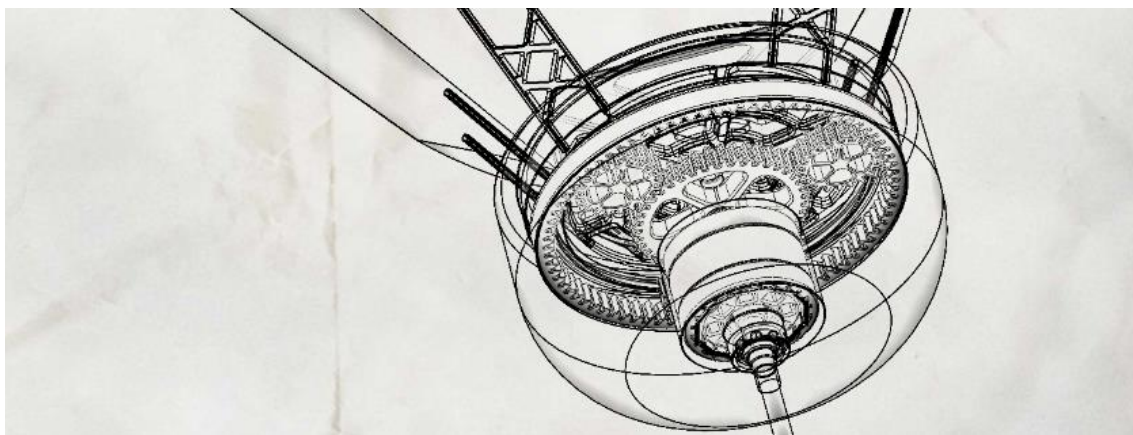


TREBALL FI DE GRAU  
Grau en Enginyeria Mecànica  
**ESTUDI D'UNA TURBINA ÈOLICA D'EIX BASCULANT**



**Memòria**

**Autor:** Gerard Alsina Merelo  
**Director:** Francesc Pozo Montero  
**Ponent:** Francisco Javier Puerta Coll  
**Convocatòria:** Juny 2018



# Resum

L'estudi, la recerca i la investigació sobre el camp de les energies renovables sempre és fruit de interès i sinònim de desenvolupament evolutiu cap a una societat sostenible i autosuficient. En aquest treball es pretén aportar alguns elements associats al desenvolupament de les turbines eòliques i l'aprofitament de l'energia eòlica. Basant-se sempre en un model matemàtic implementat a softwares de programació, es pretén vincular la teoria aerodinàmica establerta referent a la mecànica de fluids cap a sistemes de programació i optimització enfocats a una turbina real. Aquesta turbina s'ha interpretat, traspassat i modelat utilitzant programes CAD seguint els criteris dimensionals establerts per els programes de càlcul basats en el model matemàtic.

# Resumen

El estudio y la investigación sobre el campo de las energías renovables siempre es fruto de interés y sinónimo de desarrollo evolutivo hacia una sociedad sostenible y autosuficiente. En este trabajo se pretende aportar algunos elementos asociados al desarrollo de las turbinas eólicas y el aprovechamiento de la energía eólica. Basándose siempre en un modelo matemático implementado en softwares de programación, se pretende vincular la teoría aerodinámica establecida referente a la mecánica de fluidos hacia sistemas de programación y optimización enfocados a una turbina real. Esta turbina se ha interpretado, traspasado y modelado utilizando programas CAD siguiendo los criterios dimensionales establecidos por los programas de cálculo basados en el modelo matemático.

# Abstract

The research on the field of renewable energies is always a source of interest and a synonym for evolutionary development towards a sustainable and self-sufficient society. This paper intends to provide some elements associated with the development of wind turbines and the use of wind energy. Based always on a mathematical model implemented in programming software, it is intended to link established aerodynamic theory regarding fluid mechanics towards programming and optimization systems focused on a real turbine. This turbine has been interpreted and transferred to modeling using CAD programs following the dimensional criteria established by the mathematical model based calculation programs.

## Índex de taules

<i>Taula 1</i> .....	15
<i>Taula 2</i> .....	43
<i>Taula 3</i> .....	44
<i>Taula 4</i> .....	44

## Índex de gràfics

<i>Gràfic 1</i> .....	6
<i>Gràfic 2</i> .....	6
<i>Gràfic 3</i> .....	8
<i>Gràfic 4</i> .....	26
<i>Gràfic 5</i> .....	26
<i>Gràfic 6</i> .....	27
<i>Gràfic 7</i> .....	27
<i>Gràfic 8</i> .....	28
<i>Gràfic 9</i> .....	28
<i>Gràfic 10</i> .....	29
<i>Gràfic 11</i> .....	30
<i>Gràfic 12</i> .....	30
<i>Gràfic 13</i> .....	32
<i>Gràfic 14</i> .....	34
<i>Gràfic 15</i> .....	35
<i>Gràfic 16</i> .....	37
<i>Gràfic 17</i> .....	37
<i>Gràfic 18</i> .....	38
<i>Gràfic 19</i> .....	38
<i>Gràfic 20</i> .....	39
<i>Gràfic 21</i> .....	39
<i>Gràfic 22</i> .....	40
<i>Gràfic 23</i> .....	45
<i>Gràfic 24</i> .....	45

# Índex de il·lustracions

<i>Il·lustració 1</i> .....	5
<i>Il·lustració 2</i> .....	7
<i>Il·lustració 3</i> .....	8
<i>Il·lustració 4</i> .....	11
<i>Il·lustració 5</i> .....	11
<i>Il·lustració 6</i> .....	12
<i>Il·lustració 7</i> .....	12
<i>Il·lustració 8</i> .....	14
<i>Il·lustració 9</i> .....	14
<i>Il·lustració 10</i> .....	15
<i>Il·lustració 11</i> .....	17
<i>Il·lustració 12</i> .....	20
<i>Il·lustració 13</i> .....	24
<i>Il·lustració 14</i> .....	25
<i>Il·lustració 15</i> .....	25
<i>Il·lustració 16</i> .....	25
<i>Il·lustració 17</i> .....	32
<i>Il·lustració 18</i> .....	35
<i>Il·lustració 19</i> .....	40
<i>Il·lustració 20</i> .....	46
<i>Il·lustració 21</i> .....	46
<i>Il·lustració 22</i> .....	47
<i>Il·lustració 23</i> .....	47
<i>Il·lustració 24</i> .....	48
<i>Il·lustració 25</i> .....	48
<i>Il·lustració 26</i> .....	49
<i>Il·lustració 27</i> .....	49
<i>Il·lustració 28</i> .....	50
<i>Il·lustració 29</i> .....	50

Resum	III
Resumen	III
Abstract	III
Índex de taules, figures i gràfics	IV
<b>1. Prefaci</b>	<b>1</b>
1.1. Origen	1
1.2. Motivació	1
1.3. Requeriments	2
<b>2. Introducció</b>	<b>3</b>
2.1. Objectius	3
2.2. Abast	3
<b>3. Teoria aerodinàmica</b>	<b>4</b>
3.1. Principals mètodes d'aprofitament aerodinàmic	4
3.2. Règims fluids i capa límit	6
3.3. Entrada en pèrdua o 'stall'	7
3.4. Perfils alars normalitzats. 'Naca airfoils'	8
3.5. Turbines HAWT	9
3.6. Turbines VAWT	9
3.7. Correcció de velocitats en perfils alars	12
<b>4. Turbina d'eix basculant, TAWT</b>	<b>13</b>
4.1. Introducció	13
4.2. Taula comparativa entre diferents turbines	15
4.3. Hipòtesi de l'estudi	16
<b>5. Estudi del model</b>	<b>17</b>
5.1. Velocitat del fluid respecte l'àlep	17
5.2. Càlcul de les forces aerodinàmiques en base a velocitats	19
5.3. Parell i potència entregada	21
5.4. Força d'arrossegament ' $F_m$ '	23
5.5. Determinació del perfil alar	23
5.6. Càlcul dels angles reals ' $s$ ', ' $t$ ' i ' $S_m$ ' en base a un ajust iteratiu	40
5.7. Conclusions del model matemàtic	45
<b>6. Components mecànics</b>	<b>46</b>
6.1. Àleps	46
6.2. Carrier	46

6.3.	Engranatge cilíndric anella	47
6.4.	Engranatge cilíndric central	47
6.5.	Engranatge cilíndric planetari	48
6.6.	Estructura <i>housing-àlep</i>	48
6.7.	Estructura interna àleps	49
6.8.	<i>Housing</i> (vista d'una secció)	49
6.9.	Rotor (vista d'una secció)	50
6.10.	Explosionat	50
<b>7.</b>	<b>Anàlisi de l'impacte ambiental</b>	<b>51</b>
<b>Conclusions</b>		<b>52</b>
<b>Bibliografia</b>		<b>53</b>
<b>Pressupost</b>		<b>54</b>
<b>Annex</b>		<b>56</b>
<b>A.1.</b>	<b>Càlculs</b>	<b>56</b>
A.1.1.	Coeficients ' <i>Lift</i> ' i ' <i>Drag</i> '	56
A.1.2.	Parell i força d'arrossegament	57
A.1.3.	RPM d'equilibri	60
A.1.4.	Potència màxima	61
A.1.5.	Gràfics	61
A.1.6.	Càlcul iteratiu per la inclinació ' <i>s</i> '	64
A.1.7.	Sèries de convergència per a ' <i>s</i> '	67
<b>A.2.</b>	<b>Plànols</b>	<b>68</b>
	Plànol 1/9: Rotor	69
	Plànol 2/9: ' <i>Carrier</i> '	70
	Plànol 3/9: Engranatge Cilíndric Anella	71
	Plànol 4/9: Engranatge Cilíndric Central	72
	Plànol 5/9: Engranatge Cilíndric Planetari	73
	Plànol 6/9: Estructura Housing-Àlep	74
	Plànol 7/9: Estructura Interna Àleps	75
	Plànol 8/9: ' <i>Housing</i> '	76
	Plànol 9/9: Àlep	77

# 1. Prefaci

## 1.1. Origen

Aquest projecte parteix de la idea de testar un nou concepte de turbina conceptualitzat per el meu tutor, Francisco Javier Puerta. Cal dir que la meva aportació està vinculada a antigues aportacions de altres estudiants dels quals se'n pot fer referència al llarg del treball igual que de la feina aportada per el tutor prèviament. I es pren amb gran iniciativa la aportació que, des dels camps que es creguin convenientes, es pugui acoblar al projecte.

## 1.2. Motivació

El fet que el treball estigui pre-definit per el professor no limita sota cap concepte les múltiples vessants i oportunitats que se'n poden derivar. El desenvolupament en el camps de la aerodinàmica aplicada a l'aprofitament de l'energia eòlica son, per exemple, un dels conceptes a desentranyar, analitzar i testar. La meva ambició per els camps de l'aerodinàmica i la dinàmica de fluids en general s'ha vist representada per una proposta de treball que té la possibilitat influenciar-se d'aquests camps. S'ha de contemplar que es treballa sobre un estudi que ja està en marxa i que es necessita la tecnologia i intel·lecte per, si més no, ajudar a desentranyar i aportar els elements que se'n requereixen.

La motivació sorgeix a partir del meu interès en els camps de la física que estudia el comportament dels fluids. Prèviament havia tingut experiència en el desenvolupament de una turbina tipus 'Tesla'. Vaig tenir la oportunitat de analitzar, testar i inclús imprimir una turbina de dimensions reduïdes. La meva motivació per seguir estudiant totes les màquines que tenen relació amb la interacció de fluids segueix eixamplant-se a mesura que es van coneixen nous conceptes. Turbines, bombes, aerogeneradors, molins, etc. són objecte de interès i actualment son objecte pel desenvolupament tecnològic sostenible. La aportació que se'n pot derivar des de l'estudiant dóna lloc a unes possibilitats extenses cara al aprofitament i implementació de les energies renovables en la societat actual.



## 1.3. Requeriments

Els requeriments teòrics que ens permeten el desenvolupament de projecte són nocions bàsiques sobre la dinàmica de fluids, mecànica de fluids i alguns conceptes de aerodinàmica. Alguns dels conceptes s'hauran treballat a diferents assignatures del grau pertinent de Enginyeria Mecànica com poden ser mecànica de fluids o matemàtiques. Altres requeriments tenen a veure amb la programació del model matemàtic desenvolupat pel tutor i modificat per l'estudiant adaptant el model a l'estudi del treball. També s'han dissenyat models en CAD utilitzant Solidworks, per tal de conèixer prèviament les propietats físiques de un possible model real i les geometries que se'n poden derivar.

## 2. Introducció

### 2.1. Objectius

El objectius que es marquen son el desenvolupament teòric d'una turbina d'eix vertical modificada amb la possibilitat de inclinar l'eix (eix basculant) segons la direcció del fluid l'aire. Aquest desenvolupament teòric es veu implementat en programes de càlcul aconseguint un model matemàtic capaç de optimitzar els resultats. També es marca com a objectiu el modelatge en Solidworks.

### 2.2. Abast

A partir de uns objectius determinats, els interessos al desenvolupament de segons quins camps poden interferir en el que en un principi s'havia marcat. L'abast pren com a referència el desenvolupament teòric d'un model i el disseny. Es concentra en la part mecànica i aerodinàmica i es deixa per un futur l'estudi de la part elèctrica corresponent la generació i al transport de l'energia produïda. Es creu que el mateix desenvolupament del projecte ja és prou ambiciós, tenint en compte que s'haurien analitzat prèviament els valors de la turbina basats en els models matemàtics pertinents.

## 3. Teoria aerodinàmica

### 3.1. Principals mètodes d'aprofitament aerodinàmic

Existeixen dos maneres d'aprofitar l'energia eòlica. Dos mètodes que es basen en principis físics totalment diferents, però que estan relacionats:

#### Principi de la quantitat de moviment

S'ha vist anteriorment com en la turbina Savonius funciona basant-se en aquest principi. La mateixa força que transmet el fluid cap a l'àlep serà la que es recollirà en forma de força mecànica cap al mateix, transportant la quantitat de moviment directament des del fluid cap a l'àlep en el volum de control.

#### Principi aerodinàmic (Teoria de sustentació)

La sustentació és la força generada per una superfície, cos, en la direcció perpendicular a la direcció relativa del fluid que la travessa. Quan tenim un corrent d'aire que incideix a un volum aquest es distribueix en dos. L'intradós, que es el corrent que va per sota i el extradós el que va per damunt. Aquests corrents es veuen dirigits per la geometria del mateix cos, modificant així les velocitats i les direccions dels mateixos. La geometria que intervé en el càlcul de la força de sustentació ve representada per un coeficient adimensional,  $C_L$ . La diferència de pressions produïda per la diferència de velocitats genera una força resultant desdoblada en dues components. La component Lift i la component Drag. El Lift fa referència a la sustentació i va en la direcció perpendicular a la direcció del vent relatiu (representat a la figura per  $V_\infty$ ). El *drag* fa referència a la força d'arrossegament i té la direcció paral·lela a la direcció del vent relatiu. Aquestes forces es poden calcular mitjançant el següent model matemàtic.

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_L$$

$C_L$ : Coeficient Lift, adimensional.

$A$ : Àrea de superfície alar, en  $m^2$ .

$V$ : Velocitat relativa del fluid a la superfície, en  $m/s$

$\rho$ : Densitat del fluid, en  $kg/m^3$

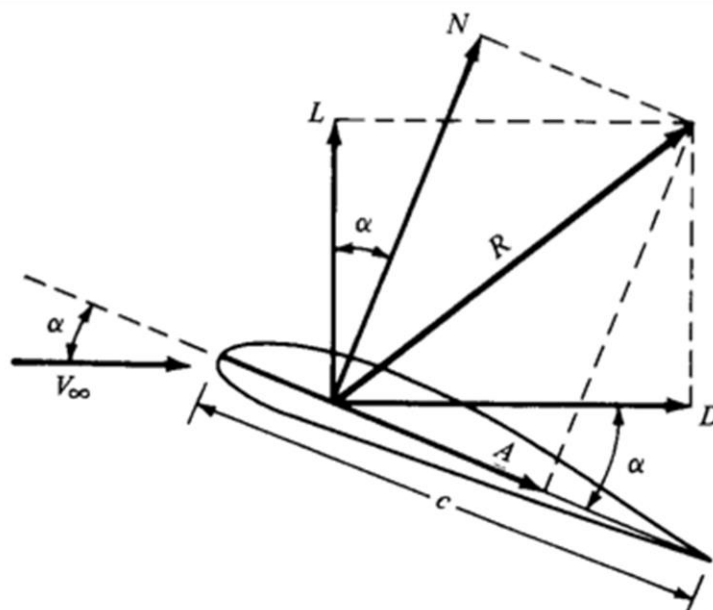
$L$ : Força de sustentació, en  $N$ .

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_D$$

$C_D$ : Coeficient 'drag', adimensional.

$D$ : Força d'arrossegament, en  $N$ .

$A, V$  i  $\rho$  : igual que l'apartat anterior



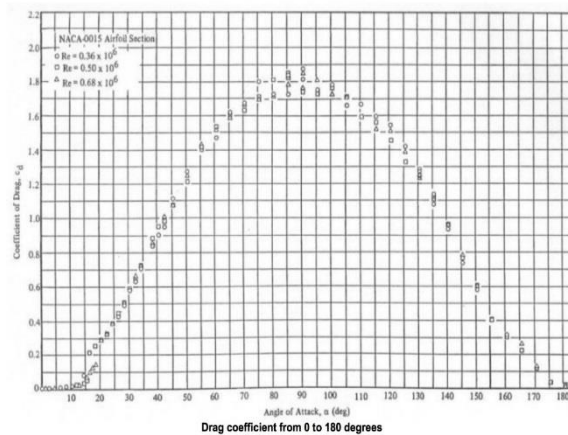
Il·lustració 1 Forces lift 'L' (en vertical) i drag 'D' (en horitzontal). Triangle de forces i Resultant (R)

En la figura també s'han representat les forces en funció dels eixos perpendiculars respecte a la direcció de la corda (representada pels punts suspensius que travessen el perfil alar) de l'aleró per les lletres *N* i *D*. La corda és el segment damunt del qual se'n dibuixa el perfil alar representat per la lletra *c*. L'angle d'atac  $\alpha$  és la inclinació de la direcció del vent relatiu respecte la direcció de la corda. La modificació d'aquest angle juntament amb la velocitat relativa del vent per l'aleró serà la responsable d'aquestes forces resultants objectes d'estudi.

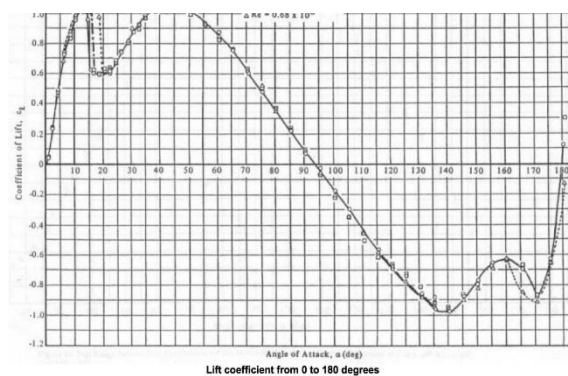
Els coeficients 'lift' i 'drag' s'extreuen a través d'una normalització<sup>1</sup> i varien en funció de l'angle d'atac. La informació que ens proporciona es taules d'internet estan limitades a valors de alfa compresos entre  $-10^\circ$  i  $20^\circ$  normalment degut a la aplicació sobre l'aeronàutica. En el cas d'una turbina d'eix vertical l'aire pren varies direccions i s'ha hagut d'aproximar un model per estudiar aquest cas. La solució que es proposa per poder utilitzar les taules de  $C_L$  i  $C_D$  de qualsevol perfil és la següent.

Partim de les taules 'lift' i 'drag' corresponents a un perfil simètric:

<sup>1</sup> Totes les dades referents als coeficients 'drag' i 'lift' s'obtenen de: <http://airfoiltools.com/>



Gràfic 1 Funció del coeficient 'drag' vs angle d'atac



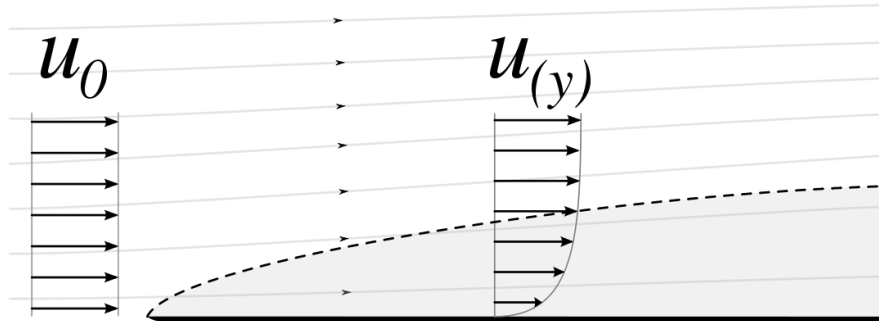
Gràfic 2 Funció del coeficient 'lift' vs angle d'atac

I les estenem de forma natural a 360°. Fora dels angles d'atac en el flux és laminar, el perfil es comporta com una superfície plana.

## 3.2. Règims fluids i capa límit

Quan un fluid travessa una superfície aquest genera un camp de velocitats. Aquest camp s'interpreta com la pertorbació, la influència que té el cos a travessar respecte el camp de velocitats original sense veure's modificat pel cos. Aquest camp s'analitza perquè és el responsable de dos conceptes importants en la mecànica de fluids: el règim fluid i la capa límit. Es pren un punt de referència de la superfície i s'apliquen allà les lleis fonamentals de la mecànica de fluids (Llei del no lliscament en el punt de contacte entre fluid-sòlid) i a partir d'aquell punt es dibuixen les velocitats des de la vora  $x=0$  fins a una distància suficient com perquè el mateix valor de la velocitat prengui valors propis del camp de velocitats original  $u$ . La representació de tots els punts en els quals es considera que la velocitat  $u(y)$  ja val igual a  $u(0)$  formen una corba (representada en punts suspensius). Aquesta corba rep el nom de capa límit. La suavització d'aquesta capa ve determinada per l'increment abrupte del perfil de velocitats en cada secció. La representació d'aquesta capa ens porta al següent concepte anomenat règim fluid. Diem que tenim un règim laminar quan obtenim una capa límit suavitzada i petita i un

règim turbulent quan aquesta té canvis abruptes i s'allunya del punt de referència a on  $u_{(y)} = 0$



*Il·lustració 2 Representació de la capa límit (punts suspensius), el perfil de velocitats abans i després de interferir al sòlid i el camp de velocitats (per darrera)*

El comportament i l'estudi de la capa límit és vital per l'aprofitament aerodinàmic i depèn de múltiples variables tan de l'entorn com de la geometria, material i de les propietats físiques dels perfils. L'anàlisi de la capa límit dóna lloc a la interpretació dels dos règims comentats. El model matemàtic desenvolupat al treball permet obtenir, a partir de uns paràmetres d'entrada, unes representacions o altres d'aquests comportaments, afinant els resultats en la mesura que ens interessi obtenir uns perfils i uns règims determinats.

### 3.3. Entrada en pèrdua o 'stall'

L'entrada en pèrdua de l'àlep i per conseqüència del conjunt mecànic que forma és un fenomen que ens interessa evitar. Aquest succeeix quan l'angle d'atac (la inclinació de la velocitat relativa del vent en funció de la direcció de la corda de l'àlep) sobrepassa el valor límit. La capa límit es desprèn de la superfície de l'àlep provocant turbulències a la corrent d'aire. Augmenta el mòdul de la força 'drag' bruscament i l'àlep frena.



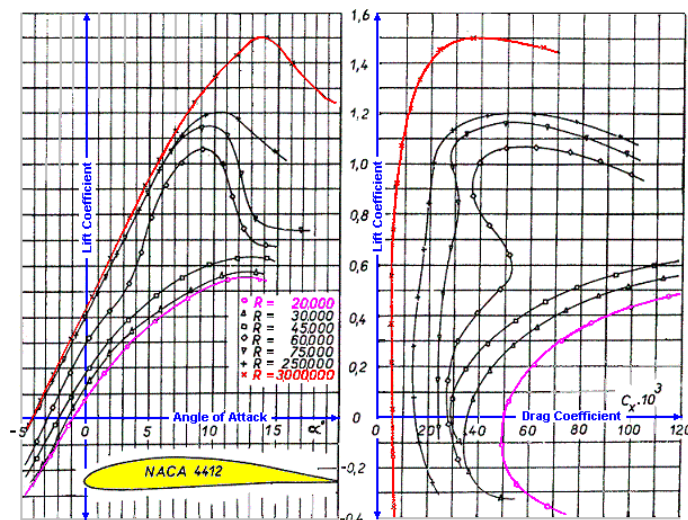
Il·lustració 3 Despreniment de la capa límit. Generació de vòrtex d'esprial degut a les turbulències del règim fluid.

### 3.4. Perfils alars normalitzats. 'Naca airfoils'

Els perfils NACA són perfils alars desenvolupats per 'National Advisory Committee for Aeronautics'. Els perfils estan descrits utilitzant un número juntament amb les sigles NACA. Aquests paràmetres numèrics es poden associar a unes equacions que generaran de forma precisa la geometria de la secció del perfil alar. Aquestes geometries son les corbes polars en les quals s'expressen les relacions entre els coeficients 'lift', 'drag' i l'angle d'atac.

En el desenvolupament del treball s'utilitzaran varis perfils NACA per desenvolupar el model matemàtic juntament amb el modelatge del disseny amb l'ajuda d'un CAD i s'escollirà un d'ells per portar-lo a la pràctica fabricant el model.

Exemples de les propietats esmentades:



Gràfic 3 A l'esquerra: gràfics del coeficient 'lift' vs angle d'atac en un perfil NACA 4412 sota diferents règims fluids. A la dreta: gràfics del coeficient 'lift' vs 'coeficient 'drag' sota els mateixos règims.

## 3.5. Turbines HAWT

Les turbines eòliques de eix horitzontal són aquelles les quals el pla que conté el rotor se situa perpendicular a la direcció del vent. Són les més utilitzades per l'aprofitament en l'extracció de l'energia eòlica i també les més estudiades. Es caracteritzen per la orientació que pren el pla del qual se'n treu l'energia. Això provoca haver de situar l'eix del rotor a una distància més gran que la que en fa el radi de rotació. Estan formades per els àleps, que s'encarreguen de l'intercanvi d'energia cinètica a energia mecànica. Aquests són elevats a una gran distància respecte el terra mitjançant una torre (d'acer o ciment) molt costosa i pesant que descansa sobre uns ciments suficientment estables. A la part superior de la torre consta la cabina dins de la qual es produeix, mitjançant el rotor, l'intercanvi energètic des de l'energia mecànica a l'energia elèctrica. La infraestructura de les HAWT són el seu principal inconvenient encara que el potencial energètic que tenen es prou elevat.

## 3.6. Turbines VAWT

Les VAWT són turbines eòliques d'eix vertical a diferència de les tradicionals turbines d'eix horitzontal. A continuació s'enumeren les principals característiques de les VAWT així com les seves principals avantatges respecte les HAWT.

### AVANTATGES

#### - Aprofitament eòlic en múltiples direccions

El fet que el centre de pressions sigui una fracció diferencial de la superfície total d'aprofitament alar fa possible que la força eòlica estigui constantment impactant sobre aquesta fracció [orientant així les turbines d'eix basculant, quan sigui el cas]. Es a dir, normalment tindrem un cilindre o con, un cos de revolució com a volum de control en el qual tot l'aire que circula per aquell volum és aprofitat, vingui de la direcció que vingui. En el cas de les HAWT podríem afirmar que només tenen una orientació en la qual el rendiment és màxim. També cal dir que necessita menys velocitat del fluid per arrancar respecte del horitzontals.

#### - Habilitat per aprofitar règims turbulents

La turbulència del fluid com per exemple el canvi constant de velocitat afecta menys a una turbina d'aquesta configuració comparada amb una HAWT.

#### - Facilitació del manteniment mecànic i elèctric

Al tenir una configuració vertical, la zona de conversió energètica la podem situar en la part més inferior, a nivell de terra, cosa que no podem fer amb les turbines HAWT. També comentar que no es necessària una torre per elevar el centre del rodet i això ens estalvia material i estudi sobre l'estabilitat estructural.

#### - Increment de superfície aprofitable per m2



Existeix un factor de compressibilitat major al necessitar majoritàriament altura aprofitable més que una superfície circular vertical.

- **Increment de superfície aprofitable en parcs eòlics existents.**

## INCONVENIENTS

- **Dynamic stall. Entrada en pèrdua:** Els àleps generen una modificació en la velocitat del fluid. Aquesta modificació la podem entendre com la variació de la capa límit. El que ens interessa es treballar en el comportament d'aquesta capa, per tal que pugui ser el màxim laminar possible. Quan tenim els àleps en rotació, l'angle d'atac varia ràpidament. Durant les diferents posicions que prenen els àleps, entren en posició de pèrdua [pèrdua del registre de la capa límit] i això genera unes turbulències que dificulten el moviment del mateix àlep.

- **Fatiga:** Els àleps són força propensos a patir fatiga al estar constantment rebent forces en direccions oposades per cada rotació que donen. Els cicles de fatiga d'un àlep que gira en règim VAWT són propis d'un règim sinusoidal a diferència dels cicles que rep els àleps d'una turbina HAWT, que són pulsatius. Això representa un desgast per fatiga major. Les noves tecnologies estan implementant nous materials per arreglar el problema.

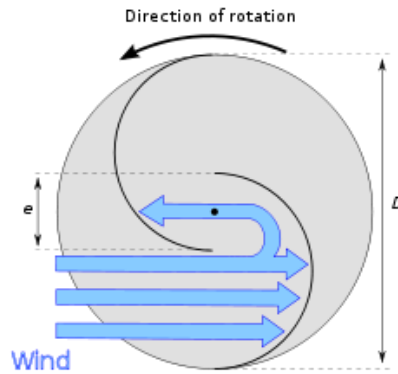
- **No pot arrencar per si mateixa**

### Turbines existents: Turbina *Darrieus* i turbina *Savonius*

**SAVONIUS<sup>2</sup>.** Aquesta turbina utilitza el principi de quantitat de moviment per tal de iniciar-se. Això permet que la pugui arrencar amb velocitats baixes però la velocitat de rotació és petita. La configuració es basa en dues pales còncaues oposades. La força del vent arrossega amb més facilitat la pala que es troba còncaua cap a la seva direcció i això permet que pugui rotar. El fet que funcioni per un principi d'arrossegament i no de sustentació fa que aquesta sigui una turbina amb menys rendiment que d'altres respecte el volum en el qual es conté. No obstant, la fabricació i manteniment és molt senzilla. Veiem com funciona el principi de quantitat de moviment quan el fluid interacciona amb la turbina i com es fa possible el moviment en la imatge següent.

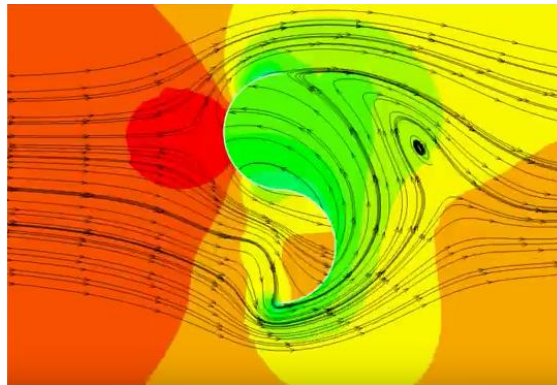
---

<sup>2</sup> La primera patent de la turbina *Savonius* data de 1922 i va ser creada per l'enginyer finlandès *Sigurd J. Savonius*. L'enginyer es va basar en un precedent del 1578



Il·lustració 4 Turbina Savonius. Interferència sòlid-fluid dels vectors de velocitat en els àleps de la turbina.

A continuació una simulació feta en CFD. Es mostren les corbes que prenen la distribució de velocitats, el camp de velocitats, en negre. Els colors mostren la distribució de pressions.



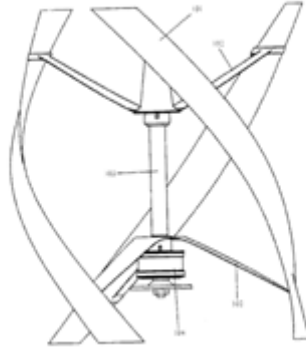
Il·lustració 5 Distribució de pressions i vectors de velocitat en el comportament d'una turbina Savonius simulada en CFD. Font: google.

### TURBINA DARRIEUS<sup>3</sup>

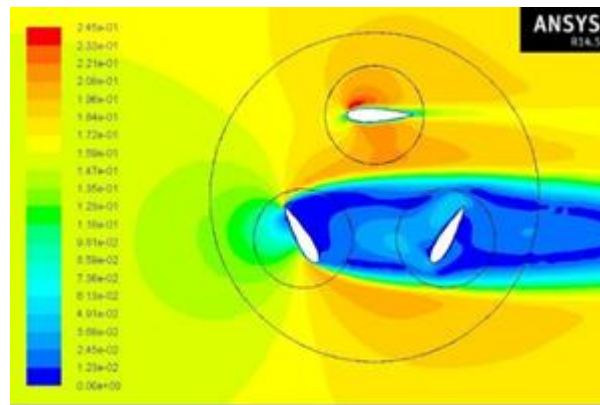
La turbina d'eix vertical Darrieus, a diferència de la turbina Savonius, és fonamenta en un principi físic anàleg al l'aprofitament aerodinàmic en les turbines HAWT. Aquest principi fa que la turbina pugui tenir un rendiment més elevat d'aprofitament energètic per unitat de volum d'aire que hi passa a través. Però la fabricació és més complicada i el manteniment més costós. La primera patent prové del 1931. Gira a velocitats més elevades i té un rendiment major.

A continuació es mostra una turbina Darrieus helicoïdal. Si ve és cert que el model inicial es basava en dos àleps biconvexos continguts en un pla, s'han desenvolupat àleps que prenen la curvatura de la superfície referent al volum de control del cilindre generat. Això permet que existeixi una posició diferencial òptima constant en tot moment de rotació per cada àlep. I això deriva a una distribució més repartida de la força màxima que pot rebre un àlep, degut a la posició relativa entre el mateix i la direcció del vent, o angle d'atac.

<sup>3</sup> Informació extreta de la wikipèdia: [https://es.wikipedia.org/wiki/Turbina\\_e%C3%B3lica](https://es.wikipedia.org/wiki/Turbina_e%C3%B3lica)



Il·lustració 6 Turbina Darrieus formada per tres àleps helicoidals convexos.



Il·lustració 7 Simulació mitjançant CFD, Ansys, en una turbina Darrieus extreta de 'youtube'. Els colors mostren la distribució de pressions.

### 3.7. Correcció de velocitats en els perfils alars

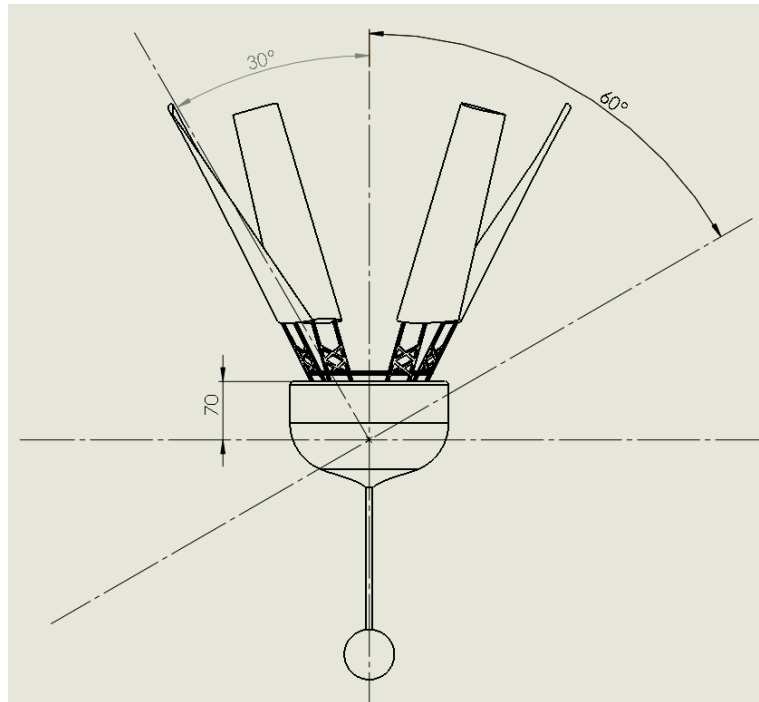
La correcció de velocitats és el concepte responsable de la modificació del perfil alar en una turbina d'eix horitzontal principalment. És la correcció que pren l'àlep a mesura que s'allunya de l'eix de rotació. Aquest és modificat amb una certa inclinació diferencial al radi de gir. Contra més radi, menys inclinació. Això succeeix perquè interessa mantenir constant l'angle d'atac del fluid, que es calcula mitjançant la velocitat relativa del fluid a l'àlep i, com és obvi, la velocitat lineal de l'àlep a cada secció es diferent.

La correcció de velocitats es tindrà en compte al dissenyar el prototip, calculant prèviament les velocitats hipotètiques del fluid cap a l'àlep en el seu perfil.

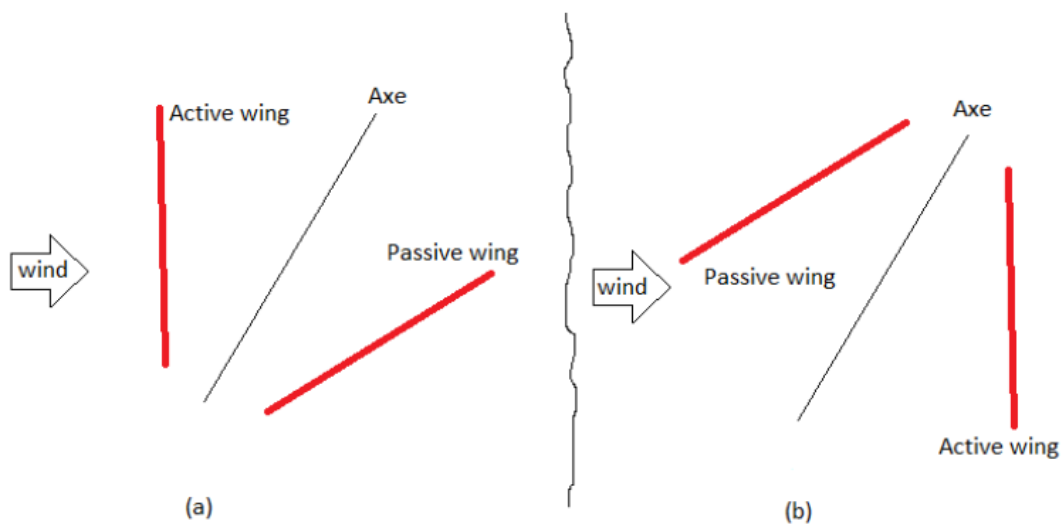
## 4. Turbina d'eix basculant, TAWT.

### 4.1. Introducció

El que es vol realitzar en aquest treball és l'adaptació d'una turbina d'eix vertical com a punt d'origen cap a una turbina d'eix vertical basculant [TAWT: *Tilting Axis Wind Turbine*]. La combinació de una turbina que presenti les geometries pròpies de una turbina d'eix vertical preexistent com podria ser una Darrieus juntament amb la possibilitat de la basculació del eix del rotor planteja una novetat en l'eficiència energètica de la mateixa. La orientació automàtica en funció de la direcció del vent implementada en una turbina és un concepte que actualment està en vies de desenvolupament. Això permetria extreure un rendiment més elevat pel fet que la turbina deixaria de ser totalment de eix vertical per convertir-se en una mena d'híbrid (vertical/horitzontal). A més, es vol modificar la típica geometria cilíndrica per convertir-la en una cònica, adaptant els perfils alars a les generatrius del con. El que s'aconsegueix és una execució més eficient en les dos semi rotacions de cada àlep en el transcurs d'una volta. Quan ens trobem a la part activa, l'àlep genera una geometria de moviment el qual aprofita al màxim les directrius dels vectors tant del fluid, com del mateix àlep i per conseqüència, la velocitat relativa del fluid respecte l'àlep. Es creu, i serà objecte d'estudi fins allà on ens permeti la aerodinàmica i el ingeni, que durant la semi rotació passiva, l'àlep generarà forces de magnitud més baixes que generarà parells menys elevats contraris als parells actius que permetran el moviment de la turbina. Això és degut a que l'àlep que se situa contrari al centre de pressions es troba en una posició inclinada, deixant passar la major part de fluid en el volum de control que compren la turbina. De moment, s'ha comprovat en prototips anteriors que aquest concepte és funcional i rendible, ara el que es necessita és millorar el model preexistent.



Il·lustració 8 Diagrama dels angles de inclinació de la turbina.  $s=30^\circ$  com a inclinació 's'. Angle complementari de  $sc=60^\circ$  formant la línia horitzontal respecte el mar.

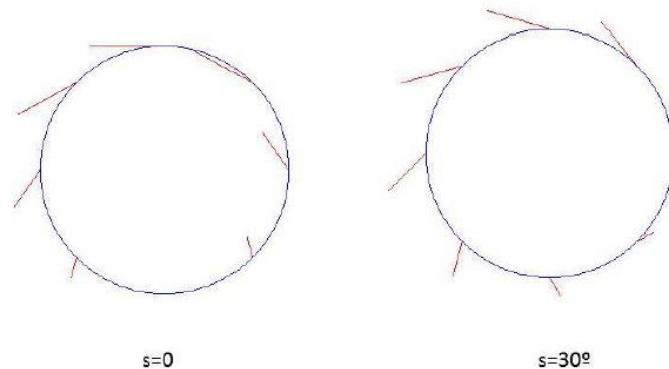


Il·lustració 9 A l'esquerra: Una possible configuració de la turbina en forma de 'V'. A la dreta: Una altra configuració en 'V' invertida. Es veu representada en els dos casos les orientacions que pren en funció de la direcció del vent.

En la primera posició, l'àlep se situa amb una inclinació de  $90^\circ$  respecte la direcció del vent. Això permet un màxim aprofitament del mateix. En canvi durant la primera part de la rotació l'àlep comença a inclinar-se fins a arribar a una posició de  $0^\circ$  respecte la

direcció del vent. Es pot deduir doncs que el vent no interferirà gaire en les posicions en les que l'àlep no pot extreure parell. La qüestió seria aconseguir que un mateix àlep pugui extreure parell durant tot el transcurs d'una rotació però això, malauradament, no serà objecte de l'estudi.

A continuació s'han calculat les velocitats del vent relatives a la velocitat que pren un àlep en donar una rotació. Podem distingir com el vector de la velocitat relativa va modificant en funció de la posició. La següent imatge es tracta del mateix anàlisi però fet a una turbina que tingui una certa inclinació. Podem treure que la inclinació ens permet obtenir velocitats relatives positives i per conseqüència, parells positius, o poc negatius a l'eix de la turbina.



Il·lustració 10 Trajectòria de rotació que pren la turbina. A l'esquerra: vectors de la velocitat del vent relatiu a l'àlep per una inclinació de  $s=0^\circ$ . A la dreta: Els mateixos vectors modificats per una inclinació de  $s=30^\circ$ .

## 4.2. Taula comparativa entre diferents turbines

La taula mostra un resum de les propietats més interessants des d'una perspectiva econòmica, social, mediambiental i tecnològica i els valors que prenen en cada tipus diferent de turbina.

	HAWT	VAWT	TAWT
Eficiència			
Pressupost			
Tecnologia			
Impacte Ambiental			
Vida útil			
Auto-iniciació			
Adaptabilitat direcció fluid			
Adaptabilitat territorial			
Adaptabilitat règims fluid			

Taula 1 Taula 1 Grau de viabilitat comparant turbines HAWT, VAWT i TAWT

## 4.3. Hipòtesi de l'estudi

L'anàlisi del comportament aerodinàmic de qualsevol turbina és un treball molt intens i complex dels quals existeixen nombrosos estudis, interpretacions, simulacions, hipòtesis i solucions respectives. Tenint en compte la envergadura i la extensió d'aquest estudi el treball es veu obligat a interpretar una sèrie de condicions de treball establint una sèrie de hipòtesis.

[HIPÒTESIS RESPECTE LA MÀQUINA]

### 1a hipòtesi

Degut a la falta de recursos i les limitacions temporals, econòmiques, tecnològiques es decideix no realitzar un estudi de l'extracció d'energia útil a través de conversions energètiques com la mecànica-elèctrica. És a dir, no es tractarà de connectar cap tipus de aparell electromecànic que sigui capaç de calcular la potència que es podria generar, tan sigui un alternador, un fre resistiu parell generat, etc.

Només es tractarà de calcular la potència neta mecànica que es podria obtenir mitjançant la velocitat de gir de l'aparell i el moment de inèrcia que la pròpia màquina transmet al centre de rotació.

[HIPÒTESIS RESPECTE LES CONDICIONS DE CONTORN]

### 2a hipòtesi

La turbina té conceptualment, la idea que s'enclavi amb un 'mort' al fons marí a través d'un cable. Aquest ancoratge podria generar una oscil·lació del cable entre el mort i la posició relativa a la superfície de l'aigua al no ser un element que estigui treballant a compressió i, per tant, no es tensi en el entorn aquàtic. A part, les corrents marines influïrien en aquesta posició relativa, fent moure la turbina d'una banda a l'altra. Ens situarem en la idea que el volum de control de la turbina és fixe respecte el moviment de les corrents marines.

### 3a hipòtesi

L'estudi de l'aerodinàmica d'un perfil alar és certament complicat, i més si es tracta de un perfil integrant d'una turbina eòlica. El que succeeix és que tota la teoria desenvolupada per els comitès i empreses respecte el comportament dels perfils normalitzats, per exemple, els NACA, treballa a unes condicions molt concretes. El que passa quan s'estudia el moviment de l'àlep és que aquesta teoria perd rigor pel fet que el moviment d'un àlep sigui tant diferent al de un perfil alar d'aviació. En el treball es realitza una simplificació d'aquests càlculs desenvolupada a continuació, limitant les condicions de interacció entre el fluid i el sòlid en qüestió.

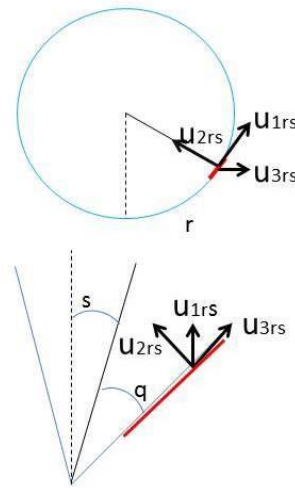
### 4a hipòtesi

L'onatge pot provocar perturbacions en la velocitat del vent respecte la de l'àlep. Per tant es considerarà un onatge nul, de manera que la direcció absoluta del vent sempre serà paral·lela a la superfície de l'aigua.

## 5. Estudi del model<sup>4</sup>

### 5.1. Velocitat del fluid respecte l'àlep

Fixem un sistema de referència ortonormal  $[i,j,k]$  en el que la velocitat del vent està representada pel vector  $wi$  i en el qual el pla generat per  $[i,k]$  conté l'eix de rotació de la turbina. El parell de forces que el vent exerceix sobre l'eix de la turbina, així com la força resultant sobre el mateix depenen del vent relatiu que travessa els àleps de la turbina. En primer lloc calculem les components d'aquest vector respecte els eixos naturals associats al àlep.  $u_{1rs}, u_{2rs}, u_{3rs}$ .



Il·lustració 11 Triedre format pels vectors posició de l'àlep.

Considerem una posició de referència del àlep en la qual  $s=r=0$ .

$$u_{100} = [1,0,0]', u_{200} = [0, \cos(q), \sin(q)]', u_{300} = [0, -\sin(q), \cos(q)]'$$

A continuació introduïm les dos rotacions que transformen els triedre obtingut en el triedre format pels vectors  $u_{1rs}; u_{2rs}; u_{3rs}$ , on 'r' és la posició angular de l'àlep i 's' és la inclinació del eix en la direcció del vent. Aquestes rotacions i la seva composició es:

$$R_{r0} = \begin{bmatrix} \cos(r) & -\sin(r) & 0 \\ \sin(r) & \cos(r) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R_{0s} = \begin{bmatrix} \cos(s) & 0 & \sin(s) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(s) & 0 & \cos(s) \end{bmatrix}$$

<sup>4</sup> La teoria matemàtica respecte el model desenvolupada al llarg dels punts 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 ha estat ideada per el professor de la UPC Francisco Javier Puerta. Són les bases matemàtiques preestablertes en les quals es basa la part del modelatge matemàtic. Aquestes han estat adaptades en els casos convenients per l'estudi d'un nou model de turbina.



$$R_{r,s} := R_{0s} \cdot R_{r0} = \begin{bmatrix} \cos(s)\cos(r) & -\cos(s)\sin(r) & \sin(s) \\ \sin(r) & \cos(r) & 0 \\ -\sin(s)\cos(r) & \sin(s)\sin(r) & \cos(s) \end{bmatrix}$$

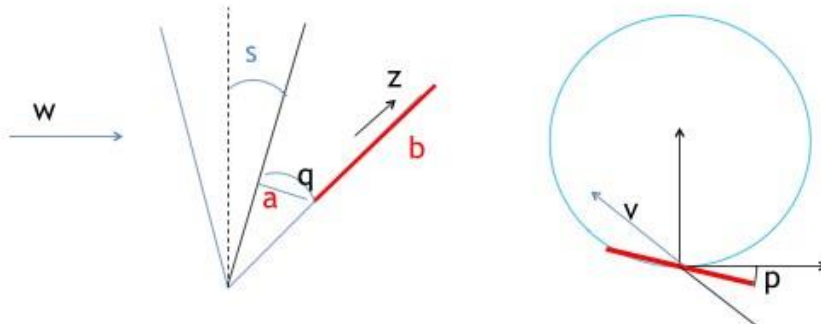
Aplicant la última rotació  $R_{r,s}$  als vectors del triedre  $u_{100}, u_{200}, u_{300}$  obtenim els vectors  $u_{1rs}, u_{2rs}, u_{3rs}$ :

$$u_{1rs} = \begin{bmatrix} \cos(s)\cos(r) \\ \sin(r) \\ -\sin(r)\cos(r) \end{bmatrix}$$

$$u_{2rs} = \begin{bmatrix} -\cos(s)\sin(r)\cos(q) + \sin(s)\sin(q) \\ \cos(r)\cos(q) \\ \sin(s)\sin(r)\cos(q) + \cos(s)\sin(q) \end{bmatrix}$$

$$u_{3rs} = \begin{bmatrix} \cos(s)\sin(r)\sin(q) + \sin(s)\cos(q) \\ -\cos(r)\sin(q) \\ -\sin(s)\sin(r)\sin(q) + \cos(s)\cos(q) \end{bmatrix}$$

A continuació calcularem les components del vent relatiu que travessa una secció de l'àlep, respecte el triedre anterior. La secció del àlep la parametritzarem per la distancia 'z' al seu punt inferior que es troba a distància 'a' de l'eix.



La velocitat a aquesta secció es:  $(a + z \cdot \sin(q))\dot{r} \cdot u_{1rs}$  ( $\dot{r}$  és la velocitat angular de la turbina). El vent relatiu que travessa la secció és, per tant:

$$v_{zr} := [w, 0, 0]' - (a + z \cdot \sin(q))\dot{r} \cdot u_{1rs}$$

$$= \begin{bmatrix} -\sin(q) \cos(s) \cos(r) \dot{r} z - \cos(s) \cos(r) a \dot{r} + w \\ -(a + z \cos(q))\dot{r} \sin(r) \\ (a + z \sin(q))\dot{r} \sin(s) \cos(r) \end{bmatrix}$$

Simplificant els càlculs, les components del vector en les direccions del triedre  $u_{1rs}, u_{2rs}, u_{3rs}$  son:

$$V_{1zr} = v_{zr} \cdot u_{1rs} = -\sin(q)z\dot{r} + \cos(s)\cos(r)w - a\dot{r}$$

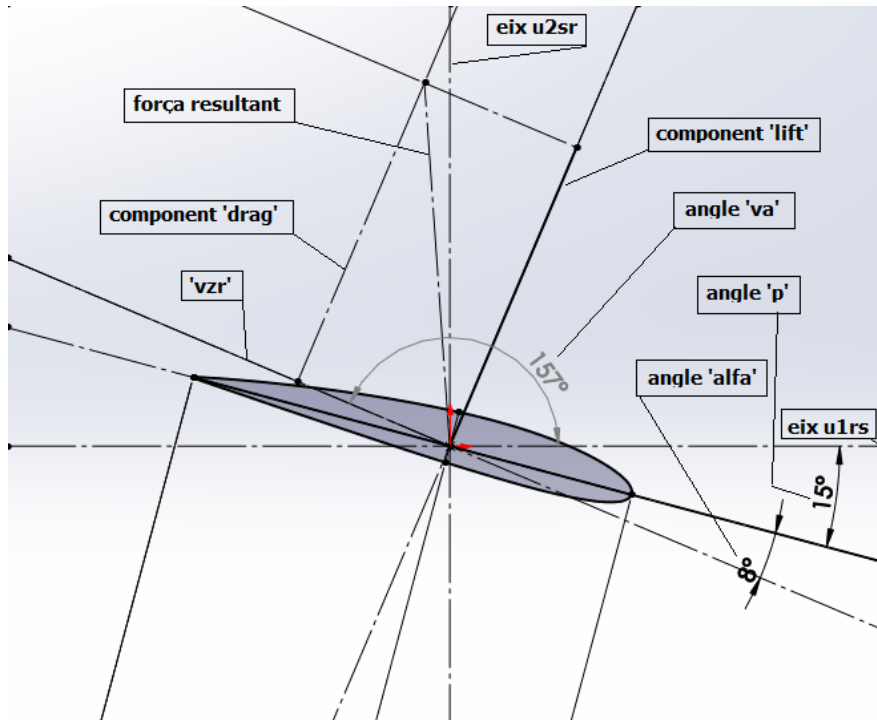
$$V_{2zr} = v_{zr} \cdot u_{2rs} = -\cos(q)\cos(s)\sin(r)w + \sin(s)\sin(q)w$$

$$V_{3zr} = v_{zr} \cdot u_{3rs} = w(\cos(s)\sin(r)\sin(q) + \sin(s)\cos(q))$$

## 5.2. Càlcul de les forces aerodinàmiques en base a velocitats

Ens disposem a calcular la força que realitza el vent relatiu sobre cada secció de l'àlep a la altura de 'z' corresponent. Degut a que la component del vent en la direcció del àlep,  $u_{3rs}$  produeix una força negligible sobre la secció, en centrarem en el pla generat per  $u_{1rs}$  i  $u_{2rs}$  ortogonal al àlep.

En la figura següent podem observar un esquema de forces, vectors i posicions angulars sobre l'estudi aerodinàmic bidimensional de la secció de l'àlep. En primer lloc veiem els eixos de coordenades  $u_{1rs}$  i  $u_{2rs}$  que es corresponen a les direccions tangencials i normals del centre de rotació de la turbina respectivament. Respecte l'eix horitzontal veiem l'angle 'p' o 'pitch' que és la inclinació de la corda de l'àlep respecte la trajectòria d'aquest. Es sobreposa l'angle 'alfa', la direcció del vent respecte l'àlep. Aquest angle surt de dibuixar la projecció de la direcció relativa del vent respecte l'àlep:  $v_{zr}$ . Respecte aquesta projecció observem la força 'drag'  $F_d$  i la força 'lift'  $F_l$ . La suma d'aquestes dos components donen com a resultat la força ' $f_{zr}$ '. Més endavant veurem la necessitat de dibuixar la força  $F_{1zr}$  i  $F_{2zr}$  que son les forces col·lineals als eixos de coordenades establerts per tal d'extreure el parell generat a la turbina.



Il·lustració 12 Diagrama de forces de una secció de l'ala i orientacions respectives a les condicions de contorn.

La força 'lift' i 'drag' venen donades a través de les equacions següents:

$$F_l = \frac{1}{2} \rho C_l(\alpha) \|\overline{v_{zr}}\|^2 c dz$$

$$F_d = \frac{1}{2} \rho C_d(\alpha) \|\overline{v_{zr}}\|^2 c dz$$

On  $\rho$  és la densitat del fluid.  $c$  és el valor de la corda.  $v_{zr}$  és la velocitat del fluid.  $C_d(\alpha)$  i  $C_l(\alpha)$  són els coeficients adimensionals 'lift' i 'drag' que depenen de l'angle d'atac ( $\alpha$ ) i de les característiques aerodinàmiques del perfil escollit. El coeficient  $C_d(\alpha)$  és la suma del coeficient 'drag' de la secció del perfil i la contribució de la resistència induïda del àlep:  $C_d = C_{d0} + C_i$  on:

$$C_i = \frac{C_l^2}{\pi \cdot A \cdot e}$$

On 'A' és l'allargament de l'ala,  $A = b/c$  i  $e$  el coeficient de eficiència de *Oswald*.

D'altra banda tenim que:

$$\begin{aligned} \|\overline{v_{zr}}\|^2 &= V_{1zr}^2 + V_{2zr}^2 = \\ &- \cos(s)^2 \cos(r)^2 \cos(q)^2 w^2 - 2 \sin(q) \sin(s) \cos(s) \cos(q) \sin(r) w^2 \\ &+ 2 \cos(s)^2 \cos(q)^2 w^2 \cos(q)^2 \dot{r}^2 z^2 + \cos(s)^2 \cos(r)^2 w^2 2 \cos(r) \cos(s) \sin(q) \dot{r} w z \\ &- 2 \cos(s) \cos(r) a \dot{r} w + 2 \sin(q) a \dot{r}^2 z - \cos(q)^2 w^2 - \cos(s)^2 w^2 + \dot{r}^2 a^2 + \dot{r}^2 z^2 \\ &+ w^2 \end{aligned}$$

Per alleugerar les notacions designem la expressió anterior per  $V_{zr}^2$ . Observem que per el cas de  $s = q = 0^\circ$  (turbina Darrieus), l'expressió anterior queda simplificada:

$$-2 \cos(r) a \dot{r} w + \dot{r}^2 a^2 + w^2$$

D'altra banda trobem ' $\alpha$ ' a través de:

$$\tan(\pi - p - \alpha) = V_{2zr}/V_{1zr}$$

Expressem ara les components de la força resultant en termes de  $F_l$  i  $F_d$ :

$$f_{zr} = F_{1zr} \cdot u_{1rs} + F_{2zr} \cdot u_{2rs}$$

On:

$$\begin{aligned} F_{1zr} &= \cos(v_a) F_d + \sin(v_a) F_l = \frac{1}{2} \rho (\cos(v_a) C_d + \sin(v_a) C_l) \|\overline{v_{zr}}\|^2 c dz = \\ &= \frac{1}{2} \rho (V_{1zr} C_d + V_{2zr} C_l) V_{zr} c dz \\ F_{2zr} &= \sin(v_a) F_d - \cos(v_a) F_l = \frac{1}{2} \rho (\sin(v_a) C_d - \cos(v_a) C_l) \|\overline{v_{zr}}\|^2 c dz = \\ &= \frac{1}{2} \rho (V_{2zr} C_d - V_{1zr} C_l) V_{zr} c dz \end{aligned}$$

### 5.3. Parell i potència entregada

Observem que la força  $F_{2zr}$  no té cap contribució al parell de forces sobre l'eix. En primer lloc calculem el parell exercit per un àlep com:

$$T_r = \int_0^b (a + z \cdot \sin(q)) \cdot F_{1zr} dz = \frac{1}{2} \rho c \int_0^b (a + z \cdot \cos(q)) (V_{1zr} C_d + V_{2zr} C_l) V_{zr} dz$$

Observem que l'angle d'atac  $\alpha$  depèn de  $z$ , la qual cosa, en general  $C_d$  i  $C_l$  depenen també de l'altura  $z$  en la qual es realitza la secció. La integral anterior es pot calcular analíticament en alguns casos particulars en els quals la dependència de  $z$  és menor, per exemple, si  $q = s = 0^\circ$  (turbina Darreus).

Havent definit prèviament els paràmetres que intervindrien al càlcul del parell entregat per cada revolució li hem de afegir els paràmetres que no depenen del disseny ni a disposició respecte el sistema:

$r$ : velocitat angular de la turbina  
 $w$ : velocitat del mitjà fluid  
 $\rho$ : densitat del fluid  
 $LD$ : taula de valors del  $C_L$  i  $C_D$

Per obtenir el parell total que entrega cada àlep fem el promig de  $T_r$  al voltant d'un cicle:

$$T = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} T_r dr$$

El parell teòric obtingut amb una turbina de  $N$  àleps serà:  $T_t = NT$  si es negligeix la interacció entre els àleps.

En un règim estacionari, el valor del parell  $NT$  s'igualarà amb el parell que ofereix la resistència del rotor,  $T_0$ . Donat un valor inicial  $\dot{r}(0)$ ,  $\dot{r}(t)$  evoluciona (transitoriament) seguint l'equació diferencial:

$$\ddot{r} = k(NT(\dot{r}) - T_0)$$

On  $k$  és el moment de inèrcia de la turbina (que és irrellevant per aquest càlcul) fins al seu punt d'equilibri estable. Utilitzem l'algoritme per calcular-lo amb el nom de 'rev.m' (mostrat a l'annex A.1.3)

Si  $T_0$  es degut al accionament d'un generador que entrega una potència  $W$ , tenim que:

$$T_0 = \frac{W}{\dot{r}}$$

Si fixem aquesta potència a un valor positiu, llavors, el punt d'equilibri, de l'equació diferencial

$$\ddot{r} = k(NT(\dot{r}) - T_0)$$

Determina el valor de  $\dot{r}$  compatible amb  $W$ .

La potència màxima que pot entregar la turbina ve donada pel màxim de la funció  $f(x) = xT(x)$  on  $T(x)$  és el parell corresponent a una velocitat angular  $x = \dot{r}$ . Per trobar-lo resoldrem la equació  $f'(x) = 0$ . Donat que  $T(x)$  només la coneixem numèricament, aproximem  $T'(x)$  pel seu valor mitjà amb un petit increment de  $x$ ,  $\Delta$ .

$$T(x) + xT'(x) = 0 \rightarrow x \sim - \frac{T(x)\Delta}{k(T(x_n + \Delta) - T(x_n))}$$

La solució de la qual la trobem mitjançant la següent iteració:

$$x_{n+1} = \frac{k-1}{k} \cdot x_n - \frac{T(x_n)\Delta}{k(T(x_n + \Delta) - T(x_n))}$$

Que convergeix per algun valor de  $k$ .

Els resultats obtinguts mitjançant els apartats anteriors evidencien una sobreestimació de la potència que en realitat entrega la turbina. En particular, és evident que afegint un nombre suficient d'àleps, el coeficient de potència sobrepassaria un límit que impossibilitaria el funcionament de la mateixa. Això és degut a que el vent que travessa els àleps no és realment el vent que li arriba a la turbina, sinó un valor entremig entre aquest i la velocitat mitja del vent una vegada aquesta a travessat la turbina. Concretament cada àlep travessa una regió per la qual instants anteriors ha travessat un altre àlep, o el mateix, i per tant, hauríem d'afegir al vector  $[w,0,0]$ , el vector encarregat de restar la velocitat (que genera l'àlep que acaba de passar) teòricament aprofitable.

## 5.4. Força d'arrossegament 'Fm'

La força d'arrossegament és la suma de tots els valors de  $f_{zr}$  al variar  $z$ , fent el promig sobre 'r'. La força d'arrossegament sobre un àlep en una posició  $r$  val (observem que  $f_{zr}$  inclou  $dz$  però per claritat ho incloem dins l'expressió)

$$f_r = \int_0^b f_{zr} dz = \left( \int_0^b F_{1zr} dz \right) u_{1rs} + \left( \int_0^b F_{2zr} dz \right) u_{2rs}$$

La força promig d'arrossegament d'un àlep en un cicle val

$$f = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f_r dr$$

Aquestes con les seves components

$$F_i = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^b (\cos(s) \cos(r) F_{1zr} + (-\cos(s) \sin(r) \cos(q) + \sin(s) \sin(q)) F_{2zr}) dz dr$$

$$F_k = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^b (-\sin(r) \cos(r) (F_{1zr} + (\sin(s) \sin(r) \cos(q) + \cos(s) \sin(q)) F_{2zr})) dz dr$$

$$F_j = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^b (\sin(r) F_{1zr} + \cos(r) \cos(q) F_{2zr}) dz dr$$

On a cada valor hem de multiplicar-lo pel n<sup>o</sup> d'àleps.

## 5.5. Determinació del perfil alar<sup>5</sup>

L'objecte d'estudi del treball incideix en la major part en aquest apartat. Per seleccionar el perfil alar es necessiten tenir en compte una sèrie de paràmetres que en determinaran el comportament.

$a$ : Radi de la base, en m

$b$ : Longitud del àlep, en m

$c$ : Corda de l'àlep, en m

---

<sup>5</sup> En aquest apartat es veuen representats tots els gràfics que s'han implementat prèviament a través d'un software de programació, en aquest cas, el Matlab. Tots els gràfics venen descrits per una sèrie de algorismes que possibiliten el càlcul dels mateixos a través dels paràmetres d'entrada prèviament establerts. Aquestes funcions es veuen en l'apartat d'annexos A.1.5 com a GRÀFICS. Per tal de representar aquestes funcions s'han utilitzat els programes prèviament teoritzats matemàticament, en l'apartat d'annexos A.1.1, A.1.2, A.1.3, i A.1.4.

$p$ : 'Pitch', pas que forma la corda amb la tangent a la circumferència, en °  
 $q$ : Semi-obertura del con, en °  
 $s$ : Inclinació del eix, en °

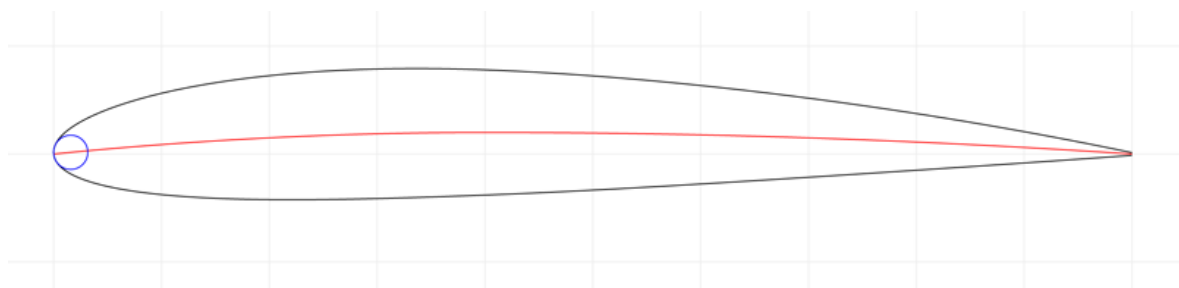
Aquestes dades es recopilaran en una matriu anomenada ' $par'$ '. D'altra banda tenim com a paràmetres de la turbina independents del disseny de la geometria dels àleps:

Perfil NACA  
Nº àleps  
Densitat de l'aire  
Nº Reynolds

## PERFIL BASE

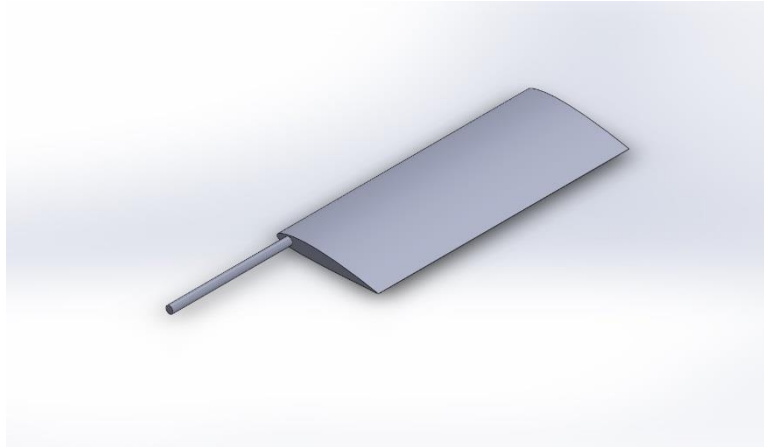
Degut a que el perfil base no és l'objecte d'estudi no es considerarà rellevant en el mateix i es prendrà qualsevol perfil del qual se'n pugui extreure informació real i analitzada pel comitè NACA. L'únic factor limitant per l'obtenció d'un prototip és el mètode de fabricació. Si el perfil és simètric, asimètric, si es necessiten màquines de CNC amb més de 3 eixos, etc. Però aquest no serà objecte d'estudi ja que al llarg del treball es podrien analitzar els resultats que obtindríem de qualsevol perfil tan sols modificant les variables d'entrades al model matemàtic.

En aquesta ocasió el perfil base del qual es parteix serà el perfil normalitzat NACA2412.

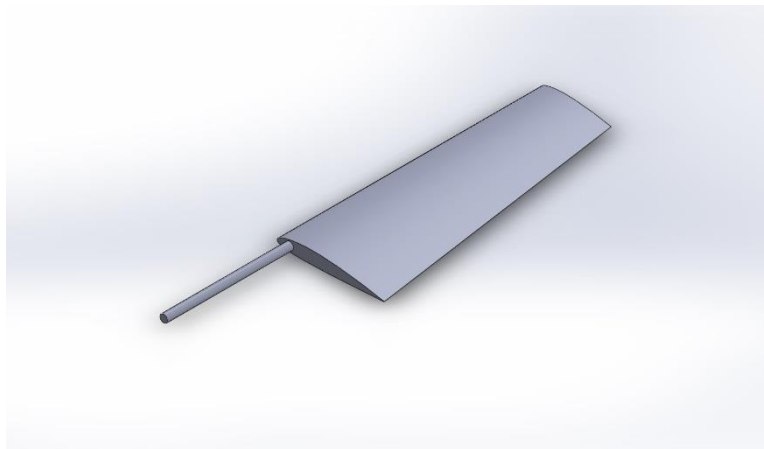


Il·lustració 13 Gràfic de la geometria alar de NACA 2412

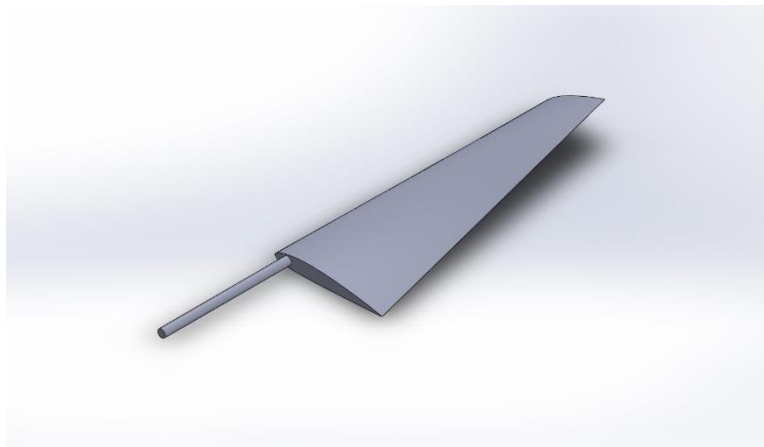
El perfil base passat a Solidworks mitjançant les components importades de '*Naca airfoils*' queda de la següent manera. A continuació se li ha aplicat les modificacions en el 'pitch' i en el valor de la corda obtenint el nou perfil. Aquestes modificacions són les que més a baix juntament amb els gràfics es comproven el seu origen, il·lustrades prèviament per entendre que significa la modificació de paràmetres portat a la realitat.



*Il·lustració 14 Perfil base en el qual es basa la modificació pertinent respecte la geometria del mateix.*



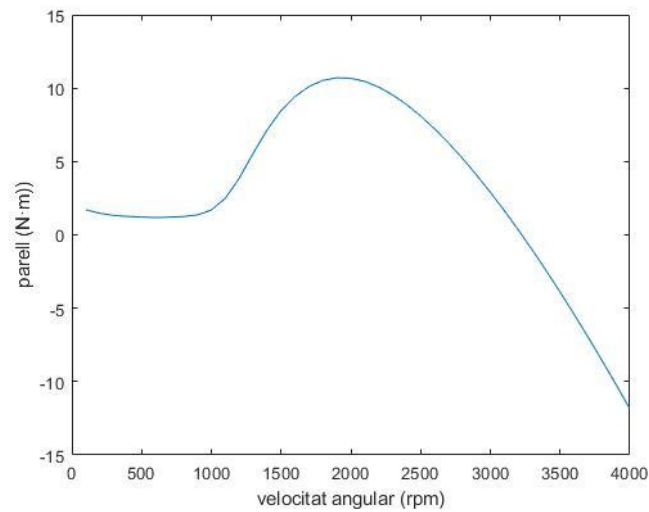
*Il·lustració 15 Perfil amb la longitud de corda modificada, anomenat: perfil diferencial.*



*Il·lustració 16 Suma de les modificacions respecte el diferencial de la corda i a inclinació del pitch. Nou perfil diferencial i helicoidal objecte d'estudi.*

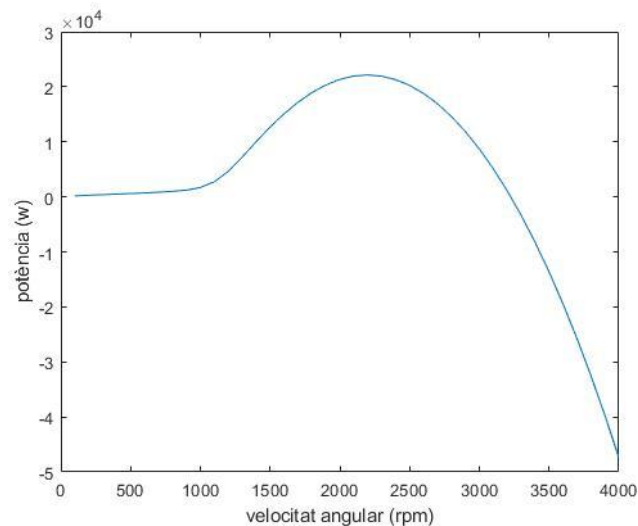


## 1. Parell vs velocitat angular



Gràfic 4 Funció mostrant el càlcul del parell òptim, del màxim de la funció que vincula el parell a la velocitat de rotació de la turbina.

## 2. Potència vs velocitat angular

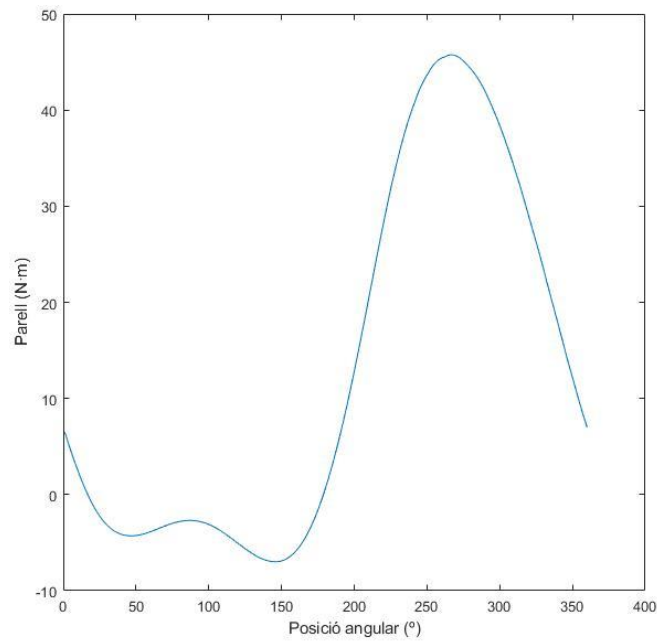


Gràfic 5 Funció mostrant el càlcul de la potència òptima, del màxim de la funció que vincula la potència a la velocitat de rotació de la turbina.

Observem com en aquests dos gràfics inicials les funcions prenen uns valor màxims que s'hi assemblen força, degut a l'expressió del parell respecte la potència. Aquest valor

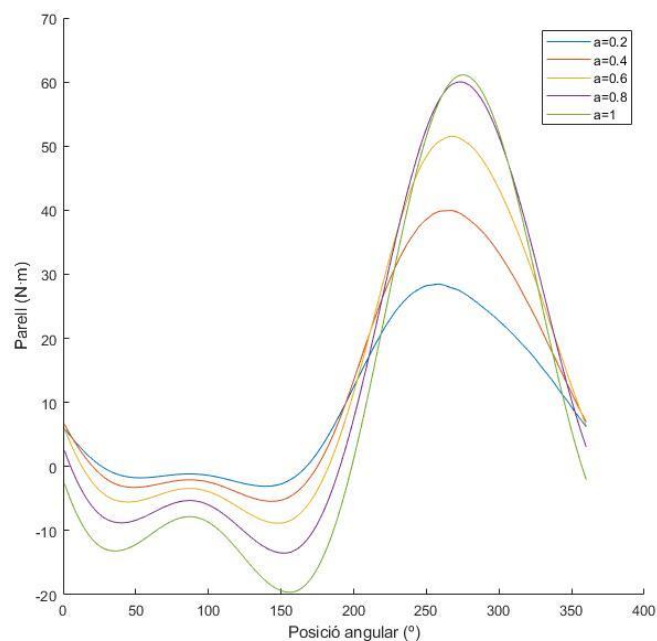
màxim serà el que s'utilitzarà, traduït a uns RPM determinats, per calcular tots els valors que van a continuació.

### 3. Parell vs posició angular



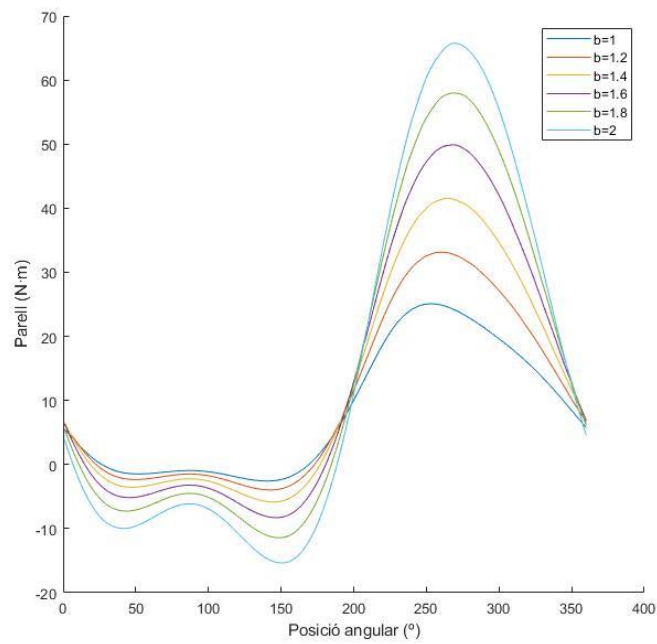
Gràfic 6 Parell entregat durant una rotació

### 4. Parell vs posició angular (modificant la variable 'a')



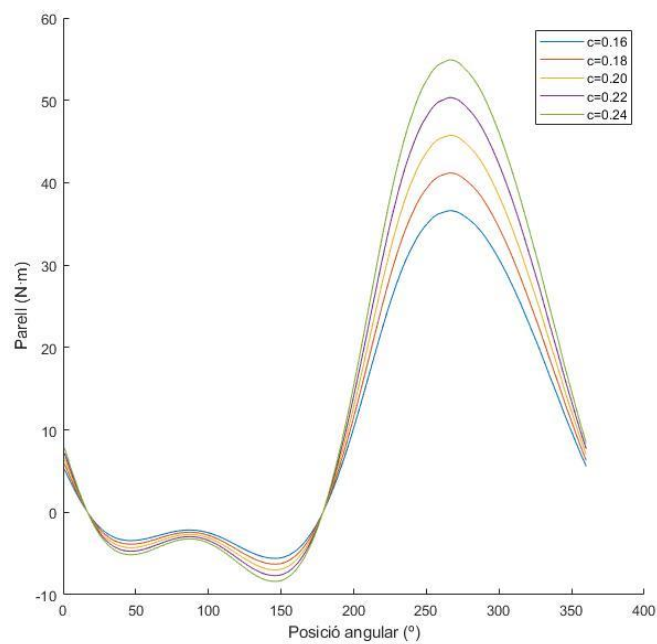
Gràfic 7 Conjunt de gràfics mostrant el parell entregat durant una rotació modificant la variable 'a'

## 5. Parell vs posició angular (modificant la variable 'b')



Gràfic 8 Conjunt de gràfics mostrant el parell entregat durant una rotació modificant la variable 'b'

## 6. Parell vs posició angular (modificant la variable 'c')



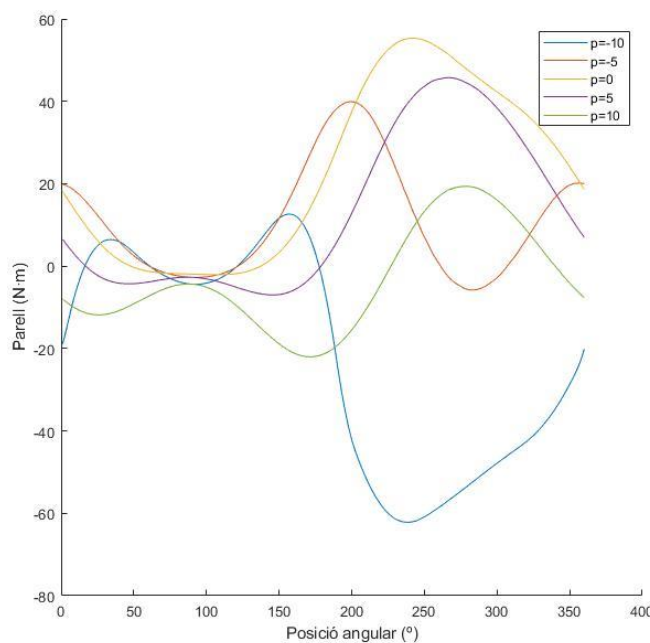
Gràfic 9 Conjunt de gràfics mostrant el parell entregat durant una rotació modificant la variable 'c'

### Comparació 'a', 'b' i 'c' per similitud entre models

Els tres gràfics presenten comportaments similars. La diferència és el grau amb el que es veuen alterats el conjunt de gràfics. Si comparem 'a' amb 'b' veiem com al augmentar la variable 'b' obtenim un augment major del parell en la zona activa contrastat amb la pèrdua en la zona passiva. Per tant podem dir que l'augment de 'b' és ofereix major parell per revolució que l'augment de 'a'. La variable 'c' també és bona candidata per ser modificada perquè presenta un parell negatiu menor que les altres dos però es veu compensat amb el guany en la zona activa.

Podem resumir que per un mateix radi a la base augmentarem la longitud i la corda de l'àlep.

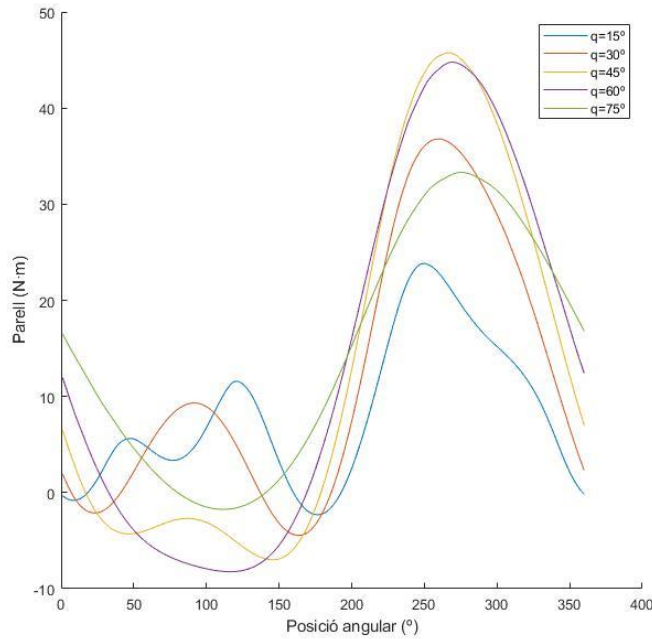
## 7. Parell vs posició angular (modificant la variable 'p')



Gràfic 10 Conjunt de gràfics mostrant el parell entregat durant una rotació modificant la variable 'p'

Observem com la major entrega de parell se situa entre  $p=0^\circ$  i  $p=5^\circ$ . Pot ser que el fet que la turbina sigui cònica, l'aprofitament de les components tridimensionals del fluid ja sigui suficient/òptim sense haver de escorar la turbina.

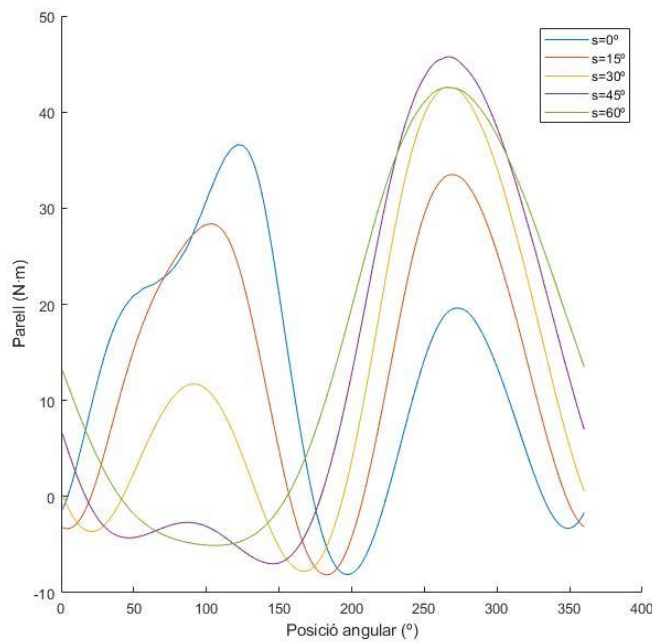
## 8. Parell vs posició angular (modificant la variable 'q')



Gràfic 11 Conjunt de gràfics mostrant el parell entregat durant una rotació modificant la variable 'q'

Podem observar que l'angle de la semi-obertura del con de màxim parell entregat és de 45° aproximadament.

## 9. Parell vs posició angular (modificant la variable 's')



Gràfic 12 Conjunt de gràfics mostrant el parell entregat durant una rotació modificant la variable 's'

Observem com la inclinació desplaça l'àrea del parell entregat cap a una zona concreta. Aquesta zona era la que enteníem per zona activa.

El nou model incorpora els dos paràmetres que s'estudien com a possible millora per el mateix. Aquests dos paràmetres son<sup>6</sup>:

- **Corda variable**
- **'Pitch' variable**

## **10. Parell vs posició angular (modificant la variable 'c' entesa com el diferencial de longitud de corda)**

El perfil alar prendrà una modificació en la distribució de la massa modificant la seva geometria. La modificació del perfil és gradual prenent un diferencial en concret, utilitzant una variable d'entrada que genera un percentatge de la corda inicial a la corda final mitjançant la següent expressió:

$$c(z) = c_0 \left( 1 - z \cdot \frac{r}{b} \right)$$

On tenim:

$c(z)$ : Longitud final de corda

$c_0$ : Longitud inicial de corda

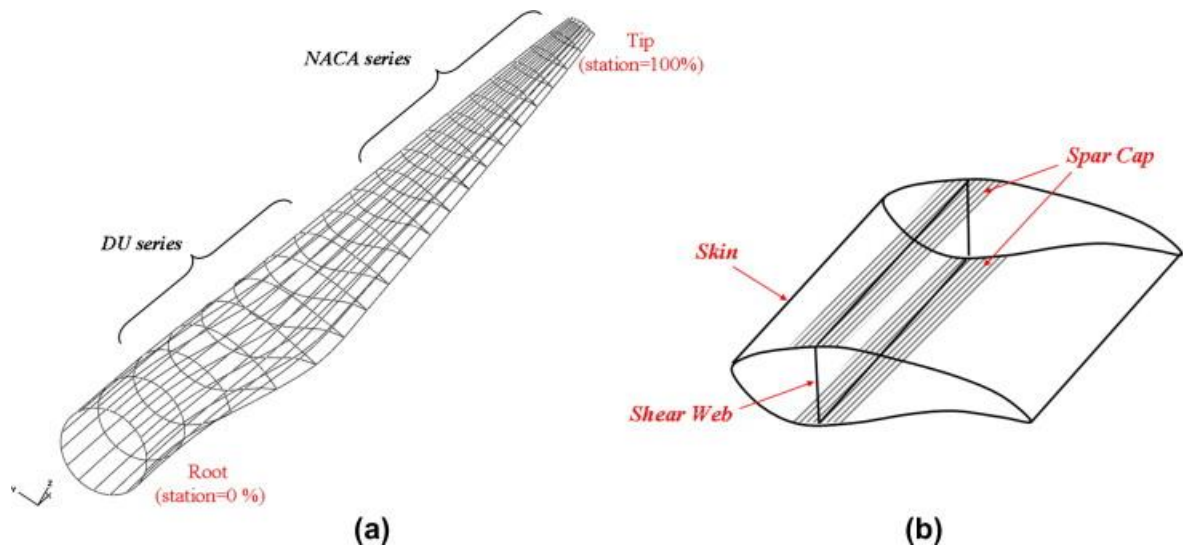
$z$ : distància respecte la longitud inicial

$r$ : percentatge de augment

$b$ : longitud d'àlel

---

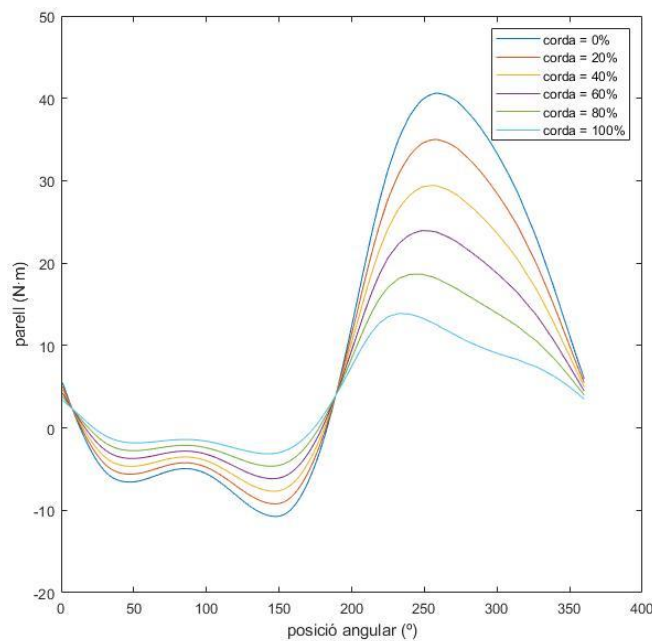
<sup>6</sup> La justificació dels valors que prenen aquestes variables estan descrites a les equacions corresponent al apartat dels annexos A.1.1 i son calculades bàsicament utilitzant un percentatge que varia entre 0-1 per relacionar els valors inicials amb els finals.



Il·lustració 17 Àlep corresponen a una turbina HAWT. S'hi pot comprovar la modificació de la longitud de la corda així com de totes les seccions que formen els diferents perfils alars diferencials.

El càlcul del perfil diferencial té a veure amb la longitud de corda bàsicament. Serà aquesta longitud que ens determinarà totes les demés magnituds respecte d'una secció determinada.

Prenent les dades anteriors s'han representat diversos graus quan a modificació de la longitud de la corda. A continuació una valoració quantitativa.



Gràfic 13 Conjunt de gràfics mostrant el parell entregat durant una rotació modificant la 'c' al llarg de la superfície de l'Àlep a diferents increments des de 0% al 100%

Observem, com és obvi, que quan disminuïm la longitud de la corda per conseqüència també disminueix la força aerodinàmica de sustentació, és a dir, el LIFT i que això acaba resultant en una entrega de parell menor. En aquest gràfic com hem fet fins ara amb tots els darrers obtenim els sumatoris de tots els parells que generen una mateixa longitud de àlep al llarg de una rotació. La distribució de les forces i els parells damunt de la superfície juntament amb la distribució del lift ens interessa especialment degut a que aquestes distribucions determinaran la resistència induïda per l'efecte dels vòrtexs als extrems dels àleps. Haurem de desentrellar el conjunt de parells generats al llarg de una superfície per arribar a treure conclusions òptimes respecte el disseny.

## 11. Parell vs posició angular (Modificant la variable 'p' entesa com el diferencial de l'angulació al llarg de l'àlep)

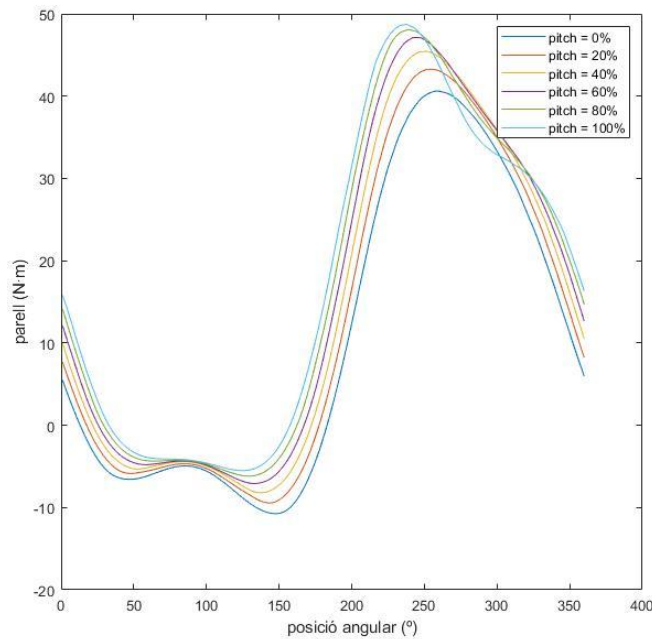
La forma geomètrica de tipus hèlix és la que determina la correcció de velocitats. És el grau amb el que l'àlep formarà la helicoide el que s'ha de determinar. Si ens fixem en els perfils dels HAWT veiem com l'àlep va modificant el 'pitch'. Això és degut a que la velocitat relativa del vent respecte l'àlep té una component en contra la velocitat lineal de la secció molt més elevada quan es troba lluny del centre de rotació que quan no. Aquesta component de velocitat variable juntament amb la component paral·lela a la direcció del vent (la component de la direcció del vent en qüestió) formen el vector de velocitat resultant per el qual es realitzen tots els càlculs. Aquest vector al veure's modificat al llarg de l'àlep implica un canvi en la orientació del mateix respecte la posició del perfil (l'angle d'atac). Per tal de mantenir l'angle d'atac constant es procurarà modificar el *pitch* i fer helicoïdal l'àlep. La equació per la qual s'ha modificat numèricament el valor del 'pitch' és la següent:

$$p(z) = p_0 \left(1 - z \cdot \frac{r}{b}\right)$$

On tenim:

- $p(z)$ : Valor del 'pitch' final
- $p_0$ : Valor del 'pitch' inicial
- $z$ : distància respecte la longitud inicial
- $r$ : percentatge de augment
- $b$ : longitud d'àlep



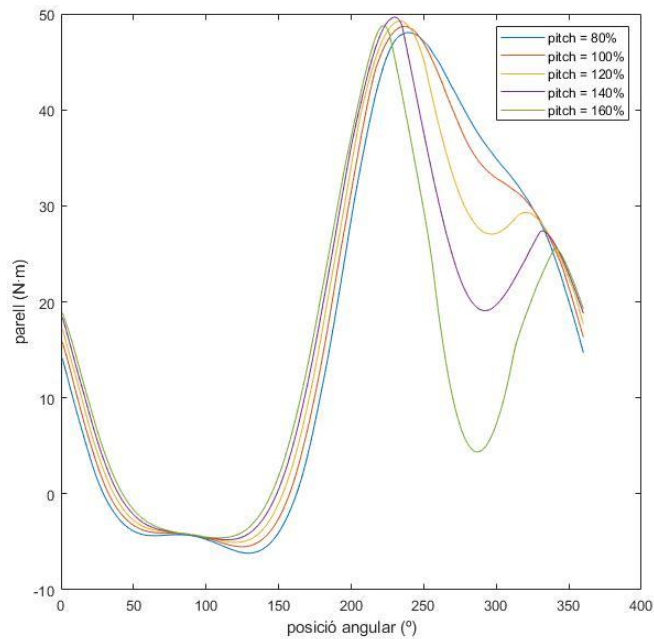


Gràfic 14 Conjunt de gràfics mostrant el parell entregat durant una rotació modificant la 'p' al llarg de la superfície de l'àlep a diferents increments des de 0% al 100%

Observem que és convenien modificar el *pitch* al llarg de l'àlep. D'aquesta forma es generen cada secció angles relatius de *pitch* que s'adapten per mantenir el màxim constant el valor de l'angle d'atac. Veiem com a partir del valor de  $p=100\%$  l'angle d'atac comença a ser excessiu i no pot seguir aprofitant la geometria de velocitats.

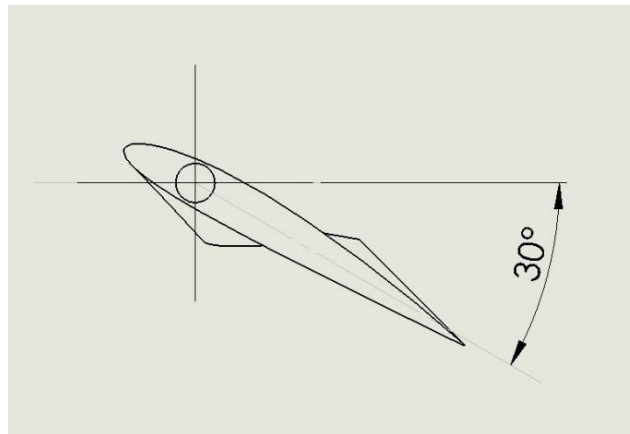
## 12. Parell vs posició angular (modificant la variable 'p' per valors excessius, entrada en pèrdua)

L'entrada en pèrdua de l'àlep succeeix quan es genera una disminució del parell entregat a mesura que ens allunyem a l'àlep. Aquest fet és degut a que la modificació abrupta de l'angle *pitch* genera un excés en l'angle d'atac i aquest porta a l'entrada en pèrdua de totes aquelles seccions les quals superin el màxim angle d'atac permès en el perfil determinat.



Gràfic 15 Conjunt de gràfics mostrant el parell entregat durant una rotació modificant la 'p' al llarg de la superfície de l'àlep a diferents increments des del 80% al 160%

La següents imatges mitjançant Solidworks ens representen la inclinació que pren l'àlep al llarg de la superfície. En aquest cas donem una inclinació de  $p=30^\circ$  i un 100% de increment del valor de 'pitch' final respecte l'inicial.



Il·lustració 18 Captura del programa de disseny Solidworks mostrant la cota referent a la inclinació del 'pitch'

## Distribució del 'lift'<sup>7</sup>

Un cop tenim els paràmetres definits podem passar a la distribució del parell, la força 'F2zr' i la força 'Lift' per damunt de la superfície de l'àlep. Amb aquesta observació podem preveure la distribució que pren la força de sustentació aerodinàmica.

Existeix una teoria sobre l'aerodinàmica que estudia el comportament dels perfils alars en funció de la distribució de les forces que intervenen a la superfície. Com ja s'ha vist l'objecte d'estudi es maximitzar el parell entregat i això es tradueix en maximitzar la component del 'lift'. Un cop maximitzada aquesta variable ens interessa obtenir una distribució òptima d'aquesta component al llarg de la superfície alar.

Aquesta component es pot representar damunt del mateix àlep com si es tractés d'una distribució d'una càrrega damunt d'una biga. La representació de totes les components lift damunt d'un perfil d'àlep genera una distribució de càrrega anomenada '*lift distribution*'. El que ens interessa estudiar és la modificació d'aquesta distribució del LIFT per tal de minimitzar uns efectes causats per la descompensació del esforç suportat al extrem del àlep en comparació al volum de control que rodeja el mateix.

Aquest efecte s'anomena '*Wingtip vortices*'. Quan un perfil genera *lift* l'aire de la superfície superior té una pressió relativa inferior que la superfície de sota. L'aire tendeix a circular des de la part inferior a la part superior passant per l'extrem de l'àlep seguint un patró circular. A mesura que avança, aquest patró esdevé un vòrtex a l'extrem distal

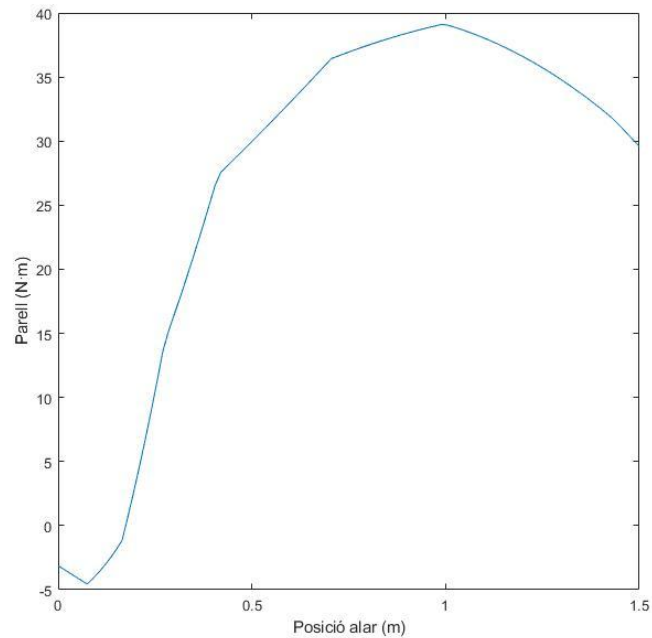
La distribució més òptima per un perfil és una distribució el·líptica, però també existeixen de distribucions lineals, parabòliques, etc.

---

<sup>7</sup> La teoria que recolza el apartat 'distribució del lift' s'ha resumit degut a no ser l'objecte d'estudi i queda desenvolupada a través d'uns models matemàtics paral·lels ideats per *Frederick W. Lanchester* al 1907, i *Ludwig Prandtl* in 1918–1919, teoria anomenada *Lanchester–Prandtl wing theory*.

### 13. Parell vs superfície angle fixat

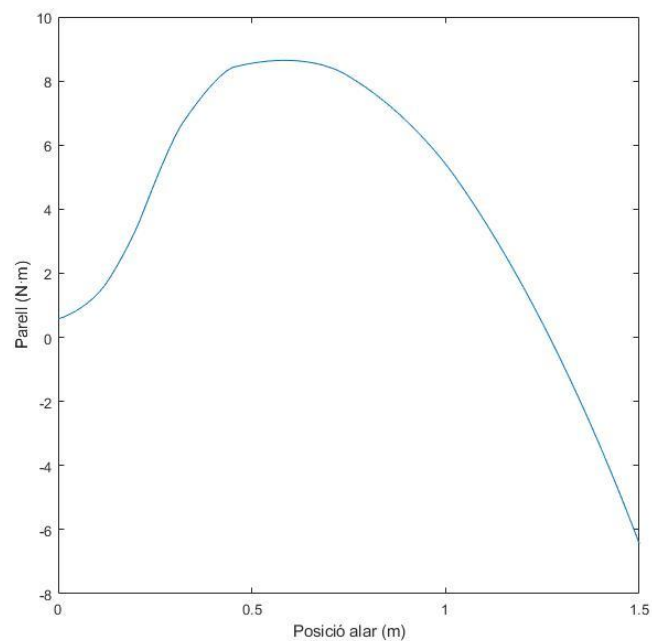
Observem el parell en funció de la posició alar per un angle determinat de posició angular



Gràfic 16 Gràfic del parell entregat en funció de la posició alar per una posició angular fixada

### 14. Parell vs superfície per revolució

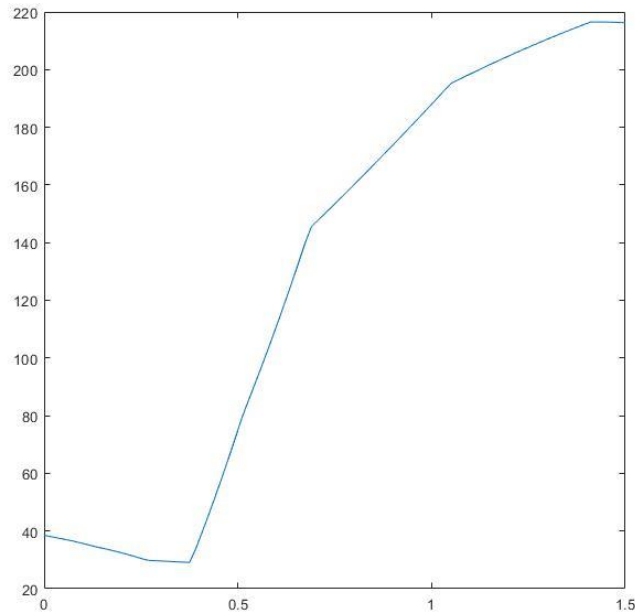
Suma dels parells diferencials respecte d'una rotació en funció de la superfície



Gràfic 17 Gràfic del parell entregat en funció de la posició alar per una rotació completa de la turbina

## 15. F2zr vs superfície per un angle fixat

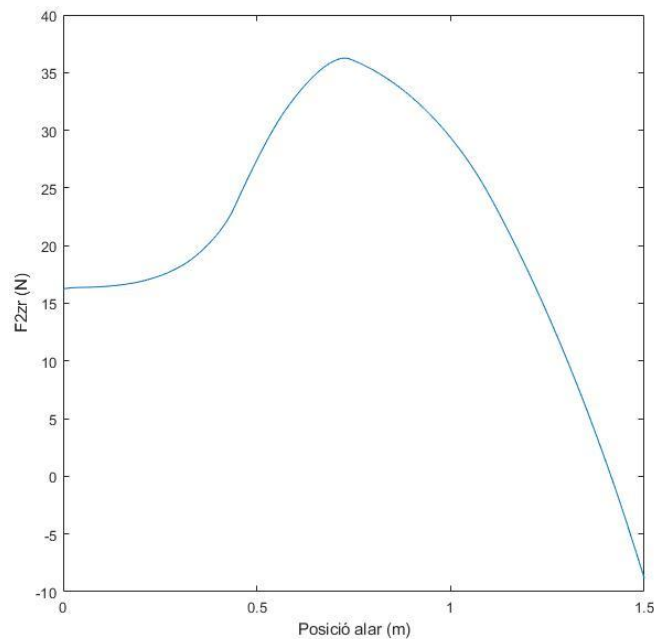
Observem la força F2zr en funció de la superfície per un angle determinat



Gràfic 18 Gràfic de la F2zr en funció de la posició alar per una posició angular fixada

## 16. F2zr vs superfície per revolució

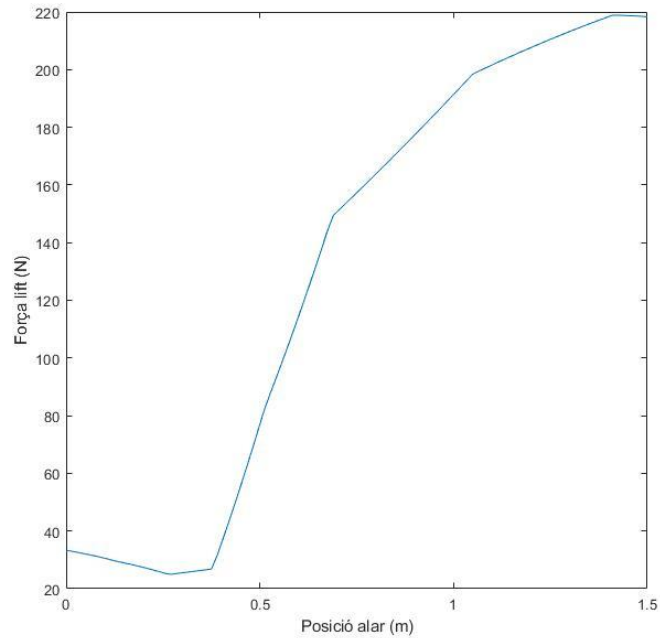
Suma dels diferencials de F2zr respecte d'una rotació en funció de la superfície.



Gràfic 19 Funció de la F2zr en funció de la posició alar per una rotació de la turbina

## 17. Component 'lift' vs superfície per un angle fixat

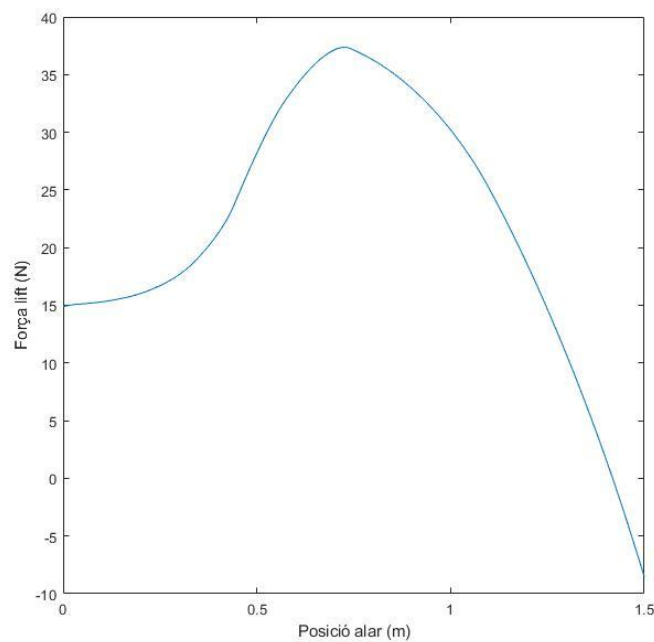
Observem la força 'lift' en funció de la superfície per un angle determinat



Gràfic 20 Funció de la força lift en funció de la posició alar per una posició angular fixada

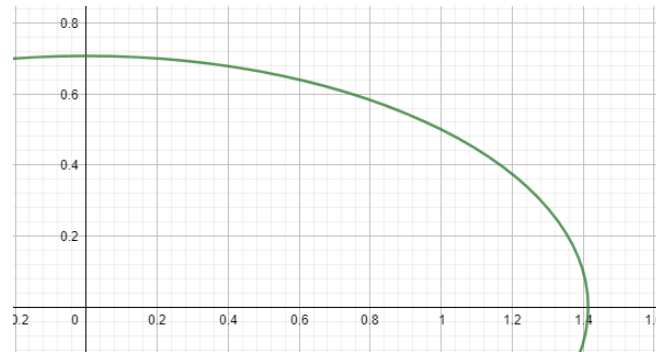
## 18. Component 'lift' vs superfície per revolució

Suma dels diferencials de *lift* respecte d'una rotació en funció de la superfície



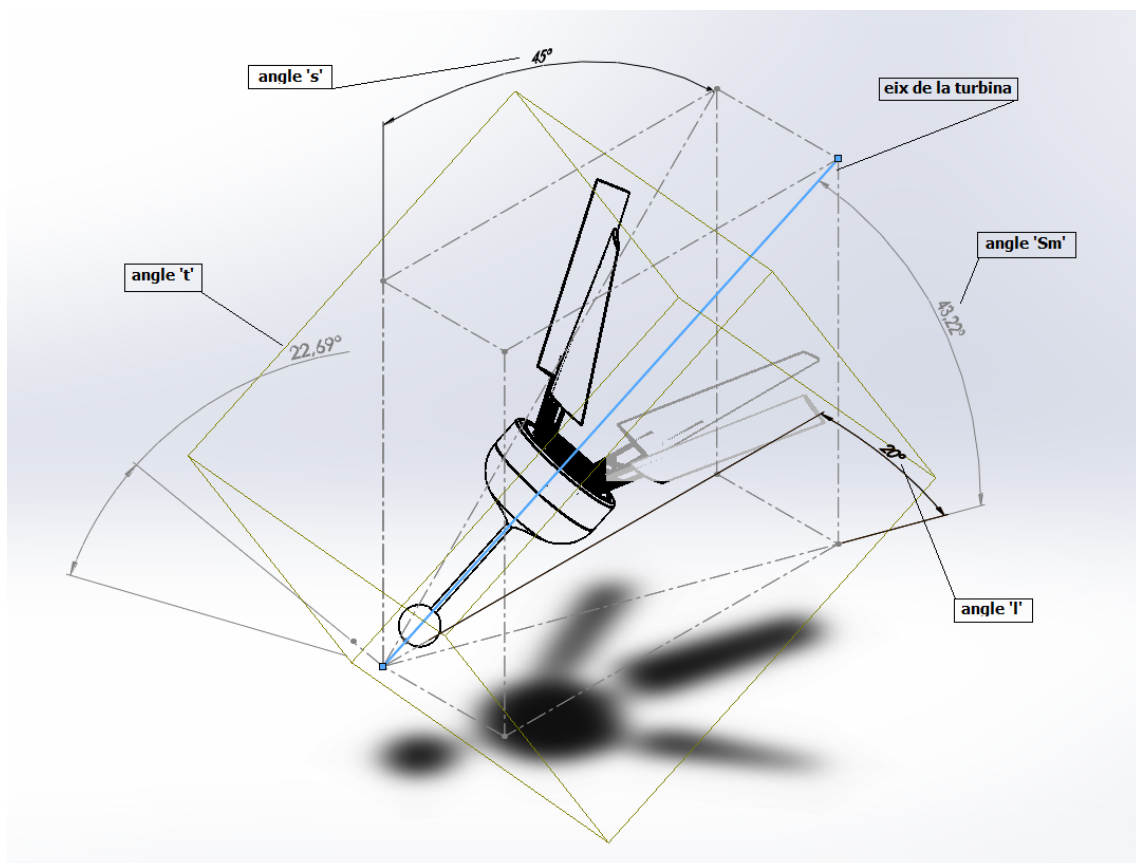
Gràfic 21 Funció de la  $F_{2zr}$  en funció de la posició alar per una revolució de la turbina

Obtinguts aquests gràfics entendrem que l'anàlisi d'aquests es regeixen per els criteris prèviament establerts al apartat **Distribució del 'lift'** de la pàgina 43. Aquests criteris fan referència a una distribució de la component 'lift' el·líptica en funció de la superfície.



Gràfic 22<sup>8</sup> Quadrant superior dret d'una el·lipse mostrant la distribució més òptima per al 'lift'. Al centre de coordenades correspondria al centre de la turbina i l'extrem dret seria l'extrem de l'àlep.

## 5.6. Càlcul dels angles reals 's', 't' i 'Sm' en base a un ajust iteratiu



Il·lustració 19 Diagrama dels angles de inclinació que pren la turbina. Vista de la màquina situada sobre aquesta configuració i vista de totes les direccions que forma respecte els eixos coordenats.

<sup>8</sup> Material de suport procedent de <https://www.geogebra.org/graphing>

Suposem un diagrama del sòlid lliure com el que mostra la figura superior. Dins del model hipotètic havíem suposat una sèrie de condicions de treball i paràmetres de disseny com per exemple la velocitat del vent, els RPM o la inclinació de l'escora 's'. Ara tractarem de calcular mitjançant les condicions reals tots els aspectes relacionats amb l'estàtica de la turbina utilitzant les equacions corresponents. Primer donarem la teoria per calcular les forces i moments que intervenen a través d'una suposició i seguidament calcularem mitjançant iteracions les condicions reals de treball de la turbina.

### Procediment

1. Definim els paràmetres de disseny de la turbina: La longitud de l'àlep, la inclinació de la corda, la longitud de la corda, la inclinació de l'eix inicial, la semi obertura del con. També la geometria del perfil 'LD' i les condicions de contorn. Tenim en compte que el nostre paràmetre a iterar serà 's' i donem un valor inicial.
2. Introduïm les variables del diagrama del sòlid lliure 'cr' i 'ck' que seran les distàncies superior i inferior respectivament als extrems de l'eix de rotació respecte el metacentre. Definim el valor del contrapès, 'h'.
3. Calculem els RPM i la potència que ajusta la corba de la funció de la potència màxima<sup>9</sup> a un valor donats els paràmetres dimensionals de la turbina en el script anterior. En aquest apartat hem de definir la velocitat del vent 'w' i el valor inicial 'r0'. Obtenim 'r1'
4. Utilitzem els valors de RPM obtinguts en l'apartat anterior i calculem la força d'arrossegament 'trust'<sup>10</sup>. Obtindrem la força composta per tres components:  $f = (f_1, f_2, f_3)$
5. Solucionem els valors de 'lambda' i calculem  $e = (e_1, e_2, e_3)$ . Per solucionar 'lambda' implementem l'equació d'equilibri que iguala els moments generats per el contrapès i la força d'arrossegament.

Solucionem l'equació  $hc_h \sin(s_m) = c_r \|E \times F_m\|$  que ens estableix la igualació dels moments. Tenim en primer lloc el vector director  $\|E\| = 1$  d'aquí en treiem que  $e_3 = \sqrt{1 - \lambda^2(f_1^2 + f_2^2)}$ . D'altra banda tenim que

$$\|E \times F_m\| = (\lambda f_2 f_3 - f_2 e_3, e_3 f_1 - \lambda f_1 f_3, 0) = (\lambda f_3 - e_3)(f_2, -f_1, 0)$$

$$\|E \times F_m\| = \left( \lambda f_3 - \sqrt{1 - \lambda^2(f_1^2 + f_2^2)} \right) \sqrt{(f_1^2 + f_2^2)} = h \frac{c_h}{c_r} * \sin(s_m)$$

$$e_3 = \sqrt{1 - \lambda^2(f_1^2 + f_2^2)} = \sin(\overline{s_m}) = \cos(s_m)$$

Aillem el  $\sin(s_m)$  de l'equació 'x' i elevem al quadrat les expressions 'x' i 'y'. Sumem els resultats i apliquem la relació trigonomètrica següent i obtenim:

<sup>9</sup> Veure annex A.1.4 on s'incorpora la funció 'pmax.m' referent a la potència màxima.

<sup>10</sup> Veure annex A.1.2. on s'incorpora el programa encarregat de calcular la força d'arrossegament en funció de les components tridimensionals.



$$\sin^2(\alpha) + \cos^2(\alpha) = 1$$

$$h \frac{c_r}{c_h} \left( \lambda f_3 - \sqrt{1 - \lambda^2 (f_1^2 + f_2^2)} \right)^2 (f_1^2 + f_2^2) + 1 - \lambda^2 (f_1^2 + f_2^2) = 1$$

que ens dona una equació biquadràtica per a *lambda* simplificada. Obtenim les 4 solucions de *lambda*.

6. Entrem a la segona part amb un dels 4 valors de *lambda* i trobem  $e = (e_1, e_2, e_3) = (\lambda f_1, \lambda f_2, e_3)$ , 's', 't', i 'Sm'. El programa esta dividit en 2 per poder separar la múltiple casuística referent a les solucions de l'equació de *lambda*. Un esquema de les possibles iteracions condicionades per aquest factor seria el que es mostra a continuació. La dificultat es troba en que per que un resultat de 's' tingui un cert rigor es necessita haver passat almenys per dues iteracions perquè en la segona iteració incorporarà la variable 't' de l'angle que condiciona el resultat de les forces 'Fm'. Per arribar al primer valor de 'Sm' amb un cert rigor podem arribar a obtenir 16 possibles solucions.<sup>11</sup>

7. Extraiem també l'angle 'l' que és l'angle que genera el pla en el qual s'estudia el diagrama del sòlid lliure però que ni intervé en els càlculs iteratius per establir l'equilibri. Cal argumentar que les components obtingudes del vector F son referenciades en base al sistema de referència  $Ox'y'z$  (en el qual en centrem en la posició de la turbina) i que cal transformar aquestes components al sistema de referència  $Oxyz$  [en el qual ens centrem en la posició del mar]. Tenim en un principi un vector director que ens determina la direcció del eix de rotació de la turbina:  $e = (0,1,0) = (e_1, e_2, e_3)$ , a partir de la força Fm resultant podem obtenir el nou vector director modificat per la seva orientació respecte el vent,  $e = (e_1, e_2, e_3)$

Aprofitant-nos del dibuix podem veure a relació existent.

$$e = \left( \frac{f_1}{\sqrt{(f_1)^2 + (f_2)^2 + (f_3)^2}}, \frac{f_2}{\sqrt{(f_1)^2 + (f_2)^2 + (f_3)^2}}, \frac{f_3}{\sqrt{(f_1)^2 + (f_2)^2 + (f_3)^2}} \right)$$

$$\tan(l) = \frac{f_1}{f_2} = \frac{e_1}{e_2}$$

A continuació es mostra el resum de l'execució de programes. [en verd les variables que conformen el càlcul iteratiu per 's']

<sup>11</sup> Veure annex A.1.6 on es realitzen tots els càlculs.

Etapa	Variables Implementades	Variables Obtingudes	Programa D'execució Matlab
1.	A,b,c,p,q,s,rho,LD,c,p,ind,G,L,R		'dades.m'
2	Cr,ck,h		'slliureP1.m'
3	W,r0	<b>R1</b>	'slliureP1.m' [pmax.m]
4		<b>[f1,f2,f3],[fm1,fm2,fm3]</b>	'slliureP1.m' [F.m]
5		<b>Lambda, [e1,e2,e3]</b>	'slliureP1.m'
6		<b>S,t,Sm</b>	'slliureP2.m'
7		<b>l</b>	'slliureP2.m'

Taula 2 Resum de etapes realitzades per el software de programació. Les variables implementades, les variable obtingudes i els noms dels programes a executar.

### Optimització de la solució en base a un procés iteratiu

Ara es calcula la inclinació 's' real suposant un model iteratiu basat en el diagrama del sòlid lliure. A partir del punt 2.5 obtenint la variable de sortida referent a la inclinació de l'eix podem re calcular els mateixos valor de entrada al programa mitjançant el mateix procés [subratllats en groc]. Donant nous valors a 's' integrats en la matriu dels paràmetres recorrem els passos anteriors des del 1. Fins al 4. És en aquest punt on hem de introduir el valor obtingut de l'angle 't' al càlcul. Aquest angle és el que determina la inclinació del pla en el que rota l'eix, el pla perpendicular a l'eix. Fins ara havíem calculat tots els valors en base a un sistema de referència que situava l'eix de la turbina perpendicular al pla horitzontal que forma el mar. Ara volem referir aquests valors a un sistema de referència basat en la horitzontal del mar i la direcció de l'eix de les 'x' paral·lela a el direcció del fluid. la component 'w' del vent [eix positiu de les 'x']. Per tal de referenciar al nou sistema hem d'aplicar la següent rotació al eix i als seus valors de 'F':

$$F_m = R_t F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(t) & -\sin(t) \\ 0 & \sin(t) & \cos(t) \end{bmatrix} F$$

1. Actualitzar els valors d'entrada amb el nou valor de inclinació de eix obtingut.
2. Es realitza una iteració però tenint en compte la rotació que pren el nou valor de  $F$  ara anomenat  $F_m$  mostrat a la matriu superior. Obtenció de noves components de  $f = (f_{m1}, f_{m2}, f_{m3}) = R_t(f_1, f_2, f_3)$
3. Obtenció d'un nou valor de inclinació de l'eix. Si es desitja, tornar a iterar el procés.<sup>12</sup>

<sup>12</sup> Veure annex A.1.6 on veiem els programes referents a les noves iteracions

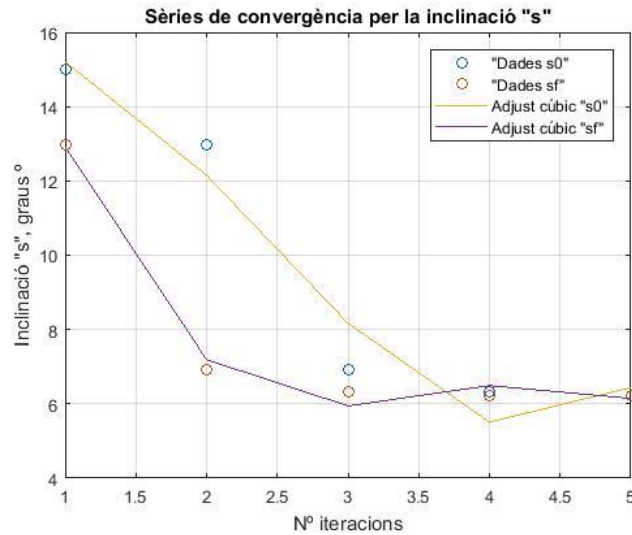
Etapa	Variables Implementades	Variables Obtingudes	Programa D'execució Matlab
1	A,b,c,p,q,s,rho,LD,c,p,ind,G,L,R		'dades.m'
2	Cr,ck,h		'iteracioP1.m'
3	W,r0	<b>R1</b>	'iteracioP1.m'[pmax.m]
4		<b>[f1,f2,f3],[fm1,fm2,fm3]</b>	'iteracioP1.m' [F.m]
5		<b>L1,L2,L3,L4, [e1,e2,e3]</b>	'iteracioP1.m'
6		<b>S,t,Sm</b>	'iteracioP2.m'
7		<b>l</b>	'iteracioP2.m'

Taula 3 Resum de etapes realitzades per el software de programació en la segona iteració. Les variables implementades, les variable obtingudes i els noms dels programes a executar.

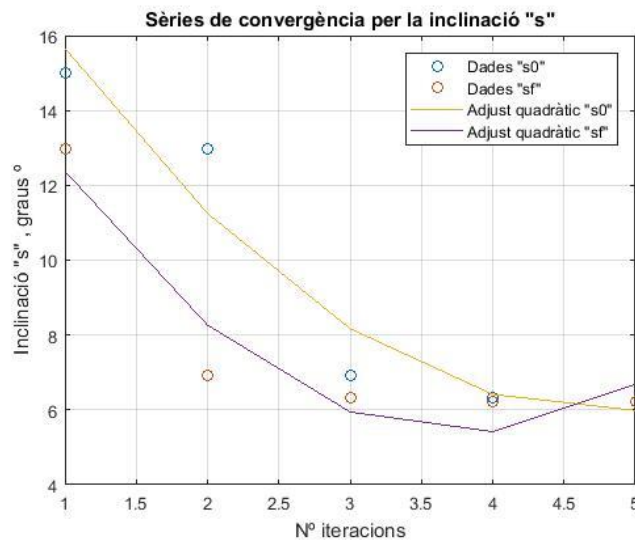
S'han obtingut una mostra de cinc valors en el procés iteratiu anterior. Aquests valors es veuen representats en la taula següent on tenim les entrades com  $y_1$  ( $s_{inicial}$ ) i  $y_2$  ( $s_{final}$ ). Veiem com els valors d'entrada van prenent els valors de sortida corresponents al càlcul anterior i s'ha intentat estudiar la convergència d'aquestes sèries de valors. Seguidament s'han representat dos gràfics que fan referència a les dades obtingudes i a dos tipus d'ajustaments polinòmics. El primer és un ajustament cúbic i el segon, quadràtic.

x	y1	y2
Iteració	s_inicial	s_final
1	15,00	12,98
2	12,98	6,92
3	6,92	6,34
4	6,34	6,23
5	6,23	6,21

Taula 4 Taula de valors de diferents angles de inclinació.



Gràfic 23 Funcions mostrant la sèrie de convergència dels valors obtinguts i l'ajustament quadràtic pertinent.



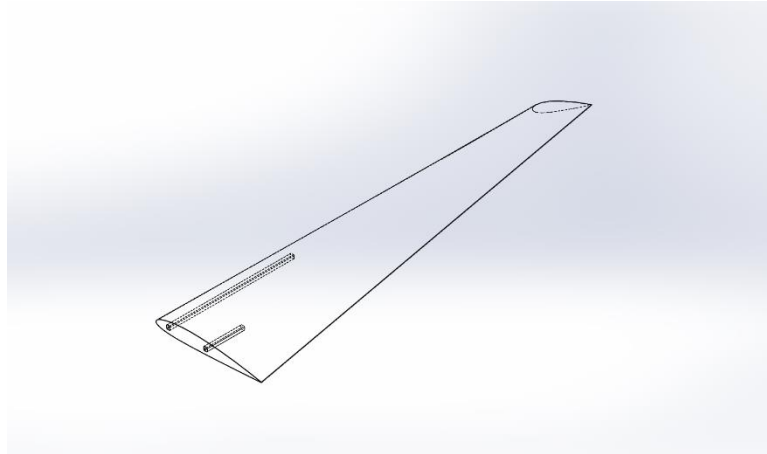
Gràfic 24 Funcions mostrant la sèrie de convergència dels valors obtinguts i l'ajustament cúbic pertinent.

## 5.7. Conclusions del model matemàtic

Es creu que s'ha pogut realitzar i complir les expectatives que resumien els objectius referents al model matemàtic. S'ha pogut observar conceptes que es podien intuir prèviament però també d'altres que haurien estat força difícils de preveure com per exemple el límit dels valors del *pitch* que permeten la caiguda del parell abrupta per l'àlep.

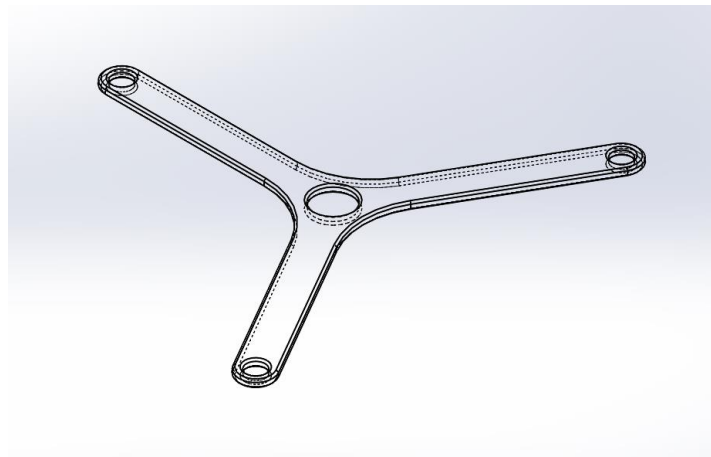
## 6. Components mecànics

### 6.1. Àleps



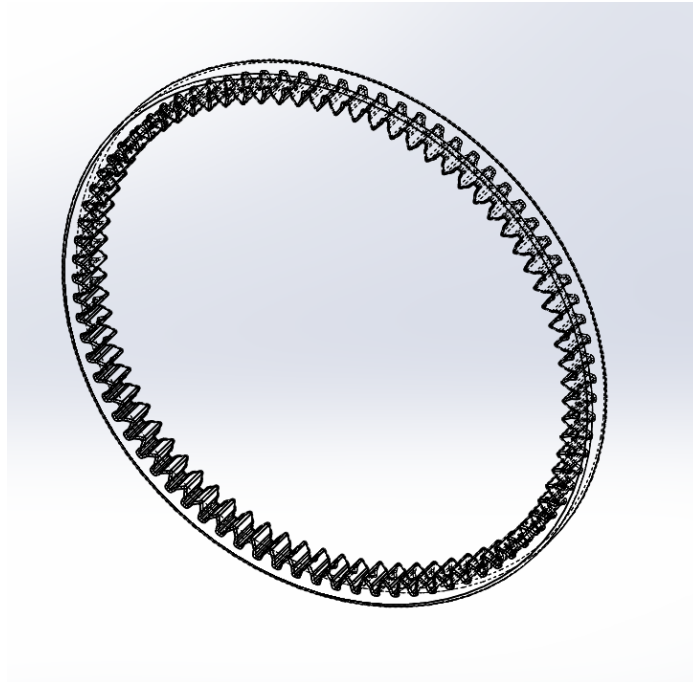
*Il·lustració 20 Vista en perspectiva de l'àlep*

### 6.2. Carrier



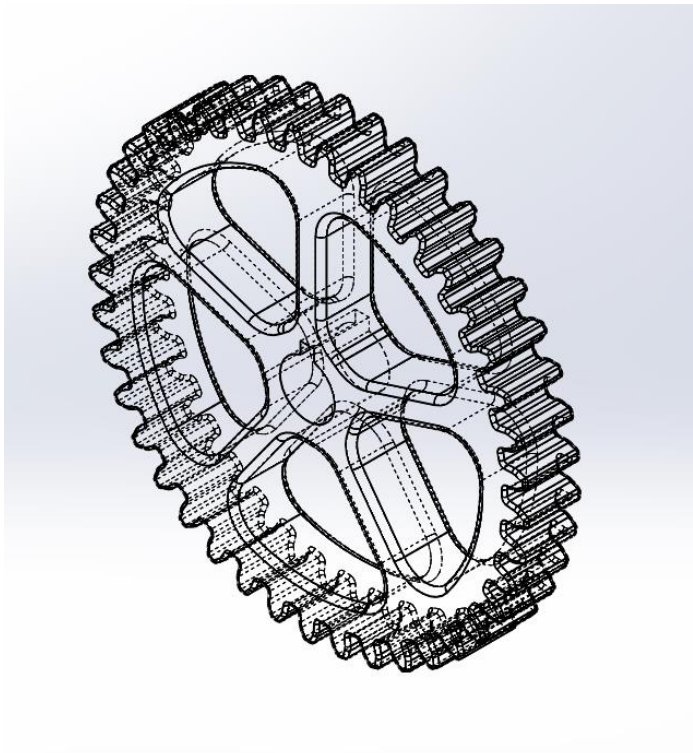
*Il·lustració 21 Vista del 'carrier' o peça que junta els tres engranatges planetaris*

### 6.3. Engranatge cilíndric anella



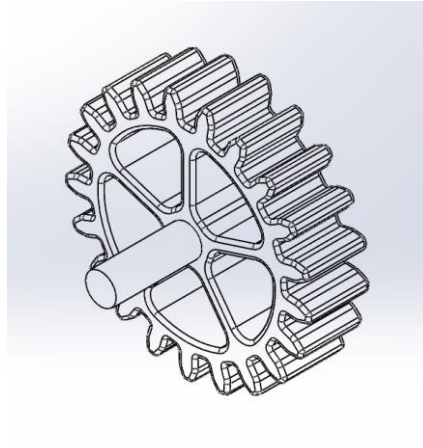
*Il·lustració 22 Vista de l'engranatge cilíndric recte de tipus anella*

### 6.4. Engranatge cilíndric central



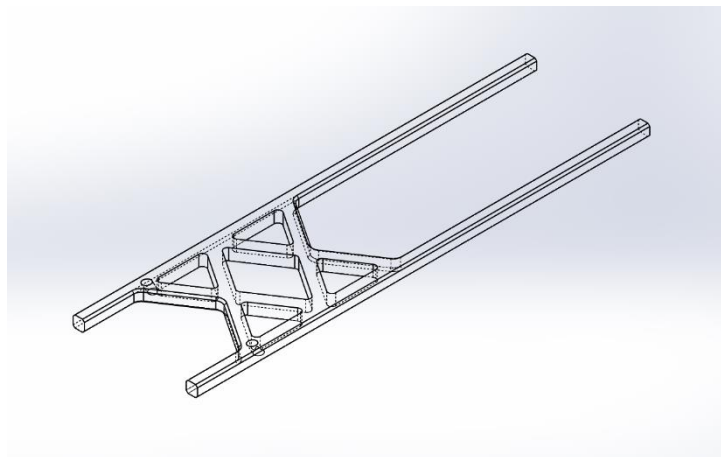
*Il·lustració 23 Vista de l'engranatge cilíndric recte centra*

## 6.5. Engranatge cilíndric planetari



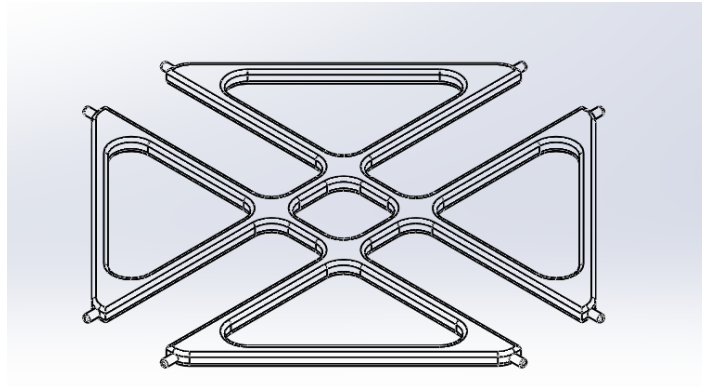
*Il·lustració 24 Vista del engranatge cilíndric recte planetari*

## 6.6. Estructura *Housing-àlep*



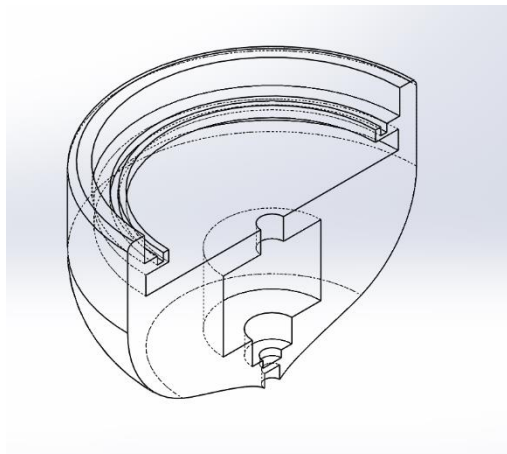
*Il·lustració 25 Vista de l'estructura que uneix els àleps al 'housing'*

## 6.7. Estructura interna àleps



*Il·lustració 26 Vista de l'estructura interna que acobla els àleps.*

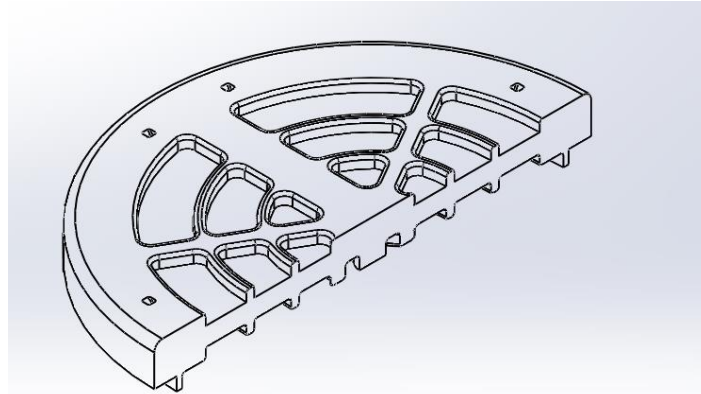
## 6.8. Housing (vista d'una secció)



*Il·lustració 27 Secció del 'housing'*

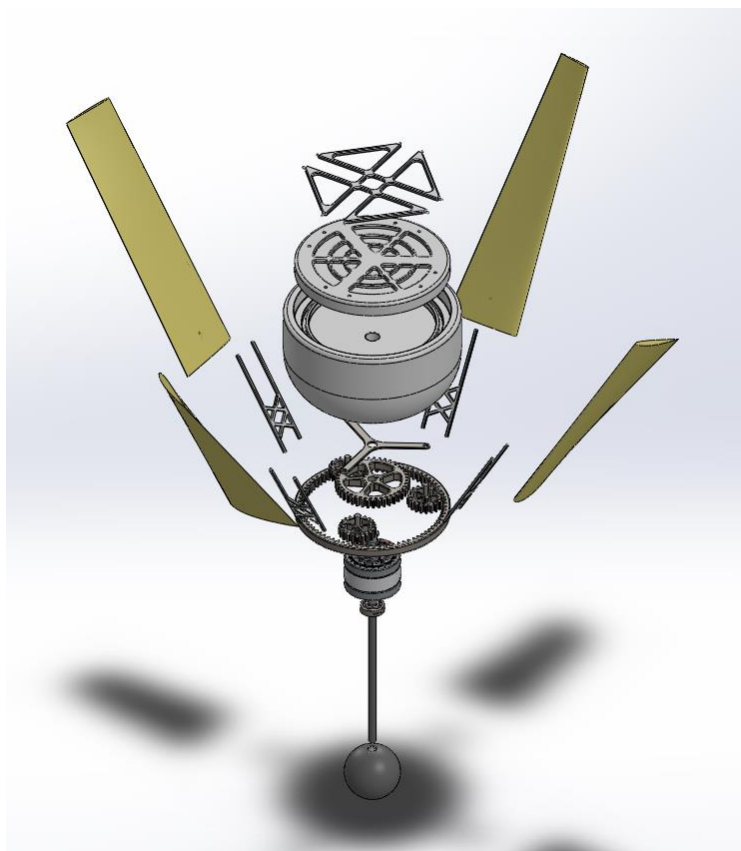


## 6.9. Rotor (vista d'una secció)



*Il·lustració 28 Secció del rotor*

## 6.10. Explosionat



*Il·lustració 29 Vista de la màquina explosionada*

## 7. Anàlisi de l'impacte ambiental

La implementació de qualsevol sistema de transferència energètica que sigui capaç de minimitzar els recursos del qual se'n enriqueix i es fonamenta sempre és un avenç cap al possible impacte a nivell ambiental que pugui tenir. Les energies renovables per desgracia encara no formen una gran part dels sistemes de conversió energètica en la nostra societat. Si que està clar que des de l'enginyeria i la ciència s'han arribat a fer estudis profundament intensos i rigorosos sobre el possible funcionament d'aquests sistemes. Abans de començar amb el treball vaig documentar-me sobre tota aquesta informació i mai podria haver imaginat una quantitat de estudis, llibres, *papers*, documentació vinculada al desenvolupament de ni més ni menys que la tradicional turbina d'eix horitzontal. Segurament els sistemes no estan establerts per motius polítics que frenen el desenvolupament i la implementació dels mateixos. Des de l'enginyeria ens dedicarem a vetllar per disminuir el impacte ambiental dels nostres projectes i implementar en tots els processos des del disseny, la fabricació, l'execució conceptes que tinguin en compte el medi ambient.

# Conclusions

Es considera que s'ha pogut assolir una sèrie de reptes en el desenvolupament del treball i se'n surt satisfet de la recerca i la implementació de diverses teories referent als camp de la mecànica de fluids respecte al treball. S'ha pogut realitzar un anàlisi curós de la influència de tots aquells paràmetres que es consideren quan estudiem la turbina eòlica. Per tant es pot afirmar que existeix un model matemàtic, prèviament establert pel professor esmentat anteriorment, i modificat per l'estudiant que permet el càlcul teòric de tots aquells valors objectes d'estudi. I que aquest model compren la gran majoria de variables que intervenen en el que podria ser un model real. (com ara tots els paràmetres integrants de un àlep però també els que fan referència a una turbina amb els seus elements que la formen com les parts integrants: mort de contrapès, eixos, alternadors, Housings, rotors, etc.)

Per contra, partíem de la base de una sèrie de hipòtesis que s'han suposat. Totes elles esmentaven una sèrie de condicions ideals per el funcionament de una turbina. És molt possible que en un escenari més realista aquestes hipòtesis deixin de tenir rigor i que les condicions de treball de la turbina es vegi condicionada fortament per les condicions ambientals.

# Bibliografia

## **Diagrames de forces aerodinàmiques**

<https://physics.stackexchange.com/questions/83432/difference-resultant-aerodynamics-force-on-an-airfoil-and-a-flat-plate>

## **Representacions de la capa límit i perfils de velocitat**

[https://www.google.es/search?q=capa+limit&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjpiYentPHZAhXEhaYKHfFrBv0Q\\_AUICigB&biw=1366&bih=675#imgsrc=gcQaOZqul4iX2M](https://www.google.es/search?q=capa+limit&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjpiYentPHZAhXEhaYKHfFrBv0Q_AUICigB&biw=1366&bih=675#imgsrc=gcQaOZqul4iX2M):

## **Vòrtex. Despreniments de la capa límit**

[https://www.google.es/search?tbm=isch&sa=1&ei=F1WtWsuwHoX1UMm6ulg&q=stall+airfoil&oq=stall+airfoil&gs\\_l=psyab.3..0i19k1.3431.5648.0.5836.8.5.0.3.3.0.136.563.2j3.5.0....0...1c.1.64.psyab..0.8.577...0i8i30i19k1.0.nfjdNEaeLas#imgsrc=ljWKBcUCybmliM](https://www.google.es/search?tbm=isch&sa=1&ei=F1WtWsuwHoX1UMm6ulg&q=stall+airfoil&oq=stall+airfoil&gs_l=psyab.3..0i19k1.3431.5648.0.5836.8.5.0.3.3.0.136.563.2j3.5.0....0...1c.1.64.psyab..0.8.577...0i8i30i19k1.0.nfjdNEaeLas#imgsrc=ljWKBcUCybmliM):

## **Gràfics del coeficient 'lift' vs angle d'atac i del coeficient 'lift' vs 'coeficient 'drag'.**

[https://www.google.es/search?biw=1366&bih=675&tbm=isch&sa=1&ei=5FmtWujTlcGuU\\_SMM1A&q=naca+airfoils+lift+plot&oq=naca+airfoils+lift+plot&gs\\_l=psyab.3...3692.4493.0.5235.5.5.0.0.0.100.421.4j1.5.0....0...1c.1.64.psyab..0.0.0....0.sfe1yQdHnSQ#imgsrc=uHcAYxvYy\\_9pMM](https://www.google.es/search?biw=1366&bih=675&tbm=isch&sa=1&ei=5FmtWujTlcGuU_SMM1A&q=naca+airfoils+lift+plot&oq=naca+airfoils+lift+plot&gs_l=psyab.3...3692.4493.0.5235.5.5.0.0.0.100.421.4j1.5.0....0...1c.1.64.psyab..0.0.0....0.sfe1yQdHnSQ#imgsrc=uHcAYxvYy_9pMM):

## **Simulació en CFD del fluid traspasant una secció de la turbina Savonius.**

[https://www.youtube.com/watch?v=mAXCB4Mf\\_wo](https://www.youtube.com/watch?v=mAXCB4Mf_wo)

## **Principi físic pel qual funciona la turbina Savonius**

[https://ca.wikipedia.org/wiki/Rotor\\_Savonius](https://ca.wikipedia.org/wiki/Rotor_Savonius)

## **Turbines darrieus**

[https://www.google.es/search?q=darrieus+wind+turbine+patent&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiajoaBqOzZAhXHvRQKHToPBRgQ\\_AUICigB&biw=1366&bih=675#imgsrc=tqllvRrcyedsJM](https://www.google.es/search?q=darrieus+wind+turbine+patent&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiajoaBqOzZAhXHvRQKHToPBRgQ_AUICigB&biw=1366&bih=675#imgsrc=tqllvRrcyedsJM)

## **Simulació CFD de turbines darrieus**

[https://www.google.es/search?q=darrieus+wind+turbine+ansys&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwik5ZCPxzZAhVIOxQKHR6NCSAQ\\_AUICigB&biw=1366&bih=675#imgsrc=TaVB1C3GyAfosM](https://www.google.es/search?q=darrieus+wind+turbine+ansys&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwik5ZCPxzZAhVIOxQKHR6NCSAQ_AUICigB&biw=1366&bih=675#imgsrc=TaVB1C3GyAfosM)

## **Àlep corresponen a una turbina HAWT.**

[https://www.google.es/search?biw=1366&bih=637&tbm=isch&sa=1&ei=Ht6yWui8NsSRgAbJ4ZbwCg&q=sections+of+wind+turbine+blade&oq=sections+of+wind+turbine+blade&gs\\_l=psyab.3...9282.17251.0.17354.30.24.0.6.6.0.142.2251.14j9.23.0....0...1c.1.64.psyab..1.16.1106...0j0i67k1j0i19k1j0i30i19k1j0i8i30i19k1j0i30k1.0.4dOK5JOMfcl#imgsrc=u6U4amxohRtrvM](https://www.google.es/search?biw=1366&bih=637&tbm=isch&sa=1&ei=Ht6yWui8NsSRgAbJ4ZbwCg&q=sections+of+wind+turbine+blade&oq=sections+of+wind+turbine+blade&gs_l=psyab.3...9282.17251.0.17354.30.24.0.6.6.0.142.2251.14j9.23.0....0...1c.1.64.psyab..1.16.1106...0j0i67k1j0i19k1j0i30i19k1j0i8i30i19k1j0i30k1.0.4dOK5JOMfcl#imgsrc=u6U4amxohRtrvM):