



Escola Politècnica Superior  
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# TREBALL FINAL DE GRAU

**TÍTOL: ESTUDI, DISSENY I COMPARATIVA DE TRES GENERADORS EÒLICS PER AUTOCONSUM DE 2KW, 4KW i 8KW DE POTÈNCIA NOMINAL**

**AUTOR: GALIMANY URPI, FERRAN**

**DATA DE PRESENTACIÓ: OCTUBRE, 2021**

**COGNOMS: GALIMANY URPI**

**NOM: FERRAN**

**TITULACIÓ: ENGINYERÍA MECÀNICA**

**PLA: 2021**

**DIRECTOR: HERNÁN ALBERTO GONZÁLEZ ROJAS**

**DEPARTAMENT: ENGINYERÍA MECÀNICA (712)**

**QUALIFICACIÓ DEL TFG**

**TRIBUNAL**

**PRESIDENT**

**SECRETARI**

**VOCAL**

**DATA DE LECTURA:**

**Aquest projecte té en compte aspectes mediambientals:  Sí  No**

## RESUM

Aquest projecte consta per una part inicial en la qual es fa un petit resum de la història de l'energia eòlica des de l'antic Egipte fins a l'actualitat, donant especial rellevància als principals investigadors d'aquest camp. Seguidament es fa una petita explicació sobre els conceptes i fonaments que intervenen en l'energia eòlica.

Començant per com es formen els moviments d'aire a nivell planetari, es donen a conèixer les forces aerodinàmiques que actuen sobre un cos envoltat per un fluid i se'n presenten les principals fórmules pel càlcul d'aquestes. Finalment, en aquest mateix apartat, es fa una explicació dels diferents tipus de turbines eòliques que existeixen i de les parts que estan formades.

En el següent apartat es fa una explicació pas per pas del funcionament del software *QBlade* utilitzat posteriorment pel disseny de les turbines que s'han establert com objecte d'estudi.

En l'apartat de càlculs i dimensionat, es comença fent una comparació de diferents perfils alars per tal de trobar l'òptim dins una selecció de perfils mitjançant l'eina *Airfoiltools* juntament amb *QBlade*. Un cop decidit el perfil a utilitzar, es procedeix a realitzar uns càlculs aproximats per tal d'esbrinar les dimensions aproximades que necessita tenir cada una de les tres turbines eòliques. Amb aquestes dades es comença el disseny i la simulació mitjançant *QBlade*.

*Un cop obtinguts els resultats de la simulació amb les dades inicials, es comparen les dades obtingudes amb les desitjades i es procedeix a optimitzar les pales de la turbina mitjançant les eines proporcionades pel propi software. Amb aquestes dades optimitzades s'arriba a la obtenció dels resultats de potència dependent de la velocitat del vent, les corbes de relació del coeficient de potència amb el tip speed ratio i el diàmetre del rotor corregit.*

Seguidament s'estudia un exemple d'una possible ubicació d'una turbina eòlica, tenint en compte les dades dels atlas eòlics i la distribució de Weibull per tal de determinar la potència que podrien generar les turbines eòliques dissenyades en aquest projecte.

Finalment es donen les conclusions extretes de l'estudi, el disseny i la possibilitat de l'ús de l'energia eòlica per autoconsum en zones aïllades.

### Paraules clau:

QBlade	Airfoiltools	Turbina eòlica	Perfil alar
Forces aerodinàmiques	Coeficient de potència	<i>Tip speed ratio</i>	Distribució de Weibull

## ABSTRACT

This project consists of an initial part in which a small summary of the history of wind energy from ancient Egypt to the present day is made, giving special relevance to the main researchers in this field. After this a small explanation of the concepts and foundations involved in wind energy.

Starting with how air movements are formed at a planetary scale, the aerodynamic forces that act on a body surrounded by a fluid are explained and the main formulas for calculating them are presented. Finally, in the same section, an explanation is made about the different types of wind turbines that exist and the parts which are formed.

In the following section, an explanation is made step by step of the operation of the QBlade software later used for the design of the turbines that have been established as object of study.

The section of calculations and sizing begins by comparing different wing profiles in order to find the optimum shape in a selection of profiles using the Airfoiltools tool together with QBlade. Once the profile to be used has been established, approximate calculations are carried out in order to find out the approximate dimensions that each of the three wind turbines needs to have. With this data begins the design and simulation with QBlade.

Once the results of the simulation have been obtained with the initial data, this data is compared with the desired ones and the turbine blades are optimized using the tools provided by the software itself. With these optimized data, the results of power are obtained depending on the wind speed, the ratio curves of the power coefficient with the speed ratio type and the diameter of the corrected rotor.

The following topic is an example of a possible location of a wind turbine, taking into account the data of the wind atlas and the Weibull distribution in order to determine the power that the wind turbines designed in this project could generate.

Finally, the conclusions drawn from the study are presented, the design and the possibility of the use of wind energy for self-consumption in isolated areas are given

### Keywords:

QBlade	Airfoiltools	Wind turbine	Wing profiles
Aerodynamic forces	Power coefficient	Tip speed ratio	Weibull distribution

## SUMARI

1. Introducció .....	10
1.1. Objectius: .....	10
1.2. Motivació .....	11
2. Energia eòlica .....	12
2.1. Història .....	12
2.2. Conceptes i fonaments .....	15
2.2.1. El vent .....	15
2.2.2. Forces aerodinàmiques .....	16
2.2.3. Potència extraïble .....	17
2.2.4. Tip speed ratio .....	18
2.3. Tipus de turbines eòliques .....	18
2.3.1. Turbines d'eix vertical (VAWT) .....	18
2.3.2. Turbines d'eix horitzontal (HAWT) .....	19
2.4. Parts d'una turbina eòlica d'eix horitzontal .....	19
2.4.1. Rotor .....	19
2.4.2. Naveta .....	20
2.4.3. Torre .....	21
2.4.4. Fonaments .....	21
2.5. Obtenció de dades .....	22
3. Funcionament del software <i>QBlade</i> .....	24
3.1. Airfoil design .....	24
3.2. XFOIL Direct Analysis .....	26
3.3. Polar extrapolation to 360° .....	29
3.4. HAWT Rotorblade Design .....	30
3.5. Rotor BEM Simulation .....	32
3.6. Multi Parameter BEM Simulation .....	33
3.7. Turbine BEM Simulation .....	36
4. Càlculs i dimensionat .....	38
4.1. Condicions de treball .....	38
4.2. Elecció del perfil de les pales .....	38
4.2.1. Càlcul del nombre de Reynolds: .....	39
4.2.2. Comparació dels perfils alars .....	39
4.3. Dimensionat de les pales .....	45
4.3.1. Aproximació inicial de les dimensions de les pales .....	45
4.3.2. Coeficients de potència i <i>tip speed ratio</i> .....	46
4.3.3. Optimització del perfil i potència generada .....	49
4.3.4. Correccions del dimensionat .....	54
5. Exemple d'ubicació d'una instal·lació de mini eòlica .....	61

6. Conclusions .....	65
7. Bibliografia.....	66

## SUMARI DE FIGURES

Figura 2.1: Molins de vent datats del 700 dC a l'actual Afganistan. Font: thecivilengineer.org.....	12
Figura 2.2: Molins de vent del segle XVI a Castilla la Mancha. Font: ngenespanol.com .....	12
Figura 2.3: Portada de la revista Scientific American de l'any 1890 amb el disseny de turbina eòlica de Charles F. Brush. Font: (Lynn, 2012) .....	13
Figura 2.4: Parc eòlic de Belmonte a Astúries. Font: fundacionendesa.org.....	14
Figura 2.5: Disseny de l'aerogenerador Vortex Bladeless i simulació de l'efecte estela. Font: vortexbladeless.com .....	14
Figura 2.6: Circulació atmosfèrica de l'aire. Font: ceupe.com .....	15
Figura 2.7: Mapa isobàric de la zona de l'oceà Atlàntic i part d'Europa. Font: aemet.es .....	16
Figura.2.8: Diagrama de forces sobre un perfil alar. Font: (Gasch & Twele, 2011) .....	16
Figura 2.9: Flux d'aire a través d'una turbina ideal de Betz. Font: (Gasch & Twele, 2011) .....	17
Figura 2.10: Disseny i flux d'aire en un aerogenerador Savonius. Font: wikipedia.org	18
Figura 2.11: Aerogenerador Darrieus. Font: wikipedia.org .....	19
Figura 2.12: Imatge de les parts d'un rotor i interior de la naveta. Font: worldenergytrade.com .....	20
Figura 2.13: Parc eòlic offshore. Font: energynews.es.....	21
Figura 2.14: Diferents mètodes d'ancoratge dels aerogeneradors offshore al terra marí. Font: ec.europa.eu.....	22
Figura 2.15: Mapa eòlic de Catalunya a una alçada de 100 metres i rosa dels vents a Vilanova i la Geltrú. Font: mapaeolicoiberico.com.....	22
Figura 2.16: Torre pel càlcul de la intensitat i freqüència de vent. Font: iter.es .....	23
Figura 2.17: Imatge d'un anemòmetre amb vela per calcular la intensitat i direcció del vent. Font: meteorologiaenred.com.....	23
Figura 4.1: Comparació de perfils alars NACA. Font: Airfoiltools.com .....	40
Figura 4.2: Distribució de pressions i característiques del perfil NACA 0012 extret del QBlade .....	43
Figura 4.3: Distribució de pressions i característiques del perfil NACA 0015 extret del QBlade .....	43
Figura 4.4: Distribució de pressions i característiques del perfil NACA 1410 extret del QBlade .....	43
Figura 4.5: Distribució de pressions i característiques del perfil NACA 2414 extret del QBlade .....	44
Figura 4.6: Distribució de pressions i característiques del perfil NACA 4412 extret del QBlade .....	44
Figura 4.7: Disseny inicial mitjançant QBlade de la pala de la turbina de 2kW.....	47
Figura 4.8: Disseny inicial mitjançant QBlade de la pala de la turbina de 4kW.....	48
Figura 4.9: Disseny inicial mitjançant QBlade de la pala de la turbina de 8kW.....	49
Figura 4.10: Disseny optimitzat mitjançant QBlade de la pala de la turbina de 2kW ...	50
Figura 4.11: Disseny optimitzat mitjançant QBlade de la pala de la turbina de 4kW ...	51
Figura 4.12: Disseny optimitzat mitjançant QBlade de la pala de la turbina de 8kW ...	53
Figura 4.13: Disseny optimitzat corregit mitjançant QBlade de la pala de la turbina de 2kW .....	55
Figura 4.14: Relació del coeficient de potència vers el tip speed ratio per la turbina de 2kW .....	55
Figura 4.15: Disseny optimitzat corregit mitjançant QBlade de la pala de la turbina de 4kW .....	57
Figura 4.16: Disseny optimitzat corregit mitjançant QBlade de la pala de la turbina de 8kW .....	59

Figura 5.1: Mapa eòlic a una alçada de 50 metres de la zona del Perelló. Font: mapaeolicoiberico.com .....	61
Figura 5.2: Rosa dels vents de la zona del Perelló. Font: mapaeolicoiberico.com .....	62
Figura 5.3: Distribució de Weibull de la densitat de vent de la zona del Perelló. Font: mapaeolicoiberico.com .....	62

## SUMARI DE GRÀFICS

Gràfic 2.1: coeficient de potencia vers el tip speed ratio per a diferents nombres de pales. Font: diva-portal.org .....	19
Gràfic 4.1: Relació Lift – Drag vers l'angle d'atac. Font: Airfoiltools.com .....	42
Gràfic 4.2: Relació "Lift – Drag" vers l'angle d'atac extret del QBlade .....	45
Gràfic 4.3: Corba del coeficient de potència vers el tip speed ratio de l'aproximació inicial de la turbina de 2 kW .....	47
Gràfic 4.4: Corba del coeficient de potència vers el tip speed ratio de l'aproximació inicial de la turbina de 4 kW .....	48
Gràfic 4.5: Corba del coeficient de potència vers el tip speed ratio de l'aproximació inicial de la turbina de 8 kW .....	49
Gràfic 4.6: Relació de la potencia vers la velocitat del vent per diferents velocitats de rotació pel disseny optimitzat de la turbina de 2kW.....	50
Gràfic 4.7: Relació de la potencia vers la velocitat del vent per diferents velocitats de rotació pel disseny optimitzat de la turbina de 4kW.....	52
Gràfic 4.8: Relació de la potencia vers la velocitat del vent per diferents velocitats de rotació pel disseny optimitzat de la turbina de 8kW.....	53
Gràfic 4.9: Relació de la potencia vers la velocitat del vent amb limitació de potència per la turbina de 2kW.....	56
Gràfic 4.10: Relació del coeficient de potència vers el tip speed ratio per la turbina de 4kW .....	57
Gràfic 4.11: Relació de la potencia vers la velocitat del vent amb limitació de potència per la turbina de 4kW.....	58
Gràfic 4.12: Relació del coeficient de potència vers el tip speed ratio per la turbina de 8kW .....	59
Gràfic 4.13: Relació de la potencia vers la velocitat del vent amb limitació de potència per la turbina de 8kW.....	60

## SUMARI DE TAULES

Taula 4.1: Perfils NACA 0012 amb Reynolds 100.000 i 200.000. Font: Airfoiltools.com .....	40
Taula 4.2: Perfils NACA 0015 amb Reynolds 100.000 i 200.000. Font: Airfoiltools.com .....	41
Taula 4.3: Perfils NACA 1410 amb Reynolds 100.000 i 200.000. Font: Airfoiltools.com .....	41
Taula 4.4: Perfils NACA 2414 amb Reynolds 100.000 i 200.000. Font: Airfoiltools.com .....	41
Taula 4.5: Perfils NACA 4412 amb Reynolds 100.000 i 200.000. Font: Airfoiltools.com .....	42



## GLOSSARI DE SÍMBOLS

$\alpha_A$	°	Angle d'atac
$A$	—	Paràmetre "A" de Weibull
$b$	$m$	Llargada de la pala
$c$	$m$	Corda del perfil alar
$c_L$	—	Coefficient de sustentació
$c_D$	—	Coefficient de fregament
$C_{P\ max}$	—	Coefficient de potencia màxima
$C_{P,\ real}$	—	Coefficient de potència real
$D$	$m$	Diàmetre del rotor
$\varepsilon$	—	Relació sustentació-fregament
$F_D$	$N$	Força de fregament o <i>Drag</i>
$F_L$	$N$	Força de sustentació o <i>Lift</i>
$k$	—	Paràmetre "k" de Weibull
$\eta_{\text{perfil}}$	—	Rendiment del perfil
$\eta_{\text{tip}}$	—	Rendiment del <i>tip speed ratio</i>
$\lambda_D$	—	<i>Tip speed ratio</i>
$\rho$	$kg/m^3$	Densitat de l'aire
$P$	—	Probabilitat
$P_d$	$W$	Potència disponible
$P_{\text{ext}}$	$W$	Potència extraïble
$P_{\text{real}}$	$W$	Potència real
$R$	$m$	Radi del rotor
$Re$	—	Nombre de Reynolds
$S$	$m^2$	Superfície
$\Gamma$	—	Funció gamma
$\mu$	$kg/m \cdot s$	Viscositat dinàmica del fluid
$v$	$m/s$	Velocitat del vent
$\nu$	$m^2/s$	Viscositat cinemàtica del fluid
$\omega$	$rad/s$	Velocitat de gir
$z$	—	Nombre de pales de la turbina

# 1. Introducció

## 1.1. Objectius:

Els objectius principals d'aquest projecte resideixen per una banda en aprendre els factors que intervenen en l'estudi pel disseny d'una turbina eòlica i els paràmetres a tenir en compte alhora de dissenyar-la, per altra banda aprendre el funcionament i fer una explicació de com utilitzar un software utilitzat a la indústria, com és el *QBlade*, que permet dissenyar turbines eòliques i extreure'n informació sobre la seva aerodinàmica i per tant saber identificar tots els indicadors i gràfics que mostra per poder-los contrastar amb els càlculs previs realitzats en l'estudi.

Es començarà per determinar quin perfil alar es més adient per les pales de la turbina mitjançant l'eina de *Airfoiltools*. Un cop obtingudes les dades eòliques dels perfils es realitzaran els càlculs previs per tal de determinar les dimensions aproximades que haurà de tenir cada una de les turbines eòliques per tal de generar els 2 kW, 4 kW i 8kW de potència nominal i així posteriorment validar aquestes dades i millorar-les amb l'ajuda del software *QBlade*.

Un cop s'hagin simulat els comportaments de les turbines amb les dimensions dissenyades inicialment, es procedirà a optimitzar-les amb l'ajuda de les eines integrades al software per tal de dissenyar l'angle de torsió a les pales, redissenyar les dimensions de la corda, la llargada de la pala i variar l'angle de pas i d'atac.

Finalment, per poder obtenir una referència amb dades reals de generació d'aquestes turbines, es donarà un exemple d'ubicació d'una instal·lació mini eòlica en una certa localització tenint en compte la incidència del vent que rep durant tot l'any. Per aquest estudi del emplaçament es farà ús de les eines de càlcul informàtic que proporcionen els atlas de vent del IDAE i s'utilitzaran les dades de la distribució de Weibull determinant el potencial eòlic d'aquesta localització.

## 1.2. Motivació

La producció d'energia elèctrica en tot el conjunt de l'estat espanyol, segons dades del ministeri per la transició ecològica i el repte demogràfic durant el període anual del 2019, representa un 13,5% del total d'emissions de  $CO_2$  alliberades a l'atmosfera amb 42.474 kT equivalents de  $CO_2$ .

Les principals fonts d'obtenció d'energia elèctrica a Espanya segons dades del 2018 procedeixen dels combustibles fòssils en un 43,05%, seguit de l'energia nuclear amb un 20,32% i després trobem l'energia eòlica amb un 18,54% de la producció total d'energia elèctrica amb una potència instal·lada de 23.405 MW que representa la major font d'energia renovable amb un 45%, seguit de l'energia hidràulica amb un 39% i la solar fotovoltaica amb un 9%.

Actualment el sector energètic està en constant creixement degut a les altes demandes d'energia elèctrica que requereix la indústria i les grans ciutats, amb un previsible augment degut a la introducció dels vehicles elèctrics que farà augmentar el consum d'energia elèctrica a les llars. Per aquest motiu, la transició de producció d'energia utilitzant combustibles fòssils per energies renovables és vital per frenar l'avanç del canvi climàtic i és aquesta necessitat d'energia sostenible la que està ajudant a desenvolupar i millorar les tecnologies existents aconseguint augmentar la producció elèctrica de forma més eficient.

Les tecnologies d'autoconsum com les plaques solars fotovoltaïques i les turbines eòliques de baixa potència es convertiran en un element clau per tal de reduir la generació d'energia mitjançant grans centrals elèctriques i passar d'un sistema centralitzat a un de descentralitzat. L'avantatge que comportarà aquest sistema descentralitzat de producció d'energia elèctrica serà la facilitat de producció d'electricitat en zones aïllades i la disminució de distància del seu transport a la resta de la xarxa elèctrica.

## 2. Energia eòlica

### 2.1. Història

Els primers exemples d'ús de l'energia eòlica en la història de la humanitat es pot trobar a l'antic Egipte on es va començar a utilitzar aquest recurs pel transport marítim en forma de veles pels vaixells. Més endavant, al voltant del 700 dC a la zona de la Mesopotàmia, actual Afganistan, es poden trobar els primers exemples de molins de vent utilitzats per moldre el gra.



**Figura 2.1: Molins de vent datats del 700 dC a l'actual Afganistan. Font: [thecivilengineer.org](http://thecivilengineer.org)**

Al voltant del 1.200 dC apareixen referències sobre molins de vent utilitzats pels Xinesos d'eix vertical similars als Mesopotàmics però formats per veles i que s'utilitzaven a més a més pel bombeig d'aigua.

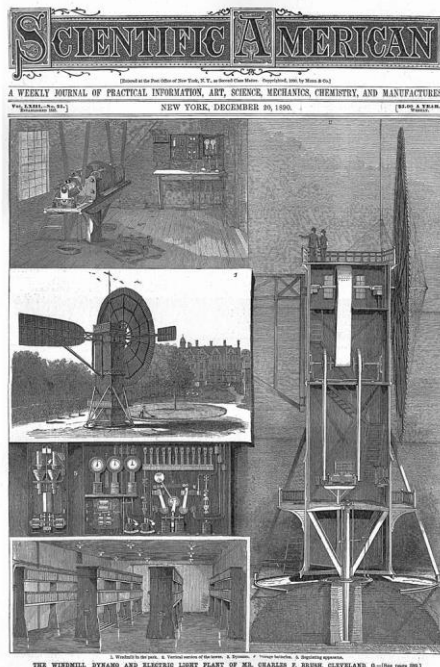
A Europa no és fins al segle XIV que es construeixen els molins tradicionals per moldre gra que encara es conserven als Països Baixos i durant el segle XVI a Espanya. Aquests molins més moderns ja no utilitzen un eix vertical sinó que el canvien per un eix horitzontal.



**Figura 2.2: Molins de vent del segle XVI a Castilla la Mancha. Font: [ngenespanol.com](http://ngenespanol.com)**

Les primeres referències científiques en l'estudi dels molins de vent apareixen amb John Smeaton, un enginyer d'Anglaterra que l'any 1759 escriu el llibre "*An Experimental Enquiry Concerning the Natural Powers of Water and Wind to Turn Mills and Other Machines Depending on Circular Motio*" i crea el coeficient de Smeaton que relaciona la pressió i la velocitats d'objectes que es mouen a través de l'aire.

Les primeres turbines eòliques utilitzades en generació d'energia elèctrica es creen l'any 1887 per James Blyth a Glasgow que crea una petita turbina eòlica d'eix vertical que s'usa per carregar unes bateries per l'enllumenat i l'any 1888 Charles F. Brush a Cleveland crea la primera turbina eòlica per generació elèctrica d'alta capacitat, formada per un eix horitzontal amb 17 metres de diàmetre i una potència de 12 kW.



**Figura 2.3: Portada de la revista Scientific American de l'any 1890 amb el disseny de turbina eòlica de Charles F. Brush. Font: (Lynn, 2012)**

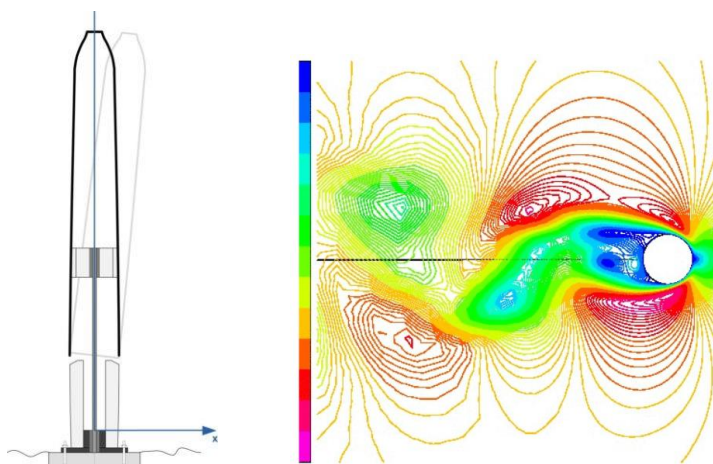
Durant la dècada del 1920 Ludwig Prandtl investiga la capa límit que es forma al voltant d'un objecte que està envoltat per un fluid i defineix el nombre de Prandtl, per altra banda, Albert Betz defineix el límit de Betz el qual teoritza que una turbina eòlica no pot ser mai capaç de transformar més del 59,3% de l'energia cinètica del vent.

Més endavant, al 1931, Georges Jean Marie Darrieus inventa un tipus d'aerogenerador que portarà el seu nom. Els aerogeneradors Darrieus consisteixen en un eix vertical amb pales corbades i que requereix de poc manteniment gràcies a la seva senzillesa per muntar el generador a la part inferior i per no necessitar elements per orientar-se al vent. Durant les dècades dels anys 1940 i 1950 s'instal·len arreu d'Europa diferents models amb diferents nombres de pales i potències però la verdadera revolució en l'estudi de la generació mitjançant energia eòlica ve entre el 1974 i el 1980 quan la NASA, arrel de la crisi del petroli amb l'increment de preus, busca formes alternatives de generació d'energia elèctrica i desenvolupa un programa per crear una indústria d'aerogeneradors a escala comercial. Es construeixen diferents dissenys experimentals tant d'eix horitzontal com d'eix vertical i s'experimenta amb diferents materials, velocitats variables i control de l'angle de pas. A partir del 1990 comença el desenvolupament de grans parcs eòlics gràcies a la capacitat de les turbines modernes de generar una major potència rendibilitzant les inversions d'aquests parcs.



**Figura 2.4: Parc eòlic de Belmonte a Astúries. Font: fundacionendesa.org**

Actualment una empresa espanyola està acabant de certificar i començant a produir unes turbines eòliques sense pales anomenades “Vortex Bladeless” que funcionen segons el principi dels Vortex de Von Karman. Aquests aerogeneradors estan formats per un màstil vertical el qual dins d'un cert rang de velocitat del vent entra amb ressonància amb oscil·la amb una certa freqüència. Aquest moviment d'oscil·lació es tradueix mitjançant un alternador en energia elèctrica.



**Figura 2.5: Disseny de l'aerogenerador Vortex Bladeless i simulació de l'efecte estela. Font: vortexbladeless.com**

Els avantatges d'aquest sistema son:

- És omnidireccional, es capaç de generar energia en qualsevol direcció de vent sense necessitar cap sistema d'orientació.
- No es necessiten frens, l'efecte de ressonància desapareix un cop la velocitat de vent puja per sobre el rang en el que està dissenyat.
- Desapareix l'efecte estela i per tant es poden instal·lar més junts el que augmenta la densitat d'aerogeneradors als parcs eòlics.
- No hi ha parts mòbils així que no es necessiten elements de lubricació i els manteniments son mes senzills.

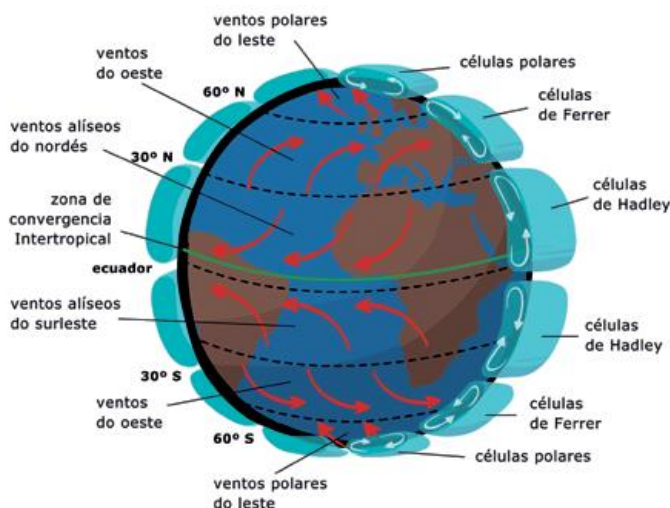
## 2.2. Conceptes i fonaments

### 2.2.1. El vent

El vent es causat pel moviment dels gasos que confereixen l'atmosfera a causa dels canvis de temperatura i pressió, formada per diferents capes cada una amb diferents concentracions de gasos i rangs de temperatura. En el cas d'estudi d'aquest projecte, la capa que ens interessa estudiar per a les aplicacions relacionades amb l'energia eòlica es la troposfera. Aquesta capa es situa des del nivell del mar fins als 11 quilòmetres d'alçada i conté el 80% de la massa total de l'atmosfera.

A escala planetària es poden observar com les masses d'aire es mouen per franges dividides en tres cèl·lules. La cèl·lula Hadley, la Ferrer i la polar. A causa de l'efecte de Coriolis a l'hemisferi nord tots els fluids tenen tendència a girar en sentit a les agulles del rellotge, mentre que a l'hemisferi sud ho fa en direcció contrària.

La radiació solar escalfa en major mesura la regió equatorial respecte als pols, això crea un corrent d'aire calent que va del equador als pols, quan les masses d'aire xoquen es veuen obligades a baixar i tanquen el cicle.



**Figura 2.6: Circulació atmosfèrica de l'aire. Font: ceupe.com**

Les forces que actuen en l'atmosfera i que creen els moviments d'aire són la gravetat, els gradients de pressió, les forces d'inèrcia (Coriolis i centrífeta) i la força de fregament o viscosa. La compensació de totes aquestes forces produeixen l'equilibri hidroestàtic.

El vent geostrofic es calcula a 2 quilòmetres d'alçada i només hi intervenen els gradients de pressió i la força de Coriolis. Amb les dades d'aquest vent geostrofic es creen els mapes isobàrics que mostren el gradient de pressió en relació a una distància i així poder calcular la velocitat d'aquest vent.

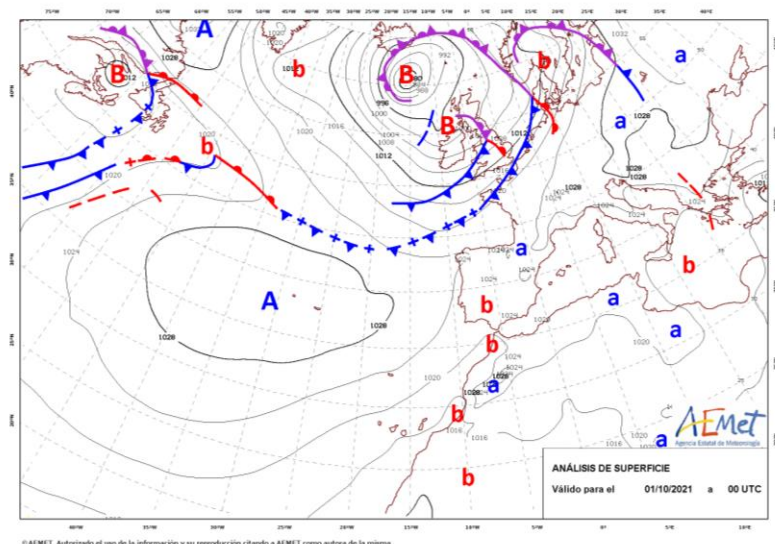


Figura 2.7: Mapa isobàric de la zona de l'oceà Atlàntic i part d'Europa. Font: aemet.es

## 2.2.2. Forces aerodinàmiques

Les forces aerodinàmiques que actuen sobre un cos es poden descompondre en forces de sustentació i forces de fregament:

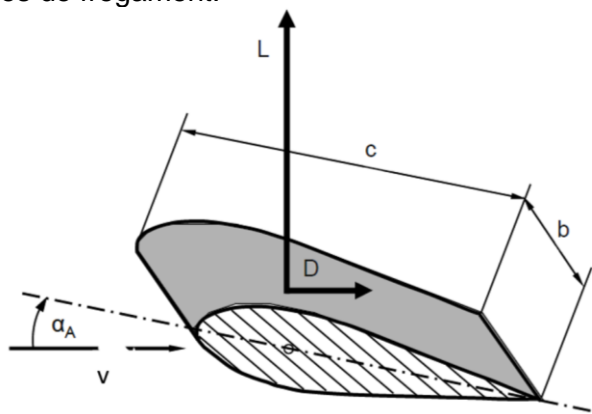


Figura.2.8: Diagrama de forces sobre un perfil alar. Font: (Gasch & Twele, 2011)

- Força de sustentació o Lift ( $F_L$ ): La força de sustentació es una força que actua perpendicularment a la direcció d'avanç del cos. La fórmula pel càlcul de la força de sustentació en un perfil alar el la següent:

$$F_L = c_L(\alpha_A) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot c \cdot b \text{ [N]} \quad [ 1 ]$$

$c_L \equiv$  coeficient de sustentació

$\alpha_A \equiv$  Angle d'atac [°]

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

$v \equiv$  Velocitat del vent [m/s]

$c \equiv$  Corda [m]

$b \equiv$  Llargada de la pala [m]

El coeficient de sustentació per cossos que no són plans és una dada que s'obté experimentalment i es pot calcular de forma aproximada amb la següent relació que varia segons l'angle d'atac.

$$c_L(\alpha) = (5,1 \sim 5,8) \alpha_A$$



- Força de fregament o *Drag* ( $F_D$ ): La força de fregament es una força que actua paral·lelament a la direcció d'avanç i que impedeix l'avanç del cos. La fórmula pel càlcul de la dorca de fregament en un perfil alar el la següent:

$$F_D = c_D(\alpha_A) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot c \cdot b \text{ [N]} \quad [ 2 ]$$

Amb el resultat de les forces de sustentació i de fregament es pot obtenir el valor de la força resultant mitjançant l'equació [3] i per altra banda es pot obtenir el valor de la relació sustentació-fregament amb l'equació [4]:

$$F = \sqrt{F_L^2 + F_D^2} \quad [ 3 ]$$

$$\varepsilon(\alpha_A) = \frac{F_L}{F_D} = \frac{c_L(\alpha_A)}{c_D(\alpha_A)} \quad [ 4 ]$$

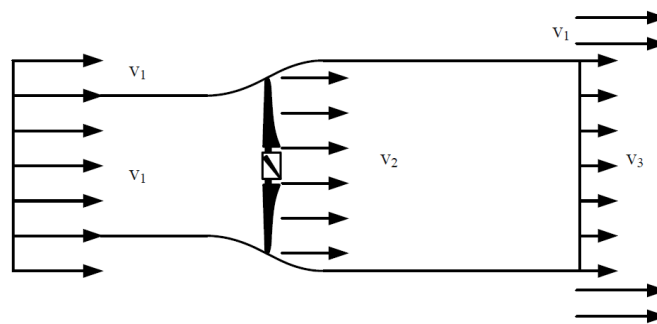
### 2.2.3. Potència extraïble

En primer lloc és important saber quina quantitat d'energia es pot extreure del vent. La potència disponible del vent dins d'una determinada superfície la podem calcular de la següent forma:

$$P_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \text{ [W]} \quad [ 5 ]$$

$P_d \equiv$  Potència disponible [W]  
 $\rho \equiv$  Densitat de l'aire [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  
 $S \equiv$  Superfície del rotor [ $\text{m}^2$ ]  
 $v \equiv$  Velocitat del vent [m/s]

La potència disponible no representa la que en realitat podem extreure del vent. Segons la teoria de Betz, si apliquem un balanç d'energia usant Bernoulli entre la secció 1-2 i la 2-3 mostrada en la *Figura 2.9* i aplicant la equació de continuïtat, veuríem que la màxima potència que podem extreure del vent es del 59.3%. Aquest coeficient s'anomena *coeficient de potència màxim* ( $c_{p \text{ max}} \approx 0,59$ ).



**Figura 2.9: Flux d'aire a través d'una turbina ideal de Betz. Font: (Gasch & Twele, 2011)**

Aplicant el coeficient de potència màxim a la equació de la potència disponible, podem extreure'n l'equació de la potència extraïble que té la següent forma:

$$P_{ext} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot 0,59 \text{ [W]} \quad [ 6 ]$$

$P_{ext} \equiv$  Potència extraïble [W]

Amb aquesta fórmula es pot obtenir una idea sobre la potència que es pot extreure d'un corrent d'aire a una certa velocitat.

## 2.2.4. Tip speed ratio

El *tip speed ratio* ( $\lambda_D$ ) és el quocient entre la velocitat lineal a la punta de la pala de la turbina i la velocitat del vent. Per tal de poder trobar el "tip speed ratio" de cada una de les nostres turbines, a més de determinar una velocitat de vent, necessitem establir quina es la velocitat a la qual girarà el rotor. En aquest cas s'escull una velocitat de gir de 300 rpm.

$$\lambda_D = \frac{\omega \cdot R}{v} \quad [7]$$

$\lambda_D \equiv$  Design tip speed ratio

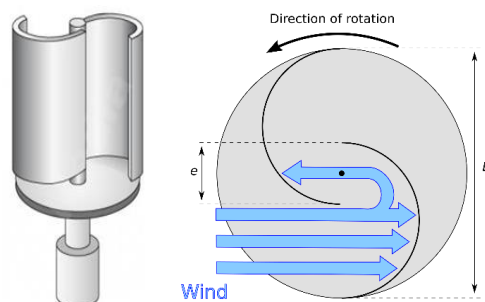
## 2.3. Tipus de turbines eòliques

Les turbines eòliques es poden classificar en dos grans grups depenent de l'orientació de l'eix de rotació.

### 2.3.1. Turbines d'eix vertical (VAWT)

Aquestes turbines, tal i com indica el seu nom, estan construïdes sobre un eix situat de forma vertical que descansa sobre el propi generador situat a la part inferior de l'estructura. Dins la família de turbines d'eix vertical en podem trobar de dos tipus:

- Savonius: És considerada la turbina més simple, formada per dues o més pales de forma còncava que atrapa l'aire en el seu interior i la fa girar. Aquesta turbina té una eficiència molt baixa i una velocitat de rotació molt lenta, per altra banda, pot funcionar amb velocitats de vent molt baixes.



**Figura 2.10: Disseny i flux d'aire en un aerogenerador Savonius. Font: wikipedia.org**

- Darrieus: Aquest tipus de turbina està formada per pales amb un perfil alar i a diferència dels aerogeneradors d'estil Savonius, les Darrieus poden generar una major potència. Per contra, la entrada en funcionament es més difícil i necessita d'un fre mecànic per parar-la.

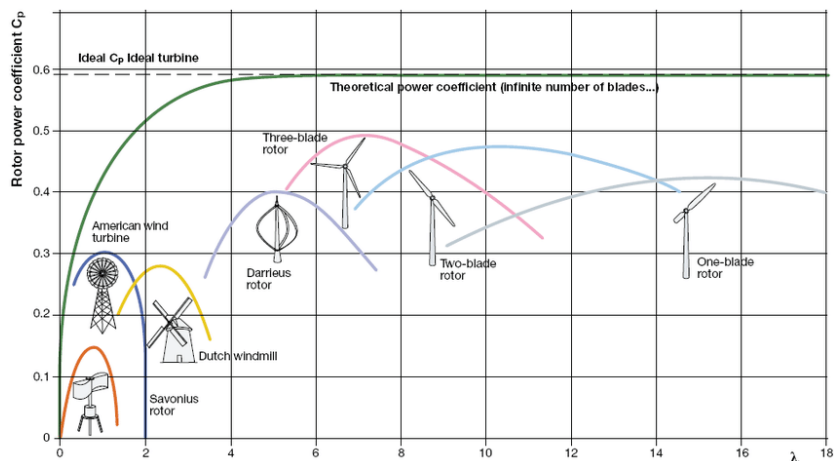


Figura 2.11: Aerogenerador Darrieus. Font: wikipedia.org

## 2.3.2. Turbines d'eix horitzontal (HAWT)

Les turbines d'eix horitzontal les podem classificar pel nombre de pales per les quals estan formades:

- Monopala: Aquests aerogeneradors estan formats per una sola pala.
- Bipala: Formats per dues pales.
- Tripala: són els més habituals, formats per tres pales formant un angle de 120° entre elles.
- Multipala: Les turbines multipala, tal i com el seu nom indica, estan formades per una gran quantitat de pales i tot i que actualment estan en desús encara es poden trobar en aplicacions com el bombeig d'aigua en un pou.



Gràfic 2.1: coeficient de potència vers el tip speed ratio per a diferents nombres de pales. Font: diva-portal.org

## 2.4. Parts d'una turbina eòlica d'eix horitzontal

### 2.4.1. Rotor

El rotor està format per les pales i la caixa. La caixa és la part encarregada d'unir les pales a l'eix principal que va a la caixa de canvis o al generador, en el cas que la turbina sigui de transmissió directe. Dins de la caixa, en el cas de les turbines més modernes,

s'hi pot trobar el sistema de variació de l'angle de pas que gira l'angle d'atac de les pales per tal de maximitzar la potència generada en relació al vent incident.

Les pales de les turbines eòliques acostumen a estar construïdes amb materials compostos com la fibra de vidre o en alumini per tal de que siguin el més lleugeres possibles i poden portar elements calefactors per evitar la formació de gel sobre seu.

## 2.4.2. Naveta

La naveta està situada a la part superior de la torre i és on s'uneix el rotor. Dins la naveta s'hi troben les parts mecàniques i elèctriques encarregades de transformar l'energia mecànica de rotació en energia elèctrica gràcies als següents mecanismes:

- Fre: Son necessaris per tal d'assegurar la seguretat en el funcionament de la turbina. Tot i que les turbines eòliques es frenen rotant les pales fins que perd completament la força de sustentació, per seguretat hi ha un sistema de fre mecànic per aturar completament el seu moviment, sobretot si s'han de fer operacions de manteniment.
- Eix de baixa velocitat: L'eix primari o de baixa velocitat es el que uneix el rotor amb la caixa de canvis i gira a la mateixa velocitat angular.
- Caixa de canvis: La caixa de canvis s'encarrega de transmetre la rotació de l'eix principal de baixa velocitat al eix secundari o d'alta velocitat per tal que el generador pugui funcionar correctament. Les turbines de transmissió directe no tenen caixa de canvis ja que l'eix primari està connectat directament a un generador capaç de generar amb una velocitat de rotació baixa.
- Eix d'alta velocitat: Uneix la caixa de canvis amb el generador.
- Generador: Es un convertidor electromecànic que transforma l'energia mecànica de rotació en energia elèctrica.
- Gòndola: Estructura que suporta tots els elements que conformen la naveta, està situada sobre una guia que permet rotar l'estructura per tal de posar-se de cara al vent anomenat mecanisme de guinyada.
- Anemòmetre i Veleta: S'utilitzen per recollir dades sobre la velocitat de vent i la direcció per tal de variar l'angle de pas o l'angle de guinyada per quedar-se de cara al vent.

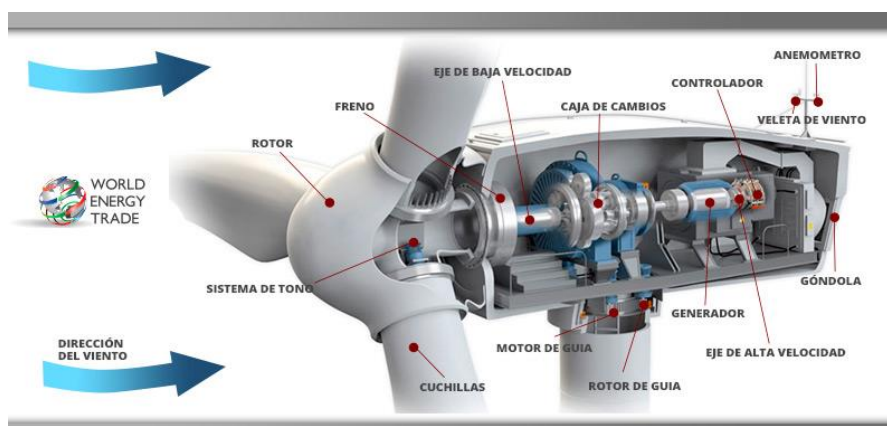


Figura 2.12: Imatge de les parts d'un rotor i interior de la naveta. Font: worldenergytrade.com

### 2.4.3. Torre

La torre d'una turbina eòlica és l'encarregada de suportar la naveta i el rotor permetent el seu accés des de l'interior mitjançant una escala o en el cas de turbines més modernes i altes un muntacàrregues. La torre està dissenyada per tal d'aguantar els esforços de flexió, torsió i vibracions que son derivades dels moments que genera el vent contra el rotor i el seu funcionament.

Estan construïdes per tubs d'acer que s'uneixen mitjançant cargols al lloc de la instal·lació per tal de facilitar el transport.

Per dins de la torre també hi circula el cablejat que transporta l'energia elèctrica generada en el generador dins de la naveta fins al transformador que acostuma a estar a la part baixa de la torre.

En el cas de les turbines *offshore* instal·lades a alta mar, aquestes torres poden arribar a tenir un heliport incorporat a la seva base per tal de facilitar l'arribada dels equips de manteniment a seu interior.

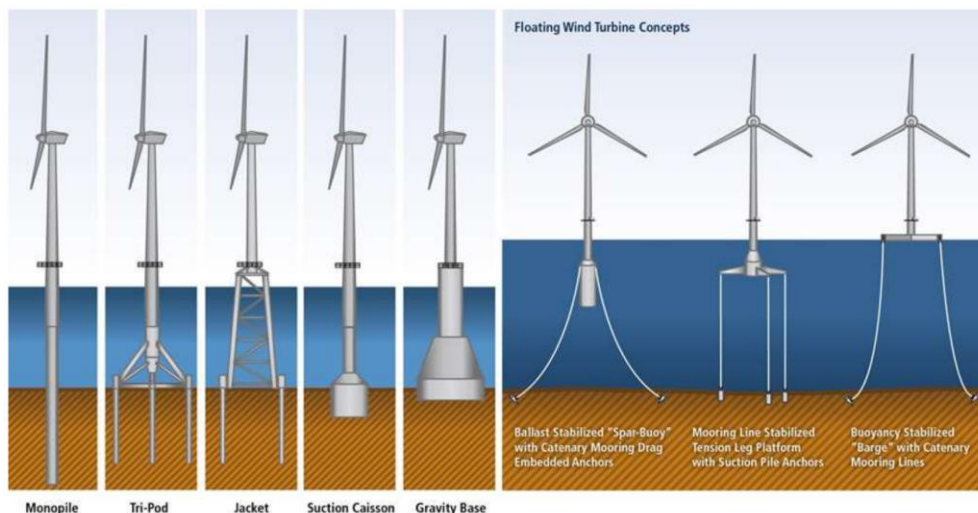


**Figura 2.13: Parc eòlic offshore. Font: energynews.es**

### 2.4.4. Fonaments

Els fonaments són la base on s'assentará l'estructura sencera i han de ser capaços d'evitar la possible bolcada de l'estructura deguda a fortes ratxes de vent. Els fonaments estan formats per grans estructures de formigó armat que s'enfonsen sota terra.

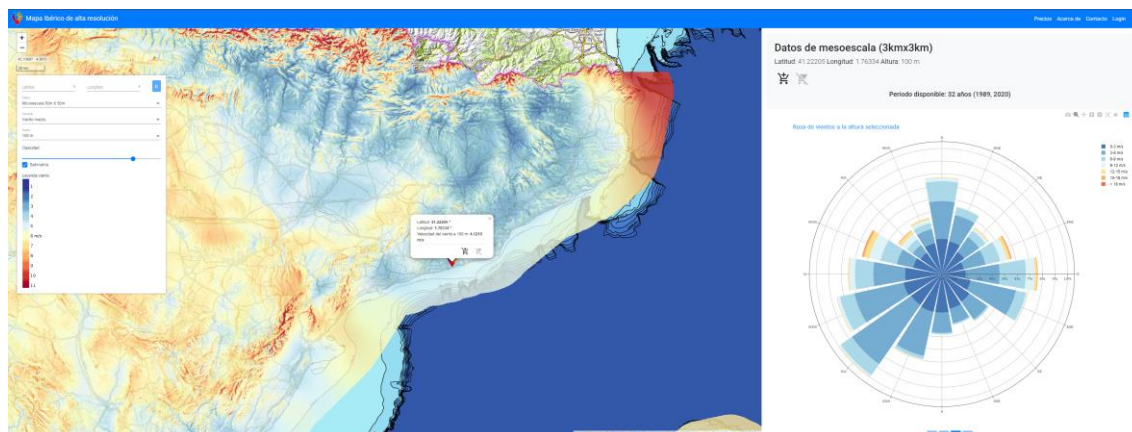
Per les turbines eòliques *offshore*, hi ha varies formes d'ancoratge o flotació de les estructures al fons marí. Aquestes dependran de la profunditat a la que es trobi el fons marí i de la complexitat d'ancoratge d'aquests fonaments.



**Figura 2.14: Diferents mètodes d'ancoratge dels aerogeneradors offshore al terra marí. Font: ec.europa.eu**

## 2.5. Obtenció de dades

Per a la projecció d'un parc eòlic o l'emplaçament de qualsevol aerogenerador, és clau conèixer el recurs eòlic disponible en la localització que es desitja. Un estudi previ es pot realitzar mitjançant els atlas eòlics disponibles en aplicacions web com poden ser [globalwindatlas.info](http://globalwindatlas.info), [map.neweuropeanwindatlas.eu](http://map.neweuropeanwindatlas.eu) o [mapaeolicoiberico.com](http://mapaeolicoiberico.com). En aquestes aplicacions web es poden extreure dades històriques eòliques capturades per estacions meteorològiques arreu del país per alçades de 50, 100 i 200 metres sobre el nivell del terreny. Quan es selecciona una ubicació, el mapa mostra la rosa dels vents per cada alçada amb la velocitat mitjana per cada direcció i la distribució de Weibull.



**Figura 2.15: Mapa eòlic de Catalunya a una alçada de 100 metres i rosa dels vents a Vilanova i la Geltrú. Font: mapaeolicoiberico.com**

Amb les dades obtingudes per aquestes aplicacions, es pot fer una estimació de la potència disponible per la ubicació desitjada i per tant, extreure'n una rendibilitat anual per aquest parc eòlic o aerogenerador.

Quan es projecta la construcció d'un parc eòlic, hi ha molts factors a tenir en compte. No solament la disponibilitat de vent es important, també hi ha factors decisius que poden fer inviable la construcció d'un parc eòlic. Alguns d'aquests impediments poden ser a causa de la falta d'accessibilitat del terreny, que l'emplaçament en qüestió estigui situat en una zona natural protegida o que no s'aconsegueixin els permisos per la negativa dels habitants propers a la zona que no volen el soroll d'aquestes turbines a prop de les seves llars o l'impacte visual que generen.

Si aquests factors mencionats anteriorment no són un impediment per a la construcció del parc eòlic, es pot procedir a la realització d'un estudi més concret de la zona exacta on es vol realitzar i de l'alçada a la qual estaran els aerogeneradors per tal d'obtenir unes dades més precises de l'emplaçament.

Per tal d'aconseguir aquestes dades es construeix una torre la qual té instal·lada anemòmetres a diferents alçades que recullen les dades eòliques, tant de la intensitat del vent com de la direcció les 24 hores durant el temps que es desitja. Finalment aquestes dades són tractades per tal d'aconseguir la rosa dels vents i la distribució de Weibull de l'emplaçament.



**Figura 2.16: Torre pel càlcul de la intensitat i freqüència de vent. Font: iter.es**

Anemòmetre: Aquest aparell s'encarrega d'agafar valors tant la velocitat del vent com de la direcció d'aquest.



**Figura 2.17: Imatge d'un anemòmetre amb vela per calcular la intensitat i direcció del vent. Font: meteorologiaenred.com**

### 3. Funcionament del software *QBlade*

El *QBlade* és un software gratuït que permet dissenyar turbines eòliques tant d'eix horitzontal com d'eix vertical que gràcies a la seva implementació amb *XFOIL* es poden dissenyar perfils alars i extreure'n les corbes polars per tal de determinar el seu rendiment.

Quan s'entra al software, el primer que cal fer és seleccionar un dels dos mòduls que són el disseny de turbines d'eix horitzontal o la d'eix vertical, tal i com es pot veure en la imatge següent:



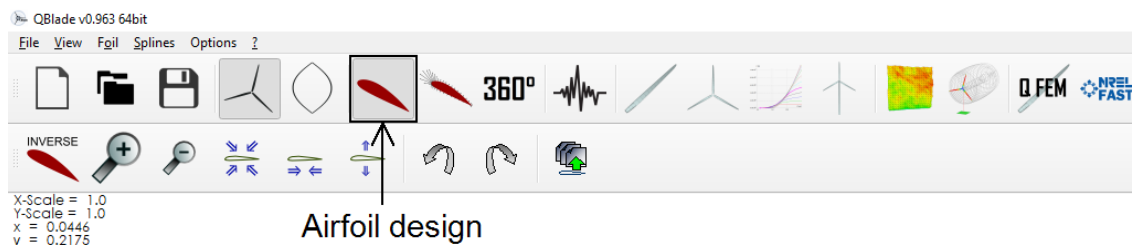
HAWT: *Horizontal Axis Wind Turbine*

VAWT: *Vertical Axis Wind Turbine*

En aquest projecte només s'explica el funcionament del mòdul per al disseny de turbines d'eix horitzontal, ja que són les que s'han utilitzat per a fer els dissenys posteriors.

Un cop seleccionada el tipus de turbina que es vol dissenyar, s'entra dins el mòdul de disseny del perfil alar.

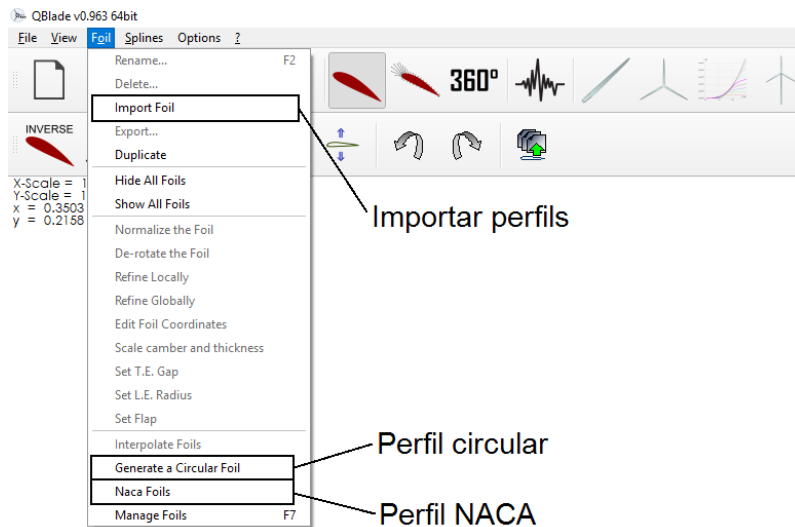
#### 3.1. Airfoil design



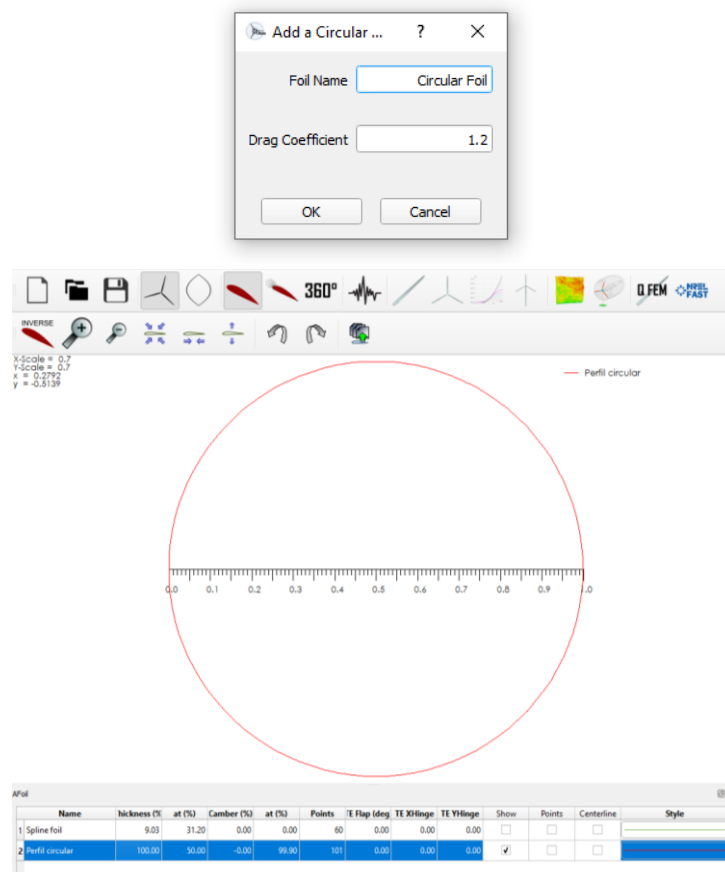
Dintre de les opcions de "Foil" es poden crear perfils circulars que s'utilitzaran per unir la pala al rotor, perfils NACA que es poden carregar introduint el codi de quatre o cinc dígits que li correspon al perfil que volem utilitzar o carregar un perfil diferent en format .dat mitjançant la opció de importar.

Per tal de trobar el perfil que s'adeqüi a les necessitats de l'aplicació es pot utilitzar l'eina *AirfoilTools* on es poden trobar tots els tipus de perfils alars de diferents fabricants i amb les seves propietats aerodinàmiques.





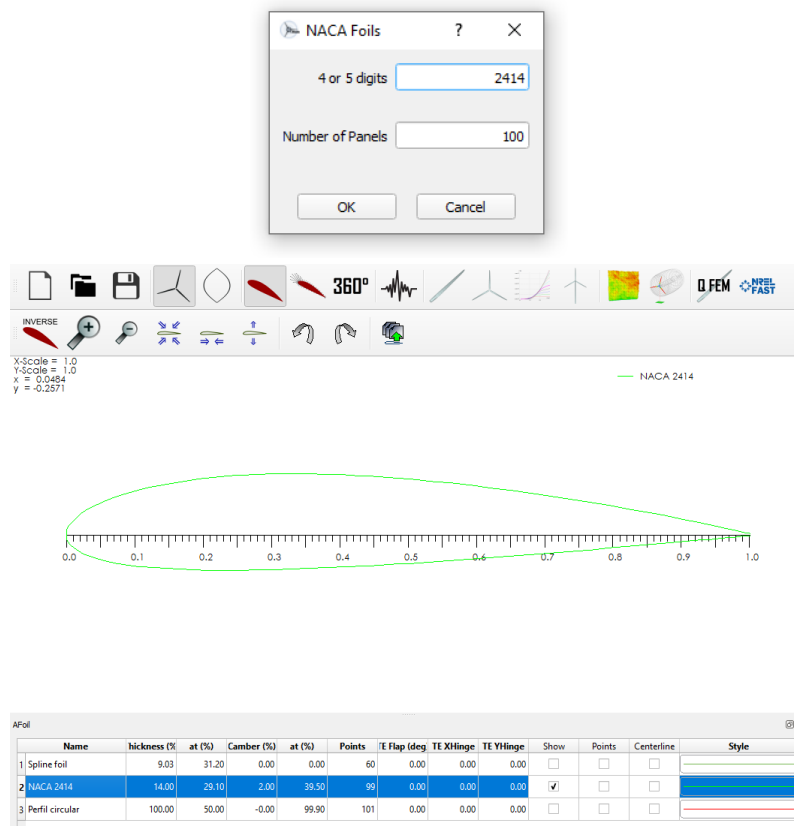
- Generar un perfil circular: Amb aquesta opció podem generar un perfil circular, canviar-li el nom i el coeficient de resistència. Per defecte, un perfil circular té una resistència al fregament de 1,2 tal i com surt per defecte.



Aquest perfil estarà a la base de la pala i es connectarà amb el rotor. Més endavant, en el mòdul de (3.4 HAWT Rotorblade Design) es definiran les mesures dels perfils.

- Generar un perfil NACA: Els perfils NACA es poden carregar utilitzant la seva pròpia nomenclatura formada per dígitos de 4 o 5 nombres o cercant el perfil en

una base de dades i carregant el fitxer .csv que conté punts de coordenades per tal que el programa pugui dibuixar el perfil de la pala. En l'exemple s'utilitza un perfil NACA 2414:

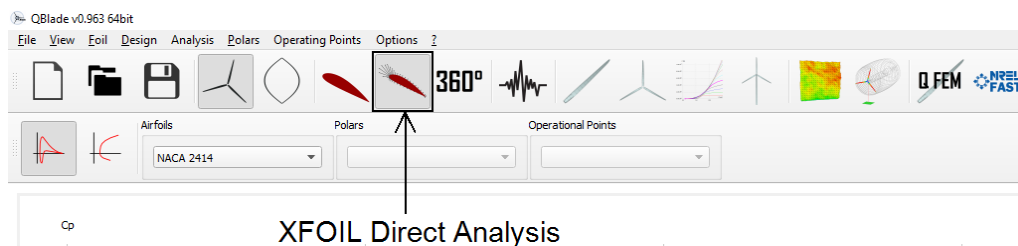


- Importar un perfil: El programa també permet importar perfils utilitzant un fitxer .csv que conté punts de coordenades per tal que el programa pugui dibuixar el perfil de la pala en dues dimensions.

Un cop es selecciona el perfil que es desitja, aquest surt representat a la pantalla de dibuix del programa.

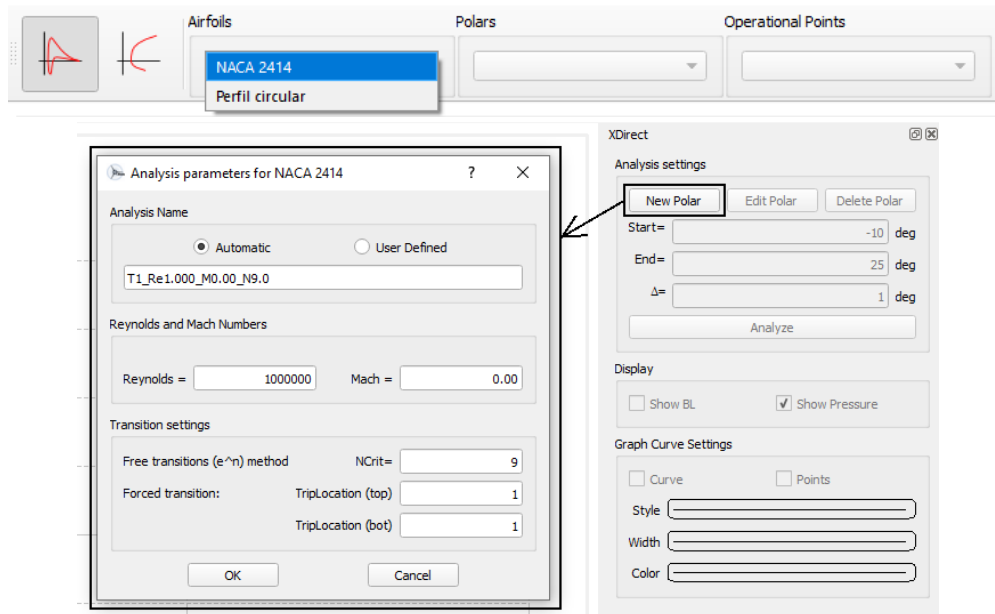
En aquest punt es poden afegir tots els perfils que es vulguin per tal de comparar-los i trobar quin ofereix les millors característiques per a la aplicació en que es vol dissenyar.

### 3.2. XFOIL Direct Analysis

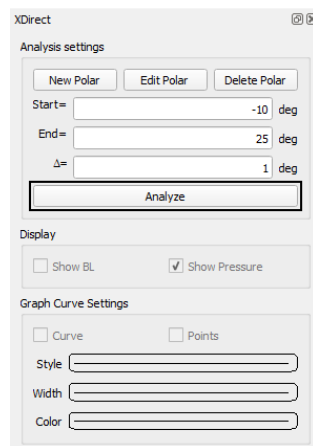


El mòdul *XFOIL Direct Analysis* calcula les característiques aerodinàmiques de cada un dels perfils donant un nombre de Reynolds i les desglossa en increments de l'angle d'atac.

Per fer la simulació el primer de tot es seleccionar sobre quin perfil es desitja fer-la i després crear una corba polar mitjançant l'opció *New Polar*.

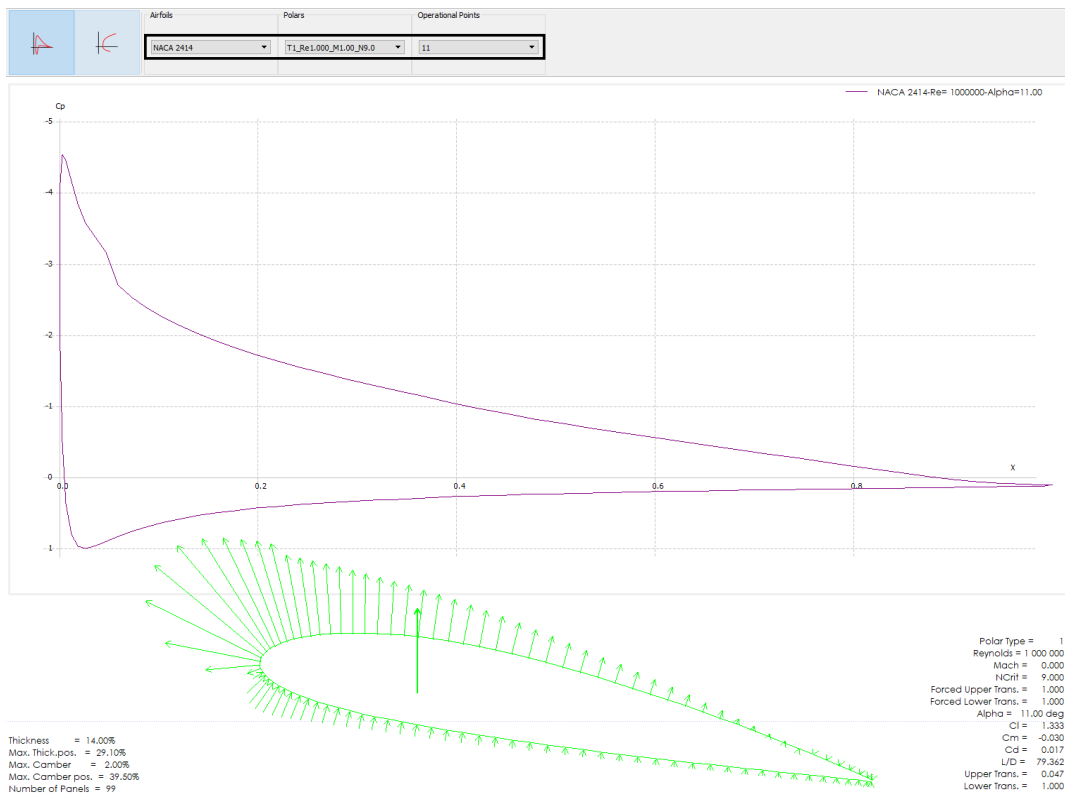


Dins de l'opció *New Polar* s'ha d'introduir el valor del nombre de Reynolds pel qual es vol estudiar el perfil. Quan es clica "OK" s'activa una finestra en el que es demana introduir el rang d'angles d'atac pels quals es vol analitzar el perfil. S'acostuma a triar un interval de  $-10^\circ$  a  $25^\circ$  amb una variació petita de l'angle.



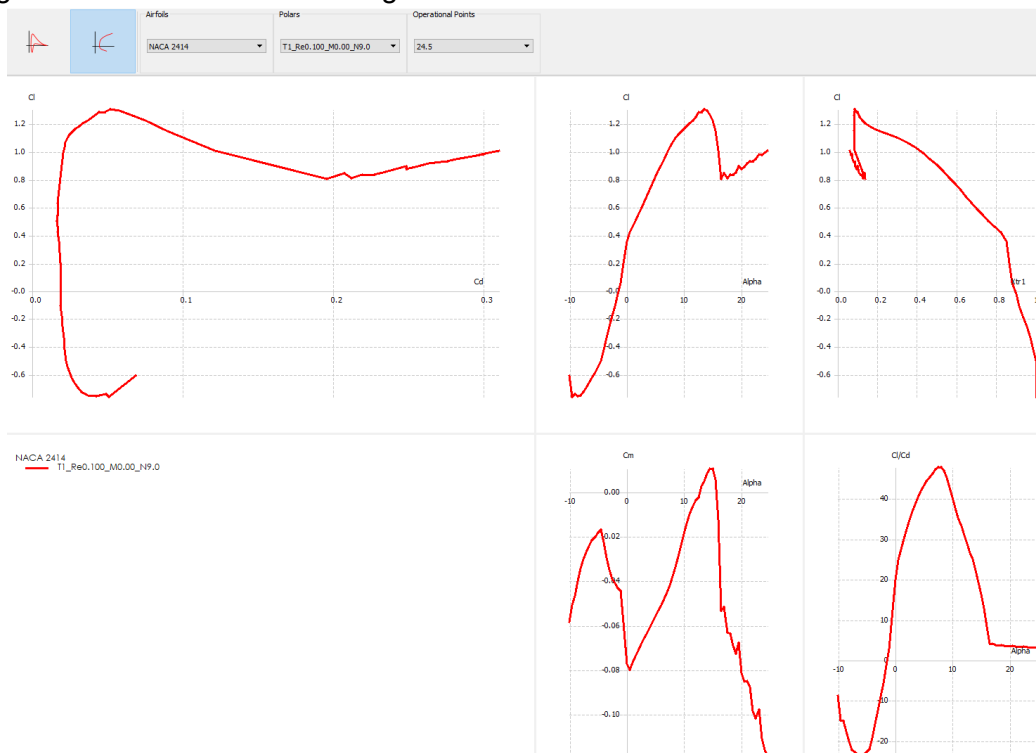
Quan es simula el perfil amb les dades aportades es mostra una gràfica amb el coeficient de potència vers la llargada de la pala. Dins la llista desplegable de "*Operational points*" podem variar l'angle d'atac de la pala amb els intervals que s'han especificat abans i actualitza la informació mostrada.

Estudi, disseny i comparativa de tres generadors eòlics per autoconsum de 2kW, 4kW i 8kW de potència nominal  
 Ferran Galimany Urpi



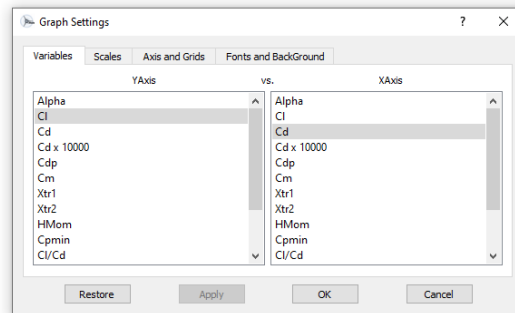
A la part inferior es mostra la distribució de pressions sobre el perfil i a la part dreta es mostren els valors numèrics dels coeficients de resistència, Reynlods i l'angle d'atac entre d'altres.

Si es selecciona la segona pestanya a la part superior esquerre, es poden visualitzar les corbes polars corresponents al perfil seleccionat obtenint els valors dels coeficients de frament i sustentació com l'angle d'atac.



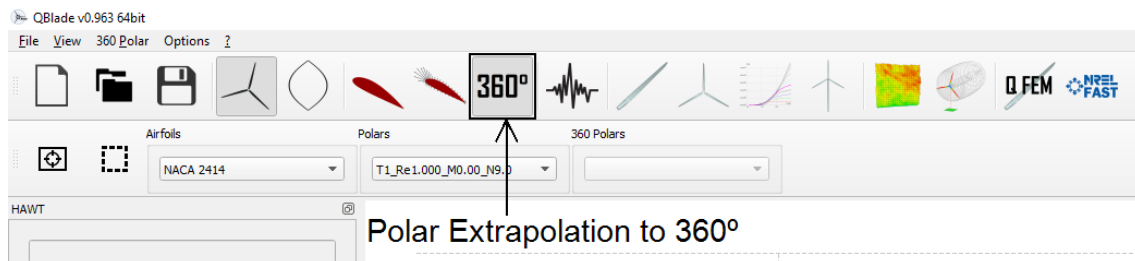
Estudi, disseny i comparativa de tres generadors eòlics per autoconsum de 2kW, 4kW i 8kW de potència nominal  
Ferran Galimany Urpi

Fent doble clic sobre qualsevol de les gràfiques s'obre una finestra on es poden canviar els coeficients dels eixos per mostrar els que més interessin.

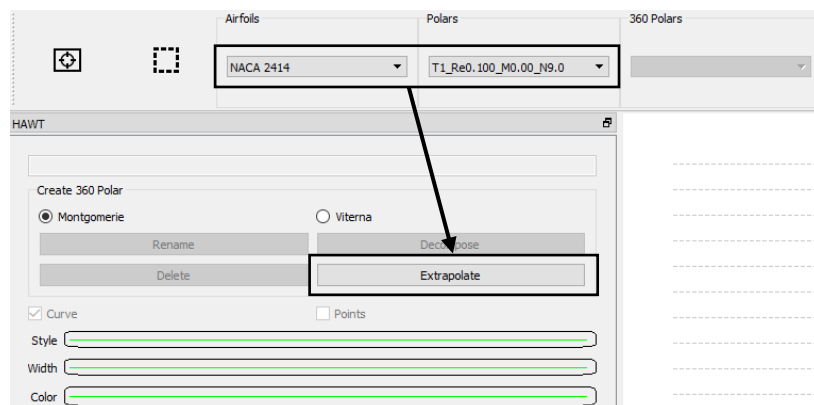


### 3.3. Polar extrapolation to 360°

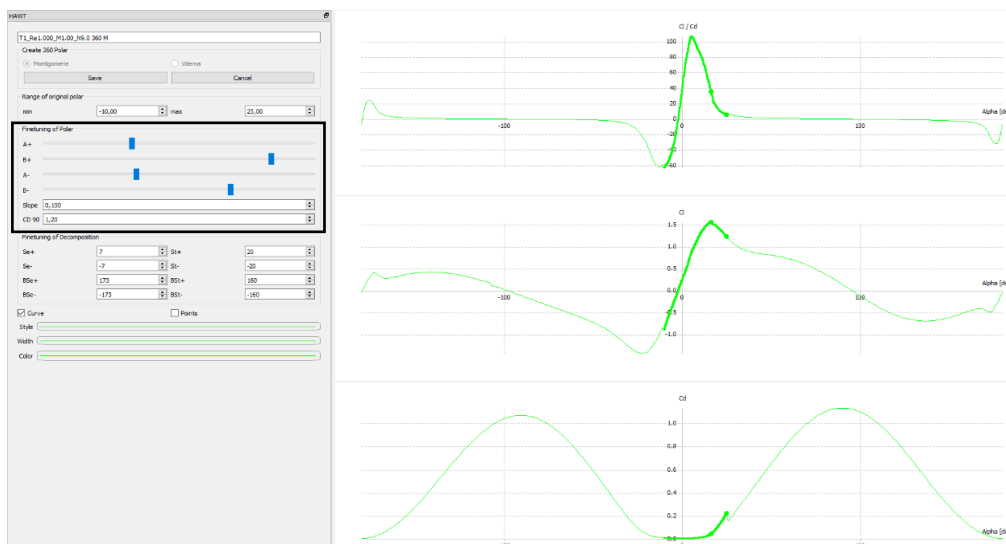
Aquest apartat és molt important ja que els valors de la polar obtinguda seran els que el programa utilitzarà per calcular en la resta de mòduls.



Per tal d'extrapolar la polar a 360°, s'ha de seleccionar el perfil i la polar de partida que es vol utilitzar i clicar a "Extrapolate".

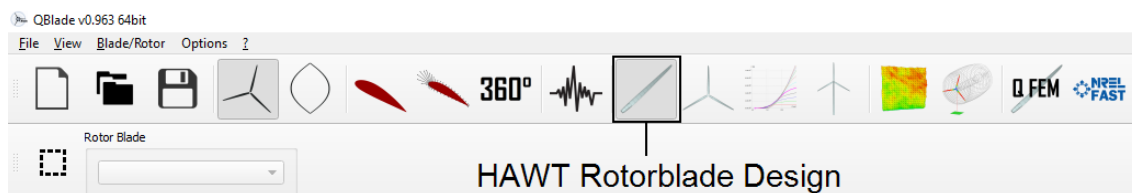


Quan s'extrapola apareix un menú a l'esquerra que permet ajustar la forma de la polar per tal de que les corbes que apareixen a la part dreta siguin contínues. Aquestes corbes representen els coeficients de sustentació i fregament vers l'angle d'atac.

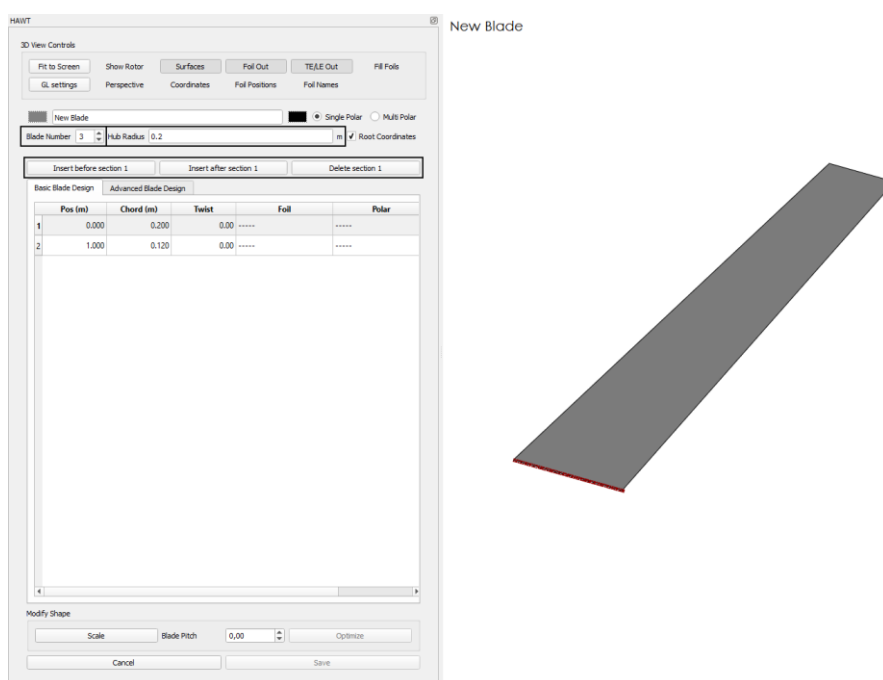


### 3.4. HAWT Rotorblade Design

Un cop obtinguda la corba polar extrapolada pel perfil que es vol estudiar es pot començar el disseny de la forma de la pala de la turbina. Pel disseny de les pales de turbines d'eix horitzontal s'utilitza el mòdul "HAWT rotorblade design".

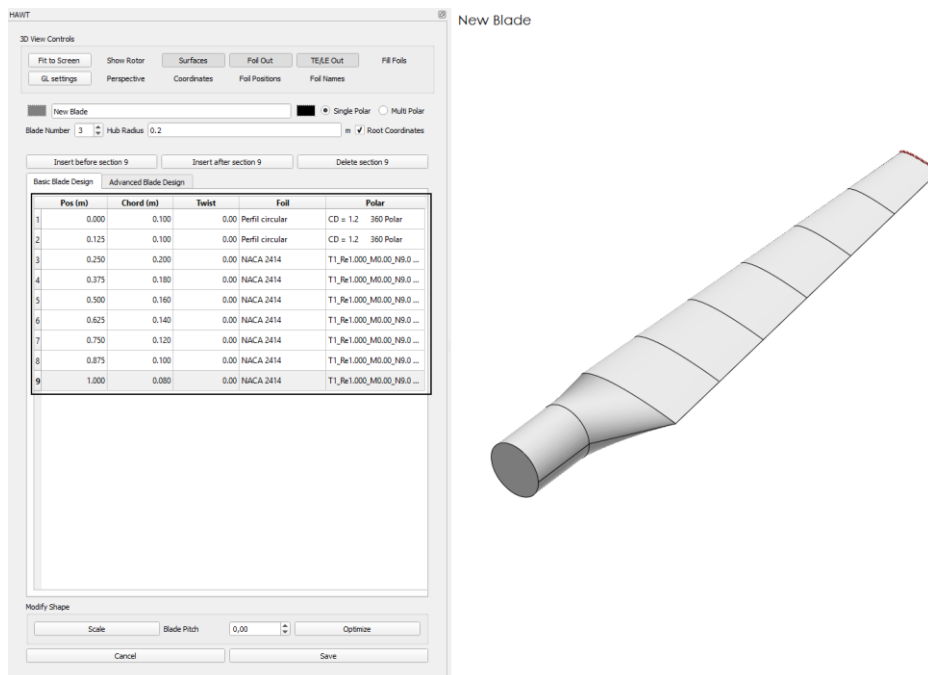


Per començar a crear la pala s'ha de seleccionar la opció "New" amb la qual apareix el menú de creació. Dins d'aquest menú es pot seleccionar el nombre de pales que es vol per la turbina, el radi de l'eix del rotor i seguidament permet afegir i eliminar seccions transversals a la pala.

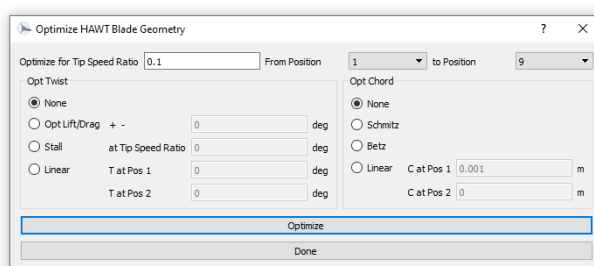


Per cada secció que es crea de la pala es pot canviar el perfil, la polar a la qual està associada, les dimensions de la corda, la posició del perfil respecte l'origen i l'angle de torsió.

En la següent imatge es pot veure un exemple de disseny d'una pala de 1 metre de radi, dividit en 9 seccions de les quals les dues primeres corresponen a perfils circulars i les següents són perfils NACA 2414.



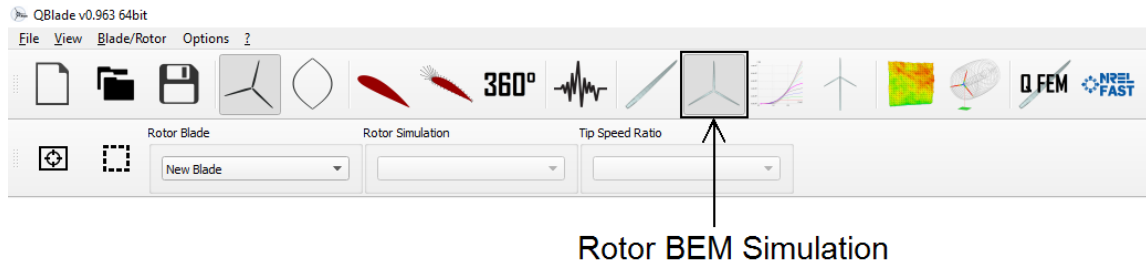
A la part inferior del menú de disseny s'hi troba la opció "Optimize" la qual permet modificar automàticament el perfil indicant un "tip speed ratio" pel qual es vol que el perfil estigui optimitzat, modificar l'angle de torsió al llarg de la pala donat un angle d'atac òptim o un "tip speed ratio" pel qual es vol que la turbina entri en pèrdua, modificar el valor de la corda segons els mètodes de Schmitz, Betz o que decreixi linealment.



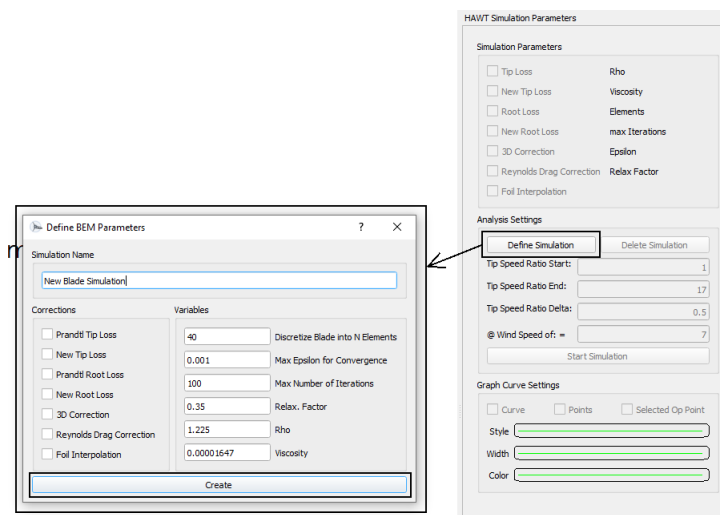
Aquesta eina es molt útil per tal de refinar els valors obtinguts inicialment i sobretot per tal d'aconseguir l'entrada en pèrdua o "Stall" de la turbina a partir d'una certa velocitat de vent.

### 3.5. Rotor BEM Simulation

El mòdul “Rotor BEM Simulation” permet simular el comportament de la turbina dissenyada donant els resultats de potència i coeficient de potència entre d’altres per cada valor de “tip speed ratio” dins d’un interval de donat.

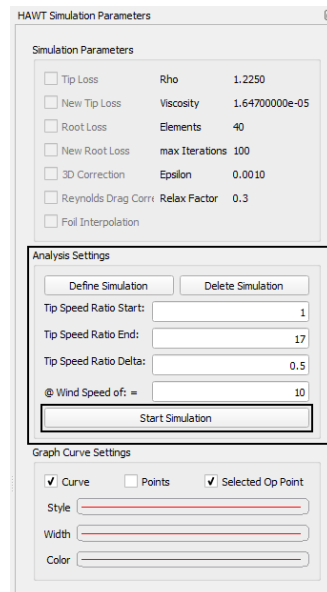


Per començar amb la simulació s’ha de seleccionar en primer lloc “Define Simulation” en el menú de la dreta i apareix una finestra on es poden seleccionar les correccions que es volen tenir en compte a la part esquerre i a la part dreta la qualitat de la simulació, indicant el nombre de iteracions que es volen fer o el nombre de particions de càlcul que es volen.

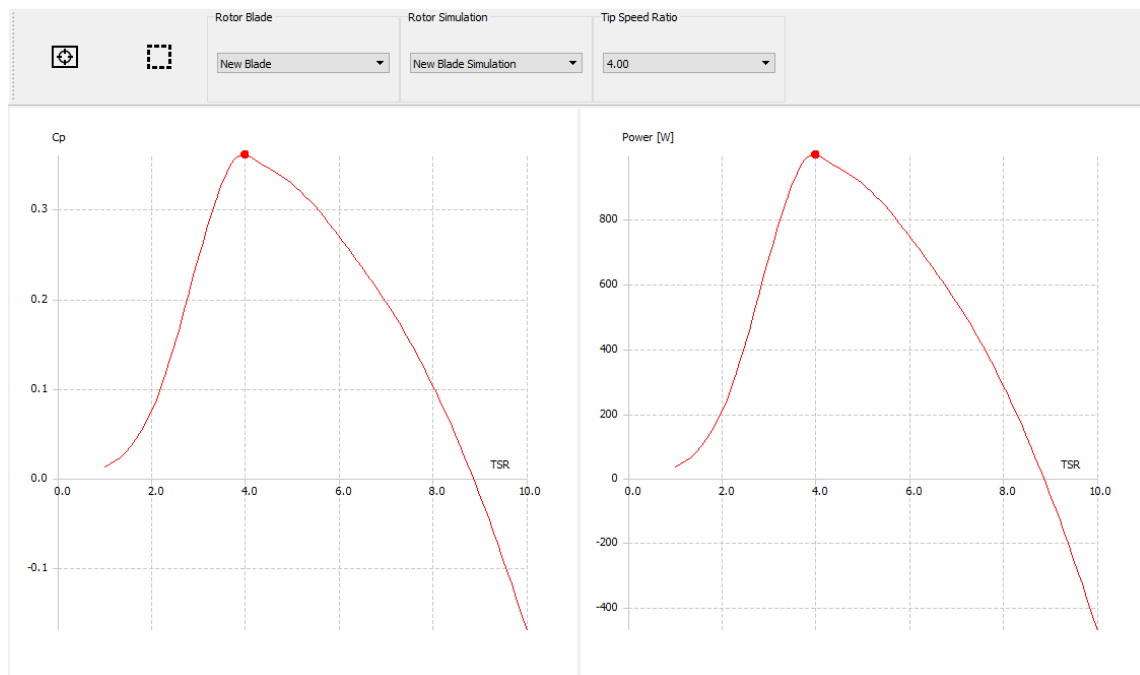


Seguidament es selecciona el rang de “tip speed ratio”, l’interval d’aquest i la velocitat de vent a la que es vol calcular.



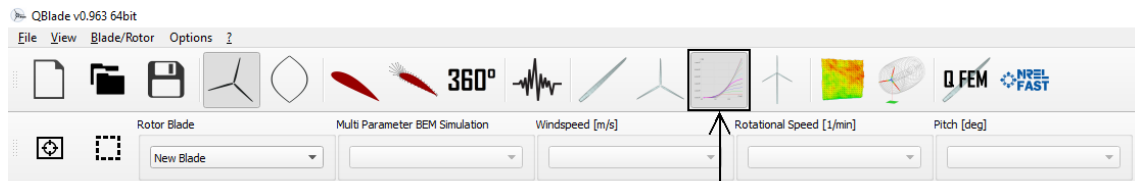


Un cop calculada la simulació, apareixen en la zona de dibuix una sèrie de gràfics als quals se'ls pot modificar els paràmetres a mostrar. En aquests gràfics s'hi poden obtenir valors de potència, coeficients de potència variant el valor de *tip speed ratio* al menú desplegable de la part superior i aquest valor es representa amb un punt sobre les corbes.



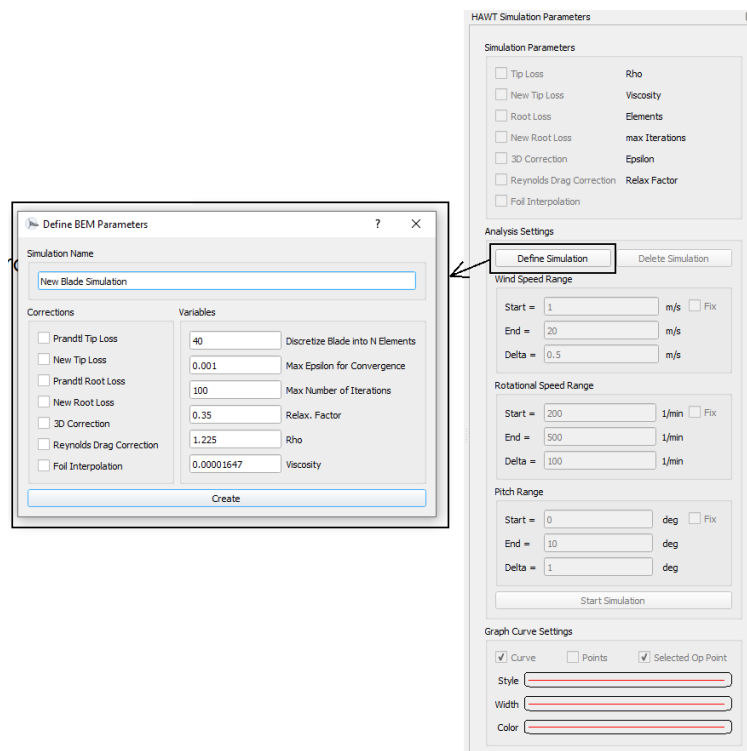
### 3.6. Multi Parameter BEM Simulation

Aquest mòdul permet obtenir les corbes de funcionament de la turbina dissenyada amb la possibilitat de comparar per diferents rangs de velocitat, angle de pas i velocitat de rotació per veure el comportament d'aquesta en tots els casos.

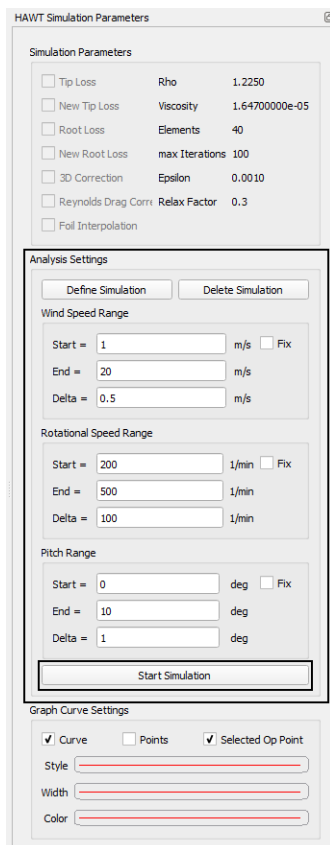


Multi Parameter BEM Simulation

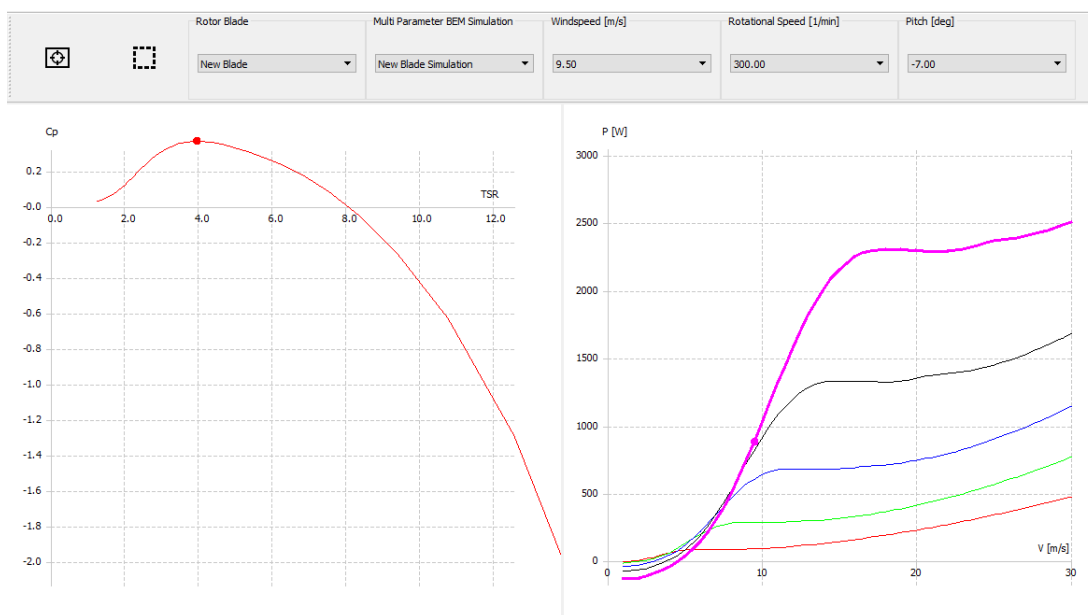
Per tal de començar l'entrada de dades s'ha de seleccionar "Define simulation". Aquí apareix una finestra on es poden seleccionar les correccions que es volen tenir en compte a la part esquerre i a la part dreta la qualitat de la simulació, indicant el nombre de iteracions que es volen fer o el nombre de particions de càlcul que es volen.



Un cop seleccionades les correccions, s'activa la finestra que permet l'entrada de valors d'inici i fi de simulació per a valors de velocitat de vent, velocitat de rotació i variació de l'angle de pas. Qualsevol d'aquestes tres entrades es poden deixar com a valor fix i variar-ne l'increment de passos a calcular. Si es posa un increment molt petit, la simulació pot tardar molta estona en acabar ja que haurà de fer moltes iteracions.



Finalment, quan acaba la simulació apareixen a la part de dibuix els gràfics resultants amb les dades entrades en tots els apartats anteriors on s'hi poden veure, per exemple, les corbes de potència per a diferents velocitats de rotació, com afecta la variació de l'angle de pas, el coeficient de màxima potència en cada punt de velocitat de vent, entre d'altres.



Estudi, disseny i comparativa de tres generadors eòlics per autoconsum de 2kW, 4kW i 8kW de potència nominal  
Ferran Galimany Urpi

Aquest mòdul ja permet extreure conclusions sobre el disseny de la turbina, les potències que pot arribar a generar i quines seran les velocitats de engegada i parada que necessitarà.

### 3.7. Turbine BEM Simulation

Finalment, per l'estudi de la velocitat d'entrada i sortida de funcionament ( $v_{cut-in}$  i  $v_{cut-out}$ ) i la regulació de potència s'utilitza el mòdul "Turbine BEM Simulation".

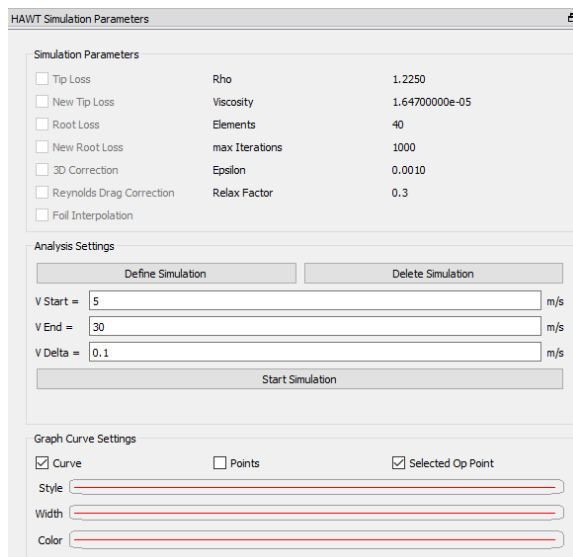


A la finestra d'entrada de dades d'aquest mòdul es demana:

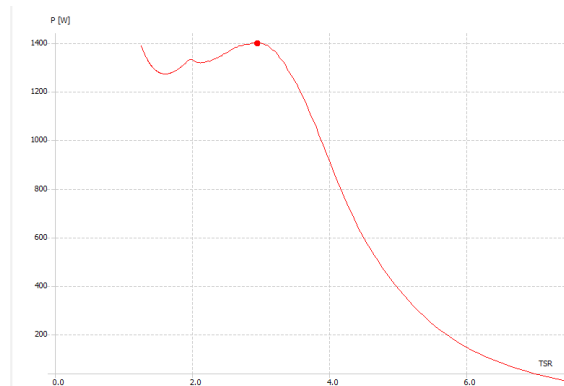
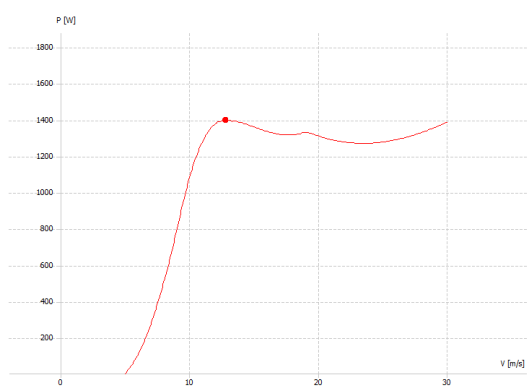
- Power regulation: Aquí es selecciona el tipus de regulació de la potència que es vol utilitzar. La regulació en *Stall* significa que a partir d'una certa velocitat de vent les pales entraran en pèrdua aerodinàmica i per tant deixaran de generar. La opció de *Pitch limited* serveix per determinar que la turbina es regularà amb la variació de l'angle de pas automàticament. Finalment, l'opció de *Prescribed* es per fixar un angle de pas fix el qual no variarà.
- Transmissió: Aquí es selecciona el tipus de transmissió que tindrà la caixa de canvis de la turbina o si aquesta serà d'accionament directe.

Finalment, es demana la capacitat del generador, les velocitats de engegada i parada, la velocitat de rotació, l'angle de pas i les pèrdues fixes.

Abans de començar la simulació es demana la entrada d'un rang de velocitats de vent i un diferencial per acotar els límits de la simulació.



Un cop acabada la simulació, a la zona de dibuix apareixen les gràfiques amb les dades obtingudes de la simulació segons els paràmetres escollits. En aquestes gràfiques ara ja s'hi pot observar la velocitat d'entrada i sortida de funcionament, la limitació de la potència, la variació de l'angle de pas i la velocitat de rotació.



Amb les dades de les simulacions obtingudes fins aquest mòdul ja es podria determinar si el disseny de la turbina es correcte per les característiques que es volen obtenir. En el cas de que no fos així, s'hauria de tornar enrere per tal d'anar millorant el disseny entrant en un cicle de millora.

## 4. Càlculs i dimensionat

En aquest apartat es realitzen els càlculs necessaris per tal de dimensionar cada una dels tres models de turbina eòlica amb diferent potència nominal que es pretenen estudiar. Per tal de realitzar aquests càlculs s'utilitza el software *QBlade* conjuntament amb fórmules analítiques per tal de poder afinar el resultat amb l'ajut d'iteracions entre els dos mètodes.

### 4.1. Condicions de treball

En primer lloc es important definir uns paràmetres inicials de les condicions de treball per les quals la turbina estarà dissenyada.

- Velocitat del vent: La velocitat de vent que es considera per al funcionament nominal de la turbina és de 10 m/s. Aquesta és una velocitat de vent prou elevada com per generar energia suficient mantenint les dimensions de la turbina en uns valors raonables. Alhora no es tant elevada com perquè sigui difícil trobar una localització que pugui rebre valor mitjans de velocitats propers a aquest valor.
- Propietats de l'aire:
  - Temperatura: 20 °C
  - Densitat:  $1,225 \text{ kg/m}^3$
  - Viscositat cinemàtica:  $1,5111 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
- Alçada: L'alçada sobre el terra en el que es trobarà l'eix de la turbina es de 20 metres. Es busca tenir una alçada prou elevada com perquè no hi hagin obstacles que interfereixin en el flux d'aire i alhora que no sigui excessivament alta ja que això requeriria uns fonaments molt costosos i manteniments més complexos. A més a més, al estar ubicada al costat de cases no es vol crear un gran impacte visual.
- Regulació de potència: La regulació de la potència de les turbines eòliques dissenyades es farà mitjançant un controlador de l'angle de pas el qual la seva funció és la de variar l'angle de rotació de les pales respecte l'eix del rotor per tal d'evitar que per a velocitats elevades la turbina perdi el control i es destrueixi. També limita la potència generada a la que el generador pot suportar
- Tipus de transmissió: La transmissió de la turbina serà directa. En turbines de baixa potència que giren a moltes revolucions, el generador acostuma a estar connectat directament a la turbina sense passa per una caixa de transmissió.

### 4.2. Elecció del perfil de les pales

Hi ha una gran varietat de perfils alars amb formes i gruixos diferents i cada fabricant crea els seus propis dissenys. Per tal de poder comparar-los entre ells es fa ús de l'eina online *Airfoil Tools* on s'escullen cinc perfils NACA amb diferents formes i gruixos. S'utilitzen perfils NACA perquè es poden trobar amb un gran ventall de formes i el

software *QBlade* els pot carregar fàcilment usant únicament la nomenclatura de quatre o cinc dígits.

En primer lloc, per tal de poder avaluar les dades extretes, és necessari conèixer el valor del nombre de Reynolds que té el flux d'aire en el que treballarà la turbina eòlica.

#### 4.2.1. Càlcul del nombre de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot c}{\mu} = \frac{v \cdot c}{\nu} \quad [ 8 ]$$

$\rho \equiv$  Densitat del fluid  $\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$

$v \equiv$  Velocitat del fluid  $\left[ \frac{m}{s} \right]$

$c \equiv$  Corda del perfil  $[m]$

$\mu \equiv$  Viscositat dinàmica del fluid  $\left[ \frac{kg}{m \cdot s} \right]$

$\nu \equiv$  Viscositat cinemàtica del fluid  $\left[ \frac{m^2}{s} \right]$

La velocitat de vent utilitzada en el estudi és de 10 m/s, la temperatura de l'aire és de 20 °C i la viscositat cinemàtica a aquesta temperatura és de  $1,5111 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$  tal i com s'havia determinat en el punt (4.1 Condicions de treball).

La corda de la pala es determinarà de forma provisional com a 0,2 m, per tant el resultat del nombre de Reynolds equival a:

$$Re = \frac{10 \cdot 0,2}{1,5111 \cdot 10^{-5}} = 132.354$$

Un cop conegut el nombre de Reynolds del flux d'aire es pot entrar a l'eina *AirfoilTools* on es compara el comportament aerodinàmic dels diferents perfils alars seleccionats.

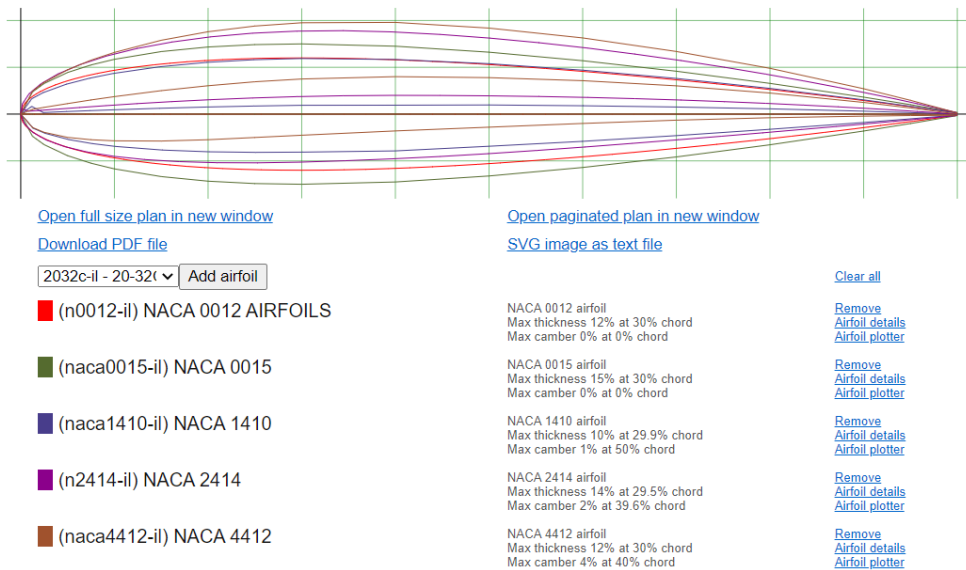
#### 4.2.2. Comparació dels perfils alars

En primer lloc es fa una comparativa utilitzant l'eina *AirfoilTools* dels diferents perfils alars.

Com es pot veure en la *Figura 4.1*, s'escullen els perfils NACA 0012, 0015, 1410, 2414 i 4412 els quals varien entre ells pel grossor de la cambra i per la seva forma. A la part inferior, on hi surten les opcions de dibuix, s'hi estableix provisionalment el valor de la corda del perfil de 0,2m.

## Airfoil Comparison

Select airfoils from the [airfoil database](#) or [add your own airfoils](#) and compare the airfoil shape and lift/drag polars.



### Drawing Options

Chord (mm)	<input type="text" value="200"/>	Chord width in millimetres
Camber line	<input checked="" type="checkbox"/>	Draw the camber line
X grid (mm)	<input type="text" value="20"/>	X grid size in millimetres
Y grid (mm)	<input type="text" value="10"/>	Y grid size in millimetres
Paper width (mm)	<input type="text" value="280"/>	Used for printing plan. A4 landscape approx 280mm
Paper height (mm)	<input type="text" value="180"/>	Used for printing plan. A4 landscape approx 180mm
<input type="button" value="Update"/>		

**Figura 4.1: Comparació de perfils alars NACA. Font: Airfoiltools.com**

Seguidament apareix una taula on es mostren, per a diferents valors del nombre de Reynolds, els màxims valors de la relació *Lift - Drag* i l'angle d'atac en que es troben els perfils seleccionats.

El valor de *Ncrit* serveix per avaluar la turbulència del fluid i la rugositat del perfil alar. Un valor de *Ncrit* baix indica una major turbulència que un valor més alt. Quan *Ncrit* té un valor de 9 indica que les dades estan extretes en un túnel de vent net, mentre que amb un valor de 5 representa un túnel de vent brut.

En el cas d'estudi d'una turbina eòlica s'utilitza un *Ncrit* de 9 i el valor del nombre de Reynolds calculat anteriorment de 132.352, per tant s'interpolen linealment els resultats tabulats entre els valors de Reynolds de 100.000 i 200.000. D'aquí se'n podrà treure el valor del *ratio lift-drag*.

- Perfil NACA 0012:

Plot	Airfoil	Reynolds #	Ncrit	Max Cl/Cd	Description	Source
<input checked="" type="checkbox"/>	n0012-il	100,000	9	36.7 at $\alpha=5^\circ$	Mach=0 Ncrit=9	<a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a>
<input type="checkbox"/>	n0012-il	100,000	5	36.1 at $\alpha=5.5^\circ$	Mach=0 Ncrit=5	<a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	n0012-il	200,000	9	47.4 at $\alpha=5^\circ$	Mach=0 Ncrit=9	<a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a>
<input type="checkbox"/>	n0012-il	200,000	5	45.9 at $\alpha=6.5^\circ$	Mach=0 Ncrit=5	<a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a>

**Taula 4.1: Perfils NACA 0012 amb Reynolds 100.000 i 200.000. Font: Airfoiltools.com**



$$\frac{c_L}{c_D} (NACA 0012) = \frac{47,4 - 36,7}{200.000 - 100.000} \cdot (132.354 - 100.000) + 36,7$$

$$\frac{c_L}{c_D} (NACA 0012) = 40,16$$

$$\alpha_A (NACA 0012) = 5^\circ$$

- Perfil NACA 0015:

Plot	Airfoil	Reynolds #	Ncrit	Max Cl/Cd	Description	Source
<input checked="" type="checkbox"/>	naca0015-il	100,000	9	37.5 at $\alpha=6^\circ$	Mach=0 Ncrit=9	<a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a>
<input type="checkbox"/>	naca0015-il	100,000	5	37.8 at $\alpha=6.25^\circ$	Mach=0 Ncrit=5	<a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	naca0015-il	200,000	9	49.6 at $\alpha=6.25^\circ$	Mach=0 Ncrit=9	<a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a>
<input type="checkbox"/>	naca0015-il	200,000	5	48.6 at $\alpha=7^\circ$	Mach=0 Ncrit=5	<a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a>

**Taula 4.2: Perfils NACA 0015 amb Reynolds 100.000 i 200.000. Font: Airfoiltools.com**

$$\frac{c_L}{c_D} (NACA 0015) = \frac{49,6 - 37,5}{200.000 - 100.000} \cdot (132.354 - 100.000) + 37,5$$

$$\frac{c_L}{c_D} (NACA 0015) = 41,41$$

$$\alpha_A (NACA 0015) = \frac{6,25 - 6}{200.000 - 100.000} \cdot (132.354 - 100.000) + 6$$

$$\alpha_A (NACA 0015) = 6,08^\circ$$

- Perfil NACA 1410:

Plot	Airfoil	Reynolds #	Ncrit	Max Cl/Cd	Description	Source
<input checked="" type="checkbox"/>	naca1410-il	100,000	9	44.6 at $\alpha=5^\circ$	Mach=0 Ncrit=9	<a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a>
<input type="checkbox"/>	naca1410-il	100,000	5	42.2 at $\alpha=4.5^\circ$	Mach=0 Ncrit=5	<a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	naca1410-il	200,000	9	56.6 at $\alpha=4.75^\circ$	Mach=0 Ncrit=9	<a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a>
<input type="checkbox"/>	naca1410-il	200,000	5	50.6 at $\alpha=3.75^\circ$	Mach=0 Ncrit=5	<a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a>

**Taula 4.3: Perfils NACA 1410 amb Reynolds 100.000 i 200.000. Font: Airfoiltools.com**

$$\frac{c_L}{c_D} (NACA 1410) = \frac{56,6 - 44,6}{200.000 - 100.000} \cdot (132.354 - 100.000) + 44,6$$

$$\frac{c_L}{c_D} (NACA 1410) = 48,48$$

$$\alpha_A (NACA 1410) = \frac{4,75 - 5}{200.000 - 100.000} \cdot (132.354 - 100.000) + 5$$

$$\alpha_A (NACA 1410) = 4,92^\circ$$

- Perfil NACA 2414:

Plot	Airfoil	Reynolds #	Ncrit	Max Cl/Cd	Description	Source
<input checked="" type="checkbox"/>	n2414-il	100,000	9	47.8 at $\alpha=7.5^\circ$	Mach=0 Ncrit=9	<a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a>
<input type="checkbox"/>	n2414-il	100,000	5	48.1 at $\alpha=6.5^\circ$	Mach=0 Ncrit=5	<a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	n2414-il	200,000	9	65.1 at $\alpha=6.75^\circ$	Mach=0 Ncrit=9	<a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a>
<input type="checkbox"/>	n2414-il	200,000	5	62.1 at $\alpha=6^\circ$	Mach=0 Ncrit=5	<a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a>

**Taula 4.4: Perfils NACA 2414 amb Reynolds 100.000 i 200.000. Font: Airfoiltools.com**

$$\frac{c_L}{c_D} (NACA 2414) = \frac{65,1 - 47,8}{200.000 - 100.000} \cdot (132.354 - 100.000) + 47,8$$

$$\frac{c_L}{c_D} (NACA 2414) = 53,40$$

$$\alpha_A (NACA 2414) = \frac{6,75 - 7,5}{200.000 - 100.000} \cdot (132.354 - 100.000) + 7,5$$

$$\alpha_A (NACA 2414) = 7,26^\circ$$

- Perfil NACA 4412:

Plot	Airfoil	Reynolds #	Ncrit	Max Cl/Cd	Description	Source
<input checked="" type="checkbox"/>	naca4412-il	100,000	9	56.1 at $\alpha=8.5^\circ$	Mach=0 Ncrit=9	<a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a>
<input type="checkbox"/>	naca4412-il	100,000	5	57.4 at $\alpha=6.75^\circ$	Mach=0 Ncrit=5	<a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	naca4412-il	200,000	9	78.1 at $\alpha=7^\circ$	Mach=0 Ncrit=9	<a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a>
<input type="checkbox"/>	naca4412-il	200,000	5	76.6 at $\alpha=6^\circ$	Mach=0 Ncrit=5	<a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a>

**Taula 4.5: Perfils NACA 4412 amb Reynolds 100.000 i 200.000. Font: Airfoiltools.com**

$$\frac{c_L}{c_D} (NACA 4412) = \frac{78,1 - 56,1}{200.000 - 100.000} \cdot (132.354 - 100.000) + 56,1$$

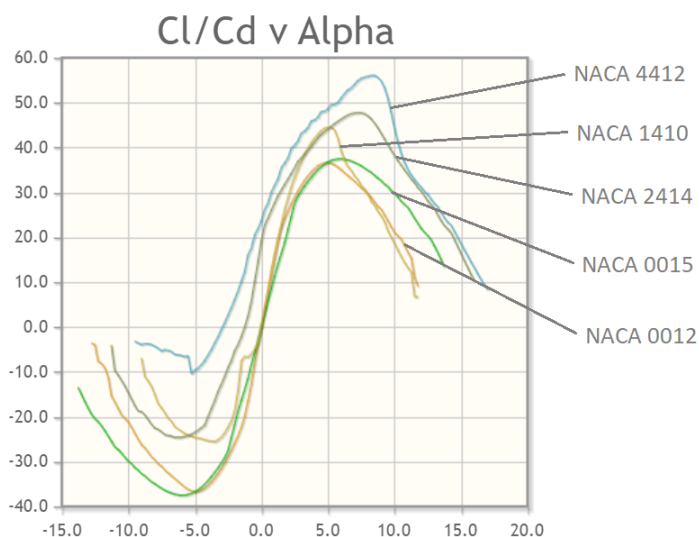
$$\frac{c_L}{c_D} (NACA 4412) = 63,22$$

$$\alpha_A (NACA 4412) = \frac{7 - 8,5}{200.000 - 100.000} \cdot (132.354 - 100.000) + 8,5$$

$$\alpha_A (NACA 4412) = 8,01^\circ$$

Com es pot comprovar amb els resultats obtinguts, el perfil alar que proporciona una millor relació *Lift – Drag* és el NACA 4412 quan es troba amb un angle d'atac de  $8,01^\circ$  per a un nombre de Reynolds de 132.354.

Seguidament es pot veure una gràfica amb els resultats de les dades extretes.



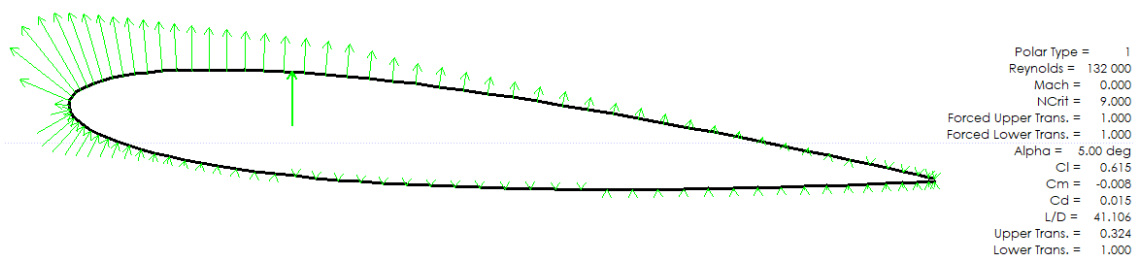
**Gràfic 4.1: Relació Lift – Drag vers l'angle d'atac. Font: Airfoiltools.com**

Un cop obtingudes aquestes dades mitjançant l'aplicació de AirfoilTools s'avaluen comparant-les amb les que proporciona el software "QBlade.

En el QBlade s'introdueixen els perfils escollits en l'apartat anterior i s'avalua el seu comportament donat el nombre de Reynolds de 132.354, un Ncrit de 9 i un rang d'angles d'atac d'entre 0° i 10° amb increments de 0,25°. Per als diferents perfils dona els següents valors:

- Perfil NACA 0012:

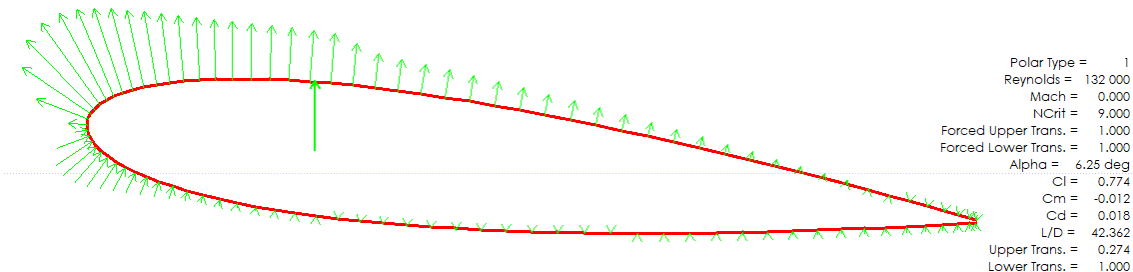
Per al perfil NACA 0012, el punt òptim amb la major relació *Lift – Drag* es troba amb un angle d'atac de 5° amb un valor de 41,106.



**Figura 4.2: Distribució de pressions i característiques del perfil NACA 0012 extret del QBlade**

- Perfil NACA 0015:

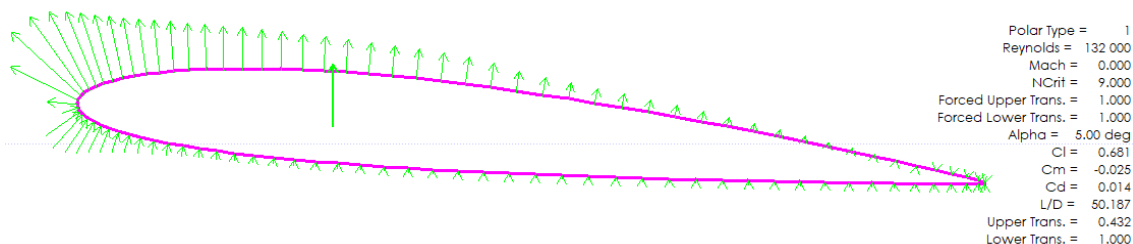
Per al perfil NACA 0015, el punt òptim amb la major relació *Lift – Drag* es troba amb un angle d'atac de 6,25° amb un valor de 42,362.



**Figura 4.3: Distribució de pressions i característiques del perfil NACA 0015 extret del QBlade**

- Perfil NACA 1410:

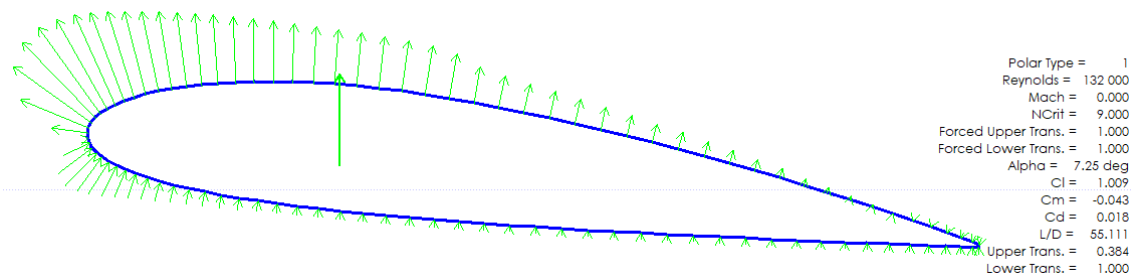
Per al perfil NACA 1410, el punt òptim amb la major relació *Lift – Drag* es troba amb un angle d'atac de 5° amb un valor de 50,187.



**Figura 4.4: Distribució de pressions i característiques del perfil NACA 1410 extret del QBlade**

- Perfil NACA 2414:

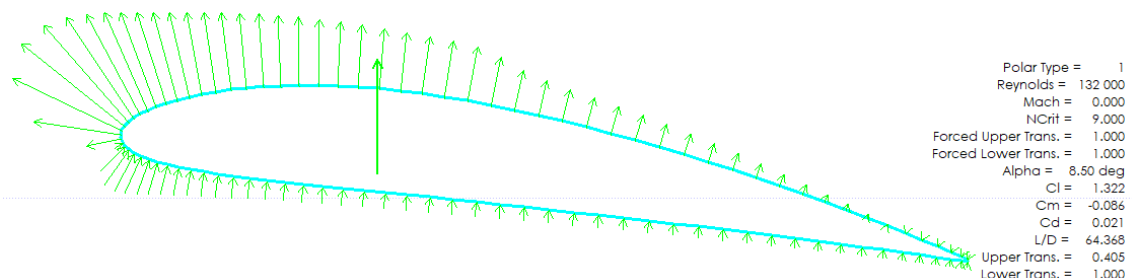
Per al perfil NACA 2414, el punt òptim amb la major relació *Lift – Drag* es troba amb un angle d'atac de  $7,25^\circ$  amb un valor de 55,111.



**Figura 4.5: Distribució de pressions i característiques del perfil NACA 2414 extret del QBlade**

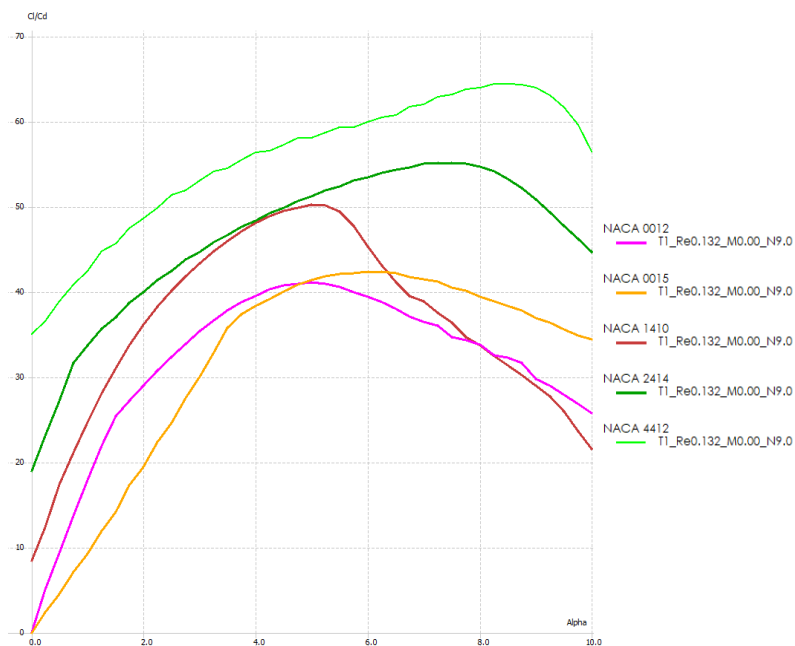
- Perfil NACA 4412:

Per al perfil NACA 4412, el punt òptim amb la major relació *Lift – Drag* es troba amb un angle d'atac de  $8,5^\circ$  amb un valor de 64,368.



**Figura 4.6: Distribució de pressions i característiques del perfil NACA 4412 extret del QBlade**

Com es pot observar, igual que en els resultats extrets a través de *AirfoilTools* el perfil més adient és el NACA 4412 quan es troba en un angle d'atac de  $8,5^\circ$  obtenint una relació *Lift – Drag* de 64,368. Seguidament es pot veure la gràfica que compara la relació *Lift – Drag* vers l'angle d'atac per cada un dels perfils escollits.



Gràfic 4.2: Relació "Lift - Drag" vers l'angle d'atac extret del QBlade

### 4.3. Dimensionat de les pales

En aquest apartat s'utilitzen les teories de Betz i Schmitz conjuntament amb el software QBlade per tal de dimensionar les turbines eòliques i aconseguir les potències desitjades de generació.

#### 4.3.1. Aproximació inicial de les dimensions de les pales

En primer lloc és important saber quina quantitat d'energia es pot extreure del vent. La potència disponible del vent dins d'una determinada superfície la podem calcular tal i com s'ha vist en l'equació. Amb aquesta fórmula es pot fer una aproximació sobre quin es el diàmetre del rotor a dissenyar segons la potència que volem aconseguir donant la velocitat del vent.

En aquest cas d'estudi ens interessa avaluar les dimensions de la turbina per a unes potències de 2kW, 4kW i 8kW. Aplicant aquestes potències a l'equació de la potència extraïble i la velocitat del vent de 10 m/s establerta en l'apartat (4.1 Condicions de treball) en podem extreure els radis dels rotors per a les tres turbines:

- Diàmetre del rotor per la turbina de 2 kW:

$$2.000 = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot S \cdot 10^3 \cdot 0,59$$

$$S = 5,5344 \text{ m}^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = 2,6545 \text{ m}$$

Per una turbina eòlica de 2 kW de potència necessitarem un diàmetre de rotor de 2,66 metres.

- Diàmetre del rotor per la turbina de 4 kW:

$$4.000 = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot S \cdot 10^3 \cdot 0,59$$

$$S = 11,0688 \text{ m}^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = 3,7542 \text{ m}$$

Per una turbina eòlica de 4 kW de potència necessitarem un diàmetre de rotor de 3,75 metres.

- Diàmetre del rotor per la turbina de 8 kW:

$$8.000 = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot S \cdot 10^3 \cdot 0,59$$

$$S = 22,1377 \text{ m}^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = 5,3092 \text{ m}$$

Per una turbina eòlica de 8 kW de potència necessitarem un diàmetre de rotor de 5,31 metres.

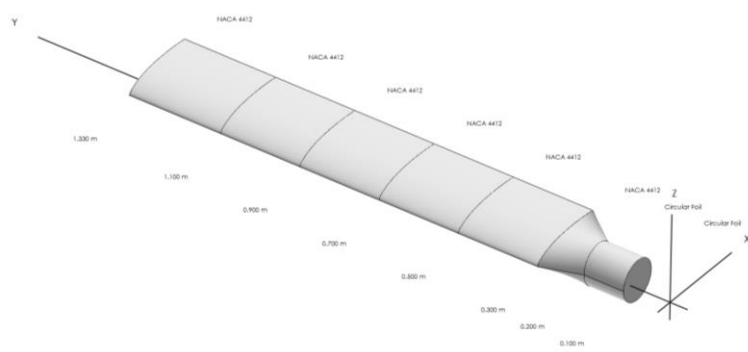
Un cop obtinguts els valors aproximats de superfície i diàmetre de les turbines, es continua mitjançant el software QBlade per tal de crear les pales i extreure'n els coeficients de potència màxims de cadascuna.

### 4.3.2. Coeficients de potència i *tip speed ratio*

Per tal de trobar els valors dels coeficients de potència i del *tip speed ratio*, primer de tot s'han de dibuixar les pales utilitzant el mòdul *HAWT Rotorblade Design* per tal de simular el seu comportament amb el mòdul *Rotor BEM Simultaion*:

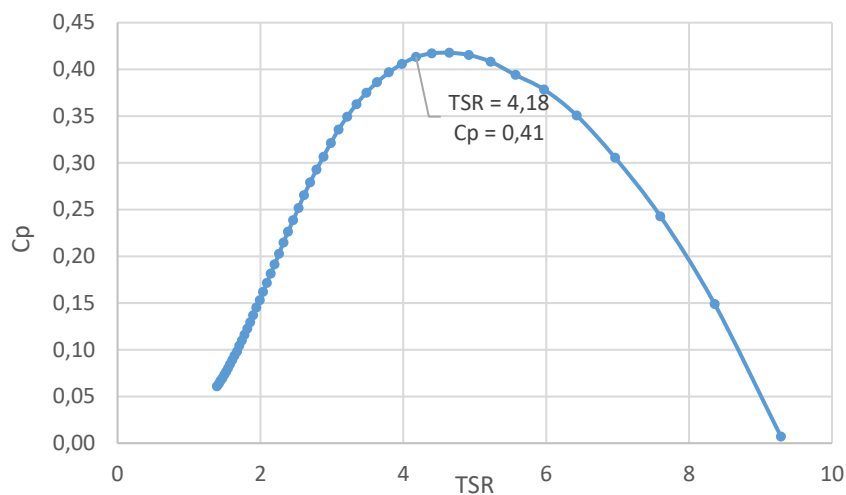
- Disseny de la turbina de 2 kW:

Com s'ha vist en l'apartat anterior, la turbina de 2 kW necessita un diàmetre de 2,6545 metres que correspon a 1,33 metres de radi. En la següent imatge es pot veure la pala de la turbina dissenyada amb el QBlade amb un perfil NACA 4412 i una corda constant de 0,2 metres en tota la seva longitud.



**Figura 4.7: Disseny inicial mitjançant QBlade de la pala de la turbina de 2kW**

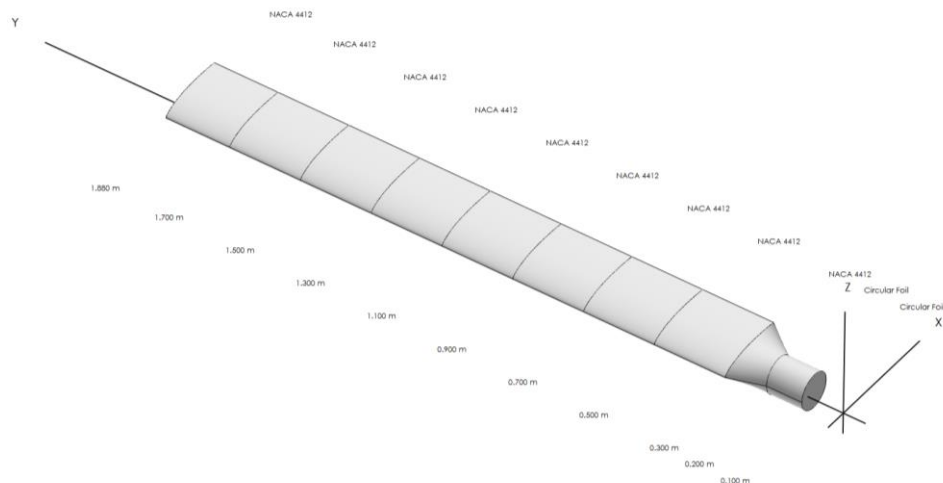
Amb aquesta primera aproximació del disseny del perfil de la turbina de 2 kW, el coeficient de potència que s'obté amb un valor de velocitat corresponent a 10 m/s és de 0,41 amb un valor de tip speed ratio de 4,18 i un angle de pas de  $-8,5^\circ$ .



**Gràfic 4.3: Corba del coeficient de potència vers el tip speed ratio de l'aproximació inicial de la turbina de 2 kW**

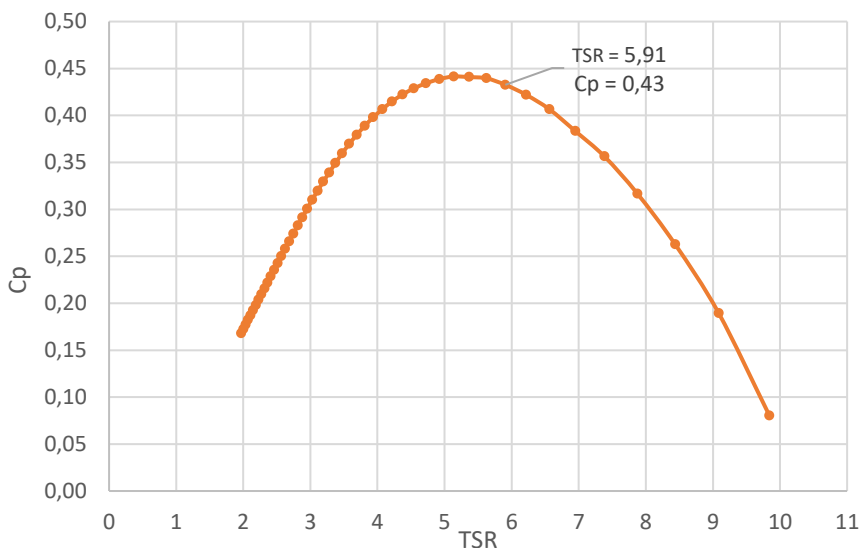
- Disseny de la turbina de 4 kW:

La turbina de 4kW necessita un diàmetre de 3,7542 metres que correspon a 1,88 metres de radi. En la següent imatge es pot veure la pala de la turbina dissenyada amb el QBlade amb un perfil NACA 4412 i una corda constant de 0,2 metres en tota la seva longitud.



**Figura 4.8: Disseny inicial mitjançant QBlade de la pala de la turbina de 4kW**

Amb aquesta primera aproximació del disseny del perfil de la turbina de 4 kW, el coeficient de potència que s'obté amb un valor de velocitat corresponent a 10 m/s és de 0,43 amb un valor de *tip speed ratio* de 5,91 i un angle de pas de  $-7,0^\circ$ .

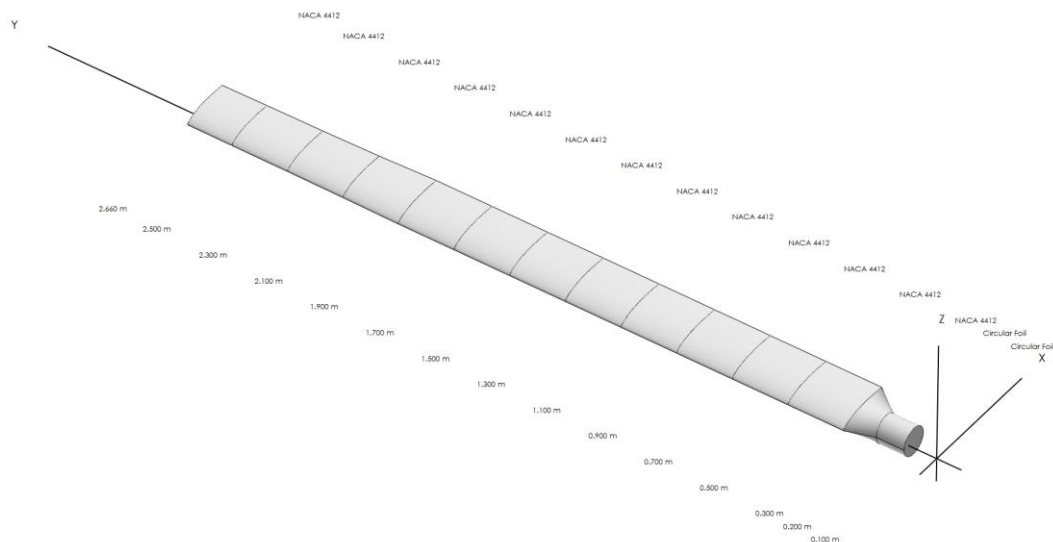


**Gràfic 4.4: Corba del coeficient de potència vers el tip speed ratio de l'aproximació inicial de la turbina de 4 kW**

- Disseny de la turbina de 8 kW:

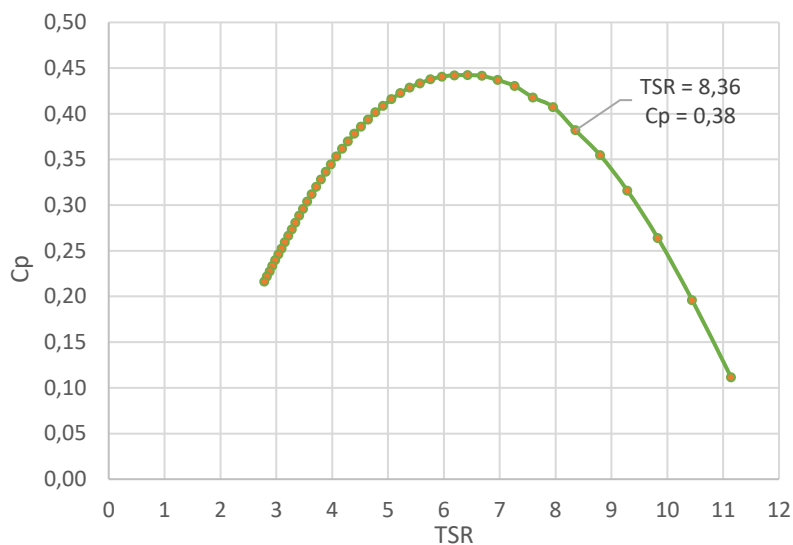
La turbina de 8 kW necessita un diàmetre de 5,3092 metres que correspon a 2,66 metres de radi. En la següent imatge es pot veure la pala de la turbina dissenyada amb el QBlade amb un perfil NACA 4412 i una corda constant de 0,2 metres en tota la seva longitud.





**Figura 4.9: Disseny inicial mitjançant QBlade de la pala de la turbina de 8kW**

Amb aquesta primera aproximació del disseny del perfil de la turbina de 8 kW, el coeficient de potència que s'obté amb un valor de velocitat corresponent a 10 m/s és de 0,38 amb un valor de *tip speed ratio* de 8,36 i un angle de pas de  $-6,0^\circ$ .



**Gràfic 4.5: Corba del coeficient de potència vers el tip speed ratio de l'aproximació inicial de la turbina de 8 kW**

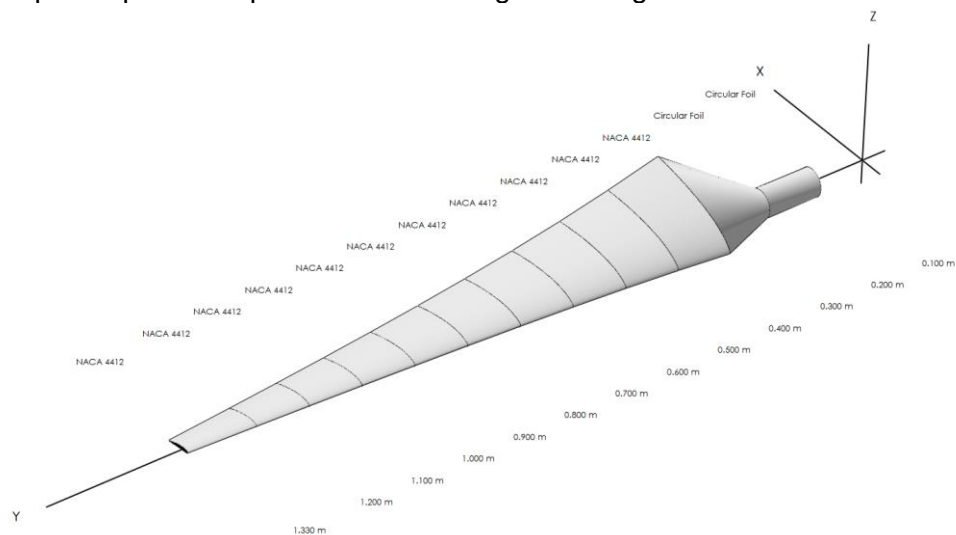
En el següent apartat s'optimitza la forma dels perfils, modificant-ne l'angle de torsió i modificant el valor de la corda al llarg de la pala.

### 4.3.3. Optimització del perfil i potència generada

En aquest apartat s'utilitza l'eina d'optimització del perfil de la pala de la turbina vist en l'apartat (3 *Funcionament del software QBlade*) per tal de millorar les característiques aerodinàmiques de les pales donat el *tip speed ratio* i l'angle d'atac pel qual el coeficient *lift – drag* és major. Aquesta eina permet donar automàticament un angle de torsió i de corda que varia per a cada secció del perfil de la pala.

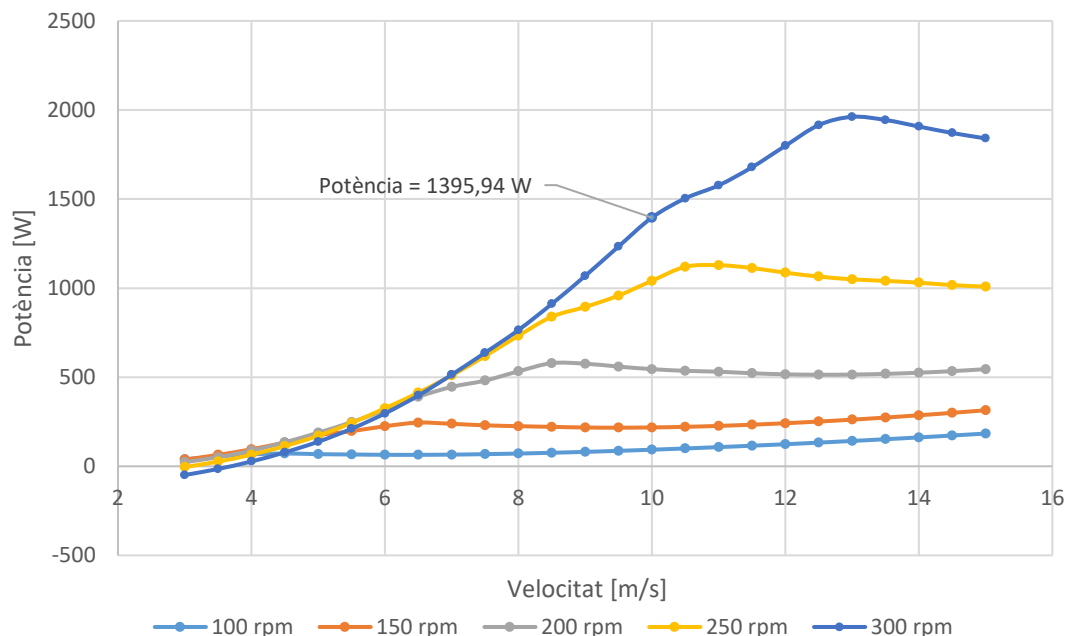
- Optimització de les pales i potència generada per la turbina de 2 kW:

Per el disseny de la pala de la turbina de 2 kW, el *tip speed ratio* per un valor de velocitat de 10 m/s com s'ha vist en l'apartat anterior és de  $\lambda_D = 4,18$  i l'angle d'atac pel qual la relació *lift-drag* és major és de  $\alpha_A = 8,5^\circ$ , vist en l'apartat (4.2.2 Comparació dels perfils alars). Amb aquests valors i utilitzant l'optimització de la corda de la pala segons Schmitz s'obté el perfil optimitzat que es veu en la següent imatge:



**Figura 4.10: Disseny optimitzat mitjançant QBlade de la pala de la turbina de 2kW**

Utilitzant la geometria d'aquest perfil optimitzat per tal de simular la potència que es capaç de generar amb el mòdul *Turbine BEM Simulation* explicat en l'apartat (3 Funcionament del software QBlade) s'obtenen els següents valors de potència:



**Gràfic 4.6: Relació de la potència vers la velocitat del vent per diferents velocitats de rotació pel disseny optimitzat de la turbina de 2kW**

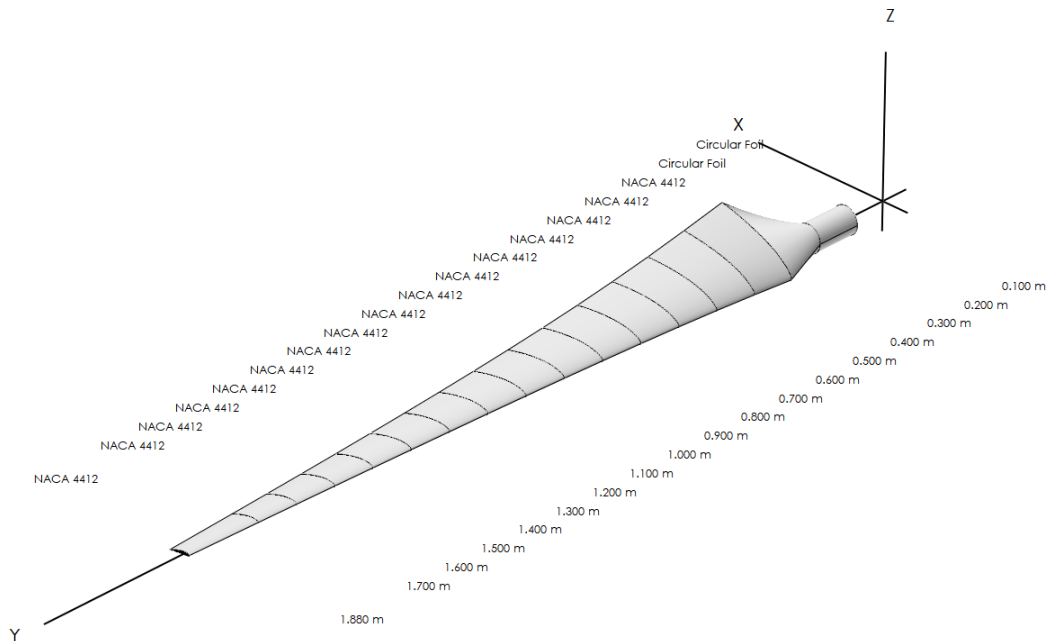
A la gràfica de corbes es pot observar la relació de la velocitat del vent amb la potència real generada per diferents velocitats de rotació de la turbina. Per una rotació de 300 rpm i una velocitat de 10 m/s s'assoleix una potència de 1396 W quan l'angle de pas és de  $-8,5^\circ$ , inferior a la potència desitjada inicialment per aquesta velocitat. També es pot

observar com per a una velocitat de vent inferior als 4 m/s la turbina no aconsegueix generar res.

Per tal de millorar les característiques del perfil, s'haurà de millorar la geometria de les pales i re calcular el diàmetre del rotor.

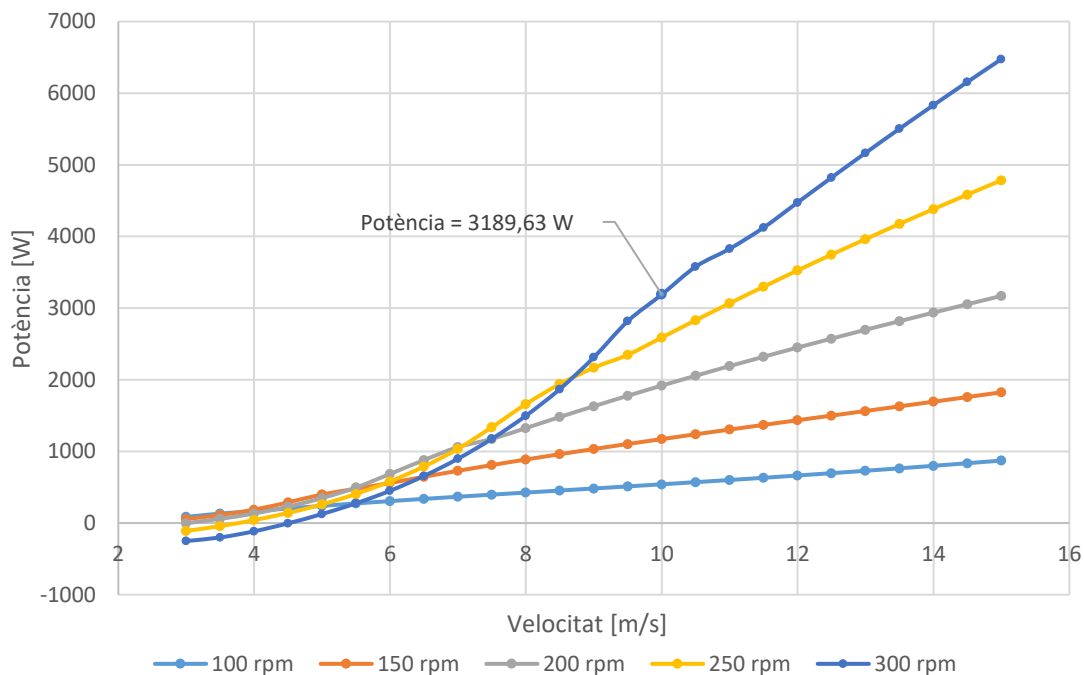
- Optimització de les pales i potència generada per la turbina de 4 kW:

Per el disseny de la pala de la turbina de 4 kW, el *tip speed ratio* per un valor de velocitat de 10 m/s és de  $\lambda_D = 5,91$  i l'angle d'atac pel qual la relació *lift – drag* és major és de  $\alpha_A = 8,5^\circ$ . Amb aquests valors i utilitzant l'optimització de la corda de la pala segons Schmitz s'obté el perfil optimitzat que es veu en la següent imatge:



**Figura 4.11: Disseny optimitzat mitjançant QBlade de la pala de la turbina de 4kW**

Utilitzant la geometria d'aquest perfil optimitzat s'obtenen els següents valors de potència:



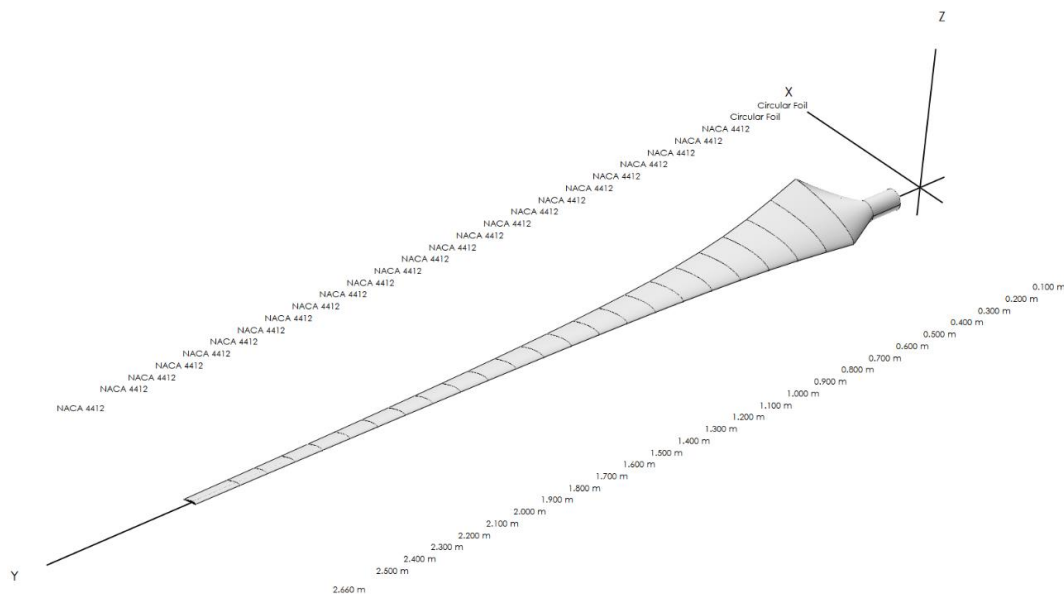
**Gràfic 4.7: Relació de la potència vers la velocitat del vent per diferents velocitats de rotació pel disseny optimitzat de la turbina de 4kW**

A la gràfica de corbes es pot observar la relació de la velocitat del vent amb la potència real generada per diferents velocitats de rotació de la turbina. Per una rotació de 300 rpm i una velocitat de 10 m/s s'assoleix una potència de 3190 W quan l'angle de pas és de  $-8,5^\circ$ , inferior a la potència desitjada inicialment per aquesta velocitat. També es pot observar com per a una velocitat de vent inferior als 5 m/s la turbina no aconsegueix generar res.

Per tal de millorar les característiques del perfil, s'haurà de millorar la geometria de les pales i re calcular el diàmetre del rotor.

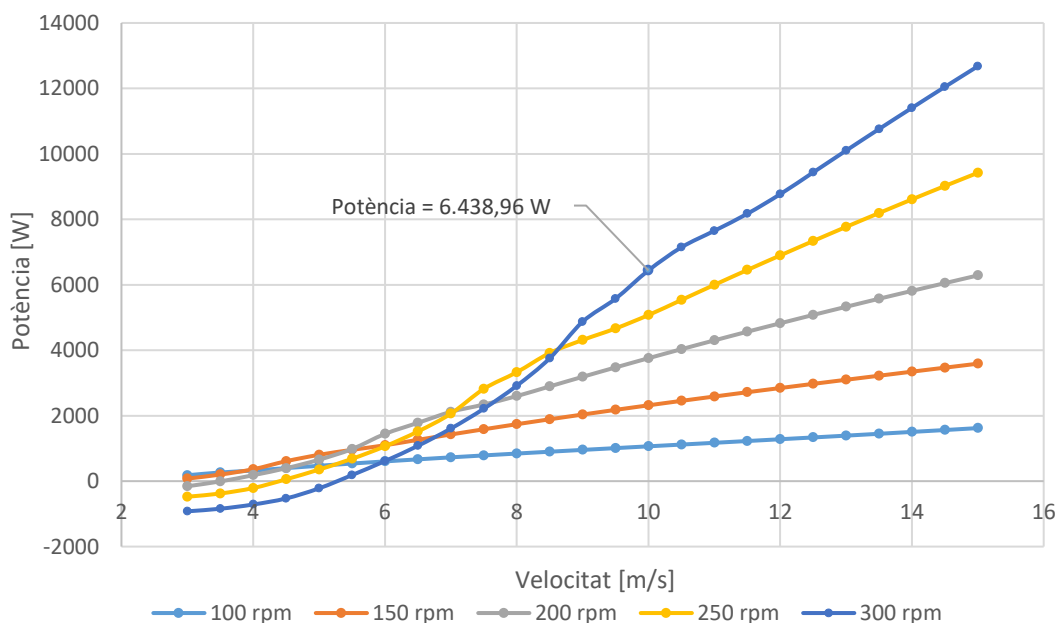
- Optimització de les pales i potència generada per la turbina de 8 kW:

Per el disseny de la pala de la turbina de 8 kW, el *tip speed ratio* per un valor de velocitat de 10 m/s és de  $\lambda_D = 8,36$  i l'angle d'atac pel qual la relació *lift – drag* és major és de  $\alpha_A = 8,5^\circ$ . Amb aquests valors i utilitzant l'optimització de la corda de la pala segons Schmitz s'obté el perfil optimitzat que es veu en la següent imatge:



**Figura 4.12: Disseny optimitzat mitjançant QBlade de la pala de la turbina de 8kW**

Utilitzant la geometria d'aquest perfil optimitzat s'obtenen els següents valors de potència:



**Gràfic 4.8: Relació de la potència vers la velocitat del vent per diferents velocitats de rotació pel disseny optimitzat de la turbina de 8kW**

A la gràfica de corbes es pot observar la relació de la velocitat del vent amb la potència real generada per diferents velocitats de rotació de la turbina. Per una rotació de 300 rpm i una velocitat de 10 m/s s'assoleix una potència de 6439 W quan l'angle de pas és de  $-8,5^\circ$ , inferior a la potència desitjada inicialment per aquesta velocitat. També es pot observar com per a una velocitat de vent inferior als 5 m/s la turbina no aconsegueix generar res.

Per tal de millorar les característiques del perfil, s'haurà de millorar la geometria de les pales i re calcular el diàmetre del rotor.

#### 4.3.4. Correccions del dimensionat

Seguidament, amb els valors obtinguts en els apartats anteriors podem re calcular el diàmetre del rotor necessari per tal de generar la potència que ens interessa per la velocitat de 10 m/s. Per tal de corregir el diàmetre del rotor es pot utilitzar la fórmula de la potència real vista en l'apartat (2.2 *Conceptes i fonaments*) per la qual tenim el valor del coeficient de potència molt aproximat gràcies a les simulacions anteriors.

$$P_{real} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot c_{P,real} [W] \quad [9]$$

Per tal de poder obtenir un valor més acurat, també s'han de tindre en compte les pèrdues de rendiment de la pala. Aquestes pèrdues les podem desglossar en pèrdues pel perfil i pèrdues en la punta de la pala tal i com s'ha explicat en l'apartat (2.2 *Conceptes i fonaments*).

$$\eta_{perfil} = 1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{r}{R} \cdot \frac{\lambda_D}{\varepsilon} \quad [10]$$

$$\eta_{tip} \approx 1 - \frac{1,84}{z \cdot \lambda_D} \quad [11]$$

Si es fan els càlculs per cada un dels perfils s'obtenen els següents resultats:

- Correcció del dimensionat per la turbina de 2 kW:

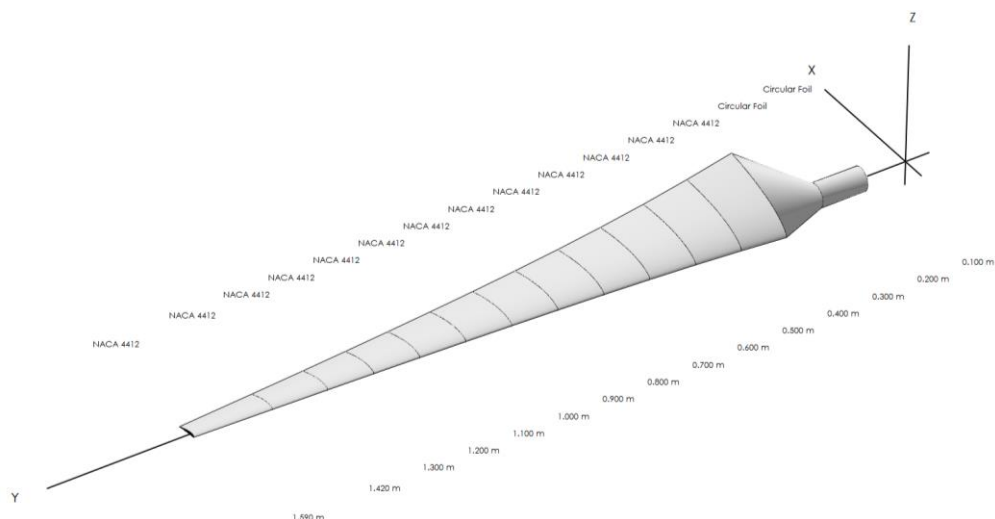
El coeficient de potència trobat en el primer dimensionat d'aquesta turbina és de  $c_p = 0,41$  i es el que s'utilitza per tal de millorar el diàmetre del rotor.

$$2.000 = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot S \cdot 10^3 \cdot 0,41$$

$$S = 7,9642 \text{ m}^2$$

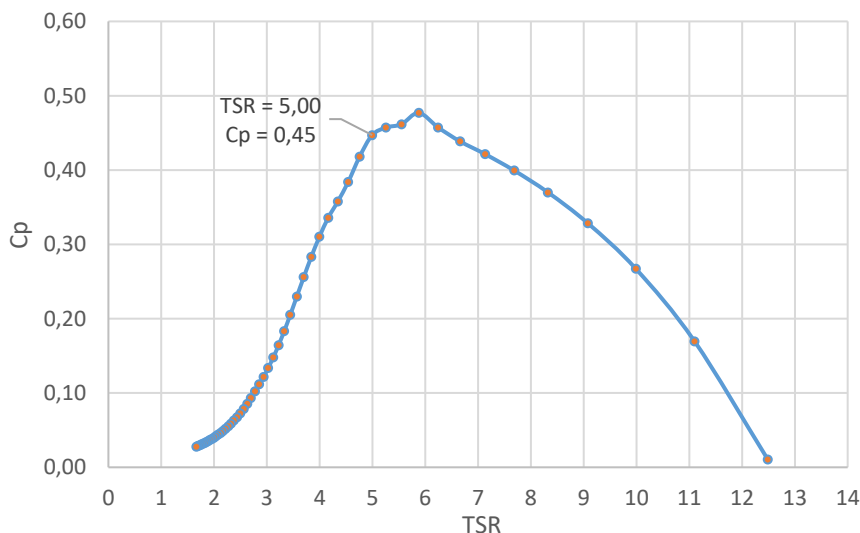
$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = 3,1844 \text{ m}$$

El diàmetre del rotor amb el dimensionat inicial era de 2,6545 metres mentre que amb la correcció surt de 3,1844 metres de diàmetre. El disseny de la pala de 2 kW queda de la següent forma:



**Figura 4.13: Disseny optimitzat corregit mitjançant QBlade de la pala de la turbina de 2kW**

Els valors de *tip speed ratio* i de coeficient de potència per la correcció surten amb els següents valors:



**Figura 4.14: Relació del coeficient de potència vers el tip speed ratio per la turbina de 2kW**

Amb el valor del *tip speed ratio* d'aquest dimensionat es poden calcular les pèrdues que es tindran per així poder-ne simular la potència real.

El rendiment del perfil és el següent:

$$\eta_{\text{Perfil}} = 1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{0,7961}{1,5922} \cdot \frac{5}{64,368}$$

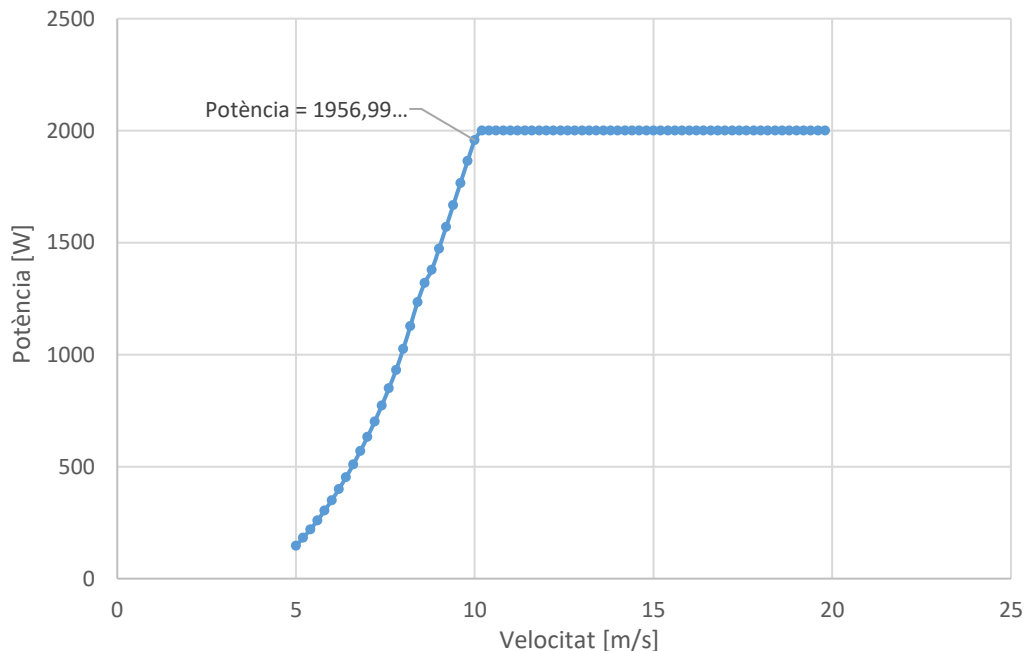
$$\eta_{\text{Perfil}} = 0,9417 = 94,17\%$$

El rendiment a la punta de la pala és el següent:

$$\eta_{\text{tip}} \approx 1 - \frac{1,84}{3 \cdot 5}$$

$$\eta_{tip} \approx 0,8773 = 87,73\%$$

A continuació es simula mitjançant el mòdul *Turbine BEM Simulation* el comportament de la pala amb aquests rendiments.



**Gràfic 4.9: Relació de la potència vers la velocitat del vent amb limitació de potència per la turbina de 2kW**

Com es pot observar en aquesta gràfica, per un valor de velocitat de vent igual a 10 m/s la potència que genera la turbina amb les correccions afegides i tenint en compte el rendiment és de 1957 W, molt pròxim al valor que es vol obtenir de 2 kW, per tant es pot donar com a bo el dimensionat actual del rotor d'aquesta turbina.

També es pot veure com a partir de 2 kW entra en funcionament el sistema de control de l'angle de pas que regula la potència que genera la turbina girant l'angle de les pales respecte l'angle del rotor per tal que no sobrepassi aquest valor i no es danyi per velocitats més elevades.

- Correcció del dimensionat per la turbina de 4 kW:

El coeficient de potència trobat en el primer dimensionat d'aquesta turbina és de  $c_p = 0,43$  i es el que s'utilitza per tal de millorar el diàmetre del rotor.

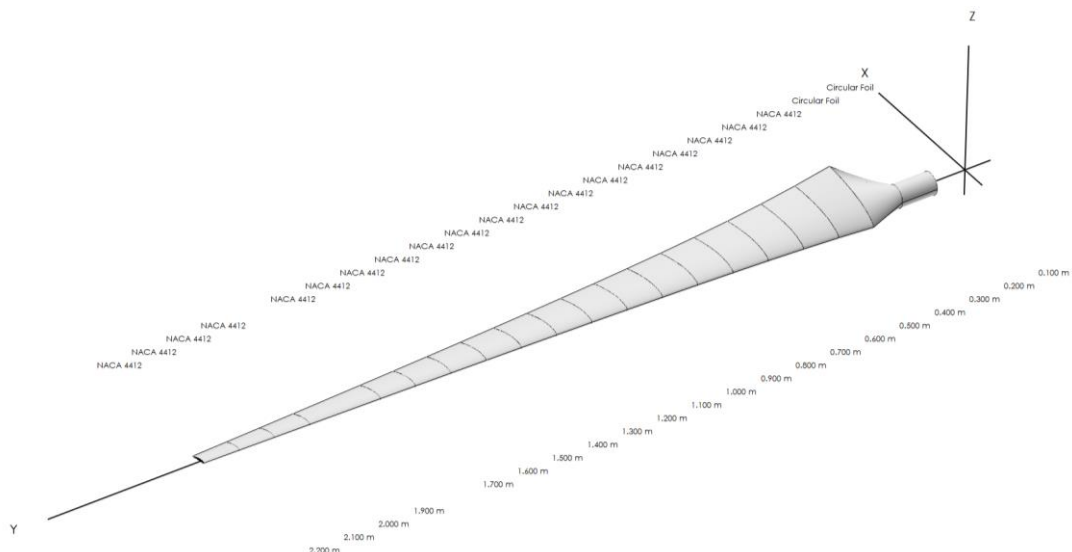
$$4.000 = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot S \cdot 10^3 \cdot 0,43$$

$$S = 15,1875 \text{ m}^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = 4,3974 \text{ m}$$

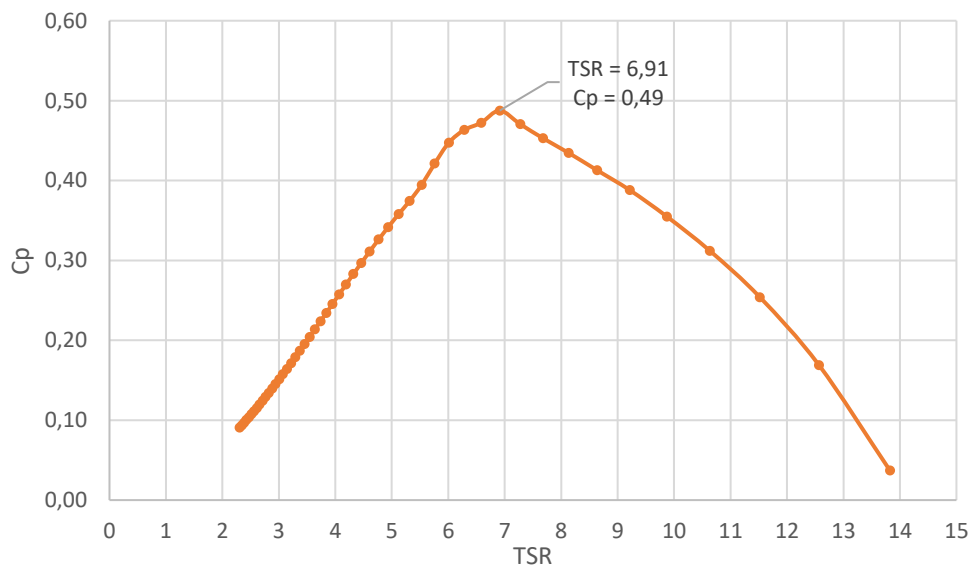


El diàmetre del rotor amb el dimensionat inicial era de 3,7542 metres mentre que amb la correcció surt de 4,3974 metres de diàmetre. El disseny de la pala de 4 kW queda de la següent forma:



**Figura 4.15: Disseny optimitzat corregit mitjançant QBlade de la pala de la turbina de 4kW**

Els valors de *tip speed ratio* i de coeficient de potència per la correcció surten amb els següents valors:



**Gràfic 4.10: Relació del coeficient de potència vers el tip speed ratio per la turbina de 4kW**

Amb el valor del *tip speed ratio* d'aquest dimensionat es poden calcular les pèrdues que es tindran per així poder-ne simular la potència real.

El rendiment del perfil és el següent:

$$\eta_{\text{Perfil}} = 1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{1,0994}{2,1987} \cdot \frac{6,91}{64,368}$$

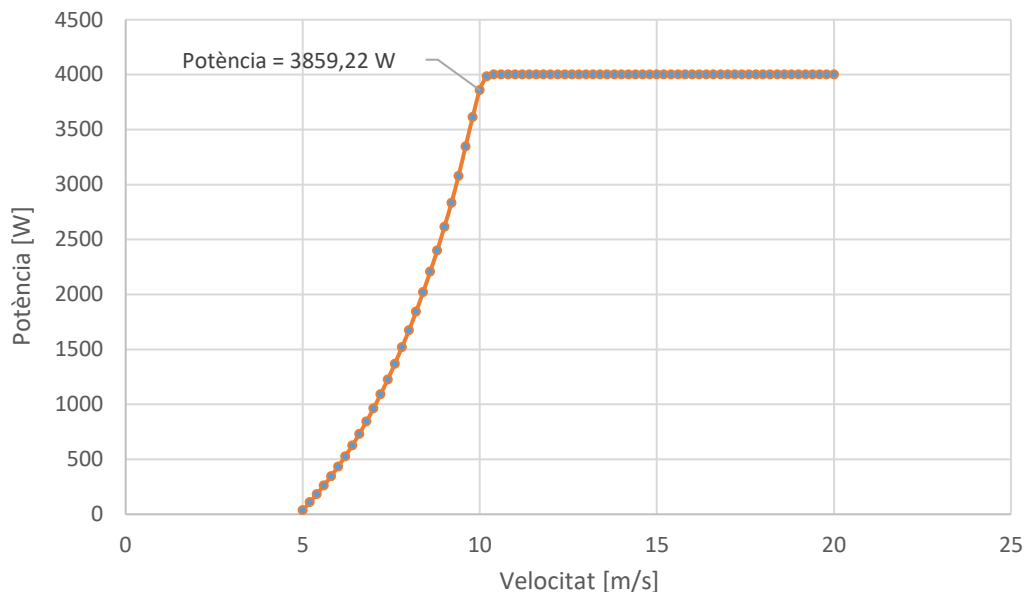
$$\eta_{\text{Perfil}} = 0,9195 = 91,95\%$$

El rendiment a la punta de la pala és el següent:

$$\eta_{tip} \approx 1 - \frac{1,84}{3 \cdot 6,91}$$

$$\eta_{tip} \approx 0,9112 = 91,12\%$$

A continuació es simula mitjançant el mòdul *Turbine BEM Simulation* el comportament de la pala amb aquests rendiments.



**Gràfic 4.11: Relació de la potència vers la velocitat del vent amb limitació de potència per la turbina de 4kW**

Com es pot observar en aquesta gràfica, per un valor de velocitat de vent igual a 10 m/s la potència que genera la turbina amb les correccions afegides i tenint en compte el rendiment és de 3859 W, molt pròxim al valor que es vol obtenir de 4 kW, per tant es pot donar com a bo el dimensionat actual del rotor d'aquesta turbina.

També es pot veure com a partir de 4 kW entra en funcionament el sistema de control de l'angle de pas que regula la potència que genera la turbina girant l'angle de les pales respecte l'angle del rotor per tal que no sobrepassi aquest valor i no es danyi per velocitats més elevades.

- Correcció del dimensionat per la turbina de 8 kW:

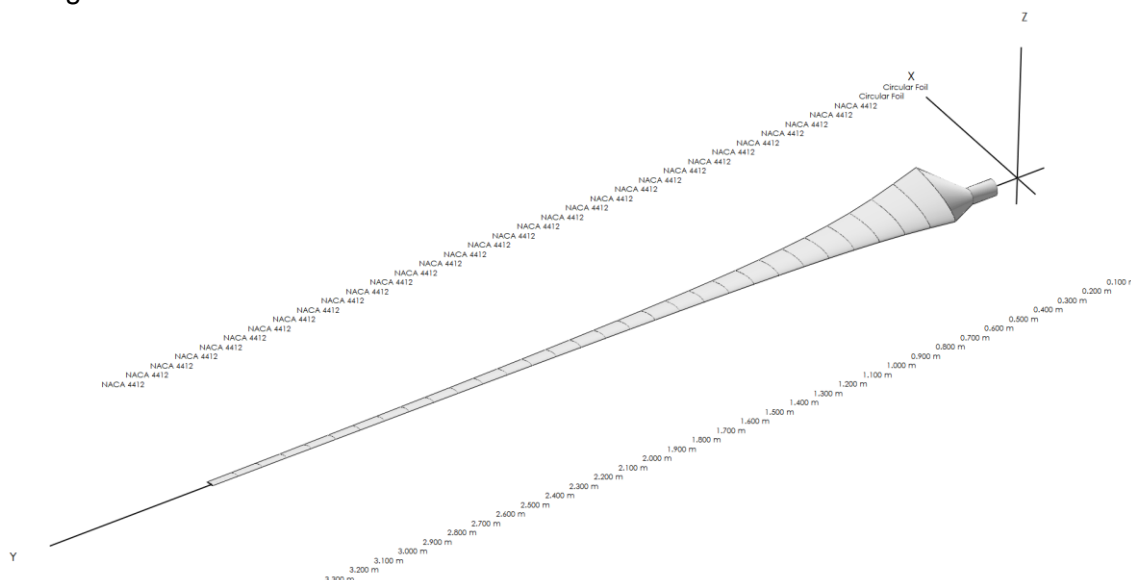
El coeficient de potència trobat en el primer dimensionat d'aquesta turbina és de  $c_p = 0,38$  i es el que s'utilitza per tal de millorar el diàmetre del rotor.

$$8.000 = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot S \cdot 10^3 \cdot 0,38$$

$$S = 34,3716 \text{ m}^2$$

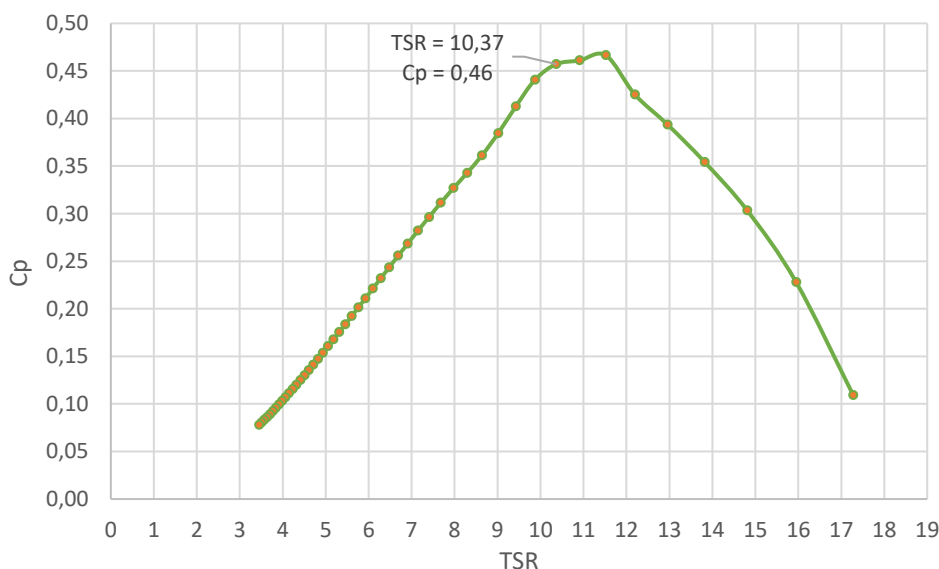
$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = 6,6154 \text{ m}$$

El diàmetre del rotor amb el dimensionat inicial era de 5,3092 metres mentre que amb la correcció surt de 6,6154 metres de diàmetre. El disseny de la pala de 8 kW queda de la següent forma:



**Figura 4.16: Disseny optimitzat corregit mitjançant QBlade de la pala de la turbina de 8kW**

Els valors de *tip speed ratio* i de coeficient de potència per la correcció surten amb els següents valors:



**Gràfic 4.12: Relació del coeficient de potència vers el tip speed ratio per la turbina de 8kW**

Amb el valor del *tip speed ratio* d'aquest dimensionat es poden calcular les pèrdues que es tindran per així poder-ne simular la potència real.

El rendiment del perfil és el següent:

$$\eta_{Perfil} = 1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{1,6539}{3,3077} \cdot \frac{10,37}{64,368}$$

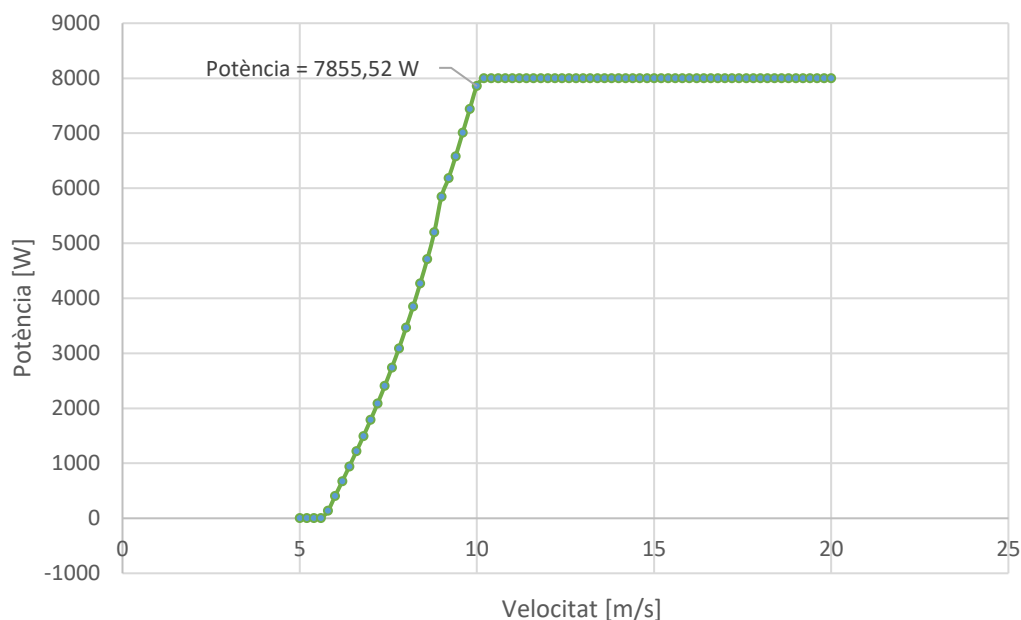
$$\eta_{Perfil} = 0,8792 = 87,92\%$$

El rendiment a la punta de la pala és el següent:

$$\eta_{tip} \approx 1 - \frac{1,84}{3 \cdot 10,37}$$

$$\eta_{tip} \approx 0,9409 = 94,09\%$$

A continuació es simula mitjançant el mòdul *Turbine BEM Simulation* el comportament de la pala amb aquests rendiments.



**Gràfic 4.13: Relació de la potència vers la velocitat del vent amb limitació de potència per la turbina de 8kW**

Com es pot observar en aquesta gràfica, per un valor de velocitat de vent igual a 10 m/s la potència que genera la turbina amb les correccions afegides i tenint en compte el rendiment és de 7.856 W, molt pròxim al valor que es vol obtenir de 8 kW, per tant es pot donar com a bo el dimensionat actual del rotor d'aquesta turbina.

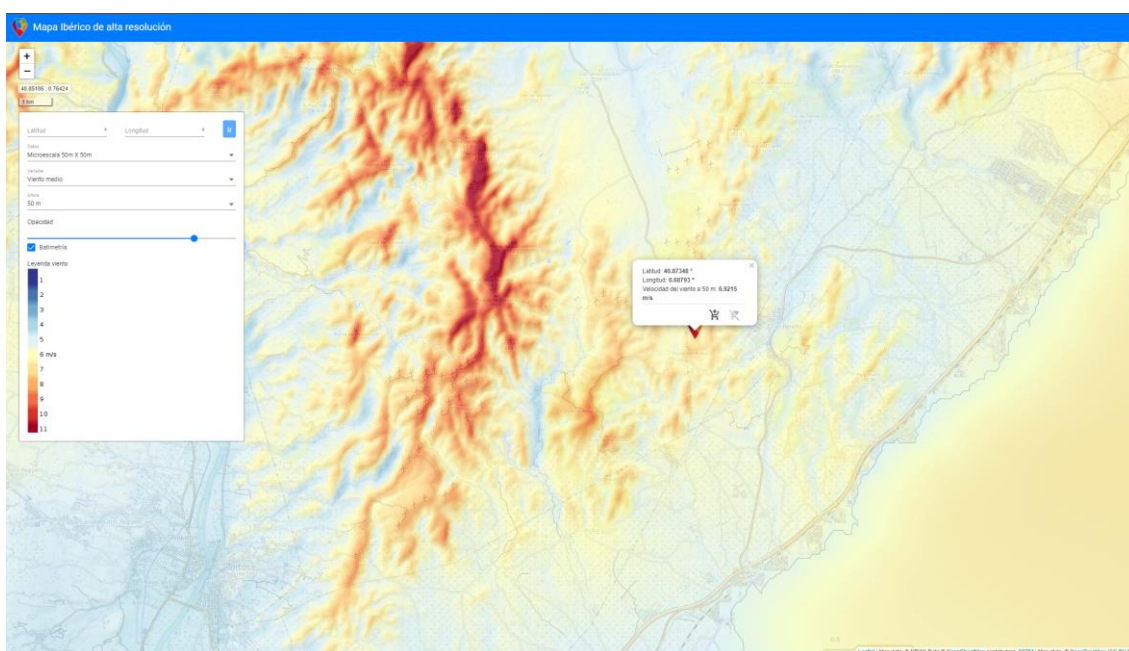
També es pot veure com a partir de 8 kW entra en funcionament el sistema de control de l'angle de pas que regula la potència que genera la turbina girant l'angle de les pales respecte l'angle del rotor per tal que no sobrepassi aquest valor i no es danyi per velocitats més elevades.

## 5. Exemple d'ubicació d'una instal·lació de mini eòlica

Per a la instal·lació d'una turbina de generació mini eòlica es necessari tenir en compte el recurs eòlic del que disposa la localització en la qual es vol muntar. En el cas de les turbines dissenyades en aquest projecte, és necessari una velocitat mitjana mínima de 5 m/s per tal que aquesta es posi en funcionament.

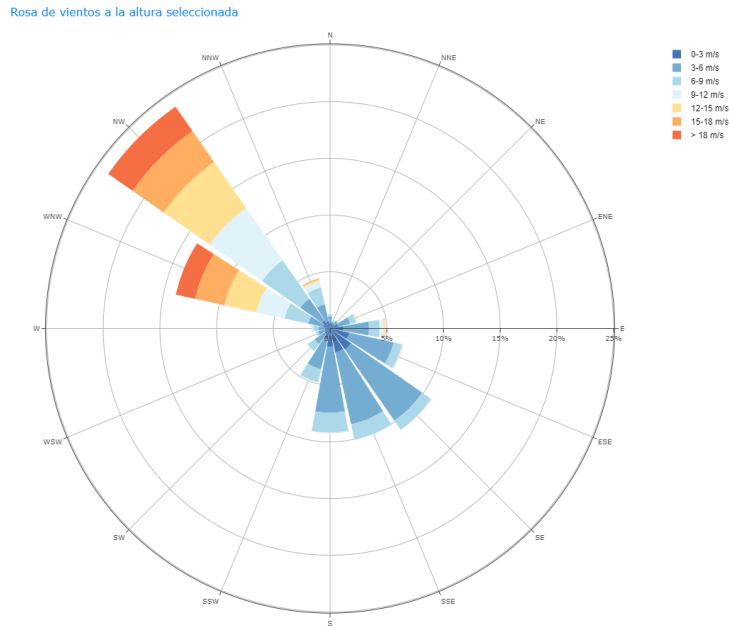
Si es fa una cerca mitjançant els atlas eòlics disponibles de localitzacions amb una probabilitat de vent superior a aquest valor, es pot observar com per alçades de 50 metres hi ha molt poques localitzacions viables per a la instal·lació d'una turbina eòlica.

Una possible localització seleccionada en aquest projecte com exemple és la zona de el Perelló. En aquesta ubicació actualment ja hi existeix un parc eòlic anomenat Les Colladetes.

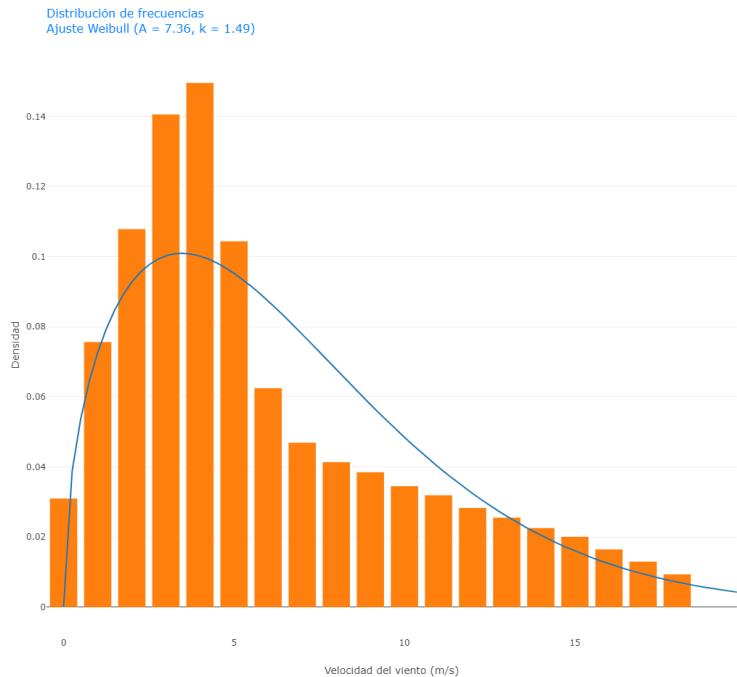


**Figura 5.1: Mapa eòlic a una alçada de 50 metres de la zona del Perelló. Font: mapaeolicoiberico.com**

Amb la distribució de Weibull de la probabilitat de la intensitat del vent a la localització, es pot fer un càlcul estimat del rendiment de la generació de la instal·lació.



**Figura 5.2: Rosa dels vents de la zona del Perelló. Font: mapaeolicoiberico.com**



**Figura 5.3: Distribució de Weibull de la densitat de vent de la zona del Perelló. Font: mapaeolicoiberico.com**

Per tal d'esbrinar la potència que poden generar les turbines eòliques dissenyades al llarg del dia, es necessita saber la quantitat de temps que el vent té una velocitat superior als 5 m/s ja que es a partir d'aquesta velocitat que les turbines comencen a generar energia. Per tal de trobar la probabilitat de vent superior als 5 m/s es pot utilitzar la distribució de Weibull i la següent equació.

Probabilitat de vent superior o igual a 5 m/s:

$$P(v \geq v_x) = e^{-\left(\frac{v_x}{A}\right)^k} \quad [ 12 ]$$

$$P(v \geq 5) = e^{-\left(\frac{5}{7,36}\right)^{1,49}}$$

$$P(v \geq 5) = 0,57 = 57\%$$

Durant el 57% del temps el vent es superior als 5 m/s, per tant, es necessita saber quina serà la velocitat mitjana del vent durant aquest temps.

Velocitat mitjana de la distribució de vent:

$$\bar{v} = A \cdot r \left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad [13]$$

$$\left(1 + \frac{1}{k}\right) = \left(1 + \frac{1}{1,49}\right) = 1,6711$$

$$r(1,6711) = 0,9035$$

$$\bar{v} = 7,36 \cdot 0,9035$$

$$\bar{v} = 6,65 \text{ m/s}$$

Temps de funcionament:

$$24 \cdot 0,57 = 13,68 \text{ h al dia}$$

$$365 \cdot 24 \cdot 0,57 = 4.993,2 \text{ h a l'any}$$

Si es té en compte que aproximadament estarà funcionant durant 13,68 hores al dia amb una velocitat mitjana de 6,65 m/s es poden deduir les següents generacions elèctriques:

- Potència generada per la turbina de 2 kW:

Per una velocitat mitjana de 6,65 m/s aquesta turbina es capaç de generar 510 W, per tant la potència generada al llarg del dia seria:

$$510 \cdot 13,68 = 6.976,8 \text{ W diaris}$$

Per tant, el rendiment d'aquesta instal·lació seria de:

$$\frac{510}{2.000} = 0,255 = 25,5\%$$

- Potència generada per la turbina de 4 kW:

Per una velocitat mitjana de 6,65 m/s aquesta turbina es capaç de generar 735 W, per tant la potència generada al llarg del dia seria:

$$735 \cdot 13,68 = 10.054,8 \text{ W diaris}$$

Per tant, el rendiment d'aquesta instal·lació seria de:

$$\frac{735}{4.000} = 0,1838 = 18,38\%$$

- Potència generada per la turbina de 8 kW:

Per una velocitat mitjana de 6,65 m/s aquesta turbina es capaç de generar 1.230 W, per tant la potència generada al llarg del dia seria:

$$1.230 \cdot 13,68 = 16.826,4 \text{ W diaris}$$

Per tant, el rendiment d'aquesta instal·lació seria de:

$$\frac{1.230}{8.000} = 0,1538 = 15,38\%$$



## 6. Conclusions

Les conclusions a les quals s'ha arribat en la realització d'aquest projecte es poden llistar de la següent forma.

- L'energia eòlica és un recurs molt abundant arreu del món el qual no està suficientment explotat. La necessitat d'energia elèctrica en la societat actual cada cop es més elevada i es necessita una transició de sistema de generació d'energia elèctrica optant per les que són d'origen renovable i deixant enrere els combustibles fòssils.
- Com s'ha pogut estudiar, el recurs eòlic es molt variable en el temps i en la regió en la que ens trobem. Es difícil trobar àrees amb alts nivell de velocitat de vent i que a més a més sigui sostingut en el temps i poc variable en intensitat.
- El disseny i enginyeria en el sector de l'energia eòlica ha avançat molt en les últimes dècades i s'ha passat de tenir parcs eòlics *onshore* formats per turbines de potències inferiors al megawatt hora a poder instal·lar turbines d'accionament directe en zones *offshore* capaces de generar potències properes als 10 megawatts hora. També destacar que actualment estan començant a implementar les turbines *Vortex Bladeless* que no tenen aspes ni parts mòbils i que poden ser una bona aposta pel futur de l'energia eòlica.
- Referent al disseny de les pales per les turbines eòliques d'eix horitzontal, en aquest projecte s'ha pogut observar que són necessàries moltes iteracions en la majoria de casos del seu disseny per tal d'aconseguir el comportament desitjat de la turbina. Tot i que els càlculs previs son necessaris per tal de tenir un punt de partida per les dimensions de les pales, el disseny resultant acaba sorgint a mesura de proves mitjançant el software de simulació i si se'n té la capacitat mitjançant prototips.
- Segons estudis de consum energètics a Catalunya, una llar consumeix de mitjana 9,3 kW diaris d'energia elèctrica. Amb les dades obtingudes de generació de les turbines eòliques dissenyades, es pot observar com tant la de 4 kW com la de 8 kW son capaces de generar aquesta energia elèctrica al llarg del dia. Tot i això, s'ha de tenir en compte que tot i haver seleccionat una zona del territori amb una alta probabilitat de vents forts, aquestes turbines estan funcionant amb velocitats baixes de vent i per tant amb un rendiment molt baix d'entre el 15% i el 20%.
- Gràcies a les dades de rendiment extretes es pot extreure la conclusió que l'energia eòlica necessita d'un recurs de intensitat de vent molt elevat el qual fa que la generació a nivell particular sigui difícilment viable. En la majoria de casos l'energia solar fotovoltaica seria més adequada gràcies a la quantitat de radiació solar que rep la regió de Catalunya i la reducció de costos de instal·lació i manteniment que suposaria. En qualsevol cas, l'energia mini eòlica serviria com a reforç d'una font energètica principal.

## 7. Bibliografia

- Agencia estatal de meteorología (AEMET)*. (2021). Recollit de <http://www.aemet.es/ca/portada>
- Airfoil Tools*. (2021). Recollit de <http://airfoiltools.com>
- Centro nacional de energías renovables (CENER)*. (2021). Recollit de <https://www.cener.com/>
- David Marten, J. W. (2013). *QBlade guidelines*. Berlin.
- Enair*. (2021). Recollit de <https://www.enair.es/es/>
- Gasch, R., & Twele, J. (2011). *Wind power plants fundamentals, design, construction and operation*. Berlin: Springer.
- Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (IDAE)*. (2021). Recollit de <https://www.idae.es/>
- Instituto tecnológico y de energías renovables (ITER)*. (2021). Recollit de <https://www.iter.es/>
- (2020). *La energía en España 2018*. Madrid.
- Lynn, P. A. (2012). *Onshore and offshore wind energy*. Imperial College London, UK: Wiley.
- Mapa eólico ibérico*. (2021). Recollit de <https://www.mapaeolicoiberico.com/>
- Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico*. (2021). Recollit de <https://www.miteco.gob.es/es/>
- QBlade*. (2021). Recollit de <http://www.q-blade.org/>
- Rao, K. R. (2019). *Wind Energy for Power Generation*. Brandon, MS, USA: Springer.
- Sistema Español de Inventario de Emisiones*. (2021). Recollit de <https://www.miteco.gob.es/>
- Wikipedia*. (2021). Recollit de <https://es.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Portada>
- Wood, D. (2011). *Small wind turbines*. University of Calgary, Canada: Springer.
- World Energy Trade*. (2021). Recollit de <https://www.worldenergytrade.com/>