



**TecnoCampus**  
Escola Superior  
Politécnica

*Centre adscrit a la*



Universitat  
Pompeu Fabra  
Barcelona

**Grau en Enginyeria Mecànica**

**DISSENY D'UN MODEL D'AEROGENERADOR  
PER L'APROFITAMENT DEL VENT GENERAT PELS VEHICLES**

**Memòria Final**

**DAVID INVERNÓ DUQUE**

**PONENT: KLÁRA VÉKONY**

**Curs acadèmic 2022/2023**



**TecnoCampus**  
Mataró-Maresme



## **Dedicatòria**

M'agradaria dedicar el present projecte la meva família, en especial als meus pares, la meva germana i a la Muntsa, els quals m'han acompanyat durant tot aquest viatge, m'han ajudat en tot moment i m'han servit d'inspiració.



## **Agraïments**

Voldria agrair a totes les persones que m'han ajudat a inspirar i desenvolupar el present projecte.

A l'Escola Superior Politènica Tecnocampus de Mataró i tots els docents que hi formen part, per tot el coneixement que m'han transmès, i per tot el suport que he rebut sempre.

A la meva tutora, Klára Vékony, per la col·laboració i ajuda que he rebut durant tot el projecte, i per transmetre part dels seus coneixements necessaris per fer d'aquest projecte una realitat.

També vull agrair especialment al Dr. Pablo Genovese i al Dr. Pedro Casariego per la seva ajuda, la qual m'ha permès créixer professionalment.



## **Resum**

Aquest document correspon a l'entrega final del Treball de Final de Grau (TFG) corresponent al grau d'Enginyeria Mecànica cursat al TecnoCampus de Mataró. El projecte consisteix en el disseny d'un model d'aerogenerador que aprofiti el vent que generen els vehicles quan aquests hi circulen per carreteres d'alta velocitat, en concret, el projecte s'ubica al tram de la B-20 Nord de la ciutat de Badalona. El conjunt d'aerogeneradors que s'instal·lin han de ser capaços de generar part de l'energia necessària per alimentar de forma sostenible els diferents enllumenats de la carretera durant les hores nocturnes, ja que, actualment, aquest tram no s'il·lumina i això comporta en risc en la seguretat viària cap als usuaris de la via.

## **Resumen**

Este documento corresponde a la entrega final del Trabajo de Final de Grado (TFG) correspondiente al grado de Ingeniería Mecánica cursado en el TecnoCampus de Mataró. El proyecto consiste en el diseño de un modelo de aerogenerador que aproveche el viento que generan los vehículos cuando estos circulan por carreteras de alta velocidad, en concreto, el proyecto se ubica en el tramo de la B-20 Norte de la ciudad de Badalona. El conjunto de aerogeneradores que se instalen han de ser capaces de generar parte de la energía necesaria para alimentar de forma sostenible los diferentes alumbrados de la carretera durante las horas nocturnas, ya que, actualmente, este tramo no se ilumina i esto genera un riesgo de seguridad vial hacia los usuarios de la vía.

## **Abstract**

This document corresponds to the final delivery of the Final Degree Project (TFG) corresponding to the degree in Mechanical Engineering studied at the TecnoCampus of Mataró. The project consists of the design of a model of wind turbine that takes advantage of the wind generated by vehicles when they drive on high-speed roads, specifically, the project is located on the section of the B-20 North of the city of Badalona. The set of wind turbines to be installed must be capable of generating part of the energy needed to sustainably power the different road lighting during night-time hours, as this section is currently not lit, and this generates a road safety risk for drivers.





# Índex

Índex de figures .....	V
Índex de taules .....	IX
Glossari de termes .....	XI
Nomenclatura .....	XIII
Marc normatiu .....	XV
1. Objectius.....	1
1.1. Propòsit.....	1
1.2. Finalitat.....	1
1.3. Objecte.....	1
1.4. Abast.....	1
1.5. Línies d’investigació i transferència de coneixement.....	2
2. Objectius per l’assoliment del projecte .....	3
2.1. Objectius.....	3
2.1.1. Objectiu 1 – Estudi de paràmetres per al disseny de la turbina.....	3
2.1.2. Objectiu 2 – Disseny del conjunt de la turbina .....	4
2.1.3. Objectiu 3 – Comprovació del disseny mitjançant XFLR5 i QBlade .....	5
3. Introducció a l’aerodinàmica i l’energia eòlica.....	7
3.1. Aerodinàmica.....	7
3.2. Perfils alars .....	8
3.2.1. Forces aerodinàmiques .....	10

## II

3.3.	Perfils NACA .....	11
3.3.1.	Nomenclatura dels perfils NACA .....	11
3.4.	Energia eòlica .....	13
3.4.1.	Passat, present i futur de l'energia eòlica .....	13
3.4.2.	La sostenibilitat de l'energia eòlica.....	14
3.5.	Aerogeneradors.....	15
3.6.	Tipus d'aerogeneradors .....	16
3.6.1.	Aerogeneradors HAWT .....	16
3.6.2.	Aerogeneradors VAWT .....	17
3.6.3.	Aerogeneradors Bladeless .....	20
3.6.4.	Elecció del tipus d'aerogenerador .....	21
4.	Estudi i càlcul dels paràmetres necessaris per al disseny de la turbina.....	23
4.1.	Estudi de la zona geogràfica i meteorològica .....	23
4.1.1.	Estudi de la zona geogràfica.....	23
4.1.2.	Estudi meteorològic.....	26
4.2.	Estudi del trànsit i del vent que generen els vehicles .....	29
4.2.1.	Estudi del trànsit.....	29
4.2.2.	Estudi del vent generat pels vehicles.....	32
4.3.	Estudi de la demanda energètica i possibilitats d'alimentació .....	38
4.3.1.	Elements que requereixen d'energia elèctrica.....	38
4.3.2.	Estudi de les possibilitats d'alimentació del sistema .....	43

4.3.3.	Components electrònics necessaris per a l'elecció de la turbina .....	44
4.4.	Espai disponible per al dimensionament de l'aerogenerador .....	48
4.5.	Càlcul del nombre de Reynolds .....	50
5.	Disseny de l'aerogenerador .....	53
5.1.	Disseny i elecció del perfil alar .....	53
5.1.1.	Presentació dels perfils NACA que s'utilitzen a l'anàlisi .....	54
5.1.2.	Elecció del perfil alar mitjançant XFLR5 .....	56
5.2.	Disseny i elecció de l'aerogenerador .....	60
5.3.	Comprovació del flux d'aire que envolta la turbina .....	64
5.4.	Estalvi econòmic mitjançant l'ús de l'aerogenerador .....	66
5.5.	Disseny del model d'aerogenerador final .....	67
6.	Planificació .....	69
6.1.	Planificació inicial del projecte .....	69
6.2.	Diagrama de Gantt de la planificació inicial del projecte .....	70
6.3.	Durada final del projecte .....	72
6.4.	Diagrama de Gantt final del projecte .....	73
7.	Perspectiva de gènere .....	75
8.	Conclusions .....	77
8.1.	Línia de treball futur .....	78
9.	Bibliografia .....	79



## Índex de figures

Fig. 3.1. Forces generades al perfil alar [16].....	8
Fig. 3.2. Parts d'un perfil alar [15].....	9
Fig. 3.3. Logotip NACA [24] .....	11
Fig. 3.4. Nomenclatura i forma dels perfils NACA [26].....	12
Fig. 3.5. Fotografia primera turbina eòlica generadora d'electricitat [28].....	14
Fig. 3.6. Fotografia d'aerogeneradors tripala amb les pales pintades de negre [35] .....	15
Fig. 3.7. HAWT tripala [37].....	17
Fig. 3.8. HAWT bipala [38] .....	17
Fig. 3.9. Savonius [46] .....	19
Fig. 3.10. Savonius helicoidal [47] .....	19
Fig. 3.11. Darrieus [48] .....	19
Fig. 3.12. Darrieus helicoidal [49] .....	19
Fig. 3.13. Turbina mixta [50] .....	19
Fig. 3.14. Giromill [50].....	19
Fig. 3.15. Fotografia Vortex Bladeless [52].....	20
Fig. 3.16. Disseny Vortex Bladeless [51].....	20
Fig. 4.1. Mapa amb el tram de la carretera B-20 estudiat .....	25
Fig. 4.2. Fotografia on es veu la poca visibilitat de la carretera per la nit .....	25
Fig. 4.3. Gràfic de les velocitats mitjanes durant l'any 2020 a l'estació de Badalona .....	27
Fig. 4.4. Nombre de vehicles que van circular per l'autopista B-20 durant el 2022 [60].....	30

Fig. 4.5. Nombre de vehicles que van circular per l'autopista B-20 durant el 2021 [60].....	31
Fig. 4.6. Vista en 3D del vent generat entorn al cotxe amb SimScale .....	35
Fig. 4.7. Vista planta de la velocitat del vent generada pel cotxe amb ParaView .....	36
Fig. 4.8. Vista planta de la velocitat del vent generada pel camió .....	37
Fig. 4.9. Fanal amb una làmpada .....	39
Fig. 4.10. Fanal amb dues làmpades .....	39
Fig. 4.11. Fotografia del model VEKA L [68].....	41
Fig. 4.12. Fotografia del model MEEPT-HE100W [70].....	43
Fig. 4.13. Alternador PMG-20000 marca Sunny Sumai Store [71].....	47
Fig. 4.14. Connexionat de l'alternador amb els elements electrònics [72].....	48
Fig. 4.15. Amplitud de la mitjana del tram d'estudi [73] .....	49
Fig. 5.1. Perfil NACA 0012 .....	54
Fig. 5.2. Perfil NACA 0015 .....	54
Fig. 5.3. Perfil NACA 2418 .....	55
Fig. 5.4. Perfil NACA 4518 .....	55
Fig. 5.5. Perfil NACA 6409 .....	55
Fig. 5.6. Llegenda de les simulacions .....	57
Fig. 5.7. Relació entre les forces d'arrossegament i les forces de sustentació.....	58
Fig. 5.8. Relació entre l'angle d'atac del perfil i el coeficient de sustentació.....	59
Fig. 5.9. Relació entre l'angle d'atac i l'eficiència aerodinàmica de l'aerogenerador.....	59
Fig. 5.10. Definició del perfil NACA 4518 al software QBlade.....	60

Fig. 5.11. Model tres pales .....	61
Fig. 5.12. Model quatre pales .....	61
Fig. 5.13. Model cinc pales .....	61
Fig. 5.14. relació entre el TSR i el coeficient de potència de les tres turbines .....	62
Fig. 5.15. Gràfic de la potència que genera l'aerogenerador segons la velocitat del vent i la velocitat de rotació .....	63
Fig. 5.16. Comportament etapa inicial del flux d'aire generat per l'aerogenerador .....	65
Fig. 5.17. Comportament flux d'aire quan la turbina ha rotat 5 vegades .....	65
Fig. 5.18. Comportament del flux d'aire quan l'aerogenerador porta molta estona funcionant	66
Fig. 5.19. Aspecte final de l'aerogenerador .....	67
Fig. 5.20. Acotació de l'aerogenerador .....	68
Fig. 6.1. Diagrama de Gantt segons planificació inicial del projecte.....	71
Fig. 6.2. Diagrama de Gantt segons planificació real del projecte.....	74





## Índex de taules

Taula 4.1. Dades mitjanes anuals de l'estació del Museu de Badalona.....	27
Taula 4.2. Dades mitjanes anuals de l'estació de Vilassar de Dalt .....	28
Taula 4.3. Nombre de vehicles que hi circulen pel tram.....	31
Taula 4.4. Distribució de lluminàries .....	40
Taula 4.5. Distribució de les lluminàries dels túnels.....	42
Taula 4.6. Consums requerits per cada opció d'alimentació.....	44
Taula 6.1. Planificació inicial del projecte .....	70
Taula 6.2. Planificació final del projecte.....	73



## Glossari de termes

AEE	<i>Asociación Empresarial Eólica</i>
AEMET	Agència Estatal de Meteorologia
AMB	Àrea Metropolitana de Barcelona
DGC	<i>Dirección General de Carreteras</i>
ECM	<i>School of Engineering, Computing and Mathematics</i>
FESVIAL	<i>Fundación Española para la Seguridad Vial</i>
HAWT	<i>Horizontal Axis Wind Turbine</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
MeteoCat	Servei Meteorològic de Catalunya
MITMA	<i>Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana de España</i>
NACA	<i>National Advisory Committee for Aeronautics</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
OMC	Observatori de la Mobilitat de Catalunya
PNIEC	Pla Nacional Integrat d'Energia i Clima
SAI	Sistema d'alimentació ininterrompuda
TSR	<i>Tip Speed Ratio</i>
UAV	Vehicle aeri no tripulat
UNE	Una Norma Española
VAWT	<i>Vertical Axis Wind Turbine</i>



## Nomenclatura

$\mu$	Viscositat dinàmica de l'aire	[kg/(m*s)]
A	Àrea de superfície de l'objecte	[m <sup>2</sup> ]
$C_d$	Coefficient d'arrossegament	[sense unitats]
$C_l$	Coefficient de sustentació	[sense unitats]
D	Força d'arrossegament	[N]
K	Energia cinètica turbulenta	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
L	Força de sustentació	[N]
$L_c$	Longitud característica del sistema	[m]
R	Radi de rotació de la turbina	[m]
$Re$	Número de Reynolds	[sense unitats]
V	Velocitat de l'aire	[m/s]
v	Velocitat del vent al que funcionarà la turbina	[m/s]
$V_{tan}$	Velocitat tangencial de l'aire	[m/s]
$\rho$	Densitat de l'aire	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\omega$	Velocitat angular	[rpm]
$\omega_{dis}$	Taxa de dissipació específica	[s <sup>-1</sup> ]



## Marc normatiu

En relació amb les característiques del projecte, es fa un recull de totes les normatives i patents que influenciaran a la solució final desitjada de l'aerogenerador, i per tant, en el desenvolupament del projecte:

- Norma UNE-EN 13201-3:2016 *Iluminación de carreteras*: Normativa que determina la distància entre els diferents enllumenats, la seva altura i la luminància requerida a cada carretera, en resum, aquesta determina la disposició mínima dels enllumenats per a una il·luminació adequada [1].
- Norma UNE-EN 12352 *Iluminación de túneles*: Normativa que estableix el número de lluminàries mínimes als túnels a Espanya. Aquesta norma afecta a tots els túnels independentment de la categoria de carretera que sigui i independentment de la seva longitud [2].
- Norma UNE-EN 14341 *Seguridad en túneles*: Aquesta norma afecta a aquells túnels que tenen una longitud igual o superior a 500 metres. Aquesta norma inclou, entre altres, requisits de ventilació, incendis, evacuació, però també d'enllumenat d'emergència [3].
- *Manual de Diseño Geométrico de Carreteras del Ministerio de Fomento*: Aquest manual especifica totes les mides que han de tenir les carreteres segons a quina classe hi pertanyi la mateixa. Dins d'aquest projecte és important les mides de la mitjana segons la protecció que hi existeixi a la via i la velocitat màxima de circulació [4], [5].
- Patent número ES2374233B: patent propietat de l'enginyer David Yáñez, aquesta inclou el disseny de tecnologia eòlica sense aspes que generen electricitat a través de la freqüència de vibració que genera l'aire [6], [7].





# **1. Objectius**

## **1.1. Propòsit**

Dissenyar una turbina eòlica que aprofiti el flux d'aire que generen els vehicles quan hi circulen a altes velocitats per a generar, de forma sostenible, part de l'energia necessària per il·luminar el tram de l'autopista B-20 que travessa la ciutat de Badalona durant les hores nocturnes i poder millorar la seguretat de la via.

## **1.2. Finalitat**

Aconseguir generar, de forma sostenible, l'energia necessària per alimentar els elements il·luminatius en el tram de carretera durant la nit amb la finalitat final de poder millorar la seguretat del tram objecte d'estudi. Aquesta energia s'ha de generar mitjançant un grup d'aerogeneradors instal·lats a la mitjana del tram d'autopista B-20 Nord que travessa la ciutat de Badalona.

## **1.3. Objecte**

Disseny aerodinàmic d'un conjunt de turbines eòliques d'eix vertical ubicades a la mitjana del tram de l'autopista B-20 que travessa ciutat de Badalona , aquestes turbines aprofiten el vent generat per els vehicles que hi circulen a altes velocitats en ambdós sentits. Les turbines produiran l'energia necessària per alimentar l'enllumenat de la carretera durant, principalment, les hores nocturnes.

## **1.4. Abast**

En aquest projecte es realitzaran els estudis de les característiques tècniques que determinaran el disseny final de l'aerogenerador, dins d'aquests es troben el vent, la potencia mínima a generar i les especificacions de cada classe d'aerogenerador, entre altres.

S'analitza la meteorologia de la zona per conèixer quina és la velocitat mitjana del vent en aquesta. Per obtenir una aproximació s'analitzaran dues estacions meteorològiques diferents.

Es fa un estudi del trànsit que hi circula per al tram d'autopista i del vent que hi generen els vehicles per conèixer la magnitud del vent a la qual, afegint-hi el vent natural, ha de ser capaç de funcionar l'aerogenerador. Aquest estudi es duu a terme mitjançant el programa SimScale.

Es fa una anàlisi del consum que requereixen els enllumenats. Dins d'aquesta es creen diferents escenaris sobre les possibilitats d'alimentació dels enllumenats. Donada la instal·lació lumínica actual, es proposa canviar les lluminàries per llums LED amb més eficiència i menor consum energètic que l'actual.

S'analitzen els perfils mitjançant el programa XFLR5 amb la finalitat d'escollir el perfil òptim aplicant les condicions de funcionament a les quals estarà sotmès l'aerogenerador.

Es dissenya el conjunt de l'aerogenerador, tenint en compte aspectes com la normativa per a la instal·lació d'aquesta classe de dispositius i la seva ubicació a la carretera; i una elecció provisional dels elements principals que fan que aquest pugui funcionar correctament, amb l'objectiu de dimensionar-lo adequadament. No es realitza el càlcul estructural de l'aerogenerador. No es farà un estudi del tipus de bateries, material, connexionat de les lluminàries, procés d'instal·lació, escalfament de les peces per l'efecte del sol i de l'ús de la pròpia bateria degut al temps disponible per realitzar el projecte. Degut a que no es pretén instal·lar aquest aerogenerador, no es realitza l'estudi de l'impacte mediambiental, econòmic i social que pot tenir la instal·lació de l'aerogenerador dins del tram de l'autopista B-20 Nord que travessa la ciutat de Badalona.

En conclusió, la intenció de la realització d'aquest projecte no és fabricar-lo ni instal·lar-lo a la realitat, sinó conèixer quin és el procediment a seguir i quins paràmetres s'han de tenir en compte per a poder realitzar el disseny d'una turbina eòlica.

## **1.5. Línies d'investigació i transferència de coneixement**

En aquest projecte es fan servir els coneixements adquirits a les diferents matèries cursades durant tot el grau, amb especial importància les assignatures de màquines i mecanismes, modelització i simulació, gestió de projectes i d'enginyeria de fluids. Aquesta última és la més rellevant, ja que es van estudiar els aspectes clau per al desenvolupament d'aquest projecte, com la interacció entre els sòlids i els fluids, en el cas d'aquest projecte, l'aire, i el mesurament i tipologia del flux.

## **2. Objectius per l'assoliment del projecte**

En aquest apartat es presenten els diferents objectius amb els quals es conclouria el projecte.

### **2.1. Objectius**

L'objectiu principal d'aquest projecte és el de dissenyar un model d'aerogenerador que aprofiti el vent que generen els automòbils a les carreteres d'altres velocitats, com en el cas d'aquest projecte, l'autopista corresponent al tram de la B-20 Nord que hi passa per la ciutat de Badalona. El conjunt d'aquestes turbines eòliques han de ser capaces de generar l'energia necessària per alimentar els enllumenats per il·luminar aquest mateix tram durant les hores nocturnes. Actualment, aquest tram d'autopista no s'il·lumina a la nit i la visibilitat d'aquesta depèn exclusivament de la capacitat lumínica dels fars dels cotxes que hi circulen per aquesta, podent posaren perill als usuaris i usuàries de la via.

En conclusió, l'objectiu principal del projecte és dissenyar un model d'aerogenerador que permeti l'alimentació de forma sostenible de l'enllumenat del tram d'autopista objecte d'estudi per a poder millorar la seguretat del mateix durant les hores nocturnes.

Els objectius del projecte estan dividits en tres blocs, els quals estan definits a continuació.

#### **2.1.1. Objectiu 1 – Estudi de paràmetres per al disseny de la turbina**

Aquest primer objectiu tracta de realitzar l'estudi dels paràmetres més rellevants i a partir dels resultats obtinguts, escollir el tipus de turbina més adequada per a l'aplicació de la solució desitjada. La realització d'aquest objectiu és la base del projecte, ja que els paràmetres són la part més crítica a l'hora del disseny.

Per assolir aquest objectiu, s'han de realitzar els següents punts:

- Estudi dels paràmetres teòrics entorn al projecte. Entre aquests, es troben les lleis físiques que influeixen en el disseny dels aerogeneradors, l'anàlisi dels diferents tipus que hi existeixen, els perfils alars i les variables clau dins del disseny d'aquests perfils.

- Estudi de la zona geològica i la meteorologia al tram d'autopista B-20 que hi circula per la ciutat de Badalona durant aproximadament els últims sis anys. Es farà l'estudi d'entre altres, de la magnitud i direcció dels vents mitjançant dades de fonts oficials com MeteoCat i AEMET, per posteriorment poder escollir de forma adequada el tipus de turbina a utilitzar.
- Estudi del trànsit i les seves característiques més destacades durant aproximadament els últims sis anys per la correcta elecció del tipus de turbina, ja que el vent que generin els automòbils també dependrà de la quantitat que transitin en ambdues direccions.
- Estudi dels elements lumínics ubicats en el tram d'estudi de l'autopista B-20 i estudiar-ne la demanda energètica de cadascun dels elements il·luminatius que requereixen energia elèctrica a la zona, com fanals o focus.
- Estudi dels diferents tipus de turbines, i, a partir dels estudis dels paràmetres realitzats i les característiques de la carretera, escollir la millor opció.
- Estudi de l'espai disponible per a la instal·lació dels elements auxiliars que componen l'aerogenerador. Encara que no es vagin a dissenyar tots els elements que el componen, s'ha de tenir present que aquests hauran de formar part del conjunt, i s'haurà de reflectir l'espai de tots aquells components necessaris per poder generar l'energia, en el cas d'aquest projecte només es consideraran l'alternador i les bateries.

### **2.1.2. Objectiu 2 – Disseny del conjunt de la turbina**

Aquest objectiu tracta de realitzar el disseny de la turbina, la qual inclou el disseny aerodinàmic de les aspes i el disseny del conjunt de la turbina.

Per assolir aquest objectiu s'ha de realitzar els següents punts:

- Realitzar els càlculs de la demanda d'electricitat i la potència que ha de generar per la turbina per poder dimensionar aquesta de forma objectiva. Generar diferents escenaris d'alimentació on s'esculli de forma objectiva quines lluminàries estaran connectades a les bateries i poder ser alimentades de forma sostenible.
- Dissenyar diferents composicions d'aerogeneradors, considerant diferents esquemes i distribucions de bateries d'alimentació per als enllumenats. També s'ha de decidir la ubicació d'instal·lació dels aerogeneradors, en concret, si aquests seran instal·lats als

mateixos fanals de l'autopista o si s'ha d'instal·lar màstils per subjectar aquests aerogeneradors.

- Càlcul dels paràmetres bàsics que determinen característiques tals com l'altura, diàmetre, potència unitària, nombre d'aspes necessàries.

### **2.1.3. Objectiu 3 – Comprovació del disseny mitjançant XFLR5 i QBlade**

Aquest últim bloc d'objectius està relacionat sobretot amb el bloc anterior, en aquest es realitzarà una sèrie de simulacions numèriques per comprovar el correcte funcionament de la turbina, utilitzant els programes XFLR5 i QBlade, en diferents escenaris segons els estudis realitzats durant el primer objectiu.

Per assolir aquest objectiu s'ha de realitzar els següents punts:

- Disseny aerodinàmic dels àleps, escollir el tipus de perfil alar i ajustar la seva forma i mida a la sustentació requerida mitjançant el programa XFLR5.
- Utilitzar el programa QBlade per a la comprovació del correcte funcionament de la turbina en els diferents escenaris plantejats.
- Finalitzar la vista del conjunt mitjançant SolidWorks.
- Realitzar una sèrie de simulacions per visualitzar i comprovar el flux al voltant d'una aspa dissenyada per a aquesta turbina.
- Realitzar una sèrie de simulacions mitjançant el programa QBlade sobre els camps de vent respecte a la turbina.



### 3. Introducció a l'aerodinàmica i l'energia eòlica

En aquest apartat es realitzarà una presentació dels antecedents teòrics que tenen especial rellevància dintre de l'objecte del treball a desenvolupar. En primer lloc, es farà una breu introducció a l'aerodinàmica i de quina és la seva influència en el disseny dels aerogeneradors. A continuació s'explicarà quins són els paràmetres que influeixen principalment en el disseny dels perfils alars i com és la normalització d'aquests perfils. Finalment, s'explicaran que és l'energia eòlica, quina és la seva importància a l'actualitat i els beneficis que aporta per a la sostenibilitat del planeta; què són els aerogeneradors i quins tipus d'aerogeneradors existeixen en l'actualitat.

#### 3.1. Aerodinàmica

L'aerodinàmica es defineix com la branca de la mecànica de fluids que estudia les accions que apareixen sobre els cossos rígids quan existeix un moviment relatiu entre aquests cossos i el fluid en el qual es banya, en aquest cas, l'aire. En el context de l'energia eòlica, l'aerodinàmica és fonamental per al disseny i optimització dels aerogeneradors, ja que les aspes d'aquests estan dissenyades segons uns perfils alars que s'adapten a les condicions de la zona on s'instal·len els aerogeneradors, com l'altitud, la velocitat i la pressió entre altres [8]–[10].

Les lleis i principis que tenen més rellevància a l'aerodinàmica són l'efecte venturi, el principi de Bernoulli i les tres lleis del moviment de Newton.

- L'efecte Venturi és un fenomen físic en el qual, un fluid que es troba en moviment dins d'un conducte tancat o una canonada disminueix la pressió augmentant la velocitat en passar per una secció menor [8], [11].
- El principi de Bernoulli descriu el comportament d'un fluid quan aquest es mou a través d'una línia de corrent. Aquest principi pot derivar-se del principi de conservació de l'energia. Això indica que en un flux constant, la suma de totes les formes d'energia en un fluid en aquesta línia de flux és la mateixa en tots els punts d'aquesta línia [8], [12], [13].
- Les tres lleis del moviment de Newton. La primera llei coneguda com la llei de la inèrcia, estableix que tot cos manté el seu estat actual de repòs a menys que s'apliqui

una força externa sobre ell. La segona, coneguda com la llei fonamental de la dinàmica, afirma que l'acceleració experimentada per un objecte és directament proporcional a la força aplicada sobre el mateix. I la tercera, coneguda com el principi d'acció i reacció, estableix que quan un cos exerceix una força sobre un altre, aquest segon exerceix una força sobre el primer una força igual però en sentit oposat [8], [14].

### 3.2. Perfils alars

Un perfil alar, o perfil aerodinàmic, és una secció transversal d'un cos que en desplaçar-se a través d'un fluid, és capaç de generar una distribució de pressions al seu voltant. La diferència de pressions a les diferents parts del cos es deriva en forces de sustentació i arrossegament. La força de sustentació és perpendicular a la direcció del vent i la força d'arrossegament paral·lela [15]. Els perfils alars tenen un paper clau a l'aerodinàmica dels aerogeneradors, ja que el disseny d'aquest és la que permetrà la interacció, de la forma més optimitzada possible, del vent amb les aspes per obtenir el màxim d'energia elèctrica possible.

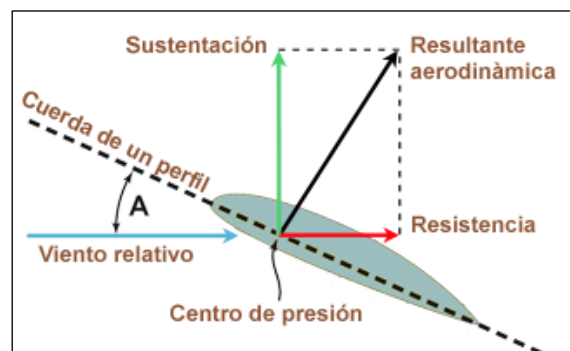


Fig. 3.1. Forces generades al perfil alar [16]

Existeixen diferents maneres de classificar els perfils, entre aquestes, hi ha segons la seva forma, característiques i rang de velocitat. En termes de forma, es poden distingir entre perfils simètrics i asimètrics. En els simètrics, la corda del perfil i la línia de curvatura mitjana coincideixen, fent que siguin més econòmics i fàcils de fabricar. En canvi, els asimètrics es caracteritzen per generar major sustentació que els simètrics, a causa del fet que la forma que té fa que l'aire es mogui més ràpidament. Segons les característiques del perfil, es poden classificar en perfils de flux laminar, dissenyats per maximitzar el percentatge de flux laminar a la capa límit; d'alta sustentació, els quals tenen coeficients de sustentació alts; autoestables, dissenyats per generar un moment angular neutre; supercrítics, optimitzats per reduir l'amplitud de les ondes de xoc generades per l'ala a velocitats transsoniques. Finalment, segons el rang de



velocitats a la qual treballarà el perfil, poden ser subsònics, transsònics i supersònics [15], [17], [18].

Per entendre quin és el funcionament dels perfils alars, a continuació, es descriuen les parts, regions i paràmetres geomètrics que defineixen la forma del perfil alar. Cadascuna d'aquestes parts es troben representades a la Fig. 3.2.[15], [18].

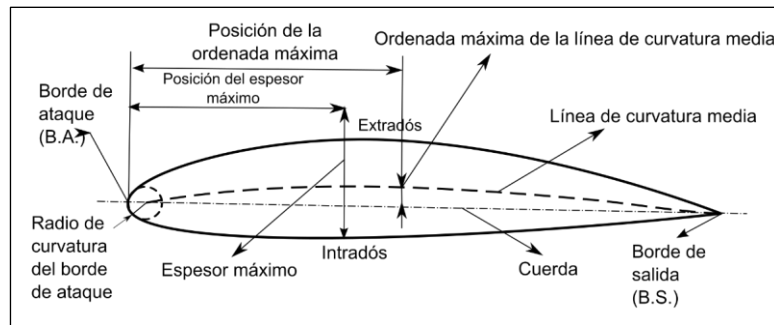


Fig. 3.2. Parts d'un perfil alar [15]

- **Vora d'atac:** Primer punt del perfil que entra en contacte amb l'aire, provocant que aquest corrent d'aire es bifurqui cap a l'intradós i l'extradós.
- **Vora de sortida:** Punt en el qual els corrents provinents de l'intradós i l'extradós conflueixen i abandonen el perfil.
- **Intradós:** Correspon a la part inferior del perfil.
- **Extradós:** Correspon a la part superior del perfil.
- **Corda:** Línia recta que uneix la vora d'atac amb la vora de sortida, és a dir, uneix el primer i últim punt del perfil. Aquesta és una dimensió característica del perfil.
- **Línia de curvatura mitjana:** Línia equidistant entre l'intradós i l'extradós. Aquesta defineix la curvatura del perfil. Si aquesta línia es troba per sobre de la corda, la corba és positiva; si aquesta se situa per sota, és negativa, i si aquesta té un tram a cada posició d'aquestes, es diu que té doble curvatura.
- **Grossària màxima:** Distància màxima entre l'intradós i l'extradós. Aquest s'expressa en el percentatge de la longitud de la corda, aquesta varia del 3%, si és un perfil molt prim, fins al 18% quan són molt gruixuts. El percentatge més comú és el 12%.
- **Posició de l'ordenada màxima:** Distància màxima entre la corda i la línia de curvatura mitjana. Aquesta s'expressa en percentatge de la longitud de la corda.
- **Angle d'atac:** Angle que forma la direcció de la corrent que impacta amb el perfil respecte a la corda. Aquest angle ( $A$ ) s'observa a la Fig. 3.1.

### 3.2.1. Forces aerodinàmiques

Quan l'aire entra en contacte amb el perfil alar, es generen forces i moments en diverses direccions envers aquest cos. L'efecte que tenen la suma d'aquestes forces és un procés complex, en canvi, a l'hora de l'estudi del disseny d'un objecte, només dues forces resultants tenen especial rellevància: les forces de sustentació i arrossegament.

La força de sustentació és una força perpendicular a la direcció del corrent del vent que incideix a l'objecte. Aquesta es produeix perquè l'extensió de l'extradós és superior a la de l'intradós, fent que el fluid que hi passa per la cara superior del perfil hagi de recórrer una distància superior a la que flueix per sota. El resultat d'això, és una disminució de la pressió a la superfície superior de l'ala, fent que es generi una força en sentit ascendent. Aquesta força permet mantenir els àleps de l'aerogenerador en moviment [19], [20].

La força d'arrossegament, es contraria al sentit del moviment de l'objecte a través de l'aire. Aquesta es produeix a causa de la resistència de l'aire quan els àleps giren. La magnitud d'aquesta força depèn de paràmetres com la velocitat del vent, la forma del perfil alar i el seu angle d'atac, entre altres. Aquesta força afecta directament a l'eficiència de l'aerogenerador, com major sigui aquesta, pitjor rendiment tindrà l'aerogenerador [21].

A continuació, es poden observar les fórmules que descriuen la força de sustentació (3.1) [22] i la força d'arrossegament (3.2) [23].

$$L = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * A * C_l \quad (3.1)$$

$$D = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * A * C_d \quad (3.2)$$

On:

L: Força de sustentació [N]

A: Àrea de superfície de l'objecte [m<sup>2</sup>]

D: Força d'arrossegament [N]

C<sub>l</sub>: Coeficient de sustentació [sense unitats]

$\rho$ : Densitat de l'aire [kg/m<sup>3</sup>]

C<sub>d</sub>: Coeficient d'arrossegament [sense unitats]

V: Velocitat de l'aire [m/s]

### 3.3. Perfils NACA

NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*) va ser l'agència federal dels Estats Units, fundada l'any 1915, que s'encarregava del desenvolupament dels perfils alars. La mateixa organització es va dissoldre l'any 1958, on va passar a formar part de la NASA [24].

NACA va aconseguir facilitar als enginyers aeronàutics una selecció de perfils en funció de l'ús al qual es destinaria cada perfil, ja que va ser capaç d'analitzar i estudiar les característiques aerodinàmiques de cada perfil amb l'objectiu de classificar-los en grups i definint la seva geometria. Aquest avenç es va aconseguir gràcies a les proves realitzades a diferents tipus de túnels de vent [25].



Fig. 3.3. Logotip NACA [24]

#### 3.3.1. Nomenclatura dels perfils NACA

Per poder facilitar l'ús dels perfils aerodinàmics estudiats per l'organització NACA, aquests han sigut classificats i tabulats. Aquests perfils aerodinàmics s'identifiquen amb les sigles NACA davant d'un conjunt de xifres que determinen la geometria del perfil [24].

Els perfils NACA, doncs, es classifiquen segons les seves característiques geomètriques a través de la seva nomenclatura,

- Sèrie de 4 dígit
- Sèrie de 5 dígit
- Sèrie 1
- Sèrie 6
- Sèrie 7
- Sèrie 8
- Modificacions

### 3.3.1.1. Perfils NACA sèrie de 4 dígit

En aquest subapartat s'expliquen els tipus de perfils NACA sèrie de 4 dígit degut a que serà l'utilitzat per a desenvolupar el present projecte. L'ordre dels 4 dígit que defineixen aquests perfils, estan reglats segons la normativa NACA. Aquesta estableix que la nomenclatura sempre ha de ser NACA xyzp, sent aquests valors x, y, z i p els que defineixen la forma del perfil. A continuació s'explica quin paràmetre correspon a cada lletra [25].

- La xifra que correspon a la posició "x", descriu la curvatura màxima de la corda en forma de percentatge.
- La xifra que correspon a la posició "y", descriu la distància de màxima curvatura des de la vora d'atac respecte de la corda.
- Les xifres que correspon a les posicions "z" i "p", indiquen l'espessor màxim de la corda en percentatge.

A la Fig. 3.4. es poden observar alguns exemples dels perfils i la seva nomenclatura. Aquesta nomenclatura NACA també permet classificar els perfils aerodinàmics en simètrics o asimètrics [25].

Les sèries de 4 dígit també es poden modificar afegint un codi de dos dígit precedits per un guió. El primer dígit descriu la rodonesa de la vora d'atac, sent el 0 una vora puntiaguda, un 6 vol dir que té la mateixa vora d'atac que el perfil original i qualsevol nombre superior vol dir que té més rodonesa que el perfil original. El segon dígit indica defineix la distància màxima de l'espessor des de la vora d'atac en percentatge respecte de la corda.

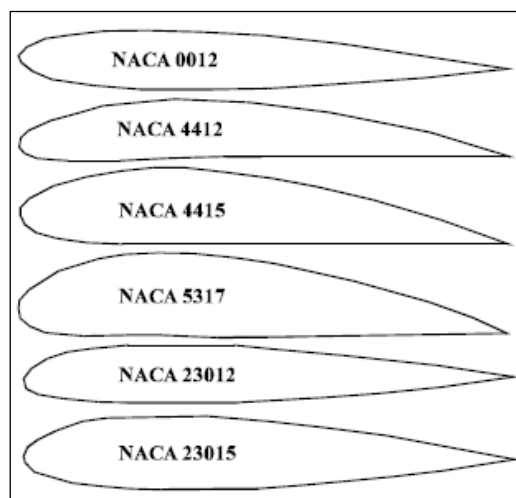


Fig. 3.4. Nomenclatura i forma dels perfils NACA [26]

## 3.4. Energia eòlica

L'energia eòlica és una forma d'energia renovable que s'obté a partir de l'aprofitament de l'energia cinètica dels corrents d'aire. Actualment, aquesta energia s'utilitza per a la producció d'electricitat mitjançant l'ús de turbines eòliques, també anomenats aerogeneradors, connectades a les xarxes de distribució elèctrica, llars o empreses depenent del tipus i mida del mateix aerogenerador [27].

### 3.4.1. Passat, present i futur de l'energia eòlica

Durant milers d'anys s'ha aprofitat l'energia eòlica per moldre grans i bombejar aigua a les poblacions properes. En el segle XIX, amb l'arribada de la Revolució Industrial, James Blyth, va crear la primera turbina eòlica generadora d'electricitat, per il·luminar una llar. Aquesta turbina tenia un disseny semblant al que coneixem avui com un aerogenerador de tipus Savonius, aquest era capaç de generar la potència necessària per il·luminar deu bombetes de 25 volts. No va ser fins a la dècada de 1970, gràcies a unes revoltes antinuclears iniciades a Dinamarca, que l'energia eòlica es va començar a utilitzar en projectes a gran escala per a la producció d'electricitat a països com Dinamarca, Alemanya i els Estats Units. A Espanya es va instal·lar la primera turbina eòlica a la província de Còrdova l'any 1983, amb una capacitat de generació de 100 kW. Aquesta primera instal·lació tenia l'objectiu principal d'investigar i desenvolupar la tecnologia eòlica a Espanya [27], [28].

En l'actualitat, Espanya és el cinquè país del món amb més potència eòlica instal·lada, després de la Xina, Estats Units, Alemanya i Índia. La potència acumulada mitjançant energia eòlica va ser de 28.139 MW, sent la primera font de generació elèctrica a Espanya durant el 2021, amb una cobertura del 23,3% de la demanda energètica consumida, en segon lloc, es troba l'energia nuclear amb el 21% de la demanda. Aquestes dades han sigut proporcionades per *Asociación Empresarial Eólica* (AEE) [29], [30].

Catalunya, durant el 2021, va generar una potència acumulada de 1.271,2 MW, sent la setena comunitat autònoma amb més potència acumulada a Espanya. La comunitat autònoma amb la potència acumulada major durant el 2021 va ser Castella i Lleó, amb 6.404,43 MW [29].

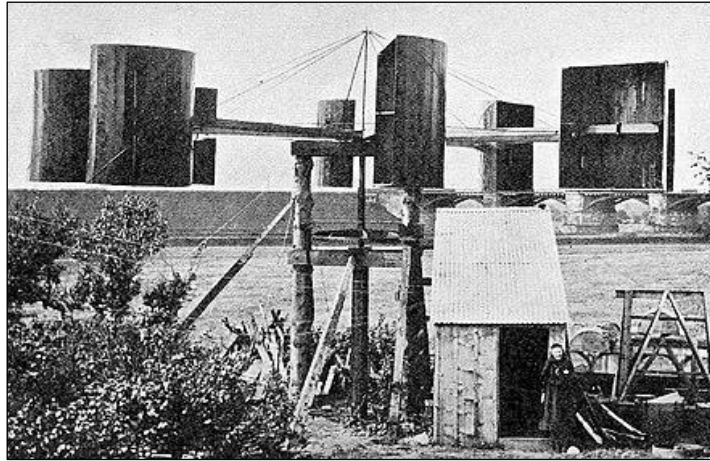


Fig. 3.5. Fotografia primera turbina eòlica generadora d'electricitat [28]

### **3.4.2. La sostenibilitat de l'energia eòlica**

Durant el 2021, s'han instal·lat 842,61 MW eòlics, una xifra rellevant i que alhora, es troba molt per sota dels 2,2 GW anuals que és necessari instal·lar d'aquí fins a l'any 2030 per a poder assolir els objectius marcats en el Pla Nacional Integrat d'Energia i Clima (PNIEC), el qual vol aconseguir una reducció d'un 23% d'emissions d'efecte hivernacle respecte al 1990, actualment l'eòlica evita l'emissió de 29 milions de tones de CO<sub>2</sub> [29], [31].

Aquesta producció d'energia sostenible també forma part de 2 dels objectius dels 17 plantejats per les Nacions Unides. En primer lloc, es troba l'objectiu número 7 per una producció d'energia no contaminant i assequible amb la finalitat d'aconseguir un futur sostenible. Algunes de les metes més destacades d'aquest objectiu número 7 per l'any 2030, són garantir l'accés universal a serveis energètics assequibles, moderns i fiables; augmentar la proporció d'energia renovable en el conjunt de fonts energètiques i duplicar la taxa mundial de la millora de l'eficiència energètica, entre altres [32]. En segon lloc, es troba l'objectiu número 12, el qual vol assolir que es faci una producció i consum responsable, actualment no tota l'energia eòlica que es genera s'emmagatzema, fent que durant algunes de les hores on hi ha molt vent i, per tant, es genera molta electricitat no s'emmagatzema tota, i durant les hores on el vent és escàs s'ha de recórrer a l'energia nuclear o a l'energia obtinguda a partir de la crema de combustibles fòssils [33]. L'assoliment d'aquests objectius són una tasca important per poder millorar la qualitat de vida tant del planeta com de les persones.

### 3.5. Aerogeneradors

Una turbina eòlica, o aerogenerador, és un dispositiu, que a través de les seves pales, converteix l'energia cinètica del vent en energia mecànica. Les pales, o àleps de l'aerogenerador, estan connectades a un eix, el qual permet una rotació. Posteriorment, aquesta energia mecànica es transforma en energia elèctrica mitjançant un alternador. En conclusió, és un dispositiu que transforma l'energia eòlica del vent en energia elèctrica.

Els aerogeneradors són una forma d'energia renovable que no emet gasos d'efecte hivernacle ni altres contaminants. El seu ús ajuda a reduir la dependència dels combustibles fòssils i a mitigar els efectes del canvi climàtic. Aquests s'utilitzen a gran part del món per generar electricitat de forma sostenible i neta.

Alguns dels inconvenients més destacats d'aquesta tecnologia són la generació de soroll a poblacions properes i la seva interacció amb la fauna de la zona on s'instal·li, ja que per exemple, molts ocells impacten contra les pales o bé perden l'estabilitat durant el vol quan passen a prop d'aquests dispositius i acaben impactant contra el terra. Aquest inconvenient es veu reduït un 70% quan les pales dels aerogeneradors són pintades de negres, segons un estudi de l'Institut Noruec d'Investigació de la Naturalesa i de l'Observatori d'aus del Llac Ånnsjön [34]. La magnitud d'aquests inconvenients depèn principalment de la classe d'aerogenerador, mida i potència que tingui.



Fig. 3.6. Fotografia d'aerogeneradors tripala amb les pales pintades de negre [35]

## 3.6. Tipus d'aerogeneradors

Hi ha diferents formes de classificar els diferents aerogeneradors que existeixen, poden ser segons la seva generació de potència, ubicació, l'orientació del vent, forma de connexió, etc. En aquest treball es tracta la classificació dels aerogeneradors segons l'orientació del seu eix de rotació. Aquests es diferencien en tres grans grups; els aerogeneradors d'eix horitzontal, els d'eix vertical i els aerogeneradors sense aspes o *bladeless*. A continuació, s'exposaran les característiques més rellevants de cada classe d'aerogenerador i quins són els aerogeneradors més utilitzats de cadascuna.

### 3.6.1. Aerogeneradors HAWT

Els aerogeneradors d'eix horitzontal, també anomenats de tipus HAWT (*Horizontal Axis Wind Turbine*), aquests tenen l'eix de rotació de les pales en paral·lel respecte a terra.

Els aerogeneradors HAWT són els més utilitzats per la seva gran eficiència energètica, ja que aquestes turbines eòliques s'instal·len a torres amb grans altures per aprofitar millor les velocitats del vent. Els vents a grans altures són molt majors i més constants que a altures més properes a la superfície. Els principals desavantatges d'aquest tipus d'aerogeneradors són; l'alt cost inicial de la instal·lació i la impossibilitat d'ubicar-los a qualsevol lloc, puix perquè sigui rendible el vent de la zona ha de ser constant. També generen molt soroll per als habitants de poblacions properes i solen tenir una capacitat de funcionament del 30%.

Els aerogeneradors HAWT més utilitzats són els models tripala i els bipala. Els tripala és el model d'aerogenerador més eficient de tots, aquests s'instal·len a la majoria de parcs eòlics, tant parcs instal·lats a terra com al mar. Els bipala, tenen l'avantatge que estalvien costos i pes, també són més segures d'instal·lar. Però el gran inconvenient d'aquestes és que han de tenir una velocitat de rotació més gran respecte a les tripala per aconseguir la mateixa potència [36]. A la Fig. 3.7. es mostra un aerogenerador HAWT tripala i a la Fig. 3.8. un aerogenerador HAWT bipala.





Fig. 3.7. HAWT tripala [37]



Fig. 3.8. HAWT bipala [38]

### 3.6.2. Aerogeneradors VAWT

Els aerogeneradors d'eix vertical, també anomenats de tipus VAWT (*Vertical Axis Wind Turbine*), els quals tenen el seu eix de rotació perpendicular al terra, són capaços de generar energia a partir del vent provinent de qualsevol direcció, degut a que les seves pales són omnidireccionals, per tant, no requereixen d'un sistema de direccionament. Aquests es poden ubicar a menor distància entre ells que els anteriors, ja que no frenen tant volum d'aire a causa de la seva forma i mida; també es poden ubicar a una altura menor, ja que aquests poden treballar a velocitats molt baixes. Els principals desavantatges d'aquest tipus d'aerogeneradors respecte als HAWT quan són instal·lats de forma individual, per exemple a una urbanització, es que menys estables, fiables i eficients. Els inconvenients més importants a destacar són que aquesta classe d'aerogeneradors no s'ha desenvolupat i investigat igual que els aerogeneradors HAWT a causa que la indústria energètica ha apostat per als HAWT per garantir els seus beneficis econòmics, l'altre és que, aquests, necessiten d'un sistema exterior per iniciar el moviment del rotor [39]–[41].

En canvi, quan aquests són instal·lats en parcs eòlics, és a dir, en un gran conjunt de turbines eòliques, aquests tenen una major eficiència, major producció elèctrica, i un cost de instal·lació i manteniment molt menor que els aerogeneradors HAWT, segons un estudi d'un equip de recerca de la *School of Engineering, Computing and Mathematics* (ECM) de Oxford Brookes liderat per Professor Iakovos Tzanakis [42].

Dintre dels aerogeneradors VAWT es poden distingir diferents models, encara que principalment n'hi ha quatre:

- Savonius: Inventat l'any 1922, són els dispositius més simples i econòmics i es caracteritzen per tenir un disseny de doble curvatura similar a la lletra "S", tal com s'observa a la Fig. 3.9. Des del punt de vista aerodinàmic, és un dispositiu d'arrossegament que consta de dues o tres pales, majoritàriament dues. Degut a que aquesta és d'arrossegament, la turbina extreu molta menys força del vent que les turbines per sustentació amb la mateixa mida, aquest és doncs el seu principal inconvenient. La velocitat de funcionament d'aquests aerogeneradors és a partir d'entre 1 i 3 m/s, sent la turbina que menys velocitat d'aire necessita per iniciar el moviment. Aquest model d'aerogenerador també pot tenir la curvatura de forma helicoidal (Fig. 3.10) [40], [43].
- Darrieus: Inventat l'any 1926, és una turbina que consta d'una sèrie de pales de perfil aerodinàmic corbades muntades a un eix vertical que es recolza sobre una estructura fixa, com es mostra a la Fig. 3.11. La velocitat de funcionament d'aquestes és a partir d'entre 4 i 12 m/s, depenent de la mida i disseny dels àleps aerodinàmics. Aquesta turbina té una alta eficiència en vents baixos. Els principals inconvenients d'aquest tipus de turbina són que no permeten l'autoarrencada, i generen moltes vibracions i sorolls significatius. D'aquesta turbina han sorgit diverses versions, sent una de les més conegudes l'aerogenerador Darrieus amb àleps helicoidals (Fig. 3.12). [40], [44], [45].
- Turbina Mixta: Aquesta és una combinació dels aerogeneradors Savonius i Darrieus. La turbina Savonius, ja que té un disseny més petit i proper a l'eix de rotació, s'ubica a l'interior de l'estructura, i les pales de la turbina Darrieus a l'exterior, tal com es pot observar a la Fig. 3.13. Aquesta turbina és una de les opcions híbrides més utilitzades.
- Giromill: Aquest disseny es considera una versió de la turbina Darrieus, ja que la patent que va presentar Darrieus l'any 1927, incloïa pràcticament qualsevol classe de disseny nou. La turbina consisteix en un mecanisme amb nombroses pales unides a l'eix vertical mitjançant braços horitzontals, les pales tenen un perfil aerodinàmic. Aquesta turbina es troba representada a la Fig. 3.14. El gran avantatge d'aquesta és que pot treballar dins

d'un rang de velocitats molt extens, des de 2 m/s fins a 25 m/s depenent del disseny del seu perfil aerodinàmic i nombre de pales. L'inconvenient d'aquest tipus de turbina són el soroll i les vibracions que es generen, encara que aquests són molt menors que el seu predecessor, la turbina Darrieus.



Fig. 3.9. Savonius [46]



Fig. 3.11. Darrieus [48]



Fig. 3.13. Turbina mixta [50]



Fig. 3.10. Savonius helicoidal [47]



Fig. 3.12. Darrieus helicoidal [49]



Fig. 3.14. Giromill [50]

### 3.6.3. Aerogeneradors Bladeless

Aquest últim grup d'aerogeneradors, no requereixen d'un sistema rotor amb àleps per a la generació d'energia, per aquest motiu s'anomenen aerogeneradors sense àleps o *bladeless*. Aquesta classe d'aerogeneradors són una tecnologia emergent, la qual es va començar a desenvolupar l'any 2013, per l'enginyer espanyol David Yáñez, el qual posseeix la patent del disseny de la turbina amb número ES2374233B1 [6], [7].

El funcionament d'aquesta classe d'aerogeneradors es basa en el fenomen de ressonància aeroelàstica. Quan el vent impacta contra el màstil, fa que aquest oscil·li i ressoni a la seva freqüència natural, i aquesta vibració es converteix en energia elèctrica mitjançant un aerogenerador situat a la base del màstil.

Els avantatges principals d'aquesta tecnologia és que són més silenciosos, fàcils de mantenir, i econòmics que els aerogeneradors convencionals, però com a principal inconvenient és que per generar la mateixa quantitat d'energia elèctrica necessiten molt més espai que els aerogeneradors convencionals. A causa d'aquestes característiques, el seu ús es centra principalment en aplicacions urbanes, per la seva gran integració als edificis [51].



Fig. 3.15. Fotografia Vortex Bladeless [52]

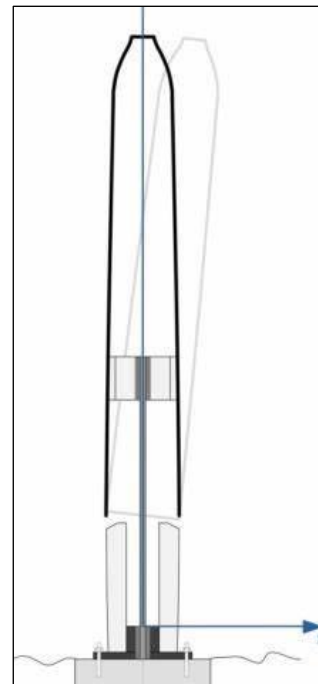


Fig. 3.16. Disseny Vortex Bladeless [51]

### 3.6.4. Elecció del tipus d'aerogenerador

Amb la finalitat de resumir i concloure aquest apartat sobre els diferents tipus d'aerogeneradors existents, es presenta una taula amb les característiques més destacades de cada model a l'annex. La finalitat d'aquesta taula és poder fer la millor elecció possible davant dels paràmetres que s'hagin de complir més endavant.

Finalment, una vegada conegudes les característiques principals de cada tipus d'aerogenerador, s'ha decidit que per a poder dissenyar la solució desitjada, s'utilitzaran els aerogeneradors d'eix vertical, a causa de les següents raons, sent les dos primeres les que han tingut més pes a la decisió:

- La direcció del vent: Com que els aerogeneradors seran instal·lats a la mitjana de l'autopista, aquests han de ser capaços d'aprofitar el vent en dos sentits oposats, fent de les pales dels aerogeneradors VAWT la gran resposta per aquesta solució.
- La velocitat del vent: La velocitat necessària per a poder generar energia pot ser molt variable, ja que molta de la intensitat del vent que ha d'aprofitar l'aerogenerador sigui el generat pels vehicles quan hi circulen a prop d'aquest dispositius, i com el pas d'aquests no es constant, s'ha de tenir en compte que pot treballar a moltes diferents velocitats.
- L'altura a la que han de ser instal·lats aquests no poden ser elevades, ja que per poder aprofitar el vent que generen els cotxes quan hi passen a altes velocitats és necessari ubicar-los pràcticament al costat d'aquests.
- Espai: Donat que l'espai on s'ubicaran els aerogeneradors és la mitjana de l'autopista, serà necessari que els àleps no superin els marges de seguretat de la mateixa mitjana i no es posi en risc cap usuari que hi circuli per la via.

Per poder escollir quin tipus de model d'aerogenerador vertical es farà servir per realitzar el disseny, s'ha de fer l'estudi del vent al qual haurà de treballar l'aerogenerador i de l'espai disponible que hi tindrà aquest per a una possible instal·lació futura.



## **4. Estudi i càlcul dels paràmetres necessaris per al disseny de la turbina**

En aquest capítol es realitzarà l'estudi i càlcul dels paràmetres necessaris per al disseny de la turbina. Es començarà per l'estudi de l'emplaçament dels aerogeneradors, on es determinarà quina és la meteorologia que hi predomina a la zona a partir de dades d'estacions meteorològiques properes. Seguidament, es realitza un estudi del trànsit que hi circula en el tram de la B-20 que travessa la ciutat de Badalona i quina és la velocitat que generen aquests vehicles a altes velocitats per conèixer la possibilitat d'alimentar els aerogeneradors ubicant-los a la mitjana de la carretera per aprofitar aquesta energia. A continuació, es fa un estudi dels elements que es desitgen il·luminar, quina és la quantitat d'aquests i el consum de cadascun. Finalment es fa un estudi de l'espai disponible per dimensionar la turbina i el càlcul del nombre de Reynolds per l'elecció del millor perfil alar per a l'aerogenerador.

### **4.1. Estudi de la zona geogràfica i meteorològica**

En aquest apartat es realitza l'estudi geogràfic i meteorològic de la zona on es realitzaria la instal·lació amb la finalitat d'obtenir la magnitud del vent que hi predomina en aquesta, la qual serà la velocitat mínima a la qual haurà de ser capaç de generar energia l'aerogenerador.

#### **4.1.1. Estudi de la zona geogràfica**

L'aerogenerador que es dissenya en aquest projecte s'ubicarà en el tram de la carretera B-20 nord que hi passa per la ciutat de Badalona. La ciutat de Badalona, la qual pertany a l'Àrea Metropolitana de Barcelona (AMB), està situada a la costa del Mediterrani, pel que es caracteritza per tenir un clima mediterrani amb temperatures suaus durant l'hivern i caloroses a l'estiu. El tram que s'estudiarà per a ubicar els aerogeneradors, es troba delimitat per dos túnels, un a cada extrem del tram, aquests són el Túnel de la Pallaresa, el qual connecta amb la ciutat de Santa Coloma de Gramenet amb direcció a Barcelona i s'ubica al Km-19 de la mateixa carretera; i el Túnel de Tiana, el qual connecta amb les primeres ciutats de la comarca del Maresme, com Alella o Montgat, aquest últim s'ubica al Km-24. En conclusió, el tram d'objecte d'estudi és el comprès entre els Km-19 i Km-24 de l'autopista B-20.

Aquest tram de carretera s'ubica entre la Serralada Litoral catalana i el mar Mediterrani, en concret es troba a escassos 100 metres de la Serralada de Marina i a 3,4 km del mar, a una altura d'entre 52 m i 80 m sobre el nivell del mar. Aquesta zona, doncs, hi predomina principalment espècies típiques de vegetació mediterrània, com pins i alzines [53].

S'ha escollit aquest tram, ja que és un dels trams que, avui dia, no s'il·luminen quan es fa fosc i això augmenta el risc de tenir accidents a causa de la poca visibilitat a la carretera. A més, com es tracta d'una zona propera a la muntanya, hi ha molts animals, com per exemple conills, que intenten travessar la carretera, i de nit, com la visibilitat d'aquests és escassa pot fer que puguin acabar sent atropellats.

La falta d'il·luminació és un dels perills més importants envers l'usuari i és el causant d'un 10% dels accidents a les carreteres, i a més a més, segons una enquesta realitzada per FESVIAL (*Fundación Española para la Seguridad Vial*) i Lumileds, el 82% dels conductors enquestats ha reconegut haver tingut situacions de risc a causa de la falta d'il·luminació [54], ja sigui a causa de que les carreteres no estaven il·luminades, o en el cas que ho estiguessin, no fos una il·luminació adequada per a la circulació. Per posar-hi solució a aquest perill, Espanya, a través dels fons del pla NextGenerationEU, destinarà 510 milions d'euros per augmentar la il·luminació a les carreteres i la seva eficiència energètica [55].

Durant l'últim any s'han aprovat alguns projectes i iniciat diverses obres per a millorar l'enllumenat de les carreteres que es tracten en aquest projecte, ja sigui augmentant el nombre de punts de llum, substituint làmpades antigues per noves amb una major eficiència energètica, o bé, fer estudis sobre la possibilitat d'implementació de noves tecnologies per enllumenar les carreteres exclusivament quan hi circulen automòbils, mitjançant detectors de pas als mateixos fanals. Pel que fa a la zona de la B-20 Nord, que és el tram de la B-20 a la que es troba el tram d'objecte d'estudi, s'han iniciat diverses obres gràcies a aquesta inversió: La primera que es va posar en marxa va ser la nova il·luminació dels exteriors del túnel de la Pallaresa, el qual com s'ha comentat anteriorment, pertanyen a l'abast d'aquest projecte. L'obra consisteix a reemplaçar les làmpades existents per làmpades LED amb un consum menor i major eficiència [56], [57]. En els últims mesos també s'ha iniciat el canvi d'enllumenat del començament del tram de la carretera C-32, a Tiana, la qual és la continuació del tram de la B-20. També s'ha iniciat l'estudi per la substitució de l'enllumenat del Túnel de Tiana.



A la Fig. 4.1. es mostra el mapa de carreteres de la ciutat, on s'observa el tram estudiat, i a la Fig. 4.2. s'observa la visibilitat que té el conductor en aquest tram de carretera durant les hores nocturnes.



Fig. 4.1. Mapa amb el tram de la carretera B-20 estudiat



Fig. 4.2. Fotografia on es veu la poca visibilitat de la carretera per la nit

### **4.1.2. Estudi meteorològic**

Per a realitzar l'estudi meteorològic de la zona, s'han analitzat les dades del vent de dues zones i fonts diferents. El primer conjunt de dades analitzat correspon a una estació meteorològica ubicada al museu de Badalona. Aquesta estació es troba envoltada d'edificis de la mateixa altura a la qual està situada, sent aquesta una altura de 42 metres. Aquestes dades han sigut facilitades pel Servei Meteorològic de Catalunya (MeteoCat) [58]. El segon conjunt es troba a una distància de 10 km del tram d'autopista de la B-20 que hi passa per la ciutat de Badalona, a Vilassar de Dalt. Aquesta estació es troba a la mateixa altura mínima que el tram de carretera de l'estudi, a 52 metres d'altura, i s'ubica justament a la sortida de l'autopista C-32, la qual connecta directament amb el tram de la B-20 objecte de l'estudi. Tot i que la distància entre les dues estacions és considerable, des del punt de vista d'ubicació es considera que ambdues es troben dins de la mateixa zona meteorològica. Aquestes darreres dades han sigut facilitades per l'Agència Estatal de Meteorologia (AEMET) [59]. Aquestes dues ubicacions es caracteritzen per tenir un clima mediterrani.

Per poder realitzar aquest estudi de la forma més completa i detallada possible, s'han utilitzat les dades corresponents als últims sis anys naturals finalitzats, és a dir, des del 2017 fins al 2022. D'aquesta forma es pot obtenir una visió general i completa de les condicions meteorològiques que hi predominen a la zona. Les dades aconseguides dels centres de dades eren diàries, i per poder visualitzar-les i analitzar-les millor, s'han agrupat per mesos i posteriorment per anys per fer una anàlisi complet. Totes aquestes dades es troben recollides a l'annex corresponent.

Un aspecte interessant a destacar és que el canvi de les velocitats mitjanes del vent durant els diferents mesos són bastants semblants independentment de l'estació i de l'any. És a dir, les velocitats mitjanes durant l'hivern són molt semblants a les de l'estiu. Per a poder mostrar aquesta semblança de les dades, es mostra l'anàlisi de les dades de l'estació meteorològica de Badalona de l'any 2020 (Fig. 4.3.). En el gràfic es mostren totes les velocitats mitjanes diàries del vent durant els 365 dies de l'any 2020, on la velocitat mitjana màxima va ser de 10,8 m/s i la velocitat mitjana mínima va ser de 1,3 m/s. L'aspecte més important d'aquest gràfic, és que es pot observar que aproximadament el 85% de les dades es troben entre 3,6 i 2,2 m/s. En conclusió, l'estació de l'any no afecta la magnitud de la velocitat del vent, ja que el clima mediterrani fa que aquesta sigui sempre bastant constant.

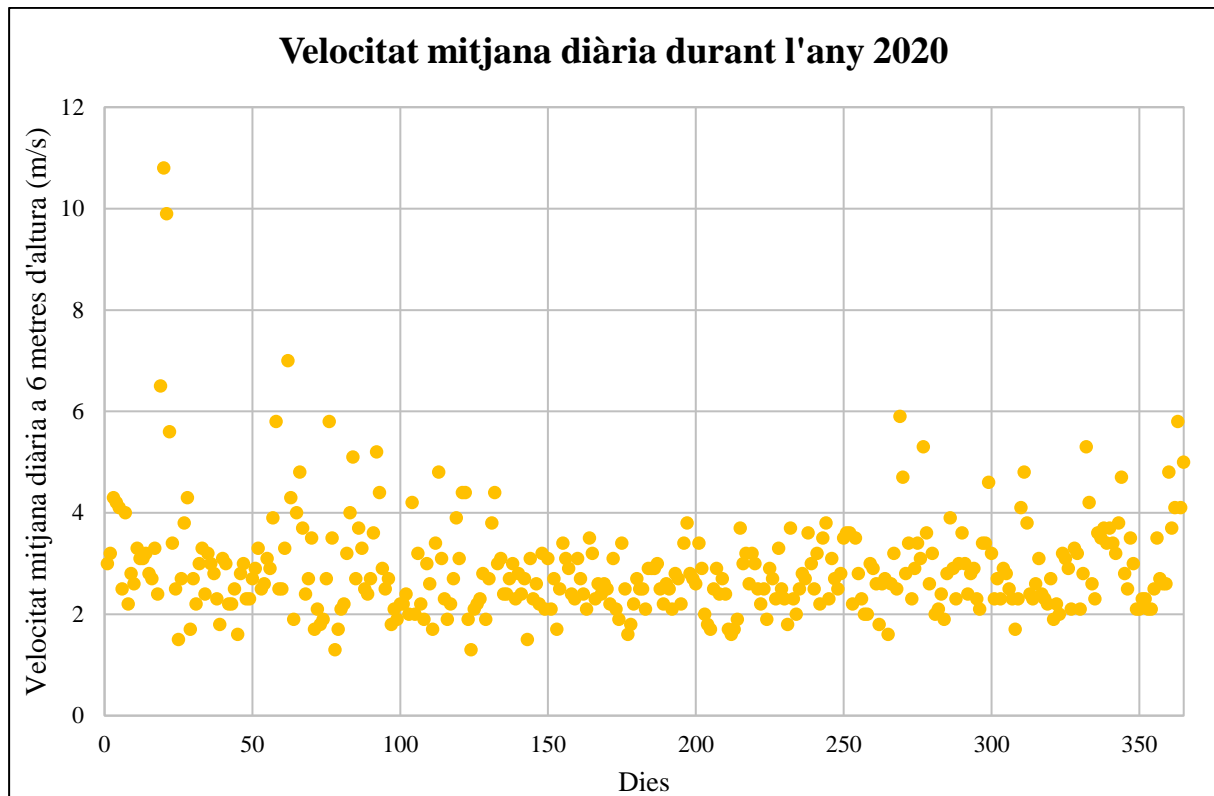


Fig. 4.3. Gràfic de les velocitats mitjanes durant l'any 2020 a l'estació de Badalona

A les Taules 4.1. i 4.2., es presenten les dades que s'han obtingut de l'anàlisi anual de cadascuna de les estacions. La Taula 4.1. correspon a les dades finals de l'anàlisi de l'estació ubicada al Museu de Badalona i la Taula 4.2. correspon a les dades finals de l'anàlisi de l'estació de Vilassar de Dalt.

ANY	Velocitat mitjana anual a 6 metres d'altura (m/s)	Ratxa màxima mitjana anual (m/s)
<b>2017</b>	2,7	7,6
<b>2018</b>	2,7	8,8
<b>2019</b>	2,7	10
<b>2020</b>	2,7	8
<b>2021</b>	2,8	8,7
<b>2022</b>	2,6	9,5
<b>TOTAL</b>	2,7	8,8

Taula 4.1. Dades mitjanes anuals de l'estació del Museu de Badalona

<b>ANY</b>	<b>Velocitat mitjana anual a 6 metres d'altura (m/s)</b>	<b>Ratxa màxima mitjana anual (m/s)</b>
<b>2017</b>	3,93	6,68
<b>2018</b>	3,85	7,46
<b>2019</b>	4,10	7,30
<b>2020</b>	3,78	7,22
<b>2021</b>	4,53	7,95
<b>2022</b>	4,21	7,67
<b>TOTAL</b>	4,07	7,38

Taula 4.2. Dades mitjanes anuals de l'estació de Vilassar de Dalt

A continuació es fa una breu anàlisi dels resultats obtinguts mostrats a les taules, encara que com es pot observar a totes dues taules, no hi ha canvis significatius a les velocitats mitjanes del vent, fent que la velocitat mitjana anual sigui molt semblant cada any. Això permetrà que l'aerogenerador pugui treballar la gran majoria del temps dins d'un rang de velocitats molt específic.

A la Taula 4.1. es mostren les dades mitjanes anuals de l'estació del museu de Badalona [58]. Les dades més rellevants d'aquesta són la velocitat mitjana anual (m/s) i la ratxa màxima anual (m/s), aquestes com es pot observar són de 2,7 m/s i 8,8 m/s relativament.

A la Taula 4.2. s'observen els valors obtinguts a partir de les dades analitzades de l'estació meteorològica de Vilassar de Dalt [59]. Aquestes ens proporcionen la velocitat mitjana anual (m/s) i la ratxa màxima mitjana anual (m/s), aquestes són 4,07 m/s i 7,38 m/s relativament. S'observa un increment de la velocitat mitjana anual de 1,37 m/s respecte a les dades obtingudes de l'estació del museu de Badalona. Encara que la velocitat de la ratxa màxima mitjana és menor, s'ha considerat que aquesta diferència és normal perquè l'altura dels edificis que envolten el museu de Badalona són superiors respecte als edificis que envolten l'estació meteorològica de Vilassar de Dalt, ja que aquesta segona es troba fora del centre de la ciutat.

Així doncs, tenint en compte les dades analitzades de les estacions meteorològiques de Badalona i Vilassar de Dalt, es conclou que la velocitat base que hi predomina al tram estudiat i que s'utilitzarà per a dissenyar l'aerogenerador serà de 4,0 m/s. S'ha escollit aquesta velocitat a causa de les característiques de la zona d'estudi, on l'altura del tram és de fins a 30 metres

major que les estacions meteorològiques analitzades, es troba molt més descobert i no tan envoltat d'edificis o altres elements al seu voltant. Cal destacar que aquesta velocitat s'hauria d'estudiar directament des del mateix punt en el qual es du a terme l'estudi, però en aquest projecte no es disposen de recursos suficients per precisar més el resultat.

## **4.2. Estudi del trànsit i del vent que generen els vehicles**

En aquest apartat es farà un estudi del trànsit que hi circula per la zona, on es determinarà quin és el volum diari de vehicles i quin és el vent total que generen aquests vehicles i en quina magnitud afecta aquest al vent natural de la zona per al disseny de l'aerogenerador.

### **4.2.1. Estudi del trànsit**

El tram de carretera objecte d'estudi, pertany a la Ronda de Dalt o B-20, específicament al tram d'autopista B-20 Nord. La Ronda de Dalt és una autopista urbana que recorre la part alta de l'àrea metropolitana de Barcelona, aquesta permet l'enllaç de la ciutat de Barcelona amb l'aeroport i altres ciutats properes, com la ciutat de Badalona en aquest cas. El tram de la B-20 Nord s'enllaça directament a la carretera C-32, la qual passa per les ciutats properes a la costa del Maresme, com per exemple, Vilassar de Mar o Mataró.

La velocitat a la qual es pot circular per aquest tram està determinat per un sistema de velocitat variable. Un tram de velocitat variable és una zona de l'autopista en la qual la velocitat màxima permesa varia temporalment en funció del trànsit, la seguretat viària, les condicions meteorològiques i la contaminació. Aquesta velocitat s'indica als usuaris de la via mitjançant senyals de trànsit electrònics. La velocitat màxima d'aquesta via normalment està regulada a 100 km/h, però la velocitat màxima a la qual es pot circular per aquesta, depèn de la situació del trànsit, per evitar el col·lapse de l'AMB i reduir la contaminació generada.

Per aquesta autopista hi circulen aproximadament 63.686 vehicles cada dia, de les quals es considera que com a mínim, el 75% han passat per tram que va des de Montgat fins al nus de la Trinitat, és a dir, un total de 47.765 vehicles aproximadament. Aquestes dades i percentatges

s'han obtingut de l'anàlisi del trànsit durant els últims sis anys naturals (2017 - 2022), les dades han sigut facilitades per l'Observatori de la Mobilitat de Catalunya (OMC) [60]. Els mesos en els quals la circulació estava restringida a causa de la pandèmia iniciada a principis de març del 2020 i finalitzada al juny del mateix any, han sigut exclosos de l'anàlisi, pel fet que eren dades que corresponen a una etapa inusual. En resum, s'estima que diàriament hi circulen 47.765 vehicles pel tram d'estudi.

A la Fig. 4.4. es mostra el nombre de vehicles totals que hi van circular per l'autopista B-20 durant l'any 2022. En aquest gràfic es pot observar que la circulació de vehicles és bastant semblant durant cada mes, excloent-hi el mes d'agost i el mes de gener, els quals representen els mesos amb més i menys circulació relativament. Durant el mes d'agost hi van circular 75.433 vehicles i durant el mes de gener 58.453 vehicles. La circulació durant la resta de mesos va ser d'entre aproximadament 63.000 i 68.800 vehicles.

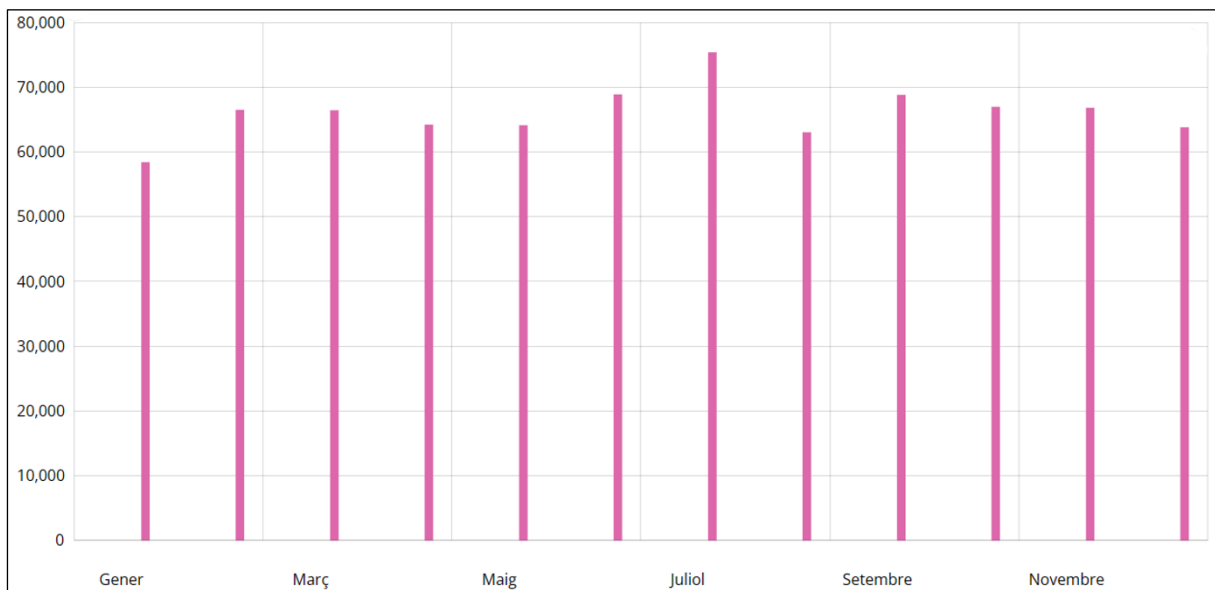


Fig. 4.4. Nombre de vehicles que van circular per l'autopista B-20 durant el 2022 [60]

Amb la finalitat de mostrar que aquesta circulació tan constant de vehicles per aquesta autopista no hi succeeix cada any, a la Fig. 4.5. es mostra el nombre de vehicles que hi van circular per la B-20 durant l'any 2021.

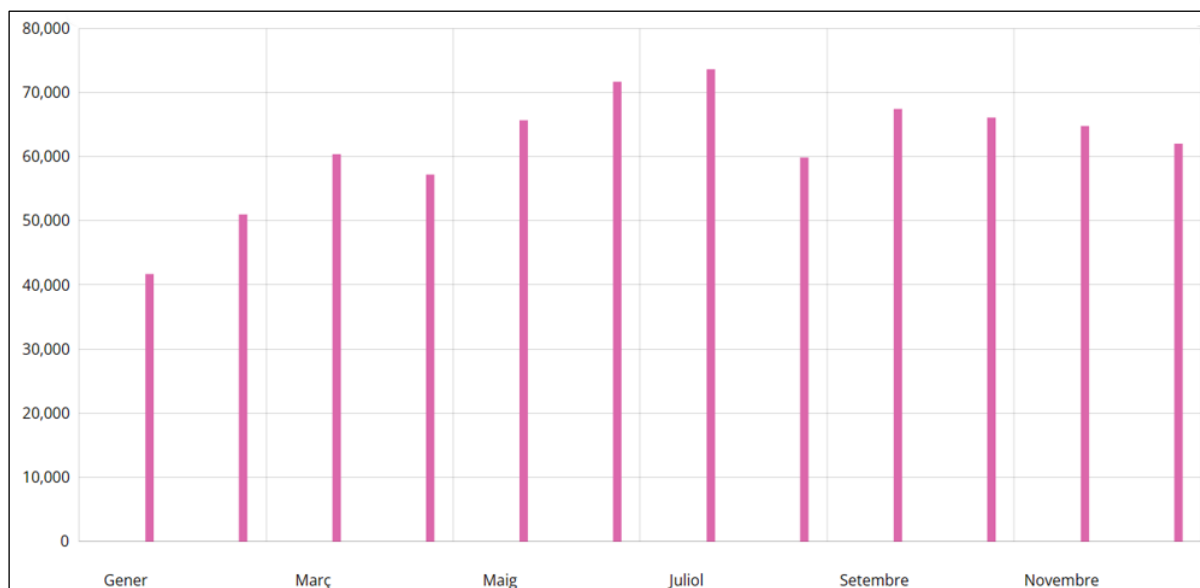


Fig. 4.5. Nombre de vehicles que van circular per l'autopista B-20 durant el 2021 [60]

En aquest gràfic es mostra molta més variabilitat del trànsit durant els diferents mesos de l'any que l'anterior. Encara que d'igual forma, gener i agost són els mesos que tenen menys i més circulació respectivament, sent aquesta de 41.712 i 73.643 vehicles diaris.

Per poder realitzar l'estudi del vent que generen els vehicles d'una forma objectiva, és necessari conèixer els tipus de vehicles que hi circulen principalment per aquest tram i quin és el nombre de cadascun.

Dins del tram es diferencien principalment dues classes de vehicles: els vehicles lleugers, els quals són principalment turismes, furgonetes i motocicletes; i els vehicles pesants, els quals són principalment camions. Segons dades analitzades facilitades pel *Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana de España* (MITMA) [61], el 93% dels vehicles que hi circulen per aquest tram de carretera són vehicles lleugers, i la resta són vehicles pesants. Això fa que dels 47.765 vehicles que s'estima que hi circulen cada dia pel tram de la B-20 comprès entre el Km-19 i el Km-24 hi circulin 44.421 vehicles lleugers i 3.344 vehicles pesants. A la Taula 4.3. es mostra, en forma de resum, el nombre de vehicles que circularan per aquest tram cada dia tal i com s'ha explicat anteriorment.

<b>Nombre diari de vehicles lleugers</b>	<b>Nombre diari de vehicles pesants</b>	<b>Nombre diari de vehicles TOTALS</b>
44.421	3.344	47.765

Taula 4.3. Nombre de vehicles que hi circulen pel tram

## 4.2.2. Estudi del vent generat pels vehicles

El vent que generen els vehicles és un fenomen que ocorre degut a la interacció dels vehicles amb l'aire mentre aquests es desplacen per carreteres i autopistes [62]. La velocitat i direcció del vent que es genera depèn de diversos factors, entre aquests destaquen:

- **Forma del vehicle:** La forma aerodinàmica del vehicle influeix en la magnitud i direcció del vent que es genera. Cada cop es dissenyen els vehicles perquè tinguin una resistència aerodinàmica menor, per millorar la interacció amb el vent natural i poder augmentar l'eficiència del combustible, la seguretat dels conductors i altres usuaris de la via i la qualitat de l'aire. Per poder millorar aquesta es fan servir túnels de vent on s'estudia meticulosament cada part del vehicle i com aquesta interacciona amb l'aire a diferents velocitats.
- **Velocitat del vehicle:** La velocitat del vent generat serà major com més gran sigui la velocitat del vehicle, tenint en compte la mida del vehicle que hi circula amb el qual interactua el vent natural.
- **Nombre de vehicles:** El nombre de vehicles que hi circulen per la carretera o autopista influeix en la quantitat del vent que es genera i la distribució d'aquest. Aquest és un paràmetre a tenir en compte en el disseny de les carreteres i autopistes per a fer una previsió de la contaminació que es generarà a la zona.
- **Condicions climàtiques:** Les condicions climàtiques com la magnitud i direcció del vent natural, influeix en la quantitat de vent que es genera i la seva distribució. Aquestes condicions es poden veure afectades també per la topografia de la zona.

El vent generat pels vehicles és un fenomen molt important per al desenvolupament del present projecte pel fet que es vol aconseguir aprofitar aquest vent generat pels vehicles per a poder convertir-lo en energia eòlica i posteriorment en elèctrica per aconseguir una il·luminació nocturna segura i sostenible.

L'estudi que es realitza en aquest apartat distingeix les dues classes de vehicles que hi circulen majoritàriament per la zona d'estudi. Com s'ha explicat a l'apartat anterior, aquests són els vehicles lleugers i els vehicles pesants. Per dur a terme l'estudi s'ha fet servir l'eina SimScale, on s'ha considerat que els vehicles lleugers hi circulen a una velocitat de 90 km/h i els vehicles



pesants a una velocitat de 80 km/h. Aquestes són velocitats inferiors a la velocitat màxima a la qual es pot circular durant el tram.

L'estudi ha consistit principalment a observar quina és la variació de la velocitat de l'aire quan aquest circula a 90 km/h i 80 km/h quan impacta amb els vehicles, aquest estudi s'ha desenvolupat mitjançant el programa SimScale i posteriorment ParaView. En primer lloc, es presenten els paràmetres que s'han fet servir a les dues simulacions, com per exemple el mallat, el tipus de flux, o el tipus de simulació; en segon lloc, es mostren els estudis realitzats amb aquests dos tipus de vehicles; i finalment es fa una anàlisi dels resultats obtinguts i es defineix quina és la magnitud del vent a tenir en consideració pel disseny de l'aerogenerador.

#### **4.2.2.1. Paràmetres establerts per realitzar l'estudi**

En aquest apartat s'expliquen els paràmetres que s'han establert per a poder realitzar els dos estudis. Aquests estudis han consistit a realitzar les simulacions mitjançant el programa SimScale, i posteriorment, amb l'objectiu de poder visualitzar millor els resultats s'ha utilitzat el software ParaView. En primer lloc, s'indicaran els paràmetres que s'han determinat per poder dur a terme la simulació a SimScale, i, en últim lloc, s'explicarà quina ha sigut la necessitat d'usar ParaView per poder dur a terme l'anàlisi de l'estudi.

A continuació s'especifiquen els paràmetres i característiques que s'han establert per dur a terme les simulacions mitjançant SimScale:

- Tipus de simulació: Es tracta d'una simulació estacionària d'un fluid incompressible. A les simulacions estacionàries es considera que el sistema està en equilibri. Els fluids incompressibles són aquells en els quals la seva densitat és constant, en els fluids que tenen velocitats baixes es negligeix la compressibilitat.
- Temps de la simulació: La simulació té un temps d'execució màxim de 3.000 segons amb una  $\Delta t$  de 1 segon.
- Tipus de flux del fluid: Flux laminar. El flux es mou de forma ordenada i en capes paral·leles, sense cap classe de turbulència.
- Model de turbulència: El model de turbulència utilitzat és el k-omega, és una combinació dels models k-omega, el qual predomina a les parets de la simulació, i el model k-èpsilon, el qual predomina al corrent lliure.

- **Mallat:** A les simulacions hi ha dues mides de mallat. Al cub que es genera per poder especificar el vent que hi circula pel seu interior té un mallat de grossor mig, i al voltant del vehicle, s'utilitza un mallat molt fi per poder determinar amb més precisió les diferents velocitats del vent al seu voltant.
- **Condicions de contorn:**
  - A les parets davantera i posterior de la malla, el flux té una velocitat constant de 22,22 o 25 m/s depenent del vehicle ,és a dir, és constant durant tot el recorregut. A les parets laterals, l'aire "llisca"; aquesta condició de lliscament permet que es desplaci l'aire com si fos es trobés dins d'una canonada.
  - L'aire impacta contra el vehicle des de la part frontal del mateix i surt al final del cub generat amb la malla.
  - Les rodes dels vehicles actuen com parets giratòries a la velocitat a la qual hi circula cada classe dels vehicles.
- **Paràmetres numèrics que s'utilitzen a les simulacions:**
  - Energia cinètica turbulenta [k]: Mesura de les fluctuacions de l'energia associades al moviment aleatori d'un fluid en un flux turbulent. Aquest valor s'estableix a  $3,75 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$  [63].
  - Taxa de dissipació específica [ $\omega_{\text{dis}}$ ]: Quantitat d'energia cinètica turbulenta que es converteix altres formes d'energia, com calor. Aquest valor s'estableix a  $3,375 \text{ s}^{-1}$ .
  - Velocitat d'entrada de l'aire: Depèn de la velocitat a la qual circularà el vehicle, ja que en aquesta simulació se suposa que el vehicle es troba en estat de repòs i és l'aire el que es desplaça.
  - Velocitat de rotació de les rodes: Aquesta depèn de la velocitat a la qual circula el vehicle.

Una vegada s'han realitzat les simulacions, s'ha utilitzat el software ParaView per poder mostrar la velocitat del vent que generen els vehicles quan aquests hi circulen. Les simulacions amb SimScale mostraven com era la interacció dels vehicles amb l'aire quan aquest anava a la velocitat que hauria de circular el vehicle a cada simulació. En resum, s'ha utilitzat ParaView per mostrar els resultats obtinguts amb SimScale com si fos el vehicle el que hi circulés a la velocitat establerta en cada cas.

#### 4.2.2.2. Vent que generen els vehicles lleugers

Per l'anàlisi del vent que generen els vehicles lleugers s'ha utilitzat un turisme de tipus esportiu, o cotxe, amb un baix coeficient aerodinàmic, s'ha escollit aquest model, ja que, com s'ha comentat anteriorment, els vehicles cada vegada tenen una resistència aerodinàmica menor per poder millorar la seva eficiència i, per exemple, en el cas dels vehicles elèctrics augmentar la seva autonomia [64].

Per l'estudi, a més a més dels paràmetres que s'han especificat a l'apartat 4.2.2.1., s'ha suposat que la velocitat a la qual circula el cotxe és 90 km/h (25 m/s). Aquest cotxe té unes dimensions aproximades de 4,7 metres de longitud, 1,3 metres d'alçada i 2,1 metres d'amplada. Una vegada obtinguts els resultats, s'han visualitzat al software ParaView per invertir els resultats.

A les figures mostrades a continuació s'observen els resultats obtinguts de l'anàlisi realitzada amb ambdós programes, per poder observar quin ha sigut el propòsit de la utilització del software ParaView. A la Fig. 4.6. es mostra la interacció del cotxe amb el fluid quan l'aire hi circula a 25 m/s, aquest és el resultat que s'assoleix de SimScale, i a la Fig. 4.7. es mostra quina és la velocitat que genera el vehicle quan aquest és el que hi circula a 25 m/s, aquesta figura és resultat de la inversió de les velocitats al software ParaView.

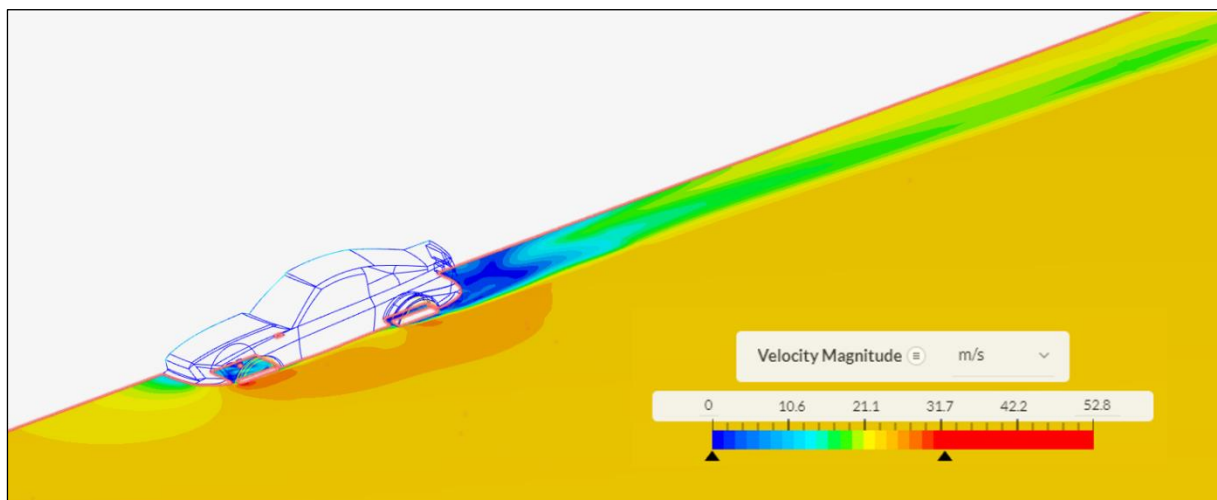


Fig. 4.6. Vista en 3D del vent generat entorn al cotxe amb SimScale

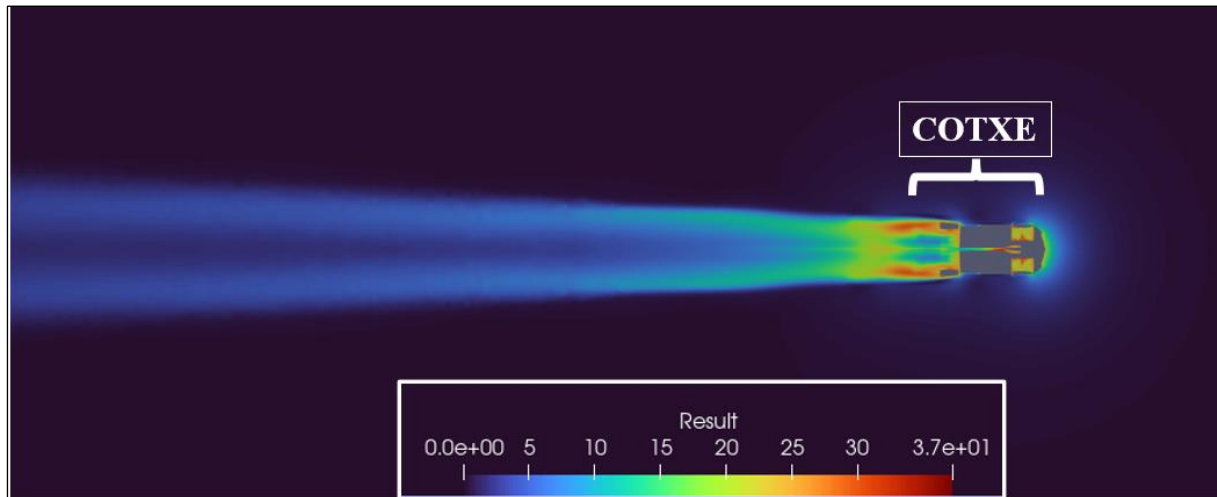


Fig. 4.7. Vista planta de la velocitat del vent generada pel cotxe amb ParaView

Tal com es pot observar a la Fig. 4.7., la variació de la velocitat al voltant del cotxe es concentra a la part posterior d'aquest, generant una estela que es va obrint cada cop més. Aquesta estela té una llargària de 30 metres i una amplària de 6 metres. També es pot veure com al voltant del cotxe es produeix un canvi de velocitats en molt poc espai, a causa de la geometria del vehicle, encara que aquesta variació no té tanta rellevància en aquest projecte. En conclusió, pel fet que la major part de la velocitat que genera el vehicle es concentra a la seva part posterior i la magnitud majoritària d'aquesta és d'entre 11 i 10,5 m/s, es considera que la velocitat que generen els cotxes quan hi circulen a 90 km/h (25 m/s), és de 10,5 m/s.

#### 4.2.2.3. Vent que generen els vehicles pesants

Per l'anàlisi del vent que generen els vehicles pesants s'ha utilitzat un camió de 13 metres de longitud, 3 metres d'alçada i 2,6 metres d'amplada. S'ha escollit aquestes mides, ja que són les més comunes en aquesta classe de vehicles [65].

Per l'estudi, a més a més dels paràmetres que s'han especificat a l'apartat 4.2.2.1., s'ha suposat que la velocitat a la qual circula el camió és 80 km/h (22,22 m/s). Una vegada obtinguts els resultats, s'han visualitzat al software ParaView per invertir els resultats.

A la Fig. 4.8. es mostra la vista en planta de quines són les diferents velocitats del vent generades per el camió, en aquest cas es mostra directament el resultat obtingut del ParaView.

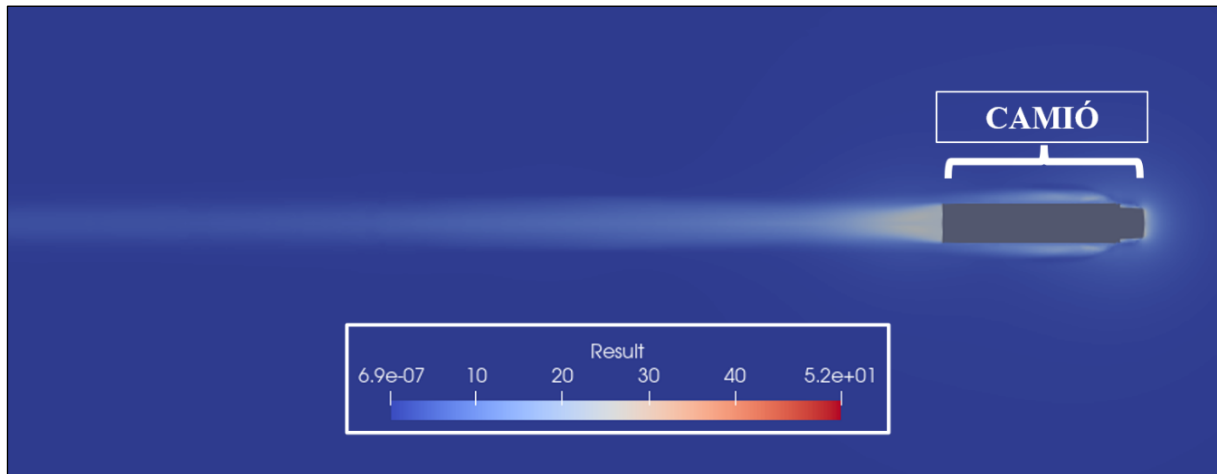


Fig. 4.8. Vista planta de la velocitat del vent generada pel camió

D'igual manera que s'ha pogut observar amb el cotxe, el camió també genera la major part de la velocitat a la part posteriorment del mateix en forma d'estela. Aquesta estela, a diferència del cotxe, no es va obrint sinó que a mesura que augmenta la distància amb el camió es va tancant, aquesta té una longitud de 35 metres i una amplitud final de 2 metres. La velocitat del vent que genera el camió és d'entre 8,5 i 9,0 m/s, es considera, doncs, que la velocitat que generen els camions quan hi circulen a 80 km/h (22,22 m/s), és de 8,5 m/s.

#### 4.2.2.4. Resultats totals del vent generat per els vehicles

Una vegada analitzades les dades obtingudes a través de l'eina SimScale, es pot concloure que el vent generat per als vehicles lleugers, generen més vent a causa de la seva aerodinàmica. En canvi, els vehicles pesants, generen menys vent, encara que la magnitud del vent que es genera al seu voltant és major que en els lleugers.

En conclusió, com que les dues classes de vehicles generen un moviment de l'aire major que la velocitat del vent natural i considerant el nombre de vehicles que hi circulen de cada classe, se suposa que el pas d'aquests vehicles pel tram de la B-20 objecte d'estudi, fa que la velocitat que es considera que treballarà l'aerogenerador augmenta fins als 9 m/s. Això fa que es decideixi dissenyar un aerogenerador vertical Giromill.

### **4.3. Estudi de la demanda energètica i possibilitats d'alimentació**

Durant aquest estudi, s'elabora una anàlisi dels diferents elements que componen el tram d'autopista objecte d'estudi. En aquest es coneixeran el nombre i tipus d'elements que requereixen d'energia elèctrica i quines són les potències consumides de cadascun d'aquests, per posteriorment, poder dimensionar l'aerogenerador de forma òptima i poder generar l'electricitat necessària per suplir la demanda energètica. Per tal d'augmentar la seguretat de la via, s'escolliran preferentment els elements que han de ser alimentats. A continuació, es presentaran cinc combinacions d'alimentació dels elements per poder-ne estudiar posteriorment, segons la potència requerida de cadascuna, el nombre de pales necessàries per a l'aerogenerador. Seguidament, s'especificaran les característiques dels elements electrònics principals que són necessaris per fer l'estudi del model de l'aerogenerador, que en aquest cas, són les bateries i la dinamo, encara que aquestes no siguin les utilitzades en un disseny final. A continuació, es fa un estudi de les dimensions màximes que pot tenir l'aerogenerador per no posar en risc cap usuari de la via i, finalment, es realitza el càlcul del nombre de Reynolds que s'usarà per fer l'elecció del perfil alar al següent apartat.

#### **4.3.1. Elements que requereixen d'energia elèctrica**

En aquest primer subapartat, es fa un recull exhaustiu dels elements il·luminatius que es troben instal·lats dins del tram objecte d'estudi. L'objectiu d'aquest recull és conèixer les potències consumides de cada element per posteriorment, estudiar-ne la possibilitat d'alimentar aquests elements mitjançant l'energia elèctrica que es generarà a partir dels aerogeneradors.

Els elements il·luminatius es poden classificar en dos grans blocs: les lluminàries exteriors i les lluminàries interiors. Les lluminàries exteriors són exclusivament fanals, els quals s'ubiquen a la major part del tram d'estudi, ja que, aquest és principalment a cel obert. Per altra banda, les lluminàries interiors només es tindran en compte les làmpades que il·luminen els túnels. Cal destacar que no s'han inclòs dins d'aquest estudi les lluminàries d'emergència, com per exemple balises d'indicació cap a les portes d'emergència o cap a l'exterior del túnel, o balises indicadores de telèfons d'emergència entre altres, perquè aquestes han d'estar connectades a una xarxa "SAI" per situacions d'emergència.

En resum, la recopilació que es realitza dels elements il·luminatius que es troben dins del tram de la B-20 objecte d'estudi és una tasca fonamental per a l'avaluació de la viabilitat de la generació elèctrica a través dels aerogeneradors.

#### 4.3.1.1. Lluminàries exteriors

Les lluminàries exteriors que es poden trobar al tram de la B-20 Nord que travessa la ciutat de Badalona són exclusivament fanals. Aquest poden tenir dos tipus d'estructures, els fanals amb una làmpada, que són els que s'ubiquen a les entrades, sortides i laterals de la carretera; i els fanals amb dues làmpades, aquests són els que es troben a la mitjana de la carretera.

Les làmpades que es troben instal·lades actualment en aquests fanals, són làmpades de vapor de sodi, les quals tenen un consum energètic elevat i una eficiència energètica d'entre el 45% i el 85%, la resta d'energia es dissipa en forma de calor o altres tipus de pèrdues [66], [67].



Fig. 4.9. Fanal amb una làmpada



Fig. 4.10. Fanal amb dues làmpades

En el tram de carretera estudiat, hi ha un total de 294 lluminàries, distribuïdes en 195 fanals. La distribució d'aquestes són:

### Distribució de lluminàries exteriors

Lluminàries a entrades, sortides i laterals	170 lluminàries
Lluminàries a la mitjana de la carretera	198 lluminàries

Taula 4.4. Distribució de lluminàries

Com s'ha comentat a l'apartat 4.1.1., el pla del Govern d'Espanya, a través dels fons del pla NextGenerationEU, és augmentar la il·luminació i l'eficiència de l'enllumenat existent de les carreteres i poder augmentar la seguretat. Per assolir aquest objectiu, se substituiran els enllumenats existents per làmpades LED. Aquesta substitució ja s'hi està duent a terme als dos trams d'autopista que connecten amb el tram de carretera estudiat, a les ciutats de Tiana i Santa Coloma de Gramenet.

Les làmpades LED, avui dia, són la tecnologia més eficient i econòmica que hi ha. Aquestes làmpades tenen una eficiència d'entre el 70% i el 99%, un consum energètic molt menor, una llarga vida útil més llarga i un manteniment i reemplaçament molt simple. A l'annex, es mostra una taula comparativa de les dues tecnologies [66], [67].

Per a la realització d'aquest projecte, a causa del reemplaçament d'enllumenats que s'està duent a terme, se suposa que tot l'enllumenat existent serà substituït per làmpades LED de baix consum i alta eficiència energètica, això permetrà realitzar un càlcul de la potència requerida del sistema més precís. Per escollir la millor opció quant a preu, sostenibilitat, potència, i vida útil s'ha portat a terme un breu estudi de mercat on s'han tingut en compte tres làmpades diferents. Totes tres làmpades es troben a l'annex corresponent.

Les làmpades LED escollides són de la marca CARANDINI, model VEKA L. Aquesta es pot instal·lar a les autopistes, ja que compleix amb la normativa de la il·luminació necessària. A continuació s'especifiquen les característiques més destacades d'aquesta làmpada [68], [69].

- **Aplicacions:** Vies públiques, carreteres, autopistes, autovies i pàrquings.
- **Eficiència energètica:** 151 lm/W
- **Sostenibilitat:** 99,38% reciclable
- **Potència:** 42 W ~ 313 W (Potència mitjana 250 W)
- **Vida útil:** 100.000 h
- **Rang de temperatures de funcionament:** - 40 °C a + 50 °C





Fig. 4.11. Fotografia del model VEKA L [68]

La normativa que determina la distància entre els diferents enllumenats, la seva altura i la luminància requerida a cada carretera és la norma UNE-EN 13201-3:2016 *Iluminación de carreteras* [1]. Aquesta determina la disposició mínima per a una il·luminació adequada. L'estudi d'aquesta llei és molt extensa i no es tindrà en compte a l'abast del projecte com ja s'ha especificat al corresponent apartat a causa que la instal·lació dels fanals ja ha estat legalitzat, i se suposa que l'intercanvi dels enllumenats no ha d'afectar en aquesta, ja que el valor lumínic de les làmpades està legalitzat pel fabricant i és l'òptim pel seu ús a les carreteres.

#### 4.3.1.2. Luminàries dels túnels

Les lluminàries dels túnels que es poden trobar als túnels de la Pallaresa i de Tiana, els quals limiten el tram de la B-20 objecte d'estudi són focus, balises d'emergència i indicació del sentit del túnel entre altres. A causa de la necessitat d'instal·lar sistemes contra falles elèctriques, com per exemple xarxes "SAI", a les balises d'emergència i senyalitzacions de sortida, en aquest estudi es considerarà que només existeix la necessitat d'alimentar els focus.

Els focus s'encarreguen de proporcionar la suficient llum per a la circulació segura dels vehicles i els seus ocupants. A més, també són importants per poder detectar possibles obstacles i millorar la visibilitat dels senyals i indicacions de trànsit durant el seu recorregut. El nombre de focus que s'il·luminen cada hora depèn de la llum que hi ha a l'exterior del túnel, encara que el més crucial és que tingui una il·luminació continua i que eviti enlluernaments i ombres que

dificultin la visió i augmenti el risc d'accidents. En conclusió, els focus són elements fonamentals de les infraestructures de les carreteres per poder garantir una circulació del trànsit eficient i segura.

Les lluminàries dels túnels actuals estan equipades amb làmpades de vapor de sodi, tal com les lluminàries anteriors. No obstant això, amb l'objectiu de millorar l'eficiència energètica i sostenibilitat de les instal·lacions, és necessari reemplaçar-les per lluminàries LED. Per dur a terme aquesta tasca, és imprescindible tenir en compte el nombre de lluminàries que hi ha a cada túnel. Aquesta distribució d'enllumenats s'indica a la Taula 4.5., en total hi ha 890 lluminàries.

#### Distribució de lluminàries dels túnels

Lluminàries Túnel de la Pallaresa	Sentit Barcelona	284 lluminàries
	Sentit Mataró	296 lluminàries
Lluminàries Túnel de Tiana	Sentit Barcelona	157 lluminàries
	Sentit Mataró	153 lluminàries

Taula 4.5. Distribució de les lluminàries dels túnels

Després d'un breu estudi de mercat, s'ha escollit que les làmpades que seran instal·lades són les de la marca METRIKA, amb referència MEEPT-HE100W [70]. Aquesta làmpada està dissenyada específicament pel seu ús en túnels. A continuació s'especifiquen algunes de les característiques més importants d'aquesta làmpada:

- **Aplicacions:** Túnels
- **Eficiència energètica:** 161 lm/W
- **Sostenibilitat:** 83% reciclable
- **Potència:** 100 W
- **Vida útil:** 100.000 h
- **Rang de temperatures de funcionament:** - 40 °C a + 50 °C



Fig. 4.12. Fotografia del model MEEPT-HE100W [70]

La normativa que estableix el nombre de lluminàries mínimes als túnels a Espanya és la norma UNE-EN 12352 *Iluminación de túneles* [2]. Aquesta norma afecta a tots els túnels independentment de la categoria de carretera que sigui i independentment de la seva longitud. Si el túnel té una longitud superior a 500 m, també s'ha d'aplicar la norma UNE-EN 14341 *Seguridad en túneles* [3]. Aquesta segona norma inclou, entre altres, requisits de ventilació, incendis, evacuació, però també d'enllumenat d'emergència. Aquest tipus d'enllumenat s'alimenten a través de xarxes "SAIs", i és per aquesta raó que aquest tipus d'enllumenat queda fora de l'abast d'aquest projecte, ja que només es volen considerar lluminàries que puguin tenir una alimentació directa a través de l'energia generada de forma sostenible per l'aerogenerador, sense necessitat d'instal·lació de sistemes complementaris.

#### 4.3.2. Estudi de les possibilitats d'alimentació del sistema

Una vegada es coneix el nombre de làmpades de cada tipus d'enllumenat, es procedeix a plantejar les diferents possibilitats que hi ha d'alimentar el sistema. Això servirà per saber quins elements es poden alimentar i quins han de ser descartats. En total es plantejaran cinc possibilitats d'alimentació. La primera, serà la més senzilla, on només s'alimentaran els fanals que es troben a la mitjana de la carretera. La segona opció, tracta d'alimentar totes les làmpades que es troben a les mitjanes, entrades, sortides i laterals, és a dir, totes les làmpades que no corresponen als túnels. La tercera tracta d'alimentar les mateixes làmpades que a l'anterior possibilitat afegint-hi les làmpades del túnel de Tiana. La quarta, les mateixes que la segona opció afegint-hi el túnel de la Pallaresa. I en últim lloc, la possibilitat d'alimentar totes les làmpades que es troben dins del tram objecte d'estudi.

A continuació, a la Taula 4.6. s'especifiquen el número d'elements il·luminatius a cada possibilitat, on es té en compte el consum de cada làmpada per obtenir la demanda energètica total de cadascuna.

Opció	Tipus de làmpada	Quantitat (Unitats)	Consum Unitari (W)	Consum Total (W)	Consum Total (kW)
1	CARANDINI VEKA L	198	250	49.500	49,5
2	CARANDINI VEKA L	368	250	92.000	92
3	CARANDINI VEKA L	368	250	123.000	123
	METRIKA MEEPT- HE100W	310	100		
4	CARANDINI VEKA L	368	250	150.000	150
	METRIKA MEEPT- HE100W	580	100		
5	CARANDINI VEKA L	368	250	181.000	181
	METRIKA MEEPT- HE100W	890	100		

Taula 4.6. Consums requerits per cada opció d'alimentació

La definició de quina combinació d'enllumenats es decideix alimentar, es determinarà a l'apartat de disseny de l'aerogenerador, ja que el perfil alar serà un factor clau en aquest.

### 4.3.3. Components electrònics necessaris per a l'elecció de la turbina

En aquest punt, s'especifiquen els components electrònics que són necessaris per a la posterior elecció i disseny de l'aerogenerador. Ja que aquest projecte no té la finalitat d'instal·lar la turbina eòlica a la realitat ni de vendre un producte acabat, només es fa l'anàlisi de dos components: les bateries i l'alternador.

### **4.3.3.1. Bateries**

Les bateries són necessàries per emmagatzemar l'energia produïda durant tot el dia i poder utilitzar-la de nit per alimentar els diferents enllumenats que s'hagin decidit alimentar amb aquesta energia provinent d'una font renovable.

L'elecció de les bateries és una tasca d'especial rellevància, ja que depèn de diversos factors. En primer lloc, s'exposaran els factors que influeixen en l'elecció de les bateries i posteriorment quines són les opcions de bateries que hi existeixen en el mercat.

Els factors que influeixen en l'elecció de les bateries són:

- Els requisits d'energia del sistema i la capacitat de càrrega de les bateries: Aquests dos factors es poden considerar com un, ja que serà necessari que la bateria pugui emmagatzemar la demanda energètica dels diferents enllumenats que es connectin.
- Duració del subministrament d'energia requerida: En el cas d'aquest projecte, l'energia requerida pel sistema és durant les hores nocturnes, ja que un dels objectius d'aquest, és augmentar la seguretat viària durant la nit.

Les opcions d'elecció que existeixen són:

- Bateries de petita capacitat: Emmagatzemar l'energia a bateries de petita capacitat té l'avantatge de tenir una mida petita i que puguin ser col·locades als peus dels enllumenats de forma individual. El factor negatiu d'aquestes és que hi ha molts elements a il·luminar i això comporta una necessitat enorme del nombre de bateries, influenciant en la matèria primera necessària per fabricar-les i el cost de cadascuna, ja sigui d'adquisició com de manteniment.
- Bateries de gran capacitat: Aquestes bateries tenen una gran mida i permeten emmagatzemar l'energia necessària per alimentar una gran quantitat d'elements il·luminatius, tenint en compte el consum independent de cada enllumenat. El gran avantatge d'aquest tipus de bateries és que té una facilitat major de manteniment. En canvi, en el cas d'aquest projecte, un dels majors inconvenients és que les mides d'aquestes bateries són molt superiors a l'espai disponible en el tram de carretera d'estudi.

- **Combinació de bateries:** Mitjançant un conjunt de bateries es pot assegurar la capacitat d'emmagatzematge requerida emprant bateries petites o mitjanes. Aquest sistema és molt útil per poder emmagatzemar energia en una sèrie de bateries mentre les altres descarreguen l'energia que requereix el sistema lumínic.

Tenint en compte totes aquestes característiques i factors, es determina que la millor opció per emmagatzemar l'energia que produiran els aerogeneradors serà la utilització d'un conjunt de bateries. S'ha escollit aquesta opció, ja que durant el pas dels vehicles durant les hores nocturnes, també es podrà generar energia i cap de les altres dues opcions ofereix la possibilitat. Un altre factor que ha decantat aquesta decisió és la possibilitat d'ubicar diferents aerogeneradors amb el respectiu conjunt de bateries i estalviar en un futur a l'operari/ària que s'encarregui del manteniment dels aerogeneradors que s'hagi de desplaçar menys per la mitjana de la carretera.

#### **4.3.3.2. Alternador**

L'alternador, o generador de corrent altern, és l'element encarregat de transformar el moviment rotatiu de l'aerogenerador en energia elèctrica a través del seu rotor. En el cas d'aquest projecte no s'escull un alternador de forma definitiva, ja que l'objectiu del projecte no és poder fabricar l'aerogenerador, sinó dissenyar un model segons els paràmetres rellevants que defineixen la seva forma i dimensió.

En el cas dels aerogeneradors, els generadors de corrent altern, han de funcionar en mode síncron. Pel fet que aquest projecte només té la intenció de dissenyar un model d'aerogenerador per a aprofitar el vent que generen els vehicles que hi circulen per la carretera, no s'explicarà quin és el procés d'elecció real per escollir un alternador. En aquest projecte es presenta una proposta d'alternador i en el cas de continuar amb el projecte per a l'elaboració de la part electrònica d'aquest, s'haurà de fer un estudi de mercat més detallat per a l'elecció final de l'alternador.

En aquest apartat s'especifiquen quina marca i model es farà servir per al disseny del model. Aquest s'ha escollit segons un breu estudi de mercat sobre els alternadors utilitzats en aerogeneradors amb característiques similars.

L'alternador escollit és el model PMG-200000 de la marca Sunny Sumai Store. Aquest té les següents especificacions tècniques [71]:

- Potència nominal: 200 kW
- Potència màxima: 210 kW
- Velocitat nominal: 360 rpm
- Corrent de sortida: CA
- Voltatge nominal: 220 V / 380 V / 400 V
- Eficiència: >92%
- Vida útil: Més de 20 anys
- Classe d'aïllament: F
- Generador: generador síncron permanent trifàsic
- Material de l'eix: acer inoxidable
- Material de la carcassa: aliatge d'alumini
- Dimensions: 300 mm (amplada) x 260 mm (profunditat) x 245 mm (alçada)

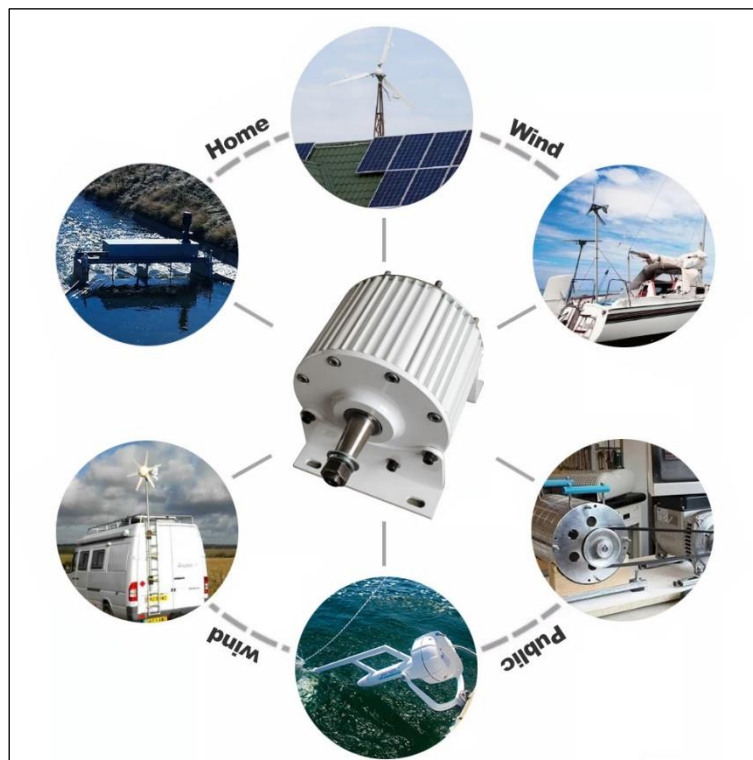


Fig. 4.13. Alternador PMG-200000 marca Sunny Sumai Store [71]

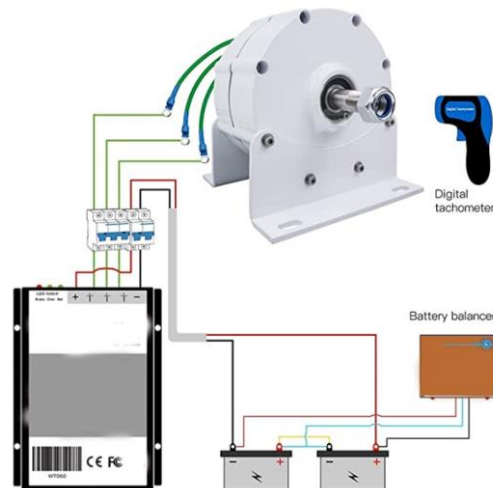


Fig. 4.14. Connexionat de l'alternador amb els elements electrònics [72]

A la Fig. 4.13. s'observa les connexions que hauria de tenir l'alternador amb la resta de components per a l'emmagatzematge de l'energia elèctrica produïda.

Com ja s'ha explicat anteriorment, aquest alternador, no és el que s'utilitzarà definitivament en el disseny de l'aerogenerador en el cas de prosseguir amb el projecte, només es considera la utilització d'aquest per poder tenir una referència de la mida que tindrà l'aerogenerador.

#### 4.4. Espai disponible per al dimensionament de l'aerogenerador

La definició de l'espai disponible per a poder instal·lar l'aerogenerador és un aspecte de gran importància, ja que s'ha d'assegurar la seguretat de tots els usuaris que hi circulen pel tram de l'autopista B-20 que travessa la ciutat de Badalona. L'espai en el qual s'ha decidit quina seria la ubicació d'instal·lació dels aerogeneradors és la mitjana de la carretera. S'ha escollit aquesta perquè l'aerogenerador pot aprofitar el vent dels vehicles que hi circulen en ambdues direccions.

La mitjana és la franja longitudinal que separa dues calçades, aquesta no està destinada a la circulació. Depenent de la classe de carretera que es correspongui, la mitjana ha de contenir un element estructural de separació de les dues calçades per augmentar la seguretat entre els dos sentits i evitar entre altres accidents, xocs frontals. A més a més d'utilitzar la mitjana com a element de seguretat, també s'utilitza per ubicar elements lumínics per enllumenar els dos sentits de la circulació, instal·lar senyals verticals, o inclús ficar plantes o arbres per aprofitar l'espai de forma verda.



Ja que el tram d'estudi de la carretera B-20, és una autopista, segons el *Manual de Diseño Geométrico de Vías del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana*, l'element de separació que s'han d'utilitzar són blocs de formigó o guarda-rails. En concret a la mitjana del tram d'estudi, s'ha optat per la instal·lació de blocs de formigó i emprar l'espai entre les dues plataformes de la carretera per instal·lar enllumenats i senyals verticals. L'ús de la mitjana no està definit per cap llei estatal i s'hi pot instal·lar qualsevol element sempre que no posi en risc als usuaris de la via [4], [5]. Per normativa, l'amplitud que ha de tenir la mitjana per aquesta classe de proteccions ha de ser mínim de 2 metres. Encara que mesurant l'amplitud del tram d'estudi via satèl·lit, s'ha determinat que la mitjana té 4 metres d'amplitud. A la Fig. 4.15. es mostra la mesura de l'amplitud de la mitjana.

Per assegurar-ne que no es posa cap usuari de la via en risc físic per la instal·lació d'aquests aerogeneradors. Es considerarà que l'amplitud màxima que pot tenir l'aerogenerador són 2 metres i aquest haurà de ser instal·lat a la part central de la mitjana, fent que aproximadament restin 100 centímetres amb el mur formigó. D'aquesta forma s'assegura la seguretat dels usuaris i la integritat de l'aerogenerador envers els vehicles.



Fig. 4.15. Amplitud de la mitjana del tram d'estudi [73]

Pel que fa a l'altura màxima de l'aerogenerador, des del punt de vista legislatiu, no hi ha límit, encara que des del punt de vista tècnic, ja que el que es vol assolir amb la instal·lació d'aquests és aprofitar el vent que generen els vehicles, es considera que aquesta no pot superar els 4 metres d'altura respecte a la calçada.

En conclusió, per poder dimensionar i dissenyar l'aerogenerador, es considerarà que aquest no pot superar els 2 metres d'amplitud i com a màxim pot estar ubicat a 4 metres d'altura respecte a la calçada.

## 4.5. Càlcul del nombre de Reynolds

El nombre de Reynolds és un nombre adimensional utilitzat en el disseny i anàlisi de sistemes que intervenen en el flux de fluids. Aquest s'utilitza en canonades, avions, automòbils, turbines eòliques, entre molts altres, per proveir un criteri per determinar la similitud fluidodinàmica. Dos fluids diferents amb velocitats també diferents, poden ser fluidinàmicament equivalents, el que farà que tinguin una geometria de flux semblant. [74], [75]

L'objectiu principal d'aquest número és concretar el comportament del fluid, és a dir saber amb certesa si aquest és laminar o turbulent. És de tipus laminar quan les forces de tipus viscos són les dominants i, a més, el fluid es mou a una velocitat molt petita i amb una trajectòria rectilínia. En canvi, el fluid és turbulent quan les forces de tipus inercial són les majoritàries, i en aquest cas el fluid té canvis en la velocitat i amb trajectòries de tipus irregular [76].

Les forces viscoses són aquelles que s'oposen al moviment lliure del fluid a causa del fregament de les partícules del propi fluid. Les forces d'inèrcia d'un fluid estan relacionades amb els canvis de la seva velocitat i direcció [77].

$$\text{Forces viscoses} = \mu * v * L_c \quad (4.1)$$

$$\text{Forces d'inèrcia} = \rho * v^2 * L_c^2 \quad (4.2)$$

On:

$\rho$ : Densitat de l'aire [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].

$v$ : Velocitat del vent al qual funcionarà la turbina [ $\text{m}/\text{s}$ ].

$L_c$ : Longitud característica del sistema [ $\text{m}$ ]. En els aerogeneradors VAWT aquesta és igual a la corda del perfil. A través de l'observació dels diferents models al mercat, es determina que la corda dels aerogeneradors VAWT H-Rotor és de 40 cm.

$\mu$ : Viscositat dinàmica de l'aire [ $\text{kg}/(\text{m} * \text{s})$ ].

A continuació es mostra la fórmula i el càlcul del nombre de Reynolds ( $R_e$ ) per poder realitzar les simulacions amb el software XFLR5 amb l'objectiu d'optimitzar el perfil per millorar la seva eficiència en les condicions que haurà de treballar.

$$R_e = \frac{\text{Forces d'incèrcia}}{\text{Forces viscoses}} = \frac{\rho * v * L_c}{\mu} \quad (4.3)$$

$$R_e = \frac{1,184 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] * 9,0 \left[ \frac{m}{s} \right] * 0,4[m]}{1,849 * 10^{-5} \left[ \frac{kg}{m * s} \right]} = 230.524,608 \cong 230.525$$

Els valors que determinen la densitat de l'aire i la seva viscositat dinàmica es troben a l'annex corresponent. Aquests valors corresponen quan l'aire es troba a una temperatura de 25 °C, que és la temperatura mitjana anual aproximada del clima mediterrani que predomina a la zona. La velocitat del vent a la qual funcionarà la turbina és de 9 m/s com s'ha explicat als apartats anteriors. Finalment, el valor de la longitud característica del sistema s'ha escollit que sigui de 40 cm perquè a partir de la cerca de diferents models que es troben en funcionament, s'ha estimat que aquesta és la longitud de corda que s'utilitza per a aquest tipus d'aerogeneradors.



## 5. Disseny de l'aerogenerador

En aquest capítol es realitzarà, a partir dels resultats obtinguts dels estudis anteriors, el disseny de la turbina eòlica. En primer lloc, es farà l'elecció de quin perfil alar escollir per a les condicions de funcionament de la turbina eòlica segons les simulacions que es duran a terme al software XFLR5. En segon lloc, es durà a terme una comparació de tres models d'aerogeneradors i s'escollirà aquell que generi més energia per a les condicions que s'han establert als apartats anteriors. Posteriorment, es comprova que el vent es comporti de la forma desitjada envers l'aerogenerador. Finalment, es dissenyarà la turbina a SolidWorks per poder visualitzar millor quina és la forma final d'aquesta.

### 5.1. Disseny i elecció del perfil alar

El disseny del perfil alar és un element clau en l'eficiència i el rendiment d'un aerogenerador. Aquest permet la generació de forces aerodinàmiques que impulsaran les pales del rotor i, en última instància, converteixen l'energia cinètica del vent en energia elèctrica.

L'elecció i disseny òptim d'un perfil alar és una tasca complexa que requereix tenir en compte diversos factors tècnics i de rendiment. Aquesta etapa d'elecció és clau per assegurar-ne un funcionament eficient i poder optimitzar la generació d'energia.

Ja que dissenyar un perfil alar que s'ajusti de la forma més eficient a les condicions de treball a la qual es trobarà l'aerogenerador és molt costós, s'ha decidit que per estalviar diners tant en la posada en marxa i en les futures reparacions en el cas que es continués el projecte, s'utilitzaran perfils normalitzats que s'ajustin de la millor forma a les condicions aerodinàmiques establertes als apartats anteriors i permetin una generació d'energia òptima.

En primer lloc, es presentaran cinc models NACA que s'usen en aerogeneradors VAWT, en aquest cas, el model d'aerogenerador a dissenyar és un de tipus Giromill. Una vegada es determinin les mides i forma que tenen cada perfil alar, es farà servir el software XFLR5 per observar quin té una major generació d'energia i quin té un rendiment superior, entre altres factors, per finalment, escollir quin serà el perfil alar que s'emprarà en el disseny de la turbina eòlica.

### 5.1.1. Presentació dels perfils NACA que s'utilitzen a l'anàlisi

En total s'han escollit cinc perfils NACA per analitzar quin és l'òptim per a les condicions a les quals treballarà l'aerogenerador. Cal recordar que totes aquestes condicions han estat determinades durant l'apartat anterior: *Estudi i càlcul dels paràmetres necessaris per al disseny de la turbina.*

Els cinc models són emprats dins de la indústria eòlica gràcies al rendiment que aporten a les seves condicions de treball [78]. A continuació s'especifiquen quin és el número NACA corresponent a cada perfil alar, quin altres usos té cadascun i quina és la seva forma:

- NACA 0012

Aquest perfil és molt emprat en:

- Prototips i investigació gràcies a la seva forma simple.
- Ensenyament per il·lustrar els principis de l'aerodinàmica.

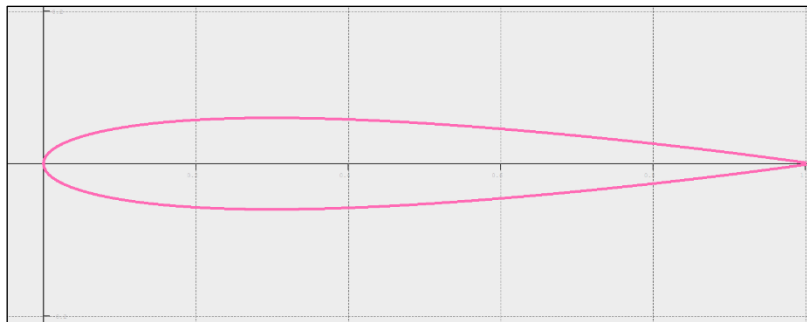


Fig. 5.1. Perfil NACA 0012

- NACA 0015

Aquest perfil és molt emprat en:

- Prototips i investigació gràcies a la seva forma simple.
- Avions lleugers i aeronaus de petites dimensions.

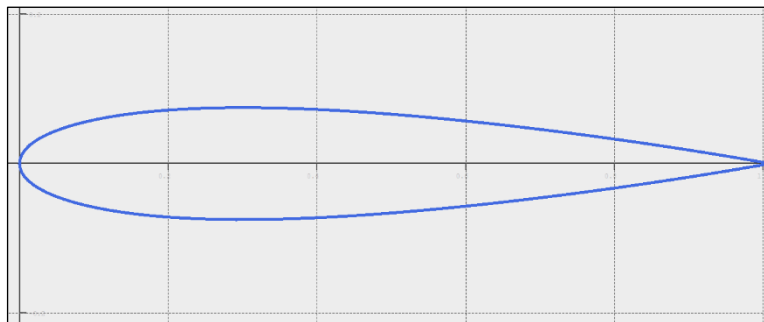


Fig. 5.2. Perfil NACA 0015

- NACA 2418

Aquest perfil és molt emprat en:

- Drons i UAV gràcies al fet que ofereix un gran equilibri
- Avions lleugers i aeronaus de petites dimensions.

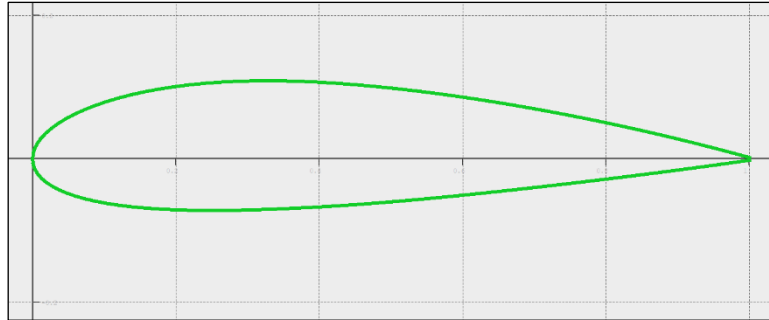


Fig. 5.3. Perfil NACA 2418

- NACA 4518

Aquest perfil és molt emprat en:

- Avions lleugers i aeronaus de petites dimensions.
- Avions de modelisme gràcies a l'estabilitat que tenen.

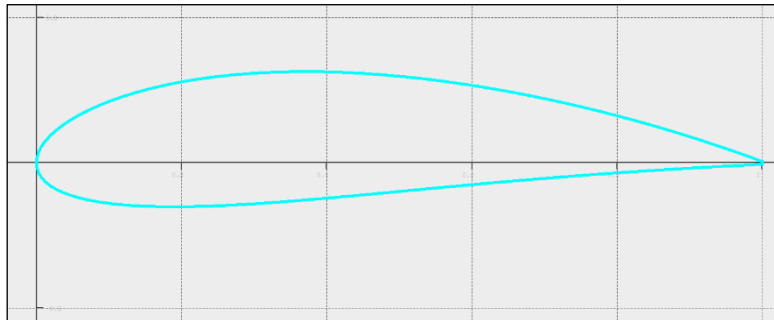


Fig. 5.4. Perfil NACA 4518

- NACA 6409

Aquest perfil és molt emprat en:

- Planejadors de vol per la seva sustentació a baixes velocitats.
- Ensenyament per il·lustrar els efectes de les formes de les ales.

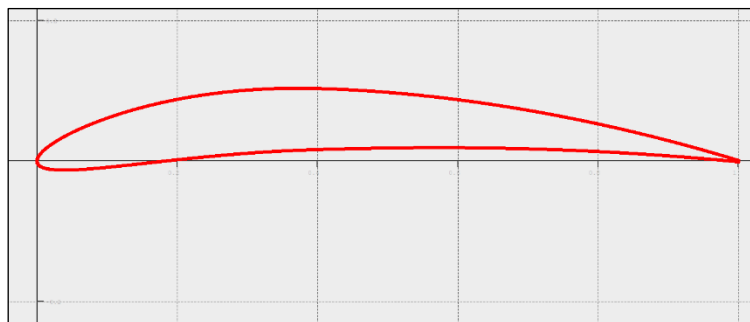


Fig. 5.5. Perfil NACA 6409

### **5.1.2. Elecció del perfil alar mitjançant XFLR5**

Una vegada introduïts els perfils alars a analitzar i indicar el nombre de Reynolds, el qual es troba calculat a l'apartat 4.5. d'aquest mateix document, es pot iniciar la simulació per estudiar el comportament dels diferents perfils emprant el software XFLR5.

El software XFLR5 és una de les eines més utilitzades, àmplies i potents per a l'anàlisi aerodinàmica de perfils alars. Aquest permet estudiar i modificar els perfils alars amb un alt nivell de precisió. En aquest estudi, gràcies al fet que els perfils alars que s'utilitzen a la indústria dels aerogeneradors són molt estudiats i coneguts, s'ha escollit primer quins perfils s'inclouen en l'anàlisi i a partir d'aquí s'estudien els resultats obtinguts, encara que aquest programa també ofereix la possibilitat de crear perfils alars segons funcions matemàtiques i definició de variables com l'eficiència o la relació entre les forces d'arrossegament i sustentació.

El software XFLR5 aporta gran quantitat d'informació respecte als perfils, però en el cas de perfils alars amb la funcionalitat final de generar energia, com és el cas d'aquest projecte, només s'utilitzen algunes de les dades resultants de l'anàlisi. En concret, s'escollirà el millor perfil segons les dades següents:

- Relació entre les forces d'arrossegament i les forces de sustentació. La relació entre aquestes dues forces té especial rellevància, ja que indica les següents característiques del perfil:
  - Eficiència aerodinàmica de l'aerogenerador. Els perfils alars amb un baix coeficient de resistència aerodinàmica ( $C_d$ ) amb alts coeficients de força de sustentació ( $C_l$ ), són els més eficients.
  - Estabilitat. Una relació errònia entre els coeficients  $C_l$  i  $C_d$  pot provocar desequilibris, provocant problemes en la maniobrabilitat i el funcionament.
  - Rendiment en diferents condicions de treball. Aquest indica el funcionament en diferents angles d'atac del perfil, amb l'objectiu de comprendre el comportament aerodinàmic del perfil alar.
- Relació entre l'angle d'atac del perfil i el coeficient de força d'arrossegament, també anomenat, resistència aerodinàmica. La relació d'aquestes dues variables genera una



corba, la qual es coneix com corba de polar. A partir de l'anàlisi d'aquesta corba es poden obtenir les següents dades:

- Angle d'atac en el qual s'assoleix el coeficient de sustentació màxim.
  - El rang d'operació del perfil, és a dir, en quin rang d'angles el perfil és capaç de generar sustentació.
  - Estabilitat i maniobrabilitat. Conèixer el comportament del perfil pels diferents angles d'atac al qual s'exposarà el perfil perquè aquest funcioni de la forma desitjada en cada cas.
- Relació entre l'angle d'atac i l'eficiència aerodinàmica de l'aerogenerador. Aquesta gràfica aporta la següent informació del perfil:
    - Angle d'atac òptim. Aquest és el punt on l'eficiència del perfil és major, depèn de la funcionalitat del perfil, pot tenir eficiències molt diferents.
    - Optimització del perfil. La gràfica ajuda a escollir quin és el millor perfil alar per a les condicions establertes, ja que indica quin dels perfils té una eficiència aerodinàmica major.

Amb l'objectiu de mostrar els resultats de l'anàlisi, en primer lloc, es mostra la llegenda de les gràfiques (Fig.5.6.), aquesta és comuna i indica cadascun dels perfils alars analitzats. En segon lloc, s'indica les gràfiques de les relacions que s'han exposat anteriorment i en cada cas es fa una explicació dels resultats obtinguts. Finalment, es fa una conclusió sobre el conjunt de dades analitzades i es fa l'elecció del perfil alar que s'emprarà per al disseny de l'aerogenerador.

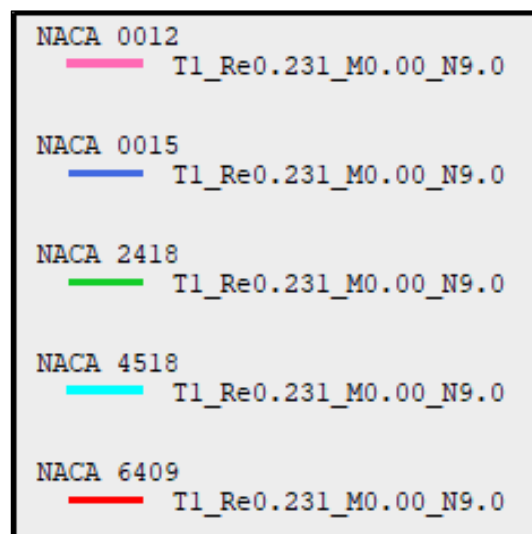


Fig. 5.6. Llegenda de les simulacions

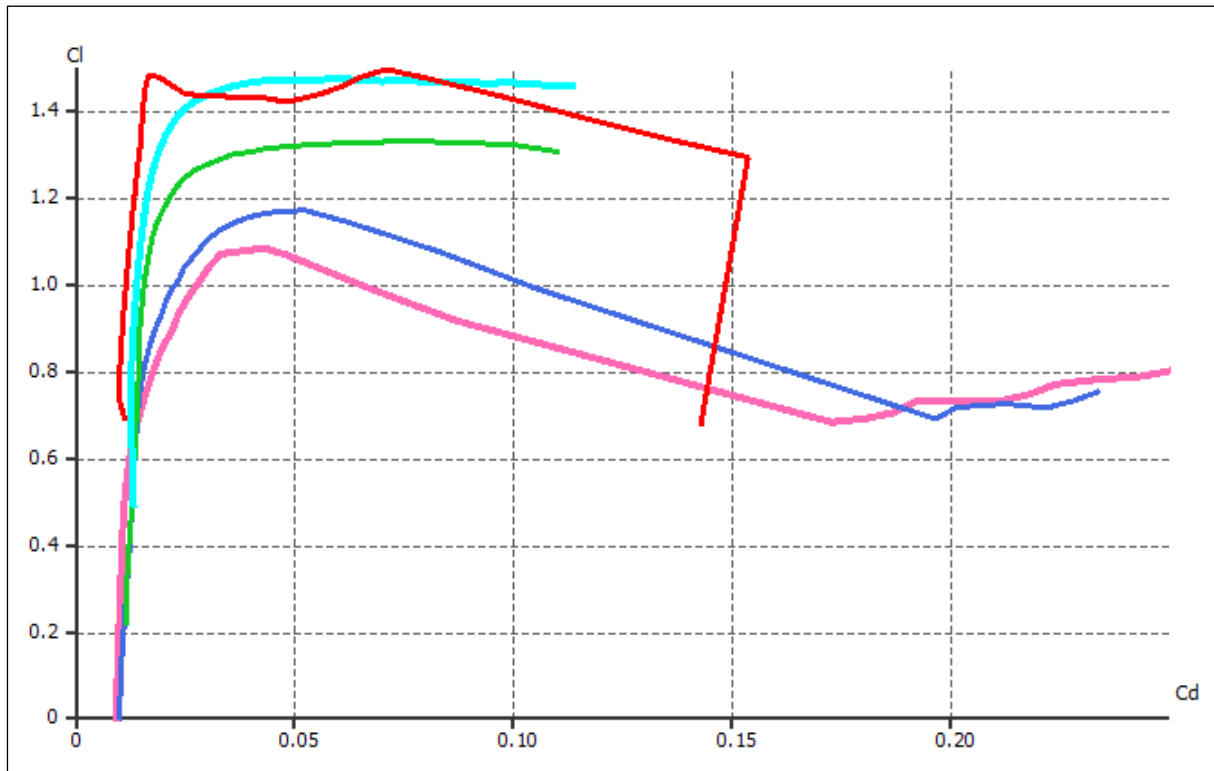


Fig. 5.7. Relació entre les forces d'arrossegament i les forces de sustentació

A la gràfica representada a la Fig. 5.7., es mostra la relació entre les forces d'arrossegament i sustentació. Aquesta ens indica que per a les condicions de treball a les que es troba l'aerogenerador, els perfils alars òptims són el NACA-2418, NACA-4518 i NACA-6409. Aquests perfils permeten una millor generació de sustentació amb una menor resistència al moviment a l'aire, la qual cosa té un impacte positiu en la potència generada, la maniobrabilitat i altres factors clau en aplicacions com els aerogeneradors o les aeronaus. Com es pot observar, el perfil NACA-6409, encara que tingui una relació òptima, aquesta no és estable, per aquest motiu, el perfil òptim d'aquesta primera anàlisi és el NACA-4518.

A la gràfica representada a la Fig. 5.8., es mostra la relació entre l'angle d'atac del perfil i el coeficient de sustentació que es genera. D'igual forma que a l'anàlisi anterior, els perfils que més coeficient de sustentació generen són el NACA-2418, NACA-4518. El perfil NACA-6409 queda descartat a causa que no mostra estabilitat, ja que la corba no té una forma constant, aquest problema és degut al fet que XFLR5 elabora l'anàlisi a través de càlculs, i en el cas d'aquest perfil, el mètode no és el correcte.

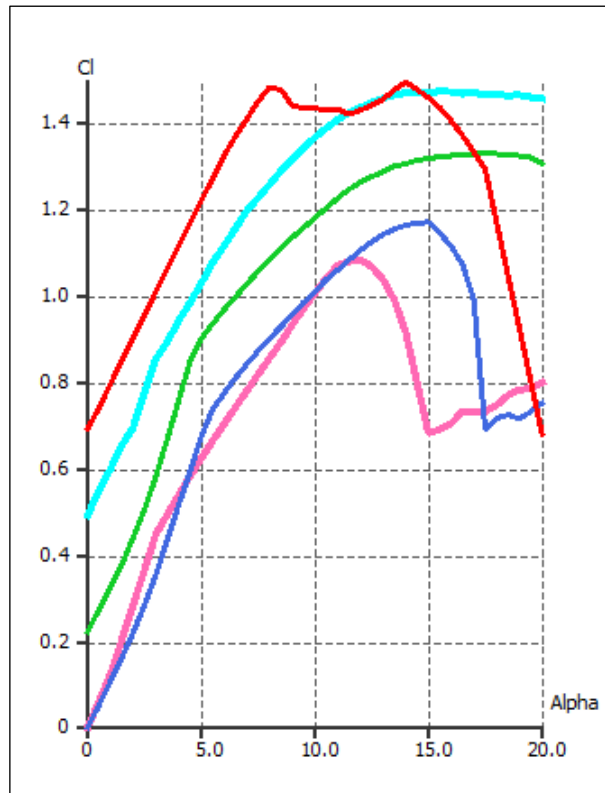


Fig. 5.8. Relació entre l'angle d'atac del perfil i el coeficient de sustentació

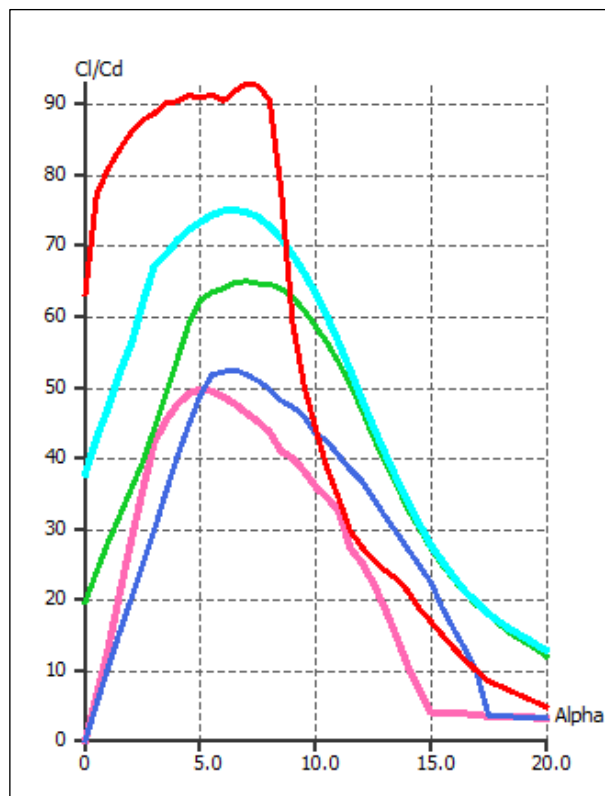


Fig. 5.9. Relació entre l'angle d'atac i l'eficiència aerodinàmica de l'aerogenerador

A la Fig. 5.9. es mostra la relació entre l'angle d'atac i l'eficiència aerodinàmica de l'aerogenerador. En aquest últim anàlisi, s'observa que els perfils més eficients des del punt de vista aerodinàmic, són els perfils NACA-2418, NACA-4518 i NACA-6409. En l'ordre esmentat, aquests tenen una eficiència aerodinàmica màxima del 64%, 75% i 92%.

Una vegada analitzats aquests tres gràfics es conclou que els perfils òptims per a les condicions de treball definides són el NACA-2418, NACA-4518 i NACA-6409. El perfil NACA-6509 queda descartat com a possible solució a causa de la poca fiabilitat que ha presentat durant l'anàlisi, fent que el perfil escollit per a crear els àleps de l'aerogenerador Giromill sigui el NACA-4518, el qual ofereix millors condicions d'eficiència i coeficient de sustentació respecte als altres perfils analitzats.

## 5.2. Disseny i elecció de l'aerogenerador

Una vegada s'ha decidit quin serà el perfil alar que tindrà l'aerogenerador Giromill que es col·locarà a la mitjana de l'autopista, s'ha de decidir quin és el nombre de pales de les quals disposarà l'aerogenerador i quines seran les dimensions d'aquestes, amb l'objectiu d'estudiar-ne quina opció generarà més energia. Aquesta anàlisi es realitzarà utilitzant el software QBlade, el qual permet dissenyar l'aerogenerador pas a pas, per poder escollir de forma òptima el nombre de pales segons diferents criteris. A continuació s'explicaran els passos que s'han seguit per arribar a poder obtenir el disseny de l'aerogenerador final i quines són les dades que s'analitzen per a l'elecció d'aquest.

En primer lloc, es defineix el perfil alar de l'aerogenerador. El software QBlade, d'igual forma que XFLR5 permet definir el perfil segons el NACA que correspon, en aquest cas, s'ha escollit que l'aerogenerador utilitzarà un perfil NACA-4518 (Fig. 5.10.).

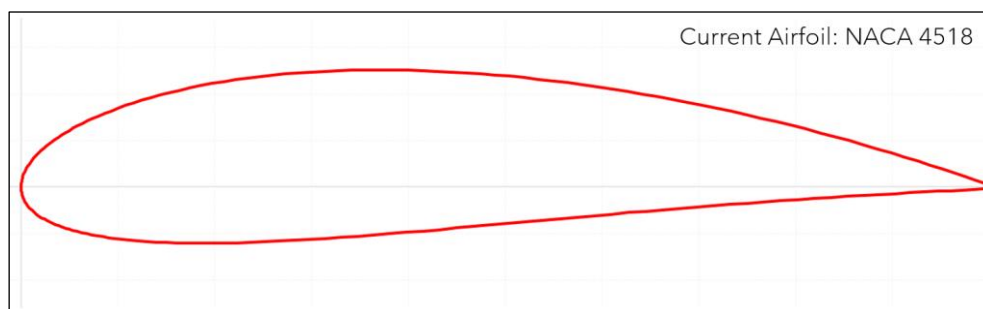


Fig. 5.10. Definició del perfil NACA 4518 al software QBlade

El software QBlade també permet realitzar l'anàlisi de perfils alars, però s'ha optat realitzar-lo al software XFLR5 perquè permet la visualització simultània dels diferents perfils analitzats i permet obtenir més dades sobre aquests.

A continuació es defineixen les dimensions de la pala i el nombre d'aquestes. En el cas de l'aerogenerador VAWT Giromill la secció de la pala és un perfil constant, fent que el procés de creació d'aquesta consisteixi a definir la longitud de la pala i la corda d'aquesta. Tenint en compte les mides màximes que s'han establert a l'apartat del dimensionament de la turbina, es defineix que aquest tindrà 1,5 metres d'alçada, una longitud de corda de 40 cm i un radi de gir de pales de 0,5 metres. Pel que fa al nombre de pales de l'aerogenerador, es distingeixen tres models diferents, un amb tres pales (Fig. 5.11.), un altre amb quatre (Fig. 5.12.), i l'últim amb cinc pales (Fig. 5.13.).

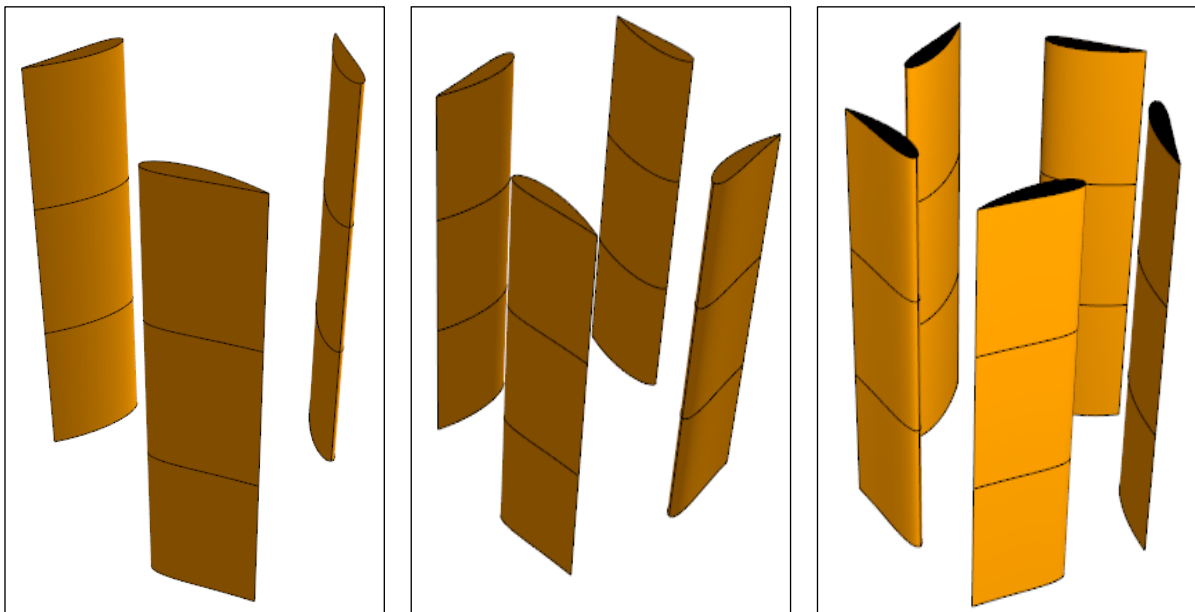


Fig. 5.11. Model tres pales      Fig. 5.12. Model quatre pales      Fig. 5.13. Model cinc pales

Una vegada definides la forma i la dimensió de cada model, s'elabora l'anàlisi del conjunt. En aquesta anàlisi, el principal objectiu és identificar quan la relació entre la velocitat de rotació de l'aerogenerador i la velocitat del vent, també anomenada *Tip Speed Ratio* (TSR), és màxima respecte al coeficient de potència de la turbina, el qual està directament relacionat la generació d'energia elèctrica. A la gràfica mostrada a la Fig. 5.14. es mostra la relació entre el TSR i el coeficient de potència de les tres turbines.

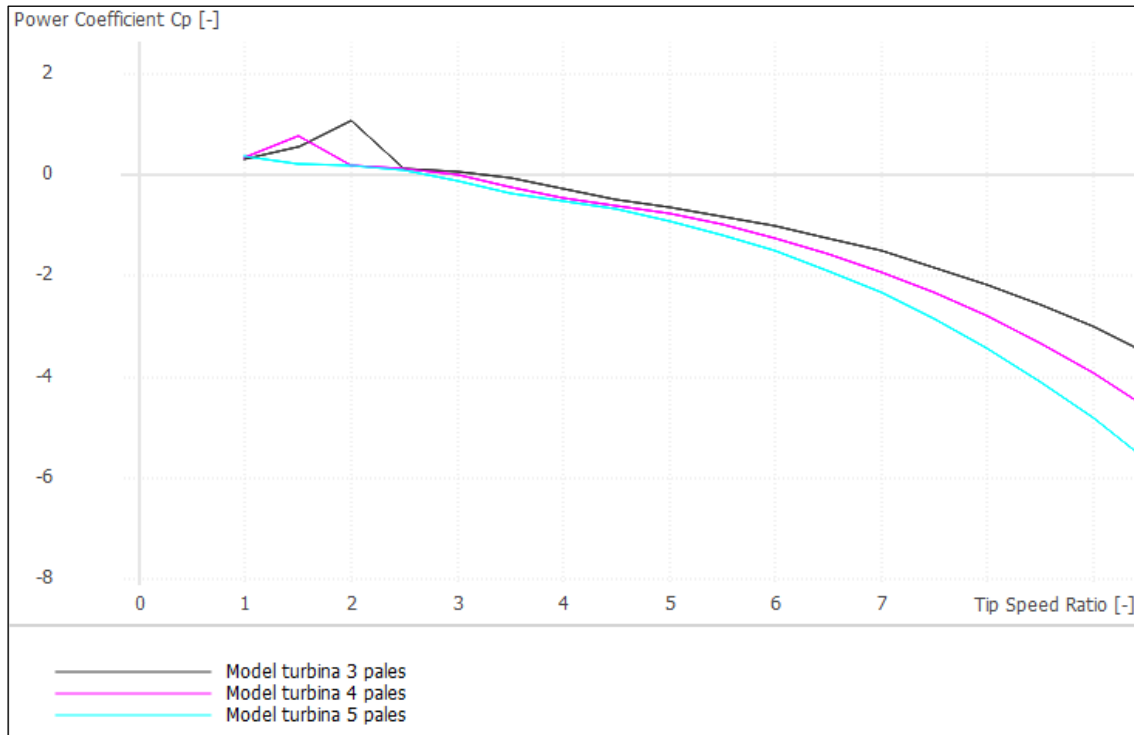


Fig. 5.14. relació entre el TSR i el coeficient de potència de les tres turbines

Tal com s'observa a la Fig. 5.14., el model que té un major coeficient de potència és el model d'aerogenerador tripala. Aquest pic de coeficient de potència ocorre quan el mòdul del TSR és igual a 2, això indica que l'aerogenerador podrà començar a generar energia, mitjançant l'alternador serà energia elèctrica, quan la velocitat de rotació de l'eix central de l'aerogenerador sigui el doble que la velocitat tangencial del vent. Per conèixer quina serà aquesta velocitat de rotació s'ha d'aplicar la següent fórmula, la qual relaciona la velocitat tangencial ( $V_{tan}$  [m/s]) d'un objecte, el radi de rotació de la turbina ( $R$  [m]) i la velocitat angular ( $\omega$  [rad/s]) d'aquesta.

$$\omega = \frac{V_{tan}}{R} = \frac{9 \left(\frac{m}{s}\right)}{0,5 (m)} = 18 \frac{rad}{s} = 172 rpm \quad (5.1)$$

Una vegada calculada la velocitat de rotació a la qual l'aerogenerador començarà a generar energia, s'ha d'observar quina serà la potència que generarà. S'ha de tenir en compte que aquesta potència generada també dependrà directament de l'alternador que s'instal·li amb aquesta. Com s'ha explicat a l'apartat corresponent, en el cas d'aquest projecte s'ha plantejat utilitzar un alternador de 30 kW.

Pel motiu explicat anteriorment, es descarta continuar analitzant els models d'aerogenerador de quatre i cinc pales, ja que per a les condicions de treball a les quals es trobarà sotmès l'aerogenerador, el model que més generació d'energia pot aportar és el de tres pales.

Una vegada conegudes la velocitat mínima de rotació de l'aerogenerador per a poder generar energia i la velocitat del vent, s'ha d'analitzar quina serà la potència que generarà l'aerogenerador quan aquestes siguin les establertes durant els diferents apartats anteriors.

A la Fig. 5.15. es mostra el gràfic que relaciona la velocitat del vent, la potència generada per l'aerogenerador, i la velocitat de rotació del rotor d'aquest. A l'eix de les abscisses es mostren les velocitats del vent, en aquest cas, amb l'objectiu d'estudiar la potència que es generaria utilitzant el vent dels vehicles, només importa quan aquesta velocitat és de 9 m/s. A l'eix de les ordenades es mostra la potència que genera la turbina eòlica. A la part interior del gràfic, es mostra la corba de la velocitat de rotació de l'aerogenerador, s'ha definit que aquesta és la mateixa que la calculada anteriorment.

Tal com es pot observar, per aquesta velocitat de rotació, a una velocitat del vent de 9 m/s, l'aerogenerador serà capaç de generar fins a 200 kW d'energia aproximadament, la qual serà transformada per l'alternador en energia elèctrica.

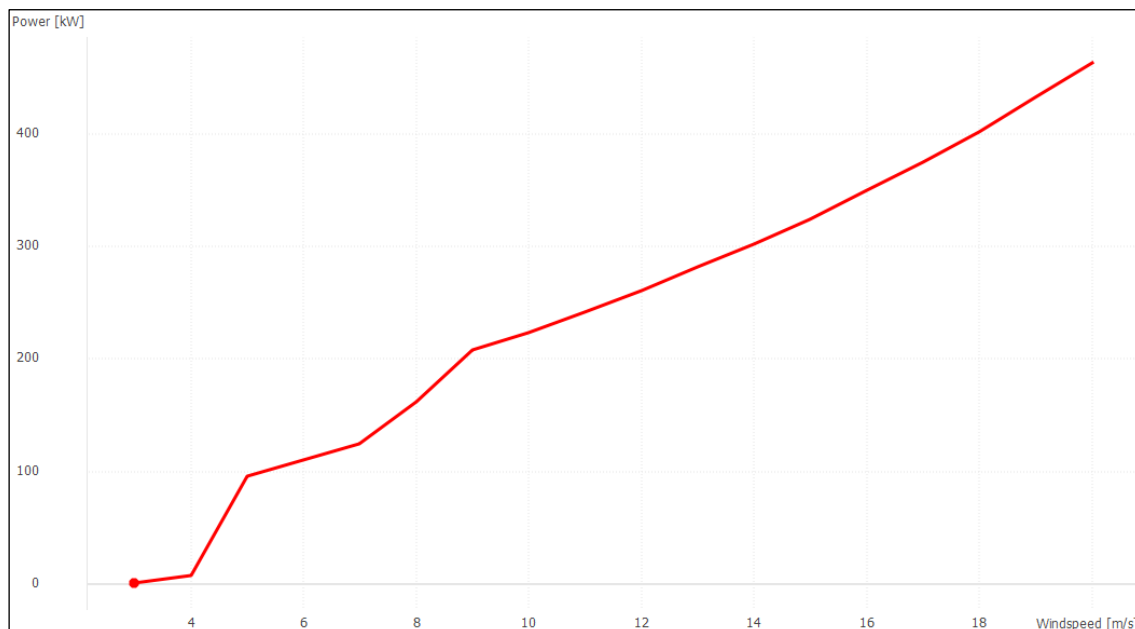


Fig. 5.15. Gràfic de la potència que genera l'aerogenerador segons la velocitat del vent i la velocitat de rotació

A causa del factor de potència que tenen els alternadors trifàsics, aquests 200 kW no són transformats completament en energia elèctrica. Normalment, el factor de potència dels alternadors està situat a 0,8, per tant, l'energia elèctrica que aporti aquest aerogenerador serà d'aproximadament 160 kW. Com la potència de transformació que requereix l'alternador és molt superior a l'escollit, caldrà utilitzar un altre per poder portar a terme la fabricació i instal·lació real d'aquest. Ja que això no es contempla dins de l'abast del projecte, no es fa una nova cerca d'alternadors.

En conclusió, durant els moments en els quals l'aerogenerador treballa amb una velocitat del vent igual a 9 m/s, serà capaç de generar una potència de 160 kW, tenint en compte que es faria servir un alternador que aprofités al màxim la potència generada per la turbina eòlica. Donada la potència de l'aerogenerador, finalment s'escull alimentar amb aquesta energia els fanals ubicats al centre i laterals de l'autopista, és a dir, l'opció número dos de la Taula 4.6..

### **5.3. Comprovació del flux d'aire que envolta la turbina**

A manera de comprovació per conèixer si el comportament de l'aire entorn de la turbina és l'adequat, es fa una sèrie de simulacions que permeten observar les diferents direccions que pren l'aire posteriorment d'estar amb contacte amb la turbina.

A causa del fet que té una gran dificultat la representació del comportament d'un fluid en constant variació de direcció, es mostren tres imatges on es veu el procés del canvi de direcció del fluid envers la pala. En aquesta es poden distingir dos fluids, encara que els dos són el vent, el de color verd és aquell que es genera després del contacte amb les aspes per la part interior d'aquestes, i el de color vermell és aquell que es genera després del contacte amb els extrems de les aspes i el seu punt mig.

A la Fig. 5.16. es mostra el primer comportament del fluid, en aquest es veu que el comportament del vent que es genera es bastant ordenat, ja que només ha interactuat una vegada amb el perfil alar.

A la Fig. 5.17. es mostra quan l'aerogenerador ja ha rotat un total de 5 cops, en aquesta imatge ja es pot observar que el comportament del fluid comença a ser més turbulent, encara que com ja s'esperava, aquest deu comportar-se així donada la seva forma i funcionalitat.



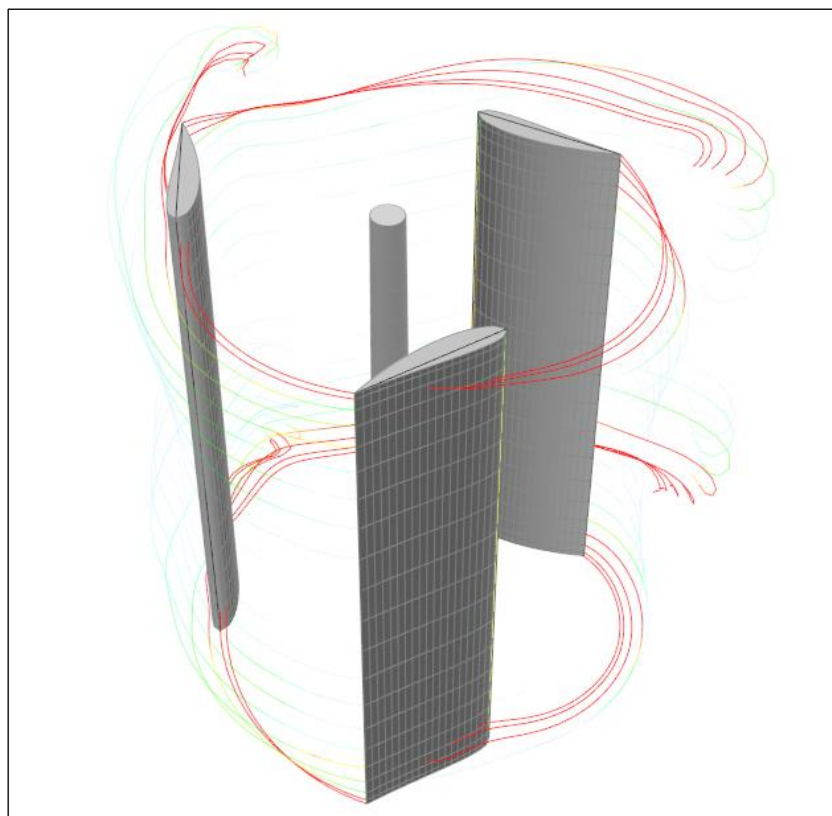


Fig. 5.16. Comportament etapa inicial del flux d'aire generat per l'aerogenerador

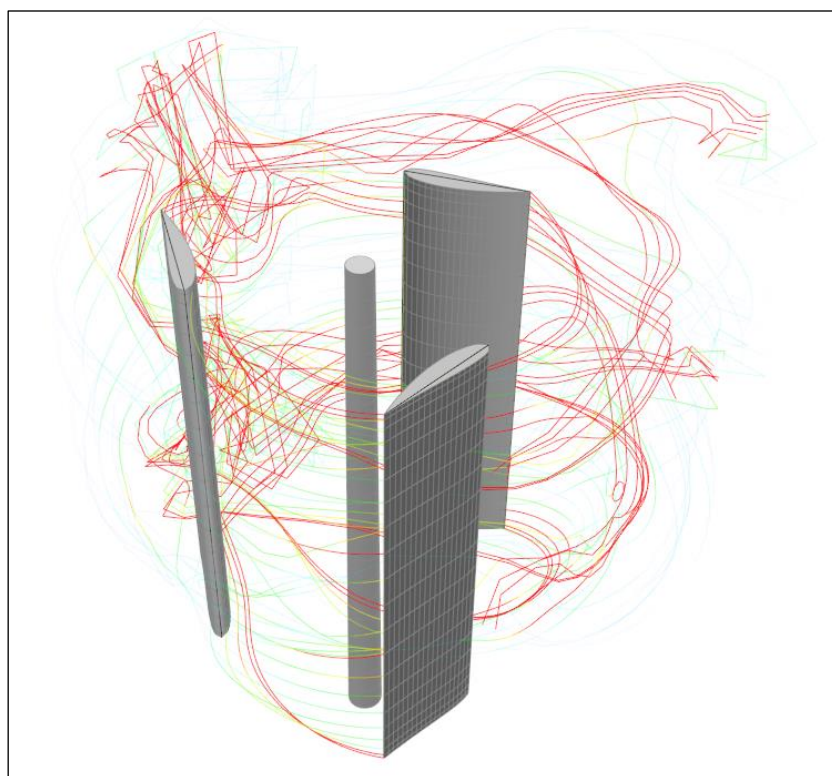


Fig. 5.17. Comportament flux d'aire quan la turbina ha rotat 5 vegades

A la Fig. 5.18. es mostra finalment com és el flux d'aire quan la turbina porta molta estona en funcionament. Aquest comportament és l'esperat ja que els aerogeneradors distorsionen el flux d'aire quan han interaccionat amb el fluid.

En conclusió es considera que el comportament del flux envers la turbina és correcta i que no hi ha problemes de generació de turbulències perilloses que puguin afectar el trànsit.

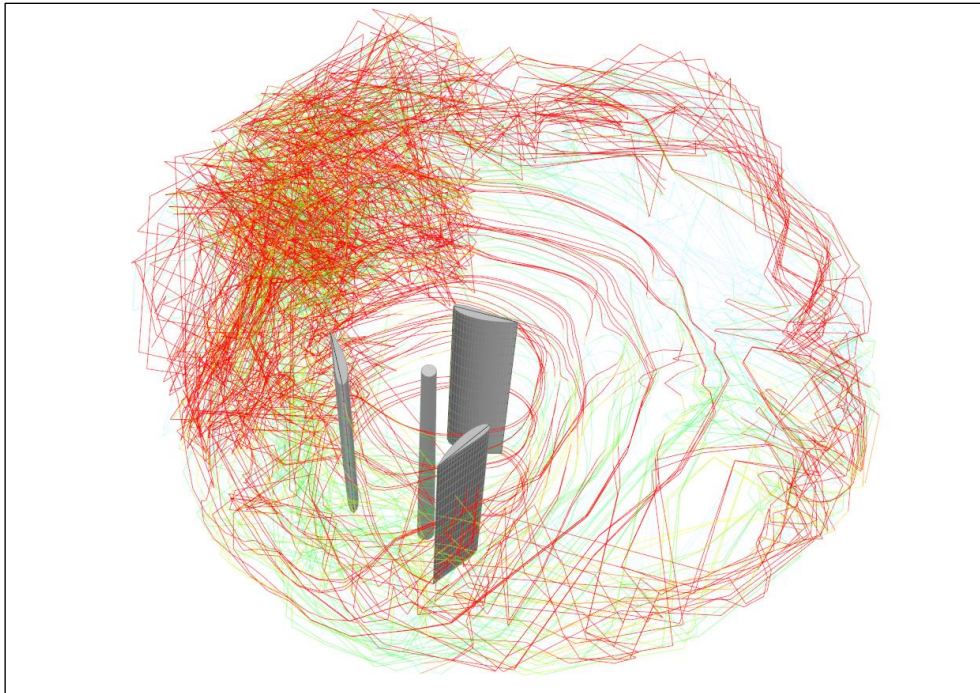


Fig. 5.18. Comportament del flux d'aire quan l'aerogenerador porta molta estona funcionant

#### **5.4. Estalvi econòmic mitjançant l'ús de l'aerogenerador**

Finalment, s'ha escollit alimentar tots els fanals exteriors, els quals tenen un consum energètic de 92 kW. Des de la suposició de que tota l'energia generada per l'aerogenerador serà emmagatzemada per un sistema de bateries, es considera que no caldrà que els enllumenats utilitzin electricitat de la xarxa elèctrica municipal. Això farà que tot el cost d'aquesta electricitat sigui l'estalvi econòmic i energètic que aportarà l'aerogenerador.

Tenint en compte que el cost de l'electricitat és d'aproximadament 0,14867 €/kWh [79] durant les hores nocturnes, i que els enllumenats s'encenen des de les 8:00 p.m. fins a les 8:00 a.m., és a dir, 12 hores. Durant el període d'un any, l'Ajuntament de Badalona, pot estalviar un total de 4.992,34€.

Encara que en aquest projecte no s'ha realitzat un estudi sobre la vida útil de l'aerogenerador, sota la suposició de que aquesta sigui semblant a la de la majoria dels aerogeneradors que tinguin característiques semblants a aquest, es pot estimar que aquesta és de 20 anys . Per tant, sota aquesta suposició, l'estalvi econòmic que aportaria l'aerogenerador a l'ajuntament, seria d'un total de mínim 99.846,80€.

## 5.5. Disseny del model d'aerogenerador final

Una vegada s'ha escollit la classe d'aerogenerador a partir de les simulacions numèriques i quines són les seves dimensions a partir dels corresponents estudis, es pot dissenyar el model final d'aquest. Per al disseny s'ha fet servir el software CAD SolidWorks. Encara que aquesta turbina no es vagi a produir ni instal·lar a la realitat, es important tenir clar quina és la seva forma final, degut a que en el cas de voler prosseguir amb el projecte, faria més fàcil la comprensió de les mides i paràmetres clau que determinen la seva forma.

A la Fig. 5.19. es mostra una imatge amb l'aspecte final del model de l'aerogenerador en cas de construir-lo, i posteriorment, a la Fig. 5.20. es mostra amb les cotes que el defineixen.

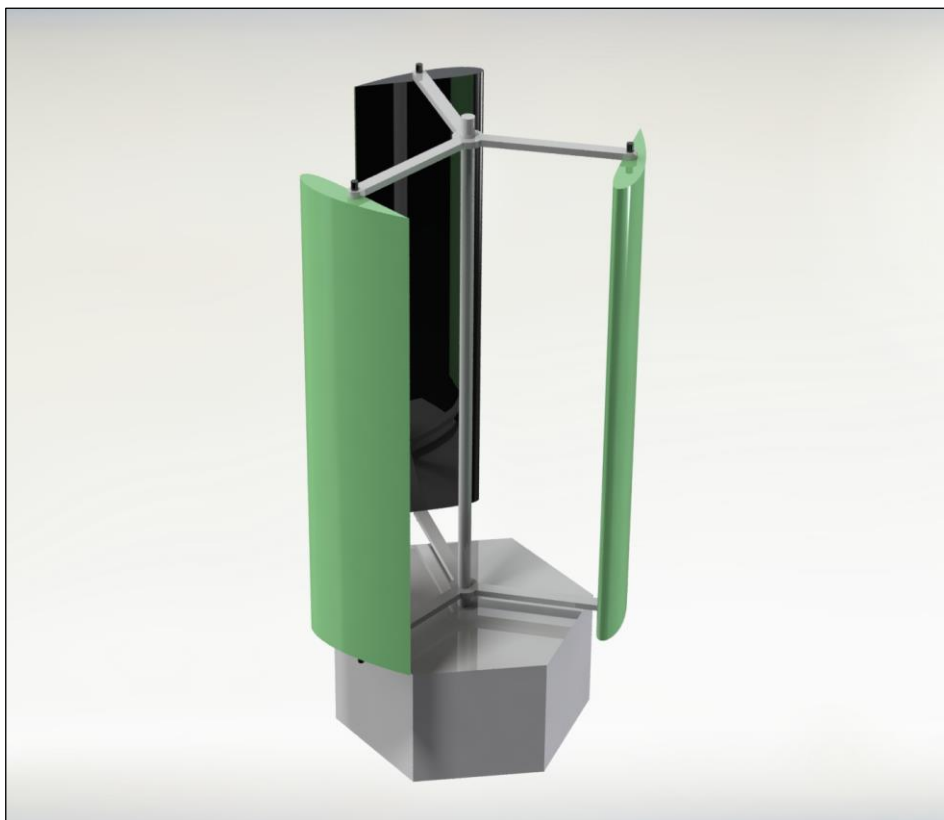


Fig. 5.19. Aspecte final de l'aerogenerador

Per el disseny s'ha optat que dues de les pales siguin pintades de color verdes i una sigui de color negre. S'ha realitzat aquesta decisió basant-se en l'estudi sobre la reducció de l'impacte de les diferents aus amb els aerogeneradors explicat a l'apartat 3.5. *Aerogeneradors* [35]. La resta de peces que componen l'aerogenerador s'ha optat per pintar-lo de color blanc. La mida de la caixa inferior, on s'ubica l'alternador i altres components per al funcionament de l'aerogenerador s'ha dissenyat segons les mides dels alternadors trobats al mercat.

A la Fig. 5.20. es mostren les cotes que defineixen l'estructura de l'aerogenerador. Aquestes s'han anat definint durant el treball, així que aquesta imatge funciona a mode de recull de tota la informació explicada anteriorment.

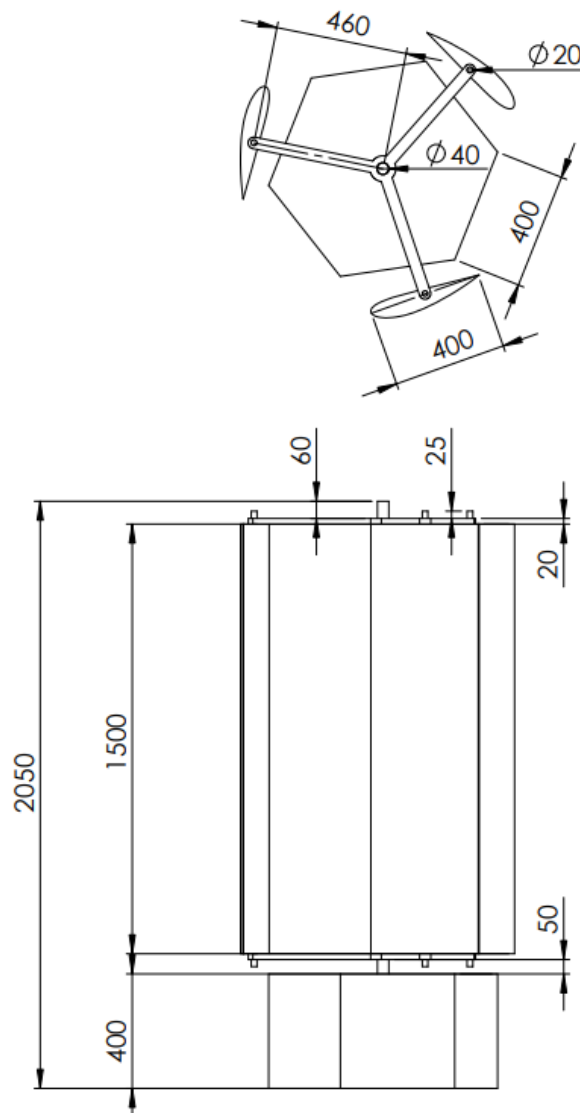


Fig. 5.20. Acotació de l'aerogenerador

## 6. Planificació

En aquest apartat es presenta la planificació que es va plantejar per dur a terme durant el projecte i quina ha sigut la durada real d'aquest. En primer lloc, es presenten les tasques que es van decidir realitzar per poder finalitzar el projecte i el temps que es va estimar per cadascuna. Posteriorment, es presenta la duració que ha tingut finalment el projecte i s'elaborarà una anàlisi d'aquelles tasques que han vist modificada la seva duració durant la realització del projecte.

### 6.1. Planificació inicial del projecte

Segons la planificació inicial realitzada, el projecte té una durada de 404 hores. La distribució d'aquestes hores està pensada per fer-ne dues hores cada dia de dilluns a dissabte. La data inici del projecte, és el dia 3/10/2022 i la data de finalització del mateix és el 25/05/2023. La data de finalització del projecte és anterior a la data d'entrega, ja que s'ha volgut tenir un marge de seguretat per possibles imprevistos. En aquesta planificació inicial s'han diferenciat les tasques a dur a terme segons la tipologia d'aquestes per a la finalització del present projecte.

<b>1, Planificació del Projecte</b>	<b>404 hores</b>	<b>dl 03/10/22</b>	<b>ds 27/05/23</b>
<b>1. Estructurar el projecte</b>	<b>30 hores</b>	<b>dl 03/10/22</b>	<b>dc 19/10/22</b>
1.1. Preparar documentació segons rúbrica	4 hores	dl 03/10/22	dt 04/10/22
1.2. Definir objectius i abast del projecte	10 hores	dc 05/10/22	dl 10/10/22
1.3. Realitzar planificació del projecte	10 hores	dt 11/10/22	ds 15/10/22
1.4. Crear l'índex de la memòria del projecte	6 hores	dl 17/10/22	dc 19/10/22
<b>2. Marc teòric del projecte</b>	<b>138 hores</b>	<b>dj 20/10/22</b>	<b>ds 07/01/23</b>
2.1. Recerca d'informació	70 hores	dj 20/10/22	dt 29/11/22
2.2. Recerca de les normatives vigents	10 hores	dc 30/11/22	dl 05/12/22
2.3. Elecció i redacció de la informació	38 hores	dt 06/12/22	dt 27/12/22
2.4. Anàlisi de dades recopilades	20 hores	dc 28/12/22	ds 07/01/23
<b>3. Estudis i càlculs dels paràmetres necessaris pel disseny de la turbina</b>	<b>114 hores</b>	<b>dl 09/01/23</b>	<b>dc 15/03/23</b>
3.1. Estudi de la zona geogràfica de la zona	10 hores	dl 09/01/23	dv 13/01/23
3.2. Estudi de la zona meteorològica de la zona	28 hores	ds 14/01/23	dl 30/01/23

3.3. Estudi del trànsit i el vent generat pels vehicles	30 hores	dt 31/01/23	dj 16/02/23
3.4. Estudi de la demanda energètica i les possibilitats d'alimentació	28 hores	dv 17/02/23	ds 04/03/23
3.5. Estudi de l'espai disponible per a la turbina	8 hores	dl 06/03/23	dj 09/03/23
3.6. Càlcul del nombre de Reynolds segons els estudis anteriors	10 hores	dv 10/03/23	dc 15/03/23
<b>4. Disseny aerodinàmic de l'aerogenerador</b>	<b>96 hores</b>	<b>dj 16/03/23</b>	<b>dc 10/05/23</b>
4.1. Elecció del perfil alar	30 hores	dj 16/03/23	ds 01/04/23
4.2. Elecció del model de turbina eòlica	40 hores	dl 03/04/23	dt 25/04/23
4.3. Comprovació del funcionament aerodinàmic de la turbina	12 hores	dc 26/04/23	dt 02/05/23
4.4. Disseny del model d'aerogenerador	14 hores	dc 03/05/23	dc 10/05/23
<b>5. Perspectiva de gènere del projecte</b>	<b>2 hores</b>	<b>dj 11/05/23</b>	<b>dj 11/05/23</b>
<b>6. Estudi econòmic del projecte</b>	<b>16 hores</b>	<b>dv 12/05/23</b>	<b>ds 20/05/23</b>
<b>7. Conclusions i treball futur del projecte</b>	<b>8 hores</b>	<b>dl 22/05/23</b>	<b>dj 25/05/23</b>

Taula 6.1. Planificació inicial del projecte

## 6.2. Diagrama de Gantt de la planificació inicial del projecte

A la Fig. 6.1. es mostra el diagrama de Gantt de la planificació inicial del projecte, on es poden observar les precedències de cada apartat del projecte. Les tasques no s'inicien fins finalitzada la tasca anterior, a causa de la naturalesa del treball. Això fa que el treball sigui molt lineal i que el retard d'una tasca, endarrereixi la data de finalització del projecte.

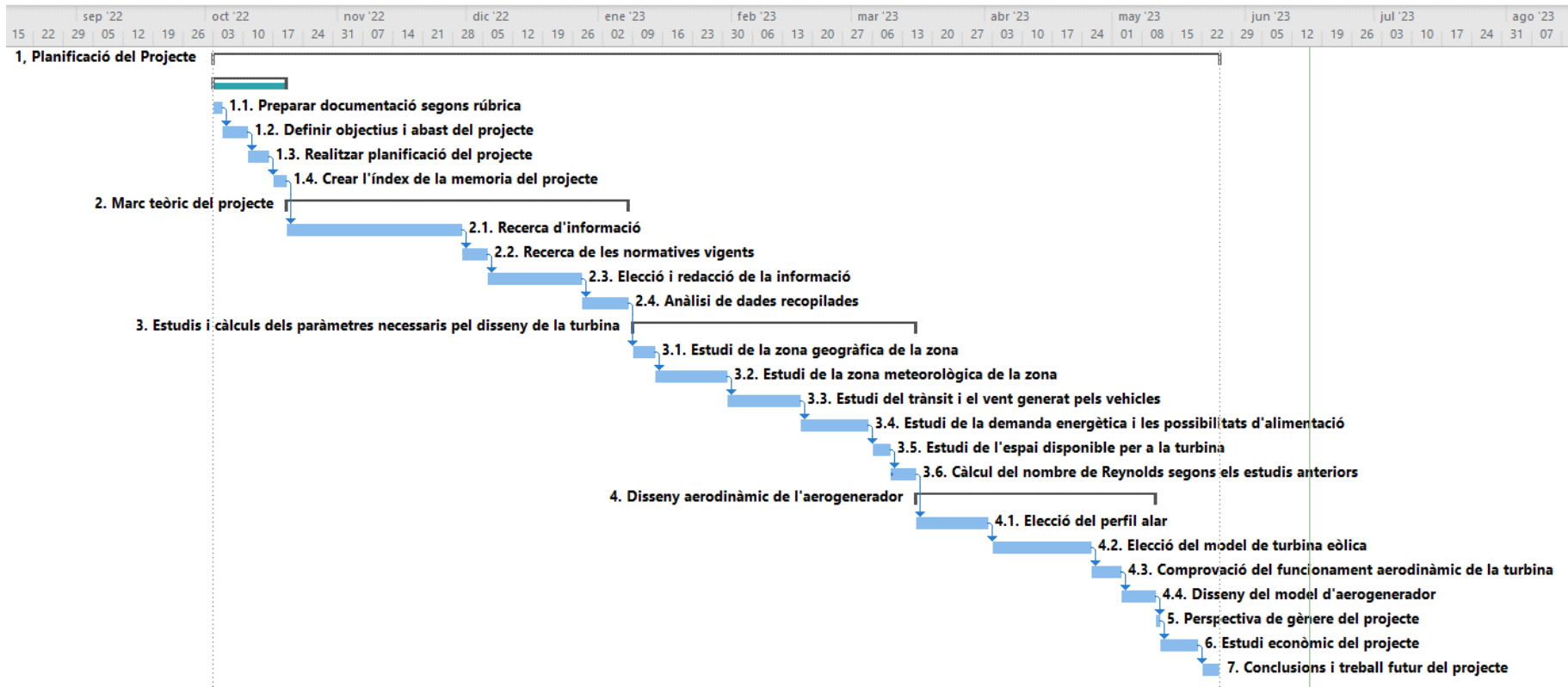


Fig. 6.1. Diagrama de Gantt segons planificació inicial del projecte

### 6.3. Durada final del projecte

En aquest apartat es presenta la duració final del projecte i de cadascuna de les tasques. La duració final del projecte ha sigut de 436 hores, fent que la data de finalització del treball fos el 13/06/2023. L'increment d'hores del projecte no ha condicionat el nombre d'hores dedicades cada dia, ja que, com es va plantejar a la planificació inicial, es va deixar un temps de marge per poder acabar el treball abans de la data d'entrega.

<b>1, Planificació del Projecte</b>	436 hores	<b>dl 03/10/22</b>	<b>dt 13/06/23</b>
<b>1. Estructurar el projecte</b>	<b>30 hores</b>	<b>dl 03/10/22</b>	<b>dc 19/10/22</b>
1.1. Preparar documentació segons rúbrica	4 hores	dl 03/10/22	dt 04/10/22
1.2. Definir objectius i abast del projecte	10 hores	dc 05/10/22	dl 10/10/22
1.3. Realitzar planificació del projecte	10 hores	dt 11/10/22	ds 15/10/22
1.4. Crear l'índex de la memòria del projecte	6 hores	dl 17/10/22	dc 19/10/22
<b>2. Dmc teòric del projecte</b>	<b>154 hores</b>	<b>dj 20/10/22</b>	<b>dt 17/01/23</b>
2.1. Recerca d'informació	70 hores	dj 20/10/22	dt 29/11/22
2.2. Recerca de les normatives vigents	8 hores	dc 30/11/22	ds 03/12/22
2.3. Elecció i redacció de la informació	44 hores	dl 05/12/22	dj 29/12/22
2.4. Anàlisi de dades recopilades	32 hores	dv 30/12/22	dt 17/01/23
<b>3. Estudis i càlculs dels paràmetres necessaris pel disseny de la turbina</b>	<b>118 hores</b>	<b>dc 18/01/23</b>	<b>dl 27/03/23</b>
3.1. Estudi de la zona geogràfica de la zona	6 hores	dc 18/01/23	dv 20/01/23
3.2. Estudi de la zona meteorològica de la zona	36 hores	ds 21/01/23	dv 10/02/23
3.3. Estudi del trànsit i el vent generat pels vehicles	38 hores	ds 11/02/23	ds 04/03/23
3.4. Estudi de la demanda energètica i les possibilitats d'alimentació	26 hores	dl 06/03/23	dl 20/03/23
3.5. Estudi de l'espai disponible per a la turbina	8 hores	dt 21/03/23	dv 24/03/23
3.6. Càlcul del nombre de Reynolds segons els estudis anteriors	4 hores	dv 10/03/23	dl 27/03/23
<b>4. Disseny aerodinàmic de l'aerogenerador</b>	<b>94 hores</b>	<b>dl 27/03/23</b>	<b>ds 20/05/23</b>
4.1. Elecció del perfil alar	42 hores	dl 27/03/23	dj 20/04/23
4.2. Elecció del model de turbina eòlica	34 hores	dj 20/04/23	dc 10/05/23
4.3. Comprovació del funcionament aerodinàmic de la turbina	8 hores	dc 10/05/23	dl 15/05/23



4.4. Disseny del model d'aerogenerador	10 hores	dl 15/05/23	ds 20/05/23
<b>5. Perspectiva de gènere del projecte</b>	<b>6 hores</b>	<b>ds 20/05/23</b>	<b>dc 24/05/23</b>
<b>6. Estudi econòmic del projecte</b>	<b>20 hores</b>	<b>dc 24/05/23</b>	<b>dl 05/06/23</b>
<b>7. Conclusions i treball futur del projecte</b>	<b>14 hores</b>	<b>dl 05/06/23</b>	<b>dt 13/06/23</b>

Taula 6.2. Planificació final del projecte

Respecte la planificació inicial, les tasques que més s'han endarrerit són les relacionades amb el disseny aerodinàmic de l'aerogenerador. Això és degut a que es van cercar diferents perfils alars per fer l'anàlisi en comptes de dissenyar un de nou per a les condicions de treball estudiades tal i com es va preveure en un inici. Aquest canvi, encara que ha suposat un augment de càrrega de treball, permetrà estalviar costos en la fabricació de les aspes.

## 6.4. Diagrama de Gantt final del projecte

A la Fig. 6.2. es mostra el diagrama de Gantt respecte la duració final del projecte, on es poden observar les precedències de cada apartat del projecte.

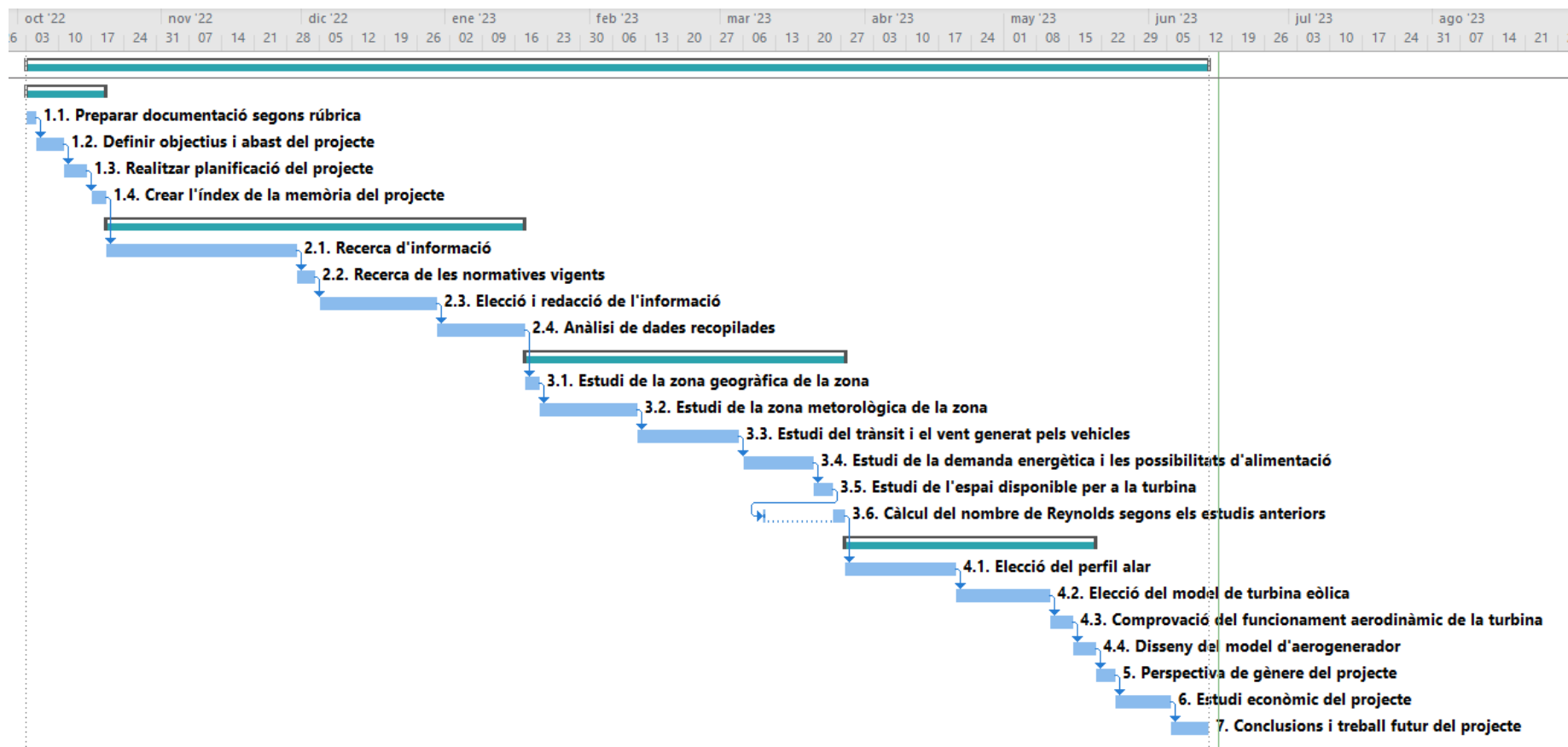


Fig. 6.2. Diagrama de Gantt segons planificació real del projecte

## **7. Perspectiva de gènere**

Puix que aquest projecte tracta del disseny d'un model d'aerogenerador que aprofita el vent que generen els vehicles que hi circulen pel tram d'autopista de la B-20 que travessa la ciutat de Badalona no es considera que el gènere de cada persona tingui una funció significativa a l'hora de la realització del projecte, això és degut al fet que es considera que totes les persones independentment del seu gènere tenen la capacitat de conduir per aquesta carretera i poden ser part d'aquesta solució.

Com aquest projecte, el qual permetria il·luminar el tram de carretera durant la nit, permet que els usuaris i usuàries que circulen per aquesta puguin tenir una major seguretat i poder evitar accidents o bé per la falta d'il·luminació o per enlluernaments amb altres vehicles. Tots els gèneres s'aprofiten de la mateixa manera d'aquesta solució a causa de que l'ull humà, té la mateixa visibilitat nocturna independentment del gènere. Aquesta visibilitat es veu afectada segons l'edat, condicions genètiques o salut ocular, però no segons el gènere de la persona.

També es vol aconseguir que aquest treball pugui inspirar a persones, independentment del seu gènere, a aconseguir buscar solucions per poder generar energia de forma sostenible i poder reduir l'ús de combustibles fòssils, entre altres.

En resum, el present projecte no fa una distinció ni discrimina a les persones segons el seu gènere, raça, religió, orientació sexual, edat o origen. Ja que tracta de que tots es puguin beneficiar d'alguna manera positiva.



## 8. Conclusions

Al llarg del present projecte, s'ha pogut observar i detallar el procés de disseny, simulació i verificació que es pot dur a terme per a escollir un aerogenerador per a una aplicació específica, en aquest cas, per a generar energia elèctrica aprofitant el vent que generen els vehicles quan hi circulen pel tram d'autopista B-20 que travessa la ciutat de Badalona. Aquesta metodologia és aplicable a altres projectes sobre models aerodinàmics de turbines eòliques que comparteixin característiques similars.

Per escollir la classe i tipus d'aerogenerador que s'havia d'utilitzar per assolir l'objectiu principal del projecte, s'ha fet una sèrie d'estudis sobre la geografia i la meteorologia de la zona; la magnitud del vent que generen els vehicles que hi circulen per el tram d'autopista objecte d'estudi tenint en consideració el nombre de cada classe de vehicle que hi circula per aquest; la demanda energètica que tenen les lluminàries ubicades al tram i quines són les possibilitats d'alimentar aquestes amb l'energia elèctrica que es genera de forma sostenible; i finalment un estudi sobre quin és l'espai disponible a la mitjana de la carretera, és a dir, on es trobaria ubicat l'aerogenerador, tenint en compte els elements principals que es requereixen per al seu correcte funcionament i la normativa que regula aquest espai per evitar posar en perill a qualsevol usuari de la via. Tots aquests estudis han sigut necessaris per poder iniciar el procés de disseny del model d'aerogenerador.

Una vegada realitzats tots els estudis corresponents a les diferents condicions a les quals hauria de treballar la turbina, s'ha fet l'elecció del perfil alar òptim per a l'aerogenerador mitjançant el software XFLR5. Amb la finalitat d'estalviar costos de producció en un futur, s'ha decidit no dissenyar un perfil especial per aquesta solució, sinó aprofitar els estudis que s'han fet durant anys per part d'altres enginyers i enginyeres i escollir un perfil normalitzat.

Per finalitzar el disseny de la turbina, s'ha fet una anàlisi amb tres models amb un diferent nombre de pales cadascun. A través dels resultats d'aquesta investigació, s'ha dissenyat el model que generava més energia per les condicions de treball calculades.

Durant aquesta investigació, han sorprès diverses característiques dels aerogeneradors. En primer lloc, que un aerogenerador pugui tenir coeficient de potència negatiu, és a dir, que necessiti més energia per funcionar que la generació d'energia pròpia. En segon lloc, la gran quantitat d'energia que pot generar un aerogenerador de dimensions tan reduïdes.

Es considera que aquest projecte s'ha realitzat amb èxit gràcies al fet que s'ha assolit dissenyar un model d'aerogenerador que aconsegueixi aprofitar el vent que generen els cotxes en un espai reduït com l'espai disponible que hi ha a la mitjana de la carretera. També s'ha aconseguit que tots els enllumenats exteriors del tram d'objecte d'estudi, siguin alimentats de forma sostenible a partir de l'energia generada per l'aerogenerador i doncs, s'ha pogut presentar una primera proposta per poder augmentar la seguretat del tram il·luminant aquest a la nit.

## **8.1. Línia de treball futur**

La línia de treball que s'ha de seguir per poder avançar amb el projecte pel que fa a la part mecànica es basa en l'elecció dels materials i la realització del càlcul estructural de l'aerogenerador, per si s'ha de modificar l'estructura. També s'haurà de realitzar l'estudi de l'impacte mediambiental que produeix la fabricació i la instal·lació d'aquest.

Pel que fa al material amb el qual es fabrica l'aerogenerador, s'ha d'escollir tenint en compte les condicions de temperatura a la qual treballarà, ja que aquest estarà instal·lat a la intempèrie. També s'ha d'escollir un material que sigui reciclable i produït de forma sostenible, per si en el cas que es trenqués una de les aspes, el material d'aquesta pogués reutilitzar-se amb una altra finalitat. La sostenibilitat també s'ha d'aconseguir en tots els processos previs a la instal·lació i utilització del producte.

Per altra banda, per la part electrònica de l'aerogenerador, es té el propòsit de portar-la a terme durant el curs acadèmic vinent. En aquesta part, s'ha de fer una elecció dels components que faran que aquest funcioni de forma òptima, la distribució elèctrica a realitzar per connectar tots els dispositius amb les bateries considerant entre altres factors, les pèrdues del cablejat, i dissenyar un controlador per conèixer la quantitat d'energia generada en cada moment, quina és la quantitat d'energia emmagatzemada i quina és la que s'està subministrant a les lluminàries. Tot això amb l'objectiu de poder conèixer en cada moment l'estat del sistema.

Quan s'hagin assolit totes aquestes tasques, es podrà obtenir el cost real de l'aerogenerador, i si es desitja, presentar la proposta a l'Ajuntament de Badalona per a augmentar la seguretat viària a una de les seves carreteres principals.

## 9. Bibliografía

- [1] UNE Normalización Española, “UNE-EN 13201.” <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0057659>
- [2] UNE Normalización Española, “UNE-EN 12352.” <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0038710>
- [3] BOE, “UNE-EN 14341.” <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=doue-l-2014-83674>
- [4] Ministerio de Transportes y Movilidad, “Manual Diseño Geométrico de vías - Normativa técnica,” Sep. 2020.
- [5] M. y A. U. Ministerio de Transportes, “Estudio del ancho de mediana y secciones tipo.” [https://www.mitma.gob.es/recursos\\_mfom/carreteras/EI1-CC-013/Documento%20n%C2%BA%201%20MEMORIA%20Y%20ANEJOS/2.%20Anejos%2013%20estudio%20ancho%20mediana%20y%20secciones%20tipo.pdf](https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/carreteras/EI1-CC-013/Documento%20n%C2%BA%201%20MEMORIA%20Y%20ANEJOS/2.%20Anejos%2013%20estudio%20ancho%20mediana%20y%20secciones%20tipo.pdf) (accessed May 10, 2023).
- [6] EspaceNET Patent Search, “Vortex Resonance Wind Turbine Patent.” <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/045531642/publication/ES2374233B1?q=ES2374233B1>
- [7] Wikipedia, “Vortex Bladeless,” May 30, 2022.
- [8] Antonio Crespo Dmtínez, *Mecánica de Fluidos*. Ediciones Paraninfo, 2006.
- [9] Viquipèdia, “Aerodinàmica,” 2020. <https://ca.wikipedia.org/wiki/Aerodinàmica>
- [10] Universidad de Investigación y Desarrollo, “Manual Aerodinámica,” 2003. <https://www.udi.edu.co/images/biblioteca/aeronautica/aerodinamica.pdf>
- [11] IQR Ingeniería Química, “Efecto Venturi,” Aug. 11, 2020. <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/08/efecto-venturi.html>
- [12] Wikipedia, “Principio de Bernoulli,” Feb. 14, 2023. [https://es.wikipedia.org/wiki/Principio\\_de\\_Bernoulli](https://es.wikipedia.org/wiki/Principio_de_Bernoulli)

- [13] Khan Academy, “What is Bernoulli equation?,” Jan. 2023. <https://es.khanacademy.org/science/physics/fluids/fluid-dynamics/a/what-is-bernoullis-equation>
- [14] Médico Plus, “Las 3 leyes de Newton,” 2022. <https://medicoplus.com/ciencia/leyes-newton>
- [15] Wikipedia, “Perfil alar,” May 2022. [https://es.wikipedia.org/wiki/Perfil\\_alar](https://es.wikipedia.org/wiki/Perfil_alar)
- [16] L'avionnaire, “Aerodinámica de la aviación,” Jan. 2023. <https://www.lavionnaire.fr/EspAerodinamica.php>
- [17] John J. Anderson Jr., *Fundamentals of Aerodynamics*. [Online]. Available: <https://archive.org/details/FundamentalsOfAerodynamics5thEdition/page/n5/mode/2up>
- [18] Oriol López Moles, “Estudi aerodinámico de un perfil NACA,” 2021. [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/357232/TFG\\_ORIOL\\_LOPEZ\\_MORIA\\_QP2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/357232/TFG_ORIOL_LOPEZ_MORIA_QP2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [19] Wikipedia, “Sustentación,” Dec. 2022. [https://es.wikipedia.org/wiki/Sustentaci3n#Teor3as\\_matem3ticas\\_de\\_la\\_sustentaci3n](https://es.wikipedia.org/wiki/Sustentaci3n#Teor3as_matem3ticas_de_la_sustentaci3n)
- [20] Xavier Aguado J3dar, “La fuerza de sustentaci3n.” <https://www.bing.com/ck/a?!&&p=65ee184860e8e5b6JmltdHM9MTY3Njg1MTIwMCZpZ3VpZD0zZjkzNDI0ZC0xMjAxLTZhODItM2Q0OS01MDU1MTNhOTZiOTImaW5zaWQ9NTIwMg&pfn=3&hsh=3&fclid=3f93424d-1201-6a82-3d49-505513a96b92&psq=fuerza+de+sustentacion&u=alHR0cHM6Ly93d3cua2ltZXJpdXMuY29tL2FwcC9kb3dubG9hZC81NzgwNDEwMzQ0L0xhK2Z1ZXJ6YStkZStzdXN0ZW50YWNPJUMzJUIzbi5wZGY&ntb=1>
- [21] OpenStax TM, “Fuerza de arrastre y velocidad límite.” <https://openstax.org/books/f%C3%ADsica-universitaria-volumen-1/pages/6-4-fuerza-de-arrastre-y-velocidad-limite>
- [22] National Aeronautics and Space Administration (NASA), “Lift Formula,” May 13, 2021. [https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/WindTunnel/Activities/lift\\_formula.html](https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/WindTunnel/Activities/lift_formula.html)



- [23] Engineering Toolbox, “Drag Coefficient.” [https://www.engineeringtoolbox.com/drag-coefficient-d\\_627.html](https://www.engineeringtoolbox.com/drag-coefficient-d_627.html)
- [24] Wikipedia, “Comité Asesor Nacional para la Aerodinámica,” 2022.
- [25] Jahir de la Cruz Mayorga and Mohammad Talha Sharif Rafique, “Análisis y optimización de perfiles alares,” Jun. 2021. [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/357240/delaCruz\\_Sharif\\_Tfe\\_Estudio\\_simulacion\\_y\\_optimizacion\\_de\\_un\\_perfil\\_alar.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/357240/delaCruz_Sharif_Tfe_Estudio_simulacion_y_optimizacion_de_un_perfil_alar.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [26] Airfoils Tools, “Airfoil database search (NACA 4 digit).” [http://www.airfoiltools.com/search/index?m\[textSearch\]=&m\[maxCamber\]=&m\[minCamber\]=&m\[maxThickness\]=&m\[minThickness\]=&m\[grp\]=naca4d&m\[sort\]=1&m\[page\]=2&m\[count\]=30](http://www.airfoiltools.com/search/index?m[textSearch]=&m[maxCamber]=&m[minCamber]=&m[maxThickness]=&m[minThickness]=&m[grp]=naca4d&m[sort]=1&m[page]=2&m[count]=30) (accessed Apr. 12, 2023).
- [27] Wikipedia, “Energía eólica,” Jan. 2023. [https://es.wikipedia.org/wiki/Energía\\_Eólica](https://es.wikipedia.org/wiki/Energía_Eólica)
- [28] Wikipedia, “James Blyth (Engineer),” Dec. 22, 2022. [https://en.wikipedia.org/wiki/James\\_Blyth\\_\(engineer\)](https://en.wikipedia.org/wiki/James_Blyth_(engineer))
- [29] Asociación Empresarial Eólica, “La eólica en España,” Dec. 2022. <https://aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-en-espana/>
- [30] Iberdrola, “Energía eólica,” Dec. 2022. <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/energia-eolica#:~:text=QU%C3%89%20ES%20LA%20ENERG%C3%8DA%20E%C3%93LICA.%20La%20energ%C3%ADa%20e%C3%B3lica,transforma%20la%20energ%C3%ADa%20cin%C3%A9tica%20en%20energ%C3%ADa%20mec%C3%A1nica%20>
- [31] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico - Gobierno de España, “Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030,” Dec. 2022. <https://www.idae.es/informacion-y-publicaciones/plan-nacional-integrado-de-energia-y-clima-pniec-2021-2030>
- [32] Naciones Unidas, “Objectiu 7 de Desenvolupament Sostenible.” <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>

- [33] Naciones Unidas, “Objectiu 12 de Desenvolupament Sostenible.” <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals/produccion-consumo-responsables>
- [34] Roel May, Torgeir Nygård, Ulla Falkdalen, Jens Åström, Øyvind Hamre, and Bård G. Stokke, “Paint it black: Efficacy of increased wind turbine rotor blade visibility to reduce avian fatalities,” Jun. 2020, Accessed: Apr. 13, 2023. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/ece3.6592>
- [35] My Modern MET, “Pintar de negro las palas de las turbinas eólicas reduce la muerte de aves en un 70%,” Aug. 31, 2020. <https://mymodernmet.com/es/turbinas-eolicas-pintura-muerte-aves/> (accessed Apr. 13, 2023).
- [36] ELECTROSITIO.COM, “Principio de funcionamiento de la turbina eólica de eje horizontal (HAWT).” <https://electrositio.com/principio-de-funcionamiento-de-la-turbina-eolica-de-eje-horizontal-hawt-aerogeneradores-de-una-dos-y-tres-palas/>
- [37] Wikipedia and Emilio J. Rodríguez Posada, “Aerogenerador en Tarifa,” May 01, 2009. [https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Aerogenerador\\_en\\_Tarifa.jpg](https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Aerogenerador_en_Tarifa.jpg)
- [38] WeMake Consultores, “Turbinas eólicas de récord.” <https://wemakeconsultores.com/turbinas-eolicas-de-record/>
- [39] Mint for people: Rethinking the future, “Energía eólica, tipos de aerogeneradores.” <https://mintforpeople.com/noticias/energia-eolica-tipos-aerogeneradores/>
- [40] Cumbre Pueblos, “Aerogeneradores: Qué son, Cómo funcionan. Tipos,” Feb. 21, 2019. [https://cumbrepuebloscop20.org/energias/eolica/aerogeneradores/?utm\\_content=cmp-true](https://cumbrepuebloscop20.org/energias/eolica/aerogeneradores/?utm_content=cmp-true)
- [41] Definición.DE, “Aerogenerador,” Nov. 2022. <https://definicion.de/aerogenerador/>
- [42] OXFORD BROOKES UNIVERSITY, “Vertical turbines could be the future for wind farms,” Apr. 26, 2021. <https://www.brookes.ac.uk/About-Brookes/News/2021/04/Vertical-turbines-could-be-the-future-for-wind-far> (accessed Apr. 13, 2023).

- [43] Wikipedia, “Rotor Savonius,” Apr. 13, 2022.  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Rotor\\_Savonius](https://es.wikipedia.org/wiki/Rotor_Savonius)
- [44] ELPROCUS, “What is a Darrieus Wind Turbine & Its Working.”  
<https://www.elprocus.com/darrieus-wind-turbine-working/>
- [45] Wikipedia, “Darrieus Wind Turbine,” Nov. 08, 2022.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Darrieus\\_wind\\_turbine](https://en.wikipedia.org/wiki/Darrieus_wind_turbine)
- [46] Netzero Guide, “Savonius Wind Turbine.” <http://netzeroguide.com/savonius-wind-turbine/>
- [47] AliExpress, “Turbina residencial 300W.”  
<https://es.aliexpress.com/item/32813439753.html>
- [48] Wind Turbine Models, “Dornier Darrieus 55.” <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/93-dornier-darrieus-55>
- [49] Composites World, “Off-grid turbine: Helix in the wind,” Jan. 10, 2012.  
<https://www.compositesworld.com/articles/off-grid-turbine-helix-in-the-wind>
- [50] casa practica, “Impianto eolico vertical: caracteristiche e prezzo.”  
<https://www.casapratca.net/energia-pulita/energia-eolica/eolico-vertical.asp>
- [51] Vortex Bladeless, “Vortex Bladeless.” <https://vortexbladeless.com/>
- [52] InceptiveMind, “Vortex Bladeless wind turbines generate electricity from vibration,” Apr. 04, 2021. <https://www.inceptivemind.com/vortex-bladeless-wind-turbines-generate-electricity-vibration/18413/>
- [53] Google Maps, “Ubicació Zona Estudi.”  
<https://www.google.es/maps/@41.4602609,2.2272148,15z>
- [54] Tráfico y Seguridad Vial - DGT, “El 82%, en riesgo por pocas luces,” Apr. 22, 2021.  
<https://revista.dgt.es/es/motor/noticias/2021/04ABRIL/0422-IlluminacionCoches.shtml#>

- [55] Cinco Días - El País, “España planta cara al gasto eléctrico de la carretera con 510 millones para bajarlo al 50%,” Oct. 22, 2022. [https://cincodias.elpais.com/cincodias/2022/10/25/companias/1666710894\\_319152.html](https://cincodias.elpais.com/cincodias/2022/10/25/companias/1666710894_319152.html)
- [56] INVERTIA | El Español, “Bruselas autoriza a España a destinar 20 millones de Next Generation a digitalización del sector del transporte,” Jan. 19, 2022. [https://www.elespanol.com/invertia/observatorios/movilidad/20220119/bruselas-autoriza-espana-next-generation-digitalizacion-transporte/643685759\\_0.html](https://www.elespanol.com/invertia/observatorios/movilidad/20220119/bruselas-autoriza-espana-next-generation-digitalizacion-transporte/643685759_0.html)
- [57] Gobierno de España, “Plan de Recuperación,” Dec. 2022. <https://planderecuperacion.gob.es/>
- [58] Meteocat, “Dades vent del Meteocat - Museu de Badalona,” Dec. 2022. <https://es.meteocat.gencat.cat/funcions>
- [59] Agencia Española de Meteorología (AEMET), “Datos Viento AEMET - Vilassar de Dm,” Dec. 2022. <https://datosclima.es/Aemet2013/Viento2013.php>
- [60] Observatori de Mobilitat de Catadilya, “Trànsit als accessos de Barcelona,” Jan. 2023. <https://www.omc.cat/ca/w/transit-bcn?filterCategoryId=786319>
- [61] M. y A. U. Ministerio de Transporte, “Mapa de tráfico de DGT - Año 2020,” 2020. <https://mapas.fomento.gob.es/mapatrafico/2020/>
- [62] Wikipedia, “Drag (Physics),” Feb. 15, 2023. [https://en.wikipedia.org/wiki/Drag\\_\(physics\)#Aerodynamics](https://en.wikipedia.org/wiki/Drag_(physics)#Aerodynamics)
- [63] PTC, “Definiciones sobre la turbulencia (Creo Flow Analysis).” [https://support.ptc.com/help/creo/creo\\_pma/r9.0/spanish/index.html#page/simulate/cfd/Definition\\_2.html](https://support.ptc.com/help/creo/creo_pma/r9.0/spanish/index.html#page/simulate/cfd/Definition_2.html) (accessed May 07, 2023).
- [64] motor.es, “Influencia de la aerodinámica en los coches,” Feb. 2023. <https://www.motor.es/que-es/aerodinamica>

- [65] Bahía Tránsito, “Dimensiones vehículos de carga,” Jan. 2023.  
[https://www.bahia.gob.ar/conducir/test/i15/#:~:text=Cami%C3%B3n%20simple%3A%20trece%20metros%20con,\(20%2C50%20m.\)](https://www.bahia.gob.ar/conducir/test/i15/#:~:text=Cami%C3%B3n%20simple%3A%20trece%20metros%20con,(20%2C50%20m.))
- [66] SON DE LED - MUNDO LEDS, “Lámparas de vapor de sodio vs LED,” Dec. 2022.  
<https://sondeled.es/lamparas/lamparas-de-vapor-de-sodio-vs-led/>
- [67] ILUMINICA, “¿Cómo reemplazar luminarias de vapor de sodio por luminarias LED?”  
<http://iluminica.com/como-reemplazar-luminarias-de-vapor-de-sodio-por-luminarias-led/>
- [68] CARANDINI, “VEKA L CARANDINI.”
- [69] CARANDINI, “Data Sheet del model VEKA.”
- [70] METRIKA Led Technology, “Luminària LED Túnel.”  
<https://metrika.company/tienda/producto/iluminacion-tunel/luminaria-tunel-led-metrika-100w/>
- [71] AliExpress, “Alternador CA Turbina Eólica 200kW,” May 2023.  
[https://es.aliexpress.com/item/1005005104580581.html?spm=a2g0o.detail.1000013.3.26048e87i7fPiM&gps-id=pcDetailBottomMoreThisSeller&scm=1007.13339.291025.0&scm\\_id=1007.13339.291025.0&scm-url=1007.13339.291025.0&pvid=b60ddfe7-6446-4c93-b1fa-1f4cdf746d3e&\\_t=gps-id:pcDetailBottomMoreThisSeller,scm-url:1007.13339.291025.0,pvid:b60ddfe7-6446-4c93-b1fa-1f4cdf746d3e,tpp\\_buckets:668%232846%238107%231934&issee=y&pdp\\_npi=3%40dis%21EUR%216942.13%213123.96%21%21%21%21%21%21%40211b5e2216866947303584018e5f74%2112000032359951160%21rec%21ES%21](https://es.aliexpress.com/item/1005005104580581.html?spm=a2g0o.detail.1000013.3.26048e87i7fPiM&gps-id=pcDetailBottomMoreThisSeller&scm=1007.13339.291025.0&scm_id=1007.13339.291025.0&scm-url=1007.13339.291025.0&pvid=b60ddfe7-6446-4c93-b1fa-1f4cdf746d3e&_t=gps-id:pcDetailBottomMoreThisSeller,scm-url:1007.13339.291025.0,pvid:b60ddfe7-6446-4c93-b1fa-1f4cdf746d3e,tpp_buckets:668%232846%238107%231934&issee=y&pdp_npi=3%40dis%21EUR%216942.13%213123.96%21%21%21%21%21%21%40211b5e2216866947303584018e5f74%2112000032359951160%21rec%21ES%21)
- [72] Amazon, “Alternador Trifásic 10000W FEICHANGHAO,” May 15, 2023.  
[https://www.amazon.es/FEICHANGHAO-Generador-Permanente-Alternador-Controlador/dp/B0B5YY6VSD/ref=asc\\_df\\_B0B5YW8BBC/?tag=googshopes-21&linkCode=df0&hvadid=618911583990&hvpos=&hvnetw=g&hvrnd=1837070289367154683&hvppone=&hvptwo=&hvqmt=&hvdev=c&hvdvcmdl=&hvlocint=&hvlochy=1005423&hvtargid=pla-1754814382491&th=1](https://www.amazon.es/FEICHANGHAO-Generador-Permanente-Alternador-Controlador/dp/B0B5YY6VSD/ref=asc_df_B0B5YW8BBC/?tag=googshopes-21&linkCode=df0&hvadid=618911583990&hvpos=&hvnetw=g&hvrnd=1837070289367154683&hvppone=&hvptwo=&hvqmt=&hvdev=c&hvdvcmdl=&hvlocint=&hvlochy=1005423&hvtargid=pla-1754814382491&th=1)

- [73] Google Maps, “Localització mesura mitjana,” 2023. <https://www.google.es/maps/@41.4639657,2.2378045,18z> (accessed May 15, 2023).
- [74] i-Ciencias, “Número de Reynolds y fuerza de Inercia,” Oct. 08, 2013. <https://www.i-ciencias.com/pregunta/35946/numero-de-reynolds-y-fuerza-de-inercia> (accessed May 15, 2023).
- [75] Wikipedia, “Número de Reynolds,” Sep. 13, 2022. [https://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero\\_de\\_Reynolds](https://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero_de_Reynolds) (accessed May 15, 2023).
- [76] IELOGIS, “Número de Reynolds: Qué es y cómo se calcula,” Aug. 26, 2022. <https://ielogis.com/numero-reynolds-calculo/> (accessed May 12, 2023).
- [77] Aerodinámica F1, “¿Qué es el número de Reynolds?,” Oct. 12, 2020. <https://www.aerodinamicaf1.com/2020/10/que-es-el-numero-de-reynolds/> (accessed May 18, 2023).
- [78] Airfoils Tools, “Airfoils Data.” [http://www.airfoiltools.com/search/index?m\[textSearch\]=&m\[maxCamber\]=&m\[minCamber\]=&m\[maxThickness\]=&m\[minThickness\]=&m\[grp\]=naca4d&m\[sort\]=1&m\[page\]=2&m\[count\]=30](http://www.airfoiltools.com/search/index?m[textSearch]=&m[maxCamber]=&m[minCamber]=&m[maxThickness]=&m[minThickness]=&m[grp]=naca4d&m[sort]=1&m[page]=2&m[count]=30) (accessed May 22, 2023).
- [79] ElPrecioDeLaLuz.es, “Preu de la llum.” <https://www.elpreciodelaluz.es/>