

Anàlisi mitjançant mecànica de fluids  
computacional d'un aerogenerador minieòlic

Marc Berenguer Vilamitjana



# Índex

<b>1</b>	<b>Descripció del treball</b>	<b>4</b>
1.1	Antecedents . . . . .	4
1.2	Objecte general del projecte . . . . .	5
1.3	Especificacions . . . . .	7
1.4	Abast del projecte . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Introducció</b>	<b>8</b>
2.1	Inicis de l'energia eòlica . . . . .	8
2.2	Els generadors eòlics . . . . .	10
2.3	Situació actual i futura . . . . .	12
2.4	Els generadors minieòlics . . . . .	17
2.5	Air-X SD2030 . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Descripció de la metodologia</b>	<b>23</b>
3.1	Estimació de les velocitats de simulació . . . . .	23
3.2	Elecció del paràmetre $\lambda$ . . . . .	24
3.3	Càlcul de les velocitats de gir teòriques . . . . .	25
3.4	Càlcul dels límits de potència teòrics . . . . .	25
3.5	Creació de la geometria . . . . .	28
3.6	Mallat del model . . . . .	33
3.7	Preparació de les simulacions . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Resultats</b>	<b>39</b>
4.1	Anàlisi dels resultats de les simulacions . . . . .	39
4.2	Obtenció de la corba de potència teòrica . . . . .	44
4.3	Comparació amb la corba de potència real . . . . .	47
4.4	Rang de validesa dels resultats . . . . .	49
<b>5</b>	<b>Índex dels documents</b>	<b>52</b>
<b>6</b>	<b>Resum del pressupost</b>	<b>53</b>
<b>7</b>	<b>Conclusions finals</b>	<b>54</b>

<i>ÍNDEX</i>	3
<b>Apèndix</b>	<b>60</b>
<b>Apèndix A Taules de resultats de les simulacions</b>	<b>61</b>
<b>Apèndix B Gràfics de les simulacions</b>	<b>64</b>
<b>Apèndix C Pressupost</b>	<b>73</b>



# Capítol 1

## Descripció del treball

En aquest capítol s'explicarà la idea que ha motivat aquest treball, així com l'objecte, especificacions i abast que definiran les línies generals de la seva realització.

### 1.1 Antecedents

La consciència sobre la contaminació global al planeta ha anat augmentant gradualment en els últims anys. Paral·lelament la tecnologia en les diferents fonts energètiques ha anat evolucionant i millorant, permetent una millora de rendiment i al mateix temps una baixada de preus.

Aquests dos fets combinats han fet que augmentés, en alguns llocs del planeta més que en altres, la quantitat de cases i edificis que optaven per generar-se una part de l'energia que consumien, tal com es pot veure a la figura 1.1. Possiblement la més utilitzada hagi sigut, i continuï essent, la solar fotovoltaica, però en determinats llocs s'han anat instal·lant petits generadors eòlics coneguts com a generadors minieòlics.

El seu principi de funcionament és el mateix que els molins eòlics de



Figura 1.1: Exemples d'autogeneració d'energia elèctrica domèstica. [16] i [17]

grans dimensions que s'instal·len als parcs eòlics, però evidentment amb una reducció de la potència generada proporcional a la reducció de la mida. La part d'emmagatzematge de l'energia generada i la seva adaptació per al consum és idèntica a la que s'utilitza en la solar fotovoltaica.

Al mateix temps que evolucionaven les tecnologies energètiques també ho feia la informàtica, i al ser una eina relativament nova, ha evolucionat increïblement ràpid. La gran millora de potència de càlcul dels ordinadors ha permès que s'utilitzessin per ajudar en el disseny i el càlcul de tot tipus de processos industrials, domèstics i comercials.

I concretament una eina que ha evolucionat a enorme velocitat han estat els programes de simulació per ordinador. Aquest tipus de software permet fer proves i simulacions utilitzant un ordinador en lloc d'haver de crear diferents models o maquetes per a realitzar experimentacions amb ells, reduint enormement els temps totals necessaris per a la creació de nous productes. Dins aquest grup de software, hi trobem els de dinàmica de fluids computacional (CFD en les seves sigles en anglès). Els CFD permeten simular el comportament d'un fluid (sigui aquest un gas o un líquid) i com interacciona amb els elements que es troba en el seu recorregut.

També gràcies al nivell de potència gràfica disponible actualment en ordinadors de preu assequible, avui en dia existeixen gran varietat de programes per fer amb gran precisió el disseny en tres dimensions de qualsevol element, permetent posteriorment fer, per exemple, una simulació amb CFD o amb programes d'elements finits.

A la universitat de Girona es disposa de varies opcions tant per al disseny en 3D com de simulació amb CFD. Al mateix temps també es disposa de dos generadors minieòlics, un instal·lat al terrat de l'edifici P2 i un de més petit, mostrat a la figura 1.2, al laboratori d'energies que s'utilitza en treballs, pràctiques i experiments diversos.

El fet de disposar a la universitat tant dels aparells com del software mencionat, va fer pensar en simular un dels generadors minieòlics per veure si es podria treure la corba de potència sense fer cap simulació física per agafar dades experimentals.

En cas que fos possible treure la corba de potència únicament amb simulació per ordinador, es podria afirmar que es podrien evitar despeses en construcció de prototips i en la seva simulació experimental, reduint la inversió en el disseny i en la optimització d'aquest nous dissenys o dels ja existents.

## 1.2 Objecte general del projecte

L'objecte del present projecte final de carrera és comprovar si es podria obtenir la corba de potència d'un generador minieòlic només amb la seva simulació per ordinador, i sense fer cap prova experimental per obtenir dades.



Figura 1.2: Generador minieòlic SD2030 del laboratori d'energies de la UdG.

Les úniques dades que s'utilitzaran en la creació del model informàtic per a les posteriors simulacions, seran les mesures geomètriques de l'aparell i de la forma del seu perfil proporcionades pel fabricant o mesurades directament si no es tenen.

### 1.3 Especificacions

Les especificacions que s'han decidit per aquest projecte són:

- No es realitzarà cap prova experimental per agafar dades del generador minieòlic.
- El generador minieòlic que s'utilitzarà és un Air-X amb perfil de pala SD2030 de la casa Technosun S.L. que es troba en el laboratori d'energies.
- Només s'utilitzaran les dades sobre geometria i forma del perfil proporcionades pel propi fabricant.
- En cas que faltin dades de tipus geomètric per a fer el model del generador minieòlic a l'ordinador, es podran agafar de l'aparell real. Les dades de tipus geomètric són les úniques que es permetrà agafar.
- El minigenerador té una  $\lambda$  de vuit coma vuit (a l'apartat 3.2 s'explica el significat d'aquest paràmetre).
- Tot el procés ha de poder realitzar-se en els ordinadors del laboratori de CFD de la universitat, amb les limitacions que impliquen les llicències de que es disposa i els propis ordinadors.

### 1.4 Abast del projecte

El present projecte contempla únicament la simulació del generador minieòlic model Air-X SD2030 de la casa Technosun. No es contempla la possibilitat de buscar altres generadors minieòlics per comprovar si el procés és vàlid de manera general. Tampoc no es busca proposar millores en el disseny aprofitant que la simulació per ordinador permetria abaratir molt la inversió a fer al no ser necessari construir cap prototip.

Aquest projecte només busca si es pot obtenir la corba de potència del generador minieòlic únicament amb simulació informàtica i disposant només de les dades geomètriques..

## Capítol 2

# Introducció

La radiació solar que arriba a la terra provinent del sol escalfa la superfície del planeta, però no ho fa de manera uniforme a tot el planeta, ja sigui per la latitud i longitud de la zona o bé pel tipus de superfície (terra o aigua).

Aquestes diferències de temperatura fan que l'aire de cada zona estigui a una temperatura diferent, i per tant que també variï la seva densitat. Al variar la densitat es produeix un moviment de les masses d'aire per intentar compensar la diferent pressió de cada zona. Aquest moviment és el que coneixem com a vent.

El Sol irradia cada hora sobre la Terra 174.473TWh d'energia. Entre un u i un dos per cent d'aquesta energia que arriba a la terra provinent del sol es transforma en vent.

### 2.1 Inicis de l'energia eòlica

L'energia eòlica és una de les primeres que va utilitzar l'home, tot i que evidentment en els inicis els seus usos no tenien res a veure amb l'electricitat.

Els primers usos de l'energia eòlica van ser bàsicament dos: els molins de vent i les veles de les embarcacions, encara que també es te constància d'un molí del segle I que servia per fer funcionar un orgue.

Tot i que els molins que tothom imagina al pensar en l'antiguitat són d'eix horitzontal com els de la figura 2.1, en realitat els primers molins per a ús pràctic dels que es coneixen eren d'eix vertical. Eren a la zona d'Afganistan, Egipte i alguns llocs d'Àsia al segle VII a.C. i consistien en sis o vuit draps a mode de vela que feien girar un eix.

A Europa els primers molins no van aparèixer fins al segle XII a zones de França i Anglaterra. Posteriorment es van distribuir ràpidament per tot el continent. A Holanda, coneguda entre altres coses pels seus molins, es van desplegar massivament a partir de 1430.

Dins dels molins de vent existien dues classes ben diferenciades, els que servien per triturar gra i fer farina i els que s'utilitzaven per obtenir aigua.



Figura 2.1: A l'esquerra molí per fer farina. A la dreta molí per obtenir aigua. [18] i [19]

Els molins per fer farina, com el de la figura 2.1, constaven habitualment de quatre, sis o fins i tot vuit pales d'entre tres i nou metres de llarg, amb una estructura de fusta i un recobriment de tela o també de fusta. Aquestes pales transmetien el seu moviment a través d'eixos i engranatges fins a una pedra que girava sobre una altra pedra fixa. Al introduir el gra al mig de les dos pedres s'anava triturant fins a obtenir farina.

Actualment encara es conserven molins d'aquest tipus en algunes zones, de les quals una de les més conegudes és Holanda. Alguns es conserven simplement per mostrar el funcionament a les persones interessades, però si estan correctament conservats encara poden fer la seva funció original, tot i que els mètodes actuals són considerablement més ràpids, eficients i econòmics.

Els molins per obtenir aigua per la seva part tenien un disseny diferent. Les pales eren més petites i n'hi havien moltes més. A més solien ser metàl·liques. Això era degut a que aquest tipus de molí girava més ràpid que el de fer farina. Les pales transmetien el seu moviment a través d'una sèrie de mecanismes a una bomba de pales situada sota terra a l'extrem del tub que arribava fins la bossa d'aigua subterrània, i a través del moviment d'aquesta bomba la feia pujar pel tub fins al punt de sortida.

Tenien un diàmetre mig de tres metres i podien tenir entre divuit i vint-i-quatre pales. Se'n van fabricar més de sis milions entre 1880 i 1930.

Gràcies a aquests molins es va poder desenvolupar l'agricultura i la ramaderia en moltes zones que no tenien rius ni embassaments a prop, com per exemple en moltes zones de l'interior i oest dels EUA.

Els molins d'aigua també van facilitar l'expansió del ferrocarril al proporcionar aigua per les locomotores de vapor.





Figura 2.2: Vaixell de vela utilitzat actualment com a vaixell de luxe. [31]

L'altre gran ús de l'energia eòlica en els seus inicis eren les veles de les embarcacions, com per exemple el vaixell de la figura 2.2. Es té constància de gravats egipcis on ja sortien embarcacions de vela que daten de l'any 4.500aC.

La introducció de la vela als vaixells permetia recórrer distàncies molt més llargues que les que es podien fer utilitzant només els remos. Gràcies a això es va poder arribar a zones encara inexplorades, a més de facilitar el transport de mercaderies i persones entre ciutats i països.

Era bastant habitual que a part de les veles els vaixells incorporeessin també remos per no dependre únicament del vent, el qual no es pot controlar.

Actualment encara s'utilitzen molt els velers, tot i que solen ser embarcacions d'esbarjo i de dimensions més reduïdes que els de l'antiguitat. A més els velers actuals solen incorporar un motor de combustió en substitució dels antics remos per els casos en que es requereixi.

## 2.2 Els generadors eòlics

La generació d'energia elèctrica mitjançant generadors eòlics no va arribar fins a finals del segle XIX. Aquests primers generadors van inspirar-se en la forma i funcionament dels molins de vent que ja existien.

No obstant, la importància d'aquests generadors va ser pràcticament inexistente fins a la primera crisi del petroli dels anys 70, i es va potenciar encara més als anys 80 al aparèixer moviments en contra de l'energia nucle-

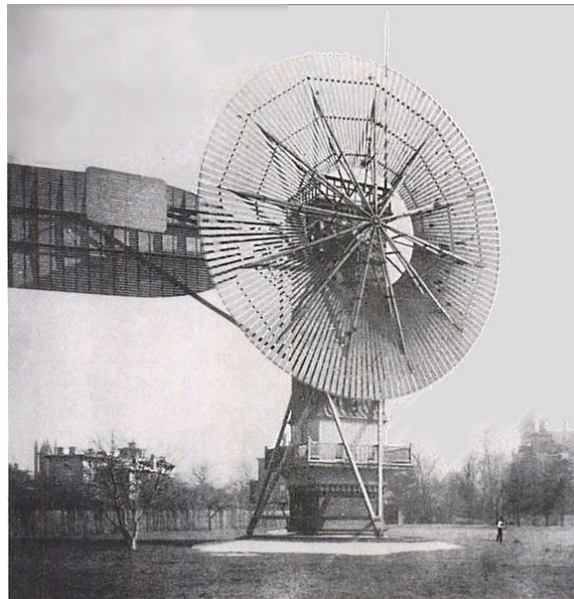


Figura 2.3: Primer aerogenerador de la història, creat per Charles F. Brush. [20]

ar. Fins a aquell moment el preu de l'energia elèctrica generada de forma eòlica era molt elevat i no sortia a compte. Però l'afany de trobar noves maneres d'aconseguir electricitat va empènyer els governs a crear programes d'investigació i de subvencions en energia eòlica.

Això va fer que en molt pocs anys el cost de producció de l'energia eòlica caigués a la meitat, fent-los rentables econòmicament i afavorint-ne el seu desplegament. També hi va ajudar que els grups ecologistes la considerin una de les fonts d'energia més econòmiques si hi son inclosos els costos externs com ara els danys al medi ambient.

L'inici dels generadors eòlics es remunta a l'estiu de 1888 quan Charles F. Brush (1849-1929), un dels fundadors de la companyia elèctrica americana, va construir un aparell que avui en dia es considera el primer generador eòlic. Com es pot veure a la figura 2.3, constava de cent quaranta-quatre pales i tenia un diàmetre de disset metres, molt més petit que els actuals però enorme per l'època. Però tot i aquestes mides només tenia una potència de dotze kilowatts de corrent continua i simplement alimentava una bateria que ell mateix tenia a casa. Va estar en funcionament al voltant de vint anys.

Però tot i haver construït el primer aerogenerador, a Charles F. Brush no se'l considera el pare de l'energia eòlica moderna. Aquest honor recau sobre Poul la Cour (1846-1908), un meteoròleg danès. La Cour va fundar la primera acadèmia per formar enginyers especialitzats en energia eòlica, així com també el primer diari que tractava exclusivament el tema eòlic. Els



seus aerogeneradors comercials es van instal·lar després de la primera guerra mundial com a conseqüència de l'escassetat de combustible. El seu primer prototip contava amb unes pales amb forats que deixaven passar part del vent i constituïen un innovador sistema de protecció contra els vents forts.

El físic alemany Albert Betz (1885-1968) va formular la llei de Betz, que estableix el màxim valor que es pot aprofitar de l'energia del vent. Aquest valor és del cinquanta-nou coma tres per cent. Avui en dia en la construcció d'aerogeneradors encara s'utilitza la seva teoria sobre la formació de les pales.

*Una turbina eòlica només pot convertir en energia mecànica un 59,26% de l'energia cinètica del vent que incideix sobre ella.*

Llei de Betz [8]

El 1941 l'enginyer americà Palmer Cosslett Putnam (1910-1986) va crear un aerogenerador de mil dos-cents cinquanta kilowatts, molt potent per l'època. Va funcionar uns quatre anys fins que va fallar per un problema amb el material. Això va fer veure que no existien materials en el mercat per a aquells aparells. L'evolució en els materials des de llavors ha arribat fins als materials compòsits que s'utilitzen actualment.

Ulrich W. Hüttner (1910-1990), va ser un enginyer alemany que construir el 1957 un aerogenerador que es considera com la primera pedra de l'època eòlica moderna.

Al mateix any 1957 Johannes Juul (1887-1969), un enginyer danès estudiant de Poul la Cour, va construir el primer aerogenerador de corrent alterna. Es pot veure a la figura 2.4.

## 2.3 Situació actual i futura

Actualment la millora de la tecnologia de materials i els processos de fabricació ha permès millorar el rendiment dels aerogeneradors i augmentar el seu diàmetre, permetent així que augmenti la potència que generen, ja que aquesta és proporcional a l'àrea que escombren les pales. També ha augmentat molt l'aprofitament de l'energia del vent, arribant fins a valors al voltant del vuitanta per cent del límit de Betz.

A la figura 2.5 es pot veure l'evolució que han patit els aerogeneradors.

També s'ha millorat en la ubicació dels aerogeneradors amb l'elaboració de mapes eòlics més precisos, com per exemple el de la figura 2.6, per establir quines zones ofereixen les condicions més òptimes per a la situació de parcs eòlics. A més, la major altura dels nous aerogeneradors fa que treballin més



Figura 2.4: Primer aerogenerador de corrent alterna, construït per Johannes Juul. [21]

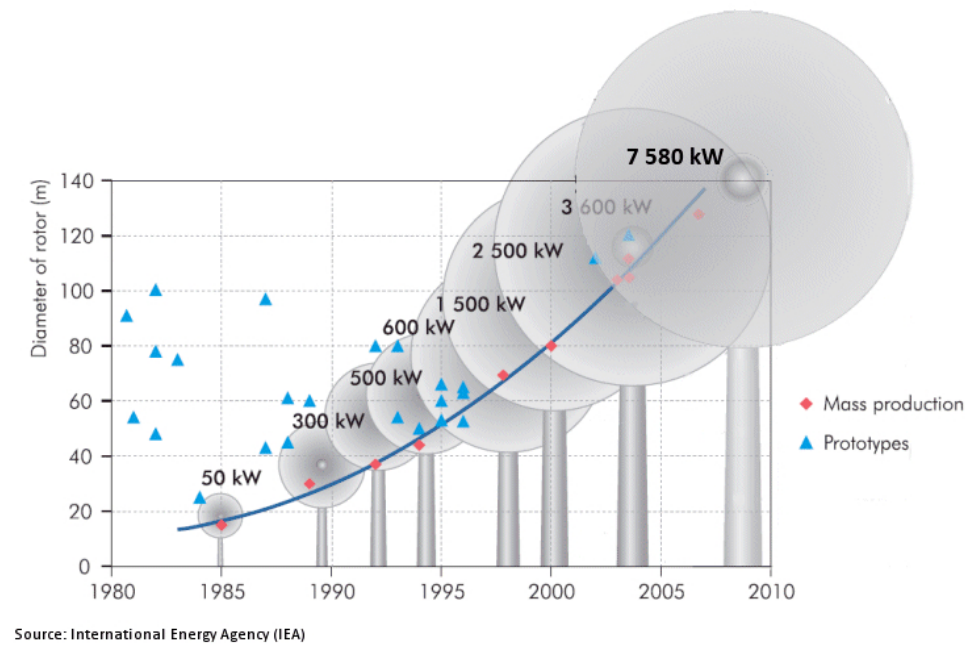


Figura 2.5: Evolució de diàmetre i potència dels aerogeneradors. [22]

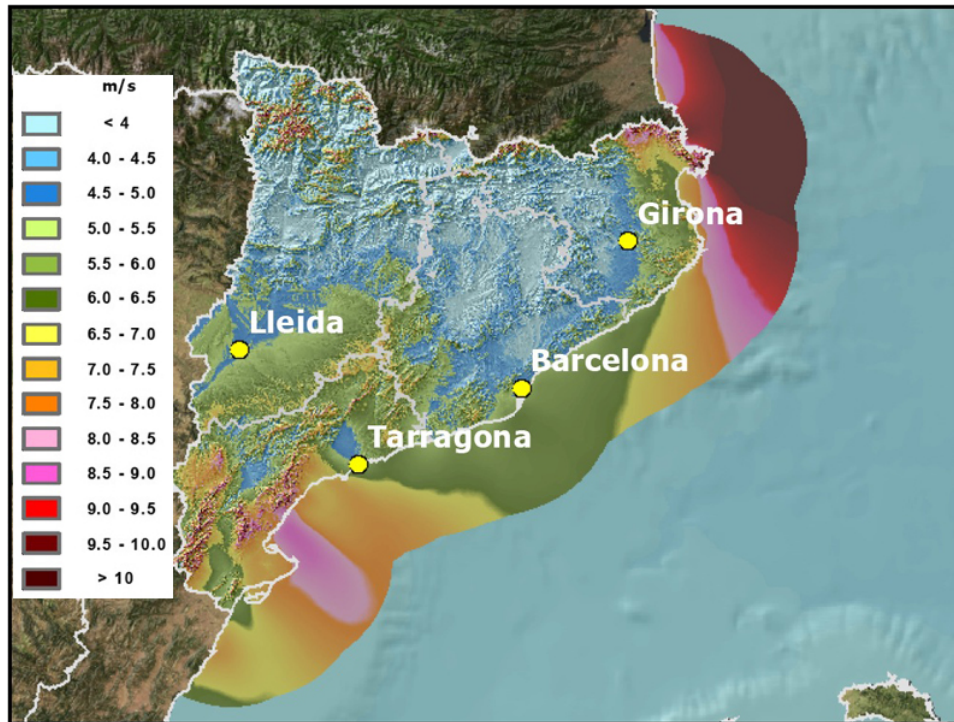


Figura 2.6: Mapa eòlic de Catalunya amb la velocitat mitjana estacional a la primavera a 80m d'alçada. [23]



Figura 2.7: Parc eòlic off shore a Dinamarca.[24]

### Cobertura de la demanda de energia elèctrica peninsular 2013

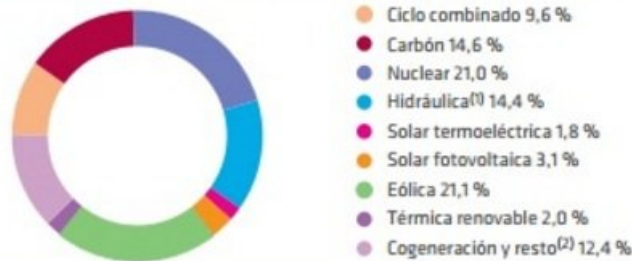


Figura 2.8: Procedència de l'energia elèctrica consumida a Espanya el 2013. [25]

lluny del terra, que és justament on el vent es veu afectat pels obstacles del terreny i perd velocitat i regularitat.

Una de les ubicacions que aquests mapes eòlics han determinat que és bona per situar aerogeneradors, és al mar, on no hi ha obstacles geogràfics per al vent i a més hi han zones on es manté acceptablement constant i a unes velocitats adequades per a la generació d'energia eòlica. Aquests parcs eòlics dins el mar, com el de la figura 2.7, s'anomenen off shore i són molt presents en llocs com Dinamarca o el Regne Unit. Aquest últim acapara actualment gairebé la meitat de la potència off shore instal·lada al món.

Tot això ha fet que la producció anual d'energia elèctrica procedent de l'eòlica hagi augmentat en els últims anys i continuï augmentant actualment. Com es pot veure al gràfic de la figura 2.8, a Espanya el passat 2013 va ser el primer any en que l'energia eòlica va liderar la producció d'energia per davant de la nuclear.

A la figura 2.9 es pot veure la potència dels aerogeneradors instal·lats a Espanya el passat any 2013. Queda de manifest com la majoria d'aerogeneradors instal·lats estan lluny de les potències vistes anteriorment. Per últim, a la figura 2.10 es pot veure com en potència instal·lada l'energia eòlica només és superada a Espanya per les centrals de cicle combinat.

A nivell mundial, com es mostra al gràfic de la figura 2.11, Espanya ocupava el quart lloc en potència eòlica instal·lada l'any 2012. Xina està instal·lant grans quantitats d'aerogeneradors, i per això s'ha situat en primer lloc de la llista, però si es mira la figura 2.12 es comprova que també està a la zona on es consumeix més de tot el planeta, i per tant en aquests moments el percentatge aportat per l'energia eòlica en el total d'energia elèctrica consumida al món encara és testimonial, com mostra la figura 2.13.

Pel que fa al futur, sembla que es pot ser optimista amb l'energia eòlica. Els governs finalment han entès, ja sigui realment o simplement per interès personal i polític, que cal afrontar els problemes mediambientals que es pro-

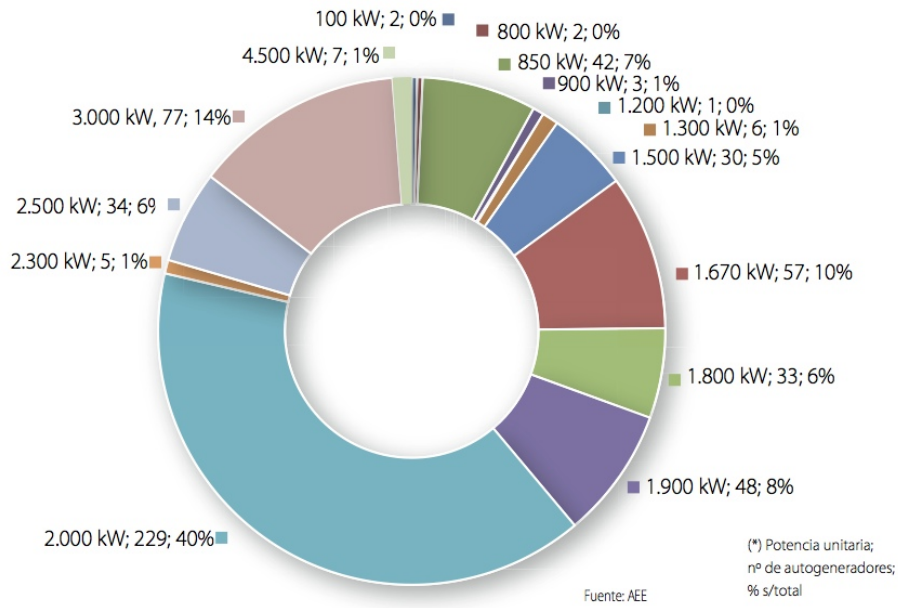


Figura 2.9: Potència dels aerogeneradors instal·lats a Espanya l'any 2013. [7]

**Tabla II.01. Potencia por tecnologías a 31/12/2012**

Tecnologías	Sistema peninsular (MW)	Sistemas extra-peninsulares (MW)	Total nacional (MW)	% sobre el total
Hidráulica	17.761	1	17.762	16,34%
Nuclear	7.853		7.853	7,22%
Carbón <sup>(1)</sup>	11.620	510	12.130	11,16%
Fuel/gas	1.492	2.909	4.401	4,05%
Ciclo Combinado	25.291	1.854	27.145	24,97%
<b>Total RÉGIMEN ORDINARIO</b>	<b>64.017</b>	<b>5.274</b>	<b>69.291</b>	<b>63,73%</b>
Hidráulica RE	2.039	0,5	2.040	1,88%
<b>Eólica</b>	<b>22.622</b>	<b>164</b>	<b>22.785</b>	<b>20,96%</b>
Solar fotovoltaica	4.186	224	4.410	4,06%
Solar termoeléctrica	1.878		1.878	1,73%
Térmica renovable	940	3	943	0,87%
Térmica no renovable	7.252	121	7.373	6,78%
<b>Total RÉGIMEN ESPECIAL</b>	<b>38.917</b>	<b>512</b>	<b>39.429</b>	<b>36,27%</b>
<b>TOTAL GENERAL</b>	<b>102.934</b>	<b>5.786</b>	<b>108.720</b>	<b>100%</b>

(1) A partir del 1 de enero 2011 incluye GICC (Elcogás)

Fuente: REE y AEE

Figura 2.10: Potència instal·lada per tipus d'energia a Espanya. [7]

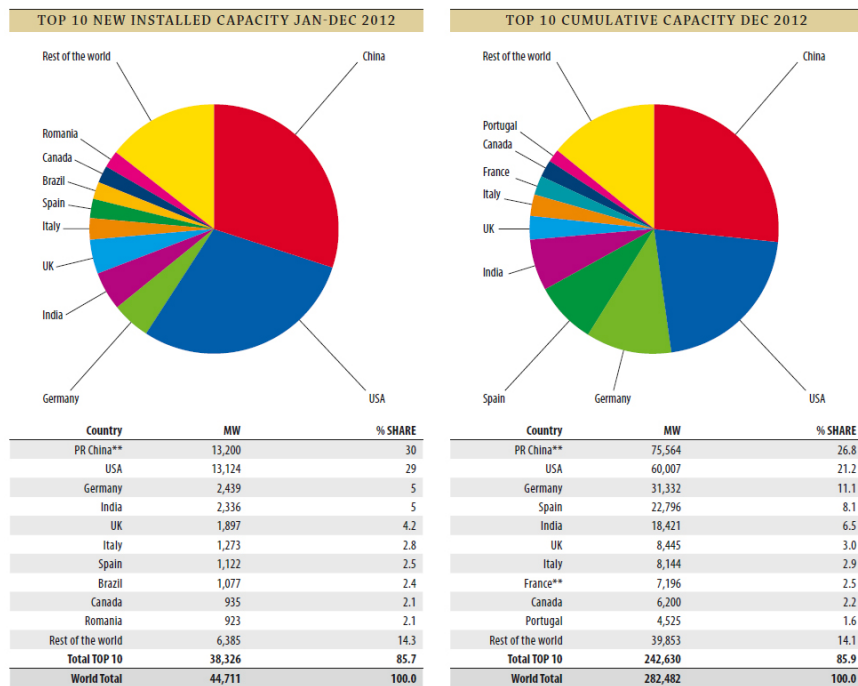


Figura 2.11: Potència eòlica instal·lada al món. [26]

dueixen al planeta. S'ha començat a reduir la quantitat de CO<sub>2</sub>, i caldrà fer-ho encara més en el futur. Això juntament amb el final de la vida útil de centrals elèctriques de mitjans del segle passat, pot portar a incrementar substancialment el pes de les energies renovables, i en especial de l'eòlica, en el sistema elèctric.

## 2.4 Els generadors minieòlics

Paral·lelament al creixement de la potència i dimensions del aerogeneradors eòlics, s'ha produït el fenomen oposat. Han aparegut aerogeneradors molt més petits per a ús domèstic i en zones aïllades.

Aquests generadors s'han anomenat minieòlics, i els més petits fins i tot microeòlics. Els minieòlics no superen els cent kilowatts.

Aquests minigeneradors permeten que zones apartades on no arriba la xarxa elèctrica no hagin de dependre únicament de generadors de combustible, habitualment diesel, per a generar-se electricitat. També en algunes zones s'estan instal·lant en cases particulars, juntament amb plaques solars tèrmiques i fotovoltaïques, per reduir la dependència de la xarxa i intentar minimitzar la generació de CO<sub>2</sub> de l'habitatge.

Degut a aquest augment de la consciència ecològica, han aparegut molts



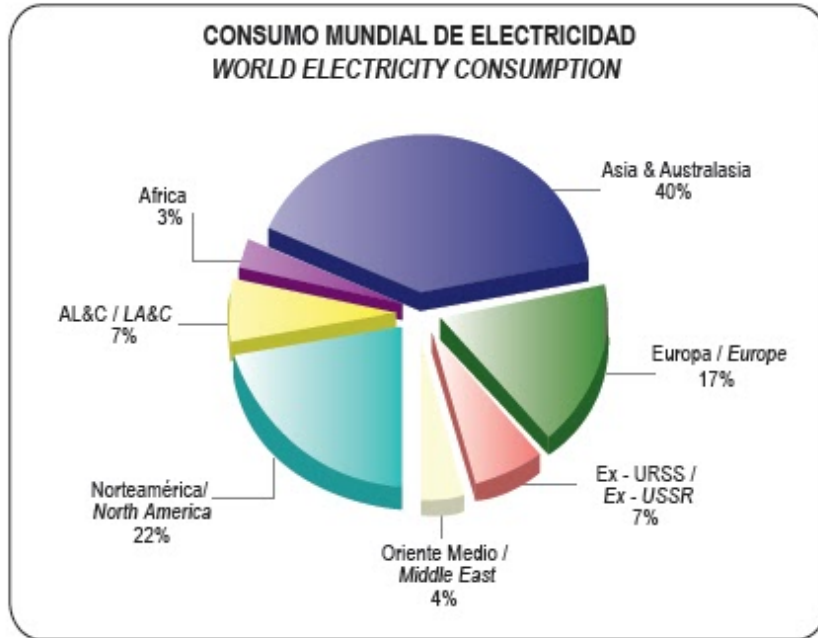


Figura 2.12: Consum d'energia mundial per zones geogràfiques. [27]

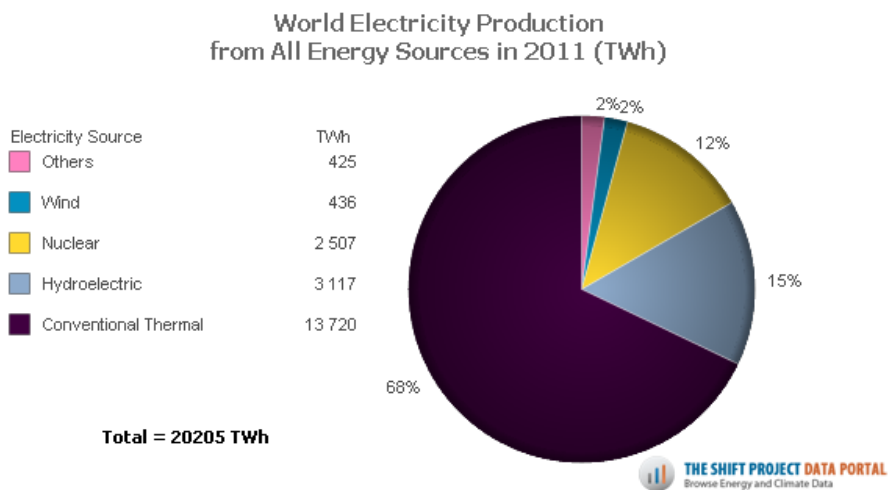


Figura 2.13: Producció mundial d'energia el ctrica per font de procedència. [28]



Figura 2.14: Generador minieòlic de 6,5kW a Oxford, Anglaterra. [20]

fabricants de generadors minieòlics, afavorint la diversitat de mides i potències per a totes les necessitats, així com també una baixada de preus que han permès que més gent es pugui plantejar la seva compra.

Anglaterra és un dels llocs on estan més estesos els generadors minieòlics, com el de la figura 2.14. A més han fet estudis demostrant que amb els preus actuals es pot aconseguir que el preu per kilowatt sigui competitiu respecte el de l'energia procedent de la xarxa elèctrica evitant de passada l'emissió de grans quantitats de CO<sub>2</sub> a l'atmosfera. L'Energy Saving Trust, un organisme depenent del govern britànic, ja fa anys que va dictaminar que cap a l'any 2050 la microgeneració podria suposar entre el 30 i el 40% de l'energia elèctrica necessària al Regne Unit.

A la universitat de Girona es disposa de dos generadors minieòlics. Un es troba al terrat de l'edifici P2 i esta en funcionament. Se'l pot veure a la figura 2.15.

Altrament, també es disposa d'un minigenerador encara més petit situat al laboratori d'energies. Aquest altre generador, el qual podem veure a la figura 2.16, s'utilitza a la universitat per fer pràctiques i altres experiments. Es troba muntat en una estructura que li fa de suport i a la mateixa altura que el ventilador que es fa servir per simular el vent. No te muntada la





Figura 2.15: Generador minieòlic al terrat de l'edifi P2 de l'escola politècnica superior.

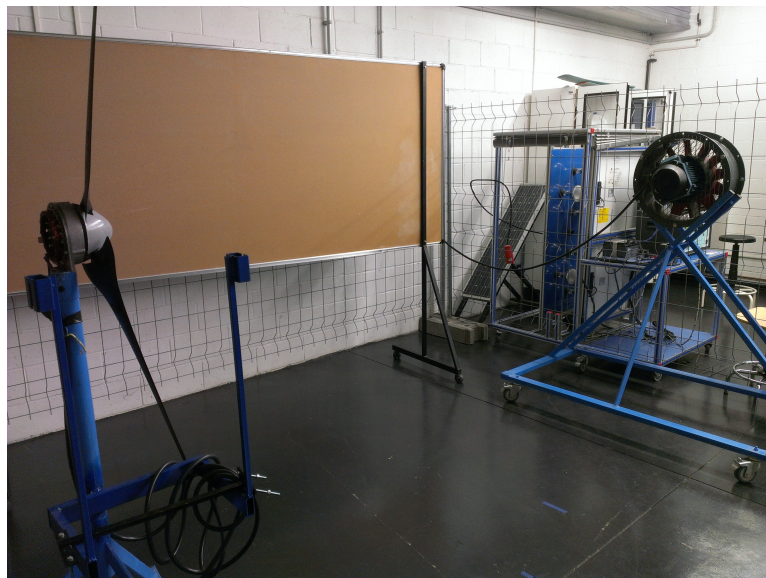


Figura 2.16: Minigenerador eòlic Air-X del laboratori d'energies de la UdG, muntat per fer experimentacions amb ell.

part posterior que conté la cua i l'alternador, però té un circuit amb un potenciòmetre connectat per poder simular diferents situacions de càrrega i així poder prendre les mesures que es consideri oportú. Aquest generador minieòlic més petit és el que s'utilitzarà per a aquest projecte.

## 2.5 Air-X SD2030

El generador minieòlic Air-X SD2030 de la casa Technosun, mostrat a la figura 2.17, és un generador de petites dimensions. Concretament algunes de les seves característiques són:

- Té un radi de cinc-cents vuitanta-dos centímetres.
- Perfil de la pala tipus SD2030.
- Sis kilograms de pes.
- Velocitat d'engegada de tres metres per segon.
- Amb vents forts (més de quinze metres per segon) un dispositiu electrònic redueix la velocitat fins a sis-centes revolucions per minut, reduint les càrregues sobre la turbina i l'estructura mentre encara segueix produint energia.
- Baix manteniment. Només consta de dues parts mòbils.
- Potència màxima segons el fabricant de cinc-cents quaranta-cinc watts.
- T.S.R. (Tip Speed Ratio en anglés) de vuit coma vuit. Aquest paràmetre indica la relació entre la velocitat a la punta de les pales i la velocitat del vent incident.

També es coneix la corba de potència del generador que proporciona el propi fabricant. Es pot veure a la figura 2.18. Les dues línies de la corba de potència es diferencien en el tipus de vent: si és de velocitat constant la corba que li correspon és la negra, mentre que si el vent bufa en ràfegues la potència obtinguda seguirà la corba verda.

Tenir aquesta corba de potència serà d'enorme utilitat per comparar-la amb la corba de potència resultant d'aquest projecte i poder comprovar quin nivell d'aproximació s'ha obtingut.



Figura 2.17: Aerogenerador minieòlic de la família Air-X. [30]

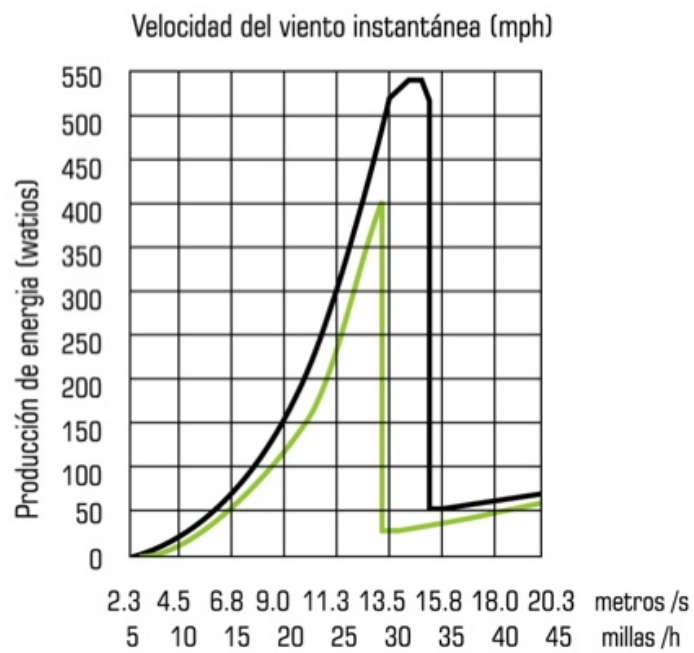


Figura 2.18: Corba de potència segons el propi fabricant de l'Air-X SD2030. [29]

## Capítol 3

# Descripció de la metodologia

En aquest capítol s'exposaran els passos seguits per a realitzar el projecte. Aquests passos s'estructuraran de forma que defineixin una metodologia aplicable en la resolució de casos similars.

Els passos a seguir seran:

- estimar les velocitats del vent que es simularan
- escollir un paràmetre lambda per a l'aerogenerador
- calcular les revolucions teòriques a que girarà
- calcular alguns límits de potència teòrics per tenir unes referències pels resultats que s'obtidran
- dibuixar la geometria del generador minieòlic amb ordinador
- fer el mallat d'aquesta geometria i de la canalització per on passarà l'aire
- fer els càlculs amb les condicions inicials i de contorn adequades

En aquest treball s'utilitzarà el programa Ansys per tot el procés de simulació per ordinador excepte en la creació de la geometria, on s'utilitzarà el Rhinoceros.

### 3.1 Estimació de les velocitats de simulació

El primer pas que cal fer es establir quines velocitats del vent s'utilitzaran per fer tots els passos.

La velocitat d'arrencada dels aerogeneradors és un paràmetre bastant típic i constant. Es sol situar cap als tres o quatre metres per segon de velocitat del vent. En aquest projecte es considerarà que és de quatre metres per segon. És un paràmetre poc determinant per els resultats, ja que la

$\lambda$	Nombre de pales
1	8 a 24
2	6 a 12
3	3 a 6
4	2 a 4
$\geq 5$	3, rarament 2 o 1

Taula 3.1: Valors típics de  $\lambda$  segons el nombre de pales de l'aerogenerador. [10]

màxima potència es donarà a les velocitats més altes. Únicament ens serveix per establir un valor on començar a calcular.

El paràmetre que si que influirà en els resultats és el de la velocitat màxima del vent. Els aerogeneradors de gran diàmetre actuals poden funcionar a velocitats de fins a vint-i-cinc o trenta metres per segon. No obstant, els generadors micro i minieòlics no funcionen a velocitats tan altes. Per una banda perquè en els llocs on es solen situar el vent sol ser més fluix, ja sigui per l'orografia o per l'altura molt inferior on es situen. Un altre motiu és que al tenir unes velocitats de rotació molt més altes que els aerogeneradors més grans, si es deixessin funcionar a velocitats del vent massa altes, es produirien esforços mecànics molt elevats i probablement apareixerien sorolls aerodinàmics.

Per tot això la velocitat màxima que s'utilitzarà en aquest projecte és de catorze metres per segon. En l'anàlisi de resultats i en la comparació amb la corba real ja es podrà veure si aquest valor és adequat o no, i es podran fer alguns càlculs addicionals o ignorar-ne alguns dels que es tinguin.

### 3.2 Elecció del paràmetre $\lambda$

El paràmetre  $\lambda$  (Lambda), també conegut com a TSR (Tip Speed Ratio), relaciona la velocitat de gir de la punta de la pala amb la velocitat del vent que esta incidint sobre la mateixa pala, considerant el nombre de pales que te.

Com ja s'ha comentat, i degut a la velocitat de rotació que assoleixen els aerogeneradors micro i minieòlics, es poden produir problemes acústics. Aquest és el motiu principal pel qual la definició del paràmetre  $\lambda$  es faci en relació a la velocitat de la punta de la pala i no directament amb la velocitat angular, ja que per una mateixa velocitat de rotació podem tenir diferents velocitats de la punta de la pala segons el diàmetre d'aquestes, i els problemes acústics apareixeran si aquesta velocitat de la punta de la pala supera uns determinats valors.

Com es pot veure a la taula 3.1, per un aerogenerador de tres pales

el valor de Lambda podria estar entre tres i cinc. No obstant, al indicar específicament tres pales en el valor cinc, aquest és que s'agafarà inicialment.

### 3.3 Càlcul de les velocitats de gir teòriques

La definició del paràmetre  $\lambda$  que s'acaba d'escollir és:

$$v_{punta} = \lambda \cdot v_{vent} \quad (3.1)$$

sabent que la velocitat de la punta de la pala està directament relacionada amb la de rotació:

$$\omega \cdot R = \lambda \cdot v_{vent} \quad (3.2)$$

cal passar la velocitat angular a radiants per segon:

$$\omega \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot R = \lambda \cdot v_{vent} \quad (3.3)$$

i finalment aïllant la velocitat angular i simplificant:

$$\omega = \frac{30 \cdot \lambda}{\pi \cdot R} \cdot v_{vent} \quad (3.4)$$

Amb aquesta fórmula es pot calcular la velocitat de rotació teòrica de l'aerogenerador. No coincidirà amb la que es produirà en la pràctica, però serveix com a valor de referència per iniciar les simulacions.

Els valors que s'obtenen es poden veure a la taula 3.2.

### 3.4 Càlcul dels límits de potència teòrics

Per últim, abans de començar a fer les simulacions es calcularan alguns límits teòrics de la potència màxima que es podria extreure de l'aerogenerador per poder tenir algunes referències de la validesa dels resultats durant els càlculs.

Primerament es calcularà la potència màxima que es podria obtenir segons Betz. Aquest càlcul ens dona la potència màxima que podríem generar

si l'aerogenerador fos capaç d'aprofitar la totalitat de l'energia que pot generar l'aire que passa per la zona que cobreixen les seves pales. Evidentment es pot deduir que, almenys actualment, no és possible extreure el cent per cent d'energia de l'aire, però és útil tenir aquesta dada perquè actuï com a límit superior de la potència, permetent descartar automàticament resultats que donessin massa elevats.

Es calcula com:

$$N_{Betz} = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot s \cdot V^3 \quad (3.5)$$

on:

- $\rho$  és la densitat de l'aire.
- $s$  correspon a la superfície que escombren les pales.
- $V$  és la velocitat del vent.

Però com ja s'ha dit, els aerogeneradors actuals encara no s'acosten als valors límit de potència que estableix Betz. Actualment per a màquines ràpides, com són els aerogeneradors i especialment els minieòlics, els valors de potència que es poden obtenir com a màxim serien de l'ordre del setanta per cent del límit de Betz.

El límit de potència per a aerogeneradors ràpids es calcula com:

$$N_{Ar} = 0,2 \cdot D^2 \cdot V^3 \quad (3.6)$$

on:

- $D$  correspon al diàmetre de l'aerogenerador.
- $V$  és la velocitat del vent.

Amb aquests dos valors de referència, que es poden veure a la taula 3.2, ja es té una estimació de per on poden sortir els resultats. A més, en el cas concret del generador minieòlic Air-X que s'estudia en aquest projecte, ja es pot deduir que els valors sortiran bastant per sota dels calculats per a aerogeneradors ràpids, ja que es tracta d'una màquina que no és de les més modernes i a més és un model de gamma mitja que no disposava dels màxims rendiments i innovacions de l'època en que es va dissenyar.

Sabent tot això ja es pot passar a la part de modelització i simulació informàtica per intentar obtenir les dades necessàries per crear una corba de potència teòrica de l'aerogenerador.

V vent (m/s)	Velocitat gir (RPM)	Límit Betz (W)	Límit Ar (W)
1	82,0	0,4	0,3
2	164,1	3,0	2,2
3	246,1	10,0	7,3
4	328,2	23,7	17,3
5	410,2	46,4	33,9
6	492,2	80,1	58,5
7	574,3	127,3	92,9
8	656,3	190,0	138,7
9	738,3	270,5	197,5
10	820,4	371,1	271,0
11	902,4	493,9	360,7
12	984,5	641,2	468,3
13	1066,5	815,2	595,3
14	1148,5	1018,2	743,6
15	1230,6	1252,3	914,6
16	1312,6	1519,8	1109,9
17	1394,7	1823,0	1331,3
18	1476,7	2164,0	1580,4
19	1558,7	2545,1	1858,6
20	1640,8	2968,4	2167,8
21	1722,8	3436,3	2509,5
22	1804,8	3951,0	2885,4
23	1886,9	4514,6	3297,0
24	1968,9	5129,4	3746,0
25	2051,0	5797,7	4234,0
26	2133,0	6251,6	4762,7
27	2215,0	7303,4	5333,7
28	2297,1	8145,3	5948,5
29	2379,1	9049,6	6608,9
30	2461,2	10018,4	7316,4

Taula 3.2: Velocitat de gir teòrica, potència màxima segons el límit de Betz i potència màxima per aerogeneradors ràpids per a cada velocitat del vent.



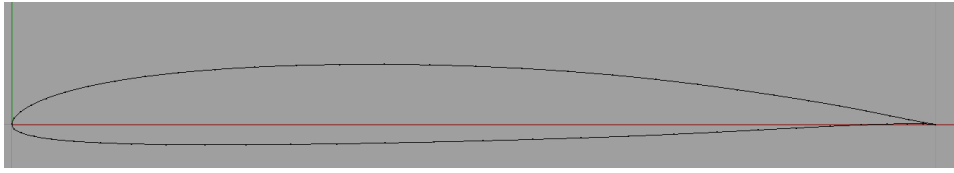


Figura 3.1: Perfil de l'ala de l'aerogenerador Air-X SD2030.

### 3.5 Creació de la geometria

El primer pas del procés consisteix en crear un model per ordinador de l'aerogenerador per a poder-lo utilitzar en la simulació. Per a fer-ho s'utilitzarà el programa Rhinoceros, de disseny 3D i que permet treballar amb superfícies molt còmodament. Altres programes com ara Solidworks treballen més bé amb sòlids, però la geometria de la pala de l'aerogenerador, especialment a la zona on s'uneix amb l'eix, fa més recomanable utilitzar el Rhinoceros.

No obstant, qualsevol programa de disseny 3D permet gravar la feina feta amb uns formats estàndards com ara .igs .acis o .stp, que és possible obrir amb qualsevol programa, inclòs l'Ansys. De fet, el mateix Ansys inclou un mòdul per crear els dissenys de les geometries que es volen simular, però és bastant bàsic i només serveix per a coses senzilles.

Un cop escollit el programa amb el que es farà la geometria, es comença el procés carregant l'arxiu de punts que defineix la pala que ha estat proporcionat a la universitat per altres investigadors. Tenir aquest arxiu simplifica molt la feina en aquest punt. Si no es tingués, s'hauria de fer les mesures corresponents a la pala per obtenir la forma del perfil. El resultat es pot veure a la figura 3.1

Després cal posicionar aquest perfil a l'altura corresponent, amb l'angle adequat i amb la mida de corda que li toca. Per a fer això s'utilitza la taula que la universitat de Girona va rebre juntament amb el llistat de punts que defineix el perfil de l'ala, i que podem veure a la figura 3.2.

L'inici del procés de construcció de la pala es pot veure a la figura 3.3.

Finalment a la figura 3.4 es pot veure la pala amb totes les seccions i un renderitzat per comprovar com es veuen les unions.

La construcció de l'eix ha estat una mica més complicada ja que no es disposaven de dades sobre la seva forma. Per fer-ho s'ha utilitzat la foto que es pot veure a la figura 3.5 per a estimar una funció que pogués generar aquesta forma al fer-la girar sobre un eix. El resultat de l'eix tal com es veu a les figures 3.3 o 3.4 s'ha aconseguit amb un polinomi senzill de grau tres.

La part més difícil de tota la geometria ha estat sens dubte la unió de la pala amb l'eix. No es disposava de cap dada sobre aquesta part i ha calgut construir-la a partir de fotos i mirant el generador minieòlic per intentar aproximar-la el millor que es pogués.

coning angle	0	°	sta- tion	distance from		element	Re.10 <sup>-2</sup>	chord		inco- ming	pitch	attack		
				apex	tip	speed		mm	norm.	°				
				ratio	m			m.s <sup>-1</sup>						
rotor radius	0,582		1	0,05	0,029	0,553	5,50	294	32,5	0,0558	66,3	0,00	66,3	hub
hub radius	0,067	m	2	0,15	0,087	0,495	16,50	1556	113,5	0,1950	37,1	19,37	17,8	airfoil
airfoil length	0,515		3	0,25	0,146	0,437	27,50	1610	80,5	0,1383	24,4	13,15	11,3	
RPM	1804,8	min <sup>-1</sup>	4	0,35	0,204	0,378	38,50	1549	57,8	0,0993	18,0	8,62	9,4	
T.S.R	8,8		5	0,45	0,262	0,320	49,50	1532	45,3	0,0778	14,2	5,93	8,2	
V <sub>w</sub>	12,5	m.s <sup>-1</sup>	6	0,55	0,320	0,262	60,50	1506	36,8	0,0632	11,7	4,21	7,5	
stations	10		7	0,65	0,378	0,204	71,50	1505	31,3	0,0538	9,9	3,24	6,7	
station length	58,2	mm	8	0,75	0,437	0,146	82,50	1486	26,9	0,0462	8,6	2,21	6,4	
blade area	2,53	dm <sup>2</sup>	9	0,85	0,495	0,087	93,50	1424	22,8	0,0392	7,6	1,61	6,0	
solidity	7,13	%	10	0,95	0,553	0,029	104,50	1387	19,9	0,0342	6,8	0,66	6,2	

Figura 3.2: Dades geomètriques de la pala. En blau l'altura de la secció, la mida d'aquesta i l'angle.

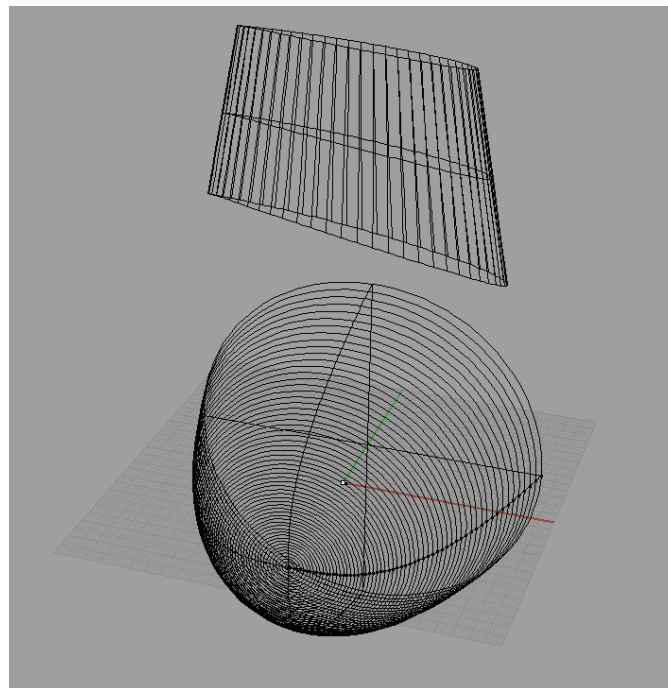


Figura 3.3: Inici del posicionament de les seccions per a la construcció de la pala.

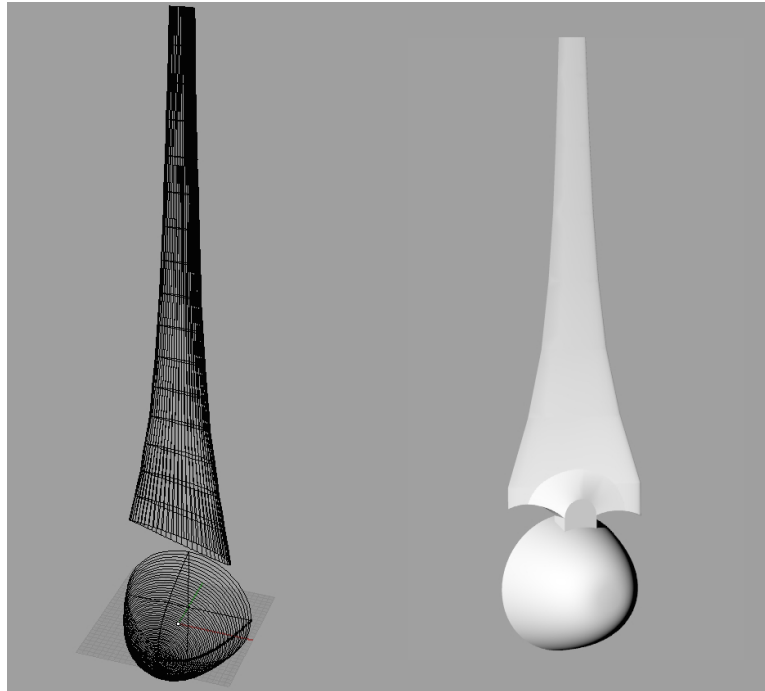


Figura 3.4: Pala amb totes les seccions i renderitzat de la pala amb l'eix i la seva unió.

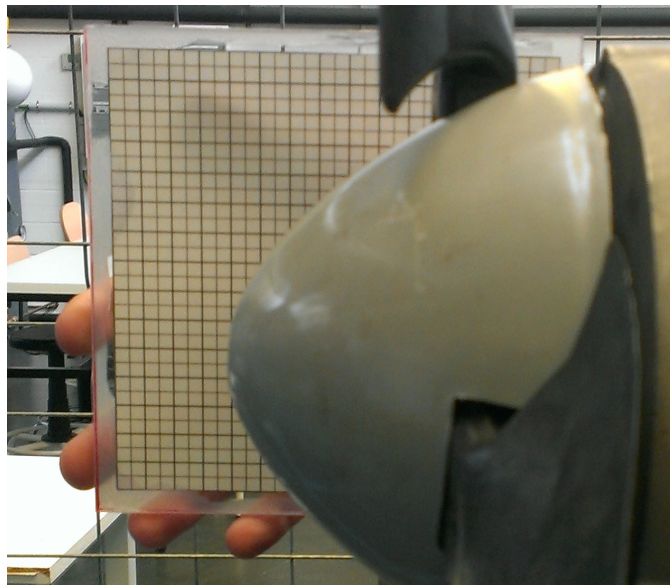


Figura 3.5: Foto de l'eix amb una quadricula per treure'n una corba generatriu.

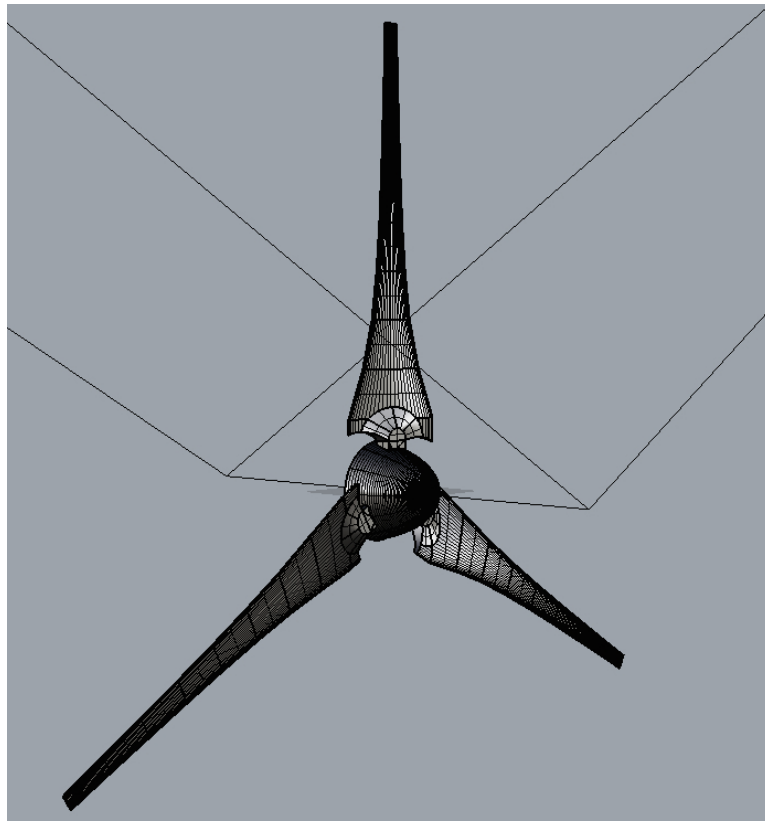


Figura 3.6: Imatge del model amb les 3 pales.

Un cop dibuixada una pala es poden dibuixar les altres dues amb una simple operació de simetria amb el Rhino. El resultat final el podem veure a la figura 3.6.

Amb les pales ja acabades només ens queda dibuixar el canal per on passarà l'aire durant la simulació. Segons la figura 3.7 extreta d'un document del Centro Nacional de Energías Renovables (CENER) podem veure com ens cal crear tres cossos, un per a l'entrada d'aire, un per a la sortida i un altre de central que contingui l'aerogenerador. Les mides van referides al radi de l'aerogenerador que en aquest cas serà de cinc-cents vuitanta-dos centímetres, tal com s'ha vist a la figura 3.2.

Totes aquestes diferents parts es poden dibuixar independentment i després passar l'arxiu per a cadascuna a l'Ansys i des d'allà restar booleanament les pales al cilindre central per obtenir un cos com el que es veu a la figura 3.8.

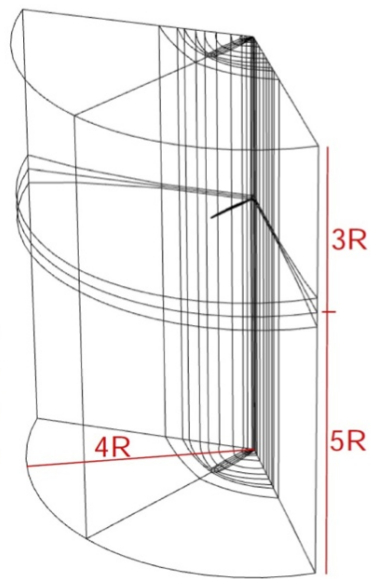


Figura 3.7: Mides del canal de circulació d'aire segons el Centro Nacional de Energías Renovables. [9]

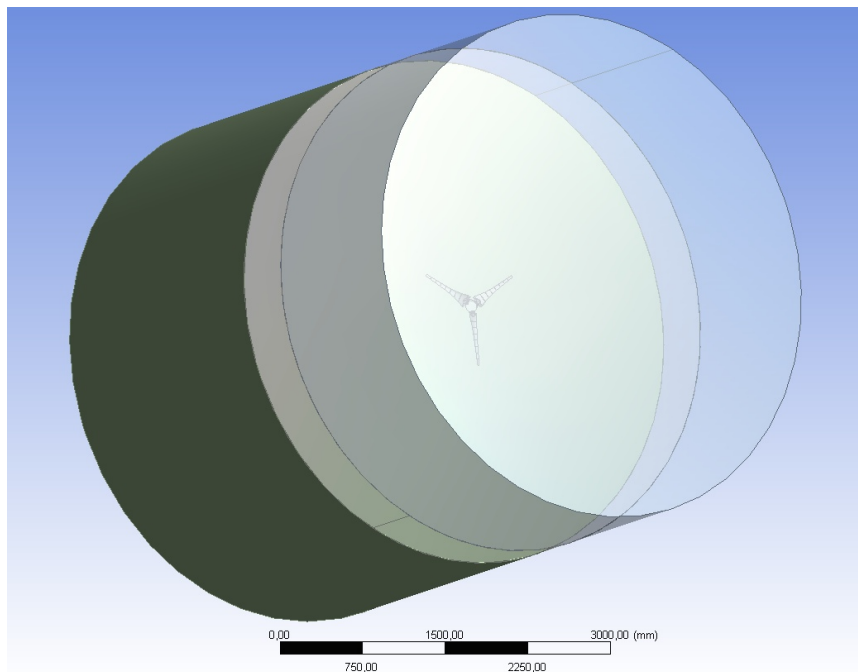


Figura 3.8: Els 3 cossos de la geometria un cop importats a l'Ansys.

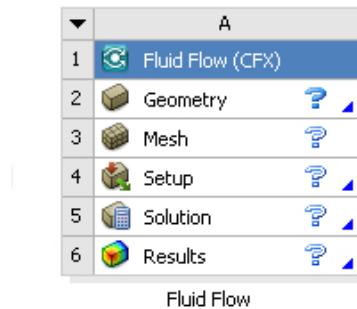


Figura 3.9: Mòdul Fluid Flow (CFX) utilitzat en el Workbench per a la simulació.

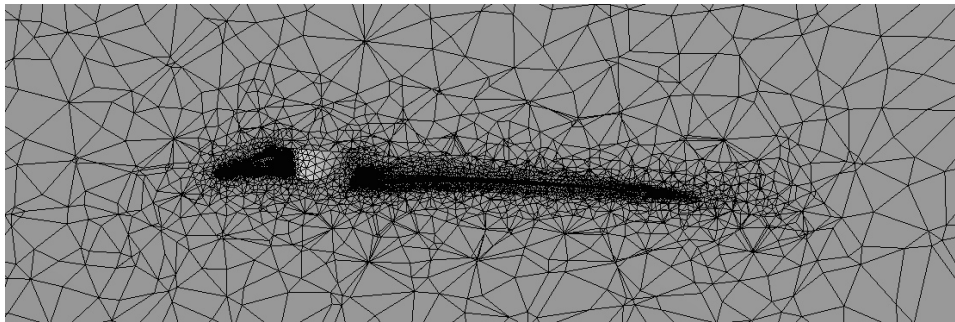


Figura 3.10: Refinament del mallat al voltant de la pala.

### 3.6 Mallat del model

Dins del programa Ansys s'utilitzarà l'eina Workbench amb el mòdul Fluid Flow (CFX) que es veu a la figura 3.9, que ja inclou tots els passos que es necessiten anar completant per a la realització d'aquesta simulació.

Un cop completada i importada correctament la geometria dins l'Ansys, es pot procedir a fer el mallat. Com que el que es voldrà calcular al final és el parell generat per l'aerogenerador, caldrà definir el més precís possible la zona del seu voltant perquè el mallat defineixi bé el contorn de la pala i la simulació sigui el més exacte possible.

Per aconseguir això es realitzen dos refinaments a la zona de la pala per aconseguir un mallat més fi en aquesta zona. El primer al voltant de totes les cares que componen la pala, i el segon a l'aresta que compona el cantell d'atac de la pala, ja que és la zona on s'han de produir les pressions més grans degudes al moviment de l'aerogenerador. Els resultats es poden veure a les figures 3.10, 3.11 i 3.12.

A la resta del cos central el mallat va creixent segons el factor de crei-

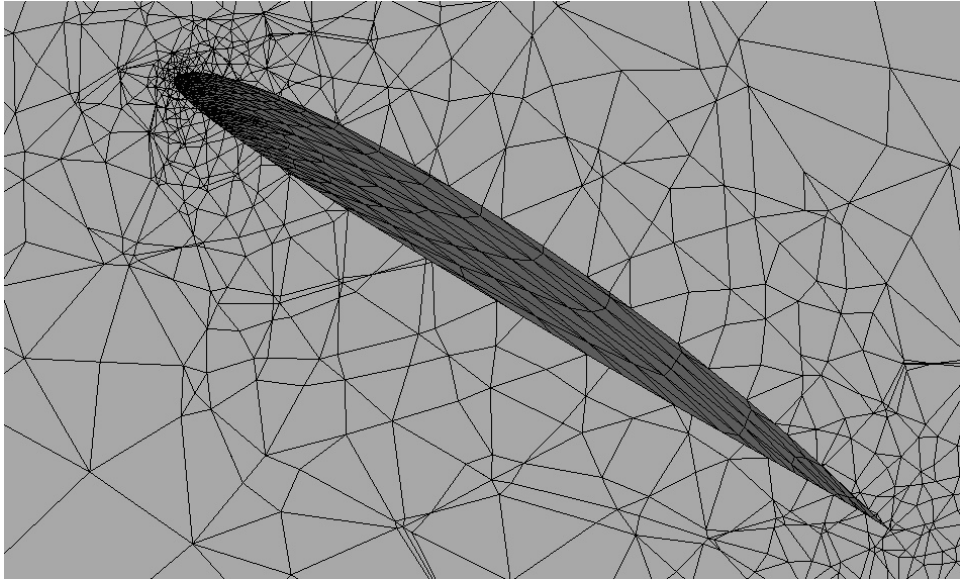


Figura 3.11: Detall del mallat on es veu el refinament aplicat al cantell d'atac del perfil de l'ala.

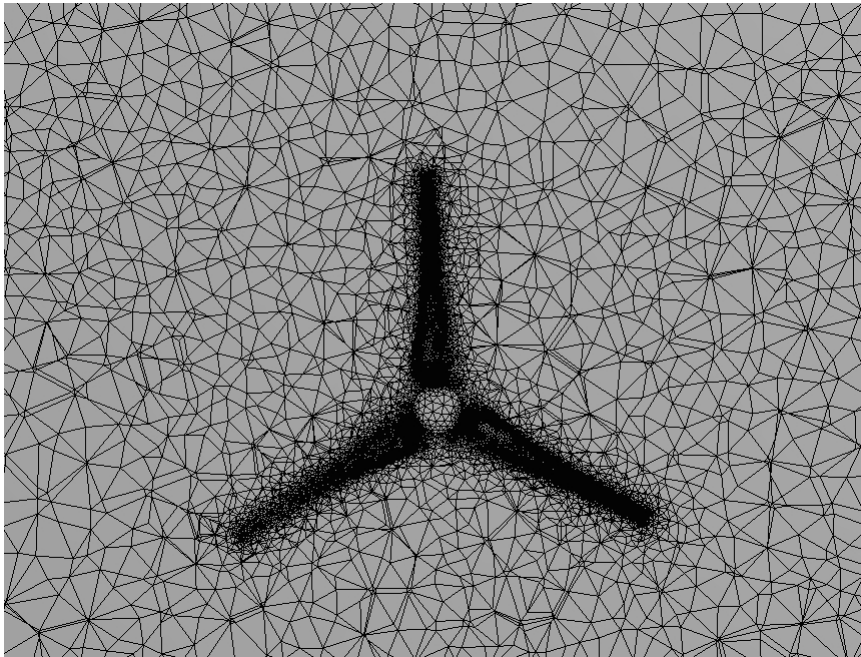


Figura 3.12: Detall del refinament del mallat com més a prop de les pales es troba.



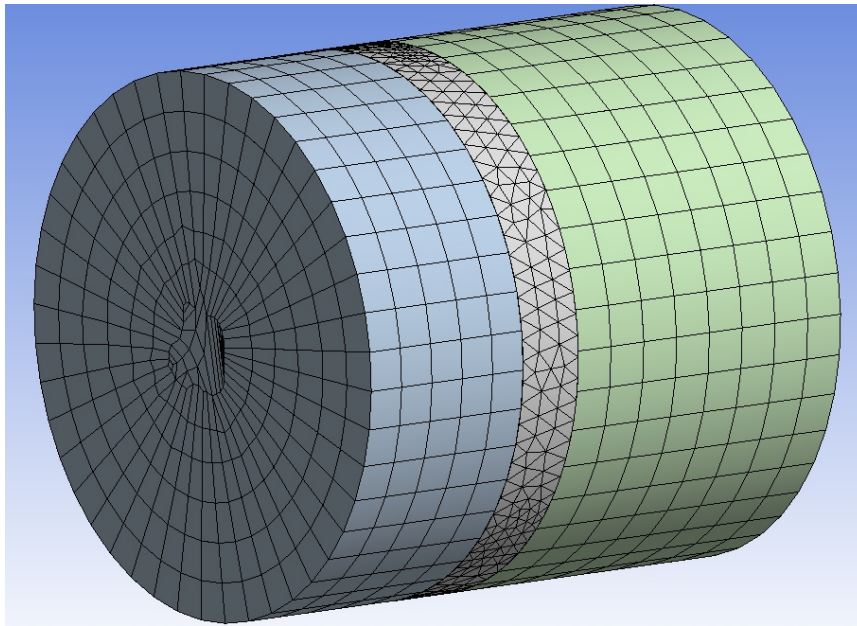


Figura 3.13: Els 3 cossos de la geometria mallats.

xement i la mida màxima dels elements que se li ha indicat. Als dos cossos restants hi fem un mallat més bast ja que en aquestes simulacions els resultats es centraran en la pala. Aquests elements més grans permetran reduir-ne el nombre en aquests dos cossos i poder així centrar el mallat i el càlcul al cos central. Si es volgués analitzar, per exemple, les pertorbacions creades per l'aerogenerador un cop en vent ha passat a través seu, si que caldria fer un mallat més fi al cos posterior.

Aconseguir un mallat acceptable que representés suficientment les pales no ha estat fàcil degut a les limitacions de la llicència acadèmica de l'Ansys de la que disposa la UdG. Aquesta llicència acadèmica té un límit de cinc-cents dotze mil nodes, i en aquesta simulació s'hi arribava fàcilment. Això ha fet que l'elecció de les mides mínimes i màximes dels elements, així com el factor de creixement i els refinaments no s'hagin fet amb criteris per obtenir el millor resultat possible, sinó buscant un resultat acceptable amb els requisits que es tenien. No obstant, cal dir que, al final i un cop vistos els resultats, el mallat que s'ha fet sembla que ha reflectit correctament les zones més delicades.

Al final s'ha aconseguit fer el mallat, mostrat a la figura 3.13, amb un total de cinc-cents deu mil sis-cents seixanta-vuit nodes i dos milions sis-cents quaranta-quatre mil quatre-cents noranta-cinc elements.



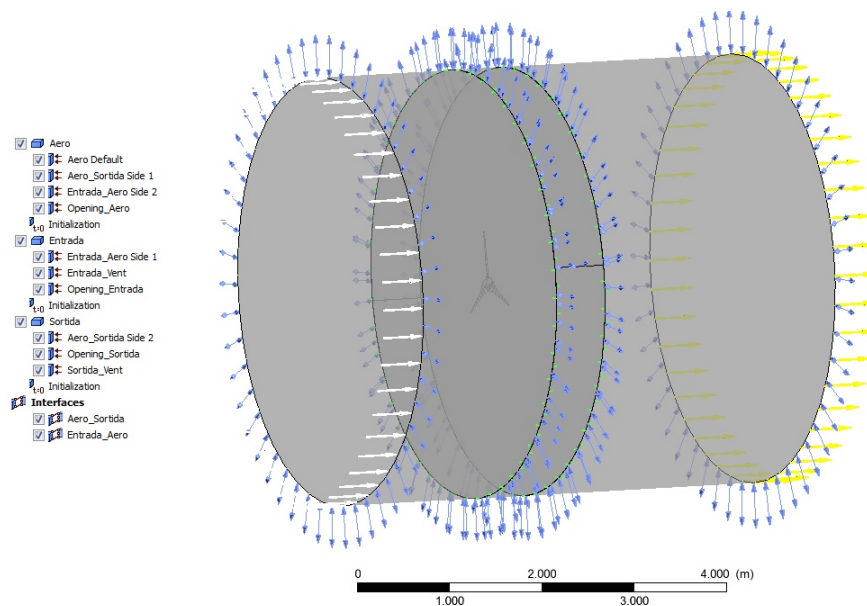


Figura 3.14: Condicions de contorn per a la simulació.

### 3.7 Preparació de les simulacions

L'últim pas abans de poder fer la simulació i comprovar si els resultats són els esperats, és definir les condicions en que es durà a terme aquesta simulació.

Primerament cal indicar-li a l'Ansys les relacions que hi ha entre els tres cossos que li hem mallat. Com es pot veure a la figura 3.14 cal definir totes les cares de tots els cossos. Al cos d'entrada se l'hi defineix la cara per on entrarà el vent a la simulació (marcada amb les fletxes blanques), el comportament de la paret corbada exterior (que es defineix com un opening ja que el vent pot entrar i sortir lliurement) i el tipus d'interfície que hi ha amb el cos central. El cos de sortida és el mateix excepte que cal marcar-li una sortida d'aire (marcada amb les fletxes grogues) en lloc d'una entrada.

Pel que fa al cos central, que és el més complex, cal definir-li el comportament de la paret corbada amb un opening com als altres dos. A més cal indicar-li que les pales giren i dir-li la velocitat de gir, i també la rugositat que tenen. Aquesta rugositat s'ha estimat en una coma cinc micres segons la taula 3.3.

Per accelerar el procés de càlcul li definirem a cada cos una velocitat del vent inicial igual a la que entra per la cara corresponent del cos d'entrada. Així des de la primera iteració el model ja estarà amb el vent circulant en la seva totalitat.

Un cop definides les condicions de contorn cal definir les condicions de la pròpia simulació. Ansys permet dos tipus de simulació en casos com aquest,

Material	Rugositat absoluta, $\varepsilon$ (mm)
Plàstic (PE,PVC)	0,0015
Polièster reforçat amb fibra de vidre	0,01
Tubs estirats d'acer	0,0024
Tubs de llautó o coure	0,0015
Fundició revestida de ciment	0,0024
Fundició amb revestiment bituminós	0,0024
Fundició centrifugada	0,003
Fundició asfaltada	0,06-0,18
Fundició	0,12-0,60
Acer comercial i soldat	0,03-0,09
Ferro forjat	0,03-0,09
Ferro galvanitzat	0,06-0,24
Fusta	0,18-0,90
Formigó	0,3-3

Taula 3.3: Rugositat absoluta de diferents materials. [12]

en estat estacionari o en transitori. En els dos casos permet que el cos central giri, però en un cas com aquest la simulació en transitori sembla més adequada, ja que les propietats del fluid no es mantenen constants en tots els punts de càlcul al llarg del temps, sinó que varien un funció de la posició que ocupa la pala en cada moment. No obstant, cal dir que requereix de moltíssim més temps de simulació.

En les simulacions en transitori, cal definir el paràmetre Timestep, que indica el temps que passa entre una iteració i la següent. Per aconseguir que els salts entre cada iteració siguin acceptablement petits, i per tant assegurar una millor validesa i convergència dels càlculs, s'ha decidit posar-hi un temps que equivalgui a un grau girat per les pales. Concretament, per a les diferents velocitats de simulació aquests temps corresponents a un gir de un grau, i per tant, al paràmetre Timestep, es calcularien com:

$$timestep = \frac{1}{\omega \cdot 6} \quad (3.7)$$

on  $\omega$  correspon a la velocitat angular de l'aerogenerador en aquella simulació.

Com que l'objectiu d'aquest projecte és trobar la corba de potència de l'aerogenerador, caldrà fer varies simulacions amb diferents velocitats del vent, i per a cadascuna d'aquestes velocitats del vent caldrà fer varies velocitats de rotació. Aquestes velocitats ja han estat justificades als apartats 3.1 i 3.3, i finalment s'ha decidit fer simulacions a les velocitats de vent i de gir que es

V vent (m/s)	Velocitat gir mínima (RPM)	Velocitat gir màxima (RPM)
4	250	600
6	350	700
8	500	1000
9	500	900
10	600	1400
11	650	1100
12	650	1150
14	700	1650

Taula 3.4: Velocitats de vent simulades i velocitats de gir mínimes i màximes per a cadascuna. Els intervals entre simulacions han estat de 50rpm en pràcticament tots els casos.

mostren a la taula 3.4. L'interval entre velocitats de gir entre simulacions ha estat de cinquanta revolucions per minut. Els resultats complets de totes les simulacions es poden veure a l'apèndix A en forma de taula i al B en forma de gràfic per a cadascuna de les velocitats.

Un cop fet això per a cada velocitat del vent, es podrà traçar una corba amb les potències per a cada velocitat de gir i mirar quina serà la màxima per a aquella velocitat. Després agafant tots els valors màxims de potència juntament amb la velocitat del vent a que es produeixen es podrà dibuixar la corba de potència de l'aerogenerador obtinguda únicament amb simulació informàtica, que és l'objectiu d'aquest projecte.

Ja només quedarà analitzar si aquesta corba que s'ha obtingut és coherent amb el que s'esperava i comparar-la amb la real proporcionada pel fabricant per comprovar la validesa de la metodologia aplicada.

## Capítol 4

# Resultats

Un cop obtinguts els resultats de les simulacions, cal tractar les dades i comprovar si els resultats obtinguts es corresponen amb els esperats.

Els passos a seguir seran: comprovar la validesa i coherència dels resultats obtinguts, tractar les dades per obtenir una corba de potència teòrica i, per últim, comparar aquesta corba amb la real.

### 4.1 Anàlisi dels resultats de les simulacions

El primer que cal mirar en les simulacions per poder donar-les per vàlides és el comportament que té la pala i l'aire al seu voltant.

Respecte a l'aire al voltant de la pala, a la figura 4.1 es pot veure les diferents àrees de pressió al voltant de la pala, que són el que es podia esperar d'un cas com es que s'està treballant, amb pressions altes a la zona frontal on impacta el vent i amb una zona de pressió relativa negativa al darrera.

Pel que fa a les pressions sobre les pròpies pales, a la figura 4.2 es pot veure com la pressió a la part posterior és negativa, i a la figura 4.3 com al davant les pressions es concentren a la zona del cantell d'atac, que és el comportament lògic i que s'espera d'un aerogenerador.

Una altra comprovació que es pot fer és mirar la distribució de velocitats a l'entrada del cos on està situat l'aerogenerador per comprovar que les canalitzacions d'aire creades són adequades. A la figura 4.4 es pot veure com les velocitats són correctes.

Un cop fetes aquestes comprovacions i donats els resultats per bons, es pot procedir a calcular el parell que ha generat l'aire sobre les pales. Per a fer això només cal anar a l'apartat de funcions del programa de resultats de l'Ansys i indicar-li que es vol calcular un parell, sobre quin eix el volem i sobre quines superfícies. En el cas concret d'aquest projecte ja es té una superfície que són únicament les pales, i l'eix sobre el que gira l'aerogenerador és l'eix Y.

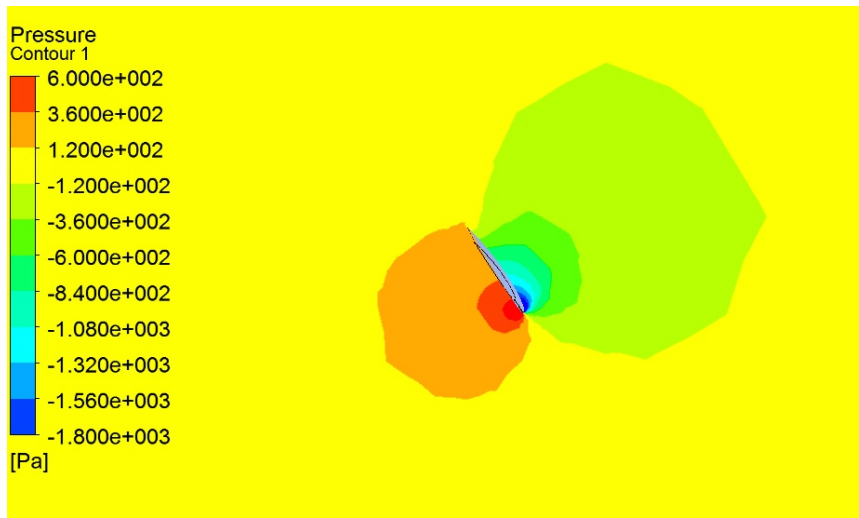


Figura 4.1: Pressions de l'aire a la zona pròxima a la pala de l'aerogenerador.

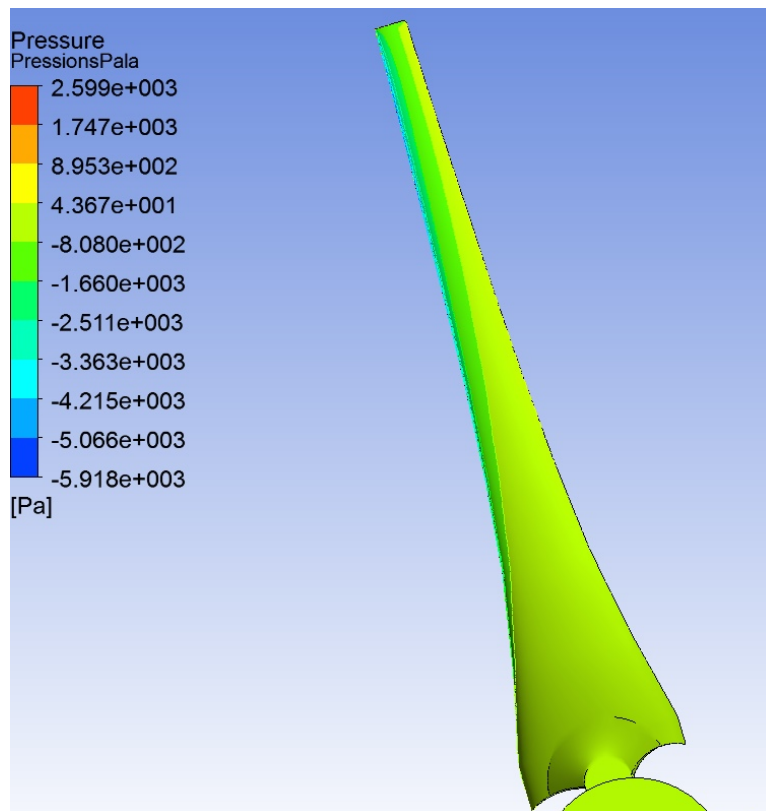


Figura 4.2: Pressions a la part posterior de les pales.

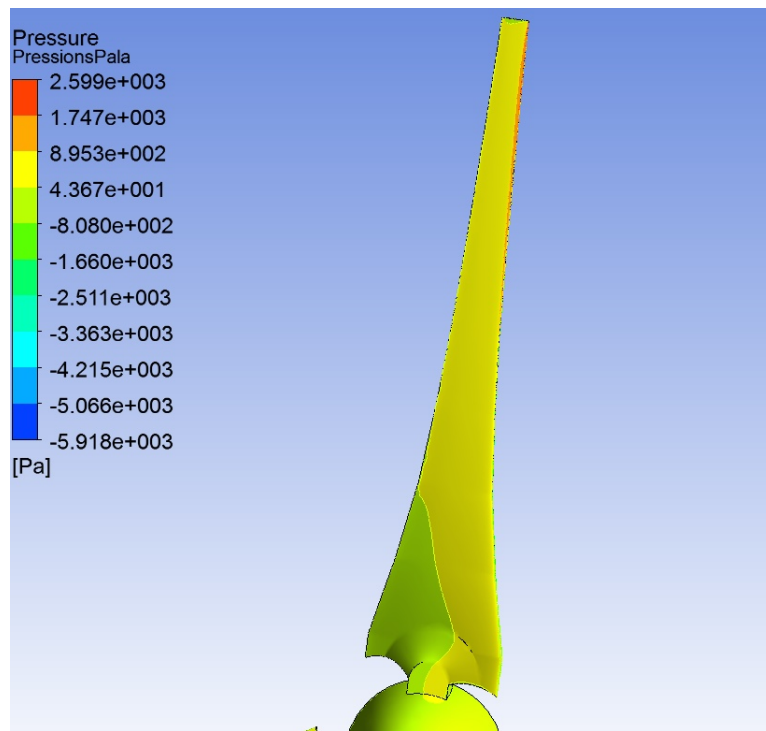


Figura 4.3: Pressions de la part frontal de les pales.

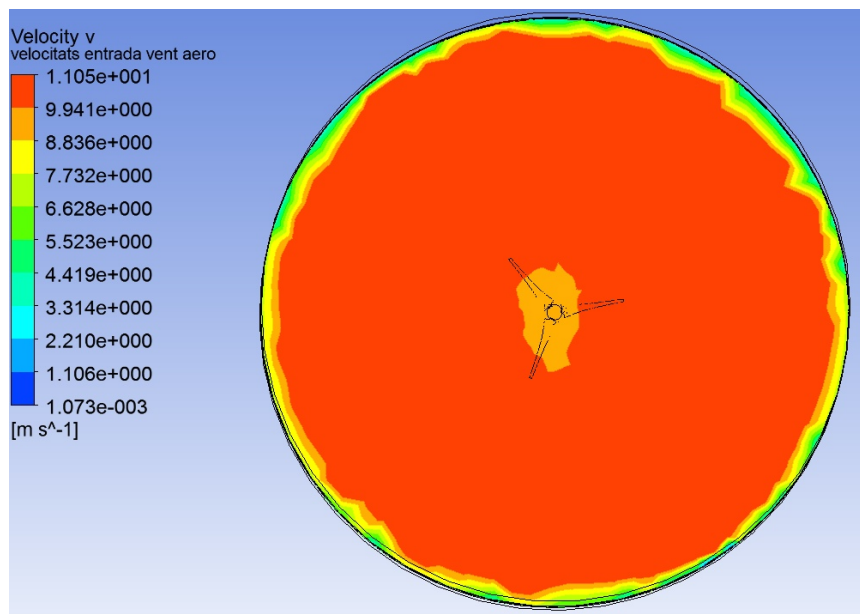


Figura 4.4: Distribució de velocitats que rep l'aerogenerador a la seva entrada.

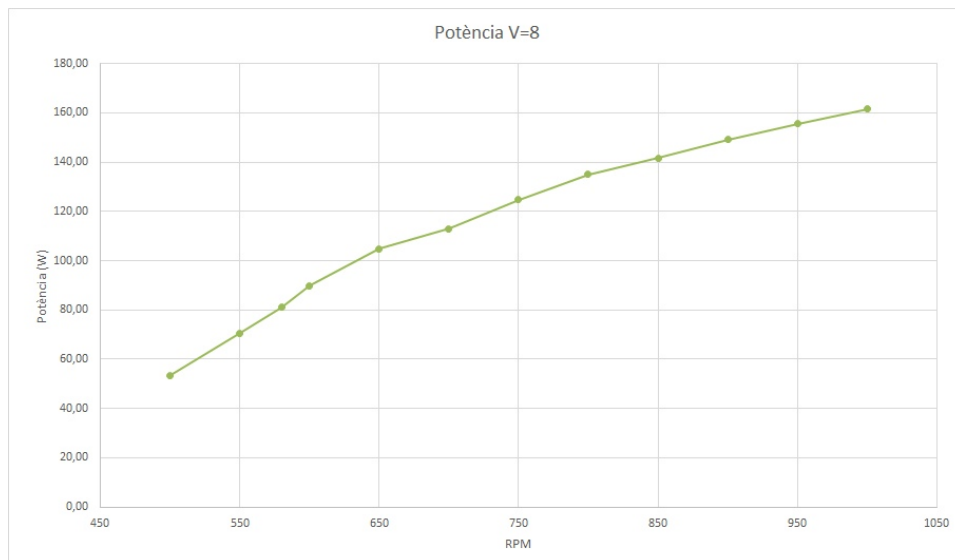


Figura 4.5: Corba obtinguda per una velocitat del vent de 8 metres per segon.

El que s'esperaria obtenir per a cada velocitat del vent simulada és una corba amb un màxim que indicaria clarament en quina velocitat de gir obtenim la màxima potència per a aquella velocitat. No obstant, els resultats que s'han obtingut són de la forma que es pot veure a la figura 4.5.

Es veu com la potència va sempre en augment al anar augmentant la velocitat. Tot i això, a partir d'un cert punt hi ha un canvi de pendent, en concret una disminució del mateix. Aquest punt en algunes velocitats, com per exemple al gràfic corresponent a vuit metres per segon de la figura 4.5 fins i tot va acompanyat d'una petita oscil·lació. La interpretació que es pot fer d'aquest canvi de pendent és que les pales estan perdent eficàcia aerodinàmica perquè es produeix un desprendiment de la capa límit que provoca la formació de remolins darrera la pala disminuint el seu rendiment. A la figura 4.6 es pot veure el perfil de l'aerogenerador funcionant correctament, amb les línies de corrent de l'aire rodejant-lo seguint la seva forma aerodinàmica. En canvi, a la figura 4.7 es pot veure el perfil amb un remolí format a la seva part posterior que indubtablement li està reduint el seu rendiment.

Per tant es pot dir que, tot i que la forma de la gràfica obtinguda no és exactament la que s'esperava, els resultats sembla que obtenen un punt de treball de l'aerogenerador per a cada velocitat del vent. A més a més, aquest punt de treball sembla estar a unes velocitats de gir raonables i que van augmentant amb la velocitat del vent.

Fetes aquestes observacions, i considerats els resultats de les simulacions com a acceptables, es pot procedir a trobar una corba de potència teòrica.

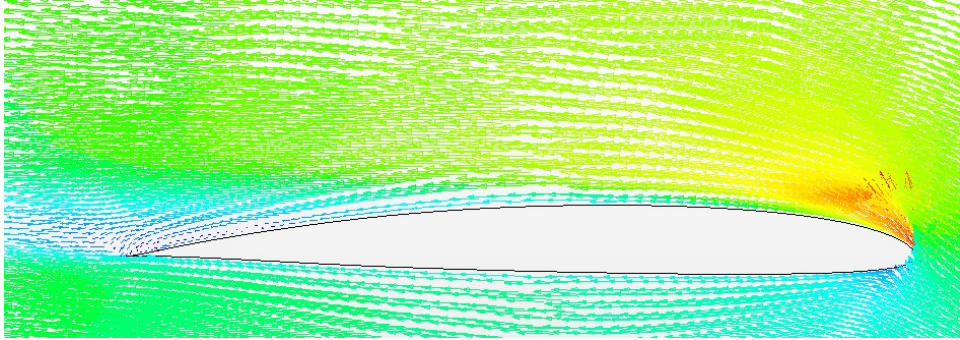


Figura 4.6: Perfil de l'aerogenerador funcionant correctament.

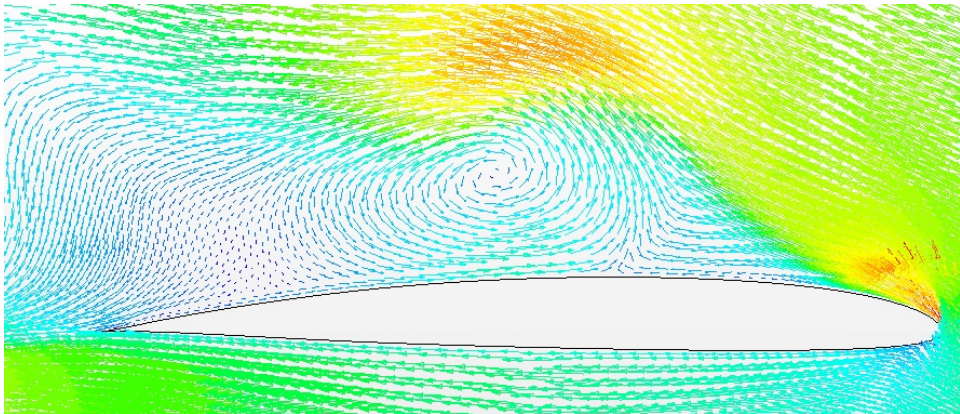


Figura 4.7: Perfil amb despreniment de la capa límit que ha provocat la formació d'un remolí que li resta eficàcia.



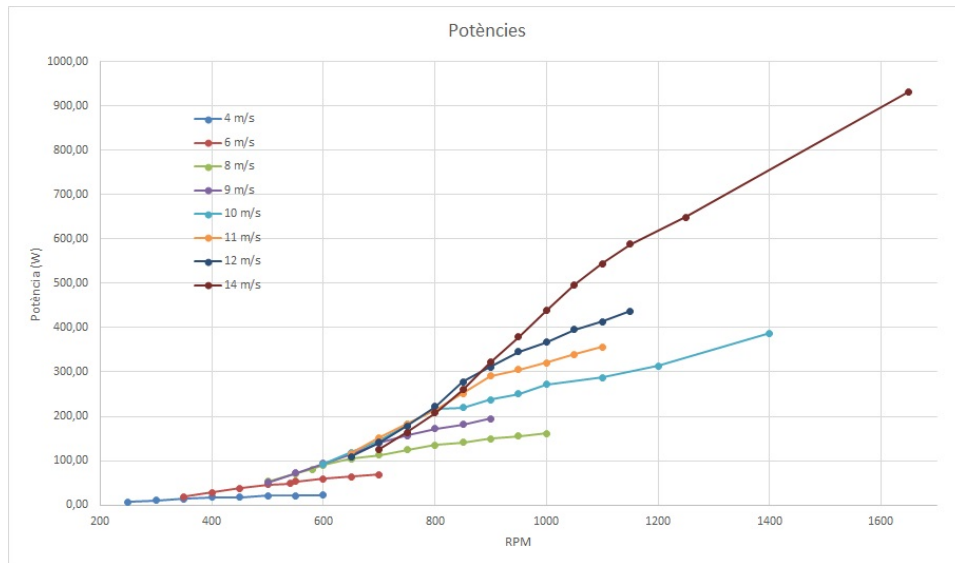


Figura 4.8: Conjunt de potències obtingudes en les simulacions.

## 4.2 Obtenció de la corba de potència teòrica

Com ja s'ha explicat, les diferents corbes obtingudes per a cada velocitat presenten dos pendents diferenciats degut, probablement, a una pèrdua aerodinàmica per efecte dels remolins que es formen. A més a més, i tal i com es pot veure a la figura 4.8, es veu com a la part de l'esquerra de les corbes, aquestes descriuen una forma similar a una exponencial.

Si es consideren només els punts situats a la primera part de la corba, la que té un pendent més alt i on es suposa que l'aerogenerador està treballant correctament, i es dibuixen tots en una mateixa gràfica s'obté el resultat que es veu a la figura 4.9. En aquesta figura també s'hi veu que si es traça una corba de regressió de tipus potencial la seva equació és molt similar a les que defineixen els límits de potència teòrics i que s'han vist a l'apartat 3.4. Recordant-los, són el límit de Betz i el d'aerogeneradors ràpids, que es calcularien, respectivament, com a:

$$N_{Betz} = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot s \cdot V^3 \quad (4.1)$$

$$N_{Ar} = 0,2 \cdot D^2 \cdot V^3 \quad (4.2)$$

La corba de regressió proporcionada pel Microsoft Excel, i que es pot veure a la figura 4.9, és:

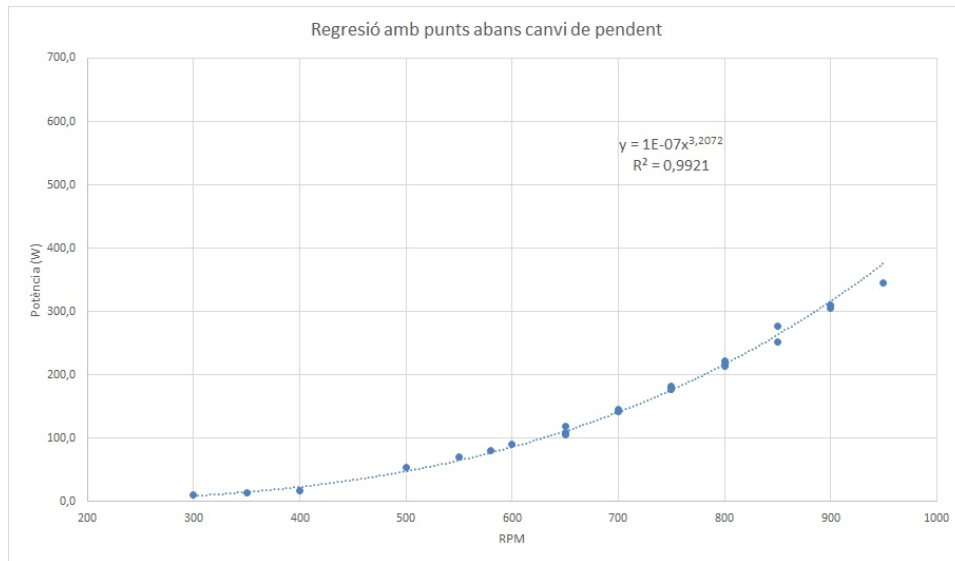


Figura 4.9: Punts considerats correctes en les simulacions juntament amb la recta de regressió que els defineix.

$$N = 1e^{-7} \cdot x^{3,2072} \quad (4.3)$$

Per comprovar la validesa d'aquesta regressió es representen les tres corbes juntes a la figura 4.10. Es veu com la corba obtinguda es situa per sota de les altres en el rang de velocitats on es mourà l'aerogenerador que s'està calculant. A més altes revolucions es situa per sobre de la corba d'aerogeneradors ràpids, però això és perquè en aquesta zona no s'hi han simulat punts i l'aproximació obtinguda no es pot considerar com a vàlida.

El fet que les gràfiques de les figures 4.9 i 4.10 estiguin expressades una en funció de la velocitat del vent i l'altra de la velocitat de gir no importa, ja que per a cada aerogenerador la relació entre aquestes dues velocitats és constant, com ja s'ha explicat, segons la relació:

$$\omega = \frac{30 \cdot \lambda}{\pi \cdot R} \cdot v_{vent} \quad (4.4)$$

Finalment, a la figura 4.11 es poden veure totes les potències representades juntament amb la línia de regressió que s'ha obtingut.

S'hi pot veure com cada línia de potència es separa de la corba de regressió, que actua com una envoltant, a unes determinades revolucions. Aquestes

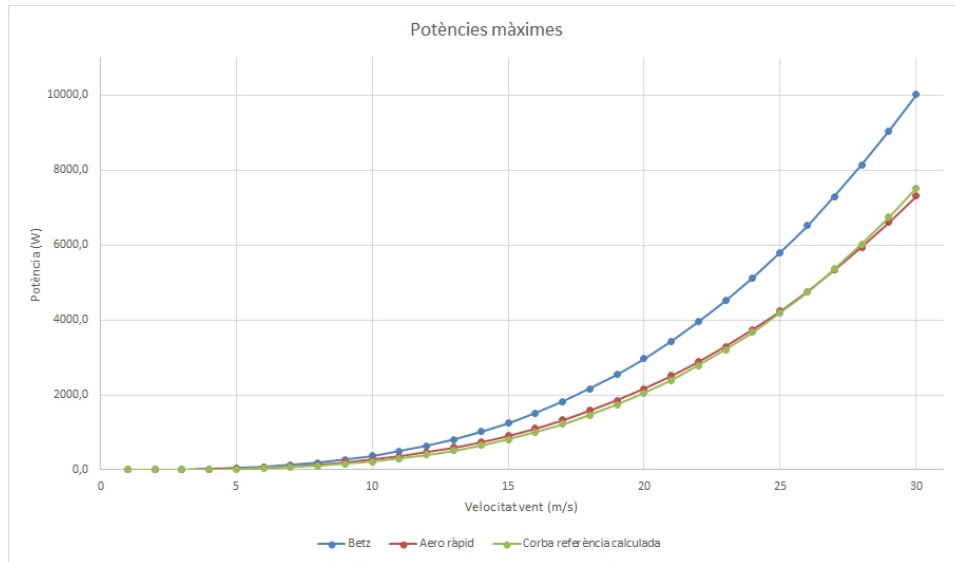


Figura 4.10: Comparativa de la corba de regressió obtinguda amb els límits teòrics de Betz i dels aerogeneradors ràpids.

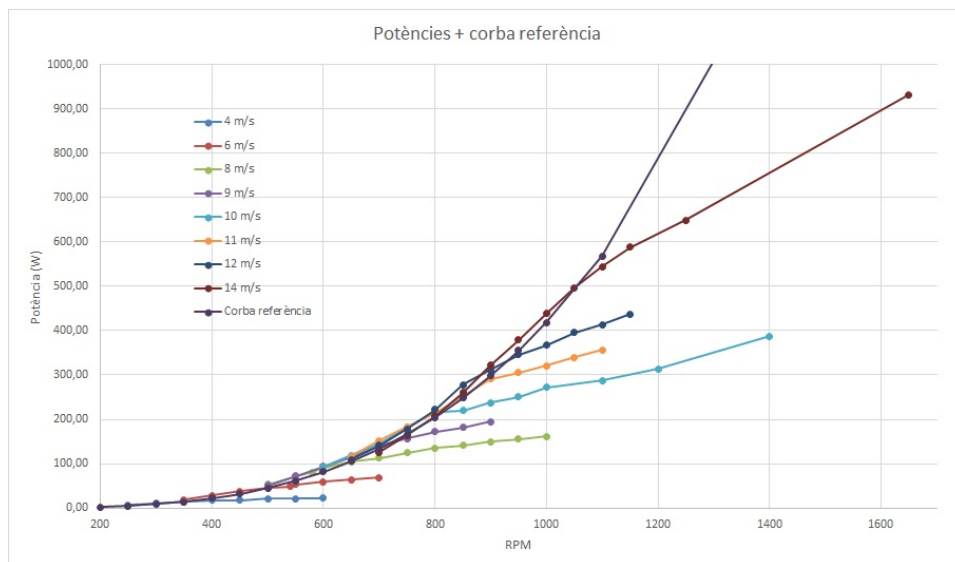


Figura 4.11: Potències de totes les simulacions juntament amb la línia de regressió.

V vent (m/s)	Velocitat gir (RPM)	Potència (W)
4	350	14,27
6	450	37,15
8	650	104,82
9	750	156,44
10	800	217,50
11	900	305,26
12	950	345,22
14	1100	543,75

Taula 4.1: Velocitats de gir òptimes trobades per a cada velocitat del vent i potència que dona l'aerogenerador en cadascuna d'elles.

revolucions corresponen, aproximadament, al punt on es produeix el canvi de pendent de les gràfiques per les pèrdues que apareixen en l'aerogenerador. Per tant es poden considerar aquests punts com els punts de funcionament òptim de l'aerogenerador per a cadascuna de les velocitats del vent estudiades.

En concret, aquests punts són els que es poden veure a la taula 4.1. I la corba de potència que podem extreure dels resultats de les simulacions mostrats en aquesta taula és la que es pot veure a la figura 4.12.

### 4.3 Comparació amb la corba de potència real

Un cop s'ha trobat la corba teòrica de la figura 4.12, es pot comparar amb la corba de potència real de l'aerogenerador Air-X que s'està utilitzant com a referència en aquest projecte i que ja s'ha vist a la figura 2.18.

Primerament però, es pot comparar la corba real amb els límits teòrics calculats. Es pot veure a la figura 4.13, i s'observa com, efectivament, l'aerogenerador Air-X es troba per sota dels dos límits. Fins i tot es pot veure com es troba relativament lluny del límit pels aerogeneradors ràpids. Com ja s'ha comentat, aquest fet és degut a que s'està treballant amb un model relativament econòmic i amb una certa antiguitat.

Finalment, a la figura 4.14 s'afegeix a la gràfica la corba de potència teòrica que s'ha calculat amb el procediment explicat en aquest projecte.

Es pot veure com pràcticament és idèntica a una de les corbes proporcionades pel fabricant, en concret a la negra que representa un vent amb poques turbulències. Aquest fet es correspon amb les simulacions fetes amb l'Ansys on les turbulències eren només d'un cinc per cent.

També es veuen unes oscil·lacions a onze i dotze metres per segon de velocitat. Això pot ser provocat per alguna imprecisió en el càlcul d'un dels punts, o més probablement al fet que les simulacions estan fetes amb una

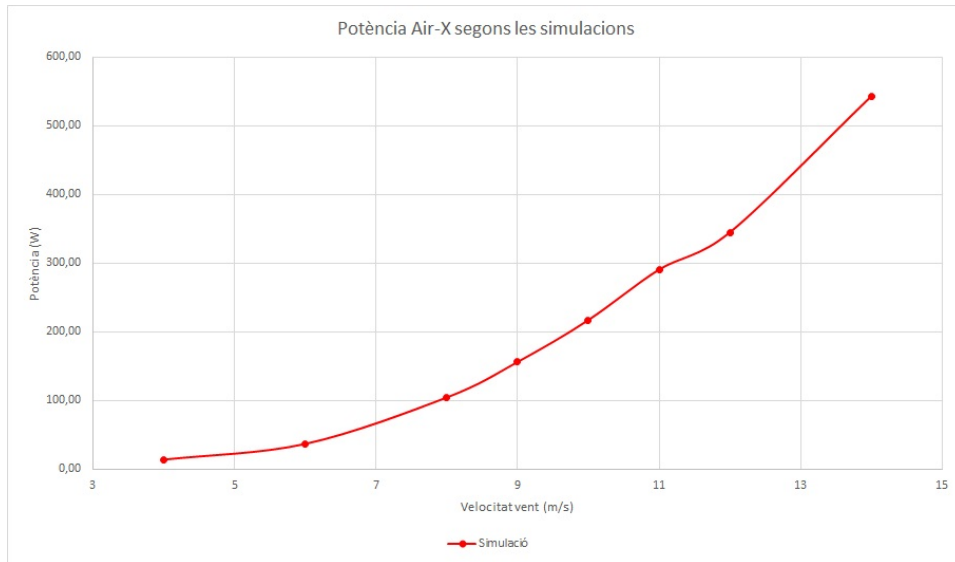


Figura 4.12: Corba de potència teòrica de l'Air-X obtinguda a partir dels resultats de les simulacions.

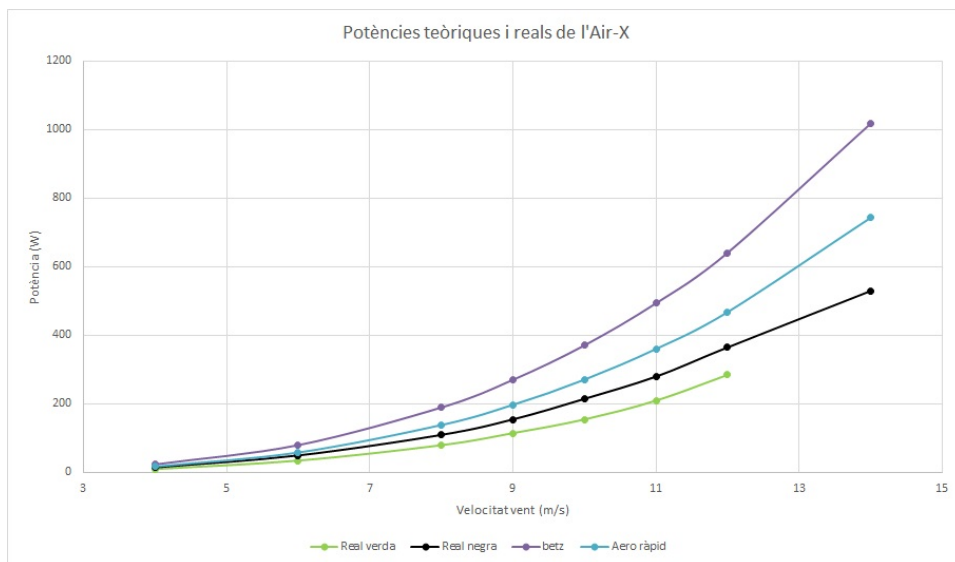


Figura 4.13: Potències reals de l'Air-X comparades amb els límits teòrics prèviament calculats.

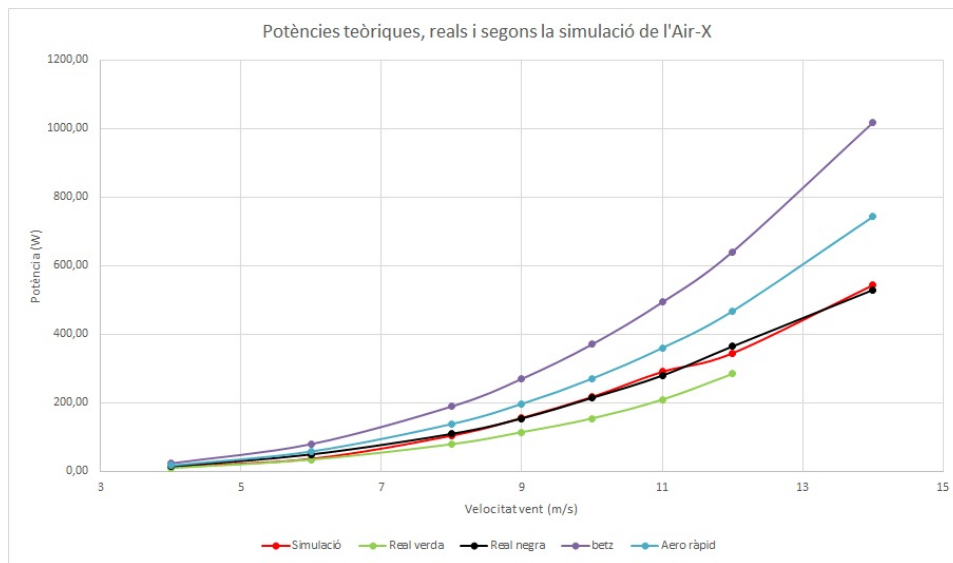


Figura 4.14: Corba de potència teòrica de l'Air-X comparada amb les reals i els límits teòrics.

diferència de cinquanta revolucions per minut entre elles i per tant si el punt real queda entre dos punts simulats, al fer les aproximacions al punt més proper els resultats tenen petites variacions respecte a l'òptim.

En general però, es pot veure com l'aproximació obtinguda és molt correcta i es podria considerar com a perfectament vàlida.

#### 4.4 Rang de validesa dels resultats

En els apartats anteriors ja s'ha vist com s'han analitzat els resultats i com s'ha trobat la corba de potència teòrica en funció d'aquests, però, en quin rang de velocitats del vent són vàlids aquests resultats?

Per comprovar-ho es pot simular una velocitat de vent bastant més elevada i comprovar què passa. Això és justament el que s'ha fet, i a la figura 4.15 es pot veure el resultat.

Es pot veure com en les simulacions el comportament és exactament el mateix que es produïa a velocitats més baixes, es poden veure dues zones amb pendents clarament diferenciats. A més a més, si es representa també la corba de regressió que s'ha calculat, com es pot veure a la figura 4.16, s'observa que, tot i que no es tenien punts per calcular la corba de regressió a velocitats tant altes, i per tant la seva validesa és menor que en la resta de comparacions, el comportament és equiparable a la resta de velocitats del vent, seguint la zona de pendent més alt la corba de regressió i separant-se a partir d'un valor que indicaria un punt de treball.

Per tant es pot concloure que el model informàtic utilitzat en aquest projecte, si bé permet trobar de forma considerablement precisa la corba de potència, no troba una velocitat màxima de simulació.

Aquesta velocitat màxima, doncs, caldria calcular-la d'una altra manera. Les principals maneres de fer-ho serien dos: per una part, i com ja s'ha explicat a l'apartat 3.2, segons criteris acústics deguts a la gran velocitat de rotació dels aerogeneradors minieòlics. Per exemple, en el cas concret de l'Air-X utilitzat en aquest projecte, el fabricant ha decidit limitar el seu funcionament a una velocitat del vent de quinze metres per segon abans de reduir mecànicament la seva velocitat de gir. Amb el diàmetre que té, provoca que per un vent de quinze metres per segon la punta de la pala es mogui a setanta metres per segon, fet que provoca ja bastants sorolls aerodinàmics deguts als remolins que es formen per la diferència de pressió entre les dues cares de la pala.

L'altre criteri per calcular una velocitat màxima seria segons les característiques mecàniques de l'aparell. Segons les seves dimensions, material de construcció i velocitats de funcionament es podria fer un estudi de les pressions i inèrcies que rep, i comparant amb les màximes admissibles en cada cas es podria establir una velocitat màxima amb un marge de seguretat suficient per assegurar el bon funcionament de l'aparell.

També seria molt important fer un estudi de fatiga, ja que les vibracions i la velocitat a la que gira durant el seu funcionament, podrien fer que es reduís la resistència de la pala, i per tant també la velocitat màxima aconsellable respecte a la calculada per límits purament del material.

Concloent, es pot afirmar que el procés detallat en aquest projecte funciona per aproximar correctament la corba de potència de l'aerogenerador simulat, però que la velocitat màxima a la que podria funcionar l'aerogenerador, corresponent a la velocitat màxima que s'hauria de simular, s'ha d'obtenir per altres mètodes.

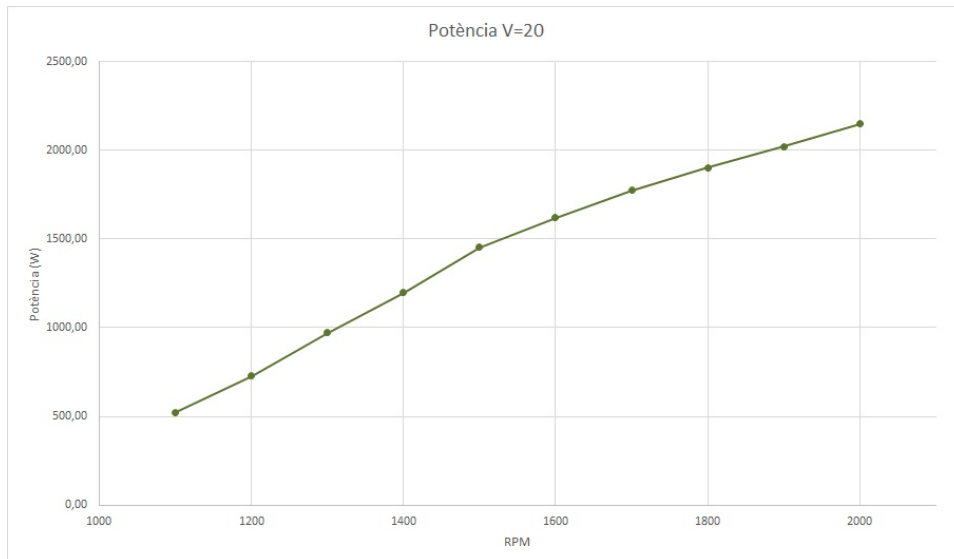


Figura 4.15: Potència per a una velocitat del vent de 20 m/s segons les simulacions.

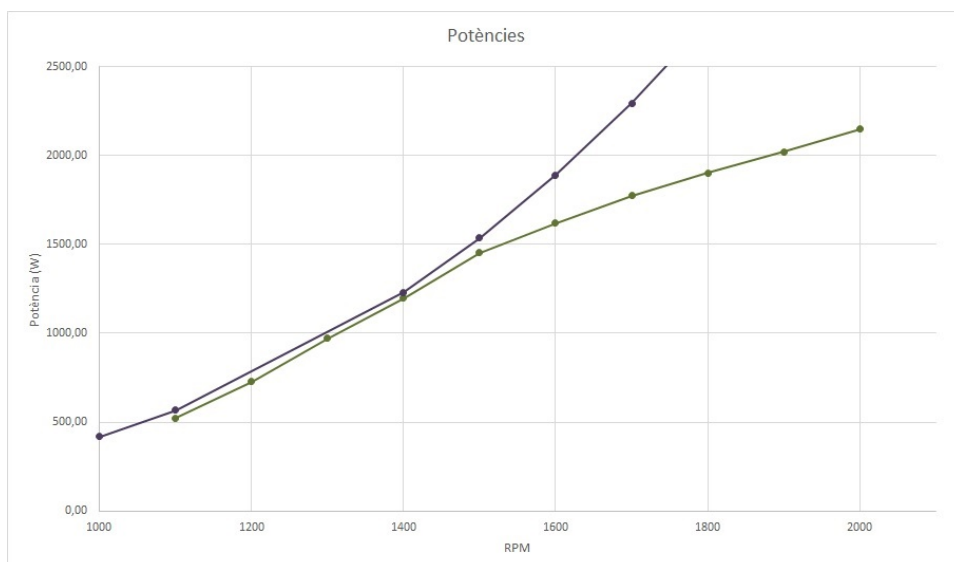


Figura 4.16: Potència per a una velocitat del vent de 20 m/s juntament amb la línia de regressió.



## Capítol 5

# Índex dels documents

Aquest projecte consta del següent document:

- Document 1: Memòria i apèndixs

## Capítol 6

# Resum del pressupost

El pressupost del present projecte, que es troba detallat a l'apèndix C, ha estat d'onze mil vint-i-tres coma un Euros (11.023,1€).

## Capítol 7

# Conclusions finals

Una de les conclusions que s'han fet bastant evidents des de l'inici d'aquest projecte és que tant la potència dels ordinadors del laboratori de CFD de la universitat, com el fet que la llicència de l'Ansys fos acadèmica han limitat la precisió dels resultats obtinguts.

Els ordinadors perquè en alguns dies de simulació només aconseguien fer un nombre d'iteracions que s'allunyava bastant del mínim que s'hauria volgut per assegurar la fiabilitat dels resultats. I amb el gran nombre de simulacions diferents que calia fer, el temps total de realització del projecte fent simulacions més llargues hauria estat molt elevat i inviable tant per la durada com perquè s'haurien monopolitzat alguns (o pràcticament tots) els ordinadors del laboratori impossibilitant la realització de les classes que s'hi han de fer.

Pel que fa a la llicència acadèmica de l'Ansys, introduïa la limitació de poder calcular només amb cinc-cents dotze mil nodes. Això ha fet que al mallar hagi calgut que, per aconseguir una mida mínima dels elements suficient per definir els contorn de la pala, la mida màxima d'elements i el factor de creixement s'han hagut de posar bastant grans. Això ha limitat la precisió amb que es calculaven les velocitats i pressions del vent a la pala, tot i que amb els refinaments introduïts en el procés de mallat s'ha intentat aconseguir que almenys aquesta zona obtingués uns resultats acceptables. També cal dir que, si s'hagués pogut fer el càlcul amb un nombre d'elements i nodes considerablement més gran, encara s'hauria allargat més els temps de càlcul i hauria fet més evident la necessitat d'ordinadors més potents.

Sense el nombre de nodes limitat el que es podria fer és definir elements més petits, permetent resseguir més exactament les curvatures de l'aerogenerador, així com els canals d'entrada i sortida de l'aire. D'aquesta manera es podria veure, a part del parell que generen les pales que és on s'ha centrat aquest projecte, les zones de sobrepressió que origina el cantell d'atac i les pertorbacions i turbulències que genera l'aerogenerador en l'aire que el creua i com afecten a la part posterior.

Però malgrat aquests problemes s'ha aconseguit l'objectiu principal d'aquest projecte, que era obtenir una corba de potència teòrica per a l'aerogenerador, i a més l'exactitud al comparar-la amb la corba real proporcionada pel fabricant ha estat molt alta.

I s'ha aconseguit fer només a partir de la geometria de la pala tal com es volia segons les especificacions d'aquest projecte, i sense necessitar cap de les altres dades de que en realitat es disposava de l'aerogenerador minieòlic Aix-X.

Les principals dificultats que s'han trobat han estat bàsicament dues:

- Dibuixar l'eix de l'aerogenerador i la seva unió amb la pala.
- Interpretar estadísticament i físicament les dades per arribar als resultats finals.

En el primer cas, l'única solució ha estat intentar mesurar algunes parts per després poder dibuixar amb el Rhinoceros aquestes parts amb la màxima fidelitat possible. En l'eix, com ja s'ha explicat, s'ha aconseguit de forma relativament fàcil utilitzant una quadrícula per aproximar una corba generatriu. En quan a la unió entre l'eix i la pala la cosa ha estat bastant més difícil. Amb les poques mides que s'han pogut obtenir s'han fet algunes proves amb diferents variacions de les superfícies fins a aconseguir que visualment s'assemblés a l'aerogenerador real. També cal dir que mirant els resultats de les simulacions, es veu que la part que genera més parell al girar són les pales, i que aconseguir crear bé aquesta unió semblaria afectar més en la imatge estètica que dona el model que no pas de cara als resultats.

Agafar mesures reals sobre l'aparell estava contemplat dins les especificacions, ja que són part de la geometria de l'aerogenerador, i era la base sobre la que es volia treballar.

Respecte la interpretació estadística de les dades, ha calgut esperar a tenir com més simulacions millor. Al començament s'anaven fent poques simulacions simultànies perquè encara s'anava provant si el model, el mallat i les condicions de simulació eren correctes. A més el fet que a les gràfiques no es produís una pèrdua de potència, sinó només una baixada del pendent de la gràfica, ha fet que durant algun temps es pensés que no s'estava fent bé la simulació i es provessin variacions de la mateixa, tant amb el mateix programa Ansys com també amb l'Star-CCM.

Però finalment es va decidir fer més simulacions tot i no tenir la seguretat que fossin correctes, i així es va veure primer com en algunes velocitats del vent es produïa una petita oscil·lació en els valors de potència, i que aquesta coincidia aproximadament amb les velocitats en que es pensava trobar la potència màxima. Després es va observar que existia el canvi de pendent en les gràfiques i es va procedir a fer els passos detallats a l'apartat 4.2.

Això va portar a trobar una corba de potència teòrica que, comparada amb la real, va resultar ser molt precisa. Únicament en alguna velocitat els

valors varien lleugerament, possiblement degut a que com que les simulacions s'han fet en intervals de cinquanta revolucions per minut entre elles, el punt real estava entremig de dos dels calculats, i al aproximar a un dels punts els resultats s'alteren lleugerament. Tot i això, els resultats es consideren molt bons.

Com ja s'ha explicat a l'apartat 4.4 la metodologia exposada en aquest projecte no troba una velocitat màxima per a les simulacions, i per extensió, per a l'aerogenerador. Per aconseguir trobar aquesta velocitat màxima caldria fer alguns càlculs mecànics utilitzant les característiques de la pala per trobar els esforços màxims que pot suportar i també els efectes dels esforços per fatiga que pateix durant el seu funcionament. També es podria trobar una velocitat màxima estudiant l'impacte sonor que creen les pales al girar a altes revolucions, establint el límit en la velocitat del vent que provoqui un impacte sonor per sota del que es requereix en la zona on estarà situat l'aerogenerador.

Un altre punt a destacar és la diferència entre la Lambda real de l'aerogenerador, que és de vuit coma vuit, i la que s'ha suposat en aquest projecte, que ha estat de cinc. Aquesta diferència no afecta als resultats, ja que la Lambda únicament s'utilitza per establir una velocitat de gir teòrica a la que es produirà la potència per a cada velocitat del vent. Les simulacions s'han fet en un rang de velocitats al voltant d'aquesta velocitat de gir teòrica, per tant, haver escollit un altre valor de Lambda només hauria fet que l'interval inicial no hagués estat el mateix, però no hauria afectat a la corba de potència i per tant s'hauria pogut arribar a les mateixes conclusions.

Tot aquest projecte s'ha fet treballant amb l'aerogenerador minieòlic Air-X del laboratori d'energies de la Universitat de Girona, i per tant no se sap si funcionaria en altres aerogeneradors de diferents fabricants, mides, potències màximes i tipus de perfils a les pales. Però, tot i no tenir cap evidència de que sigui així, el fet que els procediments són molt generals i que es poden aplicar a qualsevol aerogenerador, ha fet que es decidís estructurar la redacció d'aquest projecte de forma que s'ha obtingut una metodologia del procés que qui vulgui pot aplicar en qualsevol altre cas.

En resum, la conclusió final d'aquest projecte és que s'ha aconseguit fer exactament el que estava proposat: aconseguir obtenir una corba de potència d'un aerogenerador mitjançant simulació informàtica i només a partir de les seves dades geomètriques.

# Bibliografia

- [1] J.L. Rodríguez Amenedo, J.C. Burgos Díaz, S. Arnalte Gómez. “*Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica*”. Rueda S.L., 2003.
- [2] Frank Kreith, Mark S. Bohn. “*Principios de transferencia de calor*”. Thomson, 2009.
- [3] Félix Avia Aranda. “*Principios de conversión de la energía eólica*”. CIEMAT, 1995.
- [4] Gabriel Valiente Feruglio. “*Composició de textos científics amb L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X*”. Edicions UPC, 1996.
- [5] Raúl Mata Botana. “*Tablas en L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X*”. 2008.
- [6] Gastón Simone. “*Tutorial de L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X. Introducción básica*”. 2002.
- [7] Asociación Empresarial Eólica (AEE). “*Eólica 13, anuario energía eólica 2013*”. 2013.
- [8] ENDESA. “*Curso energía eólica 2007, sesión: principios de la energía eólica*”. 2007.
- [9] S. Gomez. “*Uso de simulación numérica en diseño de aerogeneradores*”. Centro nacional de energías renovables (CENER), 2010.
- [10] Antonio Lecuona Neumann. “*La energía eólica: principios básicos y tecnología*”. Universidad Carlos III de Madrid, 2002.
- [11] Alexandre Deltell, Josep Arnau, Josep M. Corretger. “*Energia eòlica*”. Universitat de Girona, Apunts tecnologia energètica, 2013.
- [12] Jesús Antonio López Perales. “*Rugosidad absoluta de materiales*”. Escuela de ingenieros agrónomos, Universidad de Castilla-La Manxa, 2014.
- [13] “*CFD Online Discussion Forums*”. [www.cfd-online.com/Forums](http://www.cfd-online.com/Forums), Abril 2014.

- [14] Ammonit Measurement GmbH. “Medición eólica: data loggers, sensores de viento, sensores solares, software de monitorización”. [www.ammonit.com/es](http://www.ammonit.com/es), Noviembre 2013.
- [15] OPEXenergy. “OPEXenergy, operación y mantenimiento”. [www.opex-energy.com](http://www.opex-energy.com), Febrero 2014.
- [16] El Correo del Sol. “El ministro Soria impedirá el autoconsumo renovable en España y pondrá peajes elevados a quienes se decanten por producir su propia electricidad”. [www.elcorreodelsol.com/etiquetas/noticias](http://www.elcorreodelsol.com/etiquetas/noticias), Juliol 2014.
- [17] GreenStyle. “Minieolico, le caratteristiche”. [www.greenstyle.it/minieolico-le-caratteristiche-4439.html](http://www.greenstyle.it/minieolico-le-caratteristiche-4439.html), Juliol 2014.
- [18] Foxinver. “Viento en popa, a toda vela | FOXINVER the clever investments, sl”. [www.foxinver.com/2009/07/31/viento-en-popa-a-toda-vela](http://www.foxinver.com/2009/07/31/viento-en-popa-a-toda-vela), Gener 2014.
- [19] Conrado Moreno Figueredo. “Producción de electricidad con energía eólica”. [www.cubasolar.cu](http://www.cubasolar.cu), Gener 2014.
- [20] Wikimedia Foundation, Inc. “Wind Turbine”. [http://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_turbine](http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine), Diciembre 2013.
- [21] “Wind energy pioneers”. [http://mstudioblackboard.tudelft.nl/duwind/Wind%20energy%20online%20reader/Static\\_pages/wind\\_pioneers.htm](http://mstudioblackboard.tudelft.nl/duwind/Wind%20energy%20online%20reader/Static_pages/wind_pioneers.htm), Diciembre 2013.
- [22] “How wind turbines work”. [www.chemistryviews.org/details/ezone/1444481/How\\_Wind\\_Turbines\\_Work.html](http://www.chemistryviews.org/details/ezone/1444481/How_Wind_Turbines_Work.html), Gener 2014.
- [23] “Mapa eòlic de Catalunya”. [www.factor4.cat/cms/index.php/ca/hosabies/mapa-eolic-de-catalunya](http://www.factor4.cat/cms/index.php/ca/hosabies/mapa-eolic-de-catalunya), Gener 2014.
- [24] Mattia Musiello. “Vivere in Danimarca: energia eolica in Danimarca”. <http://mattiamusiello.blogspot.com.es/2012/07/energia-eolica-in-danimarca-un-futuro.html>, Gener 2014.
- [25] La Vanguardia. “La energía eólica, líder anual en producción de electricidad en España”. [www.lavanguardia.com/natural/energia/20131224/54398546670/energia-eolica-lider-anual-produccion-electricidad-espana.html](http://www.lavanguardia.com/natural/energia/20131224/54398546670/energia-eolica-lider-anual-produccion-electricidad-espana.html), Diciembre 2013.
- [26] Somos eólicos. “La eólica mundial está lista para superar los 300.000 MW instalados en 2013”. [www.somoseolicos.com/2013/noticias/la-eolica-mundial-esta-lista-para-superar-los-300-000-mw-instalados-en-2013/](http://www.somoseolicos.com/2013/noticias/la-eolica-mundial-esta-lista-para-superar-los-300-000-mw-instalados-en-2013/), Diciembre 2013.

- [27] “*Electrónica, electricidad y telecomunicaciones*”.  
<http://egresadoselectronicaunc.blogspot.com.es/2013/03/potencia-electrica-instalada-en-los.html>,  
Deseembre 2013.
- [28] The Shift Project Data Portal. “*Breakdown of Electricity Generation by Energy Source*”.  
[www.tsp-data-portal.org/Breakdown-of-Electricity-Generation-by-Energy-Source#tspQvChart](http://www.tsp-data-portal.org/Breakdown-of-Electricity-Generation-by-Energy-Source#tspQvChart),  
Deseembre 2013.
- [29] Techno Sun SL. “*Manual del usuario Air-X en español*”. 2012
- [30] “*Air-X turbine*”.  
[www.reuk.co.uk/OtherImages/air-x-turbine.jpg](http://www.reuk.co.uk/OtherImages/air-x-turbine.jpg),  
Juny 2014.
- [31] “*Galapagos Islands .com - Maryanne Sailboat*”.  
[www.galapagosislands.com/first-class-cruises/mary-anne-sailboat/mary-anne-sail-yacht.html](http://www.galapagosislands.com/first-class-cruises/mary-anne-sailboat/mary-anne-sail-yacht.html),  
Juliol 2014.



# Apèndixs

## Apèndix A

# Taules de resultats de les simulacions

A continuació es mostren els resultats de totes les simulacions fetes agrupades per velocitats

V vent (m/s)	Velocitat gir (RPM)	Parell (Nm)	Potència (W)
4	250	0,265	6,95
	300	0,342	10,74
	350	0,389	14,27
	400	0,413	17,29
	450	0,374	17,64
	500	0,400	20,96
	550	0,368	21,18
	600	0,348	21,85
6	350	0,499	18,31
	400	0,678	28,40
	450	0,788	37,15
	500	0,868	45,44
	540	0,852	48,19
	550	0,914	52,65
	600	0,947	59,49
	650	0,945	64,32
8	700	0,936	68,58
	500	1,019	53,37
	550	1,227	70,65
	580	1,334	81,05
	600	1,430	89,83
	650	1,540	104,82
	700	1,541	112,97

Continua a la pàgina següent.

V vent (m/s)	Velocitat gir (RPM)	Parell (Nm)	Potència (W)
	750	1,588	124,69
	800	1,612	135,08
	850	1,592	141,67
	900	1,583	149,20
	950	1,564	155,60
	1000	1,542	161,49
	500	0,964	50,45
	550	1,246	71,78
	600	1,493	93,82
	650	1,683	114,58
9	700	1,916	140,45
	750	1,992	156,44
	800	2,059	172,51
	850	2,035	181,15
	900	2,063	194,43
	600	1,466	92,13
	650	1,745	118,75
	700	1,995	146,22
	750	2,304	180,98
	800	2,596	217,50
	850	2,470	219,58
10	900	2,519	237,45
	950	2,514	250,13
	1000	2,593	271,52
	1100	2,491	286,95
	1200	2,496	313,61
	1400	2,644	387,56
	650	1,700	115,70
	700	2,074	152,02
	750	2,326	182,65
	800	2,551	213,70
	850	2,833	252,17
11	900	3,298	305,26
	950	3,064	304,78
	1000	3,060	320,47
	1050	3,087	339,46
	1100	3,091	356,06
	650	1,595	108,60
	700	1,931	141,58
	750	2,264	177,83
	800	2,644	221,54
12	850	3,119	277,65

Continua a la pàgina següent.

V vent (m/s)	Velocitat gir (RPM)	Parell (Nm)	Potència (W)
14	900	3,298	310,78
	950	3,470	345,22
	1000	3,504	366,89
	1050	3,594	395,20
	1100	3,592	413,80
	1150	3,630	437,10
	700	1,707	125,14
	750	2,078	163,20
	800	2,479	207,65
	850	2,926	260,43
	900	3,420	322,35
	950	3,805	378,54
	1000	4,182	437,95
	1050	4,519	496,88
20	1100	4,720	543,75
	1150	4,886	588,35
	1250	4,960	649,32
	1650	5,392	931,72
	1100	4,528	521,54
	1200	5,780	726,37
	1300	7,124	969,87
	1400	8,168	1197,49
	1500	9,249	1452,90
	1600	9,663	1618,99
1700	9,956	1772,46	
1800	10,083	1900,53	
1900	10,151	2019,68	
2000	10,262	2149,33	

## Apèndix B

# Gràfics de les simulacions

En aquest apèndix es mostren les diferents gràfiques de potència obtingudes per a cada velocitat del vent. També es representen en una mateixa gràfica tots els parells.

Posteriorment es mostren les mateixes gràfiques de potència conjuntament amb la línia de regressió que s'ha obtingut, i on s'hi veu el punt de treball per a cada velocitat.

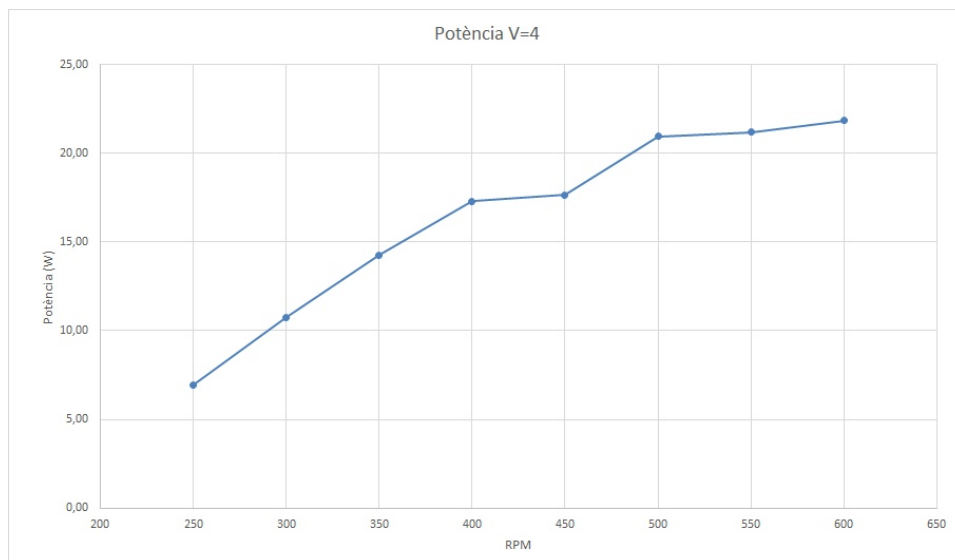


Figura B.1: Potència per a una velocitat del vent de 4 m/s segons les simulacions.

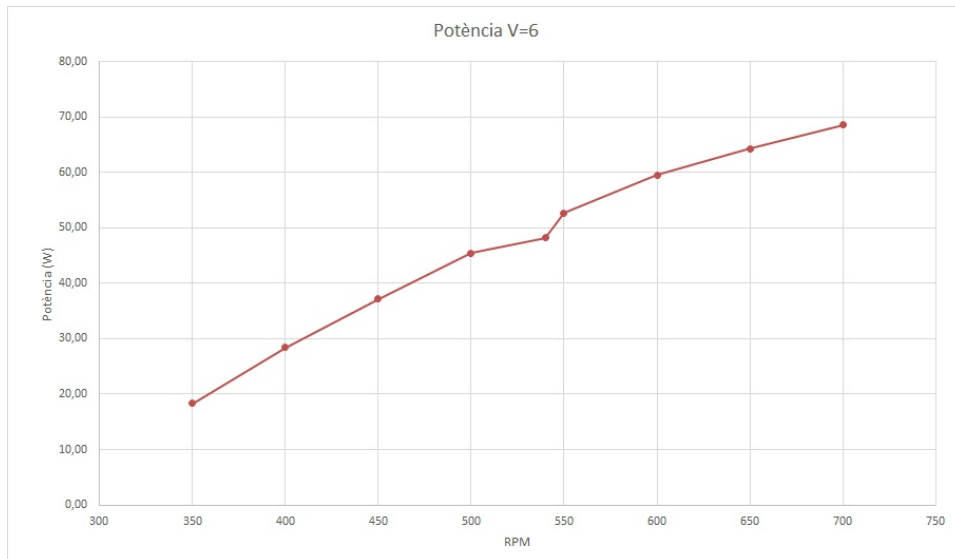


Figura B.2: Potència per a una velocitat del vent de 6 m/s segons les simulacions.

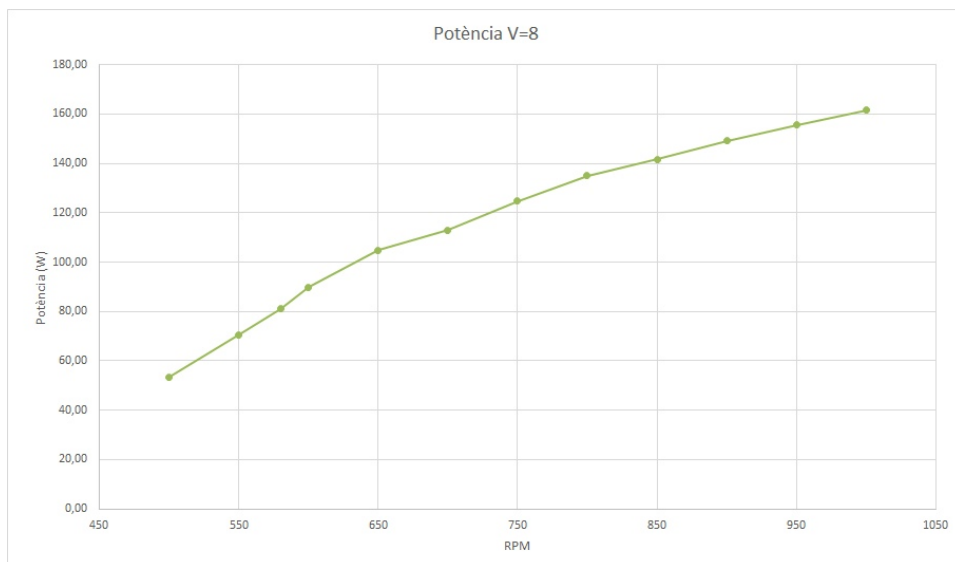


Figura B.3: Potència per a una velocitat del vent de 8 m/s segons les simulacions.

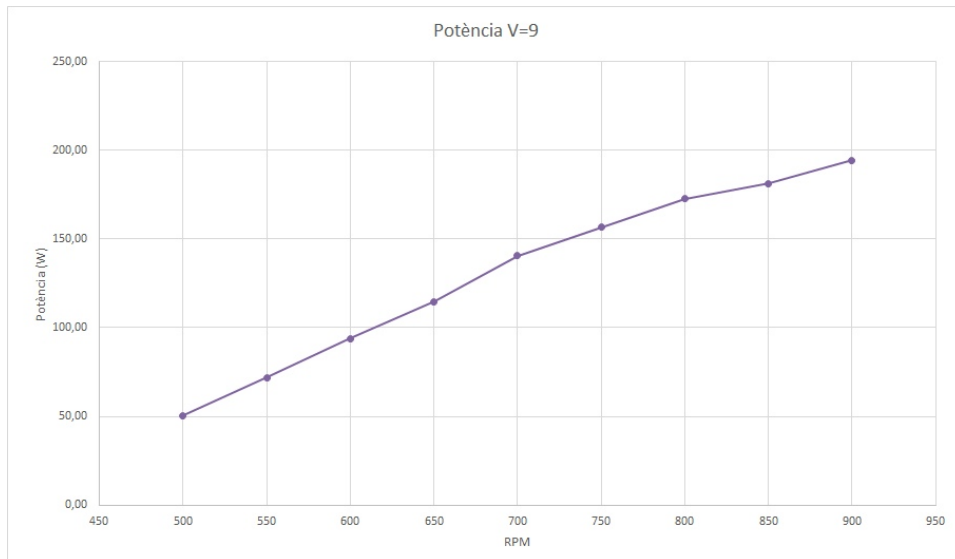


Figura B.4: Potència per a una velocitat del vent de 9 m/s segons les simulacions.

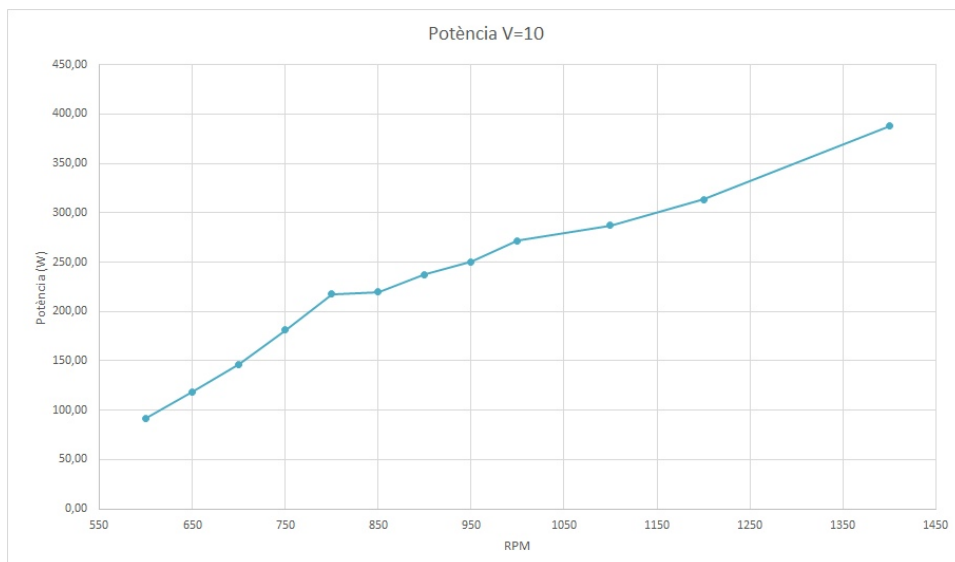


Figura B.5: Potència per a una velocitat del vent de 10 m/s segons les simulacions.

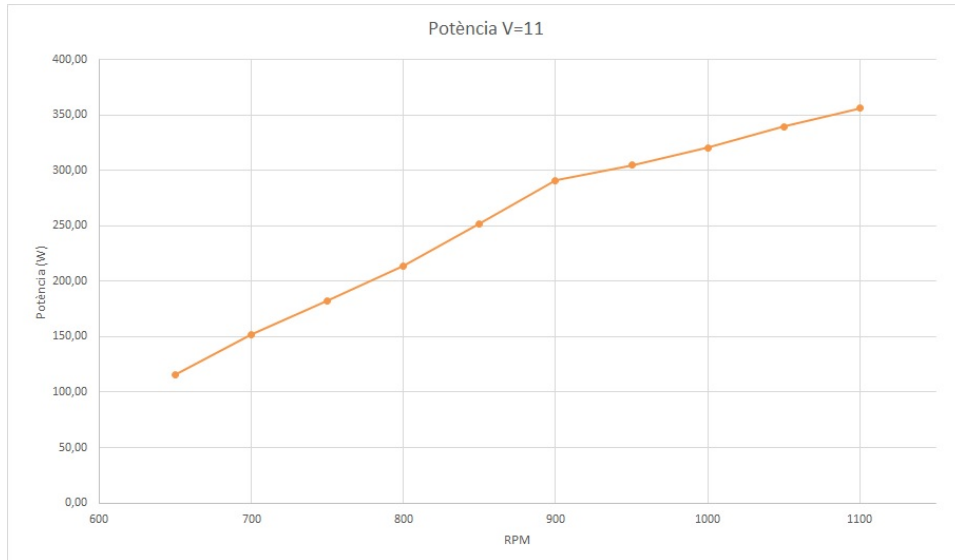


Figura B.6: Potència per a una velocitat del vent de 11 m/s segons les simulacions.

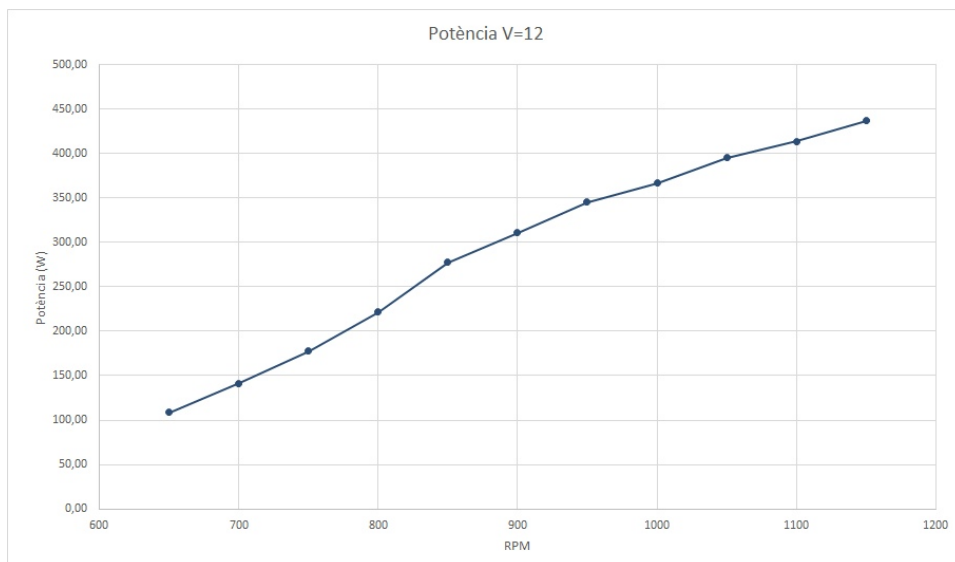


Figura B.7: Potència per a una velocitat del vent de 12 m/s segons les simulacions.



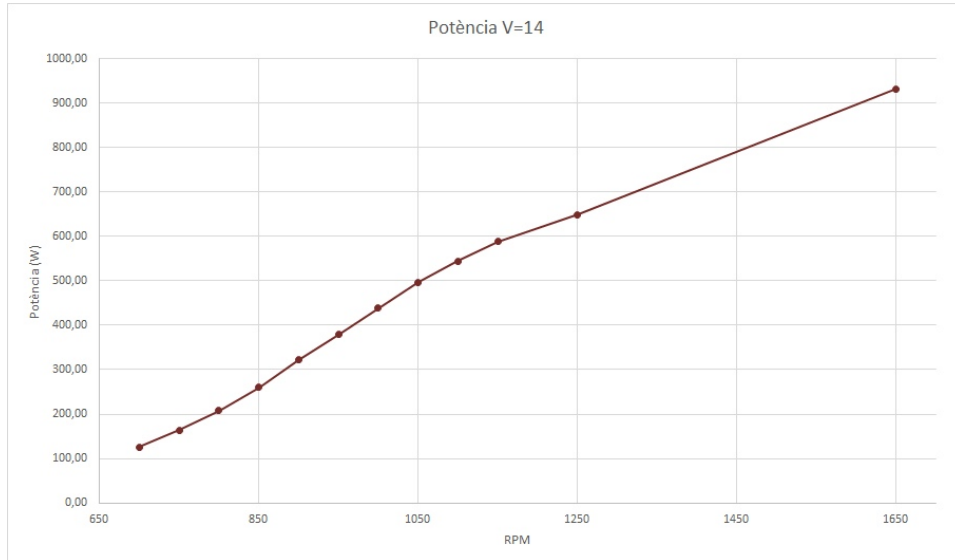


Figura B.8: Potència per a una velocitat del vent de 14 m/s segons les simulacions.

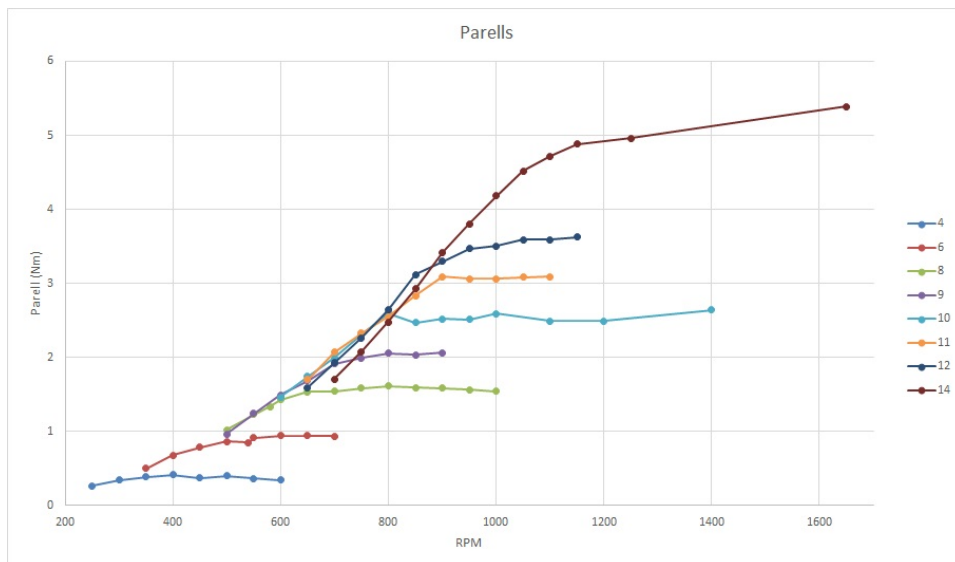


Figura B.9: Parells de les diferents simulacions.

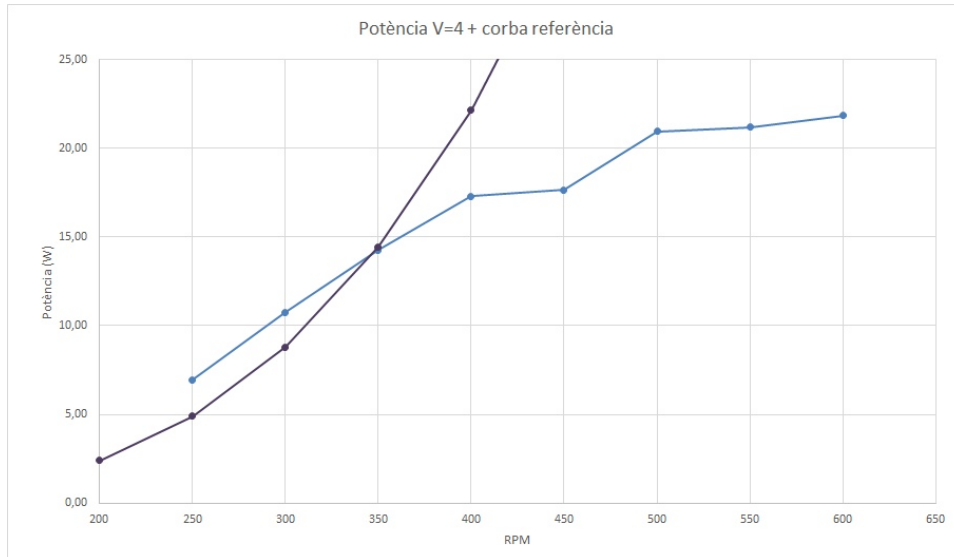


Figura B.10: Potència per a una velocitat del vent de 4 m/s juntament amb la línia de regressió.

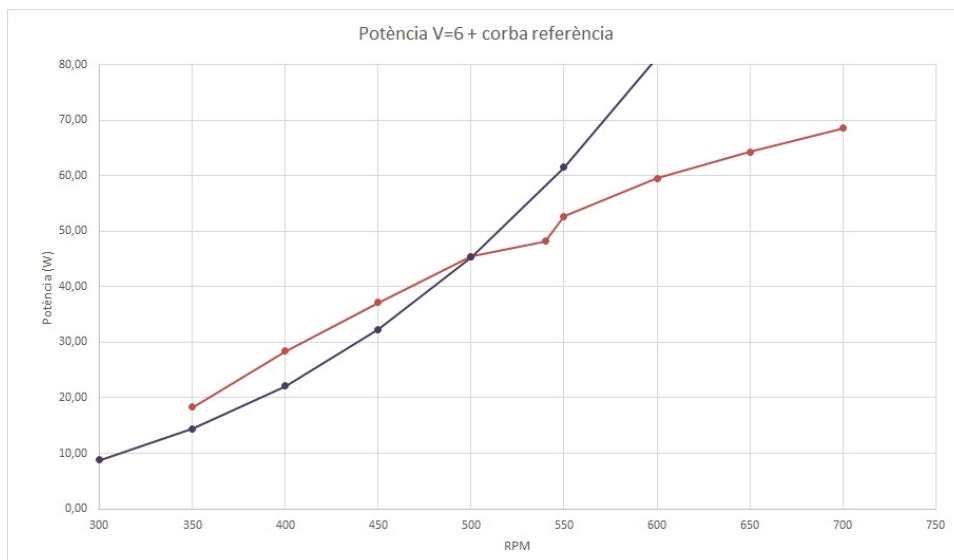


Figura B.11: Potència per a una velocitat del vent de 6 m/s juntament amb la línia de regressió.

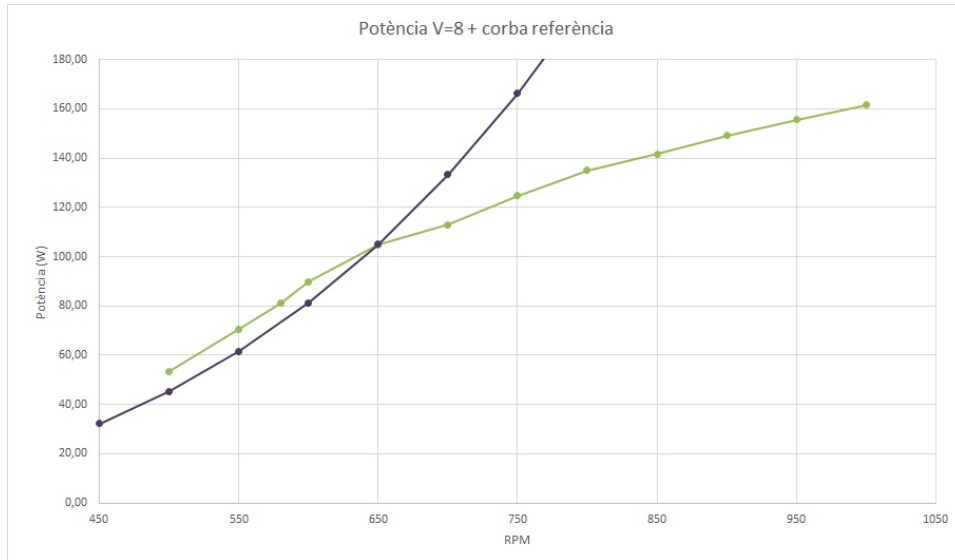


Figura B.12: Potència per a una velocitat del vent de 8 m/s juntament amb la línia de regressió.

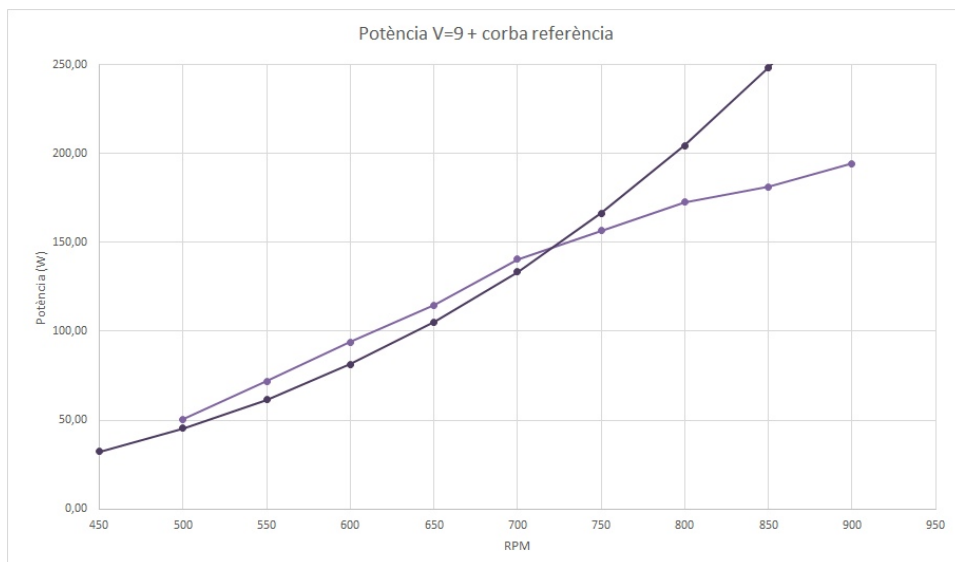


Figura B.13: Potència per a una velocitat del vent de 9 m/s juntament amb la línia de regressió.

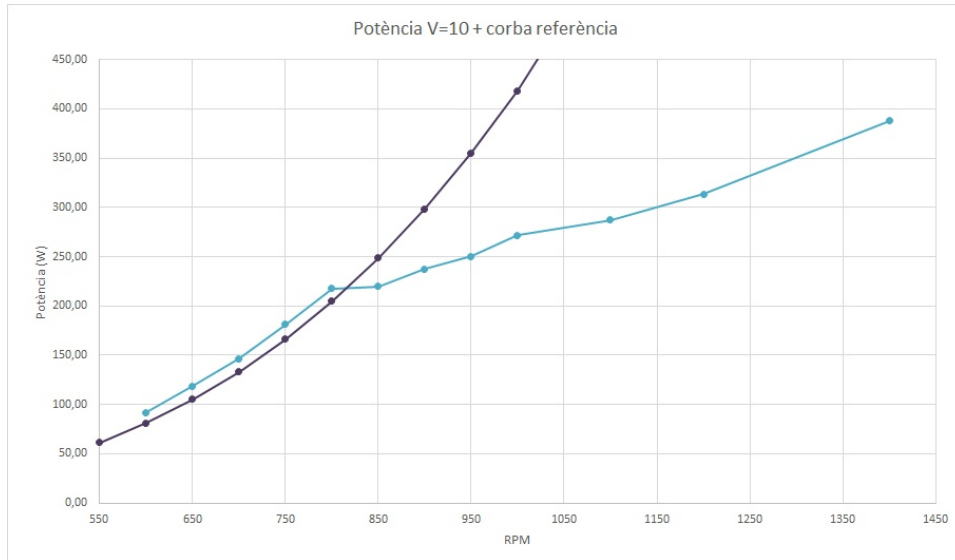


Figura B.14: Potència per a una velocitat del vent de 10 m/s juntament amb la línia de regressió.

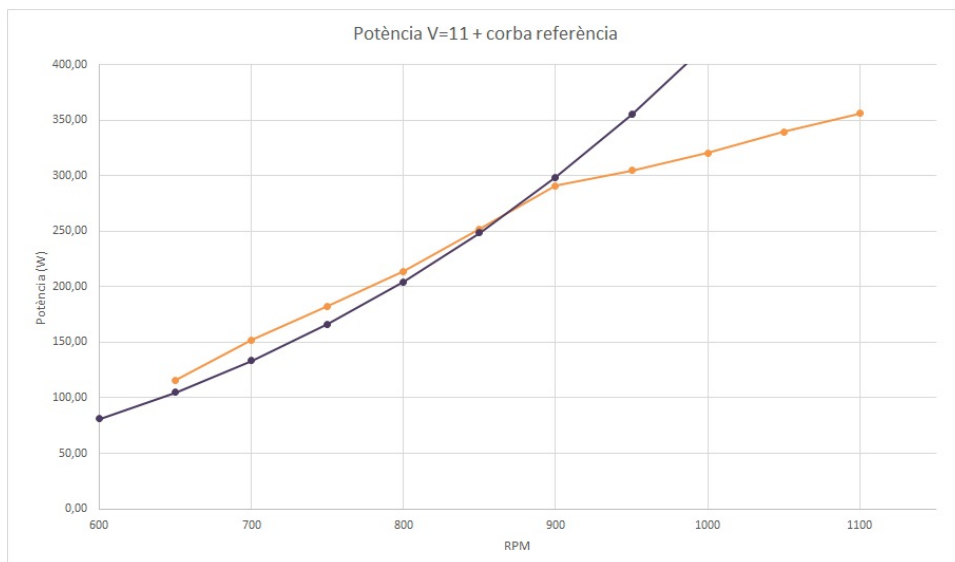


Figura B.15: Potència per a una velocitat del vent de 11 m/s juntament amb la línia de regressió.

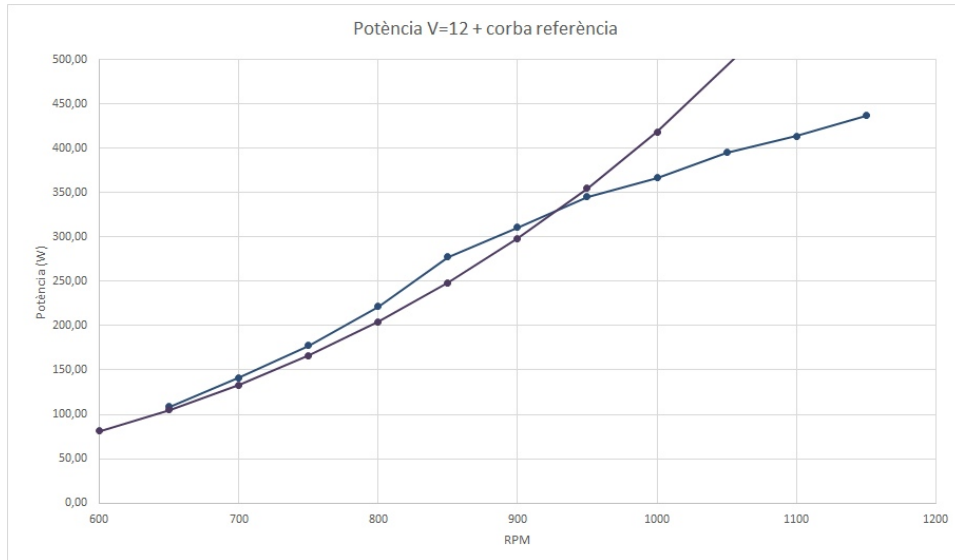


Figura B.16: Potència per a una velocitat del vent de 12 m/s juntament amb la línia de regressió.

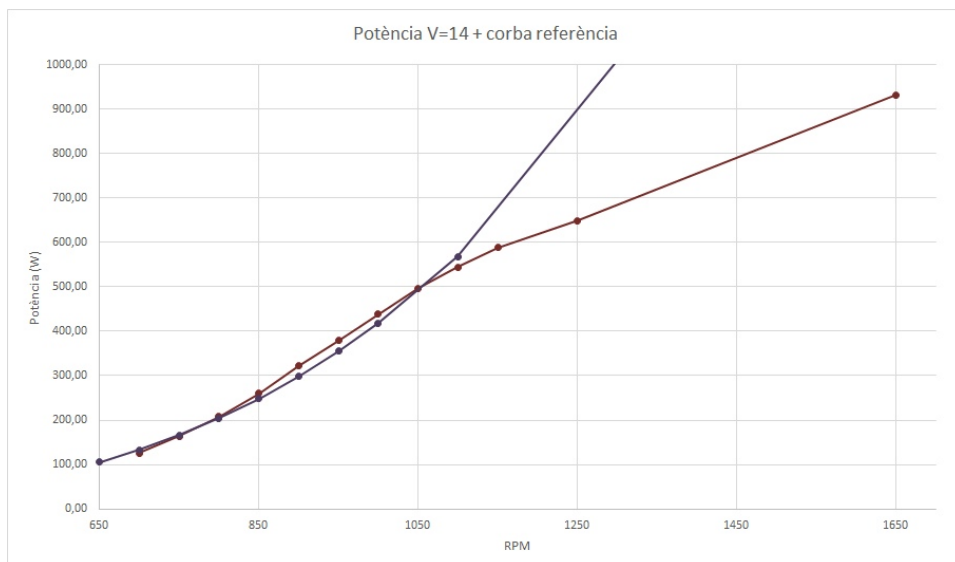


Figura B.17: Potència per a una velocitat del vent de 14 m/s juntament amb la línia de regressió.

## Apèndix C

# Pressupost

El pressupost per a la realització d'aquest projecte, desglossat en els seus conceptes principals, ha estat de:

Concepte	Unitats	Preu unitari (€/u)	Preu (€)
Preparació simulacions	50	50	2.500
Redacció projecte	100	30	3.000
Simulació	1.000	0,6	600
Llicències programes informàtics	0,114	26.400	3.010
Total sense IVA			9.110
IVA (21%)			1.913,1
<b>Total</b>			<b>11.023,1</b>