

Treball final de grau

Estudi: DOBLE TITULACIÓ GETI - ADE

Títol:

DISSENY D'UNA TURBINA EÒLICA D'EIX VERTICAL PER
L'AUTOCONSUM DOMÈSTIC

Document: 1. Memòria

Alumne: Ioana Florentina Petrescu

Tutor: Dr. Xavier Espinach Orús

Departament: Organització, gestió empresarial i Disseny del producte

Àrea: Expressió gràfica en l'enginyeria

Convocatòria (mes/any): Setembre de 2022

ÍNDEX MEMORIA

MEMÒRIA

1	INTRODUCCIÓ	6
1.1	Origen del projecte	6
1.2	Antecedents	6
1.3	Objectius	7
1.4	Abast	7
2	L'ENERGIA EÒLICA.....	8
2.1	Què és l'energia eòlica?	8
2.2	Origen del vent	8
2.3	Direcció dominant del vent	9
2.4	Beneficis de l'energia eòlica	10
2.5	L'energia eòlica a Espanya.....	10
3	AEROGENERADORS.....	12
3.1	Antecedents històrics	12
3.2	Tipus d'aerogeneradors.....	13
3.3	Aerogeneradors d'eix vertical	14
3.4	Perquè el disseny d'un aerogenerador d'eix vertical tipus Savonius.....	16
4	SITUACIÓ GEOGRÀFICA I NECESSITATS DEL PROJECTE.....	17
4.1	Situació i emplaçament de l'aerogenerador.....	17
4.2	Necessitats de l'habitatge unifamiliar.....	17
5	SISTEMES I COMPONENTS DE L'AEROGENERADOR	18
5.1	Sistema de potència	18
5.2	Sistema de generació.....	19
5.3	Sistema de control.....	20
5.4	Sistema estructural.....	20
6	DISSENY DE L'AEROGENERADOR	21
6.1	Model comercial de referència.....	21
6.2	Modelització prototip.....	21
7	SIMULACIÓ I ANÀLISI DEL MODEL	23

7.1	Simulació CFD (Dinàmica de Fluids Computacional).....	23
7.2	Anàlisi estructural estàtic.....	24
8	RESUM DEL PRESSUPOST	25
9	CONCLUSIONS	26
10	REFERÈNCIES	27
7.3	Normativa.....	27
7.4	Bibliografia i webgrafia	27

ANNEXOS

ESTAT D'AMIDAMENTS I PRESSUPOST

PLEC DE CONDICIONS

PLÀNOLS

RESUM

ÍNDEX DE FIGURES

Figura 1.	Circulació general de l'aire a la superfície. Font: Meteoblog	8
Figura 2.	Circulació general de l'aire a la Terra. Font: Meteored.....	9
Figura 3.	Evolució anual i acumulada de la potència instal·lada a Espanya. Font: AEE	11
Figura 4.	Quota de mercat 2021 segons fonts energètiques. Font: AEE	11
Figura 5.	Aerogenerador d'eix horitzontal a) Tripala. b) Bipala. c) Multipala	13
Figura 6.	a) Savonius original. b) Savonius molí. c) Savonius helicoidal.....	14
Figura 7.	a) Darrieus circular. b) Darrieus delta.	15
Figura 8.	Aerogenerador Savonius-Darrieus	15
Figura 9.	Situació i emplaçament de la instal·lació	17
Figura 10.	Components d'un aerogenerador d'eix horitzontal. Font: CCEEA	18
Figura 11.	Dinamo: generador de corrent continu	19
Figura 12.	Especificacions tècniques del generador CC escollit. Font: Siemens	19
Figura 13.	Sistema de control i frenat de l'aerogenerador.....	20
Figura 14.	Model comercial de referència: WS-0,30B. Font: Windside	21
Figura 15.	Modelització del rotor en SolidWorks: Pales i eix. Font pròpia.....	22
Figura 16.	Comportament del fluid al voltant de l'aerogenerador que gira.....	23

Figura 17. Resultat tensió principal màxima. Font pròpia	24
Figura 18. Resultat deformació total. Font pròpia	24

ÍNDIX DE TAULES

Taula 1. Beneficis rellevants de l'energia eòlica	10
Taula 2. Resum pressupost prototip (€)	25



Conjunt de turbines eòliques tipus Savonius helicoidal. Font: Windside

“Hi ha energies que són el viatge, no el destí”

Autor desconegut

1 INTRODUCCIÓ

1.1 Origen del projecte

El present projecte neix d'observar el notable augment en la implantació d'energies renovables per l'autoconsum, principalment d'energia fotovoltaica.

Aquest fenomen fa plantejar-se si és possible aplicar altres fonts energètiques sostenibles per l'ús domèstic tal que siguin rendibles, de manera individual o bé complementant-se entre elles.

Sorgit aquest dubte, s'ha pensat en un sistema eòlic, no obstant això, les grans dimensions requerides pels aerogeneradors habituals, els tripala o bipala d'eix horitzontal, dificulten la seva instal·lació en entorns urbans a causa del seu impacte visual. Per aquesta raó, s'ha considerat oportú analitzar les turbines eòliques d'eix vertical, més petites i discretes que les anteriors segons la seva tipologia i geometria.

Mogut per la curiositat, aquest projecte pretén analitzar diferents vectors per determinar si seria factible la instal·lació d'aquest tipus d'aerogeneradors.

1.2 Antecedents

En un moment on l'escassetat i revalorització de recursos energètics convencionals estan a l'alça, traduït en un constant augment de preus, combinat amb un creixement de la preocupació social per la contaminació del medi ambient, les energies renovables prenen més impuls que mai.

Amb les millores de les tecnologies d'aprofitament de recursos sostenibles, s'observa un increment en la implementació de les energies renovables per l'autoconsum. Tanmateix, ens trobem amb un escenari alternatiu poc explotat a l'àmbit domèstic, l'energia eòlica.

Aquest fet té una explicació i és la consideració de l'impacte visual i ambiental que generen les turbines eòliques, sobretot les d'eix horitzontal, per les seves grans dimensions, dificultant així el seu ús en entorns urbans.

Per aquest motiu s'ha optat per estudiar els aerogeneradors d'eix vertical, més compactes que els anteriors, i determinar si és possible generar electricitat a la geografia seleccionada.

1.3 Objectius

L'objecte principal del projecte és la modelització d'una turbina eòlica d'eix vertical tipus *Savonius* helicoidal a partir d'un model comercial per la seva implementació en un habitatge unifamiliar, així com determinar la viabilitat funcional i econòmica de la instal·lació.

1.4 Abast

El projecte abastarà la modelització dels principals elements de la turbina eòlica, en aquest cas les pales i l'eix, i l'anàlisi del conjunt a través d'una simulació CFD (Dinàmica de Fluid Computacional) i de la seva estàtica.

2 L'ENERGIA EÒLICA

2.1 Què és l'energia eòlica?

L'energia eòlica és una font d'energia renovable que genera electricitat a partir de la força del vent mitjançant un element de captació i transformació: l'aerogenerador.

L'aerogenerador transforma l'energia cinètica dels corrents de l'aire en energia mecànica a través del moviment originat per l'impacte del vent contra la superfície de les pales, les quals el transmeten al rotor connectat a una dinamo (generador) que dona lloc al corrent continu.

Per tal que sigui utilitzada a l'àmbit domèstic, és necessària la conversió del corrent continu en corrent altern a través d'un inversor.

Però, com es genera l'energia cinètica? A continuació es detalla l'explicació.

2.2 Origen del vent

L'atmosfera, constituïda essencialment per oxigen, nitrogen i vapor d'aigua, es caracteritza per la seva pressió, temperatura i humitat, paràmetres que varien amb l'altura a la qual es verifiquen.

Pel fet que la radiació solar no incideix d'igual manera a totes les superfícies terrestres, algunes zones s'escalfen més que d'altres. Aquestes variacions de temperatura donen lloc a diferències de densitats en les masses d'aire, el que causa el seu desplaçament d'unes latituds a altres. Aquest desplaçament s'efectua des de la zona on la densitat de l'aire és alta cap a la que és baixa (Figura 1), originant així el vent.

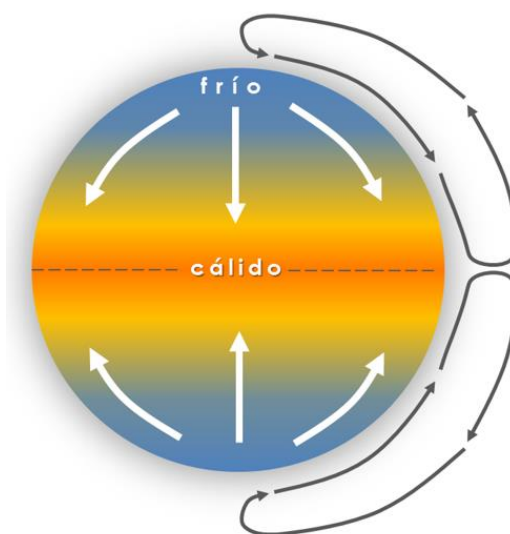


Figura 1. Circulació general de l'aire a la superfície. Font: Meteoblog

Aquests desplaçaments estan considerablement influenciats per la força de Coriolis, que s'exerceix perpendicularment a la direcció del moviment, cap a la dreta a l'hemisferi nord i cap a l'esquerra a l'hemisferi sud.

Aquestes lleis defineixen els moviments generals del desplaçament de masses d'aire, és a dir, del vent. Es pot preveure la direcció dels vents dominants en la major part de les zones de la Terra. Tal com es mostra a la Figura 2 .

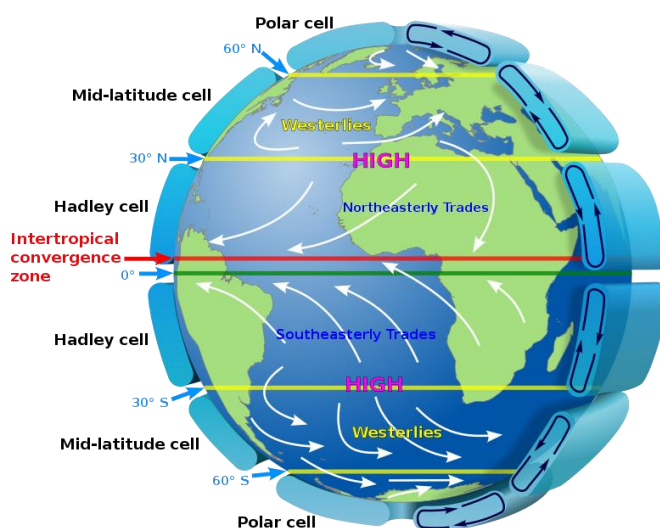


Figura 2. Circulació general de l'aire a la Terra. Font: Meteored

Malgrat això, aquestes direccions freqüentment es veuen alterades per tempestes que desvien la direcció dominant ells obstacles naturals, etc.

El vent es caracteritza per dues variables, la velocitat i la seva direcció, valors importants, tal com es pot veure a l'Annex III, per la modelització i el disseny de l'aerogenerador, ja que són directament proporcionals a la potència que és capaç de generar l'aerogenerador.

2.3 Direcció dominant del vent

Tal com es mostra a la Figura 2 anterior, la direcció predominant de circulació del vent a Espanya és des de l'oest.

Els anomenats vents de l'oest, *Westerlies* en anglès, es produeixen d'oest a est a les latituds subtropicals i mitjanes de les zones temperades en latituds entre 30 i 60 graus d'ambdós hemisferis.

La intensitat dels vents de l'oest compleix un cicle d'afebliment a les estacions càlides i d'enfortiment a les estacions fredes.

2.4 Beneficis de l'energia eòlica

Alguns dels beneficis més rellevants de l'energia eòlica es detallen a continuació:



Font energètica inesgotable

El vent és un recurs il·limitat, així com el seu aprofitament sempre que hi hagi prou corrent d'aire.

Garantia de sostenibilitat ambiental

L'eòlica no contamina i frena l'esgotament de combustibles fòssils i contribueix a frenar el canvi climàtic. És una tecnologia líder a evitar emissions de CO₂, evita l'emissió de 28,7 milions de tones de CO₂.

L'electricitat generada amb l'eòlica va estalviar a Espanya uns 1.389 milions d'euros en importacions de combustibles fòssils.



Impuls econòmic

L'eòlica representa el 0,30% del PIB espanyol. La indústria eòlica exporta tecnologia per uns 1.748,6 milions d'euros l'any.

Font d'energia més barata

L'energia eòlica baixa els preus de l'electricitat en desplaçar tecnologies de combustió més cares al mercat. L'efecte reductor de l'eòlica va ser de 18,42 €/MWh el 2021, fet que es tradueix en un estalvi per als consumidors domèstics (un cop descomptats els incentius per a l'eòlica) amb un consum mitjà anual de 3.650 kWh ha suposat un estalvi net de 41,41€.



Taula 1. Beneficis rellevants de l'energia eòlica

2.5 L'energia eòlica a Espanya

D'acord amb l'Associació Empresarial Eòlica (AEE) l'energia eòlica ha estat la primera font de generació elèctrica a Espanya el 2021, amb 28.139 MW de potència acumulada i amb previsió de seguir en creixement (Figura 3), i ha superat el 23% (Figura 4) de cobertura de la demanda. Els més de 21.500 aerogeneradors instal·lats a Espanya van generar 60.485 GWh eòlics el 2021, un 10% més que el 2020.

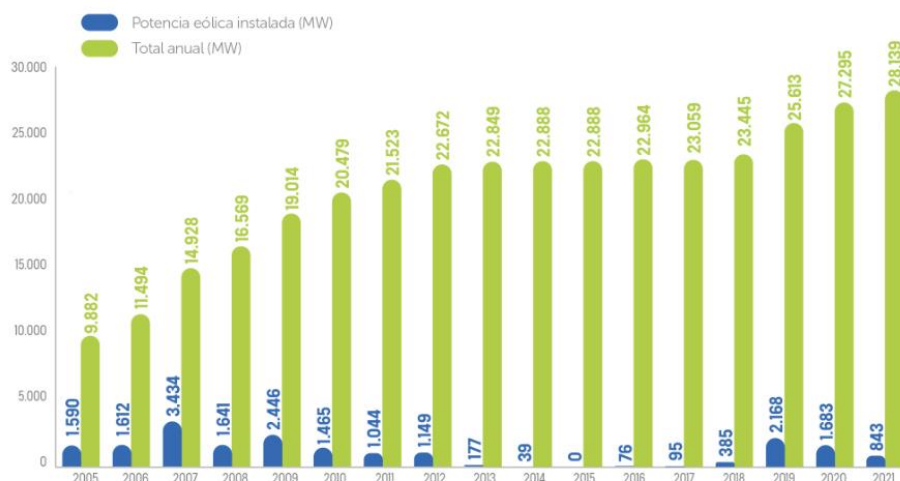


Figura 3. Evolució anual i acumulada de la potència instal·lada a Espanya. Font: AEE

Durant el 2021 s'han instal·lat 842.61 MW eòlics, xifra rellevant, però molt per sota dels 2,2 GW anuals que caldria instal·lar fins al 2030 per assolir els objectius marcats al Pla Nacional Integrat d'Energia i Clima (PNIEC), el qual persegueix una reducció d'un 23% d'emissions de gasos d'efecte hivernacle (GEI) respecte al 1990, fet que implica un increment de renovables i, en particular, duplicar-ne la potència eòlica.

Cal destacar que Espanya és el cinquè país del món per potència eòlica instal·lada, després de la Xina, els Estats Units, Alemanya i l'Índia, i el segon a Europa darrere d'Alemanya.

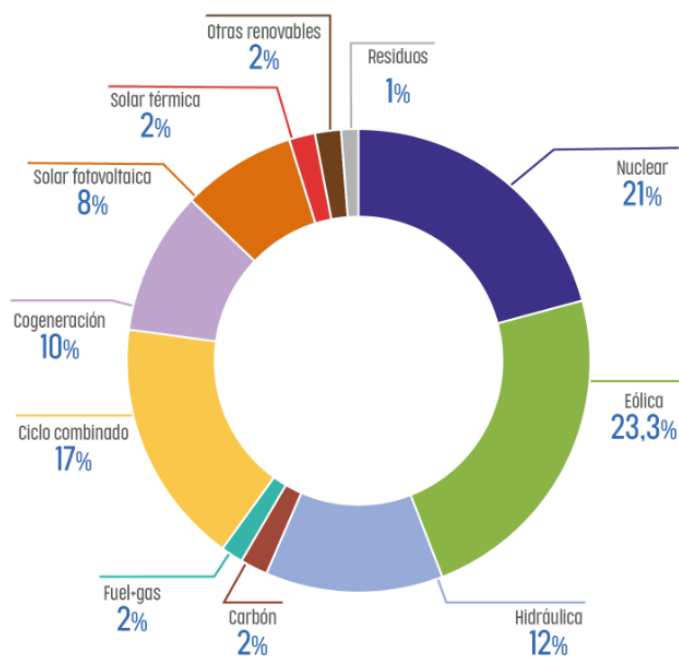


Figura 4. Quota de mercat 2021 segons fonts energètiques. Font: AEE

3 AEROGENERADORS

3.1 Antecedents històrics

A grans trets, és necessari destacar alguna data important de l'evolució de la tecnologia eòlica i de la utilització dels aerogeneradors, ja que es remunten molts anys enrere.

Se sap que ja cap al segle V aC es trobaven els primers aeromotors a l'Àsia, eren màquines d'eix vertical, mentre que a Egipte, a la mateixa època, s'utilitzaven molins d'eix horitzontal. Malgrat ser diferents des del punt de vista tecnològic, els molins tenien el mateix principi: la transformació de l'energia eòlica en energia per al bombeig de l'aigua, la molta de grans, entre altres usos.

A Europa, no és fins al segle VII dC que apareixen els primers molins pels mateixos usos. La tecnologia dels quals han evolucionat fins avui dia.

Cap a l'any 1802 es va pensar per primera vegada en transformació de l'energia eòlica en energia elèctrica. Lord Kelvin va intentar associar un generador elèctric a un aeromotor, no obstant va ser necessari l'espera de la creació de la dinamo, l'any 1850, per donar lloc al què avui dia coneixem com a aerogenerador.

Al voltant d'aquesta època, el far de la *Hève (Sainte-Adresse, França)* va ser la primera instal·lació d'abalisament marítim equipada amb una font d'energia elèctrica autònoma mitjançant un aerogenerador. Una aplicació de l'energia eòlica amb èxit.

A més a més, les investigacions en el camp de l'aerodinàmica, especialment per l'aeronàutica, va permetre progressos apreciables. Estudis que van donar lloc a la construcció de grans màquines de potències compreses entre els 100 i 1000 kW, que mostraven la factibilitat de produir energia elèctrica a partir del vent. No obstant, en aquella època el baix preu del petroli va posar el kilowatt produït per energia tèrmica a un nivell de competència inaccessible per l'energia eòlica.

Però, amb la Crisi del Petroli de l'any 1973, el procés invers va promoure els estudis i la construcció d'aerogeneradors. Algunes de les instal·lacions més importants per l'època:

- 1910 a Dinamarca, rotor 4 pales, de 22,8 m de diàmetre, amb 200 kW amb vent a 15 m/s. Parat el 1966.
- 1931 a Rússia, rotor 3 pales, de 30 m de diàmetre, amb 100 kW amb vent a 11 m/s. Parat el 1943 per la guerra.

- 1940 a Anglaterra, rotor 3 pales, de 12,5 m de diàmetre, 100 kW amb vent a 18 m/s. Funcionament defectuós, parat.
- 1941 a Estats units, rotor bipala, 53 m de diàmetre, amb 1250 kW a 15,3 m/s. Parat, ruptura d'una pala al 1945.
- 1975. Estats units, rotor bipala, 37,5 m de diàmetre, 100 kW a 8 m/s. Parat per fragilitat de les pales.

Entre molts altres. Els fracassos i èxits han permès arribar fins al progrés actual.

3.2 Tipus d'aerogeneradors

De manera general, es defineixen els aerogeneradors segons la posició del seu eix de rotació amb relació a la direcció del vent. D'aquesta manera es poden dividir en:

- Aerogeneradors d'eix horitzontals: el seu eix és paral·lel a la direcció del vent. Actualment, són les màquines més emprades, ja que el seu rendiment és superior a la resta de turbines eòliques.

La seva configuració pot ser definida per 1, 2, 3 o 4, (Figura 5) a més a més de les múltiples utilitzades principalment pel bombeig d'aigua.

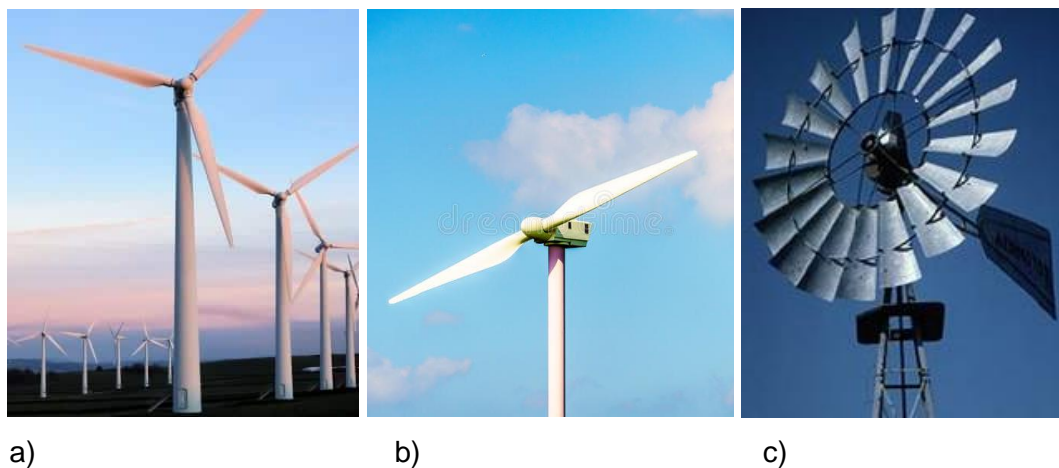


Figura 5. Aerogenerador d'eix horitzontal a) Tripala. b) Bipala. c) Multipala

- Aerogenerador d'eix vertical: el seu eix és perpendicular a la direcció del vent. Són presumiblement les primeres màquines eòliques que es van usar, ja que conceptualment són molt més senzilles que les d'eix horitzontal.

En comparació amb l'anterior tipologia, els seus rendiments són molt menors. Existeixen diferents tipus, a continuació es descriuen els més rellevants d'acord amb l'objectiu del present projecte.

3.3 Aerogeneradors d'eix vertical

3.3.1 Savonius

Aquestes turbines eòliques van ser inventades per l'enginyer finlandès Sigurd J. Savonius l'any 1922. Són de les més simples i fan ús essencialment de la força d'arrossegament diferencial creat per les pales. Tal com mostra la Figura 6, les pales poden adoptar diverses formes.

El seu parell d'arrencada és elevat, tanmateix, la velocitat màxima és inferior a la dels aerogeneradors d'eix horitzontal.

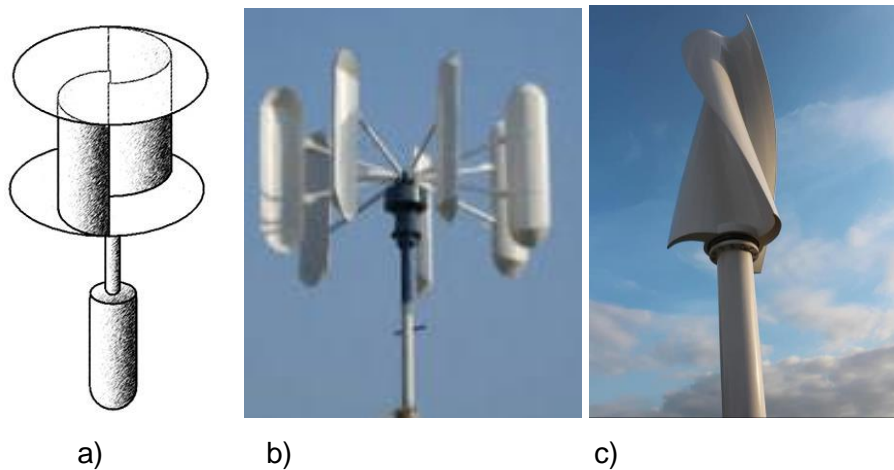


Figura 6. a) Savonius original. b) Savonius molí. c) Savonius helicoidal

3.3.2 Darrieus

Aquest disseny va ser patentat per Georges Jean Marie Darrieus, un enginyer aeronàutic francès, el 1926. Es caracteritzen per un debíl parell d'arrencada i una velocitat de rotació elevada que permet recuperar una gran potencia.

Els aerogeneradors poden adoptar diferents configuracions:

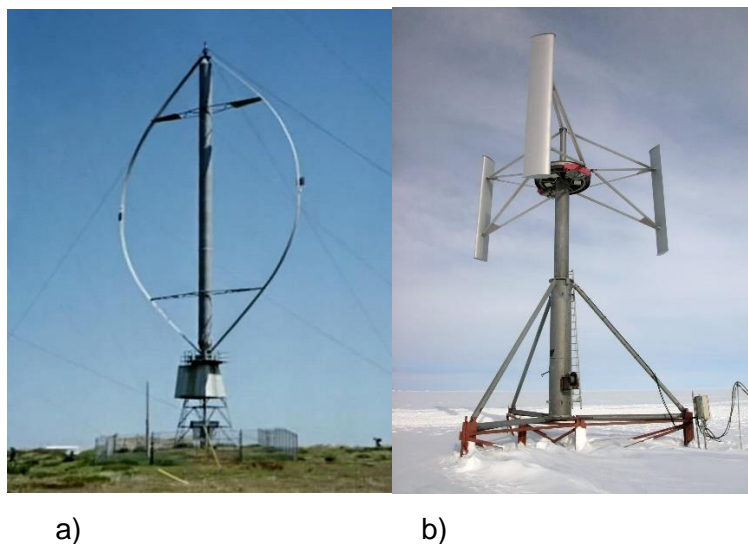


Figura 7. a) Darrieus circular. b) Darrieus delta.

3.3.3 Savonius – Darrieus

Aquesta tipologia de turbines eòliques combina els dos anteriors amb l'objectiu de tenir un parell d'arrencada superior gràcies a les característiques del rotor tipus Savonius i una velocitat de rotació major per la configuració Darrieus.



Figura 8. Aerogenerador Savonius-Darrieus

3.4 Perquè el disseny d'un aerogenerador d'eix vertical tipus Savonius

S'ha seleccionat el rotor tipus Savonius en primer lloc per la senzillesa del disseny, atès que la seva forma permet la seva instal·lació sense necessitat de comptar amb grans extensions de terreny.

En segon lloc, pel seu parell d'arrancada, ja que no necessita de cap sistema complementari d'autoarrencada, fet que simplifica el model.

Finalment, destaquen per tenir un rotor amb aspes multidireccionals en posició vertical. Això els permet generar electricitat a qualsevol lloc i sense importar la direcció del vent i, per tant, permet prescindir del sistema d'orientació.

Tot i que encara no són gaire eficients, es considera que alguns dissenys tenen un gran potencial per transformar-se en una font d'energia renovable per a zones urbanes seguint els principis de la construcció sostenible.

4 SITUACIÓ GEOGRÀFICA I NECESSITATS DEL PROJECTE

4.1 Situació i emplaçament de l'aerogenerador

Es preveu la instal·lació de l'aparell a una zona costanera, a la comarca de la Selva, més concretament a Lloret de Mar (17310).



Figura 9. Situació i emplaçament de la instal·lació

Per la modelització del prototip s'ha requerit disposar de les dades meteorològiques més rellevants. Aquestes es detallen a l'Annex I del present projecte.

4.2 Necessitats de l'habitatge unifamiliar

L'emplaçament de l'aerogenerador es preveu a una casa unifamiliar amb una superfície total de 110 m², unitat de la qual està formada per quatre membres.

L'habitatge disposa de diferents fonts d'energia. La calefacció és elèctrica, disposa de bomba de calor. La producció d'aigua calenta sanitària és a gas natural. La resta d'equips i electrodomèstics són elèctrics.

S'estima el seu consum elèctric 7.500 kWh/any.

5 SISTEMES I COMPONENTS DE L'AEROGENERADOR

Un aerogenerador està format per un conjunt de components els quals realitzen funcions molt específiques. Alguns components poden ser compartits tant per als aerogeneradors de tipologia VAWT (eix vertical) com HAWT (eix horitzontal):

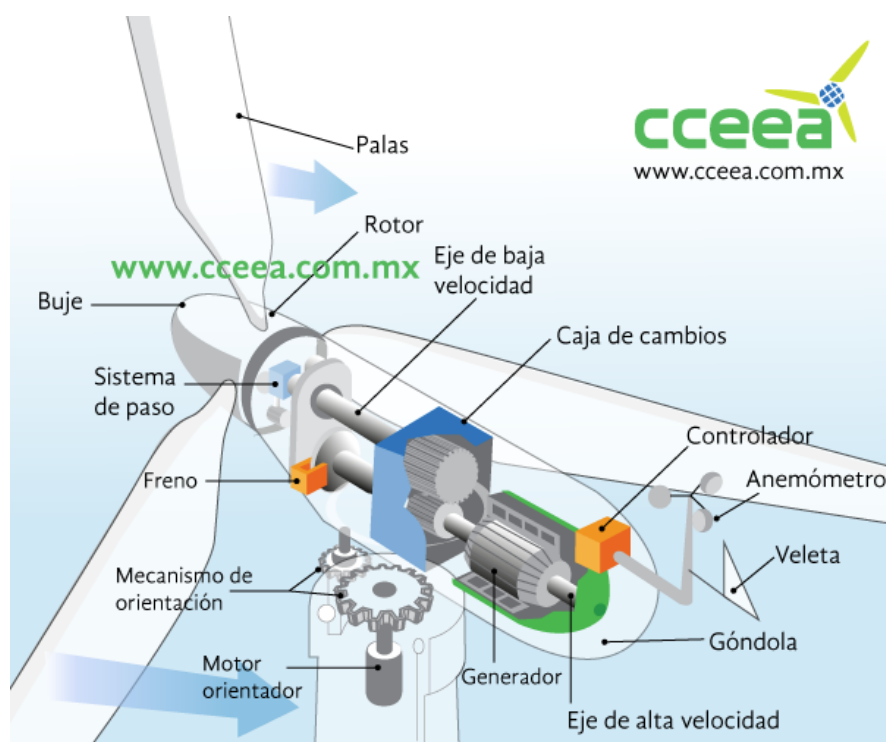


Figura 10. Components d'un aerogenerador d'eix horitzontal. Font: CCEEA

Pel cas que ocupa cal destacar que l'aerogenerador no requerirà mecanismes de canvi de revolucions, ja que no se solen utilitzar per aplicacions que precisin una velocitat angular constant. Tampoc incorporà panell, pel fet que la direcció del vent no és rellevant en la mateixa dimensió, entre altres.

A continuació es detallen els components disponibles.

5.1 Sistema de potència

5.1.1 Pales

Les pales són els components encarregats d'absorbir l'energia cinètica lineal del vent. En el present cas seran definides per un perfil semicircular amb una superfície helicoidal. El material per la seva fabricació serà de fibra de vidre amb acabat de resina Epoxy, o similar.

A l'annex IV s'analitza com es veuran afectades les pales amb l'impacte constant de la força del vent.

5.1.2 Eix principal

Mitjançant la geometria de les pales i la seva connexió amb l'eix, es transforma l'energia cinètica en energia mecànica rotacional. Aquest està directament connectat amb el generador de corrent continu.

El material previst en aquest cas és d'acer inoxidable.

5.2 Sistema de generació

5.2.1 Generador corrent continu

És el component que transforma l'energia rotacional transferida per l'eix en energia elèctrica. Es preveu que estigui dotat dels rodaments necessaris per garantir l'estanquitat del sistema i el correcte dir de l'eix.

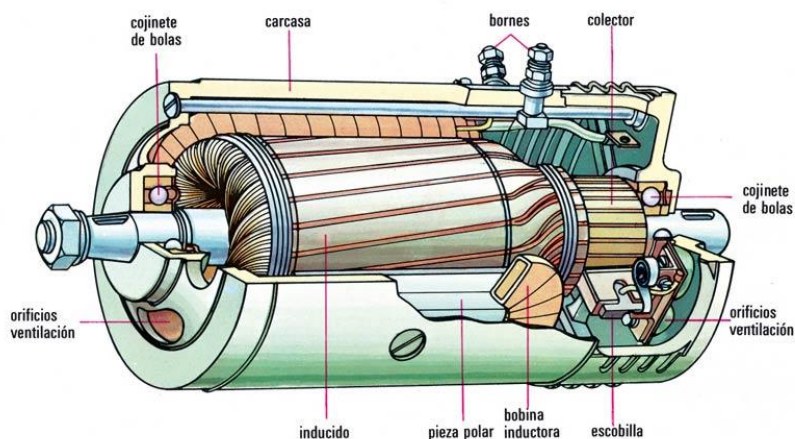


Figura 11. Dinamo: generador de corrent continu

Tal com s'especifica a l'Annex IV, el generador seleccionat és el model SIMOTICS S-1FL6 de Siemens:

SIEMENS

Hoja de medición y de datos SIMOTICS S-1FL6
Data sheet for SIMOTICS S-1FL6

Datos de pedido
MLFB-Ordering data

1FL6042-1AF61-2AA1

Número de pedido del cliente / Client order no.:

Nº. de pedido Siemens / Order no.:

Número de oferta / Offer no.:

Nota / Remarks:



Figura 12. Especificacions tècniques del generador CC escollit. Font: Siemens

5.2.2 Inversor

És el dispositiu electrònic capaç de transformar un corrent continu DC a un corrent alter AC a un voltatge i freqüència determinant, en aquest cas per a l'ús domèstic es tractaria d'un corrent altern a 230 V i 50 Hz.

5.3 Sistema de control

5.3.1 Sistema de control i frens

Es preveu la instal·lació d'una interfície de connexió a xarxa per a aerogenerador, la qual inclou resistència de frenada.

La interfície de connexió a xarxa rectifica, controla i filtra l'energia produïda per l'aerogenerador lliurant energia en tensió contínua apta per a l'entrada d'un inversor connectat cap a la xarxa de consum final.



Figura 13. Sistema de control i frenat de l'aerogenerador.

5.4 Sistema estructural

5.4.1 Pilar de suport

És l'estructura sobre la qual s'alça l'aerogenerador. Aquesta serveix per a aprofitar els vents més ràpids que es poden trobar a major altitud. S'ha previst en secció tubular, d'acer conformat. Les especificacions es detallen a l'Annex IV, juntament amb l'anàlisi estructural del pilar.

6 DISSENY DE L'AEROGENERADOR

6.1 Model comercial de referència

Per facilitar i començar el disseny del prototip de l'aerogenerador, s'ha partit de la base d'un model ja comercialitzat.

A continuació es detallen les seves dimensions i característiques tècniques:

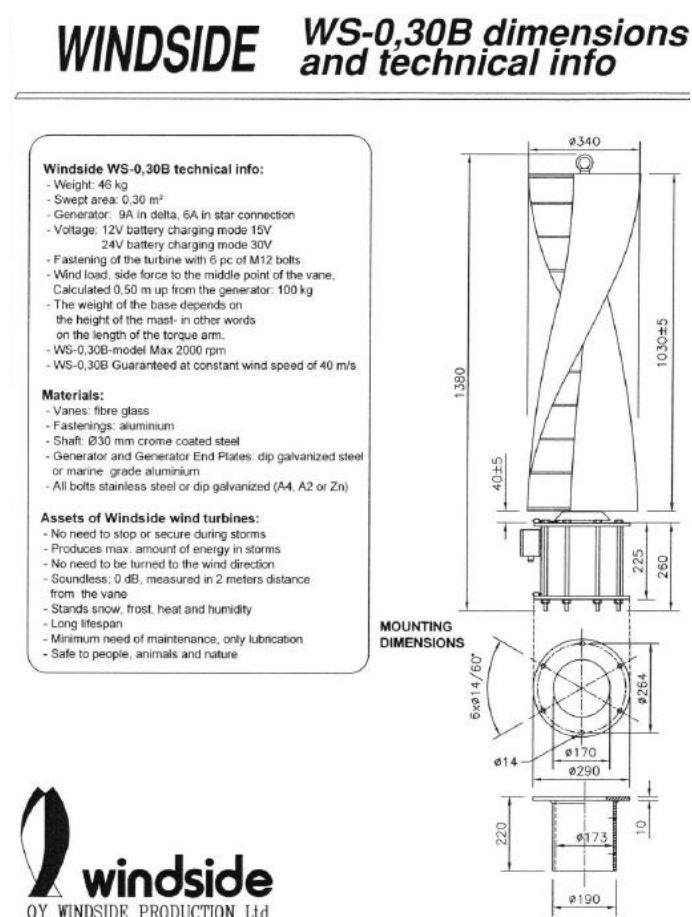


Figura 14. Model comercial de referència: WS-0,30B. Font: Windside

6.2 Modelització prototip

Basant-se en el model comercial anterior, s'ha realitzat el disseny i modelatge del prototip amb el software de Solid Works 2022.

Per aquesta raó, com a principal requisit de disseny s'ha considerat les dimensions de referència, sense pretendre aconseguir les mateixes prestacions tècniques o la viabilitat comercial del model.

Principalment, l'objectiu ha estat tenir un perfil simple, fàcil d'executar i de muntar.

A l'Annex II del present projecte es detalla el procés de modelització, el dimensionament exacte, els materials previstos així com la maquetació del prototip a través de la impressió en 3D del rotor.

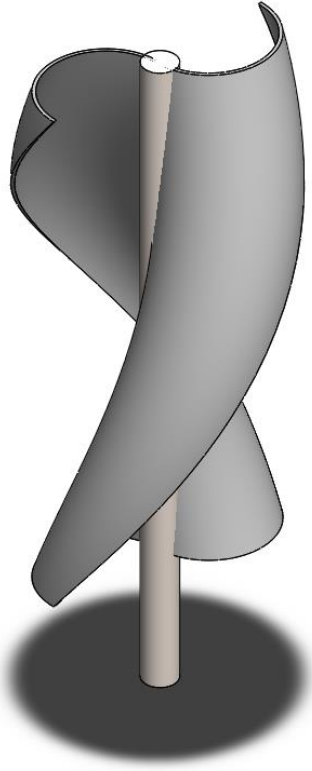


Figura 15. Modelització del rotor en SolidWorks: Pales i eix. Font pròpia

7 SIMULACIÓ I ANÀLISI DEL MODEL

7.1 Simulació CFD (Dinàmica de Fluids Computacional)

Tota la informació respecte a aquest procediment s'ha especificat a l'Annex IV del present projecte.

Per la simulació s'ha utilitzat el software ANSYS Fluent d'ANSYS Workbench 2022 R1. Aquesta és una eina de dinàmica de fluids computacional (CFD) que s'utilitza particularment per al modelatge del flux de fluids i la transferència de calor.

Per la simulació s'ha considerat una entrada de flux constant a una velocitat de 9,5 m/s, obtenint el següent:

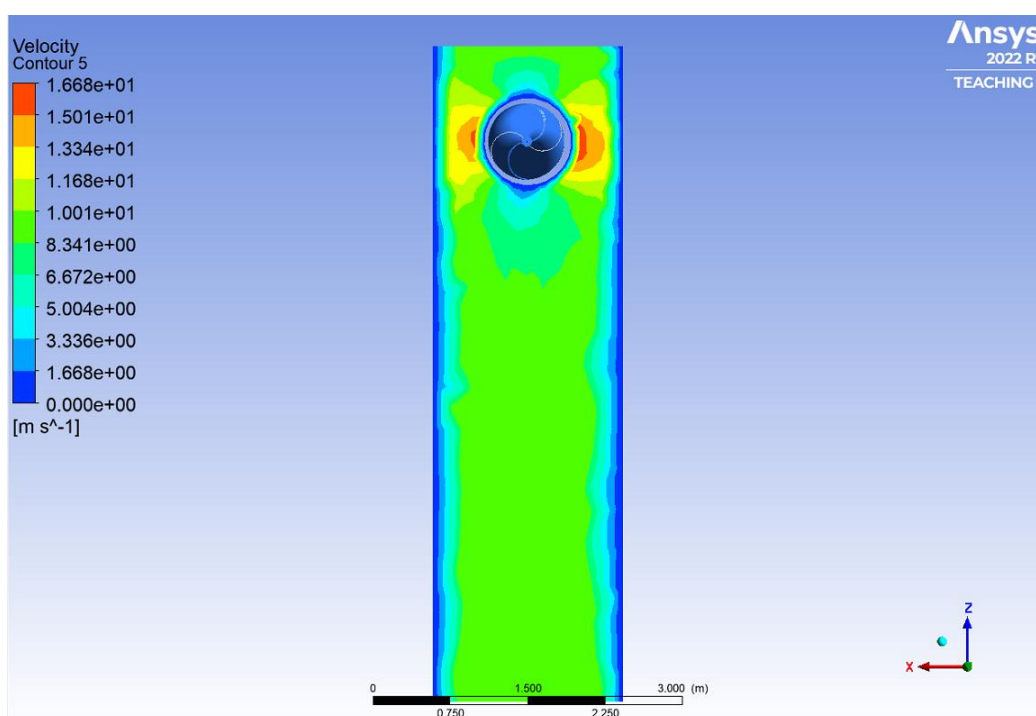


Figura 16. Comportament del fluid al voltant de l'aerogenerador que gira

El resultat que s'observa a la Figura 16 és com es comporta el fluid, en aquest cas l'aire, quan travessa el rotor, el qual té associat un moviment rotacional. El mapa mostra les àrees més afectades: les pales de l'aerogenerador al voltant de les quals s'aconsegueix velocitats superiors a la de l'entrada, ja que el gir del rotor accelera el fluid que l'envolta.

7.2 Anàlisi estructural estàtic

Amb la finalitat d'analitzar el comportament de les pales de l'aerogenerador en ser impactes per la força del vent i originar el gir de la màquina, es porta a terme un estudi estructural estàtic. El mètode d'anàlisi es descriu a l'Annex IV. L'eina utilitzada és el Static Structural del programari d'ANSYS Workbench 2022 R1.

S'ha assimilat la força del vent a un moviment rotacional de l'eix, obtenint els següents resultats:

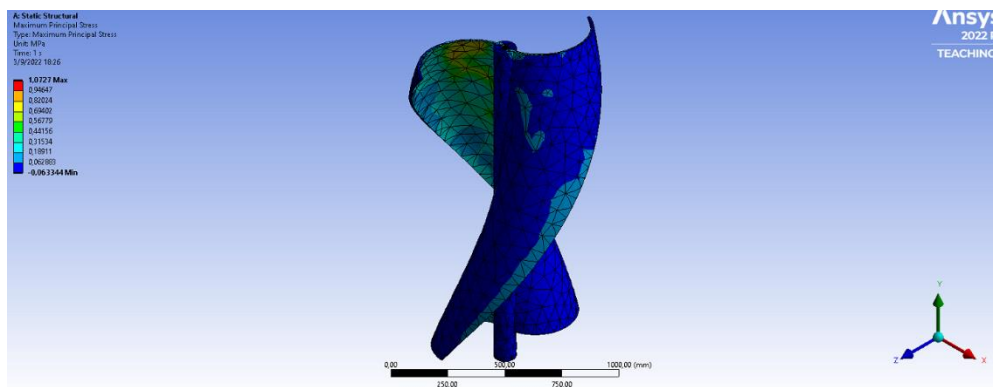


Figura 17. Resultat tensió principal màxima. Font pròpia

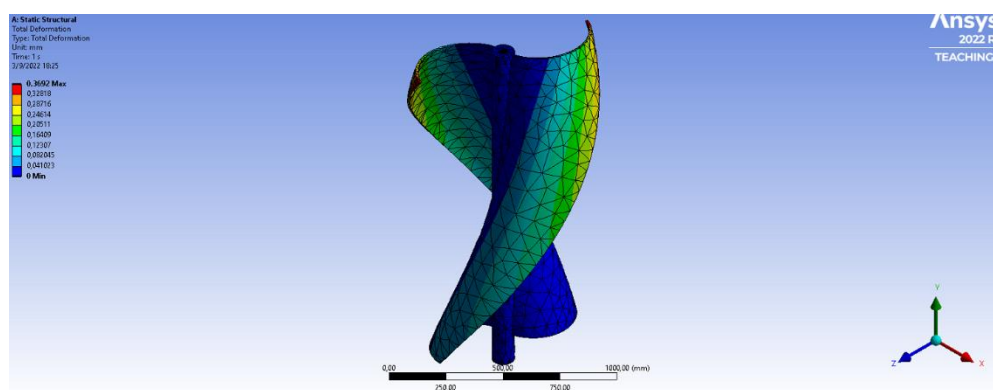


Figura 18. Resultat deformació total. Font pròpia

Respecte a la tensió, l'extrem superior davanter de l'aerogenerador es troba a sobrepressió per la força que faria el vent perpendicular a la seva superfície, mentre que la seva part posterior estaria en un estat de depressió.

Pel que fa a les deformacions de les pales, la vora lliure exterior, sobretot a la part superior, és la més afectada, capaç de deformar-se fins a 0,4 mm, resultat associat al CFD, ja que és la zona amb major velocitat unitària.

8 RESUM DEL PRESSUPOST

Tenint en compte la fabricació de les pales i rotor del prototip, juntament amb tots els elements de la instal·lació necessaris, la maquinària, el muntatge i la mà d'obra, el pressupost ascendeix a **2.685,95 €** (DOS MIL SIS-CENTS VUITANTA-CINC euros amb NORANTA-CINC cèntims).

Resum pressupost	Cost
Material	2.271,64 €
Equip i maquinària	87,89 €
Mà d'obra	326,42 €
Total	2.685,95 €

Taula 2. Resum pressupost prototip (€)

Els preus unitaris de material, maquinària i mà d'obra han estat extrets del Generador de Preus de CYPE Ingenieros. S'adjunta al present projecte l'estat d'amidaments i el desglossament de preus per cada partida.

9 CONCLUSIONS

L'objectiu principal del projecte és la modelització d'una turbina eòlica d'eix vertical tipus Savonius helicoidal per la seva implementació en un habitatge unifamiliar i la seva viabilitat. Per aquest motiu, ha estat necessari comprovar que la geometria assignada és capaç de captar l'energia cinètica del vent i recuperar-la per produir energia elèctrica.

Per aconseguir els propòsits plantejats, en primer lloc, s'ha definit un model de referència ja comercialitzat per determinar els paràmetres més rellevants que seguirà el prototip modelat.

En segon lloc, s'ha tingut present que la producció d'energia elèctrica a partir del vent està directament relacionada amb la posició geogràfica de la instal·lació, per la qual cosa s'han analitzat les dades meteorològiques disponibles a la zona. S'ha determinat que la velocitat mitjana del vent es troba al voltant dels 5 m/s, amb ràfegues de fins a 9,5 m/s.

Aquestes variables han permès calcular l'energia útil del vent que impactaria contra les pales, i, per tant, la màxima que seria capaç de recuperar l'aerogenerador en forma d'energia mecànica rotacional.

Tal com mostra la Teoria de Betz, no és possible recuperar el cent per cent de l'energia, perquè la màquina té unes pèrdues associades, per rotors de tipus Savonius el coeficient de potència es troba al voltant de 0,30. El rendiment de l'aerogenerador i la seva geometria, permet obtenir una potència màxima de subministrament de 180,85 kW.

Fent una aproximació de les hores de funcionament de l'aerogenerador i considerant que la velocitat no serà constant durant tot l'any, s'estima que es podria produir 792,12 kWh/any, molt per sota de les necessitats de l'habitatge (7.500 kWh/any). El preu de l'energia elèctrica actualment es troba al voltant dels 0,40 €/kWh i, per tant, l'aportació de l'aerogenerador permetria un estalvi de 316,84 €/any. Amb aquest valor, la instal·lació s'amortitzaria en menys de 9 anys.

Per tal de millorar aquests resultats, les úniques variables que podem modificar són les referents a la geometria de les pales. En aquest cas, s'hauria d'augmentar l'àrea de captació, definint un diàmetre o una altura superiors, o bé ambdues consideracions.

Amb totes les anàlisis portades a terme i observant els resultats obtinguts, es pot concloure amb la idea que aquest tipus d'aerogenerador, en particular, el dimensionat en el present projecte, malgrat el seu baix rendiment, pot generar potència a la zona geogràfica d'instal·lació, sent viable tècnicament, donant així compliment a l'objectiu principal del treball.

10 REFERÈNCIES

7.3 Normativa

- Reial Decret 413/2014, de 6 de juny, pel qual es regula l'activitat de producció d'energia elèctrica a partir de fonts d'energia renovables, cogeneració i residus.
- Ordre ECF/329/2010 de 9 de juny, per la qual s'obre la convocatòria de concurs públic per a l'adjudicació d'autorització i instal·lació de parcs eòlics a les zones de desenvolupament prioritari i se n'aproven les bases.
- Pla sectorial de la implantació ambiental de l'energia eòlica a Catalunya.
- Pla d'Energia de Catalunya 2006-2015 (Document exposat a debat públic).
- Ordre TRI/216/2004, de 14 de juny, per la qual s'aproven les bases reguladores per a actuacions en matèria d'estalvi, eficiència energètica i aprofitament dels recursos energètics renovables i s'obre la convocatòria per a l'any 2004 (codi d'ajut 10202 i Z06).
- Llei 38/1999, de 5 de novembre, d'Ordenació de l'Edificació (L.O.E.).
- Reial Decret 1627/1997, de 24 d'octubre, pel qual s'estableixen disposicions mínimes de seguretat i salut a les obres de construcció.

7.4 Bibliografia i webgrafia

Abdoulkader Ibrahim Idriss. (2019). *Wind energy potential and micro-turbine performance analysis in Djibouti-city, Djibouti*. www.elsevier.com/locate/jestch

AEE (2021). *La eòlica en España*. <https://aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-en-espana/>

Ansys-Tutor (2018). *ANSYS Design Modeler. Create Helical Geometry using Sweep* (video). <https://www.youtube.com/watch?v=yBjvVd38t-8>

Endesa (2021). *Conoce la energía eólica: sus ventajas, qué es y cómo funciona*. <https://www.endesa.com/es/la-cara-e/energias-renovables/energia-eolica>

Fluent Setup (2021). *Ansys Fluent: Helical Savonius Wind Turbine Using Dynamic Mesh* (video). <https://www.bing.com/videos/search?q=savonius+en+ansys&docid=608013115824099711&mid=9CC519514E82F76494119CC519514E82F7649411&view=detail&FORM=VIRE>

Generalitat de Catalunya (2001). *Mapa d'implantació de l'energia eòlica per comarques*. <http://www.gencat.cat/mediamb/parcseolics/comarques.htm>

Guy Cuntly. (1981). *Aeromotores i aerogeneradores. Guía de la energía eólica*. Ediciones Marzo 80.

Hipermapa Gencat (2022). *Informació energies renovables. Recurs eòlic*.

<https://sig.gencat.cat/visors/hipermapa.html>

Iberdrola (2022). *La transició energètica*. <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/transicion-energetica>

IDAE (2020). *Análisis del recurso. Atlas eólico de España*.

https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e4_atlas_eolico_A_9b90ff10.pdf

Ignacio Mártil (2018). *Las bases científicas de la energía eólica*.

<https://blogs.publico.es/ignacio-martil/2018/07/06/las-bases-cientificas-de-la-energia-eolica/>

Indalecio Mendoza Uribe (2018). *Valoración del viento como fuente de energía eólica en el estado de Guerrero*.

<https://www.redalyc.org/journal/467/46759491003/html/#:~:text=La%20potencia%20e%C3%B3lica%20disponible%20es%20proporcional%20al%20cubo,la%20potencia%20disponible%20se%20incrementa%20en%20ocho%20veces>

Jesús Mirapeix Serrano (2017). *Energías renovables (IV). Energía eólica*

https://ocw.unican.es/pluginfile.php/193/course/section/97/tema_6.4.pdf

Samia Tabassum (2015). *Design and Analysis of Different Types of Rotors for Pico-Turbine*

<https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=56971>

S. R. Allen, G. P. Hammond, M. C. McManus (2007). *Energy analysis and environmental life cycle assessment of a micro-wind turbine*. DOI: 10.1243/09576509JPE538

MeteoCat (2021). *Anuari de dades. Xarxa d'Estacions Meteorològiques Automàtiques (XEMA)*.

<https://www.meteo.cat/wpweb/climatologia/serveis-i-dades-climatiques/anuaris-de-dades-meteorologiques/xarxa-destacions-meteorologiques-automatiques/>

Vaughn Nelson (2020). *Innovative Wind Turbines. An Illustrated Guidebook*. CRC Press. Taylor & Francis Group.

TREBALL FINAL DE GRAU

Estudi: DOBLE TITULACIÓ GETI - ADE

Títol:

DISSENY D'UNA TURBINA EÒLICA D'EIX VERTICAL PER
L'AUTOCONSUM DOMÈSTIC

Document: 2. Annexos

Alumne: Ioana Florentina Petrescu

Tutor: Dr. Xavier Espinach Orús

Departament: Organització, gestió empresarial i Disseny del producte

Àrea: Expressió gràfica en l'enginyeria

Convocatòria (mes/any): Setembre de 2022

ÍNDEX D'ANNEXOS

ANNEX I	UBICACIÓ DE L'AEROGENERADOR	4
I.1	Situació del projecte	4
I.2	Recopilació i tractament de dades metrològiques.....	4
I.3	Potencial eòlic de la zona.....	8
ANNEX II	MODEL DE L'AEROGENERADOR	11
II.1	Geometria del model	11
II.2	Modelització en 3D.....	11
II.3	Maquetació.....	12
II.4	Viabilitat del model	14
ANNEX III	CÀLCUL DE POTÈNCIA DE L'AEROGENERADOR.....	16
III.1	Model teòric de Betz: màxim rendiment	16
III.2	Llei de Hellmann: variació de la velocitat amb l'altitud.....	18
III.3	Potencial eòlic de la zona.....	19
III.4	Acció del vent.....	21
III.5	Energia subministrada pel vent	22
III.6	Coeficient de potència, C_p i potencia calculada	23
ANNEX IV	SIMULACIÓ I ANÀLISI DEL MODEL.....	25
IV.1	Dinàmica de fluid computacional.....	25
IV.2	Anàlisi estàtic estructural aerogenerador.....	28
IV.3	Anàlisi estàtic estructural pilar de subjecció	30

ÍNDEX DE FIGURES

Figura 1.	Situació geogràfica de l'aerogenerador (Font: Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya)	4
Figura 2.	Xarxa d'Estacions Meteorològiques Automàtiques XEMA.....	5
Figura 3.	Rosa dels vents període 2014-2021. (Font: Servei Meteorològic de Catalunya)	6
Figura 4.	Mapa d'implantació de l'energia eòlica a Catalunya. (Font: Generalitat de Catalunya)	8
Figura 5.	Recurs eòlic a 50 metres d'alçada Lloret de Mar. (Font: Hipermapa Gencat). 9	
Figura 6.	Atlas eòlic ibèric. Densitat de potencia del vent (kg/m^2) a 50 m d'altura. (Font: IDAE).....	10
Figura 7.	Procés de modelització en SolidWorks. Font pròpia	11
Figura 8.	Vista en planta, alçat, perfil i isomètric de l'aerogenerador. Font pròpia.....	12

Figura 9. Màquina d'impressió Ultimaker S3. Font: Ultimaker	13
Figura 10. Procés d'impressió 3D de les pales de l'aerogenerador. Font pròpia	13
Figura 11. Conjunt de pales i eix de l'aerogenerador imperés en 3D. Font pròpia	14
Figura 12. Muntatge de circuit elèctric de la maqueta.	15
Figura 13. Model de Betz.....	16
Figura 14. Variació de la velocitat del vent amb l'alçada sobre el terreny, segons la Llei de Hellmann	19
Figura 15. Mapa del valor bàsic de la velocitat del vent, v_b . Font: Codi Tècnic de l'Edificació DB SE-AE	20
Figura 16. Valors del coeficient d'exposició c_e . Font: Codi Tècnic de l'Edificació.....	21
Figura 17. Àrea A que realitza el rotor d'un aerogenerador d'eix horitzontal	23
Figura 18. Àrea A que realitza el rotor de diàmetre \varnothing 750 mm. Font pròpia: Modelització	23
Figura 19. Coeficient de potència pels diferents tipus d'aerogeneradors. Font: Màrtel, I (2018)	24
Figura 20. Dominis a l'espai per simulació CFD.....	25
Figura 21. Definició del mallat dels diferents dominis.....	26
Figura 22. Esquema representatiu túnel de vent. Entrada i sortida del flux	27
Figura 23. Comportament del fluid en travessar l'aerogenerador. Secció longitudinal. 27	
Figura 24. Comportament del fluid en travessar l'aerogenerador. Secció transversal. 28	
Figura 25. Anàlisi estructural estàtic. Velocitat rotacional. Font pròpia	28
Figura 26. Resultat tensió principal màxima. Font pròpia.....	29
Figura 27. Resultat deformació total. Font pròpia.....	29
Figura 28. Especificacions vinculació suport base pilar. Font pròpia.....	30
Figura 29. Dades tècniques d'un generador de corrent continu. Font: Siemens.....	31
Figura 30. Configuració de perfils pilar.....	31
Figura 31. Càlcul de l'estructura per múltiples perfils	32
Figura 32. Resultats de deformació del pilar de subjecció. Font pròpia.....	32

ÍNDIX DE TAULES

Taula 1. Valors velocitat mitjana del vent (m/s) 2021. (Font: Servei Meteorològic de Catalunya)	6
Taula 2. Valors direcció dominant del vent 2021. (Font: Servei Meteorològic de Catalunya)	6
Taula 3. Valors ratxa màxima del vent (m/s) 2021. (Font: Servei Meteorològic de Catalunya)	7
Taula 4. Valors temperatura mitjana (°C). (Font: Servei Meteorològic de Catalunya)....	7
Taula 5. Valors pressió atmosfèrica (hPa) 2021. (Font: Servei Meteorològic de Catalunya)	8
Taula 6. Característiques geomètriques de l'aerogenerador	11
Taula 7. Taula de materials dels principals elements. Font pròpia	12
Taula 8. Característiques tècniques de la impressora 3D. Font: Ultimaker	12
Taula 9. Especificacions mini generador de corrent continu.....	14
Taula 10. Valors del coeficient exponencial de Hellmann (α)	18
Taula 11. Característiques del fluid.....	26
Taula 12. Accions i càrregues al pilar de subjecció 15 metres	30

ANNEX I UBICACIÓ DE L'AEROGENERADOR

I.1 Situació del projecte

Es preveu la implantació de l'aerogenerador al municipi de Lloret de Mar (17310), a la comarca de la Selva, a la província de Girona. Es tracta d'una població costanera, que forma part de la Costa Brava, denominada així pel paisatge rocós, les zones abruptes i la força de la mar.



Figura 1. Situació geogràfica de l'aerogenerador (Font: Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya)

Les seves coordenades UTM 31 ETRS89 són X: 488.453 i Y:4.616.484, i es troba a 5 metres sobre el nivell del mar.

I.2 Recopilació i tractament de dades meteorològiques

Tenint en compte l'emplaçament previst, s'analitzaran les dades meteorològiques disponibles per determinar la velocitat mitjana del vent i el potencial eòlic, amb l'objectiu de comprovar la viabilitat de la instal·lació.

La informació ha estat extreta de la base de dades del Servei Meteorològic de Catalunya, l'empresa pública adscrita al Departament de Territori i Sostenibilitat de la Generalitat de Catalunya, encarregada de gestionar els sistemes d'observació i predicció meteorològics a Catalunya.

Les dades es recopilen arreu del territori català a través de la XEMA (Xarxa d'Estacions Meteorològiques Automàtiques) amb la finalitat de conèixer la situació meteorològica en temps real a tot el territori i millorar el coneixement climàtic.

A prop de la zona d'interès es disposa de les EMA emplaçades a Santa Coloma de Farners (La Selva), Malgrat de Mar (Maresme) i Castell d'Aro (Baix Empordà).

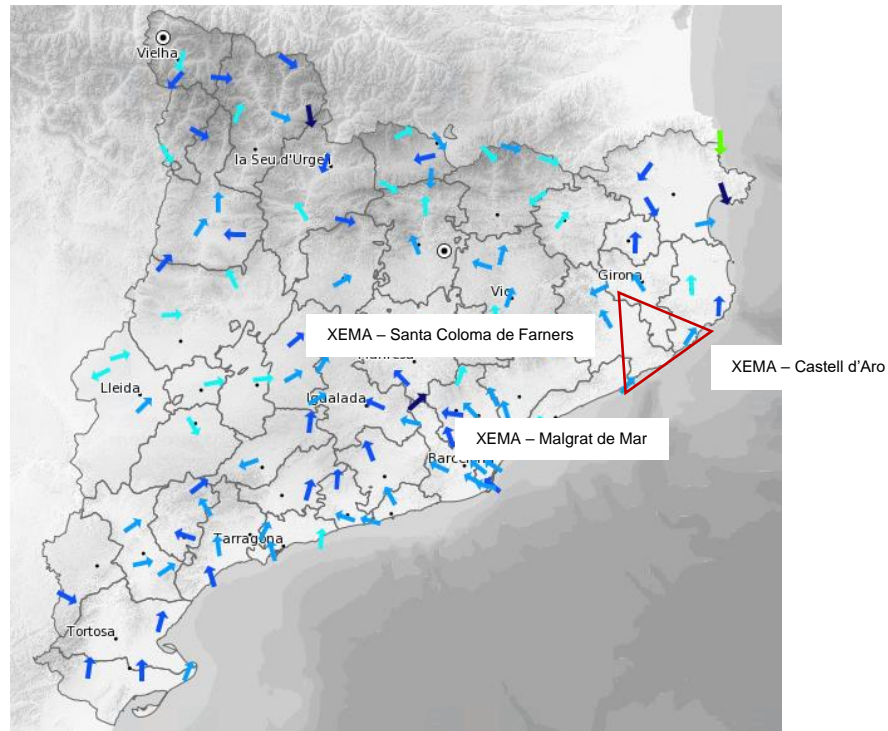


Figura 2. Xarxa d'Estacions Meteorològiques Automàtiques XEMA
(Font: meteo.cat – Servei Meteorològic de Catalunya)

El municipi de Lloret de Mar es troba entre les tres estacions, per la qual cosa s'ha decidit recopilar la informació de totes elles en el període 2021.

El vent està definit per dos paràmetres essencials, la seva velocitat i direcció. Una dada molt important de cara al disseny i l'emplaçament de l'aerogenerador és el valor mitjà mensual de la velocitat del vent a l'emplaçament geogràfic. És l'indicador principal, ja que del vent s'extraurà l'energia necessària per generar l'electricitat.

En el present cas, la situació de la màquina està predefinida, per la qual cosa, s'haurà de verificar si el potencial eòlic de la zona és suficient.

Els valors recollits per les estacions es resumeixen a la taula següent:

VELOCITAT MITJANA DEL VENT (m/s)																
COMARCA	CODI i NOM EMA	h mesura	GEN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DES	ANY	
Selva	XS	Santa Coloma de Farners	10 m	1,7	1,7	1,7	1,6	1,7	1,8	1,9	1,7	1,6	1,6	1,5	1,4	1,7
Maresme	WT	Malgrat de Mar	10 m	3,5	3,2	3,1	3,0	2,9	2,8	3,2	2,9	3,2	3,3	3,6	2,9	3,1
Baix Empordà	DO	Castell d'Aro	10 m	2,5	2,1	2,5	2,4	2,1	2,1	2,3	2,0	2,0	2,4	3,1	2,0	2,3
Mitjana			2,5	2,3	2,4	2,3	2,2	2,2	2,4	2,1	2,2	2,3	2,6	2,0	2,3	

Taula 1. Valors velocitat mitjana del vent (m/s) 2021. (Font: Servei Meteorològic de Catalunya)

En aquest cas, la velocitat mitjana del vent, tenint en compte la informació recopilada per les tres estacions és de 2,3 m/s a una altura de 10 metres.

Pel que fa a la direcció del vent, seguidament s'analitzen les dades referents aquest paràmetre:

DIRECCIÓ DOMINANT DEL VENT																
COMARCA	CODI i NOM EMA	h mesura	GEN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DES	ANY	
Selva	XS	Santa Coloma de Farners	10 m	NW	NW	NW	NW	NW	NW	NW	NW	NW	NW	NW	NW	
Maresme	WT	Malgrat de Mar	10 m	NW	NW	NW	NW	NW	NW	SW	NW	NW	NW	NW	NW	
Baix Empordà	DO	Castell d'Aro	10 m	W	W	W	W	W	W	W	W	W	N	W	W	

Taula 2. Valors direcció dominant del vent 2021. (Font: Servei Meteorològic de Catalunya)

La direcció del vent i la seva variació en el temps dona lloc a la rosa dels vents. A continuació es mostra la resultant obtinguda a la EMA de Santa Coloma de Farners.

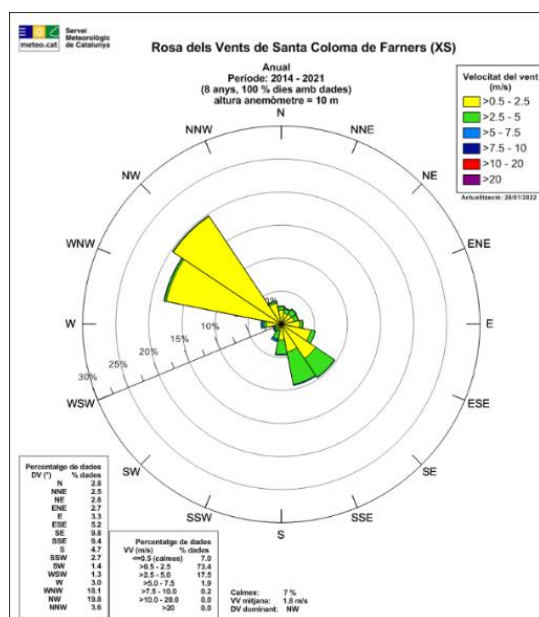


Figura 3. Rosa dels vents període 2014-2021. (Font: Servei Meteorològic de Catalunya)

Es contrasta la direcció predominant al lloc de la instal·lació a través de la Taula 2 i la Figura 3, aquesta és nord-est.

També és important tenir en compte les variacions de la velocitat del vent en el temps. Aquests fenòmens instantanis s'anomenen ràfegues de vent, i són difícil de caracteritzar, ja que és un augment molt fort de la velocitat però de curta durada.

És rellevant pel disseny de l'aerogenerador perquè variacions brusques en la velocitat del vent originen variacions considerables de l'energia aplicada a l'aeromotor. Per aquesta raó s'ha de preveure i l'equip haurà de ser capaç de suportar-ho.

A l'emplaçament s'ha obtingut una mitjana mensual de ratxa del vent entre les tres estacions de 8,6 m/s a 10 metres d'alçada.

MITJANA MENSUAL DE LA RATXA MÀXIMA DIÀRIA DEL VENT (m/s)															
COMARCA	CODI i NOM EMA	h mesura	GEN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DES	ANY
Selva	XS Santa Coloma de Farners	10 m	7,6	7,8	7,6	7,4	9,0	8,5	9,4	8,5	7,8	6,9	7,3	6,3	7,8
Maresme	WT Malgrat de Mar	10 m	9,5	9,3	8,4	8,1	8,7	7,6	8,5	7,6	8,9	8,4	9,5	8,2	8,6
Baix Empordà	DO Castell d'Aro	10 m	10,3	8,2	9,2	8,9	9,8	8,1	9,6	8,2	8,2	9,4	11,7	7,4	9,1
Mitjana			9,5	8,2	8,4	8,1	9,0	8,1	9,4	8,2	8,2	8,4	9,5	7,4	8,6

Taula 3. Valors ratxa màxima del vent (m/s) 2021. (Font: Servei Meteorològic de Catalunya)

Altres dades meteorològiques addicionals que són d'interès a l'hora d'executar el projecte són les de temperatura i pressió atmosfèrica, necessàries per calcular la densitat de l'aire, un paràmetre rellevant per determinar l'energia útil del vent.

A continuació s'adjunten les diferents taules resum:

TEMPERATURA MITJANA MENSUAL (°C)															
COMARCA	CODI i NOM EMA	GEN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DES	ANY	
Selva	XS Santa Coloma de Farners	6,2	10,3	10,2	11,9	16,0	22,6	24,4	23,5	21,2	16,1	9,8	8,3	15,1	
Maresme	WT Malgrat de Mar	7,3	11,2	10,7	12,5	15,9	22,2	24,0	23,3	22,1	17,1	11,1	9,4	15,6	
Baix Empordà	DO Castell d'Aro	7,0	10,8	10,6	12,4	16,0	22,3	24,0	23,0	21,9	16,9	11,6	9,0	15,5	
Mitjana		6,8	10,8	10,5	12,3	16,0	22,4	24,1	23,3	21,7	16,7	10,8	8,9	15,4	

Taula 4. Valors temperatura mitjana (°C). (Font: Servei Meteorològic de Catalunya)

PRESSIÓ ATMOSFÈRICA MITJANA MENSUAL, A NIVELL DE L'EMA (hPa)															
COMARCA	CODI i NOM EMA	GEN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DES	ANY	
Selva	X S	Santa Coloma de Farners	996,0	1000,1	1004,0	998,3	998,3	998,9	997,1	998,1	1000,1	1001,1	996,7	999,7	999,0
Maresme	W T	Malgrat de Mar	1014,0	1018,1	1022,0	1016,2	1016,2	1016,5	1014,5	1015,4	1017,3	1018,7	1014,2	1017,7	1016,7
Baix Empordà	D O	Castell d'Aro	1012,7	1016,9	1020,8	1014,9	1014,9	1015,2	1013,3	1014,2	1016,1	1017,4	1013,0	1016,3	1015,5
		Mitjana	1007,5	1011,7	1015,6	1009,8	1009,8	1010,2	1008,3	1009,2	1011,1	1012,4	1007,9	1011,2	1010,4

Taula 5. Valors pressió atmosfèrica (hPa) 2021. (Font: Servei Meteorològic de Catalunya)

I.3 Potencial eòlic de la zona

En el present projecte l'emplaçament de l'aerogenerador està inicialment definit, per la qual cosa caldrà verificar si la zona és apte per la seva instal·lació i si la geografia proporciona suficient potència de vent per poder ser aprofitada per l'equip.

En primer lloc, analitzem la compatibilitat del territori amb l'energia eòlica:

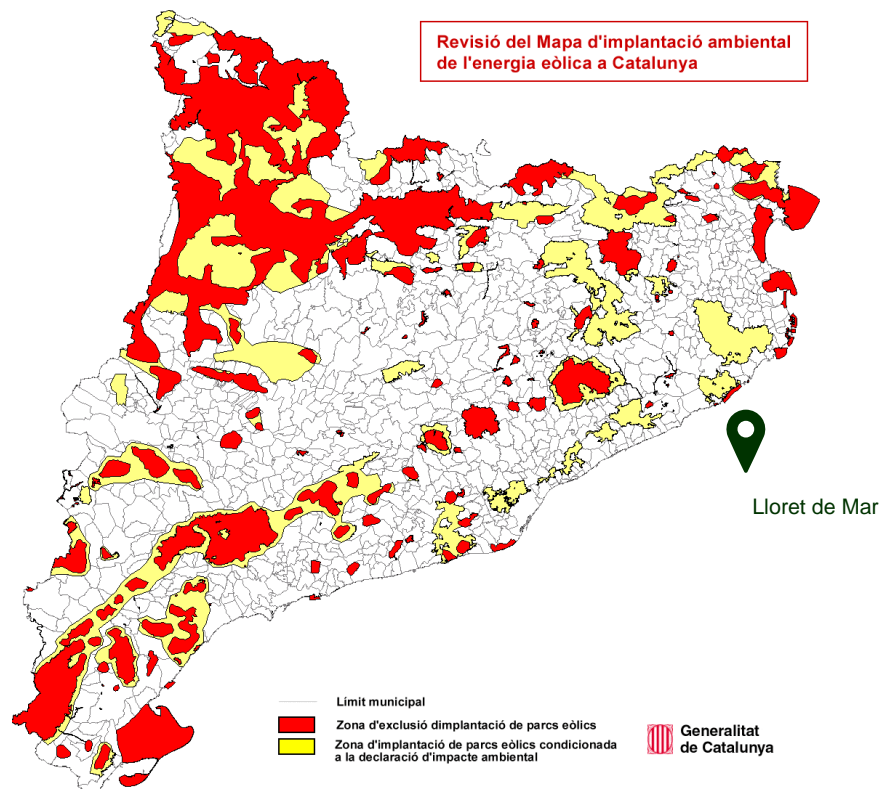


Figura 4. Mapa d'implantació de l'energia eòlica a Catalunya. (Font: Generalitat de Catalunya)

Ens trobem amb les següents zones:

- **Zona incompatible:** zona del territori exclosa de la implantació de parcs on la presència de valors naturals i culturals de protecció prioritària

aconsellen no fer-hi cap intervenció d'infraestructures d'aprofitament eòlic.

- **Zona d'implantació condicionada:** Zona on l'existència de valors naturals i culturals que han de ser protegits exigeix una declaració d'impacte ambiental positiva per a cada projecte que garanteixi la innocuïtat del projecte o l'establiment de mesures correctores que evitin l'impacte sobre els valors objecte de protecció.
- **Zona compatible:** Zona idònia per a la implantació de parcs eòlics tant des del punt de vista energètic com de la protecció del patrimoni natural i cultural. L'administració promourà l'aprofitament eòlic en aquesta zona.

Tal com es mostra al mapa, el municipi analitzat es troba en una zona compatible, per la qual cosa seria possible la instal·lació d'un aerogenerador.

Un cop confirmat la compatibilitat del territori, és necessari saber si el potencial eòlic de la zona és òptim, és a dir, si el vent té energia cinètica suficient per al nostre aerogenerador. Aquest factor serà clau pel disseny, ja que el dimensionament del rotor i les pales, els quals influeixen en l'àrea d'aprofitament, pot variar.

Respecte a la informació anterior de la velocitat mitjana del vent, el mapa de recurs eòlic de Catalunya permet acotar més la franja i establir la velocitat del vent al municipi, en aquest cas, entre els 4 i 5 m/s a 50 metres d'altura.

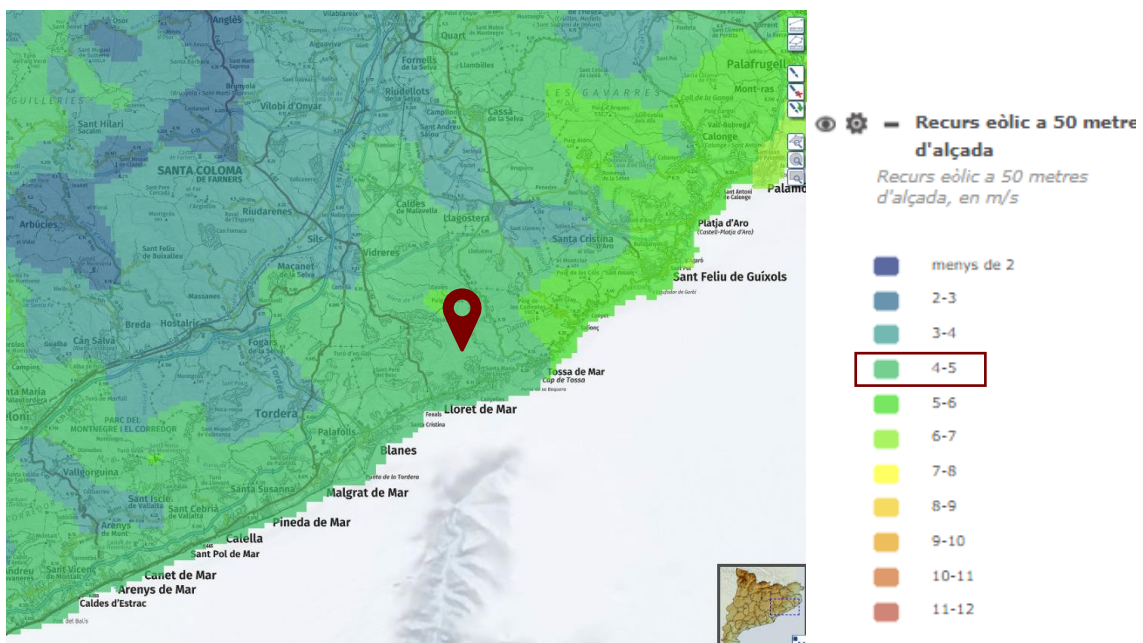


Figura 5. Recurs eòlic a 50 metres d'alçada Lloret de Mar. (Font: Hipermapa Gencat)

Posteriorment, es realitzaran els càlculs necessaris de la velocitat a l'altura prevista d'instal·lació de l'aerogenerador.

Qualitativament, també es pot determinar el potencial eòlic de la zona:

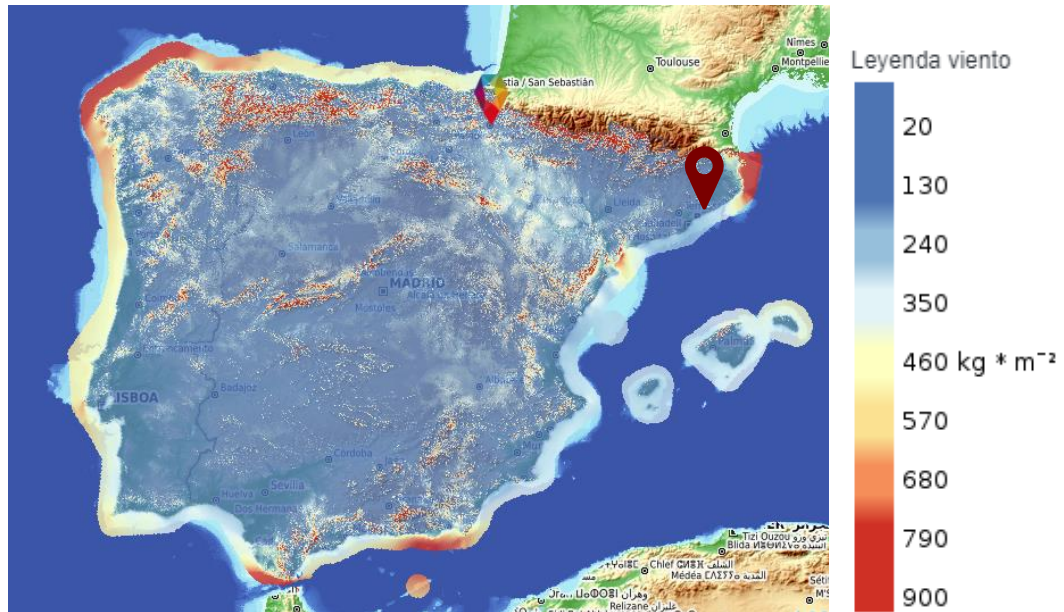


Figura 6. Atlas eòlic ibèric. Densitat de potència del vent (kg/m^2) a 50 m d'altura. (Font: IDAE)

D'acord amb els mapes anteriors, el municipi es trobaria al voltant d'un potencial eòlic entre 20 i 130 kg/m^2 . Si bé, més endavant, a l'Annex III del present document, s'analitza numèricament aquest potencial eòlic.

ANNEX II MODEL DE L'AEROGENERADOR

II.1 Geometria del model

El dimensionament de l'aerogenerador quedarà definit pels següents paràmetres:

Diàmetre total pales (mm)	740
Alçada pales (mm)	1500
Gruix pales (mm)	200
Diàmetre eix (mm)	100
Altura eix (mm)	1900

Taula 6. Característiques geomètriques de l'aerogenerador

II.2 Modelització en 3D

Per tal de portar a terme les anàlisis corresponents de l'aerogenerador necessàries més endavant, en primer lloc, aquest s'ha modelitzat a través del software *Solid Works* per obtenir un sòlid consolidat.

Els paràmetres geomètrics són els especificats a l'apartat anterior. El model s'ha assolit a partir de la relació entre el perfil de les pales i el traçat d'una hèlix, obtenint així la forma helicoidal.

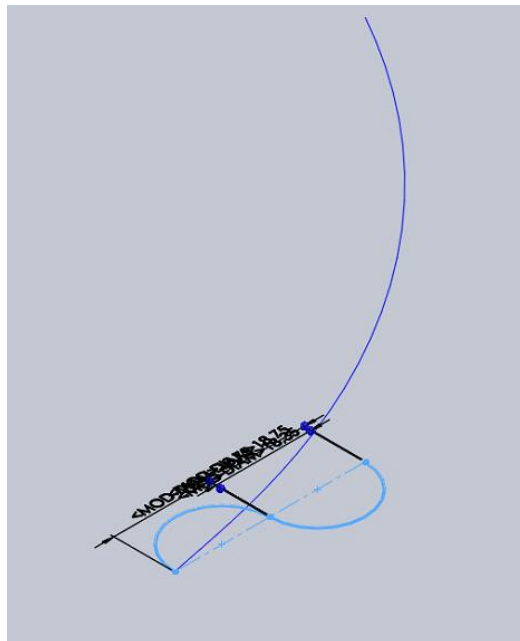


Figura 7. Procés de modelització en SolidWorks. Font pròpia

El resultat obtingut es mostra a les figures següents:

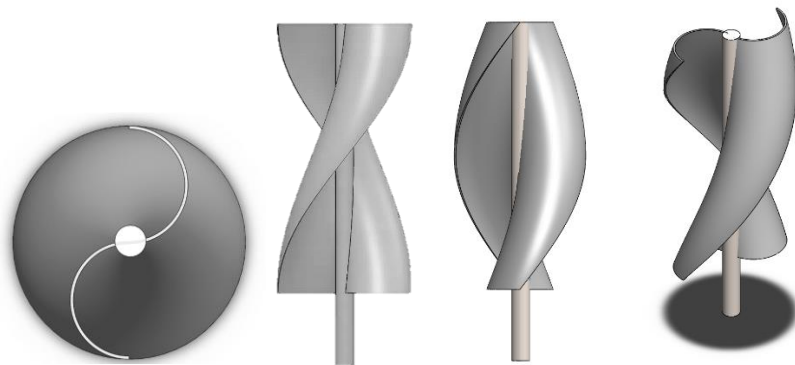


Figura 8. Vista en planta, alçat, perfil i isomètric de l'aerogenerador. Font pròpia

Amb l'objectiu de disposar de la màxima informació del model, s'han introduït els materials de fabricació de les diferents parts de l'aerogenerador segons la Taula 7. El resultat més important és el pes de la màquina, en conjunt un total de **52,10 kg**.

Part	Material
Eix rotor	Accés inoxidable
Pales	Fibra de vidre

Taula 7. Taula de materials dels principals elements. Font pròpia

II.3 Maquetació

Per comprovar la viabilitat del model, s'ha procedit a realitzar la impressió 3D d'aquest per simular el seu funcionament, a una escala 1:20.

El sòlid modelitzat s'ha exportat en format .STL per poder importar-ho al programari d'impressió 3D, pel present cas, s'ha utilitzat l'*Ultimaker Cura*, per poder calcular el temps necessari d'impressió, seleccionar el material d'impressió, ajustar l'escala, entre altres. Les principals característiques de la màquina d'impressió 3D que s'ha utilitzat són:

Model	Ultimaker S3
Volum d'impressió	230 x 190 x 200 mm
Velocitat d'impressió	24 mm ³ /s
Diàmetre boca d'impressió	0,4 mm

Taula 8. Característiques tècniques de la impressora 3D. Font: Ultimaker

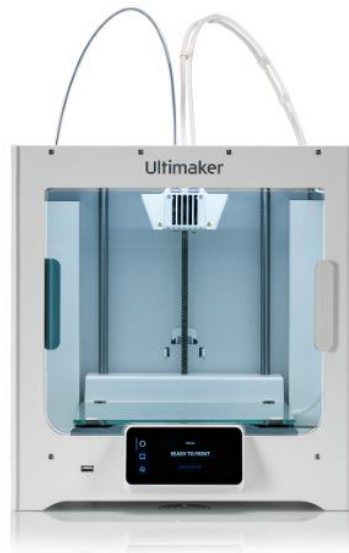


Figura 9. Màquina d'impressió Ultimaker S3. Font: Ultimaker

La impressió es va portar a terme a terme a una temperatura exterior de 26,5 °C, amb una humitat relativa del 67 %, variables importants en el temps d'impressió i solidificació de la peça.

El material emprat per la maqueta ha estat PLA (Àcid polilàctic), un termoplàstic rígid específic per la impressió 3D.

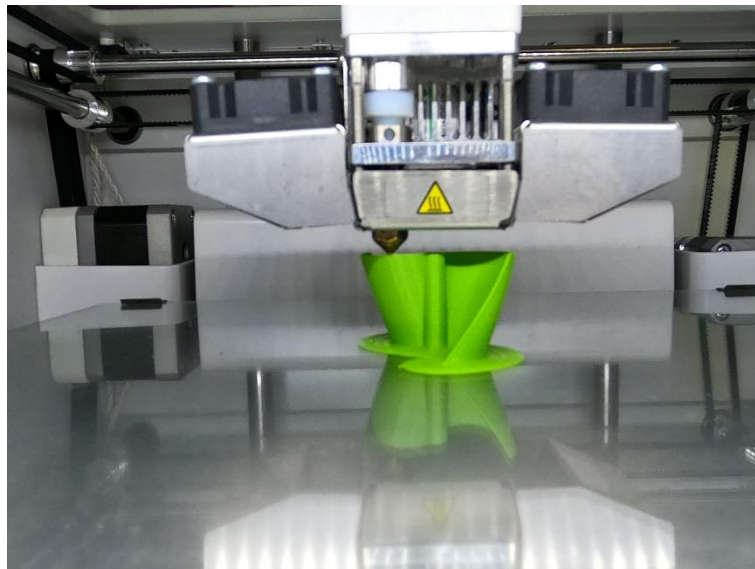


Figura 10. Procés d'impressió 3D de les pales de l'aerogenerador. Font pròpia

El temps d'impressió total va estar de 54 min 15 s, obtenint el següent resultat:




Figura 11. Conjunt de pales i eix de l'aerogenerador imperès en 3D. Font pròpia

II.4 Viabilitat del model

Per tal de determinar si el dimensionament de les pales de l'aerogenerador i la impressió de la maqueta han estat correctes, s'ha realitzat el muntatge complet d'aquest.

Per aquesta raó ha estat necessari disposar d'un mini generador de corrent continu, encarregat de transformar l'energia mecànica del conjunt de les pales i l'eix en energia elèctrica. Les seves característiques són les definides per la següent taula:

	Dimensions	Ø 24,5 mm H 34,2 mm
	Voltatge de sortida	0,01 ~ 5,5 V
	Corrent de sortida	0,01 ~100 mA
	Velocitat de rotació	100 ~ 6000 rpm

Taula 9. Especificacions mini generador de corrent continu

Per tal de muntar el circuit elèctric s'ha requerit disposar d'una *Protoboard*, dos LEDs i cablejat, obtenint el següent muntatge:

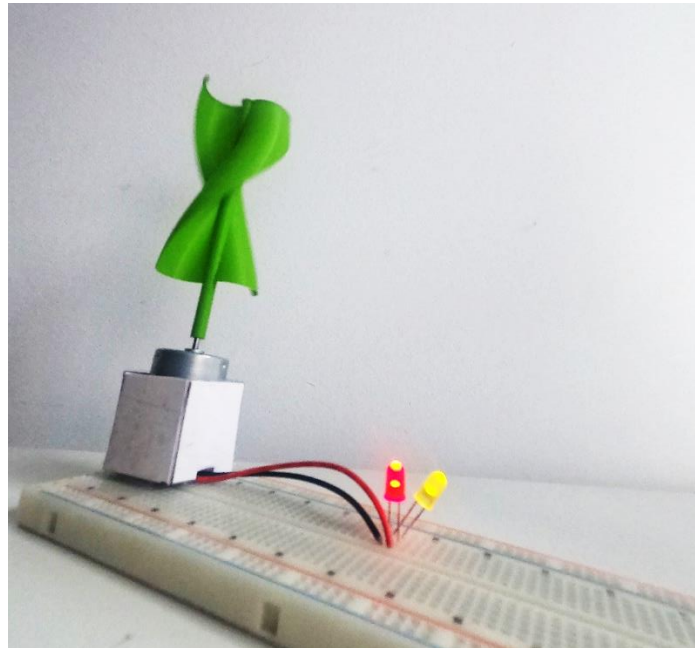


Figura 12. Muntatge de circuit elèctric de la maqueta.

Situant un ventilador davant la maqueta, ha permès l'encesa dels LEDs, verificant d'aquesta manera que seria possible generar electricitat amb la geometria considerada.

ANNEX III CÀLCUL DE POTÈNCIA DE L'AEROGENERADOR

III.1 Model teòric de Betz: màxim rendiment

El Model teòric de Betz és el que permet considerar que l'energia eòlica es pot recuperar i transformar mitjançant un aerogenerador. Aquest teorema estableix l'eficiència màxima que és capaç d'obtenir qualsevol turbina eòlica ideal, indiferentment de la seva geometria o tipologia.

La llei de Betz aplicada a un aerogenerador d'eix horitzontal, dels més comuns actualment, es pot analitzar a partir de la Figura 13, on es representa gràficament l'efecte de l'aire en travessar el rotor:

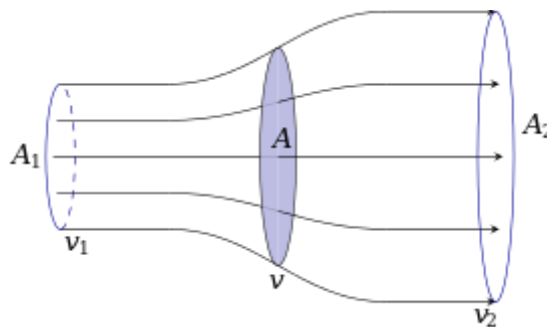


Figura 13. Model de Betz

D'acord amb la representació anterior la velocitat del flux d'aire a l'entrada v_1 , la qual travessa la secció A_1 , es veu reduïda en el moment de travessar les pales en la secció A a velocitat v , ja que aquest, per generar energia mecànica, absorbeix l'energia cinètica que porta el vent.

La velocitat v_2 del flux a la sortida, que travessa la secció A_2 , és no nul·la, i per tant, el vent continua tenint energia cinètica després de travessar el rotor, no obstant en menor quantitat. Aquest fet que comporta veure que no tota l'energia cinètica es pot captar i transformar.

Considerant que la variació de la massa respecte al temps en una àrea específic és constant:

$$m = \rho \cdot Q = \rho \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho \cdot A_2 \cdot v_2 = \rho \cdot A \cdot v$$

Equació 1

La variació de l'energia cinètica del vent respecte al temps és de la forma:

$$\Delta E_c = E_{c1} - E_{c2} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2)$$

Equació 2

Tenir present les equivalències $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3$. La potència disponible del vent, la màxima possible, quedaria definida per l'equació:

$$P_{\text{màx}} = P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3$$

Equació 3

Considerant l'equivalència $1 \text{ N} = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$ la potència útil generada per la força F_{vent} del vent sobre l'àrea fictícia A escombrada per les pales de l'aerogenerador en una unitat de temps, s'obté:

$$P_{\text{útil}} = F_{\text{vent}} \cdot v \quad \text{on} \quad F_{\text{vent}} = m \cdot a = m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad \text{amb} \quad \Delta t = 1$$

S'obté:

$$P_{\text{útil}} = m \cdot \Delta v = \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot (v_1 - v_2)$$

Equació 4

La potència útil màxima serà igual a la variació d'energia cinètica i, per tant:

$$P_{\text{útil}} = \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot (v_1 - v_2) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2)$$

D'on s'extreuen els següents resultats a l'equació:

$$v = \frac{1}{2} \cdot (v_1 + v_2), \quad v = 0, \quad \rho \cdot A \cdot (v_1 - v_2) = 0$$

Com que la velocitat v a l'àrea del rotor no és nul·la i $v_1 \neq v_2$ pel que s'ha explicat anteriorment, agafant la primera solució única viable i substituint a l'equació 2, s'obté:

$$\begin{aligned} P_{\text{útil}} &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot (v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2) \\ &= \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2) \end{aligned}$$

Equació 5

Per tal de trobar el màxim de la funció, considerant que v_1 serà una velocitat donada, es calcula la derivada de la funció segons:

$$P_{\text{útil,max}} = \frac{d P_{\text{útil}}}{d v_2} = 0$$

Equació 6

Les possibles solucions a l'equació són: $v_2 = \frac{1}{3} \cdot v_1$, $v_2 = -v_1$, $\rho \cdot A = 0$ no obstant l'única viable és la primera solució trobada i substituint a l'equació 5, s'obté:

$$P_{\text{útil,màx}} = \frac{8 \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^2}{27}$$

Equació 7

El rendiment màxim aerodinàmic, per tant, serà:

$$\eta_{m\grave{a}x} = \frac{P_{\acute{u}til,m\grave{a}x}}{P_{m\grave{a}x}} = \frac{\frac{8 \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^2}{27}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3} = 0,5925$$

Equació 8

$$\eta_{m\grave{a}x} \leq 59,25 \%$$

Aquest és el límit teòric del rendiment, el qual cap turbina eòlica pot superar.

No obstant el resultat obtingut, cal fer menció que el Model de Betz no considera altres aspectes com la resistència aerodinàmica de les pales, les pèrdues d'energia pel moviment de rotació, la compressibilitat del fluid, etc.

Per la qual cosa, a la realitat, el rendiment real dependrà d'altres paràmetres que faran baixar aquest valor. Com es veurà més endavant pel cas que ocupa, en un aerogenerador de tipus *Savonius* es troba al voltant del 30%.

III.2 Llei de Hellmann: variació de la velocitat amb l'altitud

Les dades disponibles mostrades anteriorment, tal com s'indica, han estat recollides a una alçada de 10 o bé 50 metres. La previsió és instal·lar l'aerogenerador a una altura de 15 metres.

Per determinar la velocitat del vent a l'alçada corresponent, és necessari aplicar la Llei exponencial de Hellmann, expressada de la forma:

$$v_h = v_{h_0} \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha$$

Equació 9

On v_h i v_{h_0} representen les velocitats horitzontals del vent a l'altura h i h_0 , respectivament, i α el coeficient de Hellmann, el qual varia depenent de la zona d'emplaçament.

A la taula s'indiquen els seus valors segons la rugositat del terreny:

Zona	Coefficient α
Llocs plans amb herba o gel	0,08 – 0,12
Llocs plans (mar, costa)	0,14
Terrenys poc accidentats	0,13 – 0,16
Zones rústiques	0,2
Terrenys accidentats o boscos	0,2 – 0,26
Terrenys molt accidentats i ciutats	0,25 – 0,4

Taula 10. Valors del coeficient exponencial de Hellmann (α)

De manera més visual, la següent figura mostra com varia la velocitat amb l'altura segons l'alçada respecte al terreny:

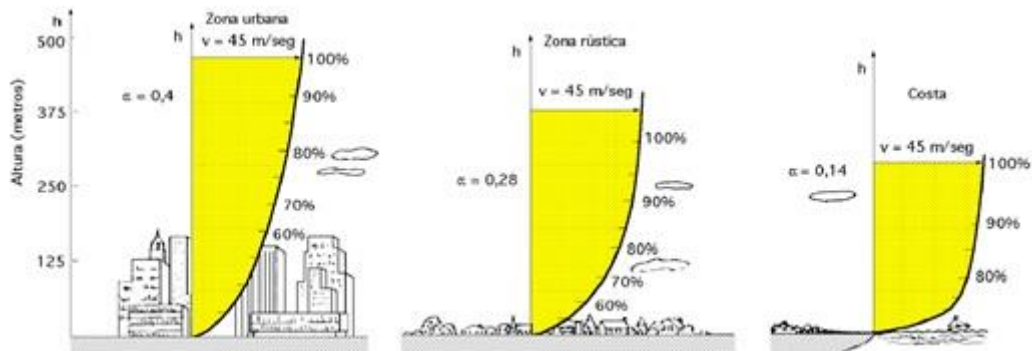


Figura 14. Variació de la velocitat del vent amb l'alçada sobre el terreny, segons la Llei de Hellmann

El municipi de Lloret de Mar és una localitat petita a la zona costanera del Mediterrani. No es pot considerar gran ciutat, però la zona de l'emplaçament està rodejada per boscos i petites edificacions, per la qual cosa el coeficient previst és de 0,25.

Prenent com a referència la velocitat mitjana del vent a 50 metres d'alçada, la qual està al voltant dels 5 m/s, aplicant l'Equació 9 a l'altura del generador, es disposarà d'una velocitat de:

$$v_h = v_{h_0} \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha = 5 \cdot \left(\frac{15}{50}\right)^{0,25} = 3,7 \text{ m/s}$$

De cara al dimensionament de l'aerogenerador i dels seus elements s'han tingut presents les ratxes de vent màximes, de valor 8,6 m/s a 10 metres d'altura:

$$v_h = v_{h_0} \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha = 8,6 \cdot \left(\frac{15}{10}\right)^{0,25} = 9,5 \text{ m/s}$$

El valor obtingut serà de gran rellevància per obtenir l'energia elèctrica màxima produïda per l'aerogenerador d'acord amb la seva àrea de captació.

III.3 Potencial eòlic de la zona

D'acord amb el mapa de la Figura 6, el potencial eòlic de la zona del municipi es trobaria al voltant dels 20 i 130 kg/m². Es procedeix a comprovar numèricament aquest valor d'acord amb les expressions teòriques de la normativa.

La pressió dinàmica del vent (q_b), també anomenat potencial eòlic, es pot determinar segons l'Annex D del Document Bàsic de seguretat estructural, Accions a l'edificació (CTE DB SE-AE) del Codi tècnic de l'edificació, a través de la fórmula:

$$q_b = 0,5 \cdot \delta \cdot v_b^2$$

Equació 10

On δ és el valor de la densitat de l'aire i v_b és el valor bàsic de la velocitat del vent. La densitat de l'aire es pot aproximar de manera general a un valor d' $1,25 \text{ kg/m}^3$.

El valor bàsic de la velocitat del vent a cada localitat es pot obtenir del mapa de la Figura 15. En aquest cas el municipi es troba a la Zona C, per tant, el seu valor és de 29 m/s .

Amb això, i tenint present que $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$, el potencial eòlic obtingut serà:

$$q_b = 0,5 \cdot \delta \cdot v_b^2 = 0,5 \cdot 1,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(29 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 525,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = \mathbf{0,5256 \text{ kN/m}^2}$$

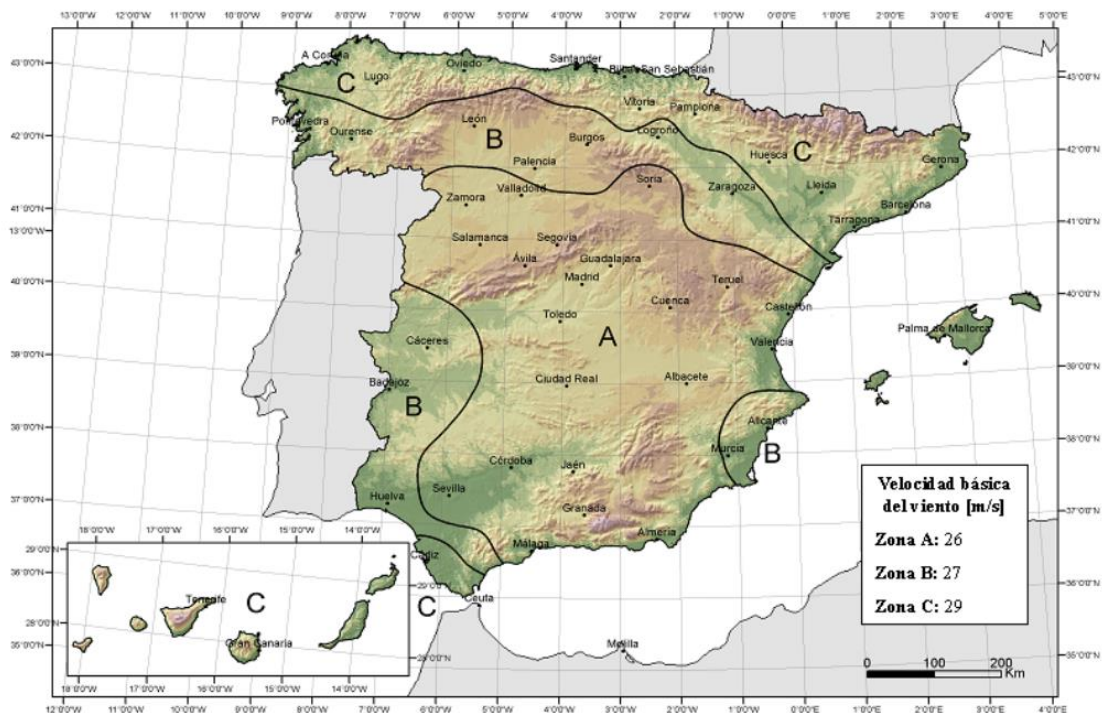


Figura 15. Mapa del valor bàsic de la velocitat del vent, v_b . Font: Codi Tècnic de l'Edificació DB SE-AE

Per tal de fer la comparativa amb el potencial eòlic qualitatiu de la Figura 6, el valor numèric aconseguit a través de les fórmules es multiplica per la gravetat, $9,81 \text{ m/s}^2$, obtenint un valor de $53,6 \text{ kg/m}^2$.

S'observa que el valor numèric calculat es torba dins dels marges preestablerts inicialment.

III.4 Acció del vent

Per determinar la viabilitat de l'estructura per subjectar l'aerogenerador, és necessari calcular la força del vent sota la qual estarà sotmesa.

D'acord amb el Document Bàsic de seguretat estructural, Accions a l'edificació (CTE DB SE-AE), l'acció del vent (q_e), en general és la força perpendicular a la superfície de cada punt exposat, la qual es pot expressar segons la fórmula:

$$q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p$$

Equació 11

On:

q_b és la pressió dinàmica del vent (kN/m^2), diferent segons l'emplaçament geogràfic de l'aerogenerador.

c_e és el coeficient adimensional d'exposició, variable segons l'altura del punt considerat.

c_p és el coeficient adimensional eòlic o de pressió, depenent de la forma i orientació de la superfície respecte al vent.

El coeficient d'exposició (c_e) té en compte els efectes de les turbulències originades pel relleu i la topografia del terreny i es pot obtenir de la taula 3.4 del DB SE-AE:

Tabla 3.4. Valores del coeficiente de exposición c_e

Grado de aspereza del entorno	Altura del punto considerado (m)							
	3	6	9	12	15	18	24	30
I Borde del mar o de un lago, con una superficie de agua en la dirección del viento de al menos 5 km de longitud	2,4	2,7	3,0	3,1	3,3	3,4	3,5	3,7
II Terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia	2,1	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,3	3,5
III Zona rural accidentada o llana con algunos obstáculos aislados, como árboles o construcciones pequeñas	1,6	2,0	2,3	2,5	2,6	2,7	2,9	3,1
IV Zona urbana en general, industrial o forestal	1,3	1,4	1,7	1,9	2,1	2,2	2,4	2,6
V Centro de negocio de grandes ciudades, con profusión de edificios en altura	1,2	1,2	1,2	1,4	1,5	1,6	1,9	2,0

Figura 16. Valors del coeficient d'exposició c_e . Font: Codi Tècnic de l'Edificació

En el present cas el coeficient tindrà un valor de **2,6** a l'alçada d'instal·lació, a 15 metres.

El coeficient eòlic de pressió, degut a la dependència de la direcció relativa del vent, de la forma de l'estructura, la posició dels elements i l'àrea d'influència, aquest valor s'estima a **1,0**, en el cas més desfavorable.

Amb l'obtenció dels valors anteriors, es determina la força perpendicular a la superfície de l'aerogenerador i l'estructura de sustentació a través de l'equació 10:

$$q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p = 0,5256 \cdot 2,6 \cdot 1,0 = \mathbf{1,366 \text{ kN/m}^2}$$

Aquest valor s'introduirà en el programa de càlcul estructural, tal com s'especifica més endavant a l'Annex IV, per determinar la suficiència del pilar de subjecció.

III.5 Energia subministrada pel vent

L'energia que és proporcionada pel vent és en forma d'energia cinètica. Considerant que la densitat (δ) de l'aire és constant, l'energia cinètica d'una massa d'aire en moviment es pot expressar segons l'expressió:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Equació 12

On m és la massa d'un volum d'aire determinat en kg i v la velocitat instantània del vent en m/s.

Ara bé, un aerogenerador per recuperar aquesta energia amb una superfície de captació A , considerant la hipòtesi que la velocitat del vent és constant a qualsevol punt de la superfície A , el volum (V) d'aire que travessarà la superfície A en un segon serà la superfície per la velocitat.

L'energia teòricament recuperable en un segon per l'aerogenerador, és a dir la seva potència (W) serà expressada per l'equació:

$$P = E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot V \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot A \cdot v \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot A \cdot v^3$$

Equació 13

Pels aerogeneradors més comuns, els d'eix horitzontal, l'àrea A queda definida per la secció que engloba la rotació de les pales, segons es mostra a la Figura 17:

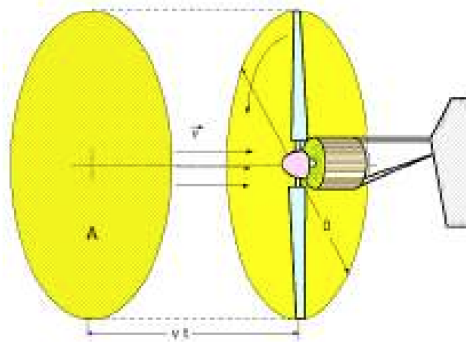


Figura 17. Àrea A que realitza el rotor d'un aerogenerador d'eix horitzontal

Pel model i tipologia d'aerogenerador escollit, l'àrea a aplicar a la fórmula de potència serà la definida per la seva altura i el seu diàmetre, tal com s'indica a la següent figura:

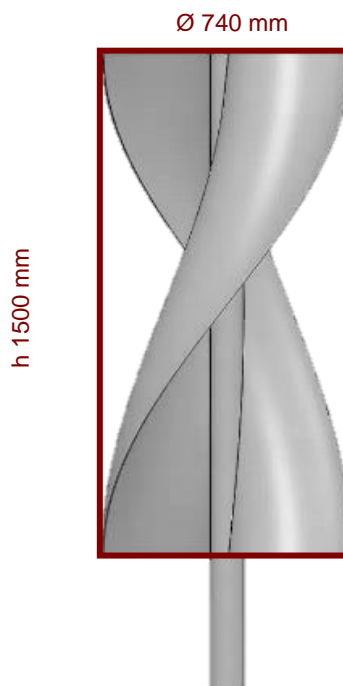


Figura 18. Àrea A que realitza el rotor de diàmetre $\varnothing 740$ mm. Font pròpia: Modelització

III.6 Coeficient de potència, C_p i potència calculada

Malauradament no es pot captar i aprofitar tota l'energia cedida pel vent, ja que la seva velocitat, un cop impacta contra la superfície de captació de l'aerogenerador, no és nul·la. Tal com demostra la Teoria de Betz hi ha una màxima energia recuperable. Per aquest motiu, per expressar el rendiment de la turbina eòlica s'estableix el coeficient de potència C_p .

Segons els resultats obtinguts a l'Annex III, el Teorema de Betz estableix aquest rendiment màxim en un 59,9%. Tanmateix, aquest coeficient depèn de múltiples factors, com la geometria de l'aerogenerador, la rugositat del material de fabricació, la solidesa, etc.

A continuació es mostren gràficament les corbes de potència de diferents tipus de turbines eòliques:

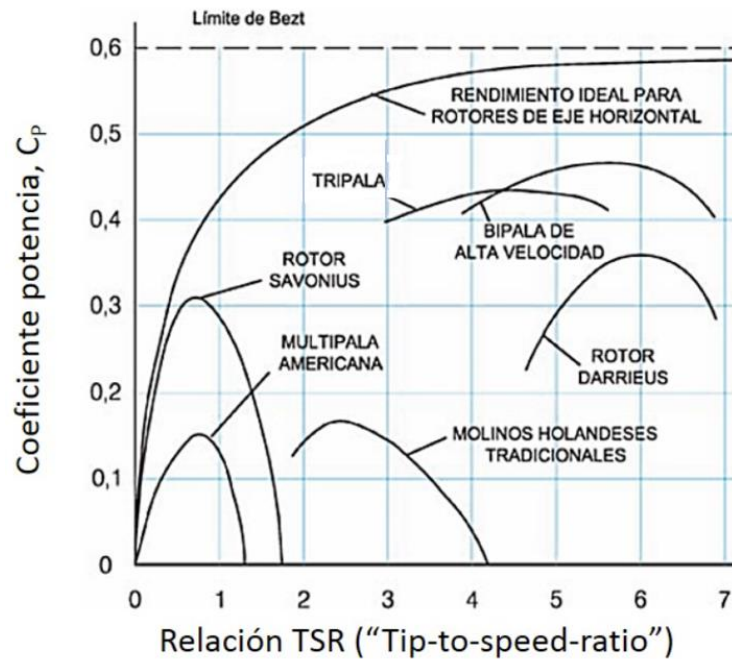


Figura 19. Coeficient de potència pels diferents tipus d'aerogeneradors. Font: Màtil, I (2018)

Amb aquesta consideració, l'equació 13 de càlcul de potència es veu modificada, quedant de la següent manera:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p$$

Equació 14

Amb un rotor de tipus *Savonius* helicoidal, al model d'aquest projecte s'aplicarà un coeficient de potència C_p de **0,30**.

Tenint en compte aquestes dades, es calcula la potència capaç de generar la turbina eòlica aplicant l'Equació 14, obtenint un resultat de 180,85 kW.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 1,50 \cdot 0,74 \cdot 9,5^3 \cdot 0,3 = \mathbf{180,85 W}$$

ANNEX IV Simulació i anàlisi del model

IV.1 Dinàmica de fluid computacional

Per l'anàlisi del comportament del fluid en interactuar amb l'aerogenerador s'ha utilitzat el software ANSYS Fluent d'ANSYS Workbench 2022 R1.

Aquesta és una eina de dinàmica de fluids computacional (CFD) que s'utilitza particularment per al modelatge del flux de fluids i la transferència de calor. La base del programari és la resolució de les equacions de Navier-Stokes que descriuen el moviment d'un fluid.

En el present cas, s'ha importat el model en SolidWorks i s'ha portat a terme l'anàlisi en 3D. En primer lloc, és necessari fragmentar l'espai, ja que el programari necessita delimitar la zona de pas del flux així com la superfície que la travessa.

Per aquesta raó s'ha modelitzat 3 dominis, els corresponents a la zona rectangular, la qual simula un túnel de vent, la part cilíndrica que identifica la zona on l'aerogenerador gira, anomenada zona de rotació i finalment el sòlid. A la següent figura s'observa les diferents parts:

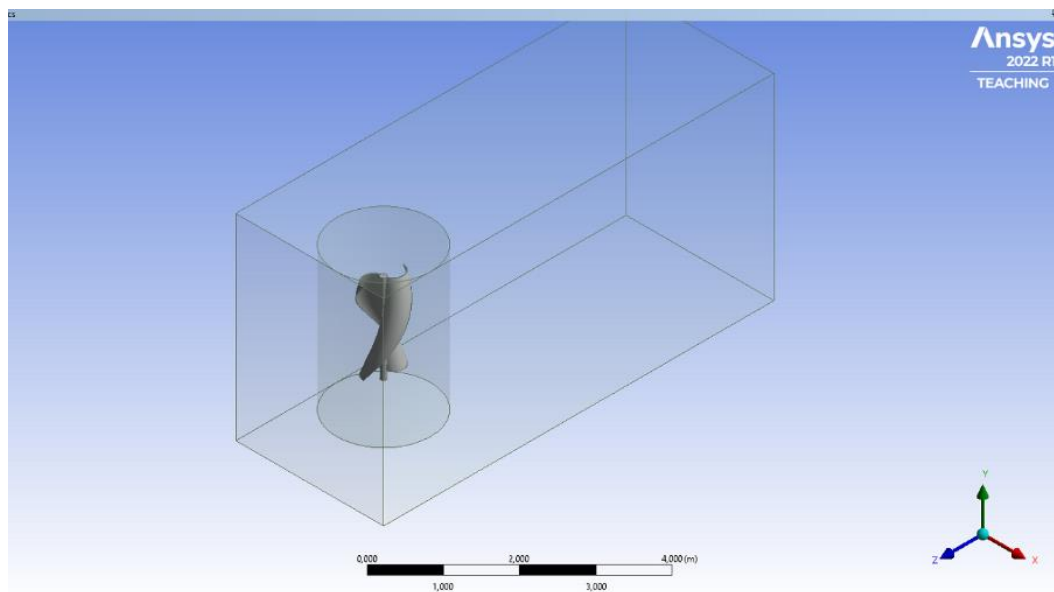


Figura 20. Dominis a l'espai per simulació CFD

En segon lloc, és necessari mallar el camp de flux amb l'objectiu de reproduir exactament la màquina eòlica.

S'ha procedit a la selecció d'un mallat fi per tal d'aconseguir la màxima precisió possible:

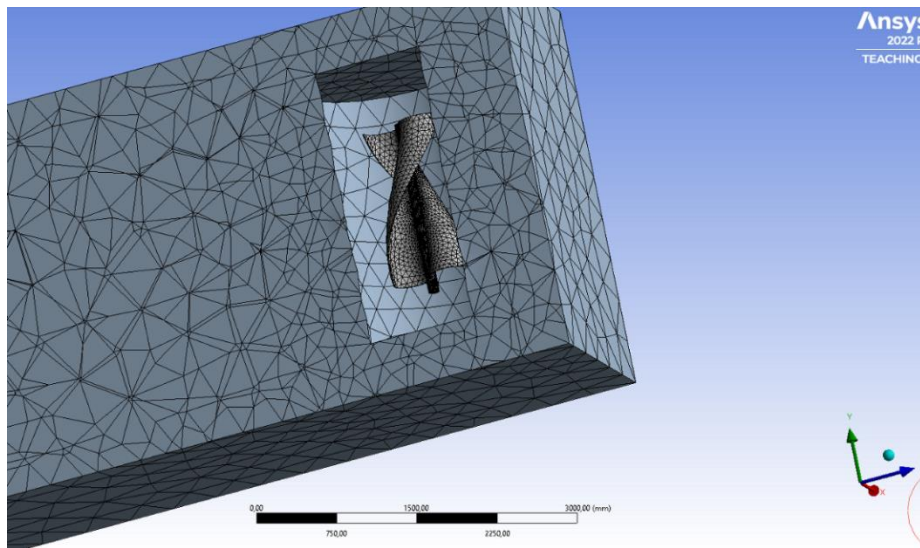


Figura 21. Definició del mallat dels diferents dominis

Les característiques pròpies del CFD es defineixen a la part de Setup del model. A continuació és detallen les que s'han tingut en compte.

El domini rectangular està definit pel fluid que el travessa, en aquest cas aire. El model del camp del fluid s'ha introduït en condicions normals, és a dir 1 atm i 25 °C. Algunes de les propietats del fluid:

Densitat	1,25 kg/m ³
Viscositat	1,7894·10 ⁻⁵ kg/m·s
Velocitat	9,5 m/s
Pressió	101325 Pa
Temperatura	298 °K
Turbulència	k-èpsilon

Taula 11. Característiques del fluid

El domini cilíndric es caracteritza per ser un domini de rotació, per la qual cosa, se l'ha assignat una velocitat de rotació de $\omega = 5$ rad/s, obtinguda a partir de la relació:

$$v = \omega \cdot R$$

Equació 15

Per continuar amb l'anàlisi, és necessari definir unes *Boundary conditions*, condicions de contorn. En aquest cas, es defineixen les zones del conjunt, més concretament per on entra el fluid, la seva velocitat d'entrada, la sortida, etc.

En aquest cas, s'ha definit la zona blava com a entrada (*Inlet*) amb una velocitat d'entrada del fluid de 9,5 m/s i, la zona vermella com a sortida oberta (*Outlet*).

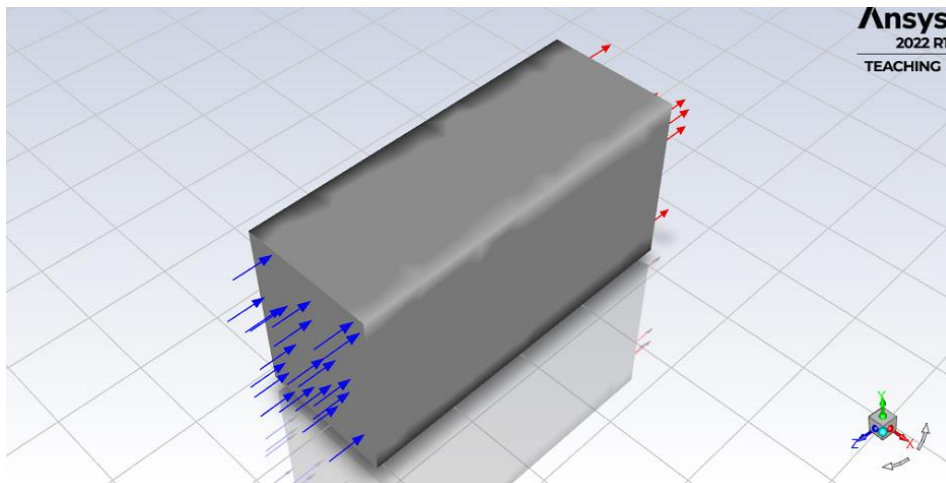


Figura 22. Esquema representatiu túnel de vent. Entrada i sortida del flux

Per tal de portar a terme l'anàlisi del fluid, cal definir l'espai temporal com un model transitori en el qual el fluid entra en el túnel, travessa l'aerogenerador i surt, determinant un seguit de cicles o repeticions a través de la velocitat angular donada.

Un cop calculat el model, la simulació mostra el següent:

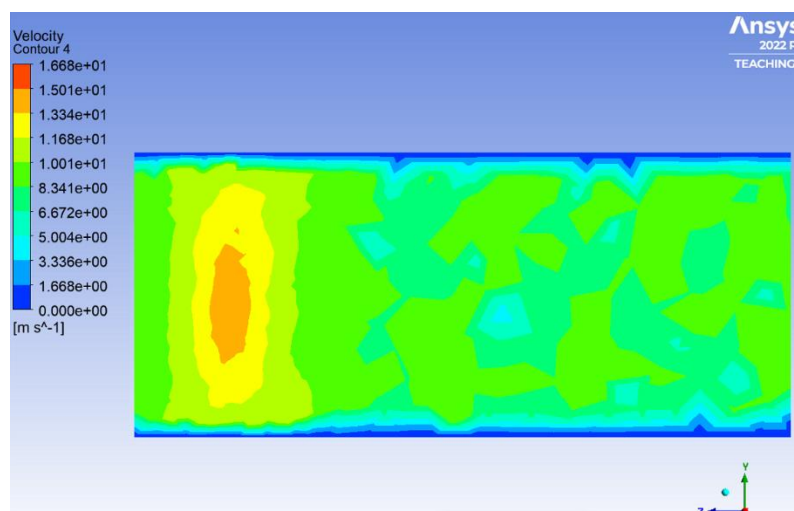


Figura 23. Comportament del fluid en travessar l'aerogenerador. Secció longitudinal

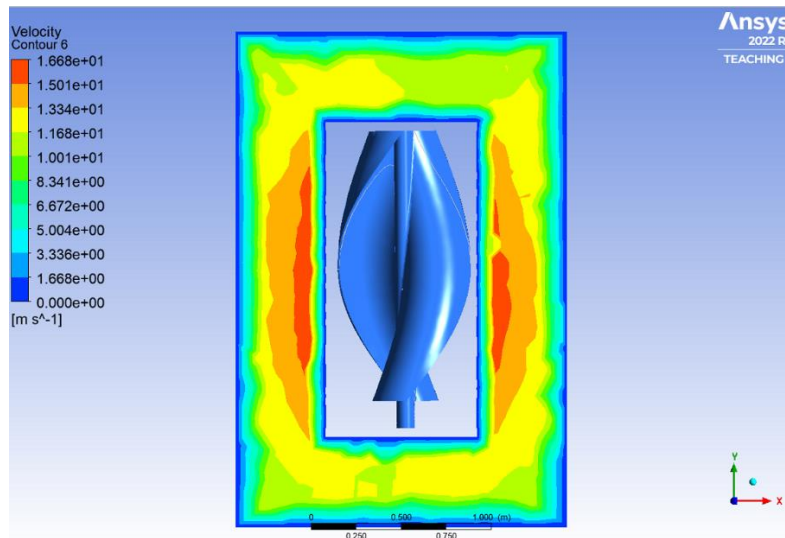


Figura 24. Comportament del fluid en travessar l'aerogenerador. Secció transversal

S'observa com la velocitat del fluid augmenta en interaccionar amb l'aerogenerador, així com també la direcció que segueix abans i després de travessar la zona de rotació i la velocitat que assoleix. La màxima velocitat del fluid es concentra a les pales, amb valors superiors als 16 m/s.

IV.2 Anàlisi estàtic estructural aerogenerador

Amb la finalitat d'analitzar el comportament de les pales de l'aerogenerador en ser impactades per la força del vent i originar el gir de la màquina, es porta a terme un estudi estructural estàtic. L'eina utilitzada és el *Static Structural* del programari d'ANSYS Workbench 2022 R1.

S'ha assimilat la força del vent a un moviment rotacional de l'eix. Per aquest motiu, s'ha introduït un suport fix associat a l'eix i un moviment de rotació de valor 5 rad/s, obtingut a partir de l'equació 15.

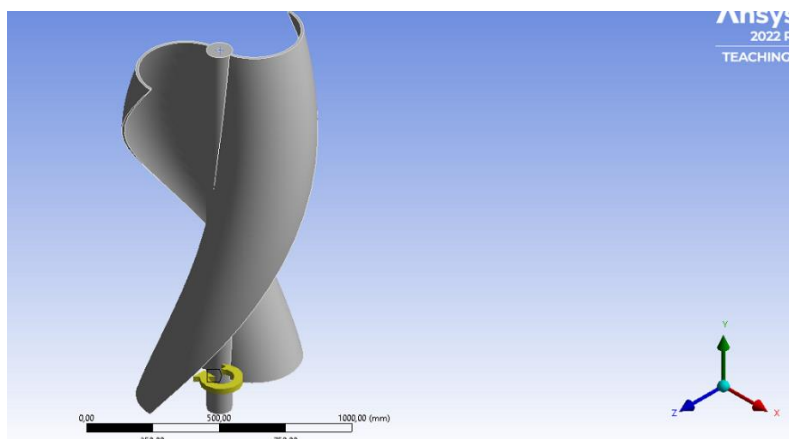


Figura 25. Anàlisi estructural estàtic. Velocitat rotacional. Font pròpia

Tenint en consideració el sentit de gir establert, en aquest cas, sentit horari, a les Figures 26 i 27 es mostra la tensió i la deformació que pateixen les pales, respectivament.

Respecte a la tensió, l'extrem superior davant de l'aerogenerador es troba a sobrepressió per la força que faria el vent perpendicular a la seva superfície, assolint valors d'1,07 MPa, mentre que la seva part posterior, amb valors de tensió negatius, estria en un estat de depressió.

Pel que fa a les deformacions de les pales, la vora lliure exterior, sobretot la superior, és la més afectada, capaç de deformar-se fins a 0,4 mm respecte a la posició inicial. En aquest cas, és necessari verificar els cantons superiors i, pot ser, augmentar el gruix de les pales per evitar sobre esforços.

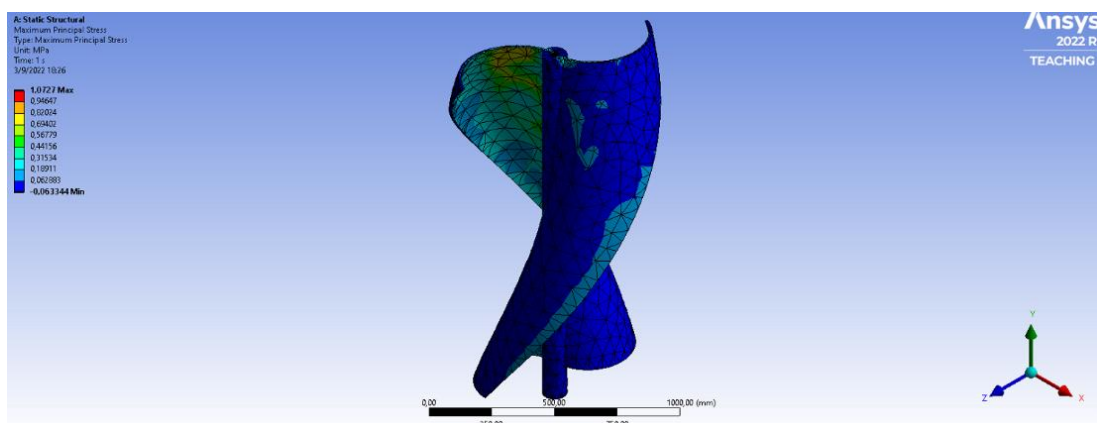


Figura 26. Resultat tensió principal màxima. Font pròpia

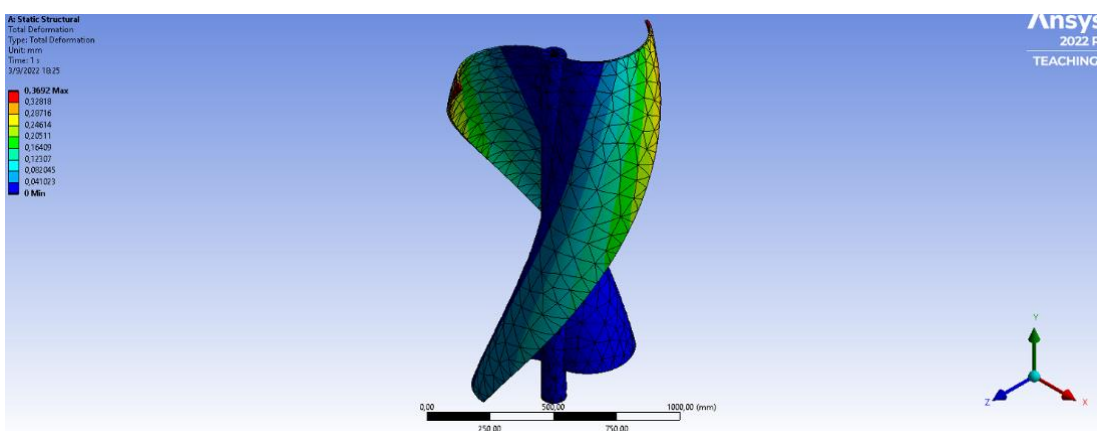


Figura 27. Resultat deformació total. Font pròpia

IV.3 Anàlisi estàtic estructural pilar de subjecció

A més a més del comportament de l'aerogenerador, s'ha considerat necessari analitzar el pilar que subjectarà la maquinària a una altura de 15 metres.

Aquest estudi s'ha portat a terme utilitzant l'eina específica de *CYPECAD 3D* del software *CYPE Ingenieros*. Aquest programari es fa servir principalment pel càlcul d'estructures compostes, tanmateix, serà d'utilitat per determinar com es comporta un únic pilar quan se li aplica les forces calculades als apartats anteriors.

En primer lloc, s'ha definit un pilar de 15 metres de llargària, encastat a terra (Node 1) segons la Figura 28. En trobar-se a la intempèrie es veurà afectat pel vent, l'acció més rellevant. Donada la situació del projecte, i que es tracta d'una estructura independent, no s'han tingut presents les consideracions de neu i sisme.

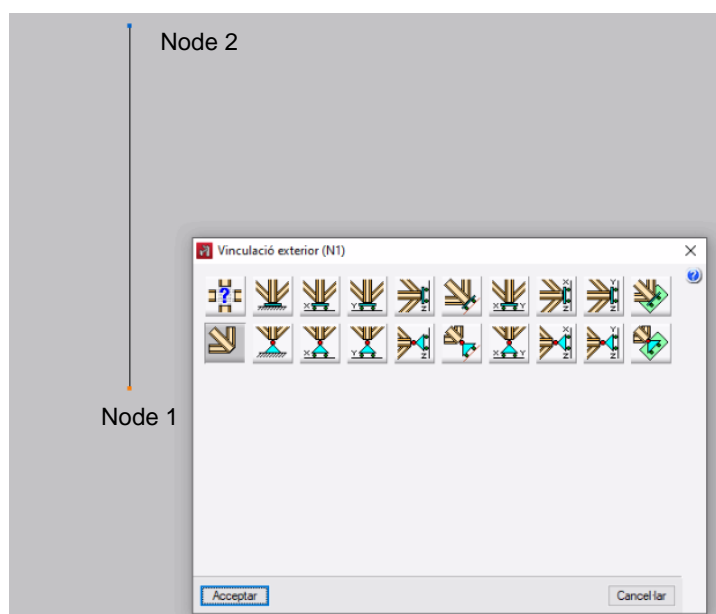


Figura 28. Especificacions vinculació suport base pilar. Font pròpia

En segon lloc, s'han introduït les càrregues sota les quals es trobaria sotmès, i que es resumeixen a continuació:

		Acció
Pes de l'eix i les pales	52,10 kg (Apartat II.2)	
Pes del generador de corrent continu	3,40 kg (Figura 29)	0,544 kN
Vent	(Apartat III.4)	1,36 kN/m²

Taula 12. Accions i càrregues al pilar de subjecció 15 metres

S'ha definit com a càrrega puntual en el Node 2 l'originada pel conjunt de pales i eix amb el generador de corrent continu. La càrrega del vent estimada s'ha definit com a càrrega distribuïda en tota la longitud del pilar en la direcció x.

SIEMENS

Hoja de medición y de datos SIMOTICS S-1FL6
Data sheet for SIMOTICS S-1FL6

Datos de pedido **1FL6042-1AF61-2AA1**
MLFB-Ordering data

Número de pedido del cliente / Client order no.:
N°. de pedido Siemens / Order no.:
Número de oferta / Offer no.:
Nota / Remarks:



Datos de configuración / Engineering data

Velocidad nominal Rated speed	3000 r/min
Par asignado (100 K) Rated torque (100 K)	1,27 Nm
Corriente asignada Rated current	1,2 A
Potencia asignada Rated power	0,40 kW / 0,54 hp
Velocidad de giro máx. Max. speed	4000 r/min
Par máx. Maximum torque	3,80 Nm
Corriente máx. Max. current	3,6 A
Par a rotor parado Static torque	1,90 Nm
Momento de inercia Moment of inertia	2,700 kgcm ²

Figura 29. Dades tècniques d'un generador de corrent continu. Font: Siemens

Abans de continuar amb el càlcul, cal definir quin perfil tindrà el pilar i el material de fabricació. En aquest cas s'ha optat per un perfil circular d'acer conformat. El programari permet seleccionar els perfils disponibles a la base de dades o introduir perfils personalitzats. S'ha decidit utilitzar un perfil circular de diàmetre Ø300 mm i gruix 20 mm, definit a la següent figura:

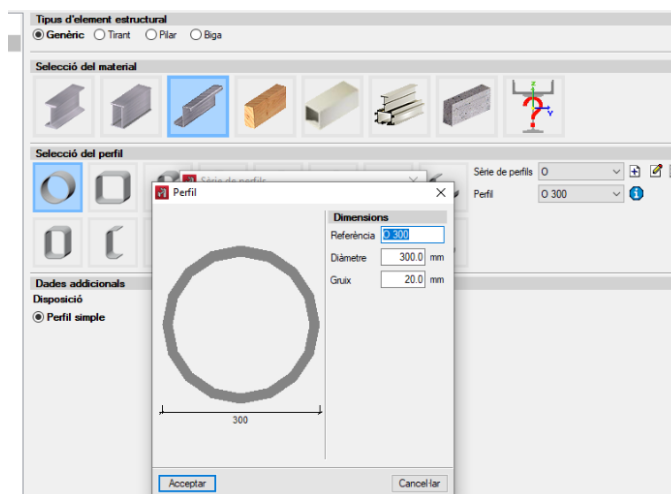


Figura 30. Configuració de perfils pilar.

El software de CYPE permet calcular a la vegada múltiples perfils prèviament introduïts per determinar el que més s'ajusta a les necessitats. Tal com es mostra a la Figura 31, amb un perfil de diàmetre Ø250 ja seria suficient, tanmateix, és decideix utilitzar un de superior.

Perfil	Pes	Resistència	Errors
✗ Ø 100	39.46	—	S'ha produït un error, ja que l'esveltesa de la barra es maj...
✗ Ø 150	64.12	—	S'ha produït un error, ja que l'esveltesa de la barra es maj...
✗ Ø 200	88.78	—	S'ha produït un error, ja que l'esveltesa de la barra es maj...
✓ Ø 250	113.44	94.66 %	
✓ Ø 300	138.10	62.76 %	
✓ Ø 350	162.77	44.76 %	

No s'han definit límits de fletxa.
Se ha seleccionat no realitzar la comprovació de resistència al foc.

Significat de les icones

- ✗ Perfil que no compleix alguna comprovació.
- ✓ Perfil que compleix totes les comprovacions.

Acceptar Cancel·lar

Figura 31. Càlcul de l'estructura per múltiples perfils

Els resultats obtinguts mostren com es deforma el pilar amb l'acció del vent, arribant a valors superiors als 30 mm.

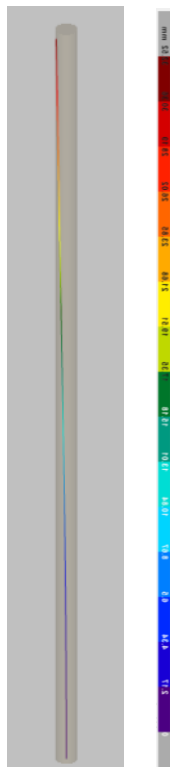


Figura 32. Resultats de deformació del pilar de subjecció. Font pròpia

Treball final de grau

Estudi: DOBLE TITULACIÓ GETI - ADE

Títol:

DISSENY D'UNA TURBINA EÒLICA D'EIX VERTICAL PER
L'AUTOCONSUM DOMÈSTIC

Document: 3. Estat d'amidaments i pressupost

Alumne: Ioana Florentina Petrescu

Tutor: Dr. Xavier Espinach Orús

Departament: Organització, gestió empresarial i Disseny del producte

Àrea: Expressió gràfica en l'enginyeria

Convocatòria (mes/any): Setembre de 2022

ESTAT D'AMIDAMENTS I PRESSUPOST

Codi	Unitat	Descripció	Quantitat	Preu unitari	Import
FON		Llosa de fonamentació de formigó armat, realitzada amb formigó HA-25/F/20/XC2 fabricat en central i acer UNE-EN 10080 B 500 S, amb una quantia aproximada de 85 kg/m³; acabat superficial llis mitjançant regla vibrant.			20,68 €
		Materials			
kg		Acer en barres corrugades, UNE-EN 10080 B 500 S, subministrat en obra en barres sense elaborar, de varis diàmetres.	2,000	1,22	2,44 €
kg		Filferro galvanitzat per a lligar, de 1,30 mm de diàmetre.	0,425	1,50	0,64 €
m³		Formigó HA-25/F/20/XC2, fabricat en central.	0,075	70,93	5,32 €
		Subtotal materials:			8,40 €
		Equip i maquinària			
h		Regla vibrant de 3 m.	0,150	5,23	0,78 €
		Subtotal equip i maquinària:			0,78 €
		Mà d'obra			
h		Oficial 1ª ferrallista.	0,300	25,55	7,67 €
h		Oficial 1ª estructurista, en treballs de posada en obra del formigó.	0,150	25,55	3,83 €
		Subtotal mà d'obra:			11,50 €
EIX		Eix format per tub d'acer inoxidable classe 1.4301 segons UNE-EN 10088-1 (AISI 304), amb soldadura longitudinal, de 100 mm de diàmetre			49,50 €
		Materials			
m		Tub d'acer inoxidable classe 1.4301 segons UNE-EN 10088-1 (AISI 304), amb soldadura longitudinal, de 100 mm de diàmetre exterior.	1,900	26,05	49,50 €
		Subtotal materials:			49,50 €
PIL		Pilar fabricat en Acer UNE-EN 10025 S275JR, amb perfil circular			210,28 €
		Materials			
kg		Acer laminat UNE-EN 10025 S275JR, en perfils laminats en calent, peces simples, per a aplicacions estructurals, de les sèries L, LD, T, rodó, quadrat, rectangular o pletina, acabat amb imprimació antioxidant. Treballat i muntat en taller, per col·locar amb unions soldades a l'obra.	138,100	1,44	198,86 €
		Subtotal materials:			198,86 €
		Equip i maquinària			
h		Equip i elements auxiliars per soldadura elèctrica.	0,100	3,42	0,34 €
		Subtotal equip i maquinària:			0,34 €
		Mà d'obra			
h		Oficial 1ª muntador d'estructura metàl·lica.	0,300	25,55	7,67 €
h		Ajudant muntador d'estructura metàl·lica.	0,150	22,71	3,41 €
		Subtotal mà d'obra:			11,08 €

Codi	Unitat	Descripció	Quantitat	Preu unitari	Import
PLA		Placa d'ancoratge d'acer UNE-EN 10025 S275JR en perfil pla de 500x500 mm i gruix 20 mm, i muntatge sobre 4 pernns d'acer corrugat UNE-EN 10080 B 500 S de 12 mm de diàmetre i 5 longitud total, embotits al formigó fresc, i cargolats amb volanderes, rosca i contraferm una vegada endurit el formigó del fonament			111,28 €
		Materials			
kg		Platina d'acer laminat UNE-EN 10025 S275JR, per aplicacions estructurals. Treballada i muntada en taller, per a col·locar amb unions soldades en obra.	39,250	2,22	87,14 €
kg		Ferralla elaborada en taller industrial amb acer en barres corrugades, UNE-EN 10080 B 500 S, de varis diàmetres.	1,775	1,60	2,84 €
Ud		Joc de volanderes, rosca i contrafermella, per a pern d'ancoratge de 12 mm de diàmetre.	4,000	1,62	6,48 €
		Subtotal materials:			96,46 €
		Equip i maquinària			
h		Equip i elements auxiliars per soldadura elèctrica.	0,100	3,42	0,34 €
		Subtotal equip i maquinària:			0,34 €
		Mà d'obra			
h		Oficial 1ª muntador d'estructura metàl·lica.	0,300	25,55	7,67 €
h		Ajudant muntador d'estructura metàl·lica.	0,300	22,71	6,81 €
		Subtotal mà d'obra:			14,48 €
PAL		Pales de l'aerogenerador de fibra de vidre tipus R amb resina de polièster			933,71 €
		Materials			
kg		Fibra de vidre tipus R amb resina de polièster	36,050	18,80	677,74 €
		Subtotal materials:			677,74 €
		Equip i maquinària			
h		Equip i elements auxiliars per la conformació de les pales	15,000	5,52	82,80 €
		Subtotal equip i maquinària:			82,80 €
		Mà d'obra			
h		Oficial 1ª manipulació fibra de vidre	5,000	25,55	127,75 €
h		Ajudant muntador	2,000	22,71	45,42 €
		Subtotal mà d'obra:			173,17 €
CAR		Ancoratge mecànic amb cargols de cap hexagonal d'hacer galvanitzat			7,11 €
		Materials			
U		Ancoratge mecànic amb cargol de cap hexagonal amb volandera, amb estrella interior de sis puntes per a clau Torx, d'acer galvanitzat, 6x40 5, de 60 mm de diàmetre i 120 mm de longitud, per a fixació sobre elements de formigó, fissurats o no fissurats.	4,000	0,69	2,76 €
		Subtotal materials:			2,76 €
		Mà d'obra			
h		Oficial 1ª construcció.	0,100	23,30	2,33 €
h		Peó especialitzat construcció.	0,100	20,15	2,02 €
		Subtotal mà d'obra:			4,35 €

Codi	Unitat	Descripció	Quantitat	Preu unitari	Import
Línia corrent continu formada per conductors del tipus PVC, Norma EN 50618, Cu, 1/1kV, H1Z2Z2-K amb reacció al foc ECA. S'instal·laran conductors aïllats en tub PVC rígid lliure d'halògens i en muntatge superficial (B1)					
CCc					
Materials					
m		Tub de PVC, sèrie B, de 75 mm de diàmetre i 3 mm de espessor, segon SUNE-EN 1329-1.	15,000	2,17	32,55 €
m		Línia corrent continu formada per conductors del tipus PVC, Norma EN 50618, Cu, 1/1kV, H1Z2Z2-K amb reacció al foc ECA. S'instal·laran conductors aïllats en tub PVC rígid lliure d'halògens i en muntatge superficial (B1)	18,000	1,58	28,44 €
U		Material auxiliar per a instal·lacions elèctriques.	0,200	1,48	0,30 €
Subtotal materials:					61,29 €
Mà d'obra					
h		Oficial 1ª electricista.	0,500	26,41	13,21 €
h		Ajudant electricista.	0,500	22,70	11,35 €
Subtotal mà d'obra:					24,56 €
Línia corrent altern formada per cables unipolars amb conductors de coure, RZ1-K (AS) Cca-s1b,d1,a1 5G10 mm², sent la seva tensió assignada de 0,6/1 kV, sota tub protector de polietilè de doble paret, de 75 mm de diàmetre.					
CAC					
Materials					
m³		Sorra de 0 a 5 mm de diàmetre.	0,092	12,02	1,11 €
m		Tub corbale, subministrat en rotllo, de polietilè de doble paret (interior llisa i exterior corrugada), de color taronja, de 75 mm de diàmetre nominal, per a canalització soterrada, resistència a la compressió 250 N, amb grau de protecció IP549 segons UNE 20324, amb fil guia incorporat. Segons UNE-EN 61386-1, UNE-EN 61386-22 i UNE-EN 50086-2-4.	2,500	2,04	5,10 €
m		Cable unipolar RZ1-K (AS), sent la seva tensió assignada de 0,6/1 kV, reacció al foc classe Cca-s1b,d1,a1 segons UNE-EN 50575, amb conductor de coure classe 5 (-K) de 10 mm² de secció, amb aïllament de polietilè reticulat (R) i coberta de compost termoplàstic a força de poliolefina lliure de halògens amb baixa emissió de fums i gasos corrosius (Z1). Segons UNE 21123-4.	3,000	2,49	7,47 €
U		Material auxiliar per a instal·lacions elèctriques.	0,200	1,48	0,30 €
Subtotal materials:					13,98 €
Equip i maquinària					
h		Dúmpet de descàrrega frontal de 2 t de càrrega útil.	0,100	10,38	1,04 €
h		Picó vibrant de guiat manual, de 80 kg, amb placa de 30x30 cm, tipus piconadora de granota.	0,090	3,92	0,35 €
h		Camión cisterna, de 8 m³ de capacitat.	0,050	44,89	2,24 €
Subtotal equip i maquinària:					3,63 €

Codi	Unitat	Descripció	Quantitat	Preu unitari	Import
Mà d'obra					
h		Oficial 1ª construcció.	0,200	25,57	5,11 €
h		Peó ordinari construcció.	0,150	21,40	3,21 €
h		Oficial 1ª electricista.	0,500	26,41	13,21 €
h		Ajudant electricista.	0,300	22,70	6,81 €
Subtotal mà d'obra:					28,34 €

GCC Generador de corrent continu DIRMRND IMOTICS S-1FL6 513,47 €

Materials					
u		Generador de corrent continu DIRMRND IMOTICS S-1FL6	1,00	484,00	484,00 €
Subtotal materials:					484,00 €
Mà d'obra					
h		Oficial 1ª electricista.	0,600	26,41	15,85 €
h		Ajudant electricista.	0,600	22,70	13,62 €
Subtotal mà d'obra:					29,47 €

INV Inversor monofàsic, potència màxima d'entrada 3 kW, voltatge d'entrada màxim 600 Vcc, rang de voltatge d'entrada de 160 a 500 Vcc, potència nominal de sortida 1,5 kW, potència màxima de sortida 1,5 kVA, eficiència màxima 97,2% 708,12 €

Materials					
U		Inversor monofàsic, potència màxima d'entrada 3 kW, voltatge d'entrada màxim 600 Vcc, rang de voltatge d'entrada de 160 a 500 Vcc, potència nominal de sortida 1,5 kW, potència màxima de sortida 1,5 kVA, eficiència màxima 97,2%, dimensions 460x122x357 mm, amb comunicació via Wi-Fi per a control remot des d'un smartphone, tablet o PC, ports Ethernet i RS-485, i protocol de comunicació Modbus.	1,000	678,65	678,65 €
Subtotal materials:					678,65 €
Mà d'obra					
h		Oficial 1ª electricista.	0,600	26,41	15,85 €
h		Ajudant electricista.	0,600	22,70	13,62 €
Subtotal mà d'obra:					29,47 €

RESUM DEL PRESSUPOST

Material	2.271,64 €
Equip i maquinària	87,89 €
Mà d'obra	326,42 €
Total	2.685,95 €

Treball final de grau

Estudi: DOBLE TITULACIÓ GETI - ADE

Títol:

DISSENY D'UNA TURBINA EÒLICA D'EIX VERTICAL PER
L'AUTOCONSUM DOMÈSTIC

Document: 4. Plec de condicions

Alumne: Ioana Florentina Petrescu

Tutor: Dr. Xavier Espinach Orús

Departament: Organització, gestió empresarial i Disseny del producte

Àrea: Expressió gràfica en l'enginyeria

Convocatòria (mes/any): Setembre de 2022

ÍNDEX PLEC DE CONDICIONS

1	DISPOSICIONS GENERALS	4
1.1	Condicions genèriques	4
1.2	Objectius del plec de condicions	4
1.3	Situació i emplaçament de les obres	4
1.4	Documentació del contracte d'obra	4
1.5	Formalització del contracte d'obra	4
1.6	Jurisdicció competentment	5
1.7	Responsabilitats	5
1.8	Accidents laborals i danys a tercers	5
1.9	Causas de rescissió del contracte d'obra	6
2	DISPOSICIONS FACULTATIVES	7
2.1	Definicions i atribucions	7
2.2	Qualificació mà d'obra	8
3	DISPOSICIONS ECONÒMIQUES	9
3.1	Definició	9
3.2	Contracte d'obra	9
3.3	Criteris generals	10
3.4	Preus	10
3.5	Indemnitzacions	11
3.6	Entrega final de l'obra	11
4	SEGURETAT I SALUT	12
4.1	Objectius	12
4.2	Equips i maquinària	12
4.3	Riscos laborals	12
4.4	Prevenició de riscos	13
4.5	Primers auxilis	14
5	MUNTATGE DE L'AEROGENERADOR	15
5.1	Diagrama general	15
5.2	Pilar de subjecció	15
5.3	Cablejat elèctric	15
5.4	Aerogenerador	16

6	MANTENIMENT DE L'AEROGENERADOR	17
6.1	Inicial.....	17
6.2	Posterior.....	17

1 DISPOSICIÓNS GENERALS

1.1 Condicions genèriques

El contractista estarà obligat a complir la reglamentació del treball corresponent, la contractació de l'assegurança obligatòria, l'assegurança de malaltia i totes aquelles reglamentacions de caràcter social vigents al moment de l'execució de les obres.

1.2 Objectius del plec de condicions

La finalitat d'aquest Plec és la de fixar els criteris de la relació que s'estableix entre els agents que intervenen en les obres definides en el present projecte i servir de base per a la realització del contracte d'obra entre el Promotor i el Contractista.

1.3 Situació i emplaçament de les obres

Les obres seran realitzades en el terme municipal de Lloret de Mar (17310) a la comarca de la Selva, a Girona. L'obra consisteix en la instal·lació d'un aerogenerador d'eix vertical de tipus *Savonius* helicoidal definit al projecte.

1.4 Documentació del contracte d'obra

Integren el contracte d'obra els següents documents:

- Les condicions fixades en el contracte d'obra.
- El present plec de condicions.
- La documentació gràfica i escrita del projecte: plànols generals i de detall, memòries, annexos, amidaments i pressupostos.

En el cas d'interpretació, prevalen les especificacions literals sobre les gràfiques i les cotes sobre les mesures a escala preses dels plànols.

1.5 Formalització del contracte d'obra

Els contractes es formalitzaran, en general, mitjançant document privat, que podrà elevar-se a escriptura pública a petició de qualsevol de les parts.

El contractista, abans de la formalització del contracte d'obra, donarà també la seva conformitat amb la signatura al peu del plec de condicions, els plànols, i pressupost general.

1.6 Jurisdicció competentment

En el cas de no arribar a un acord quan sorgeixin diferències entre les parts, ambdues queden obligades a sotmetre la discussió de totes les qüestions derivades del seu contracte a les autoritats i tribunals administratius conformement a la legislació vigent, renunciant al dret comú i al fur del seu domicili, sent competent la jurisdicció on estigués situada l'obra.

1.7 Responsabilitats

El contractista és responsable de l'execució de les obres en les condicions establertes en el contracte i en els documents que componen el projecte. En conseqüència, quedarà obligat a la demolició i reconstrucció de totes les unitats d'obra amb deficiències o mal executades, sense que pugui servir d'excusa el fet que la direcció facultativa hagi examinat i reconegut la construcció durant les seves visites d'obra.

1.8 Accidents laborals i danys a tercers

És d'obligat compliment el Reial Decret 1627/1997, de 24 d'Octubre, pel qual s'estableixen les disposicions mínimes de seguretat i salut a les obres de construcció i altra legislació vigent que, tant directa com indirectament, incideixen sobre la planificació de la seguretat i salut al treball de la construcció, conservació i manteniment de l'aerogenerador.

És responsabilitat del coordinador de seguretat i salut, en virtut del Reial Decret 1627/1997, el control i el seguiment, durant tota l'execució de l'obra del Pla de seguretat i salut redactat pel contractista.

El contractista serà responsable de tots els accidents que, per inexperiència o negligència, sobrevinguessin. Serà, per tant, del seu compte l'abonament de les indemnitzacions a qui correspongui i de tots els danys i perjudicis que puguin ser ocasionats o ser causats en les operacions de l'execució de les obres.

Així mateix, serà responsable dels danys i perjudicis directes o indirectes que es puguin ocasionar enfront de tercers a conseqüència de l'obra, tant en ella com en els seus voltants, fins i tot els quals es produeixin per omissió o negligència del personal a càrrec seu, així com els quees derivin dels subcontractistes i industrials que intervinguin en l'obra.

És de la seva responsabilitat mantenir vigent durant l'execució dels treballs una pòlissa d'assegurances per tercers.

1.9 Causes de rescissió del contracte d'obra

Es consideraran causes suficients de rescissió del contracte:

- La mort o incapacitació del Contractista.
- La fallida del Contractista.
- Les alteracions del contracte per les següents causes:
 - La modificació del projecte en forma tal que representi alteracions fonamentals del mateix segons el director d'obra i, en qualsevol cas, sempre que la variació del pressupost d'execució material, a conseqüència d'aquestes modificacions, representi una desviació major del 20%.
 - Les modificacions d'unitats d'obra, sempre que representin variacions en més o en menys del 40% del projecte original.
 - La suspensió d'obra començada, sempre que el termini de suspensió hagi excedit d'un any i, en tot cas, sempre que per causes alienes al contractista no es doni inici a l'obra adjudicada dintre del termini de tres mesos a partir de l'adjudicació. En aquest cas, la devolució de la fiança serà automàtica.
 - Que el Contractista no comenci els treballs dins del termini assenyalat en contracte.
 - Incompliment de les condicions del contracte quan impliqui negligència o dolenta fe, amb perjudici dels interessos de les obres.
 - El venciment del termini d'execució de l'obra.
 - L'abandonament de l'obra sense causes justificades.

2 DISPOSICIONS FACULTATIVES

2.1 Definicions i atribucions

Les atribucions dels diferents agents entrevinents són les regulades per la Llei 38/1999, de 5 de novembre, d'Ordenació de l'Edificació (L.O.E.).

Es defineixen agents com a totes persones, físiques o jurídiques, que intervenen en el procés de construcció de l'obra. Les seves obligacions queden determinades per la L.O.E. i altres disposicions que siguin d'aplicació i pel contracte que origina la seva intervenció.

- **Promotor:** És la persona o persones que decideix, impulsar, programar i finançar, amb recursos propis o aliens, les obres. Assumeix la iniciativa de tot el procés de construcció, impulsant la gestió necessària per a portar a terme l'obra inicialment projectada, i es fa càrrec de tots els costos necessaris.
- **Projectista:** És l'agent que, per encàrrec del promotor i amb subjecció a la normativa tècnica i urbanística corresponent, redacta el projecte. Podran redactar projectes parcials del projecte, o parts que ho complementin altres tècnics, de forma coordinada amb l'autor d'aquest. En aquest cas, cada projectista assumirà la titularitat del seu projecte.
- **Constructora / Contractista:** És l'agent que assumeix, el compromís d'executar amb mitjans humans i materials, propis o aliens, les obres o part de les mateixes amb subjecció al projecte i al contracte d'obra. S'ha de fer especial menció que la llei assenyala com a responsable explícit dels defectes constructius al contractista de l'obra, sense perjudici del dret de repetició d'aquest cap als subcontractistes.
- **Director d'obra:** És l'agent que, formant part de la direcció facultativa, dirigeix el desenvolupament de l'obra en els aspectes tècnics, estètics, urbanístics i mediambientals, de conformitat amb el projecte que la defineix, la llicència d'edificació i altres autoritzacions preceptives, i les condicions del contracte, amb l'objecte d'assegurar la seva adequació pel fi proposat. Podran dirigir les obres dels projectes parcials altres tècnics, sota la coordinació del director d'obra.
- **Director de l'execució de l'obra:** És l'agent que, formant part de la direcció facultativa, assumeix la funció tècnica de dirigir l'execució material de l'obra i de controlar qualitativa i quantitativament la construcció i qualitat de

l'aerogenerador. Per això és requisit indispensable l'estudi i anàlisi prèvia del projecte d'execució una vegada redactat per projectista, procedint a sol·licitar-li, amb antelació a l'inici de les obres, tots aquells aclariments, reparacions o documents complementaris que, dintre de la seva competència i atribucions legals, estimés necessaris per a poder dirigir de manera solvent l'execució d'aquestes.

2.2 Qualificació mà d'obra

Tot el personal empleat per a l'execució dels treballs haurà de reunir les degudes condicions de competència i comportament que siguin requerides a judici de la direcció facultativa de les obres, la qual podrà ordenar la retirada de l'obra de qualsevol operari del contractista que no satisfaci dites condicions.

3 DISPOSICIONS ECONÒMIQUES

3.1 Definició

Les condicions econòmiques fixen el marc de relacions econòmiques per a l'abonament i recepció de l'obra. Tenen un caràcter subsidiari respecte al contracte d'obra establert entre les parts que intervenen, promotor i contractista, que és en definitiva el qual té validesa.

3.2 Contracte d'obra

S'aconsella que se signi el contracte d'obra, entre el Promotor i el Contractista, abans d'iniciar-se les obres. A la direcció facultativa (director d'obra i director d'execució de l'obra) se li facilitarà una còpia del contracte d'obra per poder certificar els termes pactats.

El contracte d'obra haurà de preveure les possibles interpretacions i discrepàncies que poguessin sorgir entre les parts, així com garantir que la Direcció facultativa pugui coordinar, dirigir i controlar l'obra, per la qual cosa és convenient que s'especifiquin i es determinin amb claredat, com a mínim, els següents punts:

- Documents a aportar pel contractista.
- Condicions d'ocupació del terreny i inici de les obres.
- Determinació de les despeses i consums.
- Responsabilitats i obligacions del contractista: Legislació laboral.
- Responsabilitats i obligacions del promotor.
- Pressupost del contractista.
- Revisió de preus.
- Forma de pagament: Certificacions.
- Recepció de l'obra: Provisional i definitiva.

Atès que aquest plec de condicions econòmiques és complement del contracte d'obra en cas que no existeixi cap contracte d'obra entre les parts se li comunicarà a la direcció facultativa, que posarà a la disposició de les parts el present plec de condicions econòmiques que podrà ser usat com base per a la redacció del corresponent contracte d'obra.

3.3 Criteris generals

Tots els agents que intervenen en el procés de la construcció, definits en la Llei 38/1999 d'Ordenació de l'Edificació (L.O.E.), del 5 de novembre,, tenen dret a percebre puntualment les quantitats reportades per la seva correcta actuació conformement a les condicions contractualment establertes, podent exigir recíprocament les garanties suficients per al compliment diligent de les seves obligacions de pagament.

3.4 Preus

L'objectiu principal de l'elaboració del pressupost és anticipar el cost del procés de construir l'obra. Descompondrem el pressupost en unitats d'obra component menor que es contracta i certifica per separat, i basant-nos en aquests preus, calcularem el pressupost.

- **Preu bàsic:** És el preu per unitat (unitat, m, kg...) d'un material (inclòs el seu transport a obra, descàrrega en obra, embalatges...) o el preu per hora de la maquinària i de la mà d'obra.
- **Preu unitari:** És el preu d'una unitat d'obra que obtindrem com suma dels següents costos:
 - **Costos directes:** calculats com la suma dels productes "preu bàsic x quantitat" de la mà d'obra, maquinària i materials que intervenen en l'execució de l'obra.
 - **Mitjans auxiliars:** Costos directes complementaris, calculats en forma percentual com percentatge d'altres components, pel fet que representen els costos directes que intervenen en l'execució de l'obra i que són de difícil quantificació.
 - **Costos indirectes:** aplicats com un percentatge de la suma dels costos directes i mitjans auxiliars, igual per a cada unitat d'obra a causa del fet que representen els costos dels factors necessaris per a l'execució de l'obra que no es corresponen a cap unitat d'obra en concret.
- **PEM (Pressupost d'Execució de Material):** És el resultat de la suma dels preus unitaris de les diferents unitats d'obra que la componen. Es denomina Pressupost d'Execució Material al resultat obtingut per la suma dels productes del nombre de cada unitat d'obra pel seu preu unitari i de les partides alçades.

És a dir, el cost de l'obra sense incloure les despeses generals, el benefici industrial i l'impost sobre el valor afegit.

3.5 Indemnitzacions

Si, per causes imputables al contractista, les obres patissin un retard en la seva finalització en relació amb el termini d'execució previst, el promotor podrà imposar al contractista, les penalitzacions establertes en el contracte, que mai seran inferiors al perjudici que pogués causar el retard de l'obra.

3.6 Entrega final de l'obra

Entre el promotor i contractista, la liquidació de l'obra haurà de fer-se d'acord amb les certificacions conformades per la direcció d'obra. Si la liquidació es realitzés sense l'autorització de la direcció d'obra, aquesta només intervindrà, en cas de desavinença o desacord, en el recurs davant els tribunals.

4 SEGURETAT I SALUT

4.1 Objectius

Aquest document de seguretat i salut en el treball té com a objectiu definir els riscos derivats de les operacions i tasques necessàries per a l'execució dels treballs descrits en el present projecte, així com els derivats dels treballs de reparació, conservació i manteniment, i de les mesures de precaució i prevenció mínimes a considerar per evitar o atenuar el més possible les conseqüències d'accidents i malalties professionals que poguessin ser ocasionades durant l'execució.

4.2 Equips i maquinària

Es preveu la utilització de la següent maquinària i mitjans auxiliars:

- Pales carregadores.
- Retrocarregadora pneumàtica.
- Camió basculant.
- Grues d'alt tonatge.
- Camions formigonera.
- Vibrador de formigó.
- Radial.
- Escales de mà.
- Compressor.
- Martells destrossadors autopropulsats i manuals.
- Grups de soldadura i bufadors.
- Grues.

4.3 Riscos laborals

A continuació s'indiquen els riscos que es podrien produir durant l'execució de les obres, per culpa de la utilització de la maquinària i mitjans auxiliars necessaris per a l'execució d'aquestes.

Es preveu que els més freqüents seran:

- Caigudes del personal.
- Caigudes de material, eines o elements constructius.

- Xocs i/o bolcades de vehicles.
- Atropellaments del personal.
- Talls, cops i enganxades produïdes per màquines, eines, materials...
- Sobreesforços del personal.
- Lesions cutànies, auditives, oculars...
- Risc de danys a tercers.

Atès que no es permetrà el pas a l'obra de persones alienes a aquesta, no es preveu que es produeixin accidents que afectin terceres persones.

4.4 Prevenció de riscos

A continuació s'indiquen les mesures mínimes a considerar per a assolir i mantenir un nivell de seguretat òptim durant l'execució de les obres, de manera que s'evitin o atenuïn els efectes dels riscos en el treball.

- Proteccions col·lectives:
 - Tancament de les zones on s'executin els treballs.
 - Tancament i senyalització de les zones on s'efectuïn excavacions.
 - Protecció de caigudes d'objectes.
- Proteccions individuals mínimes:
 - Casc de seguretat homologat.
 - Ulleres protectores antipols i contra impactes
 - Botes de seguretat homologades
 - Protectors auditius
 - Equip d'arnes
 - Cinturons de seguretat.
 - Guants d'ús general de lona i serratge

Tots aquests hauran d'estar homologats i d'acord amb el Reial decret 773/1997, de 30 de maig, sobre disposicions mínimes de seguretat i salut relatives a la utilització pels treballadors d'equips de protecció individual.

- Senyalització: seria necessària la senyalització de l'obra:
 - El pas d'entrada i sortida de vehicles.
 - De prohibició de pas a persones alienes a l'obra.
 - Baranes de protecció d'1 m d'alçada en vores a diferent nivell i escales.
 - Cordes i punts de subjecció per a cinturons de seguretat.
 - Velocitat de desplaçament de vehicles limitada a 20 km/h.

Es ressalta que la millor protecció de riscos, tan professionals com a tercers, és la correcta utilització d'equips, materials i eines així com l'execució de qualsevol classe de treball per part de personal conscient i especialitzat en la seva feina professional.

4.5 Primers auxilis

Durant el muntatge de l'aerogenerador serà necessari disposar al lloc de l'obra d'una farmaciola de primers auxilis amb els materials bàsics. El personal disposarà d'una formació mínima bàsica.

5 MUNTATGE DE L'AEROGENERADOR

5.1 Diagrama general

Abans de començar a realitzar el muntatge, s'ha de tenir present els passos a seguir per garantir un correcte muntatge de l'aerogenerador



Figura 1. Procés de muntatge de l'aerogenerador

Les precaucions recomanades són:

- No planifiqui la instal·lació de l'aerogenerador en dies de vent.
- No deixar el generador funcionar lliurement sense estar connectat al sistema, podria produir danys irreparables.
- Utilitzar un cablejat adequat.

5.2 Pilar de subjecció

Es recomana col·locar l'aerogenerador en un pilar de subjecció independent, separada de l'habitatge per tal d'evitar qualsevol mena de turbulència o vibracions que pugui ser tramitada a l'habitatge.

L'ancoratge del pilar es farà segons el tipus a instal·lar, subjecta a terra fermament, generalment amb una fonamentació de formigó, totalment vertical i anivellada, per evitar un mal funcionament de l'aerogenerador. Aquest haurà de quedar totalment immòbil i consistent.

En qualsevol cas, en tot moment és necessari comprovar que el pilar queda totalment vertical i anivellat.

5.3 Cablejat elèctric

Previ a la instal·lació de l'aerogenerador i un cop instal·lat el pilar, és possible realitzar cablatge elèctric.

És necessari emprar el cablejat adequat per no invertir la polaritat.

El primer pas és connectar el generador de corrent continu al sistema de control eòlic i, posteriorment, aquest a l'inversor que conduirà fins a la xarxa interior de l'habitatge.

5.4 Aerogenerador

L'aerogenerador ha de girar lliurement 360° sense que arribi a fregar amb cap obstacle. Qualsevol objecte que entri en contacte amb les pales en moviment, pot malmetre-les i desequilibrar-les.

6 MANTENIMENT DE L'AEROGENERADOR

6.1 Inicial

Un cop realitzat el muntatge de l'aerogenerador i s'hagi realitzat la posada en marxa, passat **1 mes** es recomana comprovar visualment el conjunt del sistema per detectar qualsevol anomalia, així com comprovar els cargols i, si és necessari, prémer-los.

6.2 Posterior

Es recomana portar a terme unes revisions i uns manteniments de forma seguida, preferentment amb una **periodicitat semestral**, ja que l'aparell, el qual es troba a la intempèrie, es podria veure afectat pel canvi d'estació, de temperatura, la humitat, el vent, etc.

Es recomanen les següents actuacions bàsiques de manteniment:

- Revisar i prémer tots els cargols.
- Comprovar l'estat dels cables.
- Inspecció visual de les hèlixs.

Per les parts principals i específiques de l'aerogenerador, es donen les següents prescripcions:

Pales	Comprovar periòdicament que no hi hagi res a la superfície de les pales que pugui impedir el seu funcionament òptim, també, si és el cas, l'erosió d'aquestes.
Eix	Comprovar que l'eix gira lliurement i que no hi ha vibracions en el seu encaix amb els rodaments.
Cargols	Comprovar l'estat de cargols. Si es detecta danys superficials o corrosió, es recomana reemplaçar la peça amb la màxima rapidesa.
Cablejat	Comprovar l'estat de les unions i empalmaments, així com les regletes de les connexions que hi hagi, per evitar que es pugui desconnectar i deixar l'aerogenerador funcionant lliurement.
Greixatge	Degut a la selecció de rodaments, aquest seran de tipus compacte, per la qual cosa no requeriran engreixat.

Taula 1. Taula resum de comprovacions de manteniments

TREBALL FINAL DE GRAU

Estudi: DOBLE TITULACIÓ GETI - ADE

Títol:

DISSENY D'UNA TURBINA EÒLICA D'EIX VERTICAL PER
L'AUTOCONSUM DOMÈSTIC

Document: 5. Plànols

Alumne: Ioana Florentina Petrescu

Tutor: Dr. Xavier Espinach Orús

Departament: Organització, gestió empresarial i Disseny del producte

Àrea: Expressió gràfica en l'enginyeria

Convocatòria (mes/any): Setembre de 2022

ÍNDIX DE PLÀNOLS

P1. SITUACIÓ I EMPLAÇAMENT DE LA INSTAL·LACIÓ

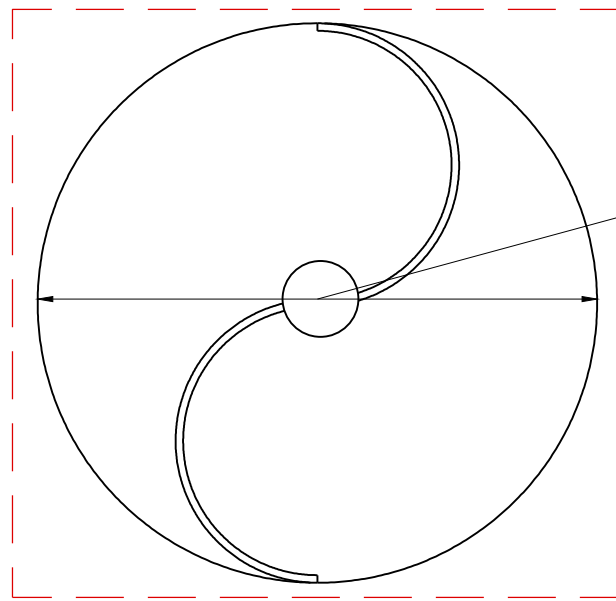
P2. DISSENY. COTES PRINCIPALS

P3. DISSENY. DETALLS

P4. COMPONENTS GENÈRICS DE LA XARXA

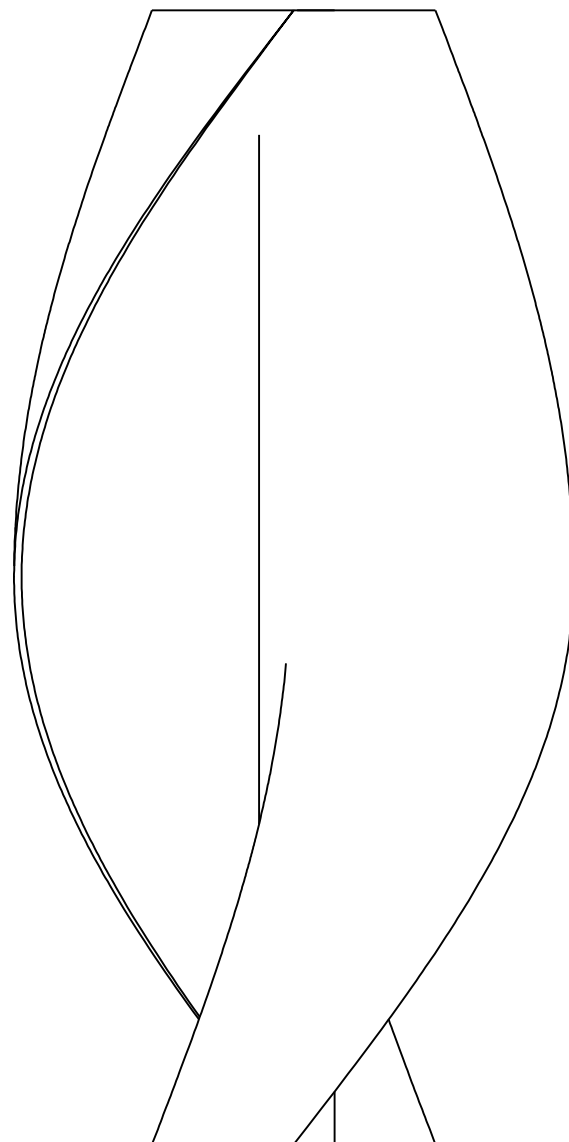
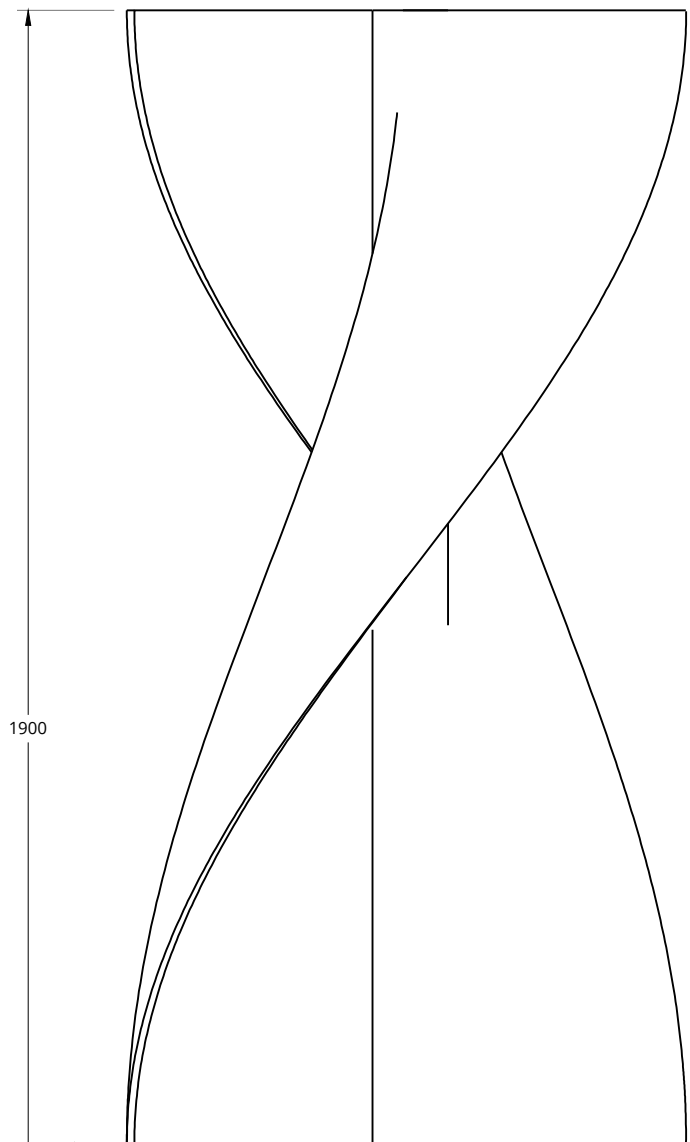


	Escola	Dibuixat per	Aprovat per	Data
	V/E	Ioana Florentina Petrescu	Ioana Florentina Petrescu	24/06/2022
	AEROGENERADOR TIPUS SAVONIUS HELICOIDAL. SITUACIÓ I EMLAÇAMENT DE LA INSTAL·LACIÓ			Titulació
	Tipus de doc: Plànol			GETI
	Nº plànol: 01			Nº Full
				1

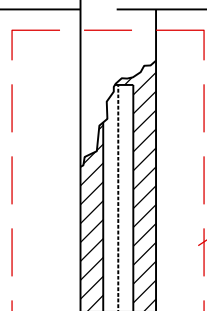


VEURE DETALL "A"

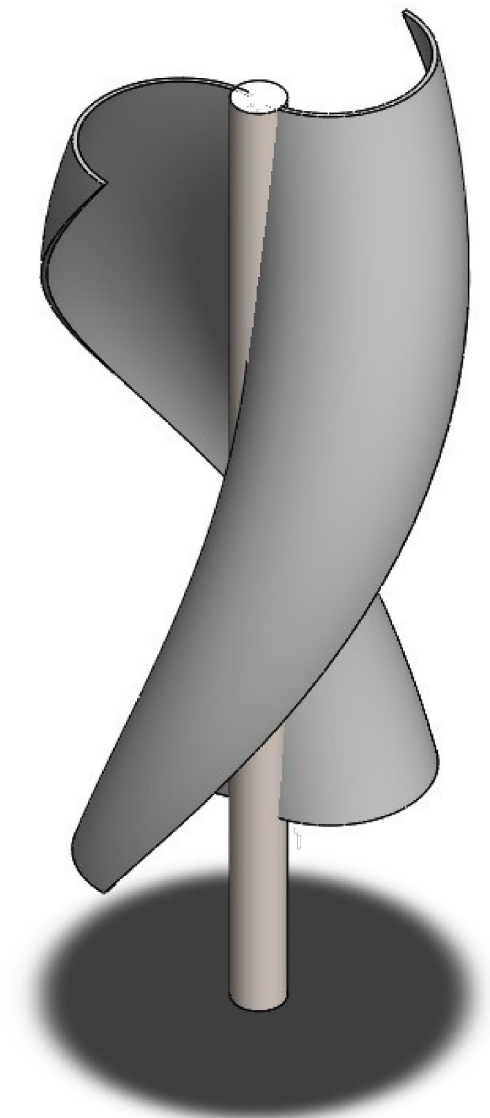
Ø 740



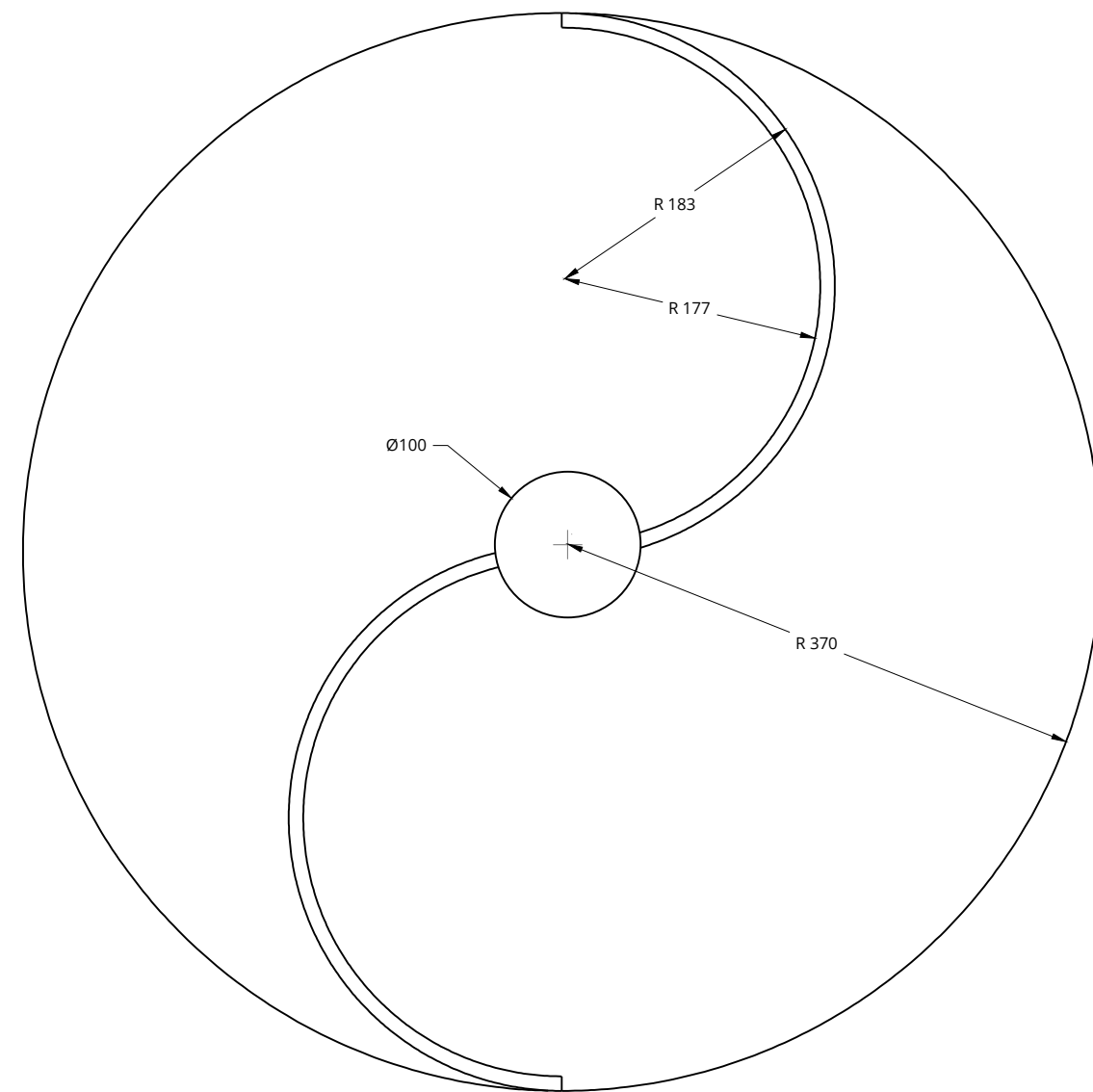
1900
400



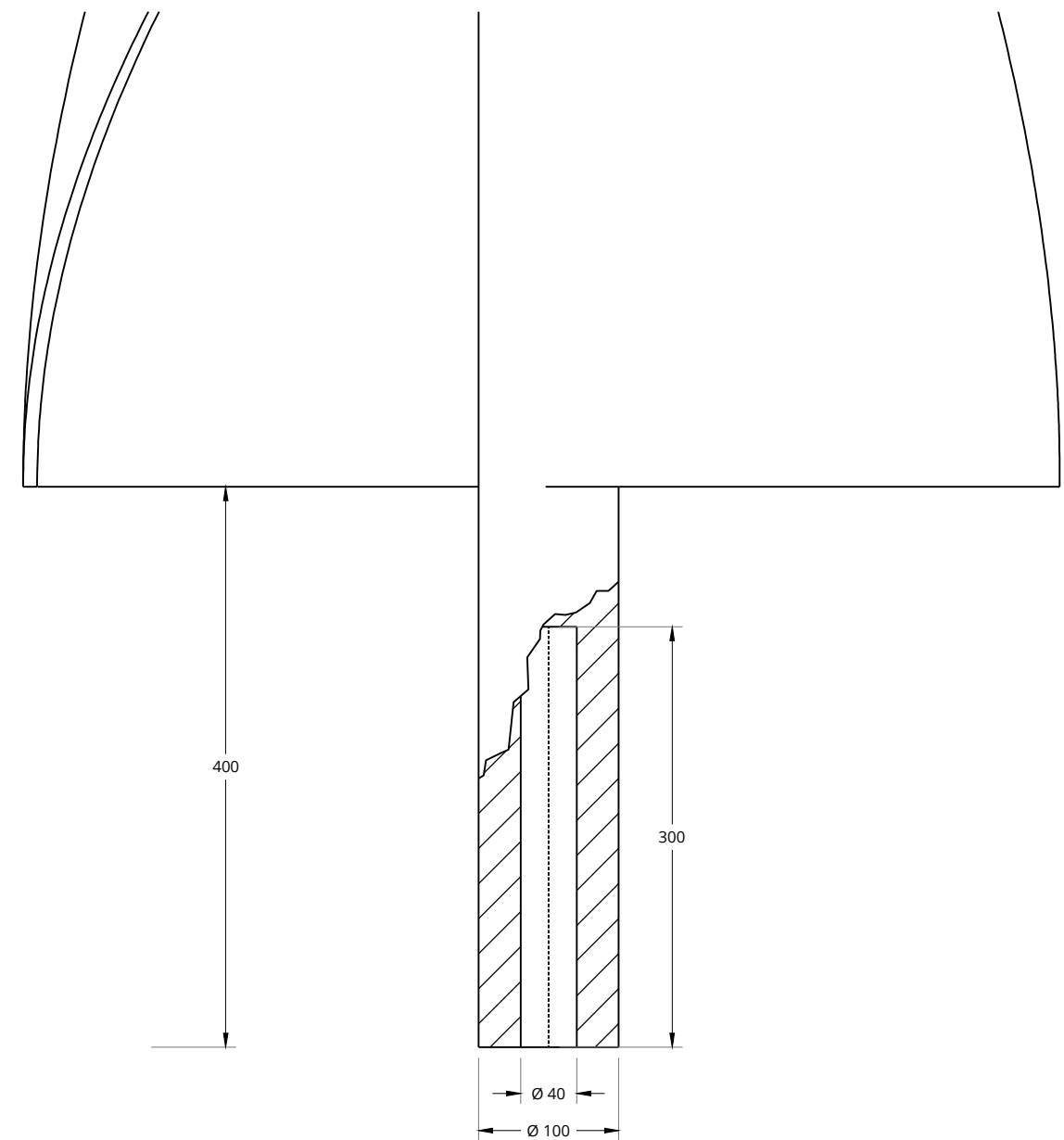
VEURE DETALL "B"



	Escala	Dibuixat per	Aprovat per	Data
	1:10	Ioana Florentina Petrescu	Ioana Florentina Petrescu	24/06/2022
	AEROGENERADOR TIPUS SAVONIUS HELICOIDAL. COTES PRINCIPALS			Titulació
	Tipus de doc: Plànol			GETI
	Nº plànol: 02			Nº Full
				2

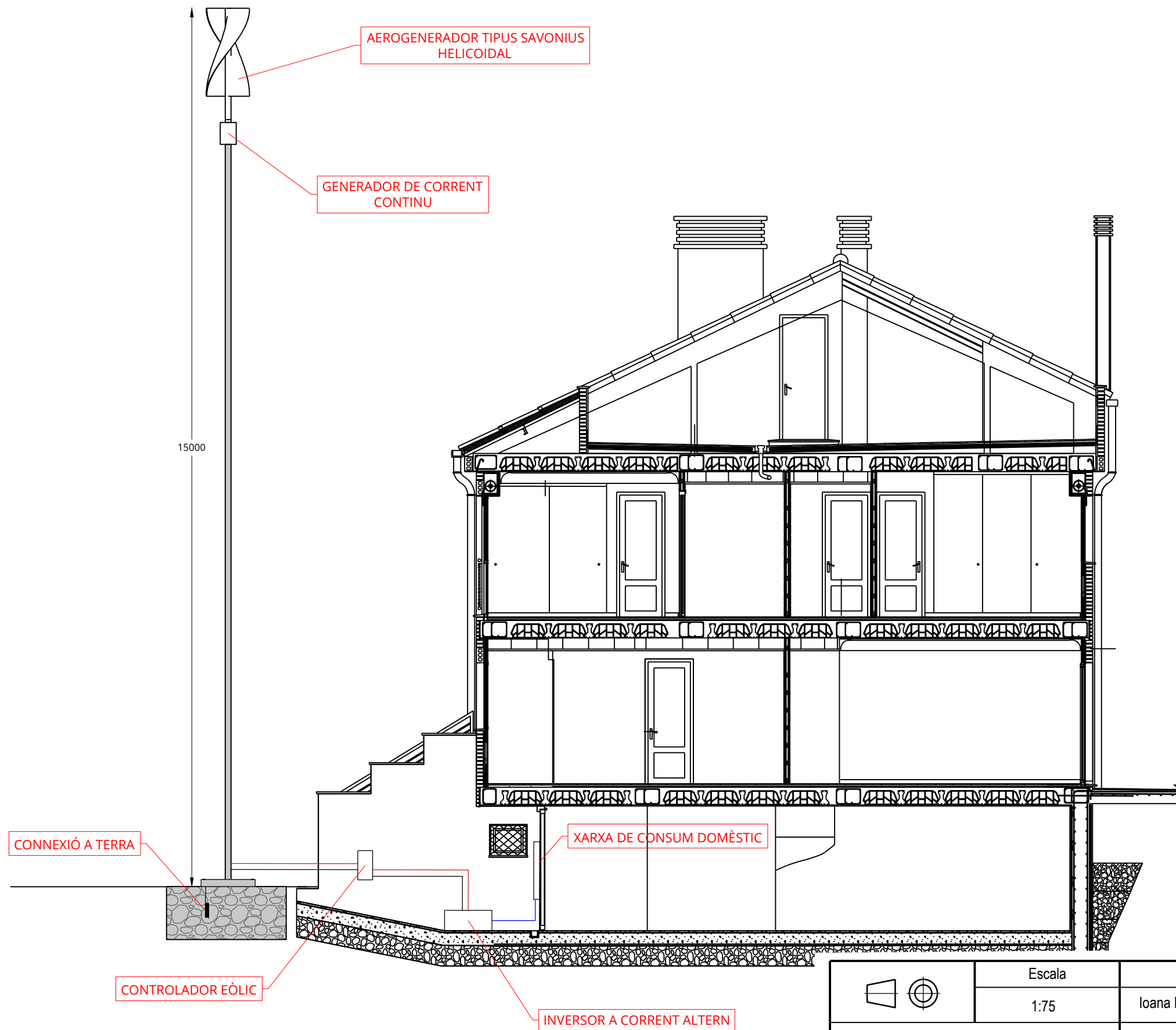


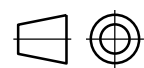

DETALL "A"
ESCALA 1:5



DETALL "B"
ESCALA 1:5

	Escala	Dibuixat per	Aprovat per	Data
	V/E	Ioana Florentina Petrescu	Ioana Florentina Petrescu	24/06/2022
	AEROGENERADOR TIPUS SAVONIUS HELICOIDAL. DETALLS DISSENY			Titulació
	Tipus de doc: Plànol			GETI
	Nº plànol: 03			Nº Full
				3



	Escala	Dibuixat per	Aprovat per	Data
	1:75	Ioana Florentina Petrescu	Ioana Florentina Petrescu	24/06/2022
	AEROGENERADOR TIPUS SAVONIUS HELICOIDAL. COMPONENTS GENÈRICS DE LA XARXA			Titulació
	Tipus de doc: Plànol			GETI
	Nº plànol: 04			Nº Full
				4

TREBALL FINAL DE GRAU

Estudi: DOBLE TITULACIÓ GETI - ADE

Títol:

DISSENY D'UNA TURBINA EÒLICA D'EIX VERTICAL PER
L'AUTOCONSUM DOMÈSTIC

Document: 6. Resum

Alumne: Ioana Florentina Petrescu

Tutor: Dr. Xavier Espinach Orús

Departament: Organització, gestió empresarial i Disseny del producte

Àrea: Expressió gràfica en l'enginyeria

Convocatòria (mes/any): Setembre de 2022

DOCUMENT RESUM

En un moment on l'escassetat i revalorització de recursos energètics convencionals estan a l'alça, traduït en un constant augment de preus, combinat amb un creixement de la preocupació social per la contaminació del medi ambient, les energies renovables prenen més impuls que mai.

Amb les millores de les tecnologies d'aprofitament de recursos sostenibles, s'observa un increment en la implementació de les energies renovables per l'autoconsum, sobretot a la branca de fotovoltaica. Per això, ens trobem amb un escenari alternatiu poc explotat a l'àmbit domèstic, l'energia eòlica.

Aquest fet té una explicació i és la consideració de l'impacte visual i ambiental que generen les turbines eòliques, sobretot les d'eix horitzontal, per les seves grans dimensions i necessitat d'extensió de terreny, dificultant així el seu ús en entorns urbans. Per aquest motiu, s'ha optat per estudiar els aerogeneradors d'eix vertical.

Els aerogeneradors d'eix vertical són els que tenen el seu eix perpendicular a la direcció del vent. Els més utilitzats són els models Savonius, Darrieus o la combinació d'ambdues tipologies.

S'ha seleccionat analitzar el rotor tipus Savonius helicoidal, en primer lloc, per la senzillesa del disseny, també perquè és capaç d'arrancar amb velocitats de vent petites sense necessitat de disposar d'un sistema d'autoarrencada i finalment perquè la geometria de les pales permeten generar electricitat a qualsevol lloc i sense importar la direcció del vent.

L'objecte principal del projecte és la modelització d'una turbina eòlica d'eix vertical tipus Savonius helicoidal a partir d'un model comercial per la seva implementació en un habitatge unifamiliar, per determinar la seva viabilitat funcional i econòmica.

Per aconseguir els propòsits plantejats, en primer lloc, s'ha definit un model de referència ja comercialitzat per determinar els paràmetres més rellevants que seguirà el prototip modelat en el software SolidWorks, amb la finalitat d'exportar-ho a altres programaris per l'estudi del seu comportament dinàmic i estructural.

En segon lloc, s'ha tingut present que la producció d'energia elèctrica a partir del vent està directament relacionada amb la posició geogràfica de la instal·lació, per la qual cosa s'han analitzat les dades meteorològiques disponibles a la zona. S'ha determinat que la velocitat mitjana del vent es troba al voltant dels 5 m/s, amb ràfegues de fins a 9,5 m/s.

Aquestes variables han permès calcular l'energia útil del vent que impactaria contra les pales, i, per tant, la màxima que seria capaç de recuperar l'aerogenerador en forma d'energia mecànica rotacional.

Tal com mostra la Teoria de Betz, no és possible recuperar el cent per cent de l'energia, perquè la màquina té unes pèrdues associades, per rotors de tipus Savonius el coeficient de potència es troba al voltant de 0,30. El rendiment de l'aerogenerador i la seva geometria, permet obtenir una potència màxima de subministrament de 180,85 kW.

Amb l'obtenció dels valors teòrics de les variables que afectaran la turbina eòlica, s'ha simulat els diferents escenaris d'anàlisi.

Primer, el comportament del fluid al voltant de l'aerogenerador a través del *software ANSYS Fluent d'ANSYS Workbench 2022 R1*, una eina de dinàmica de fluids computacional (CFD) que s'utilitza particularment per al modelatge del flux de fluids i la transferència de calor.

Seguidament, amb la finalitat d'analitzar el comportament de les pales de l'aerogenerador en ser impactades per la força del vent i originar el gir de la màquina, es porta a terme un estudi estructural estàtic. L'eina utilitzada, *Static Structural* del programari *d'ANSYS Workbench 2022 R1*, ha permès determinar les parts de les pales sotmeses a més esforços i la deformació que poden arribar a patir.

També s'ha fet una anàlisi bàsic en *CYPECAD 3D* del *software CYPE Ingenieros* del pilar de subjecció de l'aerogenerador. S'ha considerat un pilar circular d'acer conformat, sotmès a la càrrega de l'aerogenerador i a les forces del vent.

Finalment, per analitzar la viabilitat econòmica de la instal·lació s'ha considerat la fabricació de les principals peces, les pales i l'eix, les hores de maquinària i la mà d'obra pel muntatge, assolint-se un cost de 2.685,95 €. Aquest, tenint en compte la capacitat

de generació de l'aerogenerador, el preu actual de l'electricitat i l'estalvi que ocasionaria, s'amortitzaria en menys de 9 anys.

Amb totes les anàlisis portades a terme i observant els resultats obtinguts, es pot concloure amb la idea que aquest tipus d'aerogenerador, en particular, el dimensionat en el present projecte, malgrat el seu baix rendiment, pot generar potència a la zona geogràfica d'instal·lació, sent viable tècnica i econòmicament, donant així compliment a l'objectiu principal del treball.