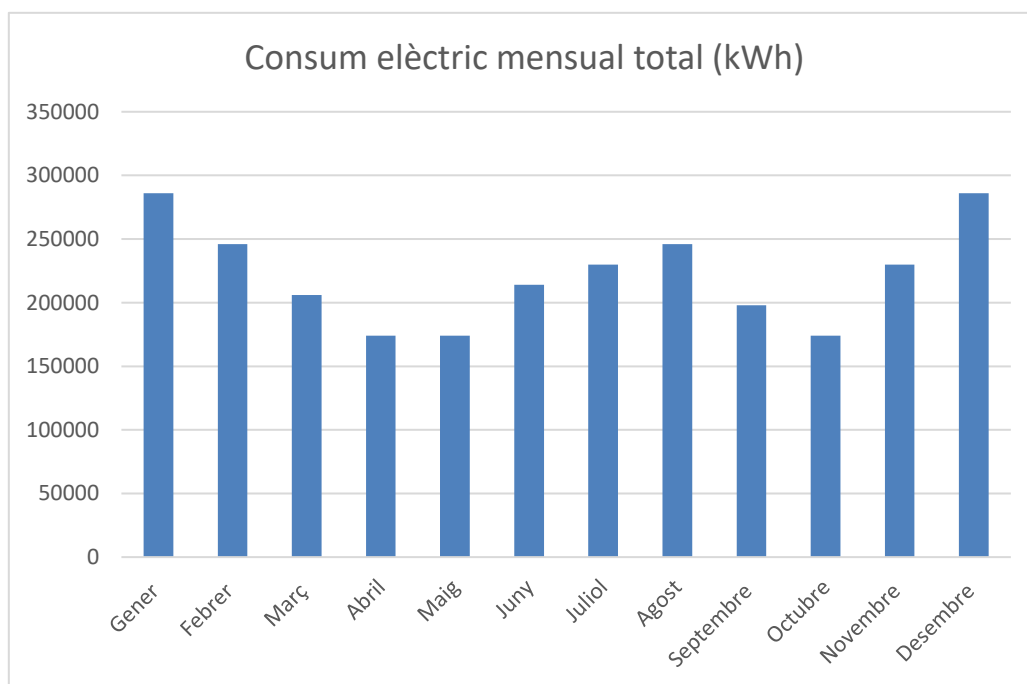
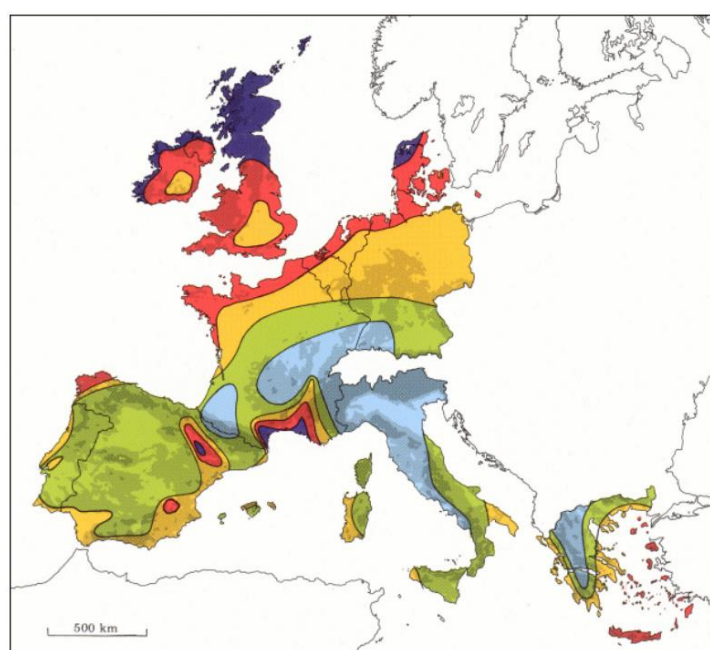


Fig. 5.1: Gràfica del consum elèctric mensual

5.3. Recerca d'un poble per instal·lar la turbina eòlica

Una vegada observat els requisits essencials per la selecció d'un lloc òptim per la selecció, es comença a realitzar una cerca pel territori nacional. En el següent mapa, es pot analitzar les zones d'Europa occidental segons la velocitat del vent, es pot observar un lloc ideal per la instal·lació d'una turbina eòlica en el territori nacional, seria la zona de la serralada ibèrica. On segons la llegenda, en un terreny poc favorable com un terreny accidentat la velocitat mitjana està entre els 5 m/s i 6 m/s, per tant compleix el requisit mínim de velocitat per al correcte funcionament d'un aerogenerador.[20]



RECURSOS EÓLICOS A 50 (45) M SOBRE EL NIVEL DEL MAR

COLOR	TERRENO ACCIDENTADO	PLANO ABIERTO	EN LA COSTA	MAR ABIERTO	COLINAS Y CRESTAS
	m/s W/m ²	m/s W/m ²	m/s W/m ²	m/s W/m ²	m/s W/m ²
	>6.0 >250	>7.5 >500	>8.5 >700	>9.0 >800	>11.5 >1800
	5.0-6.0 150-250	6.5-7.5 300-500	7.0-8.5 400-700	8.0-9.0 600-800	10.0-11.5 1200-1800
	4.5-5.0 100-150	5.5-6.5 200-300	6.0-7.0 250-400	7.0-8.0 400-600	8.5-10.0 700-1200
	3.5-4.5 50-100	4.5-5.5 100-200	5.0-6.0 150-250	5.5-7.0 200-400	7.0-8.5 400-700
	<3.5 <50	<4.5 <100	<5.0 <150	<5.5 <200	<7.0 <400
		>7.5			
		5.5-7.5			
		<5.5			

Fig. 5.2: Mapa eòlic de Europa occidental [20]

Continuant amb la cerca per la zona esmentada anteriorment, que pertany políticament a la comunitat autònoma d'Aragó. Es pot observar que en aquesta àrea hi ha projectes autoritzats o instal·lats de turbines eòliques. Per tant, és una zona òptima per aquesta tecnologia. Com es pot observar en la següent imatge, les localitzacions dels parcs eòlics abunden en la zona central corresponent a la serralada ibèrica.[21]

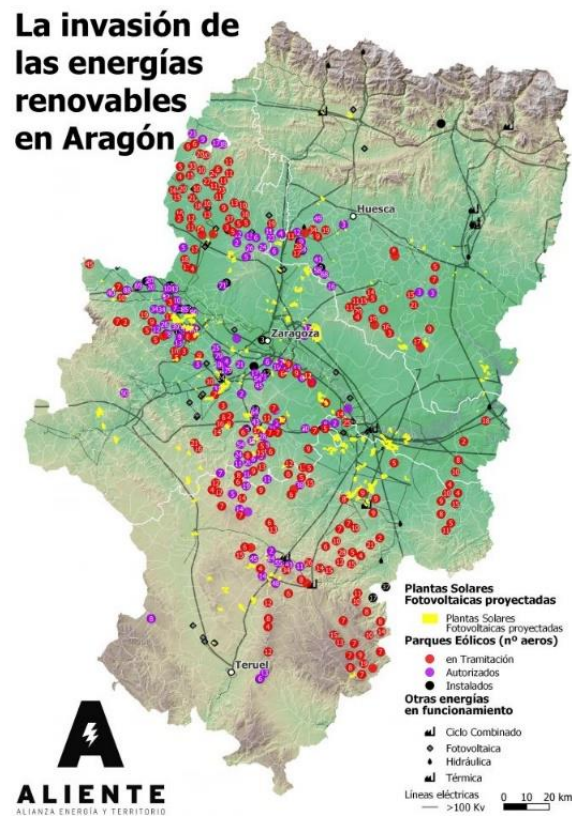


Fig. 5.3: Energies renovables en Aragó [21]

Una vegada acotada la zona d'instal·lació en una àrea reduïda, es comença la cerca de localitats amb una població propera als 2.000 habitants, per poder satisfer les seves necessitats energètiques amb un aerogenerador. Per tant, es fa una cerca de les poblacions entre 1.400 i 2.000 habitants que pertanyin a les províncies de Saragossa i Terol. Mitjançant una pàgina web que recopila les velocitats del vent al llarg d'un any i la seva direcció, de totes les localitats d'Espanya, es fa una selecció inicial on es presenten tres possibles opcions que compleixen els requisits mínims. A l'hora d'escollir en les tres opcions es tindrà en compte la velocitat mitjana del vent al llarg de l'any i l'homogeneïtat de la direcció del vent.[22]

La primera opció és Alfamén un municipi de 1.477 habitants, a uns 50 km al sud-oest de Saragossa. Amb una velocitat mitjana de 4,36 m/s (15,7 km/h) i un vent predominant de direcció oest i nord.

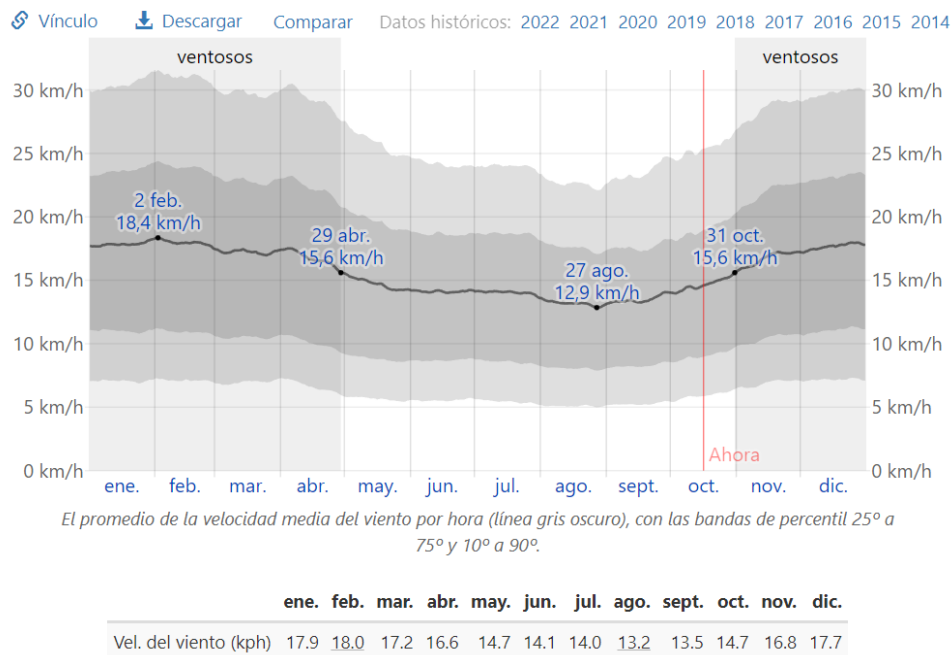


Fig. 5.4: Velocitat mitjana en Alfamén [22]

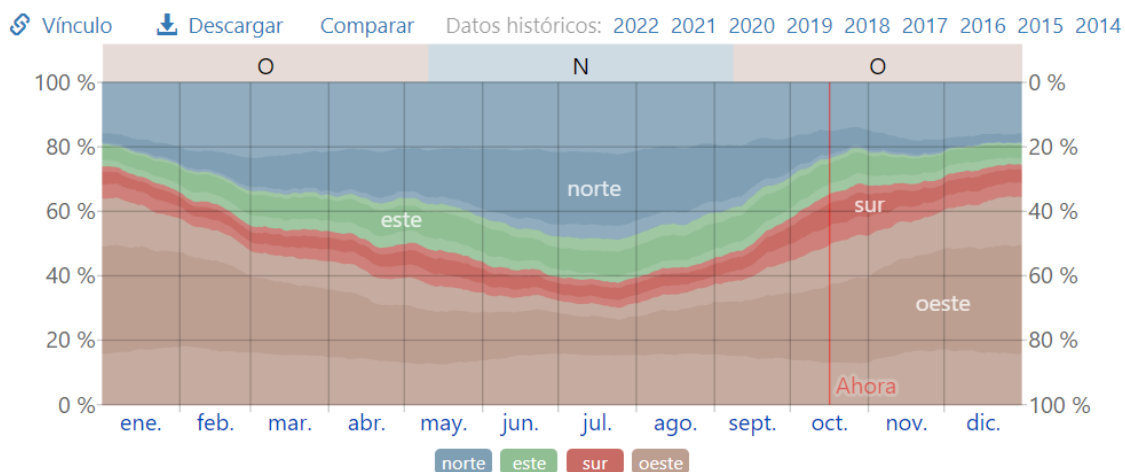


Fig. 5.5: Direcció del vent en Alfamén [22]

La segona opció és Belchite un municipi de 1.533 habitants, a uns 48 km al sud de Saragossa. Amb una velocitat mitjana de 4,375 m/s (15,75 km/h) i un vent predominant de direcció oest i nord.

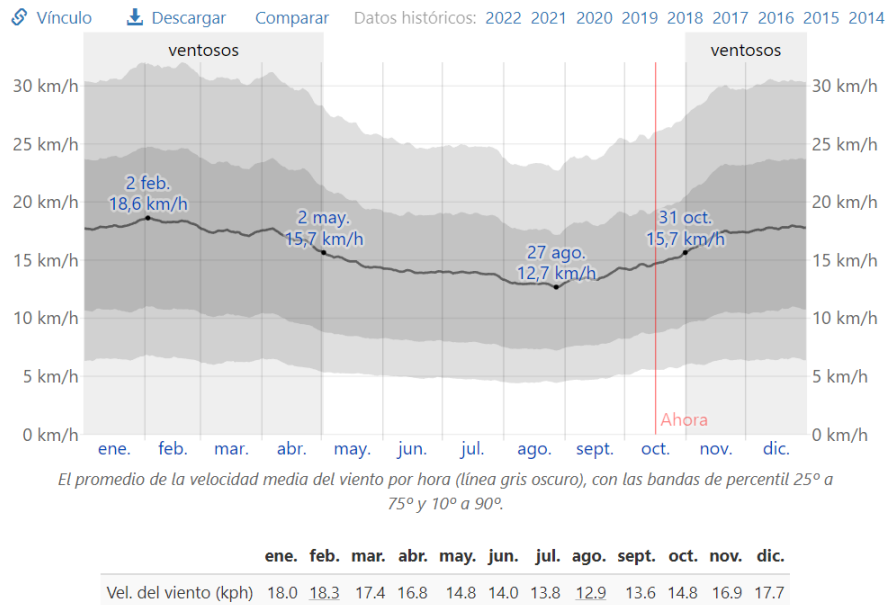


Fig. 5.6: Velocitat mitjana en Belchite [22]

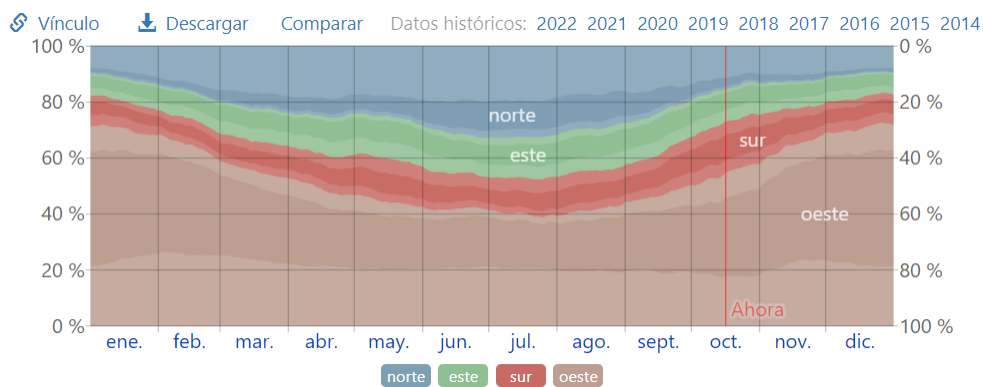


Fig. 5.7: Direcció del vent en Belchite [22]

La tercera opció és Albalate del Arzobispo un municipi de 1.959 habitants, a uns 136 km al nord-est de Terol. Amb una velocitat mitjana de 4,54 m/s (16,35 km/h) i un vent predominant de direcció oest i nord.

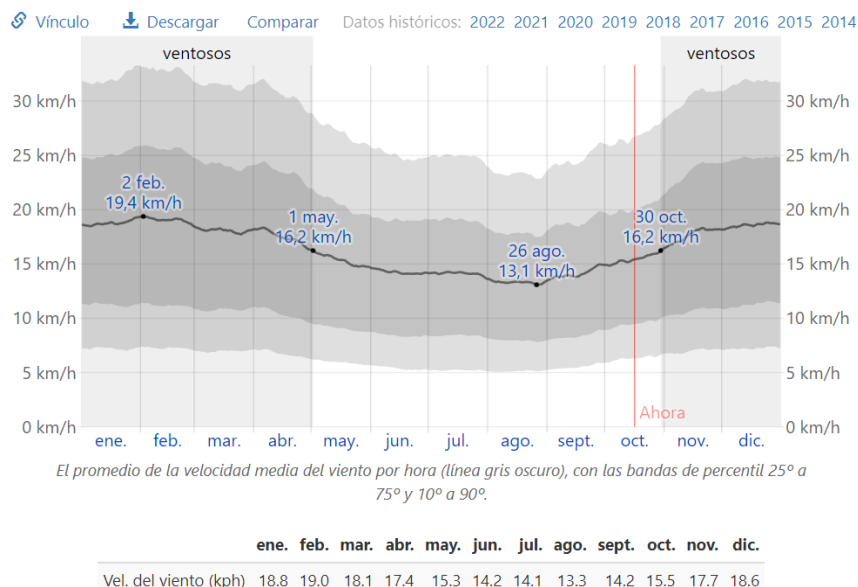


Fig. 5.8: Velocitat mitjana en Albalate del Arzobispo [22]

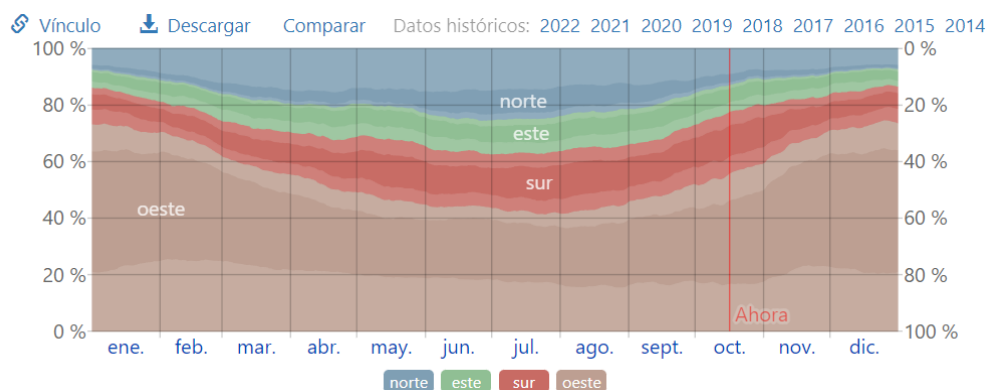


Fig. 5.9: Direcció del vent en Albalate del Arzobispo [22]

Després d’analitzar les tres opcions, l’opció més interessant és la tercera, el municipi de Albalate del Arzobispo, que té la velocitat mitjana més alta i un predomini de la direcció del vent més gran comparant amb les altres opcions. Això evitarà la instal·lació d’un sistema d’orientació, fent més econòmic el projecte.

Per tant, s’elabora un anàlisi topogràfic del relleu de la zona, per trobar el punt més alt per situar l’aerogenerador, degut que hi haurà vents més ràpids i es podrà generar més electricitat. Es proposa el punt amb coordenades 41°06'32.5"N 0°29'08.0"W. Té una elevació de 500 metres sobre el nivell del mar, envers els 340 metres del centre urbà del poble. A continuació es pot observar on estarà situat l’aerogenerador, mitjançant una imatge per satèl·lit i una del relleu.[29]

6. Dimensionament de la turbina eòlica

6.1 Càlculs preliminars del disseny d'una turbina eòlica

Per poder realitzar el dimensionament i el disseny dels diferents components d'una turbina eòlica, primer s'han de calcular i especificar els diferents paràmetres i característiques.

6.1.1 Velocitat nominal i potència nominal

Una vegada seleccionat el lloc d'instal·lació s'ha de determinar les mides de la turbina eòlica per subministrar l'electricitat necessària. Per fer els càlculs es necessita saber la velocitat mitjana i la velocitat nominal que tindrà la turbina eòlica en el rotor, degut que l'esmentada anteriorment seria la que hi hauria en el centre urbà, el lloc d'instal·lació de la turbina eòlica està més elevat que el poble i la torre fa elevar encara més el rotor. Se selecciona una turbina amb 3 aspes degut que és la que produeix més rendiment envers el seu cost econòmic, a l'afegir més aspes no millora substancialment el rendiment de generació d'energia, també és el que s'utilitza en la indústria.

A l'hora de calcular l'àrea d'escombrada d'un aerogenerador, és molt important el valor del diàmetre del rotor degut que com es pot observar en la següent imatge una típica turbina amb un generador elèctric de 500 kW sol tenir un rotor d'uns 40 metres. Si es dobla el diàmetre del rotor, s'obtindrà una àrea quatre vegades més gran, a l'estar elevat al quadrat. Això significa que també s'aconseguirà del rotor una potència disponible quatre vegades més gran. Els números de la imatge són una aproximació, degut que els aerogeneradors s'optimitzen segons la ubicació geogràfica i les seves condicions meteorològiques.

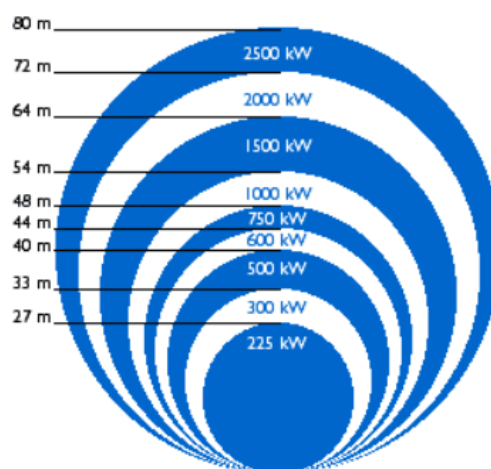


Fig. 6.1: Potència nominal segons el diàmetre del rotor [30]

Mitjançant un programa de càlcul de l'associació de la indústria eòlica danesa introduint la velocitat mitjana a una altura de 10 metres es calcula la velocitat a diferents altures segons el tipus de rugositat del terreny. Una alta rugositat de classe 3 o 4 fa referència a un paisatge amb molts arbres i edificis, mentre que a la superfície del mar li correspon una rugositat de classe 0. Es considera una rugositat de classe 4 pel fet que la velocitat mitjana és al centre urbà. Es pot observar l'evolució logarítmica de la velocitat envers l'altura. [30]

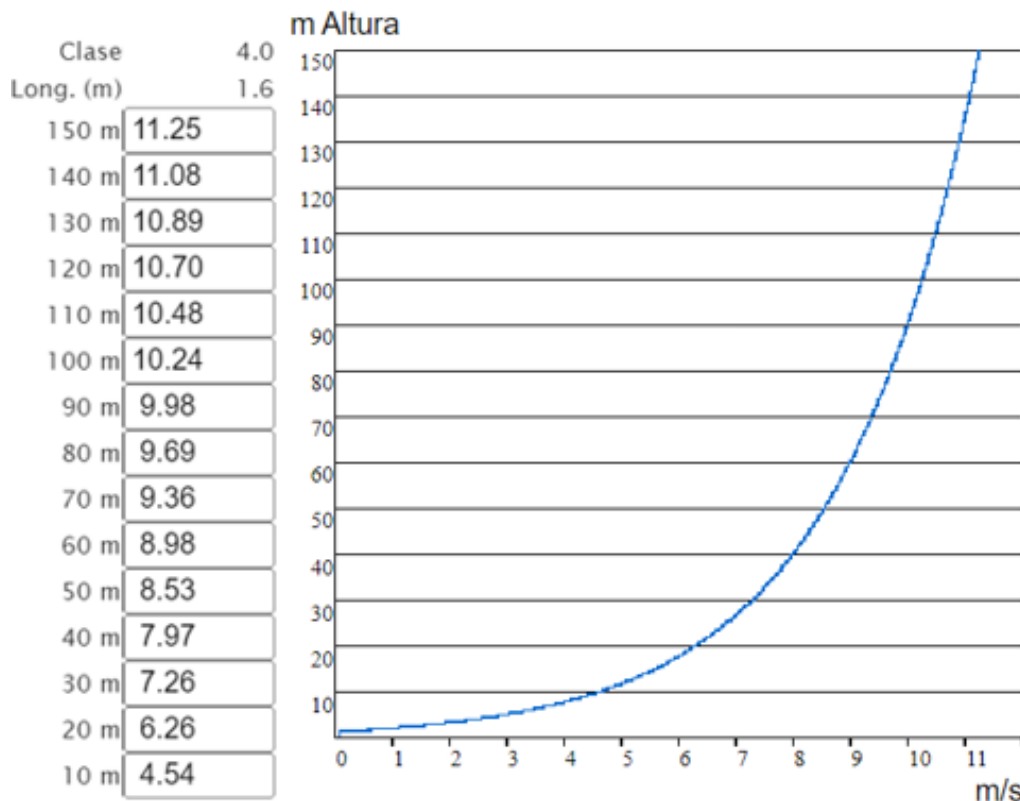


Fig. 6.2: Evolució de la velocitat del vent segons l'altura

Abans de calcular la potència nominal de l'aerogenerador s'ha de saber quantes hores estarà en funcionament, per saber l'energia que generarà al llarg d'un any. Un potencial eòlic de 2.500 hores en un any es considera mitjà, encara que hi ha llocs que se superen les 4.000 hores de funcionament. Per poder fer el projecte el més realista possible, es cerca els estudis meteorològics de parc eòlics que estan instal·lats en aquesta zona, degut que és una zona amb les condicions ideals per aquesta tecnologia. Llavors es troba un parc eòlic en el municipi d'Alloza, a uns 20 km al sud de l'emplaçament de la ubicació de la turbina eòlica dissenyada en aquest projecte. En aquest estudi es considera una producció neta de 2.988 hores, per tant és superior a la mitjana esmentada anteriorment, s'escull aquesta informació per la similitud i la insuficiència de recursos disponibles per poder desenvolupar aquestes dades. [31]

Per calcular la mida de les aspes de l'aerogenerador es fa mitjançant la fórmula de la potència nominal. On aquesta es calcula a partir de la producció neta obtinguda anteriorment i les demandes energètiques calculades anteriorment.

$$\text{Potència nominal} = \frac{\text{Demandes energètiques}}{\text{Producció neta}} = \frac{2.664 \text{ MWh}}{2.988 \text{ h}} = 0.892 \text{ MW} \quad (6.1)$$

Es considera una potència nominal d'1 MW, per tal de fer una selecció conservadora i obtenir suficient electricitat per subministrar al poble, pel fet que determinar amb exactitud les hores que està en funcionament l'aerogenerador és gairebé impossible a causa de la quantitat de variables i factors externs que poden alterar aquest valor. Per tant, s'estima una producció anual per sobre de les demandes energètiques, una producció de 2.988 MW, un 110% de les demandes del poble de 2.000 habitants. Aconseguint un cert marge per poder exportar energia a altres pobles en cas d'haver-hi superàvit i en el cas que baixi la producció hi haurà un marge del 10%.

A partir de la potència nominal de l'aerogenerador es pot determinar l'altura que tindrà la torre per tal de poder fer la distribució de Weibull. Un aerogenerador d'una potència nominal d'1 MW usualment té torres de 80 m a 100 m d'altura, llavors per obtenir la màxima velocitat s'escull una torre de 100 m. Aquesta elecció es deguda perquè el principal objectiu es subministrar la totalitat de la demanda energètica del poble, encara que el cost addicional de cada 10 metres sigui d'uns 15.000€, en conseqüència, aquest cost és menor que instal·lar dues turbines en comptes d'una. Llavors hi haurà una velocitat mitjana de 10,24 m/s i la velocitat nominal suggerida és d'11,5 m/s segons el diagrama de Weibull.

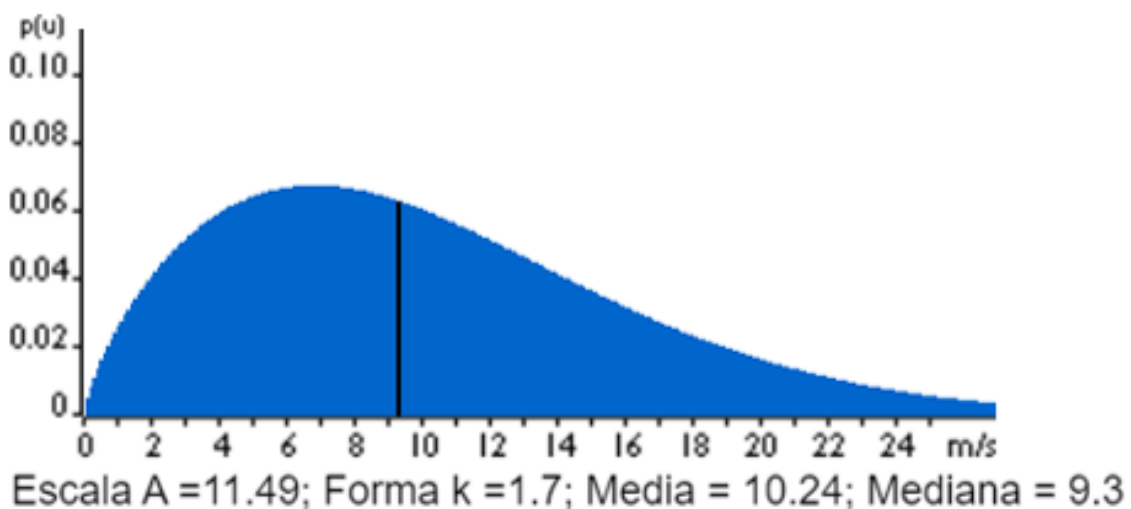


Fig. 6.3: Distribució de Weibull

6.1.2 Velocitat específica λ

La velocitat específica (λ) és el quocient entre la velocitat tangencial ($\omega_n * R$) del punt més exterior sobre l'aspa a partir de l'eix de rotació, també coneguda com la velocitat en la punta de l'aspa i la velocitat nominal del vent. Serveix per comparar el funcionament de màquines eòliques diferents.

$$\lambda = \frac{\text{Velocitat en la punta de l'aspa}}{\text{Velocitat del vent}} = \frac{\omega_n * R}{V} = \frac{\pi * D * n}{60 * V} \quad (6.2)$$

A l'hora d'escollir un valor s'ha de tenir en compte que la velocitat específica es directament proporcional a la velocitat en la punta de l'aspa, per tant, aquesta velocitat no ha de superar la velocitat del so per evitar problemes de cavitació. S'obtenen les següents dades orientatives per seleccionar la velocitat específica òptima:

- 8 a 24 aspes $\lambda = 1$
- 6 a 12 aspes $\lambda = 2$
- 3 a 6 aspes $\lambda = 3$
- 2 a 4 aspes $\lambda = 4$
- 2 a 3 aspes $\lambda \geq 5$

L'aerogenerador d'aquest projecte és de 3 aspes, per tant hi ha varies opcions per escollir, les turbines eòliques industrials d'aquesta mida tenen una velocitat específica entre 7 i 9, per tant, se selecciona un valor de $\lambda = 7$, degut que és on el coeficient de potència i parell són màxims. Es pot observar en la següent imatge com varia la geometria de l'aspa segons la velocitat específica.

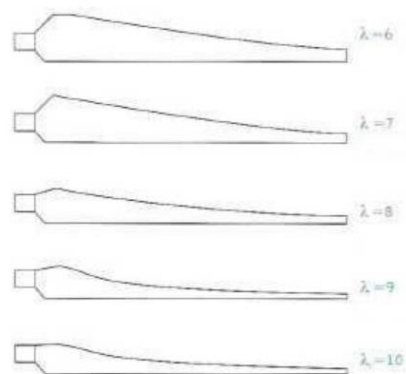


Fig. 6.4: Geometria de l'aspa segons la velocitat específica [33]

6.1.3 Coeficient de potència

El coeficient de potència màxim segons la llei de Betz seria de 59,3%, aquest coeficient és considerant un rotor ideal, per obtenir un valor més aproximat s'ha d'observar casos experimentals com es pot observar en la següent imatge, on un aerogenerador tripala pot aconseguir un coeficient de potència fins al voltant del 50%.

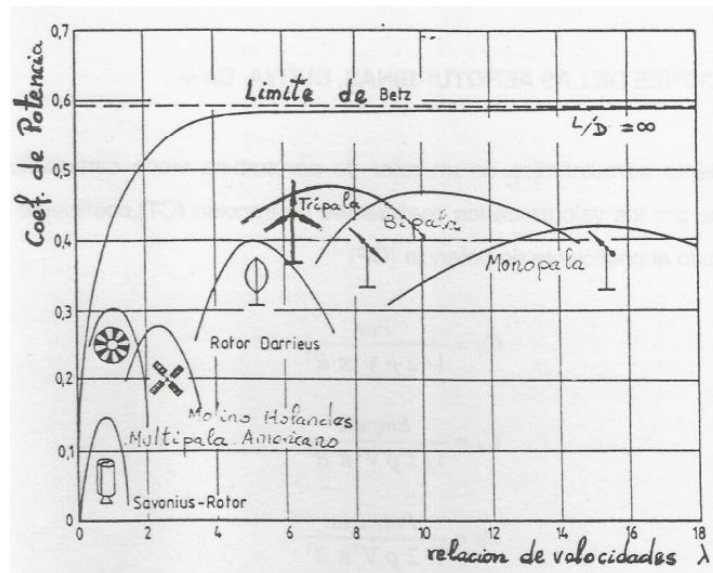


Fig. 6.5: Valors de C_p segons tipus d'aerogeneradors [33]

En la següent fotografia es pot observar una gràfica amb diferents valors del coeficient de potència segons la velocitat específica en aerogeneradors ràpids obtinguda experimentalment.

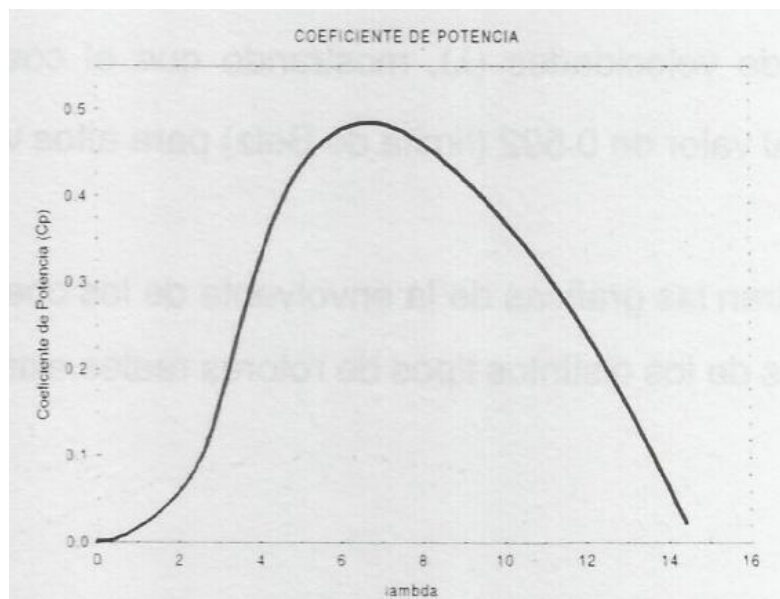


Fig. 6.6: Coeficient de potència per aerogeneradors ràpids [33]

L'aerogenerador estudiat en aquest projecte té una velocitat específica $\lambda=7$, com es va explicar se seleccionava aquest valor perquè és on el coeficient de potència té el valor màxim per a eòliques ràpides així el coeficient de potència és $C_p = 0,47$, és a dir, l'aerogenerador només podrà obtenir un 47% de la potència disponible del vent.

6.1.4 Àrea i diàmetre del rotor

El rendiment total expressat en la següent fórmula és la multiplicació del rendiment dels diferents components que conformen l'aerogenerador explicat en el punt 3.1.2.

- Rendiment de l'hèlix: 85%
- Rendiment del multiplicador: 98%
- Rendiment de l'alternador: 95%
- Rendiment del transformador: 98%

Posteriorment es calcula l'àrea d'escombrada del rotor amb una densitat de l'aire d' $1,2 \text{ kg/m}^3$, una velocitat nominal d' $11,5 \text{ m/s}$, el coeficient de potència del 47% , el rendiment total del 78% i la potencia nominal d' 1 MW . [32]

$$\text{Àrea} = \frac{2 * \text{Potència nominal}}{\rho * v^3 * C_p * \eta_t} = \frac{2 * 1.000.000}{1,2 * 11,5^3 * 0,47 * 0,78} = 2.989,25 \text{m}^2 \quad (6.3)$$

$$\text{Àrea} = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 \rightarrow d = \sqrt{\frac{\text{Àrea} * 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{2.989,25 * 4}{\pi}} = 61,69 \text{m} \rightarrow 62 \text{m} \quad (6.4)$$

Mitjançant els càlculs s'obté que el diàmetre del rotor és de 62 metres, per tant, la mida de cada aspa és de 30 metres, degut es considera una mida de 2 metres de caixa. Aquestes serien les característiques de la turbina eòlica amb les dades de demanda energètica anual.

6.1.5 Àrea i diàmetre del rotor en hivern i estiu

Es calcula també les característiques d'una possible turbina eòlica segons les demandes energètiques en hivern i en l'estiu. Es replica el procediment anterior canviant la velocitat mitjana en els mesos ventosos i els mesos sense tant de vent, la producció neta en hores es divideix en dos. En hivern hi hauria una velocitat de $5,07 \text{ m/s}$, ajustant segons l'altura de la

torre hi haurà una velocitat nominal de 12,79 m/s. En canvi, en l'estiu hi hauria una velocitat de 4 m/s, ajustant segons l'altura de la torre hi haurà una velocitat nominal de 10,3 m/s.

Es calcula la potència nominal en els diferents casos amb la respectiva demanda energètica. En hivern (H) i estiu (E).

$$\text{Potència nominal } H = \frac{\text{Demandes energètiques}}{\text{Producció neta}} = \frac{1.428 \text{ MWh}}{1.494 \text{ h}} = 0.96 \text{ MW} \quad (6.5)$$

$$\text{Potència nominal } E = \frac{\text{Demandes energètiques}}{\text{Producció neta}} = \frac{1.236 \text{ MWh}}{1.494 \text{ h}} = 0.83 \text{ MW} \quad (6.6)$$

S'observa com el valor és similar al valor calculat anteriorment i a l'escollir 1 MW anteriorment, abasta les dues possibilitats. Es procedeix a calcular el valor de l'àrea i diàmetre. En hivern (H) i estiu (E).

$$\text{Àrea } H = \frac{2 * \text{Potència nominal}}{\rho * v^3 * C_p * \eta t} = \frac{2 * 960.000}{1,2 * 12,79^3 * 0,47 * 0,78} = 2.086 \text{ m}^2 \quad (6.7)$$

$$\text{Àrea } H = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 \rightarrow d = \sqrt{\frac{\text{Àrea} * 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{2.086 * 4}{\pi}} = 51,54 \text{ m} \rightarrow 52 \text{ m} \quad (6.8)$$

$$\text{Àrea } E = \frac{2 * \text{Potència nominal}}{\rho * v^3 * C_p * \eta t} = \frac{2 * 830.000}{1,2 * 10,3^3 * 0,47 * 0,78} = 3.453,21 \text{ m}^2 \quad (6.9)$$

$$\text{Àrea } E = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 \rightarrow d = \sqrt{\frac{\text{Àrea} * 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{3.453,21 * 4}{\pi}} = 66,31 \text{ m} \rightarrow 66 \text{ m} \quad (6.10)$$

Analitzant els resultats s'obté un diàmetre de 52 m en hivern i 66 m en l'estiu, un valor similar als 62 m calculats anteriorment, per tant, en hivern es podrà satisfer el subministrament energètic sense cap problema, en l'estiu és on pot haver-hi més risc de no poder subministrar el 100%, degut al menor valor de la velocitat nominal del vent.

6.1.6 Velocitat de rotació del rotor

A partir de la fórmula de la velocitat específica, s'aïlla la velocitat de gir de l'aerogenerador en condicions normals amb la següent expressió:

$$n = \frac{60 * V * \lambda}{\pi * D} = \frac{60 * 11,5 * 7}{\pi * 62} = 24,798 \text{ rpm} \quad (6.11)$$

A partir de 11,5 m/s de velocitat de vent les pales giren sobre el seu propi eix, cosa que fa que les revolucions es mantinguin pràcticament constants, així com el parell de rotacions a l'eix. Si el sistema de canvi de pas de les pales tingués un mal funcionament provocant un augment de les revolucions a l'eix de la màquina eòlica, aquesta entraria en parada per mitjà de l'actuació del fre de disc situat a l'eix d'alta velocitat.

6.1.7 Parell desenvolupat al motor

El coeficient de parell en les turbines eòliques d'eix horitzontal ve donat per l'expressió:

$$C_Q = \frac{Q}{2 * \rho * V^2 * \pi * R^3} = \frac{Q}{2 * \rho * V^2 * A * R} \quad (6.12)$$

La velocitat a la qual una turbina eòlica és considerada ràpida o lenta varia depenent del disseny de la turbina i del seu ús previst. En general, una turbina eòlica es considera "ràpida" si la velocitat de rotor arriba als 20-30 revolucions per minut (rpm) o més, mentre que una turbina eòlica es considera "lenta" si la velocitat de rotor és menor a 20 rpm. Aquest concepte és important a l'hora de seleccionar el coeficient del parell segons les següents gràfiques.

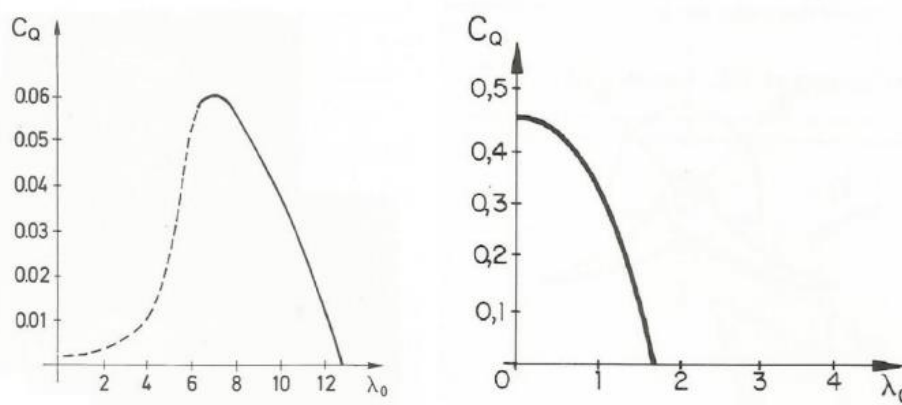


Fig. 6.7: Coeficient del parell per turbines eòliques ràpides (esquerra) i lentes (dreta) [33]

La turbina eòlica d'aquest projecte es pot considerar ràpida segons la seva velocitat de rotació del rotor, per tant, aconseguirà el màxim parell a elevades revolucions, sent el seu parell d'engegada molt petita pel que de vegades necessiten sistemes d'engegada. Llavors amb una velocitat específica de $\lambda = 7$, es considera un $C_Q = 0,06$.

A partir de l'equació esmentada anteriorment del coeficient del parell, es pot obtenir el parell desenvolupat en el motor. El parell de rotacions de l'aerogenerador es manté constant en tot el rang de funcionament, des de la velocitat nominal de vent fins a la velocitat de desconnexió.

$$Q = \frac{C_Q * \rho * V^2 * \pi * R^3}{2} = \frac{0,06 * 1,2 * 11,5^2 * \pi * 31^3}{2} = 445.587,64 \text{ N} * \text{m} \quad (6.13)$$

6.1.8 Àrea mínima d'una aspa

El factor de solidesa σ és el quocient entre l'àrea de les pales i l'àrea escombrada en girar i serveix per conèixer l'àrea mínima de cada pala una vegada coneguda l'àrea d'escombrada i el nombre de pales.

$$\sigma = \frac{A_p}{A} \quad (6.14)$$

Les màquines eòliques d'alta solidesa tenen un gran parell a baixes velocitats i són adequades per al bombeig amb bombes de pistó, mentre que les de baixa solidesa són més adequades per ser acoblades a bombes centrífugues o generadors elèctrics.

A partir de la següent figura s'obté que el valor recomanat de solidesa és $\sigma = 0,05$, (l'eix Y està en escala 100:1, és a dir, quan indica 10 es 0,1), degut que la velocitat específica per a l'aerogenerador d'aquest projecte és de $\lambda=7$.

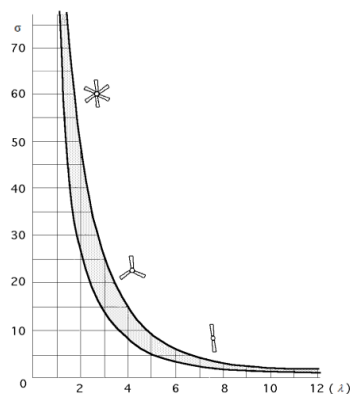


Fig. 6.8: Relació entre el factor de solidesa i la velocitat específica [33]

Per tant, s'obté la següent expressió on una vegada obtinguda l'àrea d'escombrada mínima requerida per proporcionar la potència necessària, es podrà calcular l'àrea mínima de cadascuna de les aspes.

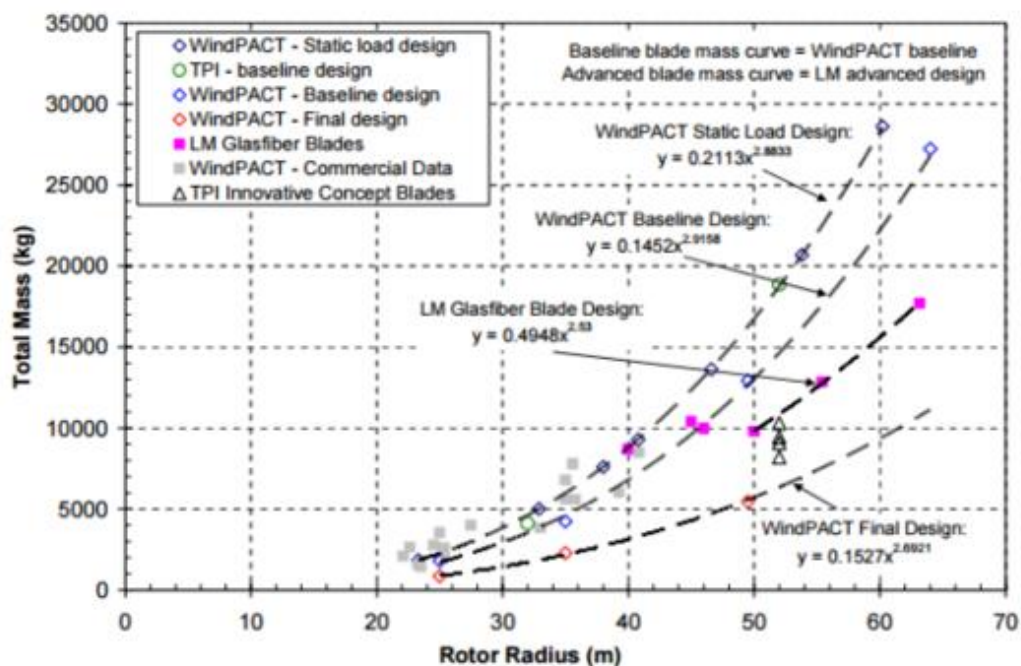
$$A_p = A * 0,05 \quad (6.15)$$

En conseqüència, es pot calcular l'àrea mínima d'una aspa tenint en compte que l'aerogenerador té tres aspes.

$$A_p = \frac{2642,08 * 0,05}{3} = 44,04 \text{ m}^2 \quad (6.16)$$

6.1.9 Massa d'una aspa

La massa d'una pala s'obindrà de la següent figura on es mostra la distribució de la massa en funció del radi del rotor i del tipus de material de fabricació; aquesta gràfica està realitzada pel National Renewable Energy Laboratory sobre la base de dades de diferents fabricants.



Baseline: mass = $0.1452 * R^{2.9158}$ per blade
 Advanced: mass = $0.4948 * R^{2.53}$ per blade
 where R = rotor radius

Fig. 6.9: Massa d'una aspa en funció el radi del rotor [33]

El material generalitzat en la fabricació de les aspes és la fibra de vidre pel que s'adopta aquest material com l'utilitzat, on la distribució de massa segueix l'equació:

$$mB = 0,4948 * R^{2,53} = 0,4948 * 30^{2,53} = 2.701,14 Kg \quad (6.17)$$

6.1.10 Corba de potència

La potència de l'aerogenerador varia amb la velocitat del vent que travessa el rotor. L'expressió és la mateixa que la utilitzada per calcular l'àrea de la turbina eòlica. Per tant, variant la velocitat del vent des de 3 m/s a 25 m/s, que són els rangs de funcionament de l'aerogenerador, es pot observar el següent gràfic amb la corba de potència.

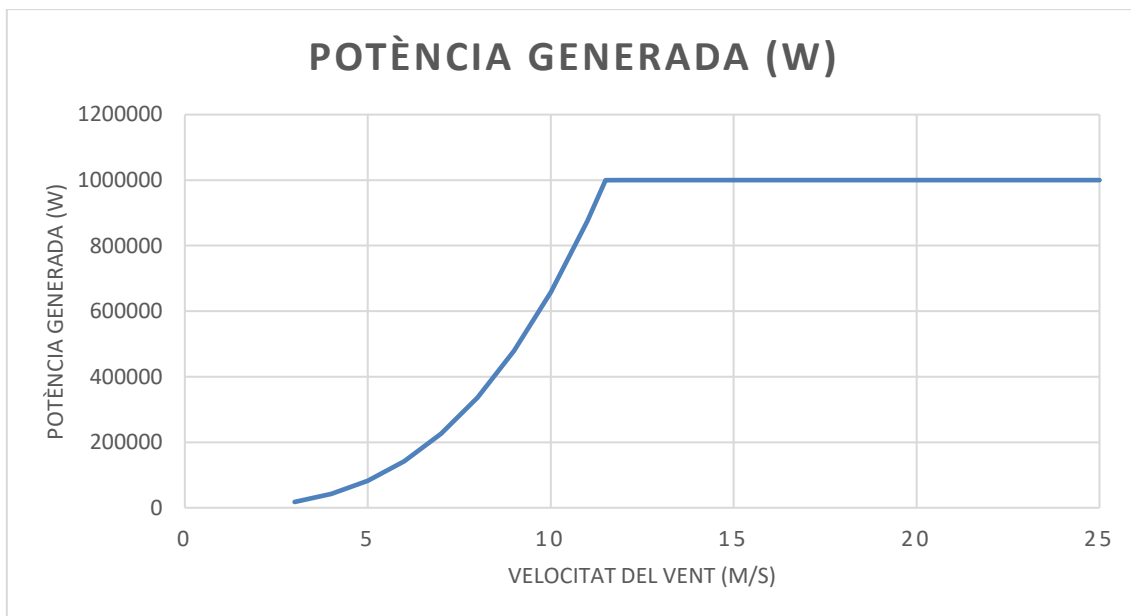


Fig. 6.10: Potència generada segons la velocitat del vent

L'aerogenerador obté la potència requerida amb una velocitat del vent de 11,5 m/s, que és la seva velocitat nominal. A partir d'aquesta velocitat, les pales giren sobre el seu propi eix, el que provoca una disminució de l'àrea de les pales a favor del vent i una pèrdua de rendiment aerodinàmic. Aquestes pèrdues es compensen amb l'augment de la velocitat del vent, mantenint la potència constant. A través de la regulació de l'angle de gir de les pales, es pot mantenir constant la potència i la velocitat de rotació del rotor en un rang més ampli de velocitats de vent.

6.1.11 Comprovació de les característiques de l'aerogenerador

A partir de l'àbac que es mostra en la següent figura es pot comprovar el diàmetre i la velocitat de rotació de les màquines eòliques ràpides en funció de la velocitat del vent i de la potència desitjada. Es fa l'estimació amb els valors calculats i dona un resultat proper als càlculs realitzats. [33]

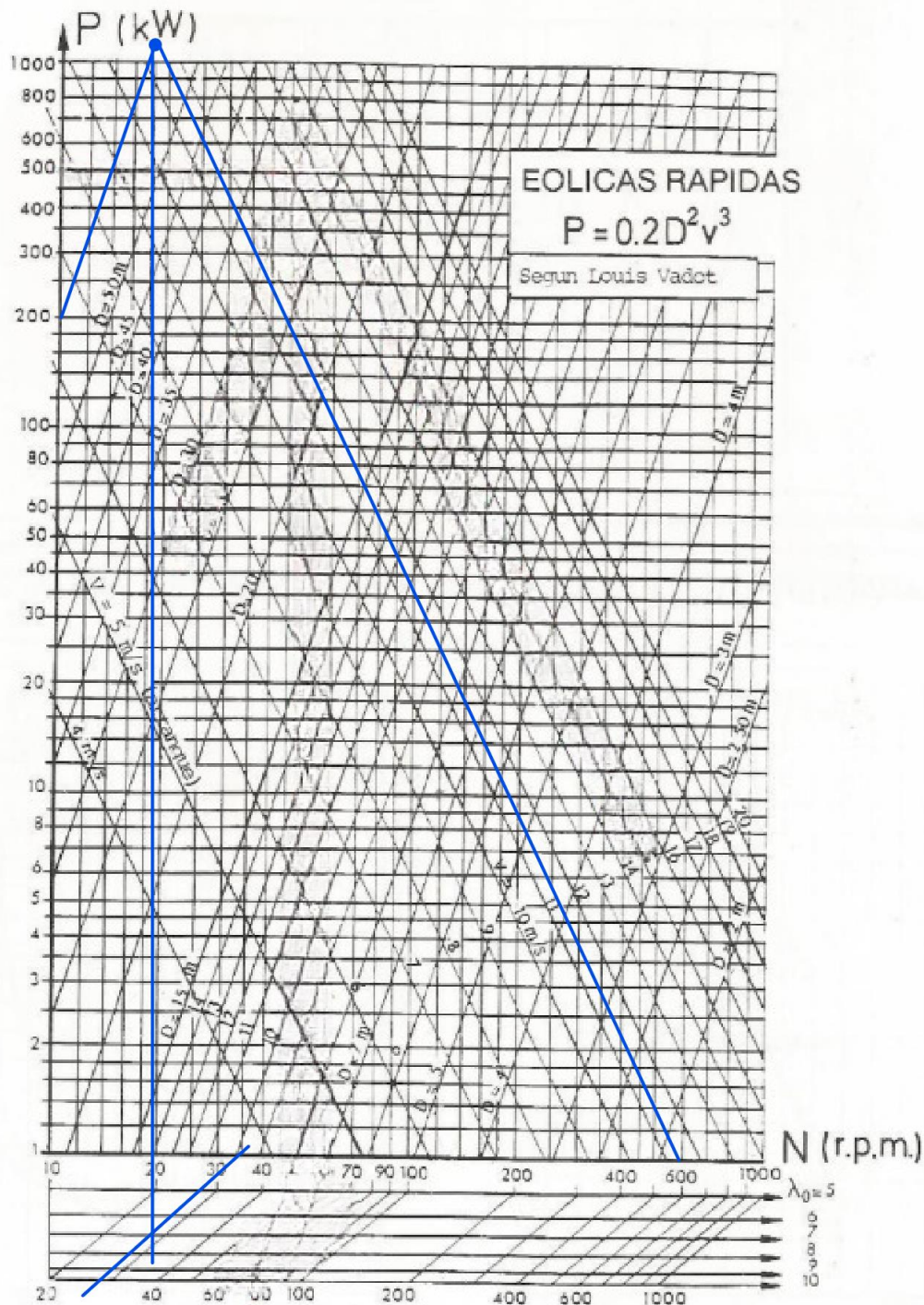


Fig. 6.11: Àbac de màquines eòliques ràpides[33]

6.1.12 Selecció alternador òptim

Per produir electricitat mitjançant el moviment mecànic de les aspes de la turbina eòlica es necessita un alternador. Un alternador per a una turbina eòlica és generalment un generador síncron d'imant permanent. Aquest tipus de generador està dissenyat per operar a velocitats variables, i és capaç de convertir l'energia mecànica de la turbina en energia elèctrica que pot ser utilitzada a la llarg de la xarxa elèctrica.

Aquest alternador ha de funcionar en unes condicions determinades per la xarxa elèctrica del país, que seria una freqüència de 50 Hz. Per tant s'aplica la següent fórmula. On f és la freqüència, n_s és la rotació síncrona i $2p$ el número de pols. La rotació síncrona és la rotació en rpm que genera la caixa multiplicadora, normalment amb una relació de 1:50, per tant, amb una rotació de 24,798 rpm s'obté una rotació en la caixa multiplicadora de 1240 rpm.

$$p = \frac{120 * f}{2 * n_s} = \frac{120 * 50 \text{ Hz}}{2 * 1240 \text{ rpm}} = 2,42 \text{ pols} \quad (6.18)$$

Al obtenir 2,42 pols, s'escull valor directament superior, és a dir, 4 pols, per tant és torna a calcular per saber la nova rotació síncrona i la relació de la màquina multiplicadora a seleccionar.

$$n_s = \frac{120 * f}{p} = \frac{120 * 50 \text{ Hz}}{4} = 1500 \text{ rpm} \quad (6.19)$$

Per tant l'alternador a escollir haurà de tenir una potència nominal al voltant de 1000 kW i 4 pols i un caixa multiplicadora amb una relació de 1:60,5. Es presenten unes surgències dels models a instal·lar.

L'alternador síncron de l'empresa Turbo Systems Iberia, S.L.U, amb una configuració de contacte de 4 pols, una freqüència de 50 Hz i potència de 55 kW a 2000 kW. Amb refrigeració d'aire i aigua. [35]

La caixa multiplicadora de l'empresa Sogears és una bona opció, amb una trajectòria fent caixes multiplicadores de 1500 rpm i relacions de 1:50 i també on es pot fer la comanda amb les necessitats del projecte. [36]

6.2 Especificacions de l'aerogenerador

Una vegada calculades totes les especificacions es poden resumir en una taula on ens indiqui tota la informació sobre l'aerogenerador i l'emplaçament on està instal·lada.

ESPECIFICACIONS DE L'AEROGENERADOR	
Termini municipal	Albate del Arzobispo
Direcció del vent predominant	NO (Nord-Oest)
Coordenades de l'aerogenerador	41°06'32.5"N 0°29'08.0"W
Classe de rugositat	Classe 4
Número de aspes	3
Velocitat mitjana	10,24 m/s
Velocitat nominal	11,5 m/s
Velocitat del vent Cut-in	3 m/s
Velocitat del vent Cut-out	25 m/s
Producció neta en hores	2.988 h
Potència Nominal	1 MW
Altura de la torre	100 m
Àrea d'escombrada	2.989,25 m ²
Diàmetre del rotor	62 m
Longitud de l'aspa	30 m
Producció elèctrica anual	2.988 MW
Velocitat de rotació del rotor	24,798 rpm
Àrea mínima d'una aspa	44,04 m ²
Parell motor	445.587,64 N*m
Massa d'una aspa	2.701,14 Kg

Taula 6.1: Especificacions de l'aerogenerador

6.3 Selecció del perfil Alar òptim

L'eficiència de les turbines eòliques depèn en gran manera del disseny aerodinàmic de les seves pales, per això és important escollir un perfil que proporcioni el millor rendiment. Institucions com la NASA i el NREL s'han dedicat a analitzar i dissenyar perfils específics per a molins d'energia eòlica que evitin la brutícia acumulada i reduiran el manteniment. El perfil ha de tenir un alt coeficient de sustentació i un coeficient d'arrossegament baix per a un rendiment òptim.

Per tant, es procedirà a seleccionar uns perfils alars utilitzats en la indústria i s'analitzaran per tal d'escollir l'opció ideal, per les necessitats d'aquest projecte. S'han seleccionat els següents perfils alars:

- NACA 0012: Aquest és un dels perfils NACA més comunament utilitzats a la indústria eòlica a causa del seu bon equilibri entre rendiment i estabilitat.
- NACA 4412: Aquest perfil NACA és conegut pel seu bon rendiment en una àmplia gamma de velocitats de vent i per la seva estabilitat a vents forts.
- NACA 2412: Aquest és un dels perfils NACA conegut pel seu bon equilibri entre rendiment i estabilitat, cosa que el fa adequat per a una àmplia gamma de velocitats de vent. També és conegut per la seva capacitat per operar en vents forts i la seva capacitat per reduir el soroll generat per la turbina.

El nombre de Reynolds és rellevant per a calcular les corbes polars del perfil d'una pala, ja que afecta els valors dels coeficients de sustentació (CL) i d'arrossegament (CD) en funció de l'angle d'atac (α). Es calcula per a cada secció de la pala i es fa servir la corda com a longitud característica. La densitat del fluid i viscositat dinàmica del fluid, són respecte al aire i són $1,267 \text{ Kg/m}^3$ i $1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Kg/m} \cdot \text{s}$ respectivament.

Com que no es coneix la mida de la corda, l'estimem. Per això es considera que és, aproximadament, el 6% de la longitud de la pala. $L_c = 0,06 \cdot R = 0,06 \cdot 30 = 1,8$.

$$R_e = \frac{\rho * v * L_c}{\mu} = \frac{1,267 * 11,5 * 1,8}{1,8 \cdot 10^{-5}} = 1.457.028 \quad (6.20)$$

Una vegada calculat el nombre de Reynolds, s'ha de determinar el N_{crit} , valor que classifica el tipus de turbulència que estarà exposada la turbina eòlica. Es considera un valor de 9, degut que és un túnel de vent mitjà.

Per obtenir el valor de l'angle d'atac òptim cal obtenir la màxima la relació entre els coeficients de sustentació i d'arrossegament del perfil. Per això, coneixent el valor del Número de Reynolds i el valor NCrit, es poden seleccionar les corbes polars del perfil triat que corresponen a les característiques d'aquest projecte. S'obté per la corba polar seleccionada els valors dels coeficients C_l i C_d , segons l'angle d'atac. En els Annexos es troben les gràfiques completes des de on s'han extret la informació per poder realitzar les següents gràfiques i valors òptims.

6.3.1 NACA 0012

Com es pot observar en el següent gràfic l'angle d'atac òptim és de $9,25^\circ$ en el punt màxim de 81,96 de la relació dels coeficients de sustentació i arrossegament. [34]

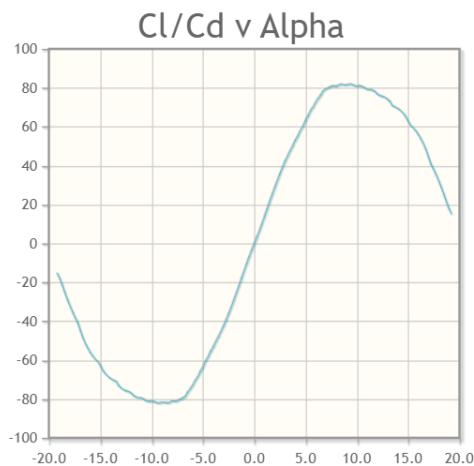


Fig. 6.12: Relació entre coeficients de lift & drag i angle d'atac en la NACA 0012 [34]

6.3.2 NACA 4412

Com es pot observar en el següent gràfic l'angle d'atac òptim és de $5,25^\circ$ en el punt màxim de 129,37 de la relació dels coeficients de sustentació i arrossegament.

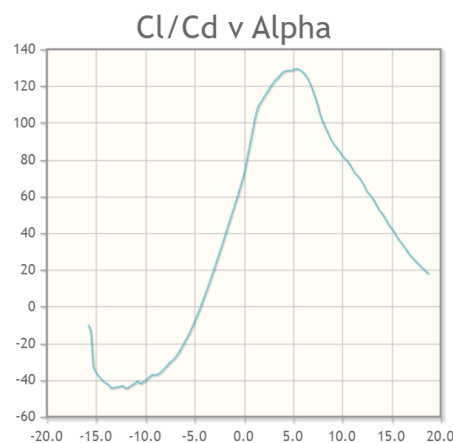


Fig. 6.13: Relació entre coeficients de lift & drag i angle d'atac en la NACA 4412 [34]

6.3.3 NACA 2412

Com es pot observar en el següent gràfic l'angle d'atac òptim és de 4,5° en el punt màxim de 101,38 de la relació dels coeficients de sustentació i arrossegament.

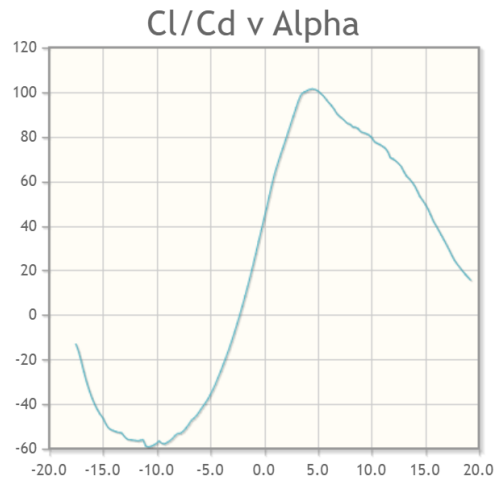


Fig. 6.14: Relació entre coeficients de lift & drag i angle d'atac en la NACA 2412 [34]

A partir de la informació exposada, es pot realitzar la següent taula on es recopilen les dades més importants de les NACAs escollides. Per tant, es pot analitzar els resultats i escollir la NACA més adient per el projecte.

Perfil Alar	Angle d'atac òptim	Cl	Cd	Cl/Cd
NACA 0012	9,25°	1,0368	0,01265	81,961
NACA 4412	5,25°	1,0518	0,00813	129,373
NACA 2412	4,5°	0,7624	0,00752	101,383

Taula 6.2 Especificacions de les NACA

Amb el programa XFLR5 es pot crear les següent figures comparatives, on s'observen les diferents formes dels perfils alars i la relació dels coeficients de sustentació i arrossegament respecte l'angle d'atac. La NACA escollida és la **NACA 4412** degut que té la relació de coeficients de sustentació i arrossegament més gran, llavors garanteix el rendiment més òptim.

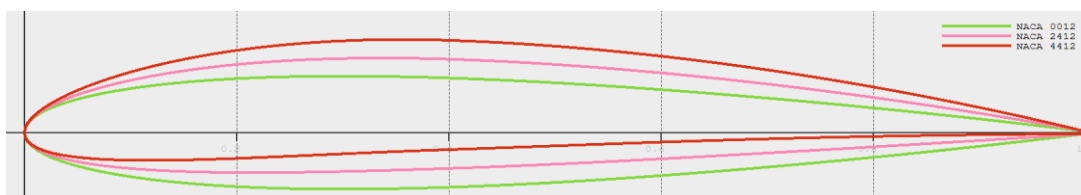


Fig. 6.15: Comparativa dels perfils alars

S'extreu els punts amb les coordenades del perfil alar escollit, en un llibre de text per posteriorment exportar-ho en el programa de simulació. Obtenint el model exacte del perfil alar, per poder procedir a realitzar la simulació. Es segueix el procediment de la referència [41].

Es procedeix a fer una simulació del flux de vent en SolidWorks per comprovar el rendiment del perfil alar escollit. Amb l'opció Wizard, es fa una simulació predeterminada amb un mallat simple, amb l'aire com fluid escollit, la velocitat del vent nominal del projecte 11,5 m/s.

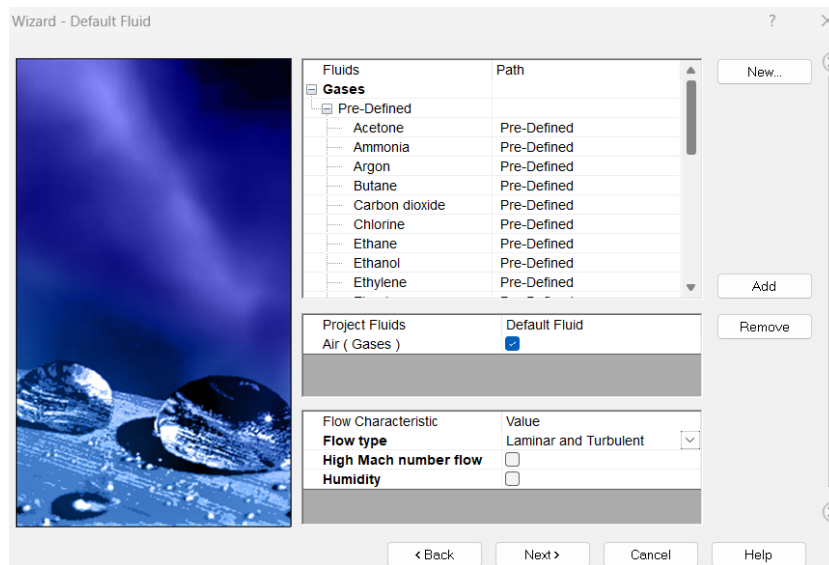


Fig. 6.16: Paràmetres Simulació de la Pressió Dinàmica

Es pot observar en el resultat de la figura següent on la pressió dinàmica és més alta en la part superior i inferior del perfil alar, demostrant la seva eficiència aerodinàmica, permetent que el fluid travessi el model d'una manera òptima.

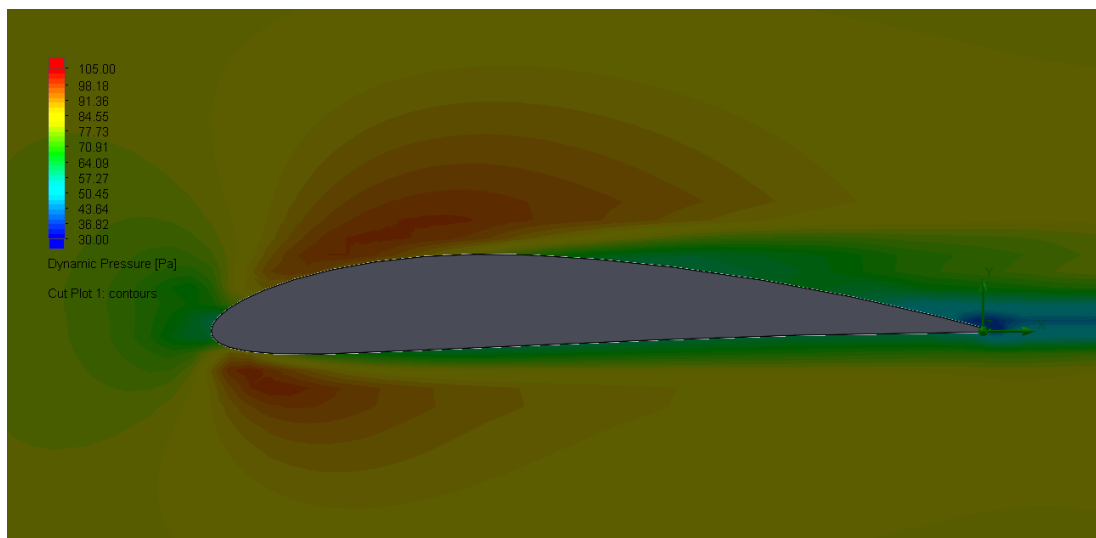


Fig. 6.17: Simulació de la Pressió Dinàmica en la NACA4412

7. Disseny de les aspes i de l'estructura de la turbina eòlica

Es procedirà al disseny de les aspes mitjançant el programa Qblade, aquest programa permet realitzar la forma geomètrica de les aspes i diferents simulacions on s'analitza el seu rendiment i comportament de diferents aspectes a tenir en compte en realitzar disseny. Com simulacions per observar la potència generada amb la velocitat del vent en el lloc de la instal·lació, anàlisi estructural de resistència a la tracció o l'impacte auditiu que pot generar, que no superi els decibels establerts per la normativa. Podent verificar en primera instància si el disseny geomètric fet compleix les necessitats del projecte.

En el programa Qblade es defineix el perfil alar seleccionat anteriorment, el NACA 4412, i un perfil circular per l'inici de l'aspa. Posteriorment, es necessita estipular la llargada de l'aspa que s'ha especificat anteriorment de 30 m, amb 1 metre de radi per la boixa. Llavors el programa amb l'angle d'atac òptim del perfil alar, pot optimitzar els paràmetres de chord i twist, essencials per dur a terme la figura geomètrica de l'aspa.

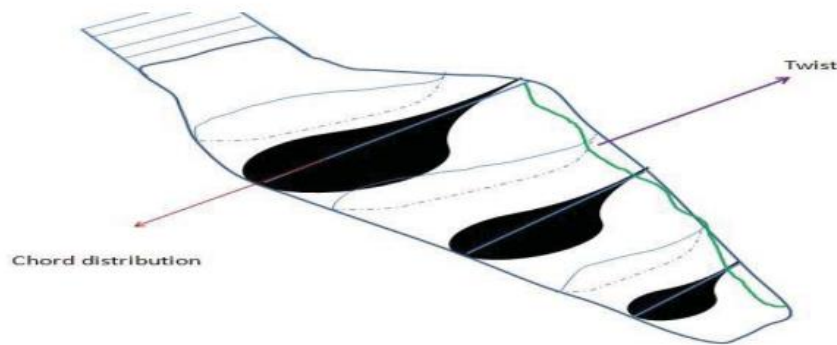


Fig. 7.1: Paràmetres d'una aspa [37]

Per calcular el chord i el twist d'una turbina eòlica, primer cal entendre la Llei de Betz. La Llei de Betz estableix que el màxim rendiment que pot assolir una turbina eòlica és del 59,3% de l'energia cinètica del vent que la travessa. Això és perquè la turbina no pot extreure tota l'energia cinètica del vent sense reduir la velocitat del vent a zero, cosa que és impossible segons la llei de conservació de l'energia. Quan s'ha determinat l'angle d'atac òptim, es pot calcular el chord i el twist de les aspes de la turbina.

El chord es refereix a la longitud de la secció transversal de les aspes, mentre que el twist fa referència a l'angle de gir de les aspes al llarg de la seva longitud. El chord i el twist han de ser dissenyats de manera que les aspes puguin mantenir l'angle d'atac òptim a mesura que giren en diferents velocitats del vent. Això s'aconsegueix mitjançant un perfil de secció transversal adequat i un disseny de twist adequat. En general, un major chord i un twist més gran són beneficiosos per a les turbines eòliques de baixa velocitat, mentre que un menor chord i un menor twist són beneficiosos per a les turbines eòliques d'alta velocitat. No obstant això, cada disseny de turbina és únic i ha de ser optimitzat per a la velocitat del vent i les condicions específiques del lloc on s'instal·larà.

A continuació, es pot veure el diagrama de blocs del procés de càlcul realitzat per el programa.

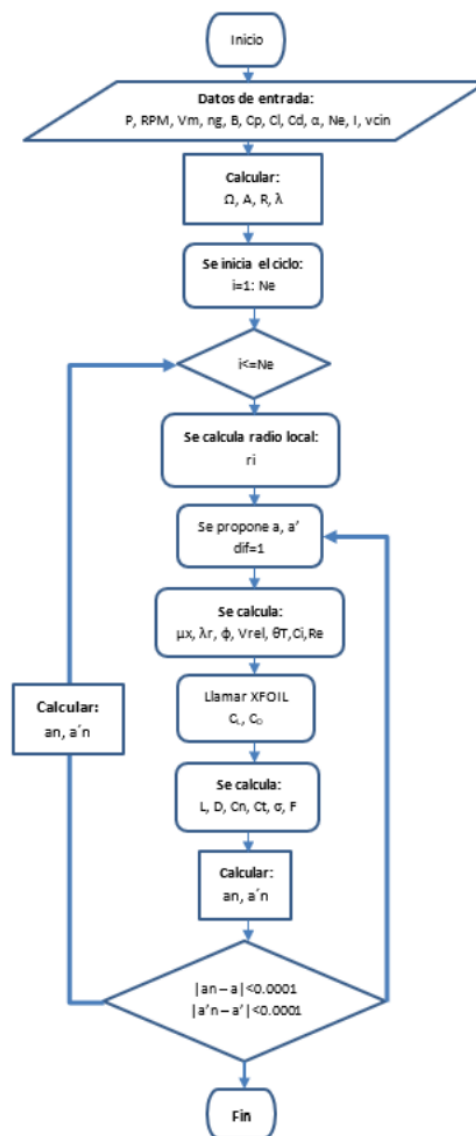


Fig. 7.2: Diagrama de Blocs càlculs Qblade [37]

Per tant, el programa realitzarà els següents càlculs iterant-los per obtenir el resultat més òptim, és a dir, el rendiment més alt. Per calcular el rendiment d'una turbina eòlica utilitzant la Llei de Betz, es poden fer els càlculs següents:

1. Calcular l'energia cinètica del vent: Per fer-ho, cal utilitzar la fórmula, $E = m * 0,5 * v^2$, on E és l'energia cinètica, m és la massa de l'aire que travessa la secció transversal de la turbina per unitat de temps i v és la velocitat del vent.
2. Calcular l'energia que pot extreure la turbina: L'energia que pot extreure la turbina es pot calcular utilitzant la fórmula $E = 0,5 * C_p * A * \rho * v^3$, on C_p és el coeficient de potència, A és la secció transversal de la turbina, ρ és la densitat de l'aire i v és la velocitat del vent.
3. Calcular el coeficient de potència: El coeficient de potència es pot calcular utilitzant la fórmula $C_p = P / (0,5 * C_p * A * \rho * v^3)$, on P és la potència de sortida de la turbina.
4. Calcular el rendiment: El rendiment de la turbina es pot calcular fent servir la fórmula $\eta = P / E$, on P és la potència de sortida de la turbina i E és l'energia cinètica del vent.
5. Calcular el chord: per a cada secció transversal, cal calcular el chord que sigui òptim per a la velocitat del vent i el perfil aerodinàmic. El chord òptim es pot calcular utilitzant la fórmula $C = 2 * A / (C_l * v^2)$, on C és el chord, A és l'àrea de la secció transversal de la pala i v és la velocitat del vent.
6. Calcular el twist: per a cada secció transversal, cal calcular el twist que sigui òptim per a la velocitat del vent i el perfil aerodinàmic. El twist òptim es pot calcular utilitzant la fórmula $T = (\arctan(v / r) - \varphi)$, on T és el twist, v és la velocitat del vent, r és la distància des del centre de la pala fins a la secció transversal i φ és l'angle d'atac òptim.

Un cop s'han calculat aquests valors, es pot comparar el rendiment de la turbina amb el màxim rendiment teòric que es pot assolir segons la Llei de Betz. Si el rendiment de la turbina és inferior al màxim rendiment teòric, es pot ajustar la geometria de la turbina i altres paràmetres per millorar-ne l'eficiència.

Alternativament, es mostrarà un sistema alternatiu, per simplificar la sintetització dels càlculs realitzats internament per al programa. Es mostren les operacions principals que es van iterant en un bucle mitjançant un script de Matlab fins a obtenir en cada posició de l'aspa la longitud de la corda i l'angle de pitch (twist), si el coeficient de potència és màxim. Es pot trobar l'script en els Annexos d'aquest projecte. [42]

Es comença el procés de càlcul amb $a=0$ i $a'=0$.

Es calcula l'angle del flux.

$$\Phi = \arctan\left(\frac{1-a}{(1+a')*\lambda}\right) \quad (7.1)$$

Posteriorment es calcula l'angle de pitch:

$$\theta = \Phi - a \quad (7.2)$$

Amb l'angle del flux calculat i dels coeficients de sustentació i arrossegament del perfil es poden obtenir els coeficients normal i tangencial de les forces que actuen sobre un element de l'aspa.

$$C_n = C_L * \cos \Phi + C_D * \sin \Phi \quad (7.3)$$

$$C_t = C_L * \sin \Phi + C_D * \cos \Phi \quad (7.4)$$

Seguint el mètode BEM es calculen les noves velocitats induïdes axial i tangencial:

$$a = \left(\frac{4 * (\sin \Phi)^2}{\sigma * C_n} + 1\right)^{-1} \quad (7.5)$$

$$a' = \left(\frac{4 * \sin \Phi * \cos \Phi}{\sigma * C_t} + 1\right)^{-1} \quad (7.6)$$

Si l'error comès entre els nous valors de a i a' i els inicials és més gran a una tolerància imposada es repeteix de nou el càlcul prenent aquesta vegada com a valors de partida els últims calculats.

7.1 Disseny de l'aspa

Primer s'introdueix les dades essencials per realitzar l'optimització, serien el valor de la velocitat específica en la punta de la pala $TSR=7$ i l'angle d'atac òptim $5,25^\circ$.

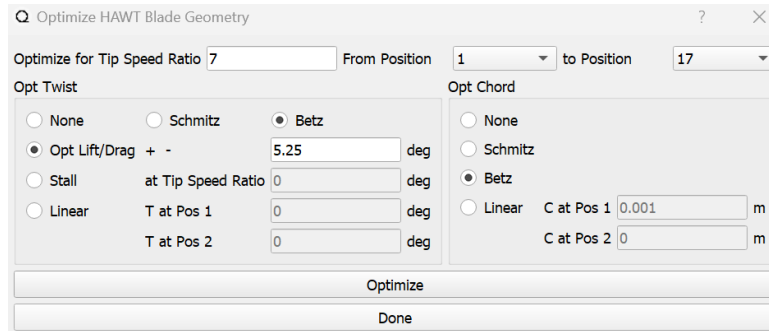


Fig. 7.3: Paràmetres per optimitzar

Aquest seria el procediment que realitza el programa per obtenir la següent taula, amb les dades principals de la geometria d'una aspa. S'imposa la columna de posició a partir de la longitud de l'aspa. S'observa com el chord i el twist va disminuint des de l'inici al final, per garantir el màxim rendiment.

3 blades and 1.00 [m] hub radius				<input checked="" type="checkbox"/> Show Blade Root Coordinates	
	Pos [m]	Chord [m]	Twist [deg]	Foil	Polar
1	0.000	2.000	65.460	Circular_Foil	Circular_Foil_CD1....
2	1.000	2.000	49.758	Circular_Foil	Circular_Foil_CD1....
3	2.000	5.565	33.103	NACA 4412	NACA_4412_Re1....
4	4.000	4.003	19.245	NACA 4412	NACA_4412_Re1....
5	6.000	3.049	11.703	NACA 4412	NACA_4412_Re1....
6	8.000	2.442	7.113	NACA 4412	NACA_4412_Re1....
7	10.000	2.029	4.060	NACA 4412	NACA_4412_Re1....
8	12.000	1.732	1.895	NACA 4412	NACA_4412_Re1....
9	14.000	1.510	0.284	NACA 4412	NACA_4412_Re1....
10	16.000	1.337	-0.960	NACA 4412	NACA_4412_Re1....
11	18.000	1.200	-1.948	NACA 4412	NACA_4412_Re1....
12	20.000	1.088	-2.752	NACA 4412	NACA_4412_Re1....
13	22.000	0.995	-3.419	NACA 4412	NACA_4412_Re1....
14	24.000	0.916	-3.980	NACA 4412	NACA_4412_Re1....
15	26.000	0.849	-4.459	NACA 4412	NACA_4412_Re1....
16	28.000	0.791	-4.873	NACA 4412	NACA_4412_Re1....
17	29.000	0.765	-5.060	NACA 4412	NACA_4412_Re1....

Taula 7.1: Chord i Twist dels segments de l'aspa

En la següent imatge es pot observar un model 3D de les aspes, amb la llargada de cada aspa de 30 metres i un diàmetre del rotor de 2 metres. Llavors es pot aplicar el mètode BEM, ja explicat anteriorment, per obtenir gràfiques interessants que expliquin les seves característiques i especificacions.

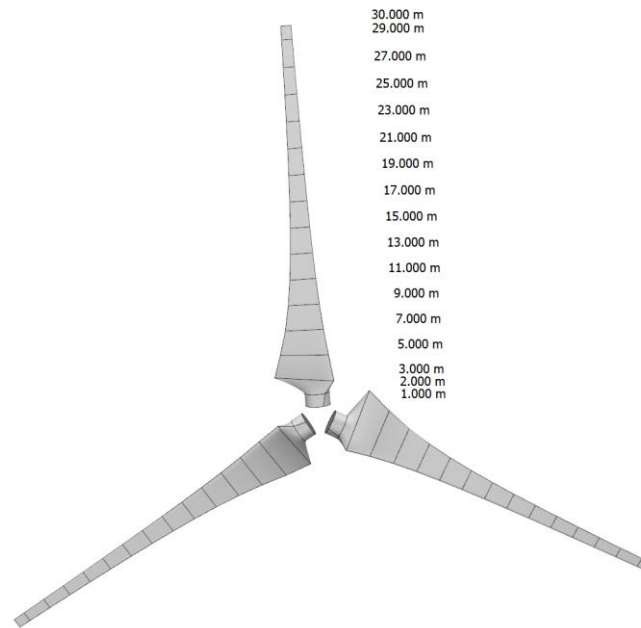


Fig. 7.4: Model 3D del rotor i aspes

7.2 Disseny de l'estructura

Es procedeix al disseny de l'estructura de la turbina eòlica. Es defineix el següent quadre de diàleg. Es selecciona una turbina HAWT amb 3 aspes. La geometria de la turbina és definida per una altura de 100 m, un voladís del rotor de 8 m i un radi de la base de la torre de 2 m i un radi superior de 1,43m. Aquesta relació és definida per les guies d'ús del programa. [37]

A l'hora de determinar el tipus d'estela, és important si es decideix fer un parc eòlic, com afecta l'estela del vent una vegada travessa el rotor. En aquest projecte al només haver-hi una turbina eòlica no té gaire importància, encara que si és rellevant. Hi ha dos tipus.

- Free Vortex: és un mètode que s'utilitza per calcular la distribució de velocitat al rotor d'una turbina eòlica.
- Unsteady BEM: és un mètode que s'utilitza per calcular les càrregues aerodinàmiques a les pales d'una turbina eòlica.

En aquest projecte s'utilitza Unsteady BEM, per realitzar l'estudi de tensions posteriorment.

En la discretització aerodinàmica es defineix:

- Lineal: distribueix els panells de manera uniforme sobre la longitud de l'aspa.
- Cosinus: produeix una discretització més fina prop dels extrems de l'aspa (arrel i punta) i una discretització una mica més gruixuda prop del centre de la fulla.

- Taula: utilitza la taula de definició d'aspes aerodinàmiques com a plantilla per a la discretització aerodinàmica.

Per tant, es decideix per una discretització aerodinàmica lineal per tal de simplificar el model, els càlculs i la simulació resultant. La resta d'elements es deixen per defecte.



Fig. 7.5: Model 3D de la turbina eòlica

The image shows a software interface for configuring a turbine. It is divided into several sections:

- Turbine Name and Rotor:** Turbine Name: TFG; Blade Design: Optimizado; Turbine Type: HAWT (selected); Number of Blades: 3; Up- or Downwind: Upwind (selected); Rotor Rotation: Standard (selected).
- Turbine Version Info:** Version Info: View/Edit
- Turbine Geometry:** Rotor Overhang [m]: 8; Tower Height [m]: 100; Tower Top Radius [m]: 1.43; Tower Bottom Radius [m]: 2; Rotor Shaft Tilt Angle [deg]: 0; Rotor Cone Angle [deg]: 0.
- Wake Type:** Wake Type: Unsteady BEM (selected); Unsteady BEM Parameters: Azimuthal Polar Grid Discretization: 12; Include Tip Loss: Off (selected); Convergence Acceleration Time [s]: 0.
- Aerodynamic Discretization:** Blade Panels: 25; Table (selected); Linear (selected); Cosine (selected).
- Aerodynamic Models:** Dynamic Stall: Off (selected); 2 Point L/D Eval: On (selected); Himmelskamp Effect: Off (selected); Tower Shadow: Off (selected); Tower Drag Coeff. [-]: 0.5.
- Turbine Structural Model:** Use: None (selected); Model Input File: Load File
- Turbine Controller:** Type: Off (selected); Controller DLL: Load File; Controller Params.: Load File

Fig. 7.6: Paràmetres de l'estructura de la Turbina

7.3 Disseny del camp de vent

Per poder realitzar la simulació de la turbina eòlica, primer s'ha de definir el camp de vent que travessarà el rotor de la turbina. Per tant, es procedeix a seleccionar els paràmetres adients amb aquest projecte, una altura de Hub de 100 m i una velocitat mitjana de 10,24 m/s. Per seleccionar la classe de turbina eòlica i la classe de turbulència es defineix cada classe.

- Turbina Classe I: Turbines de gran potència dissenyades per operar en llocs amb vents forts i velocitats de vent mitjana anuals de 10 m/s o més. Són adequades per a àrees amb vents constants i forts, com a llocs marins o en alta mar.
- Turbina Classe II: Turbines de potència mitjana dissenyades per operar en llocs amb velocitats de vent mitjana anuals de 8-10 m/s. Són adequades per a àrees amb vents moderats, com a llocs terrestres amb vents consistents.
- Turbina Classe III: Turbines de baixa potència dissenyades per operar en llocs amb velocitats de vent mitjana anuals de 7-8 m/s. Són adequades per a àrees amb vents moderats a baixos, com a llocs terrestres amb velocitats de vent variables.
- Turbina Classe IV: Turbines de molt baixa potència dissenyades per operar en llocs amb velocitats de vent mitjana anuals de 6-7 m/s. Són adequades per a àrees amb vents baixos, com a llocs terrestres amb velocitats de vent variables i condicions de baixa velocitat del vent.
- Turbulència Classe A: Representa un lloc amb baixa turbulència del vent. És adequada per a àrees amb vents suaus i estables, com a llocs en terrenys oberts o marins.
- Turbulència Classe B: Representa un lloc amb turbulència moderada del vent. És adequada per a àrees amb turbulència del vent mitjana, com a llocs terrestres amb terrenys variats o boscosos.

- Turbulència Classe C: Representa un lloc amb alta turbulència del vent. És adequada per a àrees amb vents turbulents, com a llocs urbans o terrenys muntanyosos.
- Turbulència Classe D: Representa un lloc amb molt alta turbulència del vent. És adequada per a àrees amb vents extremadament turbulents, com a llocs amb edificis alts o terrenys complexos.

Per tant, s'escull una turbina classe II i una turbulència de classe B. En el tipus de vent s'escull el NTM (Normal Turbulence Model), que com diu el propi nom es per models amb una turbulència normal.

Turb Sim		Veers Method	
Grid Parameters			
Name:	TFG		
Seed [-]:	100000		
Time [s]:	200		
Timestep Size [s]:	0.1		
Grid Width [m]:	100		
Grid Height [m]:	100		
Grid Y Points [-]:	20		
Grid Z Points [-]:	20		
Hub Height [m]:	100		
Top Pos: 150.00 m; Bottom Pos: 50.00 m			
Wind Turbine Class			
Turbine Class:	II		
Turbulence Class:	B		
I_ref [%]:	14		
V_ref [%]:	42.5		
Flow Parameters			
Mean Wind Speed [m/s]:	10.2		
Horizontal Inflow [deg]:	0		
Vertical Inflow [deg]:	0		
IEC 61400-1Ed	61400-1Ed3		
Wind Type:	NTM		
Spectral Model:	IECKAI		
<input checked="" type="checkbox"/> Default Profile and Shear			
Wind profile Type:	PL		
Reference Height [m]:	100		
Shear Exponent [-]:	0.2		
Roughness Length [-]:	0.01		
Jet Height [m]:	100		
ETMc value [m/s]:	2		
<input checked="" type="checkbox"/> Remove TurbSim Files			
<input checked="" type="checkbox"/> Close Console			

Fig. 7.7: Paràmetres del camp de vent

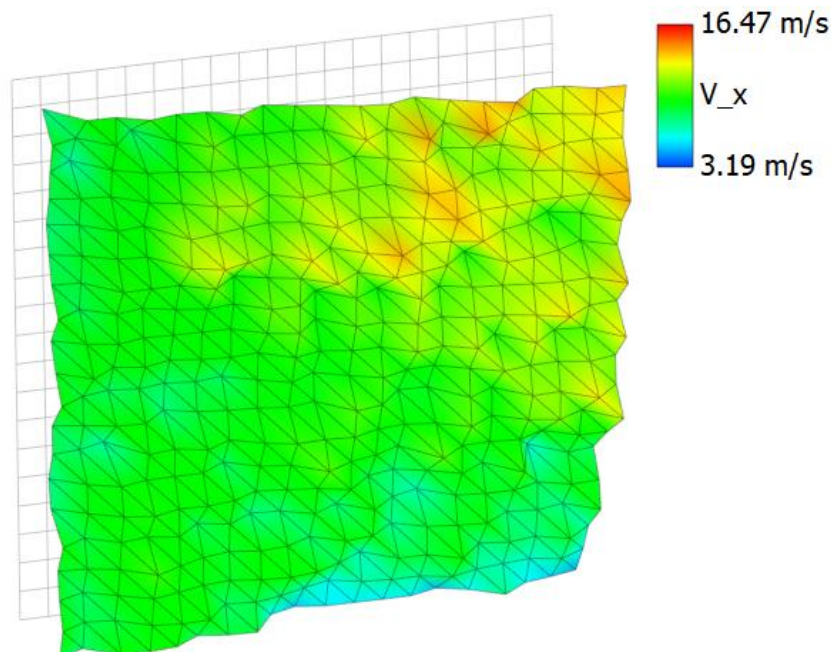


Fig. 7.8: Model 3D del camp de vent

Llavors es creen dos camps de vent extrems, aquests corresponen als casos esmentats anteriorment d'estiu i hivern. On depenen l'època de l'any hi ha més velocitat del vent o menys, llavors s'observarà també aquest efecte en les simulacions.

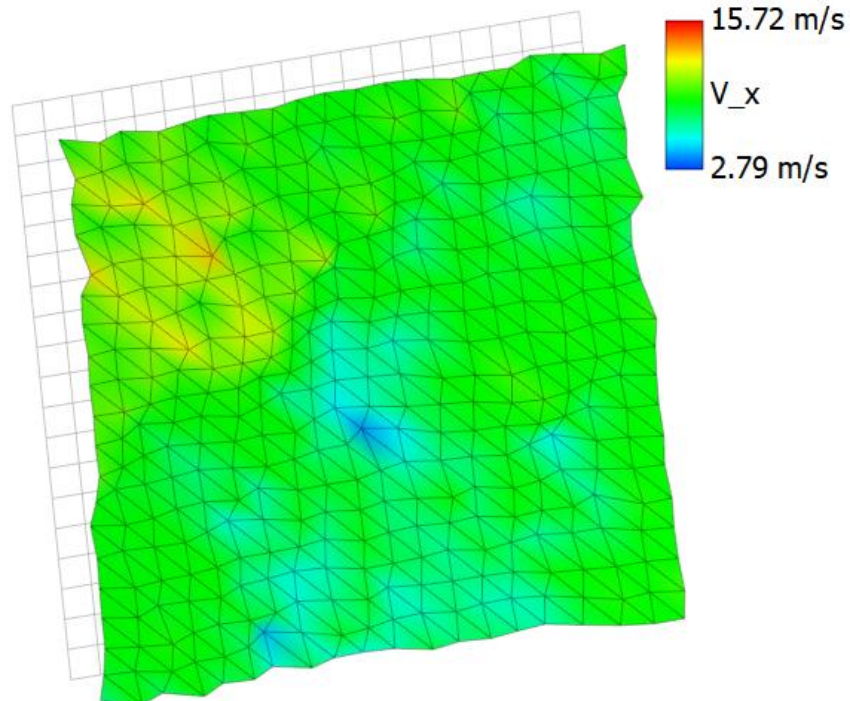


Fig. 7.9: Model 3D del camp de vent en l'estiu

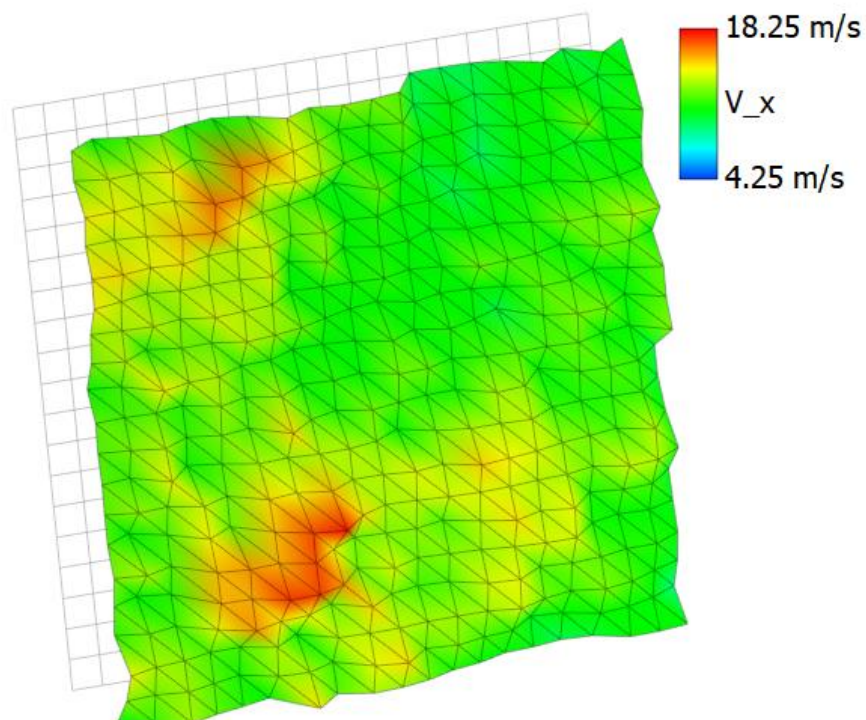


Fig. 7.10: Model 3D del camp de vent en l'hivern

8. Simulacions numèriques per verificar els resultats

8.1 Simulació BEM del rotor

Es defineix la simulació utilitzant BEM al rotor amb els següents paràmetres a partir de la informació proporcionada per al mateix programa en la seva pàgina web on explica el significat de cada valor i proposa uns valors estàndards per als paràmetres comuns. Per tant, es posa la velocitat nominal d'aquest projecte i un collective pitch de 0 graus, ja que per abaratir costos no es valora un sistema d'orientació. [37] [38]

Corrections	Variables
<input type="checkbox"/> DTU Poly BEM	<input type="text" value="11.5"/> Wind Speed [m/s]
<input checked="" type="checkbox"/> Prandtl Tip Loss	<input type="text" value="0"/> Collective Pitch [deg]
<input checked="" type="checkbox"/> 3D Correction	<input type="text" value="1.225"/> Density [kg/m ³]
	<input type="text" value="0.00001647"/> Kinematic Viscosity [m ² /s]
	<input type="text" value="50"/> Discretize Blade into N Elements
	<input type="text" value="1e-06"/> Max Epsilon for Convergence
	<input type="text" value="500"/> Max Number of Iterations
	<input type="text" value="0.1"/> Relax. Factor

Fig. 8.1: Paràmetres simulació BEM

S'obté les següents gràfiques on es pot observar el coeficient de potència en relació la velocitat específica en la punta de l'aspa (TSR), el punt màxim es quan TSR=7 amb un coeficient de potència de 0,47, coincidint amb els càlculs desenvolupats anteriorment.

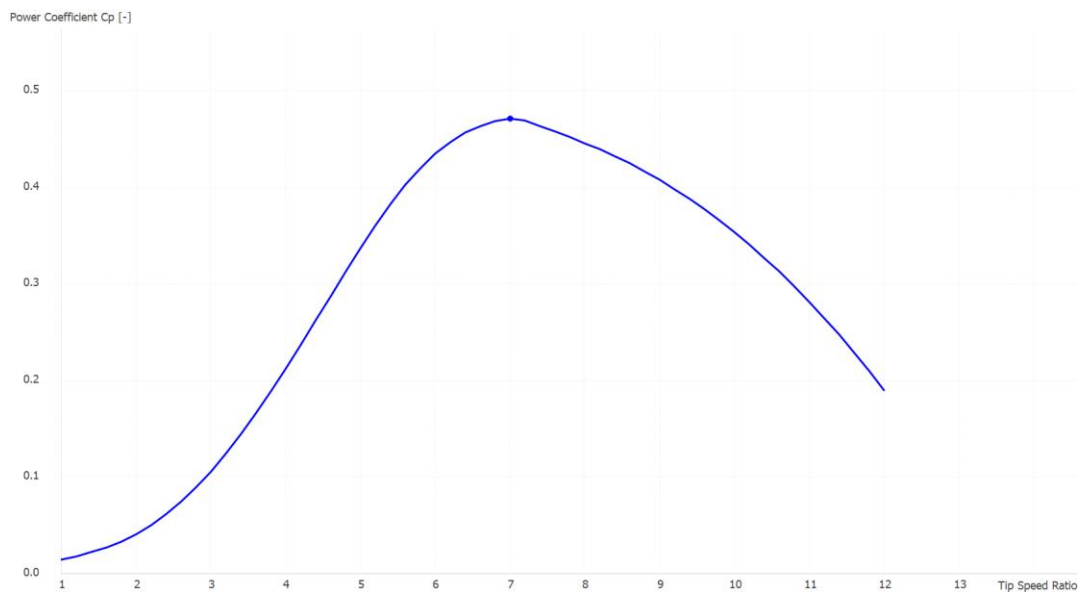


Fig. 8.2: Coeficient de potència envers TSR

El coeficient d'empenta és una mesura de l'eficiència d'un rotor de turbina eòlica per convertir l'energia cinètica del vent en energia mecànica de rotació. És una relació entre la quantitat d'energia cinètica del vent que incideix sobre el rotor i la quantitat d'energia mecànica de rotació que es produeix a l'eix de la turbina. Amb un valor de $C_t=0,88$ quan $TSR=7$.

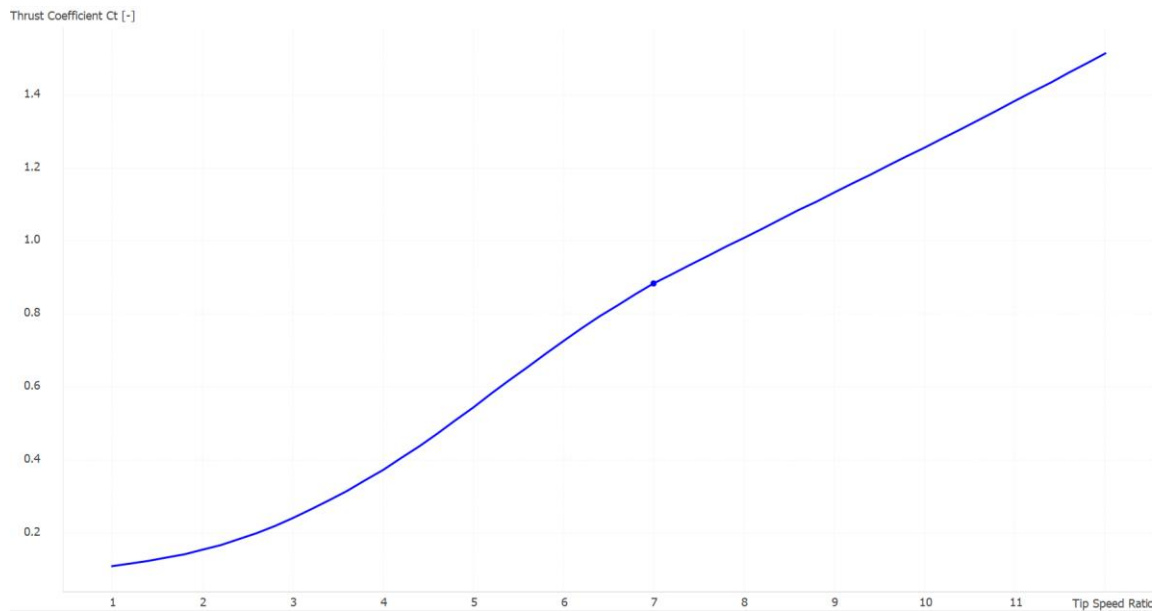


Fig. 8.3: Coeficient d'empenta envers TSR

S'obté la potència màxima de 1.240 KW amb un $TSR=7$.

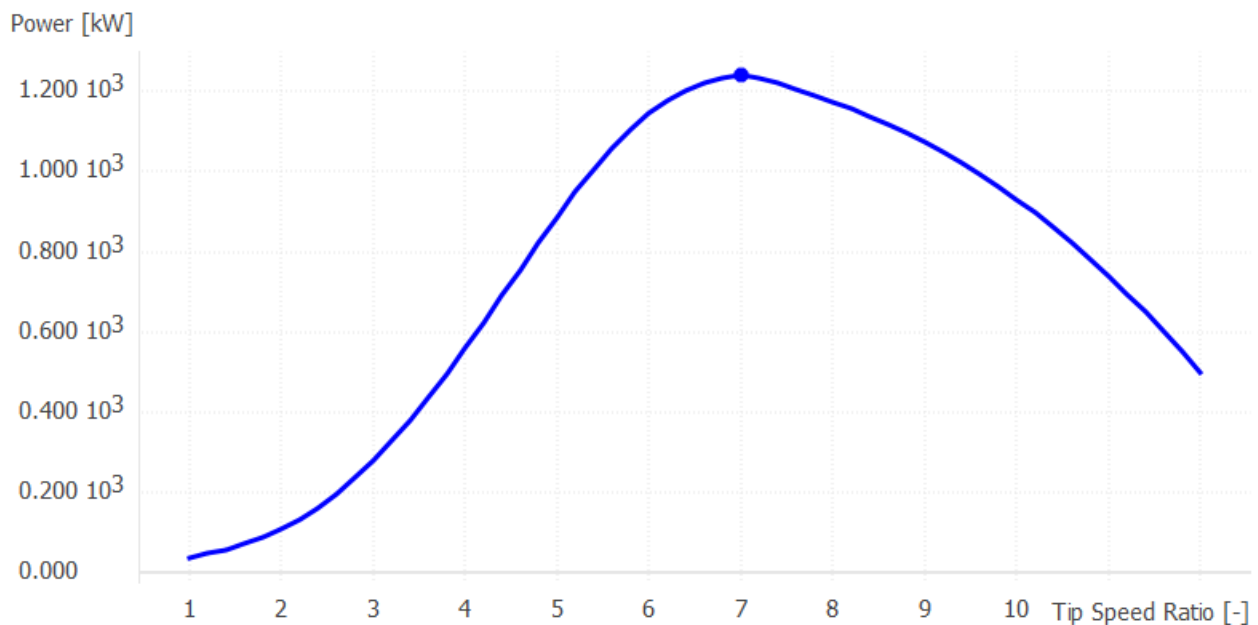


Fig. 8.4: Potència envers TSR

El parell motor generat pel vent a les pales d'una turbina eòlica fa que la turbina comenci a girar, i com més gran sigui el parell motor, més gran serà la quantitat d'energia elèctrica que es

pot generar. El parell motor és una mesura important perquè afecta directament la quantitat i la qualitat d'energia elèctrica que es pot generar, així com el funcionament suau i eficient de la maquinària. S'obté el parell màxim de 500.000 kNm quan $TSR=6$.

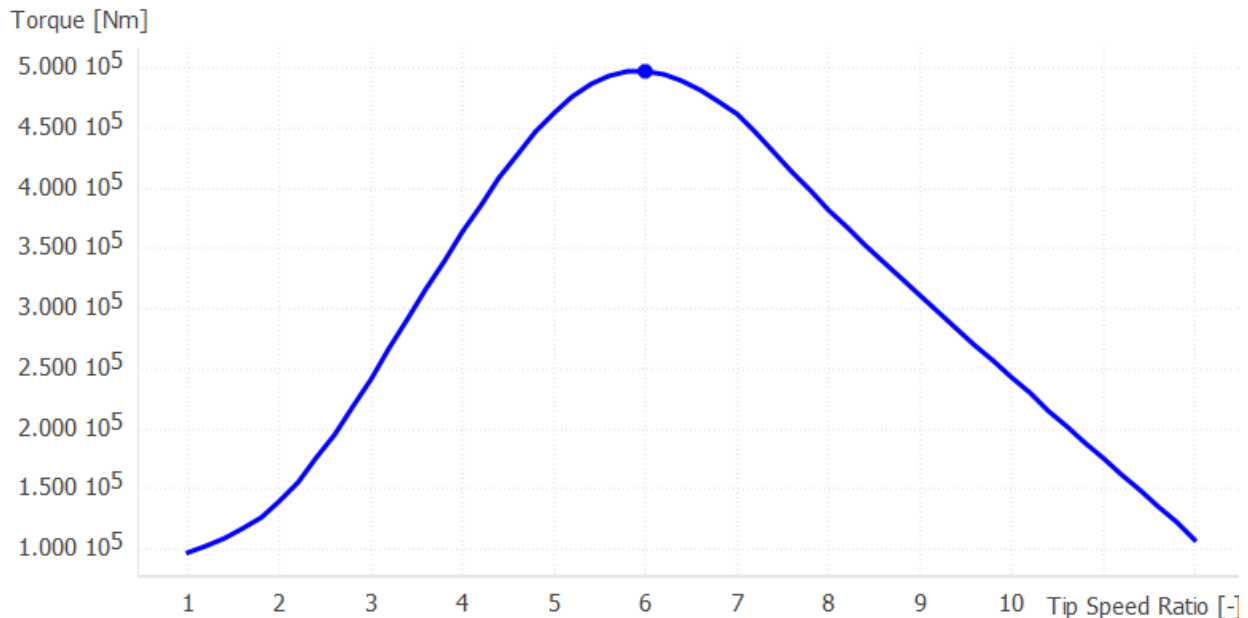


Fig. 8.5: Parell motor envers TSR

8.2 Simulació BEM de múltiples característiques

Es continua amb les simulacions BEM característic, on les simulacions es poden dur a terme en un rang especificat de velocitats del vent, velocitats de rotació i angles de pas. Es defineix la simulació igual que el rotor BEM. El rang de velocitat s'escull la velocitat mínima i màxima de treball, escollida anteriorment, 3 m/s i 25 m/s respectivament. A partir dels valors de velocitat esmentats anteriorment, es torna a calcular la velocitat de gir amb aquestes velocitats. El resultat aproximant és 7 rpm i 54 rpm. Però s'ha de tenir en compte les limitacions de la velocitat de gir màxima que pot suportar l'alternador i la mateixa turbina eòlica. Per tant, el rang de la velocitat de rotació s'escull sabent que la velocitat de gir òptima que necessita l'alternador és de 1500 rpm, encara que la màxima a suportar aniria fins a 1800 rpm i la velocitat de gir de la turbina eòlica és de 1240 rpm. En conseqüència, el rang a escollir entre 1200 rpm i 1800 rpm. Aquests valors serien després de la caixa multiplicadora, els que es necessita són els valors d'abans que serien, 24 rpm i 36 rpm respectivament. Per tant, els valors utilitzats en la velocitat de gir en la simulació són entre 7 rpm i 36 rpm. L'angle pas es considera zero a causa de les especificacions d'aquest projecte que no es realitza la possibilitat d'orientar la turbina eòlica per tal d'abaratir costos.

En les següents figures es poden observar diferents línies en el gràfic, on cada línia representa la velocitat de gir en rpm, des de 7 fins a 34 rpm, amb salts de 3 rpm entre cada línia.

En la següent figura es representa la potència generada envers la velocitat del vent amb diferents velocitats de gir. Es pot observar com amb la velocitat nominal escollida 11,5 m/s amb una velocitat de gir de 25 rpm s'obté la potència nominal desitjada 1 MW, coincidint amb els càlculs realitzats anteriorment. També s'observa la importància de la velocitat de gir de la turbina eòlica depenen la velocitat del vent per maximitzar la potència generada. En velocitats del vent petites una velocitat de gir gran limita la generació de potència, en canvi, en velocitats del vent grans una velocitat de gir gran incrementa considerablement la potència elèctrica generada. Per tant els resultats dels càlculs estan dins d'un equilibri, on es maximitza la generació elèctrica en tot el rang de velocitats del vent, pel fet que com es va veure anteriorment amb el diagrama de Weibull en la figura 6.3, hi ha més freqüències de velocitats baixes que de velocitats altes.

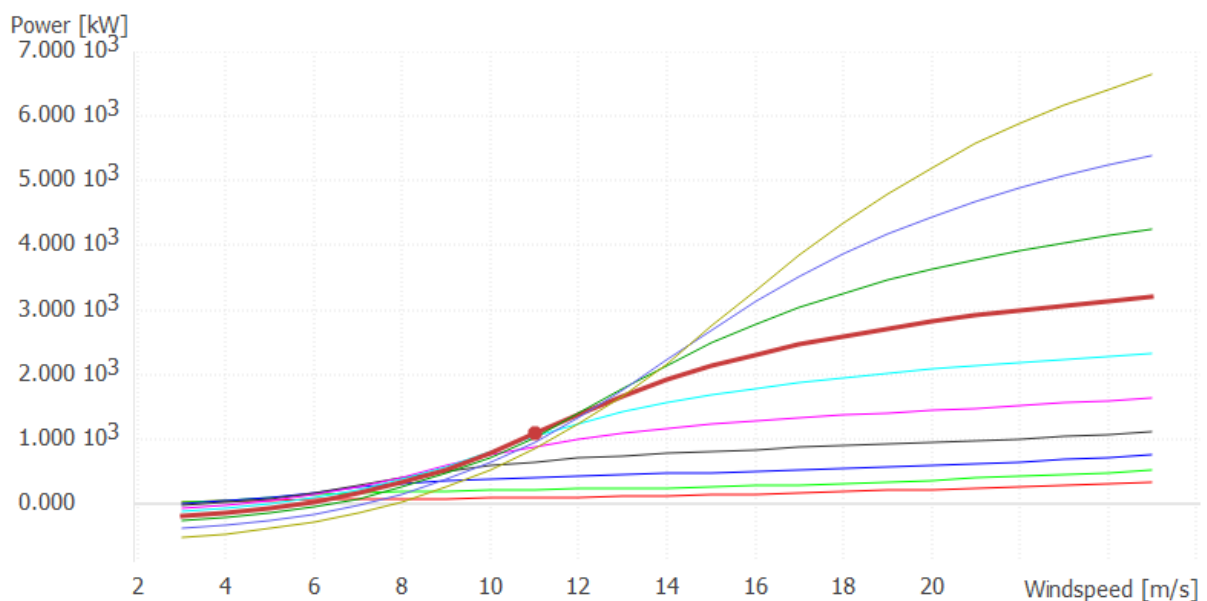


Fig. 8.6: Potència generada segons la velocitat del vent amb diferents velocitats de gir

En la següent figura es representa l'empenta generada envers la velocitat del vent amb diferents velocitats de gir. Es pot observar com l'empenta generada té un comportament molt lineal i predictiu on com més velocitat del vent i més velocitat de gir més empenta hi haurà. Encara que es pot observar un cert punt on el pendent canvia i deixa de créixer tan ràpidament. S'obté una força d'empenta de 190 KN amb una velocitat de gir de 25 rpm i una velocitat del vent de 11,5 m/s.

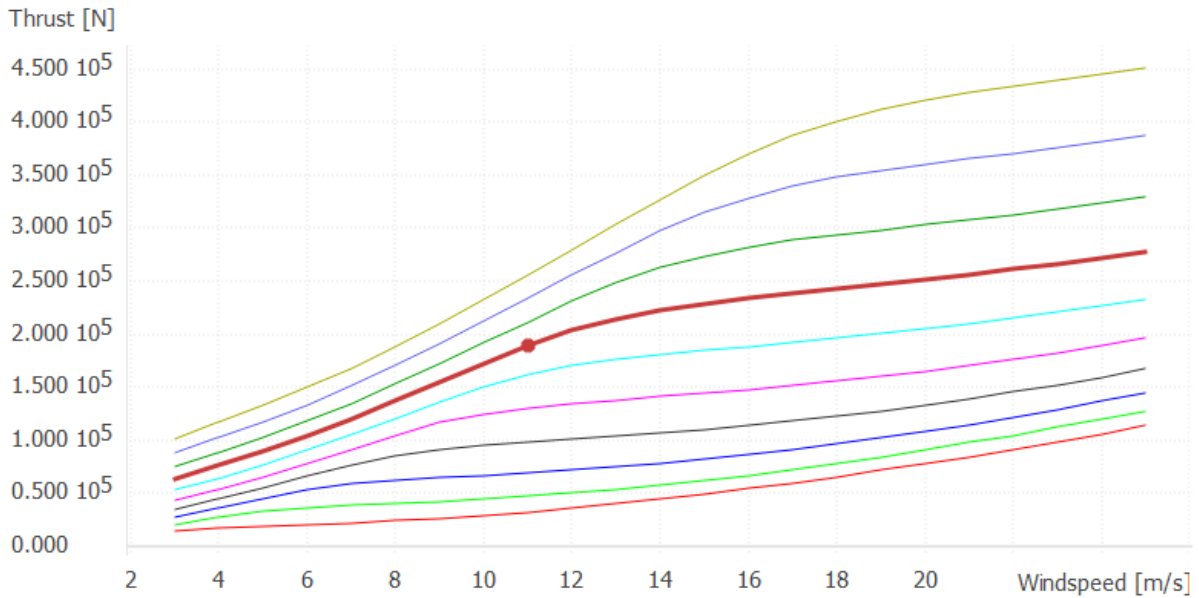


Fig. 8.7: Empenta generada segons la velocitat del vent amb diferents velocitats de gir

En la següent figura es representa el parell generat envers la velocitat del vent amb diferents velocitats de gir. Es pot observar com segueix un comportament similar al de la potència generada, on amb velocitats de gir més grans i velocitats de vent més grans el parell augmenta significativament, en canvi en el cas contrari és molt baix. S'obté un parell de 440 KN*m amb una velocitat de gir de 25 rpm i una velocitat del vent de 11,5 m/s. Valor molt similar al calculat anteriorment que és de 450 KN*m.

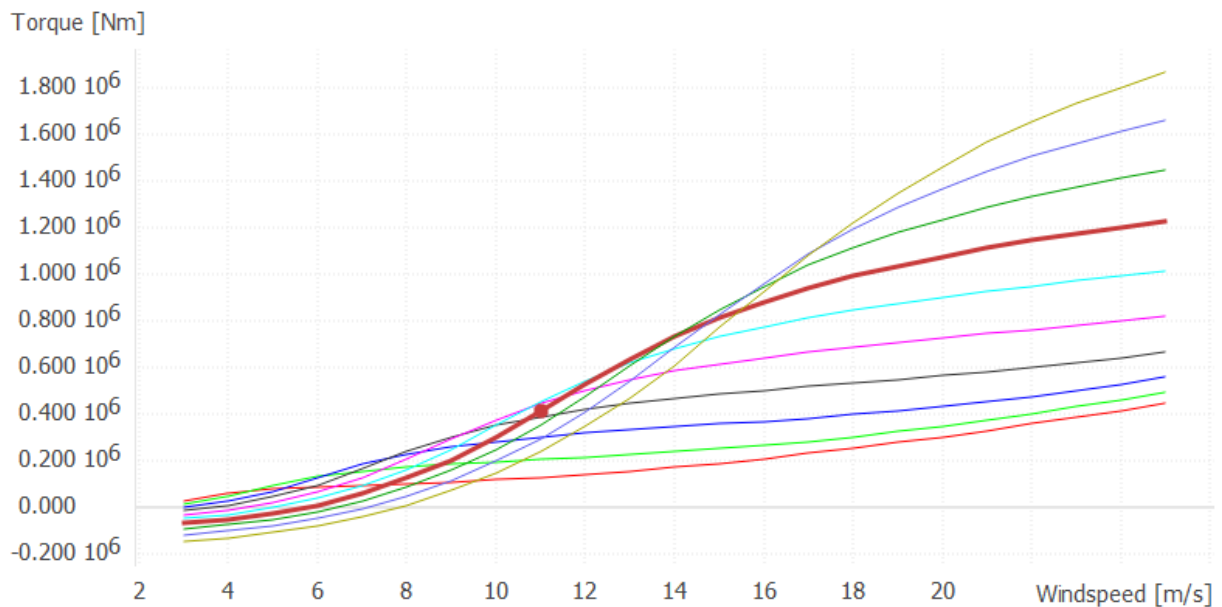


Fig. 8.8: Parell generat segons la velocitat del vent amb diferents velocitats de gir

8.4 Simulació de la turbina eòlica

En la simulació final de la turbina eòlica es defineix els següents paràmetres, on es selecciona tots els dissenys anteriors per obtenir un resultat personalitzat i aplicat a aquest projecte. Es poden visualitzar els vídeos de les simulacions realitzades durant aquest projecte en Youtube. [40]

The screenshot displays a software interface for configuring a wind turbine simulation. It is divided into several sections:

- General Simulation Settings:** Name of Simulation (TFG), Timestep Size (0.019634792853), Azimuthal Step (3), Number of Timesteps (10196), Simulation Length (200), Store Replay (On/Off).
- Structural Model Initialization:** Ramp-Up Time (20), Initial Overdamp Time (0), Overdamp Factor (100).
- Wind Boundary Condition:** Wind Input Type (Turbulent Field), Turbulent Windfield Object (TFG), Turbulent Windfield Shift (Auto), Aerodyn Hub Height File, Windspeed (10), Vert. Inflow Angle (0), Horiz. Inflow Angle (0), Wind Shear Type (Power Law), Power Law Exponent (0.2), Roughness Length (0.01), Reference Height (100), Directional Shear (0), Include Ground Effects (On/Off).
- Turbine Setup:** Name of Turbine (TFG), Use Turbine Definition (TFG), Position (X,Y,Z) (0,0,0), Rotational Speed Settings (RPM: 25.465, TSR: 6.9566, Always Fixed).
- Turbine Initial Conditions:** Azimuth, Yaw, Col. Pitch (0,0,0).
- Structural Simulation Settings:** Structural Steps / Aerostep (1), Initial Relaxation Steps (5), Number of Iterations (6), Include Aero Forces & Moments (On/Off), Include Hydro Forces & Moments (On/Off).
- Turbine Behavior:** Event Definition File, External Loading File, Simulation Input File, Prescribed Motion File (Load File buttons).
- Turbine Environment:** Installation (Offshore/Onshore), Water Depth (1), Wave Boundary Conditions (Wave Type: None/Linear, Kinematic Stretching: Vrt/Whr/Ext/Off, Linear Wave Object: New/Edit), Ocean Current Boundary Conditions (Near Surf, Sub Surf, Near Shore: U, Dir, Dcp, Exp, Dpr), Environmental Variables (Gravity, Air Density, Kinematic Viscosity Air, Water Density, Kinematic Viscosity Water).

Fig. 8.9: Paràmetres de la simulació final

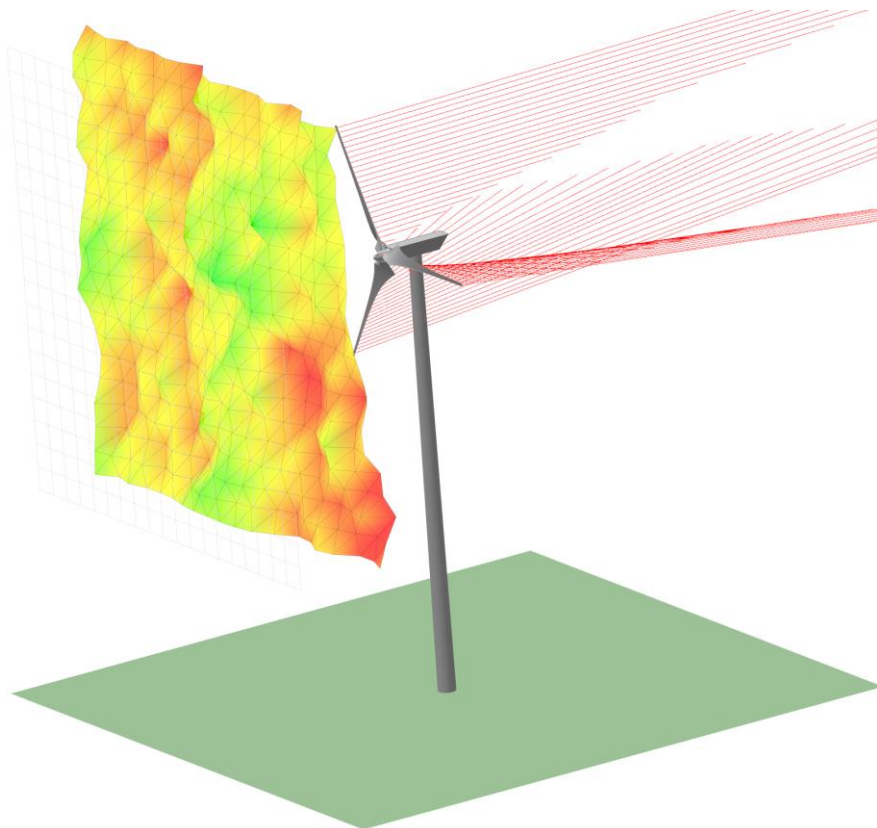


Fig. 8.10: Model 3D de la simulació final

S'obté els següents gràfics on es poden observar la generació de potència elèctrica segons l'època de l'any i també segons la velocitat del vent. On en l'hivern hi ha vents més forts, a l'estiu més febles i la global que seria la mitjana de tot l'any. S'ajusta en cada simulació la respectiva velocitat de gir de la turbina i el camp de vent adequat segons les condicions meteorològiques. En estiu 22 rpm i 9,2 m/s, en hivern 28 rpm i 11,4 m/s.

Els resultats coincideixen amb els càlculs realitzats anteriorment on en la potència global està al voltant de 1 MW, la potència en hivern al voltant de 1,5 MW i la potència a l'estiu al voltant de 0,75 MW. S'observa com la potència generada és directament proporcional a la velocitat del vent, al estar elevat al cub en la fórmula, es veu augmentada considerablement de la global a la de l'hivern i el contrari en l'estiu. S'analitza també una de les principals problemàtiques de l'energia eòlica que és la intermitència, és a dir, hi ha moments amb sobre generació d'energia elèctrica i altres moments amb manca de generació d'energia elèctrica. Fet que fa que si es vol subministrar tota la demanda energètica amb fonts renovables, es tendeix a sobredimensionar la potència nominal instal·lada.

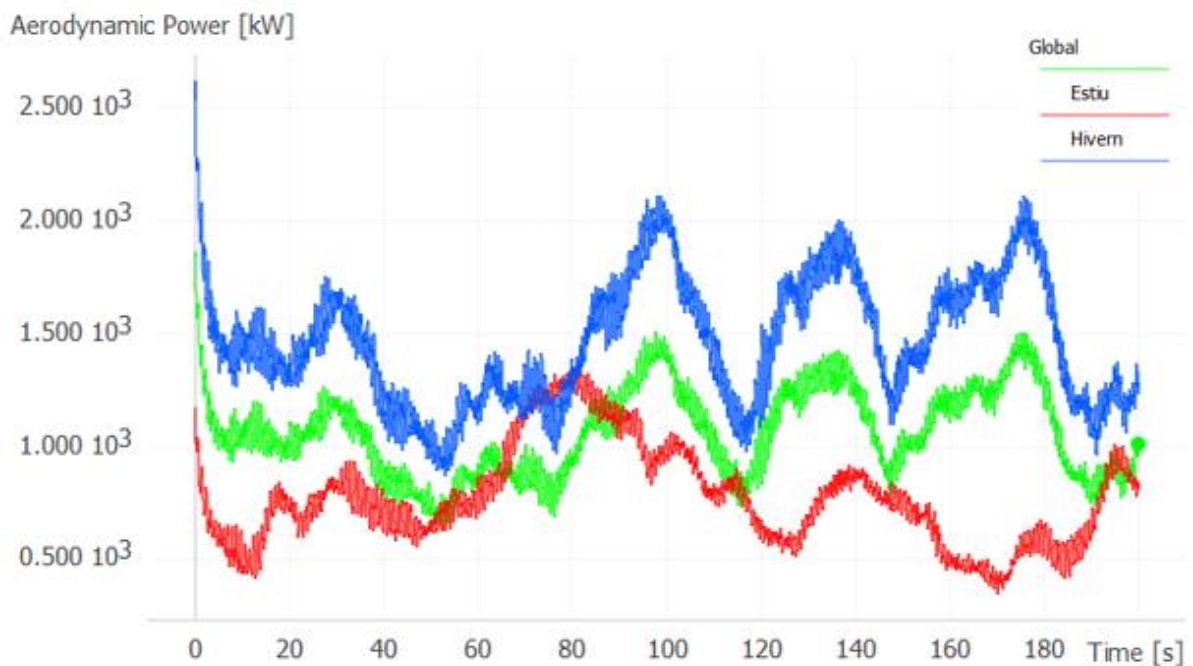


Fig. 8.11: Potència generada en diversos casos

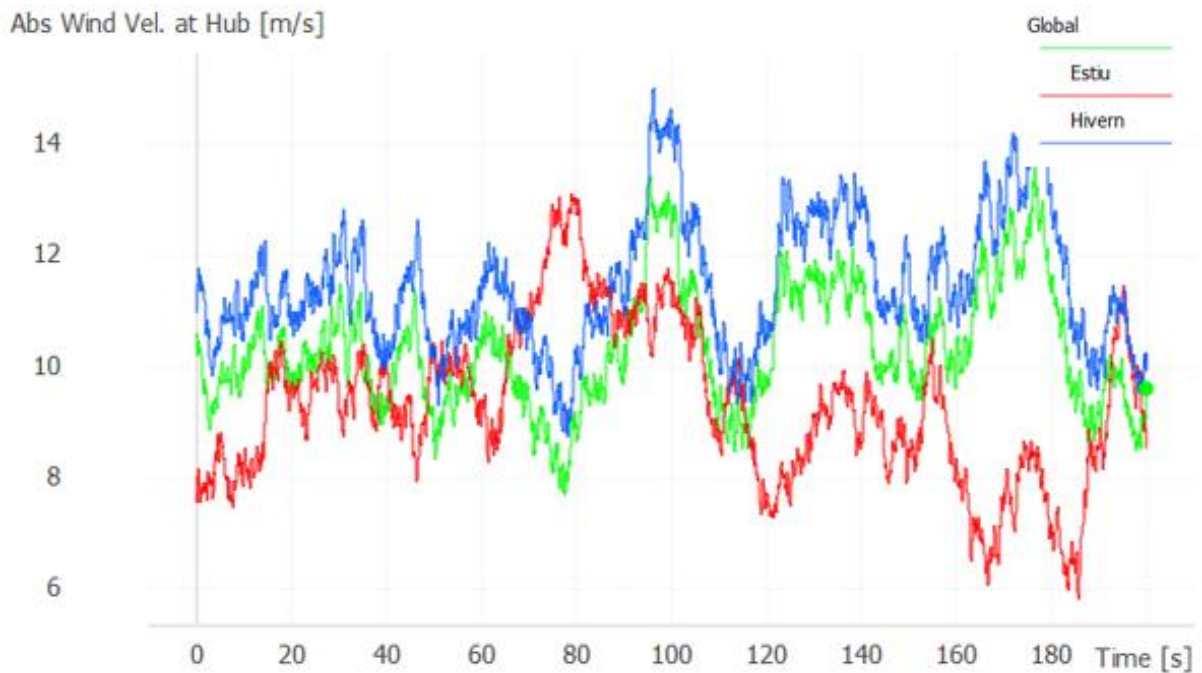


Fig. 8.12: Velocitat del vent en diversos casos

8.5 Simulació tensió

Es realitza la simulació de Von Mises amb el QFEM de Qblade. Aquest submòdul permet ingressar les característiques estructurals de l'aspa, com ara: gruix del material i del travesser per a cadascuna de les seccions. A més, permet fer una anàlisi modal i calcular les càrregues estàtiques i de deflexió de l'aspa segons un model de turbina i velocitat de vent simulats prèviament. Es defineix la següent estructura de l'aspa amb un material intern de poliuretà i un recobriment extern d'escuma de poliuretà. Obtenint una massa de 3013,41 Kg, semblant a la calculada de 2701,14 Kg. Posteriorment a partir de la velocitat de gir de la turbina i la seva velocitat específica en la punta de l'aspa, es calculen segons la part de l'aspa quines càrregues estarà sotmesa en aquestes condicions.

Structural Data	
Name of Structure	Rot. speed at design point [1/min]
Estructura	25
Internal Structure	
Hollow with Spar	Align Spar at max Thickness
Copy selected Section to ALL	
Shell Material	
Foam (Exemplary)	
E	2.56e+08 Pa
Rho	200 kg/m ³
<input checked="" type="checkbox"/> Absolute Shell Thickness	
Internal Material	
Polyurethane 20GF 65D	
E	1.72e+09 Pa
Rho	1360 kg/m ³
<input checked="" type="checkbox"/> Absolute Spar Thickness	

Fig. 8.13: Paràmetres de la simulació de tensió

Import Loading from BEM Simulation at a choosen TSR			
Simulation		TSR	
Optimizado Simulation (2)		7.00	
Click to Import Loads			
	Radial Position [m]	Normal Loading [N]	Tangential Loading [N]
1	0.00	58.56	-34.85
2	1.00	202.71	-91.94
3	2.00	686.71	415.19
4	4.00	1467.04	730.85
5	6.00	2119.72	772.40
6	8.00	2843.80	796.41
7	10.00	3476.27	804.87
8	12.00	4000.26	805.71
9	14.00	4663.65	800.58
10	16.00	5321.20	790.48
11	18.00	5833.73	779.74
12	20.00	6439.37	761.49
13	22.00	6990.02	734.04
14	24.00	7422.59	684.24
15	26.00	7803.38	576.96
16	28.00	5945.60	321.49
17	29.00	1943.69	72.69

Fig. 8.14: Càrregues en una aspa

Es mostra la càrrega i deflexió estàtica de l'aspa per a una determinada velocitat de vent. S'observa un rang d'esforç que va des dels 7,17 MPa fins als -1,84 MPa. Els majors esforços identificats són en l'arrel de l'aspa. Els valors negatius d'esforç corresponen a les seccions de l'aspa quan són a compressió. Les turbines eòliques d'un rang de 20 metres a 40 metres haurien de suportar càrregues de 5 a 15 MPa.

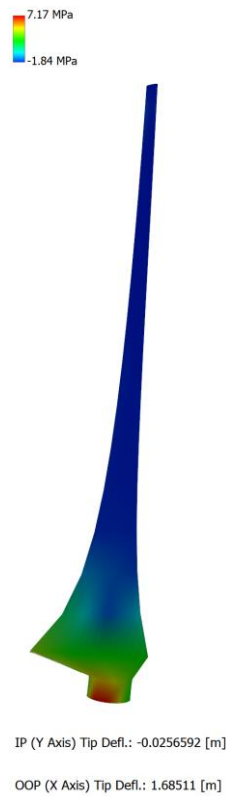


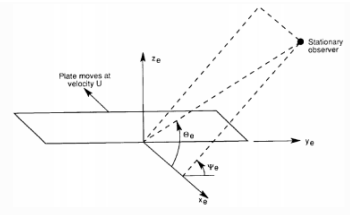
Fig. 8.15: Simulació de Von Mises

8.6 Simulació soroll

Es realitza una senzilla simulació del soroll, per posteriorment poder analitzar correctament l'impacte ambiental del projecte. Es deixa predeterminat, canviant únicament la velocitat nominal i l'angle d'atac òptim del perfil alar.

Simulation Parameters

Name of Simulation:	Noise Simulation
Length of wetted Trailing-Edge (L) [m]:	1
Distance from observer to TE (re) [m]:	1.22
Original flow velocity (U) [m/s]:	11.5
Original airfoil Chord length (C) [m]:	1
Original flow Mach Number (M):	0.21
D* at chord station:	0.98
D* scaling factor:	1
Eddy Convection Mach number [%]:	80
Directivity angle θ_e [deg]:	90
Directivity angle ψ_e [deg]:	90



TE noise source contributions

- Separated flow on the suction side (high Reynolds flow): enable
- Suction side of airfoil (attached flow): enable
- Pressure side of airfoil (attached flow): enable

Fig. 8.16: Paràmetres de la simulació de Soroll

En Espanya el límit de decibels emesos per una turbina eòlica és del voltant 45 dB si està a prop d'una zona residencial. Aquest projecte està fet a les afores del poble en un turó, per tant, aquest límit es pot superar perquè no afectarà considerablement. El resultat de la simulació és un màxim de 75 dB amb una freqüència de 100 Hz.

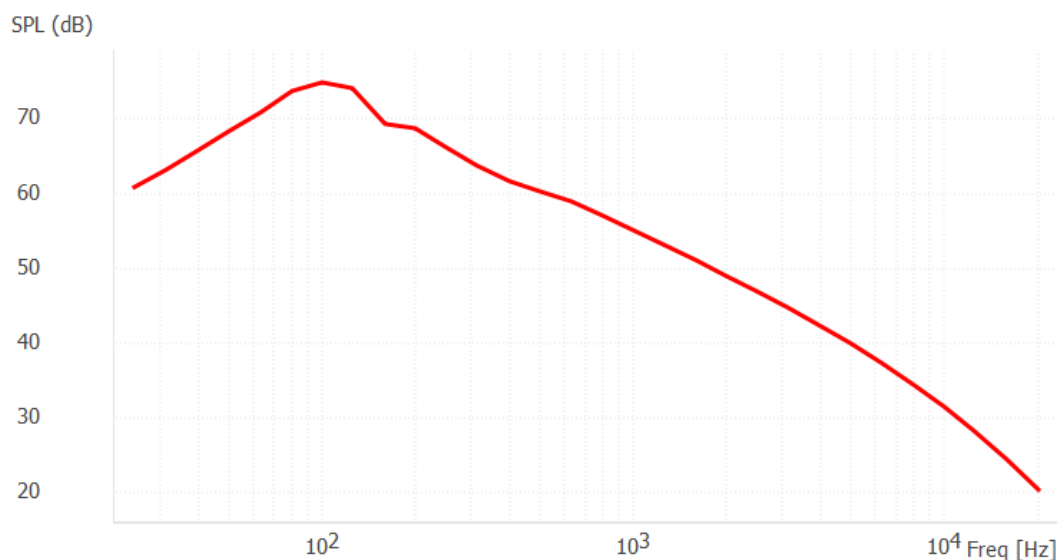


Fig. 8.17: Simulació del Soroll

9. Anàlisi del producte final

El producte final obtingut seria una turbina eòlica, en aquest producte es poden analitzar i resumir les característiques més importants i influents.

La turbina eòlica té una geometria final, amb una altura de 100 metres des de la base al rotor de la turbina, una longitud de 30 metres en cada aspa i una naveta de 8 metres de llarg. S'utilitza el perfil alar NACA 4412.

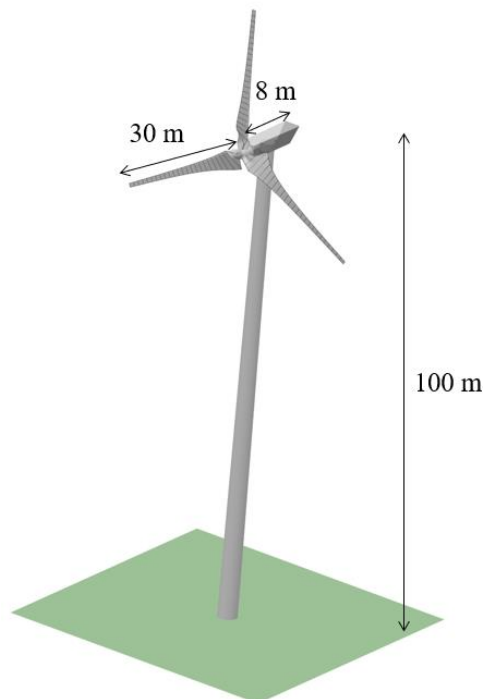


Fig. 9.1: Geometria final turbina eòlica

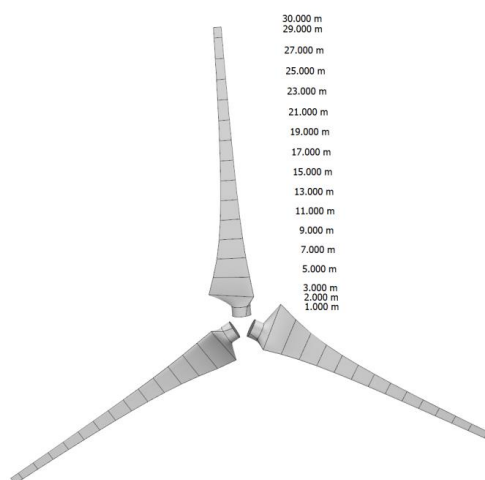


Fig. 9.2: Rotor turbina eòlica

En la següent taula es poden observar els principals valors obtinguts respecte el rendiment de la turbina eòlica depenent l'escenari:

Escenari	Potència nominal	Velocitat Mitjana del vent	Velocitat de gir del rotor
Global	1 MW	10,24 m/s	24 rpm
Hivern	1,5 MW	11,4 m/s	28 rpm
Estiu	0,75 MW	9,2 m/s	22 rpm

Taula 9.1: Valors finals

Es pot observar la importància de la velocitat del vent en la generació d'electricitat, on hi ha una relació cubica entre la potència nominal i la velocitat del vent.

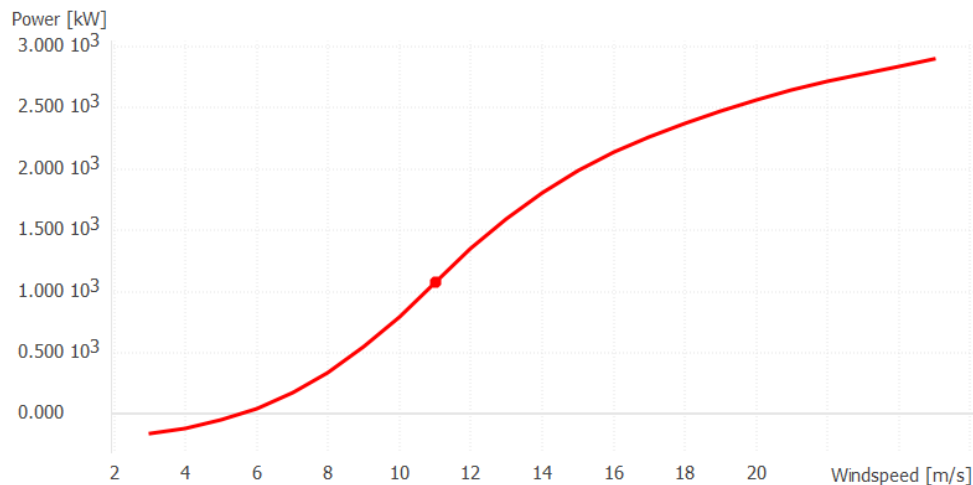


Fig. 9.3: Potència nominal envers velocitat del vent

Les aspes tenen un rang de resistència a càrregues externes de 7,17 MPa fins al -1,84 MPa. Un rang bastant bo, tenint en compte que per exemple la pressió de l'aigua en una xarxa de subministrament comú és al voltant de 0,5 MPa. L'aerogenerador produeix un soroll màxim de 75 dB, encara que pot semblar un residu acústic significant equivaldria al soroll que emeten una rentadora o un aspirador comú.

Es recopila els diferents costos de la realització d'aquest projecte d'una forma aproximada:

COSTOS INVERSIÓ	
Concepte	Costos (€)
Projecte d'enginyeria	21.247,60
Estudi impacte mediambiental	8.000,00
Construcció	700.000,00
Materials	800.000,00
TOTAL (C₀)	1.529.247,60

Taula 9.2: Costos d'inversió

10. Perspectiva de gènere

En aquest projecte no s'ha de fer un estudi sobre la perspectiva de gènere, ja que no es pot aplicar en cap part d'aquest.

11. Impacte mediambiental

L'impacte mediambiental és el més gran dels problemes per a aquest tipus d'instal·lacions. Els millors emplaçaments pel que fa a velocitat del vent es troben als cims i els pendents de relleus muntanyencs on els parcs eòlics són visibles des de llargues distàncies el que no sol ser tolerable pels ciutadans de la zona. Un altre problema mediambiental molt criticat per les associacions a favor dels animals, és el fet que el parc eòlic es troba emplaçat a les rutes migratòries de les aus. La gran alçada de les torres eòliques actuals provoca que les aspes en moviment estiguin situades a l'altura de vol de moltes espècies i això provoca que les aus impactin contra elles matant aus d'aquestes espècies que en moltes ocasions es troben en perill d'extinció. És per això que actualment es troba en desenvolupament un nou tipus d'aerogenerador sense pales.

Un altre problema a tenir en compte és el soroll que generen els aerogeneradors sigui per soroll aerodinàmic o mecànic dels alternadors a plena producció al que cal sumar el soroll en general de les instal·lacions dels parcs eòlics que disposen de grans instal·lacions per a la conversió de l'energia i la seva distribució a la xarxa elèctrica. En realitat aquest problema no és tan rellevant com es pensa, ja que de vegades el soroll provocat per les ràfegues de vent genera la mateixa intensitat de soroll que el que es pot apreciar a uns centenars de metres de les instal·lacions, però se'ls atribueix a aquestes com les causants del nivell de soroll esmentat per una incomprensió dels fets.

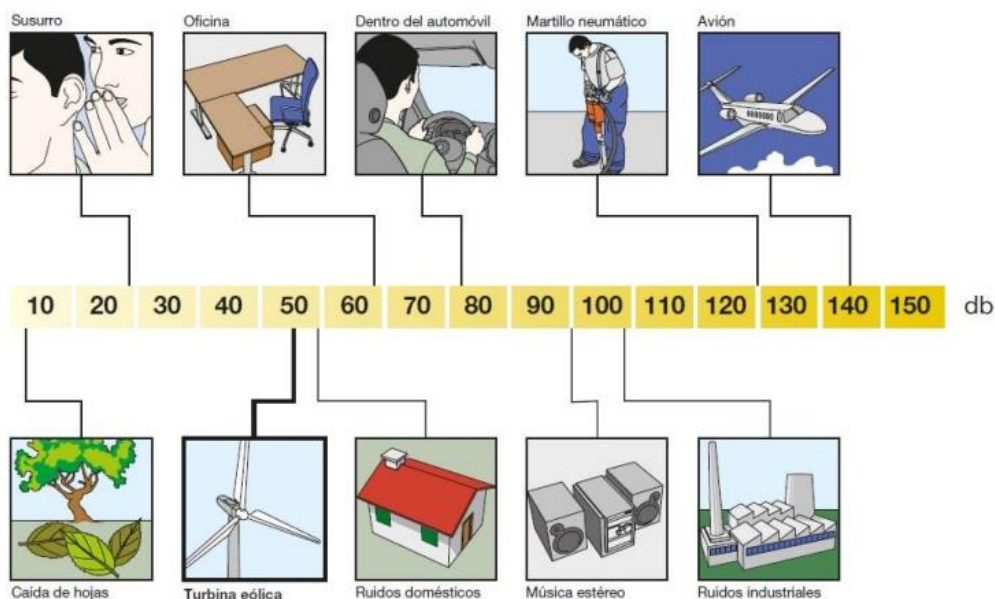


Fig. 11.1: Nivells acústics en dB

Per evitar aquests problemes hi ha una normativa que afecta la realització de parcs eòlics pel que fa a l'avaluació d'impacte ambiental és la següent:

- Reial Decret Legislatiu 1302/1986, de 28 de juny, d'avaluació d'Impacte ambiental.
- Reial decret 1131/1988, de 30 de setembre, pel qual s'aprova el
- Reglament per a l'execució del Reial Decret Legislatiu 1302/1986, de 28 de juny, d'avaluació d'impacte ambiental (E.I.A.).
- Reial Decret 1955/2000, d'1 de Desembre, pel qual es regulen les activitats de transport, distribució, comercialització i subministrament i procediments d'autorització d'instal·lacions d'energia elèctrica.
- Llei 1/1995, de 8 de març, de protecció del medi ambient de la Regió de Múrcia.
- Llei 6/2001, de 8 de maig, de modificació del Reial decret legislatiu 1302/1986, de 28 de juny, d'avaluació d'impacte ambiental.

Respecte a l'impacte mediambiental positiu d'aquest projecte, en l'àmbit que la turbina eòlica generarà 2.988 MW d'electricitat d'energia neta sense contaminació en la seva producció. A partir d'estimacions es calcula que s'evitaria l'emissió de al voltant 500 tones de diòxid de carboni, també conegut com CO₂, cada any. Equivalent a plantar uns 22.000 arbres o eliminar la contaminació de uns 120 automòbils en cada any. Juntament amb l'eliminació d'altres gasos d'efecte hivernacle i nocius per l'èsser humà com l'òxid de nitrogen i el diòxid de sofre, també coneguts com NO_x i SO₂ respectivament.

També hi ha el risc d'incendi en un nombre reduït d'aerogeneradors i alguns es poden provocar fuites de fluids lubricants, però aquests fets són poc comuns. La majoria dels projectes d'energia eòlica terrestre requereixen la creació o destrucció de carreteres per el transport dels diferents components degut les seves dimensions, fet que s'afegeix als efectes físics sobre el medi ambient. La producció de metalls i altres materials utilitzats per fabricar components d'aerogeneradors també té impactes sobre el medi ambient, i es poden utilitzar combustibles fòssils per produir els materials. Tot i que la majoria dels materials utilitzats per fer aerogeneradors es poden reutilitzar o reciclar, les aspes de les turbines, com la majoria es construeixen actualment, no es poden reciclar. Els investigadors del National Renewable Energy Laboratory (NREL) van establir un enfocament per a la fabricació de pales d'aerogeneradors, utilitzant un sistema de resina termoplàstica. Aquestes resines

termoplàstiques permeten el reciclatge de les pales dels aerogeneradors i també redueixen l'energia necessària per fabricar les pales.

Les turbines eòliques tenen una vida útil estimada al voltant de 25 i 30 anys, una vegada esgotat la seva vida útil es planteja un petit pla per reciclar i poder reutilitzar els components de la turbina eòlica per altres finalitats.

- **Aspes del rotor:** els materials de les aspes, generalment fibra de vidre o materials compostos, són molt difícils de reciclar degut als materials compostos i al seu alt cost juntament per les seves dimensions fa que sigui una tasca complicada el seu tractament, encara que si es podria les parts que continguin únicament fibra de vidre.
- **Torre:** la torre de la turbina eòlica està construïda principalment d'acer, i es pot desmantellar i reciclar a través dels processos convencionals de reciclatge de metalls. Els components d'acer poden ser separats i fosos per ser utilitzats en la producció de productes nous.
- **Generador i components electrònics:** els components electrònics i el generador de la turbina eòlica contenen materials valuosos com ara coure, alumini i metalls preciosos, que poden ser recuperats i utilitzats en la producció de nous productes electrònics.
- **Fonaments:** el fonament de la turbina eòlica està compost principalment de formigó i acer, que poden ser desmantellats i reciclats en processos convencionals de reciclatge de materials de construcció.

12. Planificació

La distribució del pla del projecte es fragmenta en les diverses tasques que figuren a la taula següent, on es detallen les respectives longituds.

Memòria	Activitat	Durada (h)	Predecessores
Memòria 1 Avantprojecte: 175 hores	1.1 Cerca d'informació	35	
	1.2 Anàlisi d'informació	15	1.1
	1.3 Objectius i especificacions tècniques	10	1.2
	1.4 Antecedents i Fonaments aerodinàmics	30	1.3
	1.5 Confecció de l'escrit d'Avantprojecte	85	1.4
Memòria 2 Intermitja: 125 hores	2.1 Cerca informació primera versió proposta	10	1.5
	2.2 Valoració dels detalls de la proposta	5	2.1
	2.3 Selecció del tipus de turbina i lloc	40	2.2
	2.4 Desenvolupament del disseny	50	2.3
	2.5 Confecció de l'escrit Intermedi	20	2.4
Memòria 3 Final: 100 hores	3.1 Estudi dels diferents programes a utilitzar	40	2.5
	3.2 Realització simulacions numèriques	20	2.6
	3.3 Anàlisi dels resultats	10	3.2
	3.4 Conclusions i consideracions futures	8	3.3
	3.5 Pressupost	2	3.3
	3.6 Confecció de l'escrit Final i presentació	20	3.4, 3.5
Durada total del projecte		400 hores	

Taula 12.1: Planificació de les activitats i la seva duració

La totalitat del projecte ha sigut elaborat per un Enginyer Mecànic. El que es tradueix en només un recurs disponible per a la realització d'aquest.

Inici fins Memòria 1: 70 dies hàbils Memòria 1 fins Memòria 2: 50 dies hàbils Memòria 2 fins Memòria 3: 40 dies hàbils

Total: 160 dies hàbils de dedicació al projecte

La durada del projecte s'ha determinat considerant el marc acadèmic del projecte, la dedicació ha d'estar aproximadament equilibrada al seu pes en crèdits ECTS.

$$16 \text{ cred} \times 25 \frac{h}{\text{cred}} = 400 \text{ hores}$$

La dedicació final del projecte és de 400 hores. Com que la dedicació no és a jornada completa, s'estimarà la dedicació diària segons els dies laborables i les hores de dedicació:

$$\frac{400 \text{ hores}}{160 \text{ dies}} = 2,5 \text{ h/dia}$$

Llavors, la planificació està prevista en jornades d'aproximadament 2,5 hores.

A continuació es mostra la planificació en MS Project. Es poden observar totes les tasques amb la dedicació en hores i el dia d'inici i final corresponent.

TFG: Disseny d'una turbina eòlica pel subministrament energètic d'un poble petit	400 hores	lun 07/11/22	vie 16/06/23		
1. Memòria 1 Avantprojecte	175 hores	lun 07/11/22	vie 10/02/23		Enginyer Mecànic
1.1 Cerca d'informació	35 horas	lun 07/11/22	jue 24/11/22		Enginyer Mecànic
1.2 Anàlisi d'informació	15 horas	vie 25/11/22	vie 02/12/22	4	Enginyer Mecànic
1.3 Objectius i especificacions tècniques	10 horas	lun 05/12/22	jue 08/12/22	5	Enginyer Mecànic
1.4 Antecedents i Fonaments aerodinàmics	30 horas	vie 09/12/22	lun 26/12/22	6	Enginyer Mecànic
1.5 Confecció de l'escrit d'Avantprojecte	85 horas	mar 27/12/22	vie 10/02/23	7	Enginyer Mecànic
2. Memòria 2 Intermèdia	125 hores	lun 13/02/23	vie 21/04/23	8	Enginyer Mecànic
2.1 Cerca informació segons primera versió de la proposta	10 horas	lun 13/02/23	jue 16/02/23	8	Enginyer Mecànic
2.2 Valoració de detalls de la proposta	5 horas	vie 17/02/23	lun 20/02/23	10	Enginyer Mecànic
2.3 Selecció del tipus de turbina i lloc	40 horas	mar 21/02/23	mar 14/03/23	11	Enginyer Mecànic
2.4 Desenvolupament del disseny	50 horas	mié 15/03/23	mar 11/04/23	12	Enginyer Mecànic
2.5 Confecció de l'escrit Intermedi	20 horas	mié 12/04/23	vie 21/04/23	13	Enginyer Mecànic
3. Memòria 3 Final	100 hores	lun 24/04/23	vie 16/06/23	14	Enginyer Mecànic
3.1 Estudi dels diferents programes a utilitzar	40 horas	lun 24/04/23	lun 15/05/23	14	Enginyer Mecànic
3.2 Realització simulacions numèriques	22 horas	mar 16/05/23	vie 26/05/23	16	Enginyer Mecànic
3.3 Anàlisis dels resultats	10 horas	vie 26/05/23	jue 01/06/23	17	Enginyer Mecànic
3.4 Conclusions i consideracions futures	8 horas	jue 01/06/23	mar 06/06/23	18	Enginyer Mecànic
3.5 Pressupost	2 horas	jue 01/06/23	vie 02/06/23	18	Enginyer Mecànic
3.6 Confecció de l'escrit Final i presentació	20 horas	mié 07/06/23	vie 16/06/23	20;19	Enginyer Mecànic

Fig. 12.1: Planificació de les activitats del projecte

Es pot apreciar el Diagrama de Gantt del projecte a partir de la planificació. A la següent representació visual, es poden observar de manera clara tant la durada de les tasques com les relacions entre elles.

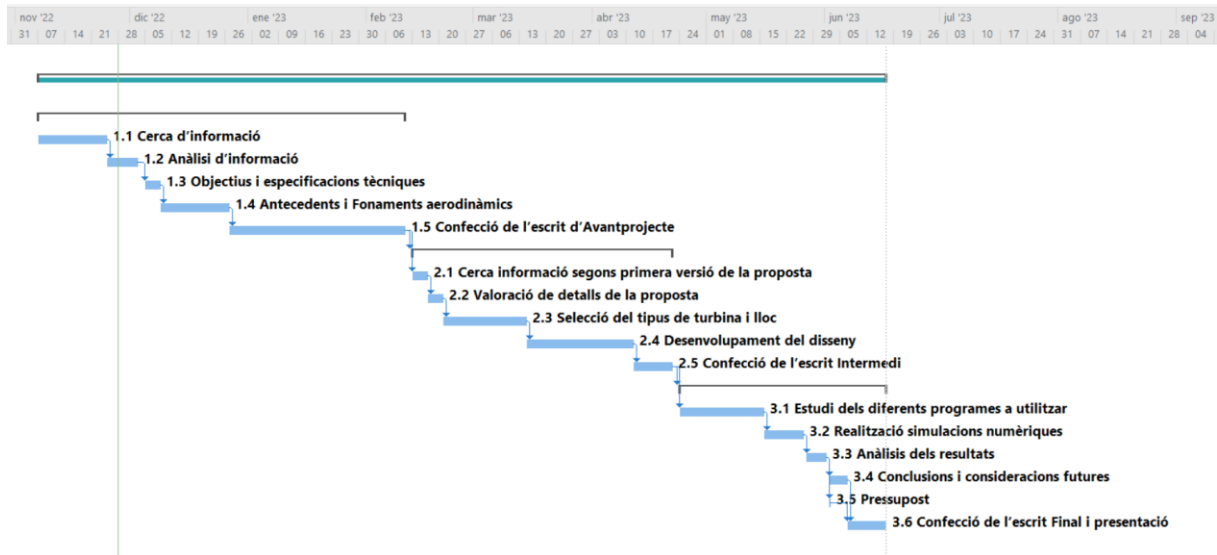


Fig. 12.2: Diagrama de Gantt del projecte

A causa de la limitada disponibilitat d'un únic recurs, no és factible dur a terme múltiples tasques de forma paral·lela, resultant en l'existència d'un camí crític pràcticament a tot el projecte.

Gràcies a la precisió de la planificació, s'han complert els terminis establerts. Encara que no totes les tasques s'han completat segons el pla previst. En conseqüència hi ha hagut tasques que s'han pogut realitzar en un menor temps, compensant la despesa extra en altres tasques. Això al ser un treball realitzat per una sola persona, és un resultat habitual. En altres projectes, podria ser necessari incorporar-hi algun recurs addicional.

Les desviacions han sigut la reducció de temps de la realització de les tasques de l'avantprojecte, podent començar a realitzar les tasques de la memòria intermèdia abans de la data de la primera entrega. Juntament amb la prèvia finalització de la memòria intermèdia, encara que després en la memòria final es van allargar les tasques d'estudi dels programes a utilitzar i la realització de les simulacions numèriques. Llavors el marge guanyat al principi es consumeix al final mantenint la data de finalització del projecte.

Es pot observar la planificació i el diagrama de Gantt amb les desviacions esmentades:

TFG: Disseny d'una turbina eòlica pel subministrament energètic d'un poble petit	400 horas	lun 07/11/22	vie 16/06/23		
1. Memòria 1 Avantprojecte	165 horas	lun 07/11/22	lun 06/02/23		Enginyer Mecànic
1.1 Cerca d'informació	35 horas	lun 07/11/22	jue 24/11/22		Enginyer Mecànic
1.2 Anàlisi d'informació	15 horas	vie 25/11/22	vie 02/12/22	4	Enginyer Mecànic
1.3 Objectius i especificacions tècniques	10 horas	lun 05/12/22	jue 08/12/22	5	Enginyer Mecànic
1.4 Antecedents i Fonaments aerodinàmics	30 horas	vie 09/12/22	lun 26/12/22	6	Enginyer Mecànic
1.5 Confecció de l'escript d'Avantprojecte	75 horas	mar 27/12/22	lun 06/02/23	7	Enginyer Mecànic
2. Memòria 2 Intermeda	125 horas	mar 07/02/23	lun 17/04/23	8	Enginyer Mecànic
2.1 Cerca informació segons primera versió de la proposta	10 horas	mar 07/02/23	vie 10/02/23	8	Enginyer Mecànic
2.2 Valoració de detalls de la proposta	5 horas	lun 13/02/23	mar 14/02/23	10	Enginyer Mecànic
2.3 Selecció del tipus de turbina i lloc	40 horas	mié 15/02/23	mié 08/03/23	11	Enginyer Mecànic
2.4 Desenvolupament del disseny	50 horas	jue 09/03/23	mié 05/04/23	12	Enginyer Mecànic
2.5 Confecció de l'escript Intermedi	20 horas	jue 06/04/23	lun 17/04/23	13	Enginyer Mecànic
3. Memòria 3 Final	110 horas	mar 18/04/23	vie 16/06/23	14	Enginyer Mecànic
3.1 Estudi dels diferents programes a utilitzar	45 horas	mar 18/04/23	jue 11/05/23	14	Enginyer Mecànic
3.2 Realització simulacions numèriques	27 horas	vie 12/05/23	vie 26/05/23	16	Enginyer Mecànic
3.3 Anàlisis dels resultats	10 horas	vie 26/05/23	jue 01/06/23	17	Enginyer Mecànic
3.4 Conclusions i consideracions futures	8 horas	jue 01/06/23	mar 06/06/23	18	Enginyer Mecànic
3.5 Pressupost	2 horas	jue 01/06/23	vie 02/06/23	18	Enginyer Mecànic
3.6 Confecció de l'escript Final i presentació	20 horas	mié 07/06/23	vie 16/06/23	20;19	Enginyer Mecànic

Fig. 12.3: Planificació de les activitats del projecte amb desviacions

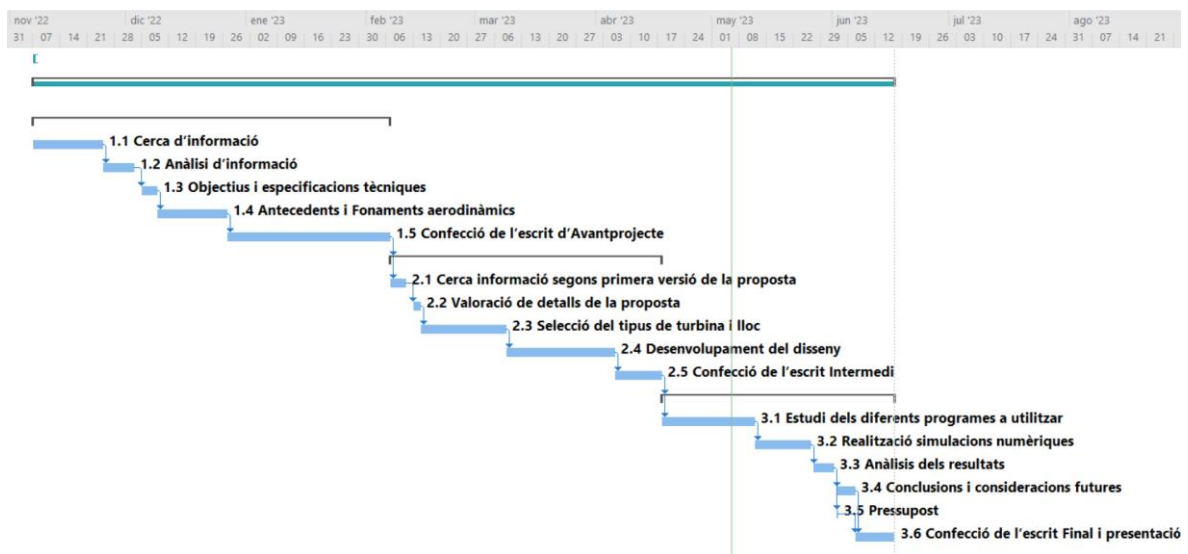


Fig. 12.4: Diagrama de Gantt del projecte amb desviacions

13. Conclusions

En aquest projecte s'ha pogut realitzar satisfactòriament l'objectiu principal, de desenvolupar una turbina eòlica que garanteixi el subministrament energètic d'un poble petit. Juntament amb els objectius secundaris que permetien a l'estudiant poder aprendre i desenvolupar una metodologia eficient de dimensionar i desenvolupar un aerogenerador segons unes condicions determinades.

Es poden extreure diverses conclusions.

Per tal de complir l'objectiu principal, i satisfer les demandes energètiques requerides es va haver de sobredimensionar la torre de l'aerogenerador, per tal d'aconseguir vents més forts a més altura, fent que les dimensions de l'estructura estiguin desaprofitades pel fet que la longitud de les aspes és petita en consideració. És a dir, amb una altura de torre de 100 m podria haver instal·lat un rotor amb unes aspes de gairebé el doble de diàmetre, passant de 62 m de diàmetre a 124 m, amb aspes de 60 m de longitud i encara havent-hi marge d'ampliar una mica més. En duplicar el diàmetre de l'aerogenerador la producció elèctrica nominal augmentaria significativament, ja que el diàmetre és quadràtic en el càlcul de la potència nominal, per tant, s'incrementaria per 4 vegades la potència nominal. Es va descartar la possibilitat de fer dues turbines eòliques, però de menors dimensions, per la raó que no sortia a compte econòmicament, pel fet que aquesta tecnologia es beneficia de realitzar instal·lacions de grans dimensions. Cal recalcar que aquestes instal·lacions es beneficien per la seva escalabilitat, és a dir, quan es fa l'estudi i el projecte d'enginyeria d'una turbina eòlica normalment es farà la instal·lació d'un parc eòlic amb diverses turbines eòliques, ja que és difícil trobar un lloc que compleixi tots els requisits.

L'energia eòlica és una bona font d'energia, però amb un problema important evident, seria la intermitència de la generació d'elèctrica, depenent del vent que hi hagi en aquell moment. Fet que en moments es pugui abastir completament la demanda energètica, altres moments que es produeixi per sobre de la demanda energètica desaprofitant aquest excedent energètic o casos que no es produeixi suficient energia havent d'utilitzar fonts d'energia alternatives com centrals tèrmiques o central nuclears. Llavors hi ha una tendència de sobredimensionar la potència total instal·lada per tal de poder subministrar electricitat en tot moment, encara que no és el més recomanable. Per tant, la millor opció seria poder aprofitar aquests excedents per produir hidrogen verd amb electrolitzadors, que és una bona alternativa per poder emmagatzemar

l'energia d'aquestes fonts de generació elèctrica intermitents i poder fer servir en moments de baixa producció.

Com s'ha observat en l'estudi econòmic la instal·lació d'una turbina eòlica seria més rendible que altres alternatives més contaminants al final de la seva vida útil. Per tant, és una elecció bastant senzilla, on es podrà produir electricitat més barata i sense contaminar al medi ambient.

14. Referències.

[1] Wikipedia, *Efecto Coriolis*, Octubre, 2022

[https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Coriolis]

[2] LinkedIn, *Distribución de Weibull para determinar el Potencial Eólico*, Octubre, 2022

[<https://www.linkedin.com/pulse/distribuci%C3%B3n-de-weibull-para-determinar-el-potencial-tapia-segura/>]

[3] Wikipedia, *Turbina eólica*, Octubre, 2022

[https://es.wikipedia.org/wiki/Turbina_e%C3%B3lica]

[4] EcoInventos, *El mayor aerogenerador del mundo es capaz de alimentar 20.000 hogares durante 25 años*, Octubre, 2022

[<https://ecoinventos.com/myse-16-0-242/>]

[5] Wikipedia, *Aerogenerador*, Noviembre, 2022

[<https://ca.wikipedia.org/w/index.php?title=Aerogenerador&oldid=30614016>]

[6] Airpes, *¿Cuáles son las partes principales de un aerogenerador?*, Noviembre, 2022

[<https://www.airpes.com/es/partes-aerogenerador/>]

[7] Revista UNE, *UNE-EN IEC 61400-1: referente para el sector eólico español*, Noviembre, 2022

[<https://revista.une.org/24/une-en-iec-61400-1-referente-para-el-sector-eolico-espanol.html>]

[8] Eolo, *Fundamentos Aerodinámicos de las Máquinas Eólicas*, Noviembre, 2022

[<https://www.exa.unne.edu.ar/fisica/maestria/modulo2/eolica/eolo22002.pdf>]

[9] Monografías, *Energía Eólica*, Noviembre, 2022

[<https://www.monografias.com/trabajos104/energia-eolica-ii/energia-eolica-ii>]

- [10] Creative Commons, *Quant a les Llicències*, Novembre, 2022
[\[https://creativecommons.org/licenses/?lang=ca\]](https://creativecommons.org/licenses/?lang=ca)
- [11] Wikipedia, *Perfil alar*, Novembre, 2022
[\[https://es.wikipedia.org/wiki/Perfil_alar\]](https://es.wikipedia.org/wiki/Perfil_alar)
- [12] Wikipedia, *Airfoil*, Decembre, 2022
[\[https://en.wikipedia.org/wiki/Airfoil\]](https://en.wikipedia.org/wiki/Airfoil)
- [13] Wikiwand, *Teoría del elemento de pala*, Decembre, 2022
[\[https://www.wikiwand.com/es/Teor%C3%ADa_del_elemento_de_pala\]](https://www.wikiwand.com/es/Teor%C3%ADa_del_elemento_de_pala)
- [14] Wikipedia, *Sutentación*, Decembre, 2022
[\[https://es.wikipedia.org/wiki/Sustentaci%C3%B3n\]](https://es.wikipedia.org/wiki/Sustentaci%C3%B3n)
- [15] Joyplanes, *Selección de perfiles alares para aeromodelos*, Decembre, 2022
[\[https://joyplanes.com/es/seleccion-de-perfiles-alares-para-aeromodelos/\]](https://joyplanes.com/es/seleccion-de-perfiles-alares-para-aeromodelos/)
- [16] Hmong, *Teoría del elemento de hoja*, Decembre, 2022
[\[https://hmong.es/wiki/Blade_element_theory\]](https://hmong.es/wiki/Blade_element_theory)
- [17] Wikipedia, *Blade element momentum theory*, Decembre, 2022
[\[https://en.wikipedia.org/wiki/Blade_element_momentum_theory\]](https://en.wikipedia.org/wiki/Blade_element_momentum_theory)
- [18] Hmong, *Teoría del impulso del elemento de la cuchilla*, Decembre, 2022
[\[https://hmong.es/wiki/Blade_element_momentum_theory\]](https://hmong.es/wiki/Blade_element_momentum_theory)
- [19] Universidad Veracruzana, *¿Que es la Energía Eólica?*, Decembre, 2022
[\[https://www.uv.mx/coatza/cires/main/keeseolica/\]](https://www.uv.mx/coatza/cires/main/keeseolica/)
- [20] Danish Wind Industry, *Mapa eòlico Europa*, Gener, 2023
[\[http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wres/euromap.htm\]](http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wres/euromap.htm)

- [21] Aliente, *La invasion de las energias renovables, Gener, 2023*
[<https://aliente.org/proyectos-en-aragon>]
- [22] Weather Spark, *Clima y tiempo promedio de todo el año, Gener, 2023*
[<https://es.weatherspark.com/>]
- [23] INE, *La invasion de las energias renovables, Gener, 2023*
[https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176952&menu=ultiDatos&idp=1254735572981]
- [24] Chcenergia, *En que meses se consume mas electricidad, Gener, 2023*
[<https://chcenergia.es/blog/en-que-meses-se-consume-mas-electricidad/>]
- [25] La Vanguardia, *Gasto de luz de una escuela, Gener, 2023*
[[https://www.lavanguardia.com/vida/20151119/30268457462/cada-nino-de-guarderia-consume-una-media-de-5kwh-y-67-litros-de-agua-al-dia.html#:~:text=CAT%2DAHORRO%20ENERG%C3%8DA&text=%2D%20Los%20ni%C3%B1os%20que%20acuden%20a,Barcelona%20\(ICTA%2DUAB\).\]](https://www.lavanguardia.com/vida/20151119/30268457462/cada-nino-de-guarderia-consume-una-media-de-5kwh-y-67-litros-de-agua-al-dia.html#:~:text=CAT%2DAHORRO%20ENERG%C3%8DA&text=%2D%20Los%20ni%C3%B1os%20que%20acuden%20a,Barcelona%20(ICTA%2DUAB).)]
- [26] Totalenergies, *Gasto de luz de un comercio, Gener, 2023*
[<https://www.totalenergies.es/es/pymes/blog/gasto-luz-local-comercial>]
- [27] Totalenergies, *Gasto de luz de un restaurante, Gener, 2023*
[<https://www.totalenergies.es/es/pymes/blog/gasto-medio-luz-gas-restaurante#:~:text=Generalmente%2C%20un%20restaurante%20suele%20acumular,cocina%20de%20unos%2020m%2D30m2>]
- [28] Ministerio de Fomento, *Electricidad que consume un CAP, Gener, 2023*
[https://cdn.mitma.gob.es/portal-web-drupal/planes_estartegicos/9_2020_informe_tipologias_y_actuaciones_terciario.pdf]
- [29] Google Maps, *Coordenades del lloc de instal·lació, Febrer, 2023*
[<https://goo.gl/maps/LoHdYKiLX1nXg6kTA>]

[30] Danish Wind Industry, *Velocitat del vent segons la altura*, Febrer, 2023

[<https://acortar.link/velocitataltura>]

[31] Govern d'Aragó, *Parc eòlic en Alloza*, Febrer, 2023

[https://www.aragon.es/documentos/20127/63218811/341705803-320-0000_PROYECTO_SEPARATA+PE+ANDORRA_VISADO.pdf/a8569e29-9771-89a4-c333-3f2bb6459abb?t=1601981703172]

[32] Danish Wind Industry, *Distribució Weibull*, Febrer, 2023

[<https://acortar.link/Weibull>]

[33] D. Le Gourières Masson, *Energía eólica: teoría, concepción y cálculo práctico de las instalaciones*. Barcelona 1983.

[34] Airfooltols, *Gràfiques de NACA foil*, Febrer, 2023

[<http://www.airfoiltools.com/airfoil/naca4digit>]

[35] Direct Industry, *Alternador trifàsic Turbo Systems Iberia, S.L.U*, Febrer, 2023

[<https://www.directindustry.es/prod/abb-motors-drives-and-power-electronics/product-30286-2321171.html>]

[36] Sogears, *Caixa multiplicadora*, Febrer, 2023

[<https://es.sogears.com/>]

[37] Qblade, *Guia d'ús*, Març, 2023

[<https://docs.qblade.org/src/user/blade/blade.html#blade-definition>]

[38] IOP Conference Series, *Selection of Twist and Chord of Wind Turbine*, Març, 2023

[<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/149/1/012203/pdf>]

[39] Johnson, Gary L., *Wind Energy Systems, Edición Electrónica*, Manhattan 2001

[40] Youtube, *Vídeos simulacions QBLADE*, Maig, 2023

[<https://www.youtube.com/playlist?list=PLsidc43IliCZFpxrvKDRbgEVbcUB3sNJj>]

[41] Youtube, *Simulació pressió Dinàmica amb SolidWorks, Maig, 2023*

[<https://www.youtube.com/watch?v=MYwxGiEwHjI>]

[42] Miguel Suau Castro, *Codis Matlab BEM, Maig, 2023*

[https://oa.upm.es/36428/1/PFG_Miguel_Suau_Castro.pdf]

[43] Jose Maria Escudero Lopez, *Manual de energia eolica, Edición Electrónica, Madrid 2008*

[44] Javier Cerezo, *Diseño de un Aerogenerador, Edición Electrónica, Madrid 2011*

