

Treball final de grau

Estudi: Grau en Tecnologies Industrials

Títol: Simulació fluídica amb programari de codi lliure de l'aerogenerador minieòlic del laboratori d'energies de l'EPS.

Document: Memòria i Annexos

Alumne: Xavier Orri Vila

Tutor: Josep Ramon González Castro

Departament: Enginyeria mecànica i de la construcció industrial

Àrea: Mecànica de fluids

Tutor: Josep Ricart Ferrer

Departament: Doctorand, departament de producte

Àrea: Comexi Group Industries

Convocatòria (mes/any): Setembre 2016

AGRAÏMENTS

Per a la realització d'aquest treball ha resultat imprescindible l'ajuda de diverses persones, sense les quals aquest estudi no hauria estat possible. Voldria fer arribar els meus agraïments:

al meu tutor extern, el Sr. Josep Ricart i Ferrer, que m'ha ajudat en les nombroses dificultats que se m'han presentat amb l'OpenFOAM, així com altres aspectes tècnics del treball;

al meu tutor, el Dr. Josep Ramon González Castro, que m'ha permès realitzar aquest treball i m'ha orientat durant el transcurs d'aquest;

a en Ferran Serra Felip, que va dissenyar l'actual suport del nou ventilador del laboratori d'energies i va participar activament en els assajos experimentals de l'aerogenerador;

i als Srs. Albert Massaguer Colomer i Eduard Massaguer Colomer, que m'han ajudat a realitzar el muntatge del banc de proves del laboratori.

ÍNDIX

1. INTRODUCCIÓ	1
1.1 ANTECEDENTS.....	1
1.2 OBJECTE DE L'ESTUDI	2
1.3 ESPECIFICACIONS I ABAST	2
1.3.1 Especificacions	2
1.3.2 Abast	3
2. DESCRIPCIÓ DE LA SOLUCIÓ	4
2.1 L'AEROGENERADOR.....	4
2.1.1 Components bàsics d'un aerogenerador minieòlic.....	5
2.1.2 Principi bàsic de funcionament i càlcul teòric de la potència màxima generada: límit de Betz	6
2.1.3 Model Guangmang M-300	12
2.2 DESCRIPCIÓ DEL FUNCIONAMENT BÀSIC DE L'OPENFOAM	14
2.2.1 Estructura general dels casos d'OpenFOAM	15
2.2.2 Creació del cas	16
2.3 ANÀLISI DEL RÈGIM DE TREBALL DEL FLUID	21
2.3.1 Número de Reynolds	21
2.3.2 Models de turbulència	21
3. SIMULACIONS AL LABORATORI D'ENERGIES	25
3.1 PREPARACIÓ DEL BANC DE PROVES.....	25
3.2 METODOLOGIA DELS ASSAJOS	28
4. SIMULACIONS AMB L'OPENFOAM	40
4.1 PROGRAMARI	40
4.1.1 SolidWorks 2014.....	40
4.1.2 ParaView	40
4.2 PRE-PROCÉS.....	41
4.2.1 Generació de la geometria i preparació del cas	41

4.2.2 Creació i anàlisi del mallat	43
4.2.4 Configuració de les condicions de contorn	49
4.3 CÀLCUL	49
4.3.1 Elecció del solver de l'OpenFOAM i configuració de les condicions d'execució.....	50
4.3.2 Determinació dels paràmetres a variar en les simulacions.....	50
4.4 POST-PROCÉS	51
4.4.1 Velocitats	52
4.4.2 Pressions.....	55
4.4.3 Moments.....	58
4.5 OBTENCIÓ DE LA CORBA DE POTÈNCIA.....	60
5. SÍNTESI DE RESULTATS	63
6. RESUM DEL PRESSUPOST	64
7. CONCLUSIONS FINALS	65
8. BIBLIOGRAFIA.....	68
9. ÍNDEX DE DOCUMENTS	70
ANNEX A: CÀLCUL CONDICIONS INICIALS DE LES SIMULACIONS	71
ANNEX B: RESULTATS DE LES SIMULACIONS	75
ANNEX C: DOCUMENTACIÓ OPENFOAM	85
C.1 CARPETA "0"	86
C.1.1 Arxiu "k"	86
C.1.2 Arxiu "nut"	87
C.1.3 Arxiu "omega"	90
C.1.4 Arxiu "p"	91
C.1.5 Arxiu "u"	92
C.2 CARPETA "CONSTANT"	93
C.2.1 Carpeta "triSurface"	93
C.2.2 Arxiu "dynamicMeshDict"	94
C.2.3 Arxiu "transportProperties"	95

C.2.4 Arxiu "turbulenceProperties"	95
C.3 CARPETA "SYSTEM"	97
C.3.1 Arxiu "blockMeshDict"	97
C.3.2 Arxiu "controlDict"	99
C.3.3 Arxiu "createPatchDict"	101
C.3.4 Arxiu "decomposeParDict"	103
C.3.5 Arxiu "forces"	105
C.3.6 Arxiu "fvSchemes"	106
C.3.7 Arxiu "fvSolution"	107
C.3.8 Arxiu "readFields"	110
C.3.9 Arxiu "snappyHexMeshDict"	111
C.3.10 Arxiu "surfaceFeatureExtractDict"	119
C.3.11 Arxiu "createInletOutletSets.topoSetDict"	120
C.4 ARXIU "MACHINES"	121
C.5 COMANDES UTILITZADES PER A EXECUTAR LES SIMULACIONS	122
ANNEX D: RESULTATS SIMULACIONS AL TÚNEL DE VENT	124
ANNEX E: PLÀNOLS.....	148
ANNEX F: INFORMACIÓ TÈCNICA DEL VENTILADOR.....	151
ANNEX G: PRESSUPOST	154

ÍNDIX DE FIGURES

Figura 1: Tipus d'aerogeneradors	5
Figura 2: volum d'aire escombrat per l'aerogenerador	7
Figura 3: evolució de la pressió i velocitat al llarg del volum de control.....	7
Figura 4: flux d'aire amb turbulències	11
Figura 5: evolució del coeficient de potència i el coeficient impuls	12
Figura 6: explosionat de l'aerogenerador Guangmang M-300, obtingut directament del manual del producte	12
Figura 7: corba de potència de l'aerogenerador Guangmang M-300	13
Figura 8: procediment bàsic per a l'execució d'un cas en OpenFOAM	14
Figura 9: estructura del directori d'un cas en OpenFOAM.....	15
Figura 10: elecció del <i>solver</i>	17
Figura 11: creació de la malla	18
Figura 12: definició de les condicions de contorn.....	19
Figura 13: definició de les condicions d'execució.....	20
Figura 14: instal·lació del <i>honeycomb</i> a l'entrada del túnel de vent.....	26
Figura 15: túnel de vent del laboratori d'energies amb variador de freqüència incorporat	26
Figura 16: variador de freqüència Schneider Altivar 630.....	27
Figura 17: connexions als mòduls d'adquisició de dades.....	28
Figura 18: gràfica potència elèctrica mesurada – revolucions per minut amb alimentació del ventilador a 50 Hz	30
Figura 19: gràfica potència elèctrica mesurada – resistència amb alimentació del ventilador a 50 Hz.....	31
Figura 20: gràfica coeficient de potència – <i>Tip Speed Ratio</i> amb alimentació del ventilador a 50 Hz.....	32
Figura 21: superposició de les corbes de potència obtingudes al banc de proves	33
Figura 22: corba experimental potència elèctrica òptima – freqüència de gir obtinguda al banc de proves	33
Figura 23: gràfica d'adequació velocitat incident calculada a partir de la T.S.R amb la velocitat del vent mesurada	35
Figura 24: comparativa corba experimental potència – RPM amb la corba del fabricant	36
Figura 25: comparativa corba experimental potència – velocitat del vent amb la corba del fabricant	37

Figura 26: corba de potència òptima experimental.....	38
Figura 27: renderitzat de la geometria final Guangmang M-300.....	41
Figura 28: fragmentació de la superfície de l'aerogenerador per a la preparació del refinament de la malla.....	42
Figura 29: dimensions del canal d'aire.....	44
Figura 30: volum de control del canal d'aire.....	44
Figura 31: refinament de la malla a les zones properes a l'aerogenerador	45
Figura 32: refinament de la malla en les seccions més crítiques de les pales.....	46
Figura 33: cel·les i <i>patches</i> continguts en la malla	46
Figura 34: classificació dels tipus de cel·les que conformen la malla	47
Figura 35: execució del <i>checkMesh</i>	47
Figura 36: mallat del volum de control aplicant condicions de simetria	49
Figura 37: estructura bàsica del cas	49
Figura 38: evolució de les pressions i les velocitats al llarg del volum de control	51
Figura 39: velocitats del vent simulades obtingudes en el canal d'aire (vista longitudinal)	53
Figura 40: velocitats del vent simulades obtingudes en el canal d'aire (vista transversal).....	54
Figura 41: vorticitats de l'aire simulades dins del canal d'aire	55
Figura 42: distribució de pressions a la superfície de l'aerogenerador (vista global) ...	56
Figura 43: distribució de pressions al perfil aerodinàmic	56
Figura 44: fluid real amb viscositat al voltant d'un perfil que per reacció crea una corrent igual a Γ i de sentit contrari	57
Figura 45: distribució de pressions a les pales de l'aerogenerador en detall.....	58
Figura 46: parell mecànic instantani provocat sobre l'eix de rotació.....	59
Figura 47: superposició de les corbes de potència simulades.....	60
Figura 48: corba òptima simulada potència mecànica – freqüència de gir	61
Figura 49: distribució potència mecànica simulada – velocitat del vent incident.....	61
Figura 50: comparació corba de potència simulada amb la corba facilitada pel fabricant	62
Figura 51: corba de rendiment en la conversió de potència mecànica a elèctrica	63
Figura 52: potència mecànica simulada – revolucions per minut per a un vent incident de 3 m/s.....	78
Figura 53: parell mecànic simulat – revolucions per minut per a un vent incident de 3 m/s.....	78
Figura 54: potència mecànica simulada – revolucions per minut per a un vent incident de 5 m/s.....	79

Figura 55: parell mecànic simulat – revolucions per minut per a un vent incident de 5 m/s.....	79
Figura 56: potència mecànica simulada – revolucions per minut per a un vent incident de 6 m/s.....	80
Figura 57: parell mecànic simulat – revolucions per minut per a un vent incident de 6 m/s.....	80
Figura 58: potència mecànica simulada – revolucions per minut per a un vent incident de 7 m/s.....	81
Figura 59: parell mecànic simulat – revolucions per minut per a un vent incident de 7 m/s.....	81
Figura 60: potència mecànica simulada – revolucions per minut per a un vent incident de 9 m/s.....	82
Figura 61: parell mecànic simulat – revolucions per minut per a un vent incident de 9 m/s.....	82
Figura 62: potència mecànica simulada – revolucions per minut per a un vent incident de 11 m/s.....	83
Figura 63: parell mecànic simulat – revolucions per minut per a un vent incident de 11 m/s.....	83
Figura 64: potència mecànica simulada – revolucions per minut per a un vent incident de 13 m/s.....	84
Figura 65: parell mecànic simulat – revolucions per minut per a un vent incident de 13 m/s.....	84
Figura 66: estructura carpeta 0	86
Figura 67: estructura carpeta constant.....	93
Figura 68: estructura carpeta triSurface.....	93
Figura 69: estructura carpeta system.....	97
Figura 70: zona de contacte dels AMI	101
Figura 71: estructura del FRAM de la UdG	122
Figura 72: potència elèctrica mesurada – resistència amb alimentació del ventilador a 10 Hz	130
Figura 73: potència elèctrica mesurada – revolucions per minut amb alimentació del ventilador a 10 Hz.....	131
Figura 74: coeficient de potència – <i>Tip Speed Ratio</i> amb alimentació del ventilador a 10 Hz	131
Figura 75: potència elèctrica mesurada – resistència amb alimentació del ventilador a 14 Hz	132

Figura 76: potència elèctrica mesurada – revolucions per minut amb alimentació del ventilador a 14 Hz.....	132
Figura 77: coeficient de potència – <i>Tip Speed Ratio</i> amb alimentació del ventilador a 14 Hz.....	133
Figura 78: potència elèctrica mesurada – resistència amb alimentació del ventilador a 18 Hz.....	133
Figura 79: potència elèctrica mesurada – revolucions per minut amb alimentació del ventilador a 18 Hz.....	134
Figura 80: coeficient de potència – <i>Tip Speed Ratio</i> amb alimentació del ventilador a 18 Hz.....	134
Figura 81: potència elèctrica mesurada – resistència amb alimentació del ventilador a 22 Hz.....	135
Figura 82: potència elèctrica mesurada – revolucions per minut amb alimentació del ventilador a 22 Hz.....	135
Figura 83: coeficient de potència – <i>Tip Speed Ratio</i> amb alimentació del ventilador a 22 Hz.....	136
Figura 84: potència elèctrica mesurada – resistència amb alimentació del ventilador a 26 Hz.....	136
Figura 85: potència elèctrica mesurada – revolucions per minut amb alimentació del ventilador a 26 Hz.....	137
Figura 86: coeficient de potència – <i>Tip Speed Ratio</i> amb alimentació del ventilador a 26 Hz.....	137
Figura 87: potència elèctrica mesurada – resistència amb alimentació del ventilador a 30 Hz.....	138
Figura 88: potència elèctrica mesurada – revolucions per minut amb alimentació del ventilador a 30 Hz.....	138
Figura 89: coeficient de potència – <i>Tip Speed Ratio</i> amb alimentació del ventilador a 30 Hz.....	139
Figura 90: potència elèctrica mesurada – resistència amb alimentació del ventilador a 34 Hz.....	139
Figura 91: potència elèctrica mesurada – revolucions per minut amb alimentació del ventilador a 34 Hz.....	140
Figura 92: coeficient de potència – <i>Tip Speed Ratio</i> amb alimentació del ventilador a 34 Hz.....	140
Figura 93: potència elèctrica mesurada – resistència amb alimentació del ventilador a 38 Hz.....	141

Figura 94: potència elèctrica mesurada – revolucions per minut amb alimentació del ventilador a 38 Hz.....	141
Figura 95: coeficient de potència – <i>Tip Speed Ratio</i> amb alimentació del ventilador a 38 Hz.....	142
Figura 96: potència elèctrica mesurada – resistència amb alimentació del ventilador a 42 Hz.....	142
Figura 97: potència elèctrica mesurada – revolucions per minut amb alimentació del ventilador a 42 Hz.....	143
Figura 98: coeficient de potència – <i>Tip Speed Ratio</i> amb alimentació del ventilador a 42 Hz.....	143
Figura 99: potència elèctrica mesurada – resistència amb alimentació del ventilador a 46 Hz.....	144
Figura 100: potència elèctrica mesurada – revolucions per minut amb alimentació del ventilador a 46 Hz.....	144
Figura 101: coeficient de potència – <i>Tip Speed Ratio</i> amb alimentació del ventilador a 46 Hz.....	145
Figura 102: potència elèctrica mesurada – resistència amb alimentació del ventilador a 50 Hz.....	145
Figura 103: potència elèctrica mesurada – revolucions per minut amb alimentació del ventilador a 50 Hz.....	146
Figura 104: coeficient de potència – <i>Tip Speed Ratio</i> amb alimentació del ventilador a 50 Hz.....	146
Figura 105: ampliació de la superposició a baixes revolucions de les corbes òptimes obtingudes al banc de proves	147

ÍNDIX DE TAULES

Taula 1: valor experimentals amb alimentació del ventilador a 50 Hz	29
Taula 2: valors de la corba de potència òptima experimental.....	34
Taula 3: valors emprats per a calcular la λ_{opt}	35
Taula 4: càlcul de la freqüència de gir òptima a partir de la T.S.R.....	73
Taula 5: valors de les variables turbulents per a cada velocitat del vent	74
Taula 6: resultats de les simulacions	77
Taula 7: valors experimentals amb alimentació del ventilador a 10 Hz	125
Taula 8: valors experimentals amb alimentació del ventilador a 14 Hz	126
Taula 9: valors experimentals amb alimentació del ventilador a 18 Hz	126
Taula 10: valors experimentals amb alimentació del ventilador a 22 Hz	126
Taula 11: valors experimentals amb alimentació del ventilador a 26 Hz	127
Taula 12: valors experimentals amb alimentació del ventilador a 30 Hz	127
Taula 13: valors experimentals amb alimentació del ventilador a 34 Hz	128
Taula 14: valors experimentals amb alimentació del ventilador a 38 Hz	128
Taula 15: valors experimentals amb alimentació del ventilador a 42 Hz	129
Taula 16: valors experimentals amb alimentació del ventilador a 46 Hz	129
Taula 17: valors experimentals amb alimentació del ventilador a 50 Hz	130
Taula 18: valors representatius de la corba òptima obtinguda al banc de proves.....	147

1. INTRODUCCIÓ

En el següent capítol s'exposarà la idea bàsica que motiva la realització del present projecte, així com les especificacions i l'abast que definiran la seva estructura i contingut.

1.1 ANTECEDENTS

Actualment les energies renovables ocupen un paper cada cop més important en la generació d'energia elèctrica dels països més desenvolupats i cada cop són més evidents els perjudicis que comporta l'ús continuat dels combustibles fòssils, principals causants del canvi climàtic.

Es presenta un futur on és obvi que les energies renovables hauran de substituir quasi per complet les fonts energètiques de tipus no renovable, principalment perquè són recursos naturals que s'estan esgotant i, en conseqüència, el seu cost d'adquisició augmenta de forma gradual. Una altra de les raons per les quals s'han de potenciar les energies renovables és perquè s'ha de posar fi a les emissions desproporcionades de CO₂ que es realitzen de forma continuada a l'atmosfera.

Una de les alternatives més prometedores de cara a la substitució dels combustibles fòssils és l'energia eòlica, capaç de generar energia elèctrica de forma eficient mitjançant l'aprofitament de l'energia cinètica del vent. Aquest tipus d'energia resulta eficient i n'és una prova d'això que, durant el transcurs de l'any 2015, l'energia eòlica va ocupar la tercera posició com a font de generació d'energia elèctrica a Espanya.

A més, durant els darrers anys, la tecnologia ha permès avanços molt importants en l'ús de les energies renovables, no només millorant-ne la seva eficiència, sinó també acostant cada cop més aquestes tecnologies al petit consumidor.

Per tal de poder investigar nous mètodes aplicables a aquest tipus de generació elèctrica es necessita l'ús de programes informàtics, que resulten indispensables per tal de dur a terme simulacions mecàniques i també de tipus fluidomecànic, entre d'altres. Actualment es disposen de moltes d'aquestes eines informàtiques en el mercat, però el principal problema és que no estan a l'abast de les petites empreses, principalment perquè s'ha de comprar una llicència anual que acostuma a ser econòmicament inaccessible. Com a conseqüència d'aquest impediment, ha sorgit la necessitat de crear nous programes de llicència gratuïta, i el més destacat en el camp

d'aplicació que afecta a aquest projecte és l'OpenFOAM, que funciona amb la plataforma Linux.

1.2 OBJECTE DE L'ESTUDI

L'objecte del present Treball de Fi de Grau és el de determinar la corba de potència de l'aerogenerador minieòlic del laboratori d'energies de l'EPS mitjançant dues metodologies diferents, a fi i a efecte de comparar-les finalment amb la corba facilitada pel fabricant. La primera d'aquestes metodologies consistirà a realitzar un seguit de simulacions fluídiques mitjançant l'ús de programari lliure, i la segona consistirà a prendre mesures directament del túnel de vent obert que actualment està disponible al mateix laboratori d'energies.

Un cop s'hauran determinat aquestes corbes de potència, s'apreciaran les similituds respecte a la corba facilitada pel fabricant i se n'extrauran conclusions. Aquestes últimes permetran verificar si efectivament les eines informàtiques actuals permeten obtenir uns resultats fiables i molt propers als resultats reals, a fi d'estalviar importants inversions en creacions de prototips durant el disseny i desenvolupament de nous models d'aerogeneradors.

1.3 ESPECIFICACIONS I ABAST

En aquest apartat es farà una descripció de quines seran les especificacions que s'hauran de complir en tot moment en el disseny del producte i quin serà l'abast del projecte, que serà el que definirà els marges d'actuació.

1.3.1 Especificacions

Les especificacions que s'imposen en el transcurs i resultat final de la simulació de l'aerogenerador minieòlic són les que segueixen:

- Pel disseny de la geometria s'usarà el programa de disseny amb 3D SolidWorks 2014. Per altra banda, per a realitzar les simulacions fluidomecàniques s'emprarà l'OpenFOAM, versió 3.0.1 i per a la visualització dels resultats s'emprarà el ParaView, versió 4.4.0.

- Pel càlcul de les simulacions s'utilitzarà el servidor del FRAM de la UdG, un servidor compost per un total de 10 nodes, amb 8 nuclis cada un d'ells.
- Es complementaran les simulacions assistides per ordinador amb la realització d'unes proves experimentals que consistiran en la presa de magnituds físiques gràcies a l'ajuda del túnel de vent obert del laboratori d'energies de l'EPS . Per a l'adquisició de dades serà necessari utilitzar el LabView.
- S'utilitzarà un perfil aerodinàmic aproximat ja que no es disposa de la referència exacta.

1.3.2 Abast

Aquest projecte contempla la determinació de la corba de potència únicament de l'aerogenerador minieòlic del laboratori d'energies de l'EPS. Es treballarà amb una geometria generada a partir de mesures geomètriques, així com el seu perfil aerodinàmic, i altres dades preses de forma directa.

Si bé que en els resultats es determinaran els possibles errors i aspectes a millorar en les simulacions, aquest projecte no es proposa realitzar una comparació entre el programari de codi lliure emprat i altres eines informàtiques d'ús comercial. Tampoc inclou la realització d'un estudi detallat dels diferents sistemes i equips de generació d'energia eòlica, només es realitzarà una breu contextualització, necessària per a desenvolupar i entendre de forma correcta el treball.

Finalitzats els assajos experimentals al túnel de vent obert, s'identificaran els aspectes que caldria millorar, així com els causants dels possibles errors avaluats.

2. DESCRIPCIÓ DE LA SOLUCIÓ

En els següents apartats es realitza una descripció detallada de cadascuna de les parts que componen el present Treball de Fi de Grau.

2.1 L'AEROGENERADOR

Un aerogenerador no és altra cosa que un aparell que permet extreure l'energia cinètica del vent per convertir-la en potència. Si bé és cert que actualment es segueix aplicant en la tecnologia eòlica la idea bàsica que regia el funcionament dels primers aerogeneradors que van aparèixer, el desenvolupament de la tecnologia i el constant increment de la producció i consum de les indústries, han propiciat una important millora de la disponibilitat dels aerogeneradors, dels seus rendiments de producció, reducció dels costos d'adquisició, d'instal·lació, d'operació i de manteniment.

Així doncs, tot aquest llarg camí d'investigació i millores ha contribuït a un increment progressiu de la potència unitària, arribant a un punt en el qual és possible trobar al mercat aerogeneradors comercials de potència unitària superior al MW.

Tot i que ha sigut llarg el recorregut que ha experimentat aquesta tecnologia eòlica des del moment que va néixer fins a l'actualitat, encara són molts els objectius que segueixen vigents. Aquests objectius, en concret, són: millora de la qualitat de l'energia, increment de la capacitat de penetració en xarxa, reducció de l'impacte mediambiental i reducció dels costos de generació. Una reducció dels costos de generació és accessible a partir de millores en el rendiment de transformació i de disponibilitat, millora en els dissenys mecànics, desenvolupament de nous sistemes de regulació de potència i ús de materials més efectius.

Paral·lelament a l'increment progressiu de les potències dels aerogeneradors, la innovació tecnològica també ha permès acostar més aquest tipus d'energia al petit consumidor. Això ha estat possible amb l'aparició dels aerogeneradors minieòlics que, com el seu nom indica, són aerogeneradors de petita potència i mida, però amb un cost d'adquisició cada cop més assequible.

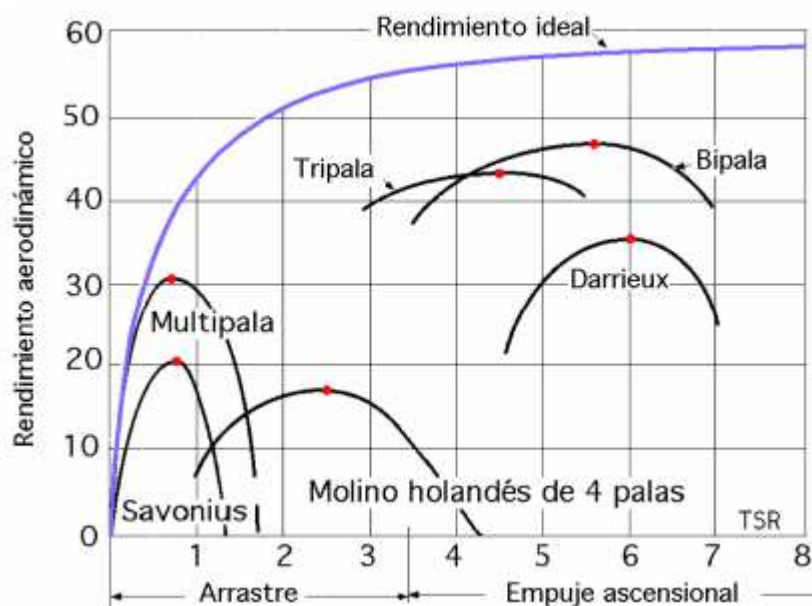


Figura 1: Tipus d'aerogeneradors

Font: Pedro Fernández Díez. *Energía Eólica*. (<http://es.pfernandezdiez.es/libro/?id=6>, juliol de 2016)

A la Figura 1 es representen els principals models d'aerogeneradors existents en funció de la velocitat específica (λ) i del coeficient de potència. Tal i com s'observa, els models més eficients són aquells que disposen d'eix horitzontal i estan compostos per tres pales. A més, el seu funcionament es basa en l'aprofitament de les forces de sustentació, que són les que tenen una direcció perpendicular al vent.

Com més alt és el valor de la velocitat específica, major és el coeficient màxim de potència que es pot arribar a obtenir. Així doncs, si s'obtingués un valor d'aquest coeficient igual a infinit, s'assoliria el màxim teòric, que correspon al límit de Betz. No obstant, per raons de resistència de materials i factors acústics existeixen limitacions en la determinació d'aquest paràmetre.

2.1.1 Components bàsics d'un aerogenerador minieòlic

Per tal de fer-se una idea bàsica de l'aparell sotmès a estudi, es realitza una breu anàlisi dels components generals que conformen un aerogenerador de baixa potència.

-**ROTOR**: actualment la majoria d'aerogeneradors disponibles al mercat són d'eix horitzontal a sobrevent, tot i que també existeixen models d'eix horitzontal a sotavent. Per a aquests tipus d'aerogeneradors es poden trobar rotors des de 2 fins a 6 pales. Normalment per a aerogeneradors amb una potència nominal inferior als 250W s'acostuma a utilitzar un major nombre de pales, com és el cas de l'aerogenerador que es sotmet a estudi.

-GENERADOR: en el cas dels aerogeneradors inferiors a 3 kW, es troba en pràcticament tots els models un alternador d'imans permanents de 4,6,8 o 10 pols.

-SISTEMA DE REGULACIÓ DE VELOCITAT I SISTEMA DE FRENAT: La normativa actual recomana que existeixi una regulació i limitació de velocitat, concretament a l'apartat 5 sobre aerogeneradors de la norma UNE-EN 61400-2: *deben utilizarse uno o más sistemas de protección si es necesario para mantener el aerogenerador dentro de los límites de diseño.*

A continuació es descriuen els cinc possibles sistemes de regulació i frenat que existeixen.

1. No disposen de regulació: són generadors preparats per treballar en totes les condicions de rotació.
2. Regulació per desorientació: l'eix del rotor està desalineat amb el pla horitzontal respecte a la direcció del vent incident.
3. Regulació per desorientació de l'eix vertical
4. Regulació pel canvi de pas: es realitza una regulació de l'angle d'atac de les pales mitjançant sistemes centrífugs.
5. Regulació per pèrdua aerodinàmica.

-SISTEMA D'ORIENTACIÓ: el sistema més utilitzat pels aerogeneradors d'eix horitzontal sobrevent és el de timó de cua.

2.1.2 Principi bàsic de funcionament i càlcul teòric de la potència màxima generada: límit de Betz

El concepte bàsic de funcionament de tota màquina eòlica consisteix a “eliminar” certa energia cinètica del vent que travessa el disc del rotor i aprofitar-la en benefici propi. Assumint que la massa d'aire que travessa el rotor es manté separada de l'aire que l'envolta, se'n pot diferenciar el volum de control en forma de tub irregular representat a la Figura 2. Suposant que en el seu funcionament més ideal l'aire no travessa els límits del volum de control del tub, es pot considerar que la massa del flux d'aire és constant en totes les seccions al llarg de l'eix axial.

Sabent que la velocitat de l'aire disminueix al passar pel rotor però no es comprimeix, l'àrea de la secció del flux s'expandeix per tal d'acomodar l'aire amb velocitat inferior.

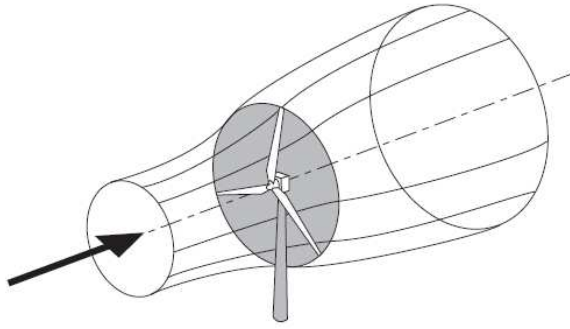


Figura 2: volum d'aire escombrat per l'aerogenerador

Font: Tony Burton, Nick Jenkins. *Wind Energy Handbook*. Segona edició. John Wiley & Sons. 2011

A continuació es realitza una aprofundiment d'aquest volum de control, ja que resulta d'interès conèixer i estudiar el recorregut i canvis que experimenta el flux d'aire.

La presència de la turbina provoca que l'aire que s'aproxima vagi reduint de forma gradual la velocitat, de tal manera que, quan l'aire arriba al rotor, la velocitat d'aquest flux és inferior a la velocitat del corrent d'aire lliure. Tanmateix es produeix un augment de la pressió estàtica en arribar al rotor com a conseqüència directa de la disminució de l'energia cinètica. Posteriorment, l'aire situat justament a continuació del rotor, experimenta una important caiguda de pressió situant-la a valors inferiors a la pressió atmosfèrica. Aquesta caiguda sobtada de pressió s'explica pel treball realitzat per l'aire sobre les pales de l'aerogenerador. Aquests canvis de pressió i velocitat al llarg de l'eix axial del volum de control es poden apreciar a la Figura 3.

Com a resultat d'això, queda demostrat que, quan es realitzin les posteriors simulacions, es treballarà sota la hipòtesi d'aire incompressible.

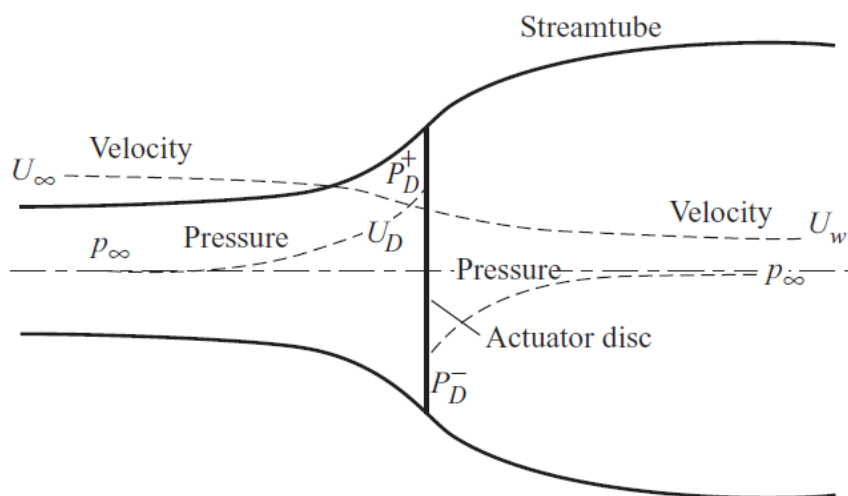


Figura 3: evolució de la pressió i velocitat al llarg del volum de control.

Font: Tony Burton, Nick Jenkins. *Wind Energy Handbook*. Segona edició. John Wiley & Sons. 2011

La massa d'aire que passa a través d'una determinada secció transversal del tub és ρAU , on ρ és la densitat de l'aire, A és l'àrea de la secció transversal i U la velocitat del flux. Tal i com s'havia comentat anteriorment, el cabal màssic ha de ser constant en qualsevol punt i, per tant, se'n pot deduir la següent expressió:

$$\dot{m} = \rho A_{\infty} U_{\infty} = \rho A_D U_D = \rho A_W U_W \quad \text{Equació 1}$$

On el símbol ∞ es refereix a les condicions del corrent d'aire lliure aigües amunt, D a les condicions en el rotor i W a les condicions d'un punt llunyà aigües avall.

És usual considerar un factor d'inducció de flux axial ' a ', originat per la variació de velocitat induïda pel disc del rotor. Així doncs, caldrà introduir un nou terme en la velocitat de manera que en la secció del disc es complirà:

$$U_D = U_{\infty} (1 - a) \quad \text{Equació 2}$$

Una manera d'entendre el factor d'inducció de forma senzilla i entenedora, és definint-lo com la permeabilitat que ofereix l'aerogenerador en front el pas d'aire. Per a valors del factor d'inducció iguals a la unitat, el rotor actuaria en certa manera com un disc sòlid.

A continuació, aplicant conservació de quantitat de moviment i considerant que en el rotor es produirà una força resultant del canvi de pressions s'obté:

$$\Delta F = (U_{\infty} - U_W) \rho A_D U_D \quad \text{Equació 3}$$

Es consideren les pressions abans i després del rotor, així com el factor d'inducció:

$$(p_D^+ - p_D^-) A_D = (U_{\infty} - U_W) \rho A_D U_{\infty} (1 - a) \quad \text{Equació 4}$$

Resulta d'interès aplicar l'equació de Bernoulli entre la secció aigües amunt i la secció just abans del rotor, tot i que cal tenir en compte que l'energia total entre aigües amunt i aigües avall serà diferent. Per tant, caldrà realitzar dos balanços per separat:

$$\frac{1}{2}\rho U^2 + p + \rho gh = \text{const} \quad \text{Equació 5}$$

Es substitueix:

$$\frac{1}{2}\rho_{\infty}U_{\infty}^2 + p_{\infty} + \rho_{\infty}gh_{\infty} = \frac{1}{2}\rho_D U_D^2 + p_D^+ + \rho_D gh_D$$

On p_D^+ és la pressió estàtica –superior a la pressió atmosfèrica- que hi ha a la secció just abans que l'aire travessi el rotor.

Com que s'està treballant sota la hipòtesi de flux incompressible i els dos punts on es realitza el balanç es troben a la mateixa cota horitzontal, s'obté:

$$\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2 + p_{\infty} = \frac{1}{2}\rho U_D^2 + p_D^+ \quad \text{Equació 6}$$

Paral·lelament, aigües avall s'obté aquesta altra expressió:

$$\frac{1}{2}\rho U_w^2 + p_{\infty} = \frac{1}{2}\rho U_D^2 + p_D^- \quad \text{Equació 7}$$

On p_D^- és la depressió estàtica just després del rotor. A continuació, combinant l'equació 6 i 7:

$$(p_D^+ - p_D^-) = \frac{1}{2}\rho(U_{\infty}^2 - U_w^2) \quad \text{Equació 8}$$

Aplicant conservació de quantitat de moviment i balanços energètics, és a dir, combinant l'equació 4 i 8, s'obté:

$$\frac{1}{2}\rho(U_{\infty}^2 - U_w^2)A_D = (U_{\infty} - U_w)\rho A_D U_{\infty}(1-a)$$

I en conseqüència:

$$U_w = (1-2a)U_{\infty} \quad \text{Equació 9}$$

Aplicant l'equació 4 i 9 a la fórmula bàsica per al còmput de la potència en la secció del rotor:

$$P = F \cdot U_D \quad \text{Equació 10}$$

Es calcula la força expressada en funció de la velocitat del vent lliure i es troba l'expressió de la potència:

$$F = (p_D^+ - p_D^-) A_D = 2\rho A_D U_\infty^2 a(1-a)$$

$$P = 2\rho A_D U_\infty^3 a(1-a) \quad \text{Equació 11}$$

Així doncs, l'equació 11 representa una potència lleugerament més propera a la real, ja que s'ha tingut en compte una possible variació en la velocitat provocada pel moviment del rotor. A continuació resultarà interessant calcular quin és el coeficient de potència límit que es pot obtenir: el coeficient de potència de *Lanchester-Betz*.

$$C_P = \frac{\text{Potència}}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^3 A_D} \quad \text{Equació 12}$$

L'equació 12 és simplement una relació entre la potència generada, demostrada anteriorment, i la potència màxima que ha entrat en el sistema, que és l'energia cinètica del vent que ha arribat al rotor.

S'opera i s'obté:

$$C_P = 4a(1-a)^2 \quad \text{Equació 13}$$

Com que el que interessa és trobar el màxim coeficient de potència que es pot assolir es deriva l'equació 13:

$$\frac{dC_P}{da} = 4(1-a)(1-3a) = 0 \quad \text{Equació 14}$$

Quan a prengui com a valor 1/3 la funció de l'equació 14 prendrà un valor màxim:

$$C_{P_{\max}} = \frac{16}{27} = 0.593$$

El resultat anterior mostra el famós coeficient de potència de *Lanchester-Betz*, que indica que com a màxim es podria arribar a aprofitar el 59,3% de l'energia

proporcionada pel component cinètic del vent. Així doncs, el 39,7% de l'energia restant que no s'aprofita, es dissipa en forma de calor i també és retornada al vent en forma de turbulència.

Si bé s'acaba de mencionar que aquesta seria la màxima potència que es podria arribar a assolir, en cap cas s'arribarà a igualar aquest límit, ja que encara no s'ha inclòs el disseny de l'aerogenerador i tampoc s'han tingut en compte les pèrdues que es produiran en els fregaments mecànics entre components, l'eficiència de l'alternador i altres pèrdues. Si es volgués fer una aproximació teòrica molt més precisada s'haurien de tenir en compte les rotacions d'aire i vòrtexs que apareixen a l'estela de l'aerogenerador. Aquestes rotacions i vorticitats es poden apreciar a la Figura 4.

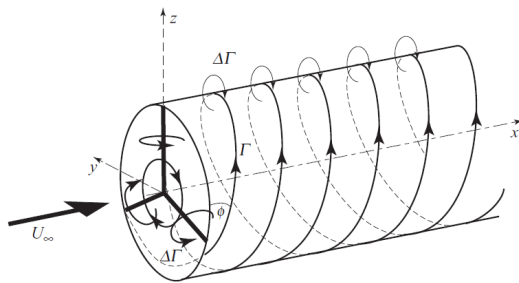


Figura 4: flux d'aire amb turbulències

Font: Tony Burton, Nick Jenkins. *Wind Energy Handbook*. Segona edició. John Wiley & Sons. 2011

No obstant, el valor trobat en l'equació 14 presenta un altre problema que apareix quan s'avalua el coeficient d'impuls C_T . Aquest coeficient és un número adimensional que representa una relació entre la força provocada per la caiguda de pressió en el disc i la màxima força que es podria arribar a assolir:

$$C_T = \frac{2\rho A_D U_\infty^2 a(1-a)}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A_D}$$

$$C_T = 4a(1-a)$$

Equació 15

Si es maximitza l'equació 15, s'obté que $a=1/2$ i això suposa un problema, ja que si es té en compte l'expressió del vent obtinguda en l'equació 9, apareixen velocitats nul·les o negatives. La variació del valor dels dos coeficients presentats en funció del factor d'inducció es pot observar a la Figura 5.

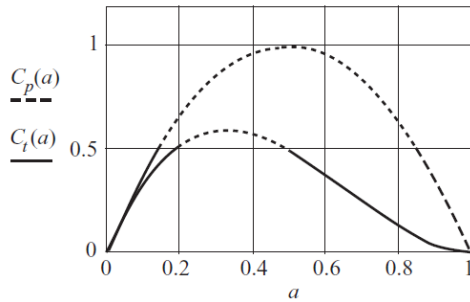


Figura 5: evolució del coeficient de potència i el coeficient impuls

Font: Tony Burton, Nick Jenkins. *Wind Energy Handbook*. Segona edició. John Wiley & Sons. 2011

Si s'analitza amb deteniment què succeeix realment quan s'assoleixen valors elevats del factor d'inducció, s'aprecia fàcilment que no apareixen velocitats negatives, sinó que l'estela de l'aerogenerador esdevé turbulent. Aquesta turbulència està provocada per l'acció d'aire que entra provinent de l'exterior del flux sotmès a estudi. Com a conseqüència d'aquest fet, l'aire que havia perdut velocitat en passar per l'aerogenerador adquireix energia.

A la pràctica, es resol aquest impediment del coeficient C_T mitjançant correccions empíriques.

2.1.3 Model Guangmang M-300

L'aerogenerador que es sotmetrà a estudi és el model M-300 de la marca Guangmang i, segons les normes de certificació d'aerogeneradors del Comitè Electrotècnic Internacional (CEI), entraria dins la classificació de petit aerogenerador. A continuació es presenta un explosionat de l'aparell, extret del manual facilitat pel fabricant:

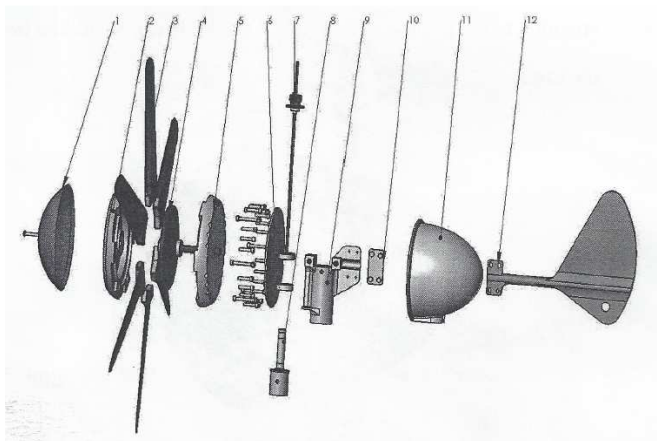


Figura 6: explosionat de l'aerogenerador Guangmang M-300, obtingut directament del manual del producte

Segons la informació del fabricant, l'aparell compleix els punts que es descriuen següidament:

- Es tracta d'un aerogenerador petit de 6 pales, amb un diàmetre total de 0.82 m i un pes de 10.5 kg.
- Les pales i la gòndula estan construïdes amb fibra de vidra reforçada.
- Generador de pols magnètics permanents.
- El voltatge nominal és de 12V i la potència nominal de 90W. La potència màxima que es pot arribar a produir és de 130W.
- Es disposa d'un controlador incorporat, protecció contra curtcircuits i estanqueïtat davant l'entrada d'aigua (IP65).
- Vida útil de 15 anys.
- Rang de funcionament: velocitats del vent de 1.5 m/s – 45 m/s

Per altra banda, s'ha obtingut la següent informació a partir del certificat de conformitat:

- Intensitat nominal 6.6 A
- Parell de posada en marxa 3.16 – 4.75 Nm
- Aïllament 21.5 MΩ

La corba de potència que mostra el comportament energètic de l'aerogenerador es troba representada en la Figura 7. Aquesta corba s'ha obtingut directament d'una web d'un distribuïdor de productes d'aquestes característiques, ja que el fabricant no el va facilitar amb l'aparell.

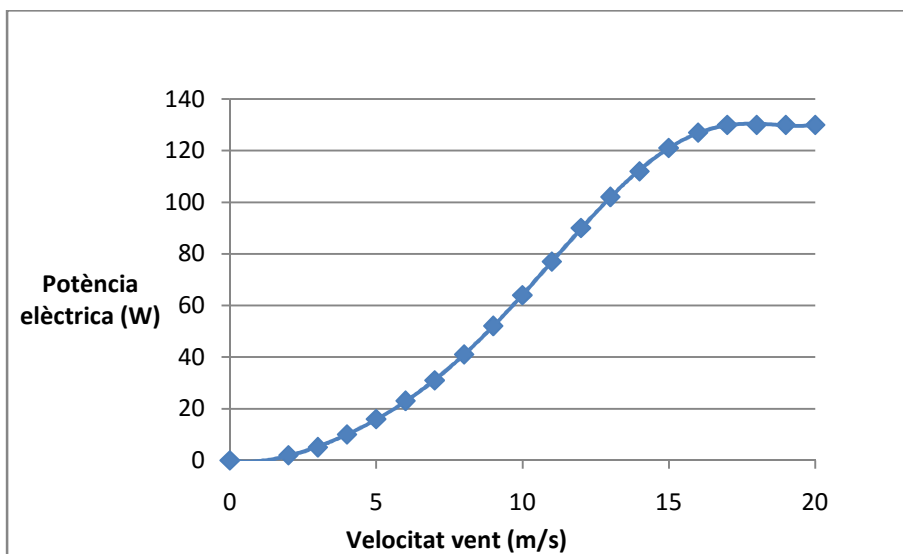


Figura 7: corba de potència de l'aerogenerador Guangmang M-300

2.2 DESCRIPCIÓ DEL FUNCIONAMENT BÀSIC DE L'OPENFOAM

OpenFOAM (Open Field Operation And Manipulation) és un paquet de software de lliure divulgació que ha estat principalment desenvolupat per OpenCDF Ltd, des de l'any 2004. Es tracta d'un software basat en una biblioteca en llenguatge C ++ , usada principalment per a crear executables, coneguts com a aplicacions. Les aplicacions es divideixen en dues categories: els *solvers*, que estan específicament dissenyats per resoldre problemes de mecànica contínua i les *utilitats*, que estan dissenyades per tal d'ajudar en la manipulació de les dades i en la correcta conversió de fitxers per tal que el problema en qüestió pugui ser avaluat pel *solver*.

Tot i que per a utilitzar OpenFOAM no és necessiten uns coneixements molt avançats de programació en C ++, sí que és necessari tenir una idea bàsica de la sintaxi d'aquest llenguatge.

Tal i com es pot observar en la Figura 8, un cas complet de resolució d'un problema CFD amb OpenFOAM consta de tres etapes: una d'inicial, coneguda com a pre-procés, en el qual s'importa la geometria i, mitjançant l'ús de les *utilitats* i eines, es crea el mallat; en segon lloc, s'utilitza el *solver* que prèviament ja haurà estat escollit i finalment el post-procés amb l'ajuda, també, de les *utilitats*.

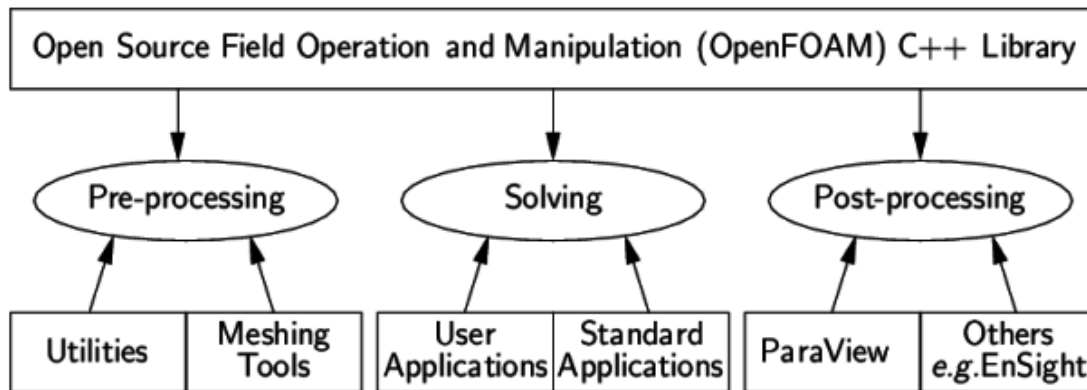


Figura 8: procediment bàsic per a l'execució d'un cas en OpenFOAM

Font: Christopher J. Greenshields, CFD Direct Ltd. OpenFOAM User Guide. 2015 OpenFOAM Foundation Ltd.

2.2.1 Estructura general dels casos d'OpenFOAM

Tal i com s'ha vist en l'apartat anterior, en certes ocasions s'opta per utilitzar una aplicació personalitzada –desenvolupada per l'usuari–, ja que és possible que el problema a resoldre no sigui adequat per cap dels *solvers* disponibles de forma estàndard. Així doncs, se'n ressalta la importància en aquests casos de tenir coneixements bàsics de C++ i també saber quina és l'estructura bàsica de què disposen els casos.

L'estructura bàsica que es requereix en qualsevol cas d'estudi d'OpenFOAM es pot apreciar a la Figura 9:

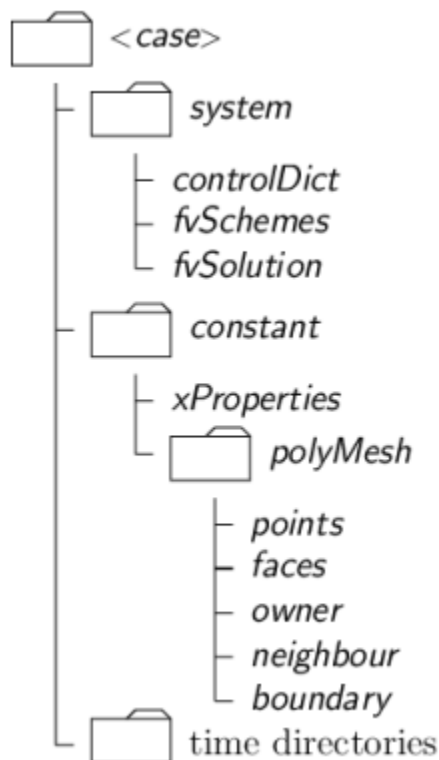


Figura 9: estructura del directori d'un cas en OpenFOAM

Font: Christopher J. Greenshields, CFD Direct Ltd. OpenFOAM User Guide. 2015 OpenFOAM Foundation Ltd.

El directori *system* és el que conté els paràmetres que configuren el mode d'execució de la solució i conté com a mínim tres fitxers: *controlDict*, on es controlen els temps d'inici/fi, els increments de temps i cada quantes iteracions es volen guardar els resultats; en l'arxiu *fvSchemes* es descriuen els esquemes numèrics utilitzats per a resoldre les equacions que apareixen en el solver i l'arxiu *fvSolution*, on es determinen

els esquemes per a resoldre les equacions, les toleràncies i altres algorismes de control.

El fitxer *constant* conté la informació completa del mallat a la subcarpeta *polyMesh* i també conté la informació on s'hi especifiquen les propietats físiques del cas d'estudi.

La carpeta *time directories* conté carpetes individuals de camps individuals. La informació que conté són les condicions inicials i les condicions de contorn que defineixen el problema. Quan el problema a tractar comenci en l'instant $t=0$ s, aquesta carpeta s'anomenarà '0' i si s'inicialitza a un instant de temps 't', llavors la carpeta s'anomenarà 't'.

Tot i que aquesta és l'estructura més bàsica de tots els casos d'OpenFOAM, el nombre de carpetes i el contingut d'aquestes variarà depenent del tipus de problema que es vulgui resoldre i el tipus de *solver* que s'hi apliqui.

2.2.2 Creació del cas

Si bé en el principi d'aquest capítol s'ha descrit quina és l'estructura bàsica de les carpetes d'un fitxer d'OpenFOAM i quines són les tres etapes principals per a l'execució de la simulació, s'ha cregut oportú fer un desenvolupament més acurat a causa de la complexitat del programa.

Per tal de fer el desenvolupament el més senzill possible, s'ha optat per realitzar uns esquemes de blocs que, juntament amb la informació adjunta en l'annex C, descriguin per complet la creació del cas. En l'annex C es troben descrits tots els fitxers de la simulació amb una breu explicació de la funció de cada un d'ells.

La primera de les etapes, representada a l'esquema de la Figura 10, consisteix a escollir el *solver* que s'emprarà, ja que segons quin s'esculli, l'estructura de les carpetes variarà, així com la construcció del domini del volum de control i la geometria.

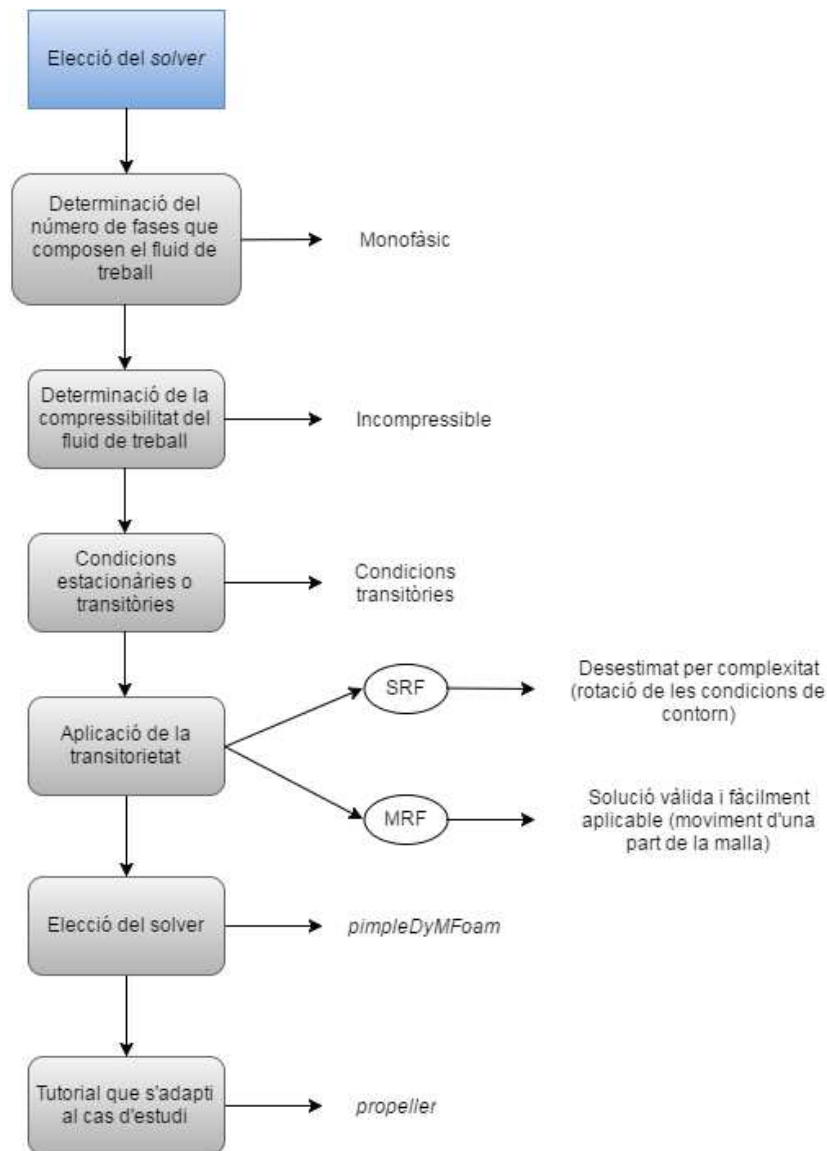


Figura 10: elecció del solver

Una vegada s'ha definit el *solver* i s'ha trobat un tutorial que s'adapta al cas d'estudi, es realitzen les modificacions pertinents sobre aquest per tal d'adaptar-lo a les nostres necessitats. Així doncs, es procedeix a la creació de la malla, tal i com es mostra a la Figura 11.

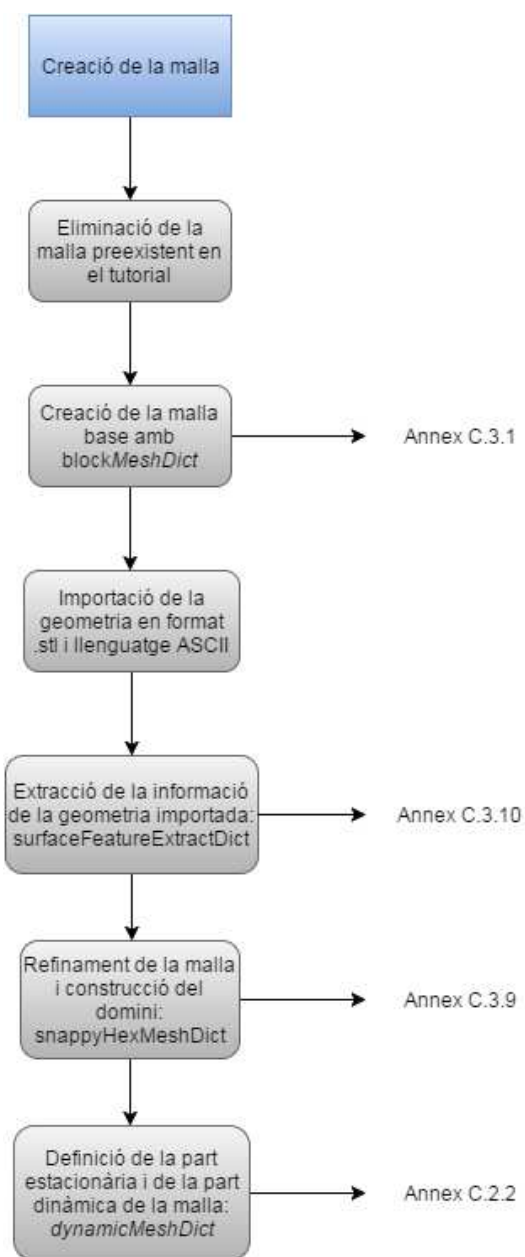


Figura 11: creació de la malla

Acte seguit es procedeix a definir les condicions de contorn tal i com es mostra a la Figura 12.

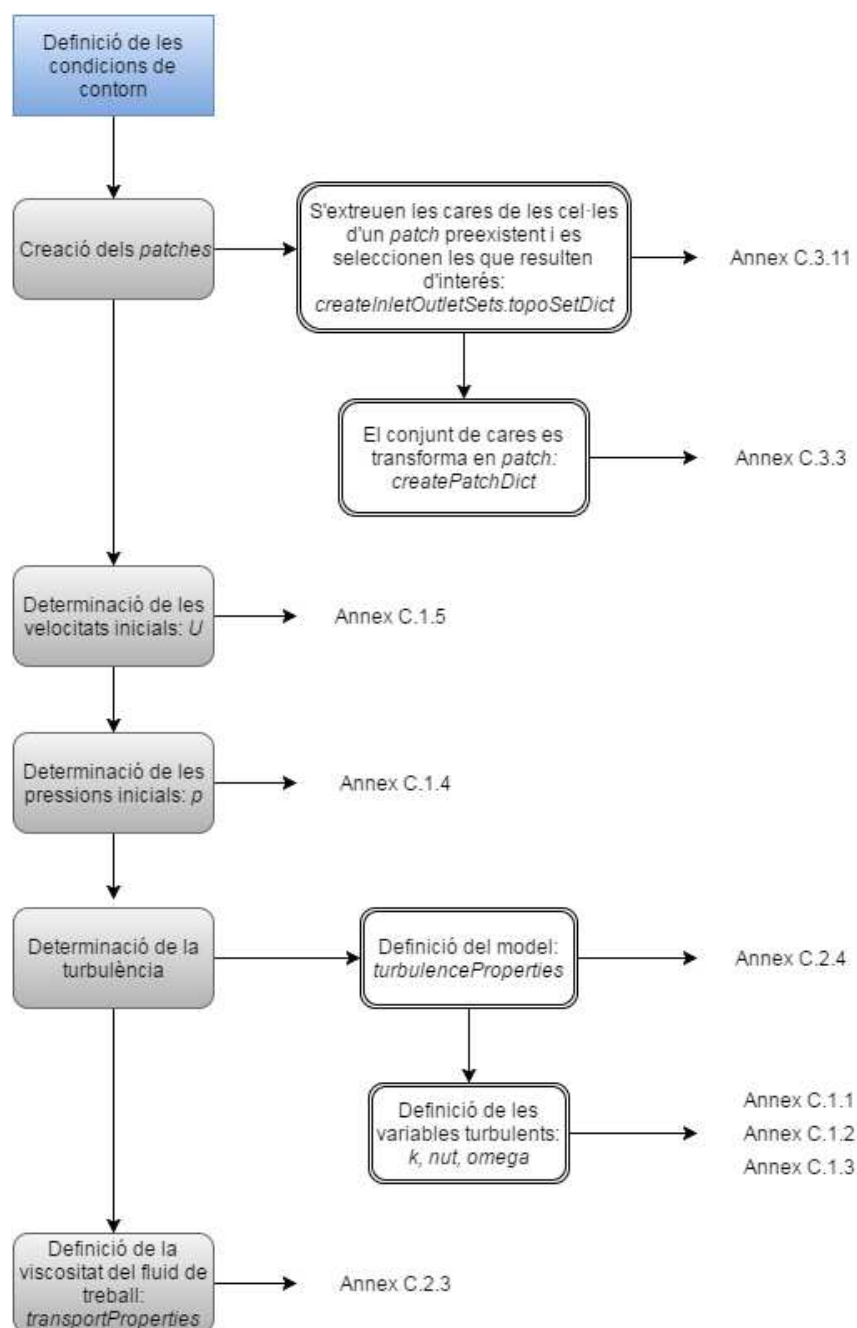


Figura 12: definició de les condicions de contorn

Finalment, com es pot observar a l'esquema de la Figura 13, es defineixen les condicions d'execució i es deixa el cas preparat per a executar la simulació:

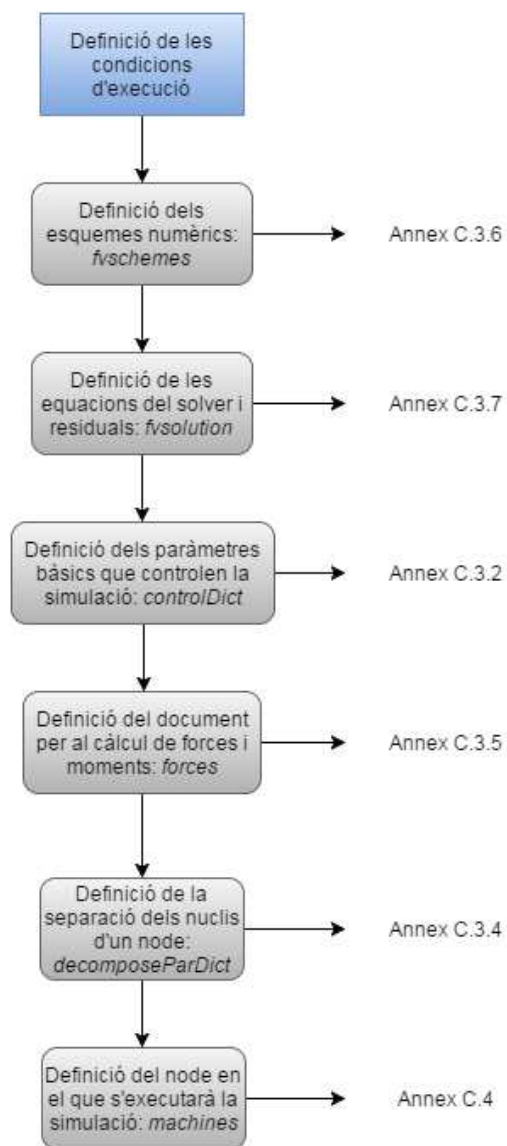


Figura 13: definició de les condicions d'execució

2.3 ANÀLISI DEL RÈGIM DE TREBALL DEL FLUID

Tal i com s'ha comentat en l'apartat 2.1.2, es treballarà sota la hipòtesi de flux incompressible, ja que la variació de pressió del fluid de treball a les condicions d'estudi és menyspreable. L'aplicació d'aquesta simple hipòtesi simplificarà en gran mesura els càlculs a realitzar.

Paral·lelament, serà necessari determinar si es treballarà en règim laminar, o bé en règim turbulent. Així doncs, serà necessari utilitzar el número de Reynolds.

2.3.1 Número de Reynolds

El número de Reynolds és un valor adimensional que quantifica el grau de turbulència d'un fluid en passar per un conducte. Tal i com es recull en la següent fórmula, el Re considera el radi hidràulic del conducte, la velocitat del fluid i la seva viscositat cinemàtica:

$$Re = \frac{D \cdot U}{\nu}$$

On D és el diàmetre del conducte en metres, U la velocitat del flux en metres per segon i ν la viscositat cinemàtica, expressada en metres al quadrat per segon.

Considerant la condició menys turbulenta, la del vent a 1 m/s, es determina el número de Reynolds. Com que el radi del volum de control de la simulació realitzada en l'OpenFOAM és de 1.64 metres, i considerant que la viscositat cinemàtica de l'aire a 20 °C és de $1.511 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, s'obté un número de Reynolds de 217.060. Per tant, queda demostrat que en totes les condicions de simulació es treballarà sota la hipòtesi de flux turbulent.

2.3.2 Models de turbulència

En la majoria de simulacions CFD és necessari especificar un model de turbulència per tal "d'afegir" l'efecte del component turbulent a les equacions de govern del fluid. Per tal de descriure aquest comportament, caldrà calcular unes variables de turbulència a les entrades del sistema.

Un dels mètodes de turbulència més emprats és el del model k- ϵ , que és àmpliament conegut com a un mètode que realitza bones aproximacions del comportament del fluid lliure per a valors de Reynolds elevats. No obstant, aquest tipus de model presenta un gran desavantatge pel present estudi: no ofereix bones prediccions per a

valors calculats en punts propers a les parets de la geometria. Per aplicar el comportament d'aquest model és necessari calcular les següents variables turbulents: l'energia cinètica turbulent (k) i la taxa de dissipació de l'energia cinètica (ϵ).

Després d'intentar implementar aquest mètode en les simulacions, s'ha demostrat que, en efecte, no era aplicable al cas d'estudi ja que els resultats divergien en les primeres iteracions. Com a conseqüència d'això, ha estat necessari buscar una alternativa per tal de definir la turbulència. Així doncs, s'ha procedit a investigar el model $k-\omega$.

El mètode $k-\omega$ és un altre model turbulència que també està implementat a partir de dues equacions de transport, i es caracteritza pel fet d'obtenir bones prediccions per a punts propers a superfícies definides com a parets. Per a definir aquest model és necessari calcular la dissipació específica (ω), a més de l'energia cinètica turbulent. No obstant, aquest mètode implementat per si sol no és d'aplicació en aquest cas, ja que el volum de control del canal d'aire té unes dimensions considerables i aquest mètode no ofereix una bona definició del comportament de l'aire per a punts allunyats de les parets.

Com que cap dels dos models presentats és útil si s'aplica individualment per a aquest tipus de cas, es procedeix a investigar un nou model que sorgeix com a resultat de la unió del $k-\epsilon$ i del $k-\omega$: el model $k-\omega$ SST. Aquest nou model és molt utilitzat i conegut en els camps de l'aerodinàmica, ja que combina la millor part dels models comentats anteriorment.

Un cop definit el model turbulent a utilitzar, es presenten breument les variables que s'hauran de calcular i s'hauran de tenir en consideració.

- **VISCOSITAT:** es pot descriure com la resistència o fregament intern entre les molècules del fluid al lliscar entre sí. Aquesta resistència dependrà de la força d'atracció entre les molècules. Si es divideix la viscositat absoluta per la densitat, s'obté la viscositat cinemàtica (ν).
Per a determinar aquest valor, és necessari consultar taules que expressin la viscositat del fluid en funció de la temperatura.
- **INTENSITAT DE TURBULÈNCIA (I):** és un valor adimensional difícil de calcular i que s'obté quasi exclusivament a partir de dades experimentals. Aquest valor expressa en percentatge el nivell d'intensitat de turbulència dels fluids. Com que controlar i quantificar el valor d'un comportament turbulent pot resultar complex, és indispensable prendre com a eina principal l'estadística.

La següent expressió permet estimar la intensitat de turbulència a partir del número de Reynolds:

$$I = 0.16 \text{Re}^{-\frac{1}{8}}$$

- **ENERGIA CINÈTICA TURBULENT (k):** la idea de l'energia cinètica turbulent és molt semblant a la de l'energia cinètica. L'energia cinètica representa l'energia del flux mig, mentre que l'energia cinètica turbulent representa l'energia de la part turbulent del flux.

A partir de la següent expressió es representa la quantitat d'energia cinètica per unitat de massa de les fluctuacions de turbulència:

$$k = \frac{3}{2}(U \cdot I)^2$$

on U és la velocitat mitjana del flux en m/s.

- **ESCALA DE LONGITUD DE TURBULENCIA (L):** és una variable física que descriu la mida dels remolins grans que contenen energia en un flux turbulent. És una variable on la seva quantitat es pot relacionar de forma intuïtiva amb la mida física del cas en qüestió.

Es pot estimar la longitud de turbulència a partir de la següent expressió, on es té en compte el diàmetre hidràulic:

$$L = 0.07 \cdot d_h$$

- **TAXA DE DISSIPACIÓ DE L'ENERGIA CINÈTICA (ϵ):** és la taxa de conversió de l'energia cinètica turbulent a energia tèrmica interna. Es calcula a partir de la següent expressió:

$$\epsilon = C_\mu^{\frac{3}{4}} \cdot \frac{k^{\frac{3}{2}}}{L}$$

On C_μ és una constant del model de turbulència que pren valor de 0.09.

- **TAXA DE DISSIPACIÓ TURBULENT ESPECÍFICA (ω):** és la taxa amb la qual l'energia cinètica turbulent es converteix en energia tèrmica interna per unitat de volum i temps. També es pot identificar aquesta variable com la freqüència mitjana de turbulència.

A partir de l'energia cinètica turbulent i l'escala de la longitud de turbulència es pot aproximar el valor d'aquesta variable:

$$\omega = C_{\mu}^{-\frac{1}{4}} \frac{\sqrt{k}}{L}$$

3. SIMULACIONS AL LABORATORI D'ENERGIES

La finalitat d'aquests assajos ha estat la de simular el comportament l'aerogenerador en condicions reals per tal de poder prendre mesures de potència, velocitats de rotació i velocitats del vent de forma directa. Com que per a aquests tipus d'assajos és necessari controlar bastants paràmetres, és evident que realitzar aquest tipus de proves resulta significativament complex, ja que es necessiten varies eines que únicament es poden trobar a les universitats. Així doncs, aprofitant al material disponible del laboratori d'energies de l'EPS, s'ha realitzat el muntatge d'un banc de proves.

3.1 PREPARACIÓ DEL BANC DE PROVES

En primer lloc, ha estat necessari adquirir un nou ventilador de major potència, ja que l'anterior resultava insuficient per a aquest tipus de prova. Les velocitats màximes de vent que podia impulsar l'anterior ventilador resultaven insuficients i no permetien arribar a assajar l'aerogenerador per a condicions de vent més extremes. Així doncs, s'ha disposat d'un nou ventilador de la marca Soler i Palau¹, de dos pols i amb una potència total de 18,5 kW. S'ha escollit un ventilador d'aquestes característiques, ja que interessava obtenir les màximes revolucions per minut possibles i, en conseqüència, un major cabal d'aire impulsat.

La fórmula que reflecteix aquest comportament és la que segueix:

$$n = \frac{2\pi f}{p}$$

On p és el número de pols del motor, n és la freqüència de gir i f és la freqüència amb la qual s'alimenta el motor del ventilador.

En segon lloc, ha estat necessari construir un nou suport per a aquest nou ventilador, per tal d'absorbir correctament les càrregues i les vibracions produïdes pel motor. Addicionalment, com que aquest nou ventilador impulsa l'aire amb vorticitats i moltes turbulències, s'ha instal·lat una malla al tub d'entrada del túnel de vent, anomenada

¹ A l'annex F s'adjunta la informació tècnica del ventilador.

honeycomb, per tal de subministrar al flux d'aire un estat més laminar. És interessant treballar amb un flux d'aire el més laminar possible per tal d'obtenir uns resultats òptims.



Figura 14: instal·lació del *honeycomb* a l'entrada del túnel de vent



Figura 15: túnel de vent del laboratori d'energies amb variador de freqüència incorporat

Acte seguit s'ha realitzat la connexió elèctrica del motor trifàsic del ventilador a la corrent, la qual ha resultat la part més complicada del muntatge, ja que s'ha hagut d'instal·lar també un variador de freqüència. Utilitzar un variador de freqüència resulta

indispensable, ja que és el que permet variar la freqüència de l'alimentació del motor i situar-lo en varies condicions de funcionament, diferents de les condicions nominals. Si no hi hagués el variador, el motor sempre funcionaria a uns 50 Hz, que és la freqüència que subministra la xarxa elèctrica i, per tant, no seria possible assajar l'aerogenerador per a tots els possibles punts de funcionament. A més, ha estat necessari configurar i realitzar algunes modificacions al variador, com ara la instal·lació d'un petit potenciòmetre, que permet variar de forma manual i més precisa la freqüència de sortida.

Per altra banda, ha estat necessari canviar l'interruptor diferencial de la línia d'alimentació. Com que la potència que consumeix aquest aparell és molt elevada, resulta insuficient utilitzar un diferencial de 30 mA de sensibilitat. Així doncs, s'ha canviat aquest interruptor per un de nou de 63 A i 300 mA de sensibilitat. Als plànols de l'esquema de muntatge disponibles a l'annex E es mostra l'aparellatge elèctric emprat.

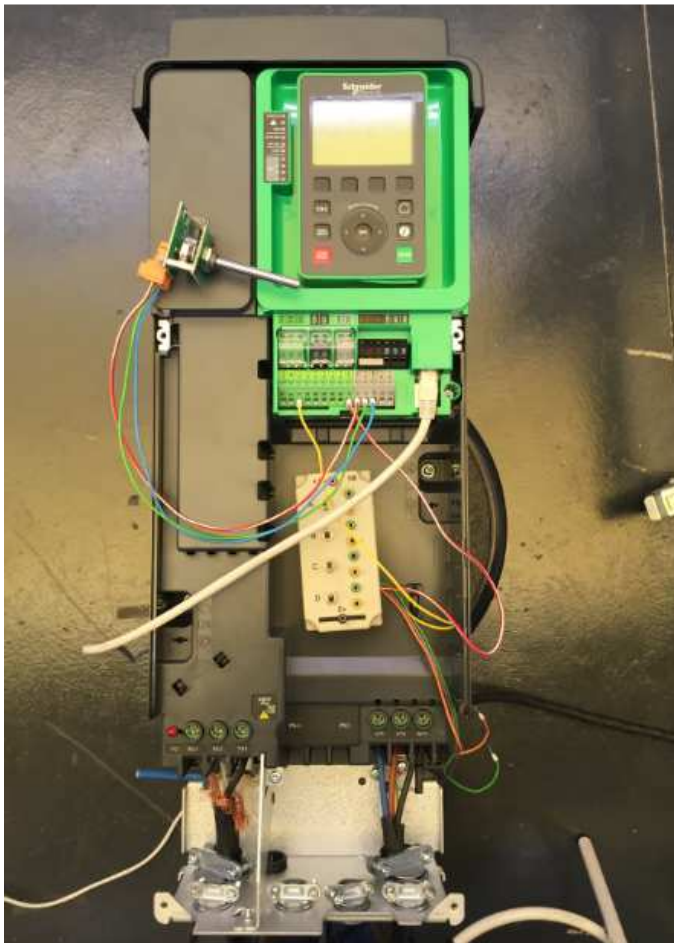


Figura 16: variador de freqüència Schneider Altivar 630

Finalment, s'ha fixat l'aerogenerador a l'extrem oposat del túnel de vent i s'han realitzat les connexions elèctriques² pertinents per tal de mesurar la potència elèctrica generada. Emprant uns mòduls d'adquisició de dades de National Instruments ha estat possible mesurar amb una considerable precisió el voltatge, la intensitat i, a partir d'aquests, la potència elèctrica.

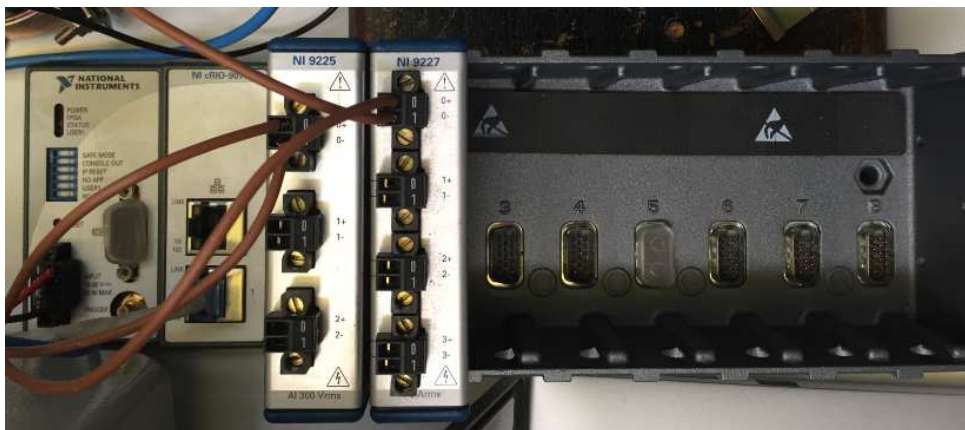


Figura 17: connexions als mòduls d'adquisició de dades

Com que la tarja d'adquisició que mesura valors d'intensitat té una intensitat màxima admissible de 5 A, quan s'han mesurat valors elevats propers a aquest límit s'ha canviat el muntatge i s'han registrat les dades d'intensitat amb un multímetre, que disposa d'uns marges de mesura molt superiors. No obstant, els valors mesurats amb el multímetre són menys precisos que el sistema mencionat anteriorment.

3.2 METODOLOGIA DELS ASSAJOS

La metodologia que s'ha seguit per a l'assaig ha consistit a fixar un valor de freqüència del variador, a la qual li correspon un valor de la velocitat del vent. Aquesta velocitat del vent s'identifica en algunes referències bibliogràfiques com la v_{HUB} o bé velocitat aigües amunt de l'aerogenerador. S'ha començat per un valor de 10 Hz i s'ha anat augmentant de forma progressiva fins arribar als 50 Hz, que correspon a la freqüència subministrada per la xarxa. Per a cada valor de freqüència a la que funciona el motor, s'ha anat variant el percentatge de resistència elèctrica³ a fi de controlar el règim de gir de l'aerogenerador. Un cop finalitzades les lectures de potència i règim de gir per a

² Al plànol 2 de l'annex E es mostra les connexions elèctriques realitzades per tal de mesurar de forma directa la intensitat i voltatge.

³ La variació del valor de la resistència s'ha realitzat amb un reòstat, que permet variar la resistència de forma percentual. Aquesta reòstat ofereix una resistència màxima de 24,8 Ohms.

cada freqüència, s'ha retirat l'aerogenerador i s'han pres les lectures de la velocitat del vent incident. Com que la velocitat del vent és molt variable degut a les turbulències i a les vorticitats, s'ha pres un total de 5 mesures i s'ha realitzat una mitjana: 4 mesures properes a la paret cilíndrica del túnel, separades entre elles 90°, i una lectura final just al centre del túnel.

Així doncs, per a cada freqüència s'han anat variant els règims de gir fins a obtenir la corba de potència per a una determinada velocitat del vent.

Per exemple, a 50 Hz, on s'han registrat els valors de màxima potència, s'han obtingut les següents mesures:

Freq (Hz)	Resistència (Ω)	RPM	U vent aigües amunt (m/s)	U vent aigües avall (m/s)	Coefficient de velocitat induïda (a)	Tip Speed Ratio (λ)	Potència (W)
50	24,8	830	11,6	1,5	0,44	3,07	8,43
	22,65	860		1,6	0,43	3,18	9,16
	20,42	885		1,6	0,43	3,28	10,23
	17,38	905		1,8	0,42	3,35	11,79
	14,49	925		1,7	0,43	3,42	13,94
	12,25	960		1,6	0,43	3,55	16,31
	9,62	1000		2	0,41	3,70	20,13
	6,88	1050		1,9	0,42	3,89	27,15
	4,43	1150		2,1	0,41	4,26	44,62
	2,89	1160		1,8	0,42	4,29	53,48
	1,88	1050		2,1	0,41	3,89	44,98
	1,25	950		1,4	0,44	3,52	24,64
	0,14	850		1,8	0,42	3,15	0,88

MITJANA

0,42

Taula 1: valor experimentals amb alimentació del ventilador a 50 Hz

La primera conclusió que es pot extreure d'aquestes resultats és que la potència màxima obtinguda és de 53,48 W. Com es pot apreciar, aquest valor mesurat dista molt dels 90 W de potència nominal especificada en el certificat de conformitat de l'aparell.

Per a tots els assajos s'ha calculat el coeficient d'inducció 'a', que resulta ser un indicador útil per a determinar la validesa dels valors de velocitat registrats i/o el correcte funcionament del ventilador. Tal i com s'ha comentat en apartats anteriors, si les condicions són òptimes, com a màxim es pot arribar a obtenir un valor d'aquest coeficient equivalent a 1/3. Qual el coeficient d'inducció pren valors propers a la unitat implica que l'aerogenerador treballa com a un disc sòlid; és a dir, no passa flux d'aire a través de les seves pales. Dels casos en els quals s'han calculat factors d'inducció negatius, se'n dedueix que les mesures de vent realitzades resulten de poca fiabilitat.

Així doncs, si s'analitzen els resultats obtinguts en el coeficient d'inducció per a 50 Hz en concret, es pot apreciar que per a totes les freqüències de gir de l'aerogenerador es supera el màxim teòric, la qual cosa indica que, o bé les mesures de velocitat preses no són prou exactes, o que l'aerogenerador no està treballant en condicions òptimes.

A la Figura 18 es representen els resultats obtinguts en la Taula 1 en forma de gràfica per a la velocitat de 11.6 m/s. A l'eix horitzontal es mostra la freqüència de gir i a l'eix vertical la potència elèctrica registrada pel mòdul d'adquisició de dades.

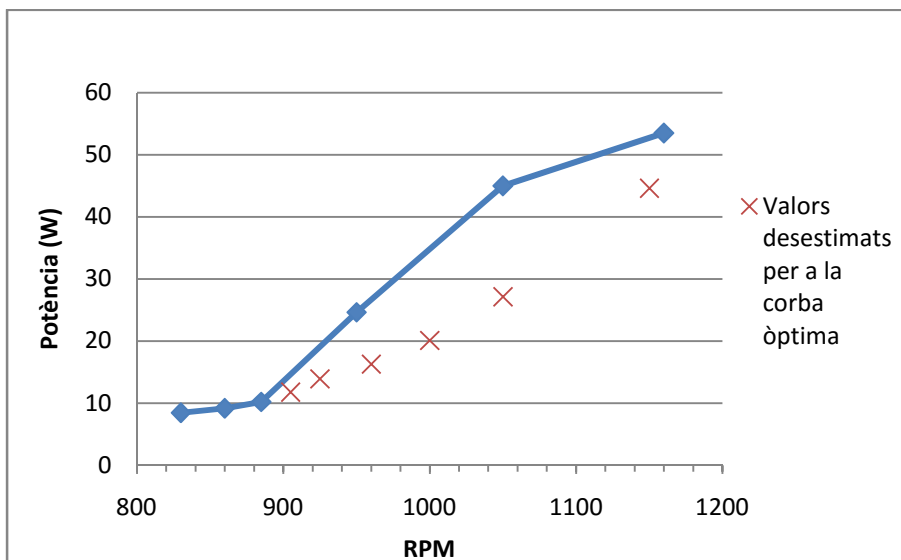


Figura 18: gràfica potència elèctrica mesurada – revolucions per minut amb alimentació del ventilador a 50 Hz

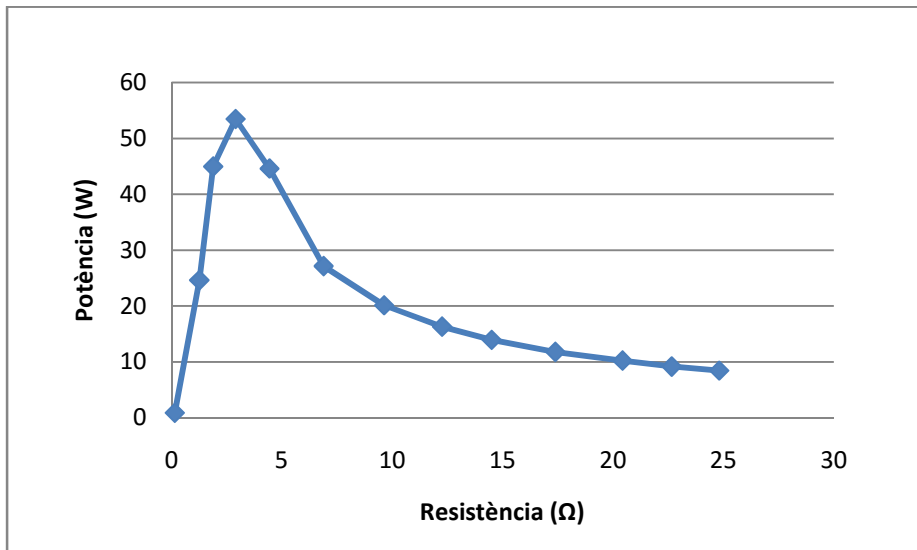


Figura 19: gràfica potència elèctrica mesurada – resistència amb alimentació del ventilador a 50 Hz

Tal i com es pot observar a la Figura 18, hi ha valors que han estat desestimats, ja que el que interessa és obtenir una corba de potència que representi la màxima potència elèctrica que es pot obtenir per a una velocitat del vent donada.

Per altra banda, també resulta interessant analitzar l'eficiència amb la qual treballa l'aerogenerador, concretament usant el coeficient de potència C_p . Aquest coeficient, exposat de forma prèvia a l'apartat 2.1.2, relaciona la potència obtinguda respecte a la potència màxima que es podria obtenir, que és la potència facilitada per l'energia cinètica del vent sobre l'àrea escombrada del ventilador. Recordant que el màxim C_p que es podria arribar a obtenir és del 59.3% (segons el límit de Betz), es representa a la Figura 20 l'evolució d'aquest paràmetre en funció de la *Tip Speed Ratio*⁴.

⁴ Es defineix amb detall el concepte de Tip Speed Ratio a l'annex A

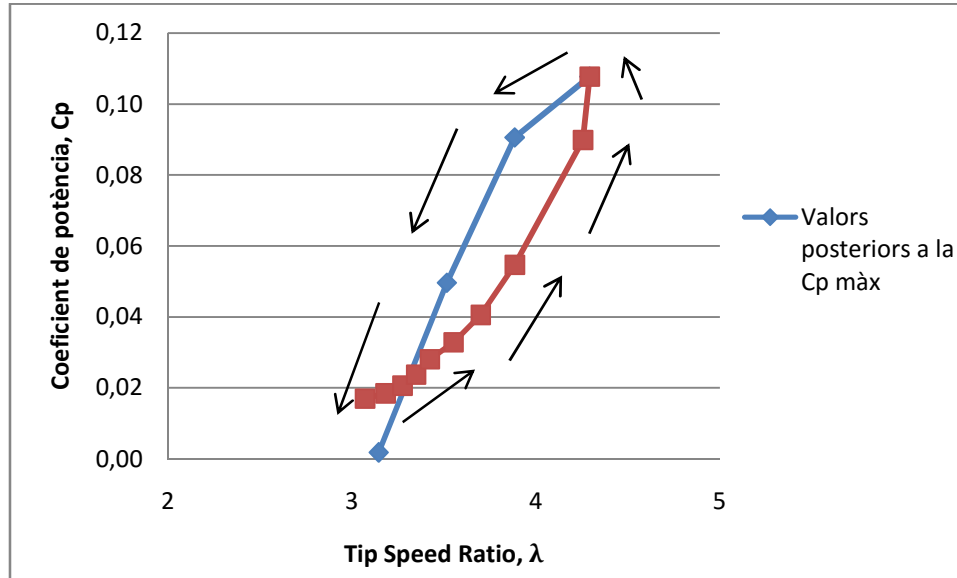


Figura 20: gràfica coeficient de potència – *Tip Speed Ratio* amb alimentació del ventilador a 50 Hz

Tal i com es pot observar a la Figura 20, el coeficient de potència màxim que s'ha obtingut en aquestes condicions de funcionament ha estat del 10.77% per a un valor de la *Tip Speed Ratio* de 4.29. Segons l'ordre en el qual es van anar prenent les mesures, la C_p màx augmenta d'una forma similar a una exponencial fins a arribar a la C_p màx, on a partir d'aquest valor decau el coeficient de potència de forma significativa.

A l'annex D s'adjunten les altres gràfiques coeficient de potència – *Tip Speed Ratio* per a cada valor de freqüència. Resulta interessant estudiar l'evolució d'aquestes gràfiques, ja que posteriorment es realitzarà una mitjana de les *Tip Speed Ratio* obtingudes en el punt de màxim coeficient de potència. El resultat d'aquesta mitjana serà la *Tip Speed Ratio* òptima (λ_{opt}), un coeficient essencial per tal de convertir les gràfiques potència – freqüència de gir a potència – velocitat del vent.

Seguint tot aquest procediment per a cada freqüència d'alimentació del ventilador s'han realitzat les mateixes mesures. Els resultats es troben representats en taules i també en gràfiques a l'annex D.

Sintetitzant resultats, es realitza una superposició de les corbes òptimes i s'obté la gràfica representada a la Figura 21.

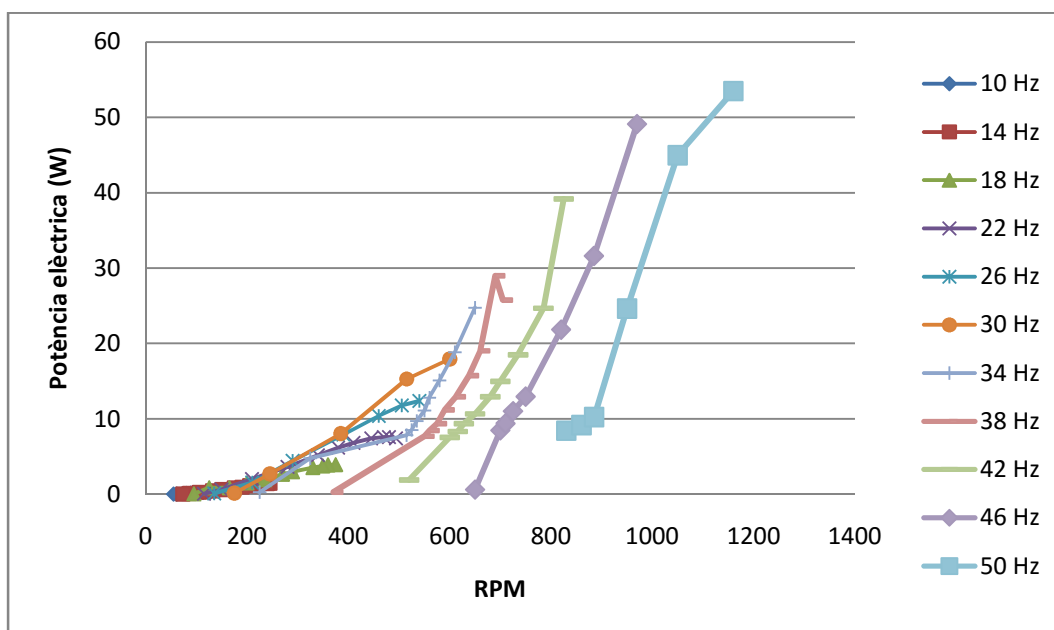


Figura 21: superposició de les corbes de potència obtingudes al banc de proves

Seguidament, a la Figura 22 s'uneixen els punts de màxima potència obtinguts per a cada velocitat del vent (assignada per a cada freqüència a què s'alimenta el ventilador) i s'obté la corba de potència característica de l'aerogenerador.

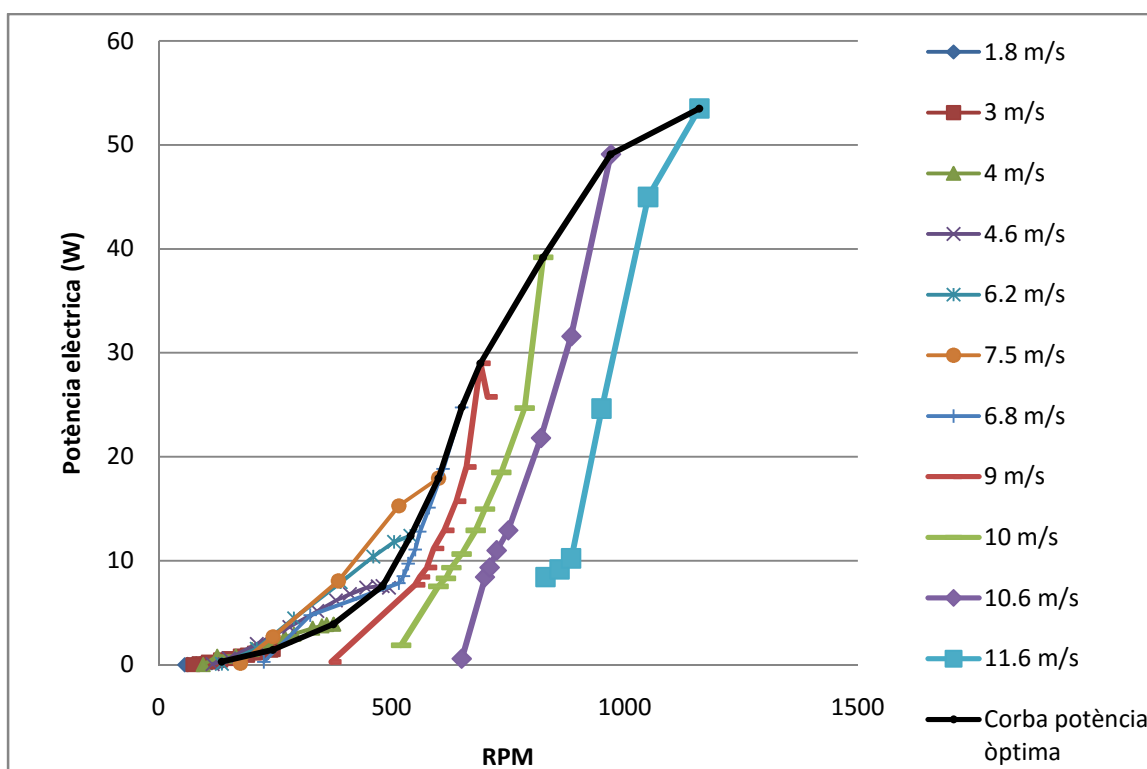


Figura 22: corba experimental potència elèctrica òptima – freqüència de gir obtinguda al banc de proves

Els valors de la corba òptima estan recollits a la Taula 2:

Tip Speed Ratio (λ)	RPM	U vent incident mesurada (m/s)	U vent incident calculada (m/s)	Potència elèctrica experimental (W)
3.84	135	1.80	1.51	0.31
	245	2.56	2.74	1.46
	375	3.98	4.19	3.92
	480	4.60	5.36	7.57
	540	6.16	6.03	12.40
	600	7.48	6.71	17.94
	650	6.82	7.26	24.76
	690	8.92	7.71	29.00
	825	9.92	9.22	39.19
	970	10.60	10.84	49.10
	1160	11.60	12.96	53.48

Taula 2: valors de la corba de potència òptima experimental

Com es pot observar en la Taula 2, apareixen dos velocitats del vent incident: una velocitat mesurada i una velocitat calculada. La primera ha estat calculada com a una mitjana de les 5 mesures preses per a una determinada freqüència d'alimentació al ventilador; la segona ha estat calculada utilitzant la relació de la *Tip Speed Ratio* o λ_{opt} . Segons els recursos bibliogràfics consultats, si s'obté la λ_{opt} , aquesta es pot utilitzar per a realitzar la conversió de la gràfica potència – règim de gir a potència – velocitat del vent, o a la inversa. Concretament, aquest valor de la λ_{opt} ha estat calculat a partir d'11 valors (els que apareixen a la Taula 3), un per a cada freqüència d'assaig. Cada un d'aquests valors que han servit per a calcular la mitjana corresponen a la λ on la C_p és màxima. Per exemple, en el cas dels 50Hz, el valor de la λ escollit és el de 4.29, que és el punt on s'obté un C_p de 10.77%.

Tip Speed Ratio (λ)	Cp
3.22	0.16580374
4.11	0.2732948
4.04	0.19528586
4.48	0.24458044
3.76	0.16673282
3.44	0.13475985
4.09	0.24538431
3.32	0.12843397
3.57	0.12620395
3.93	0.1295941
4.29	0.10771815

Taula 3: valors emprats per a calcular la λ_{opt}

A continuació, s'estudia la relació de semblança entre la velocitat calculada a partir de la T.S.R. i la mesurada directament.

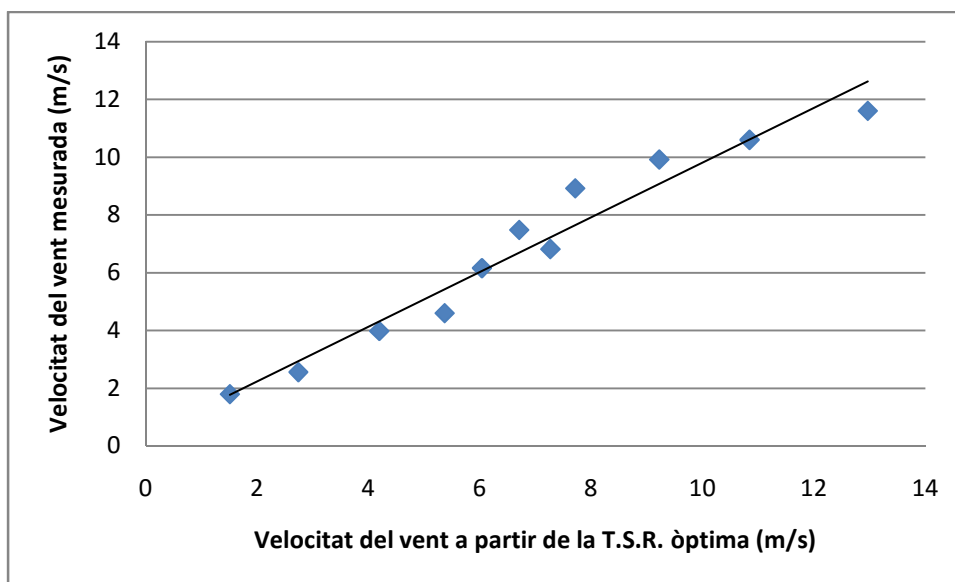


Figura 23: gràfica d'adequació velocitat incident calculada a partir de la T.S.R amb la velocitat del vent mesurada

L'equació lineal obtinguda en la Figura 23 és la que segueix:

$$y = 0.946 \cdot x + 0.351$$

$$R^2 = 0.952$$

Com es pot observar, la pendent obtinguda és pròxima a la unitat i, per tant, es considerarà vàlid utilitzar la relació de la λ_{opt} . S'analitzaran les corbes obtingudes a partir de les dues velocitats presentades, ja que resultarà interessant estudiar les petites diferències.

Amb l'ajuda del programa Microsoft Excell s'ha realitzat una interpolació polinòmica de cinquè grau i s'ha obtingut la següent equació, amb un grau de representació dels valors mesurats d'un 99.8%:

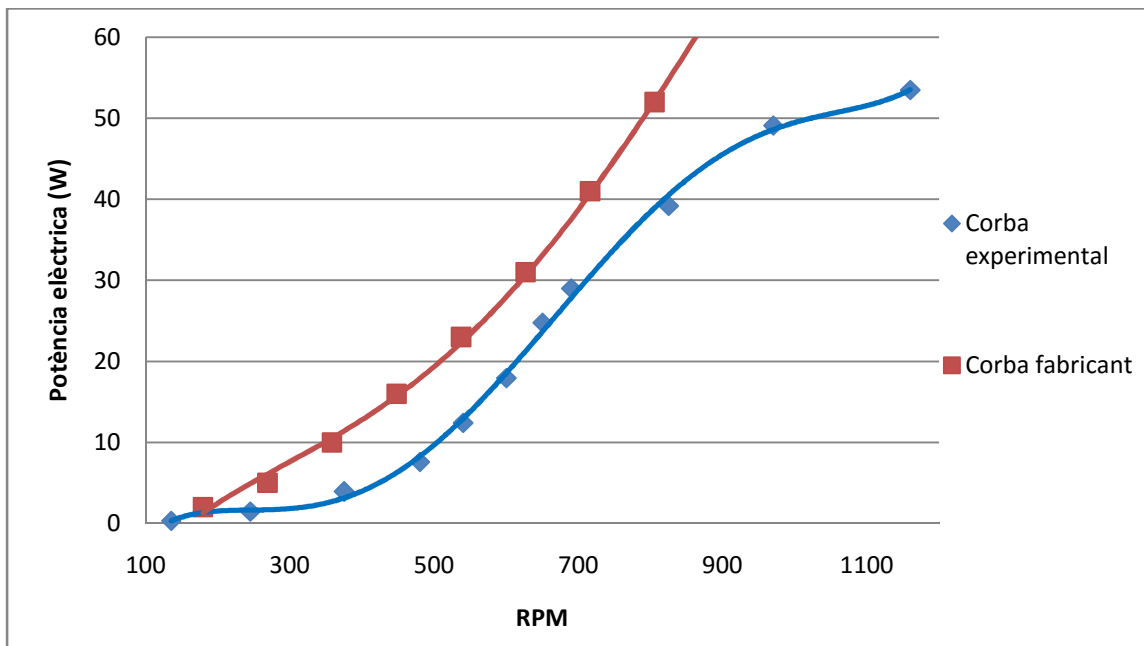


Figura 24: comparativa corba experimental potència – RPM amb la corba del fabricant

$$P_{el\grave{e}ct}(n) = 7 \cdot 10^{-13} \cdot n^5 - 2 \cdot 10^{-9} \cdot n^4 + 3 \cdot 10^{-6} \cdot n^3 - 0.001 \cdot n^2 + 0.234 \cdot n - 15.57$$

On n és la freqüència de gir en revolucions per minut.

Ha estat necessari interpolar amb una corba polinòmica de grau 5 ja que les aproximacions exponencials no eren vàlides, així com les corbes polinòmiques d'un grau inferior.

De la mateixa manera, es pot representar la gràfica de la Figura 24 en funció de la velocitat del vent incident, utilitzant la relació de la TSR mitjana o bé la velocitat del vent mesurada directament. A la gràfica de la Figura 25 es representen els valors del fabricant i els valors experimentals sense realitzar una regressió.

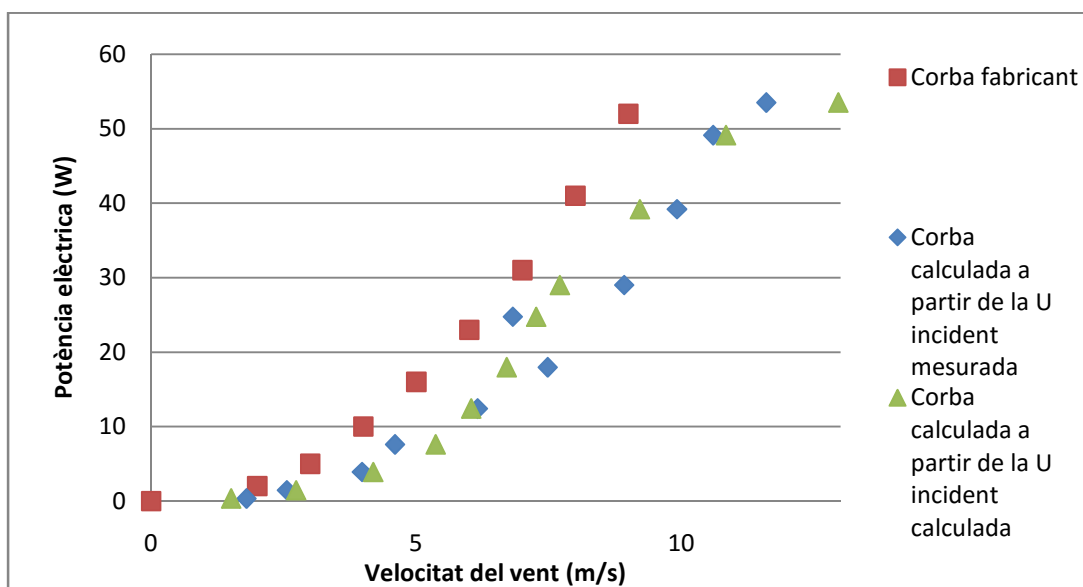


Figura 25: comparativa corba experimental potència – velocitat del vent amb la corba del fabricant

Analitzant els resultats s'observa que, tot i que els resultats obtinguts mitjançant les dues velocitats són força similars, els valors de velocitat mesurats presenten una millor adequació amb els resultats del fabricant.

Seguidament, es procedeix a realitzar una regressió potencial per tal d'obtenir la corba de potència òptima experimental.

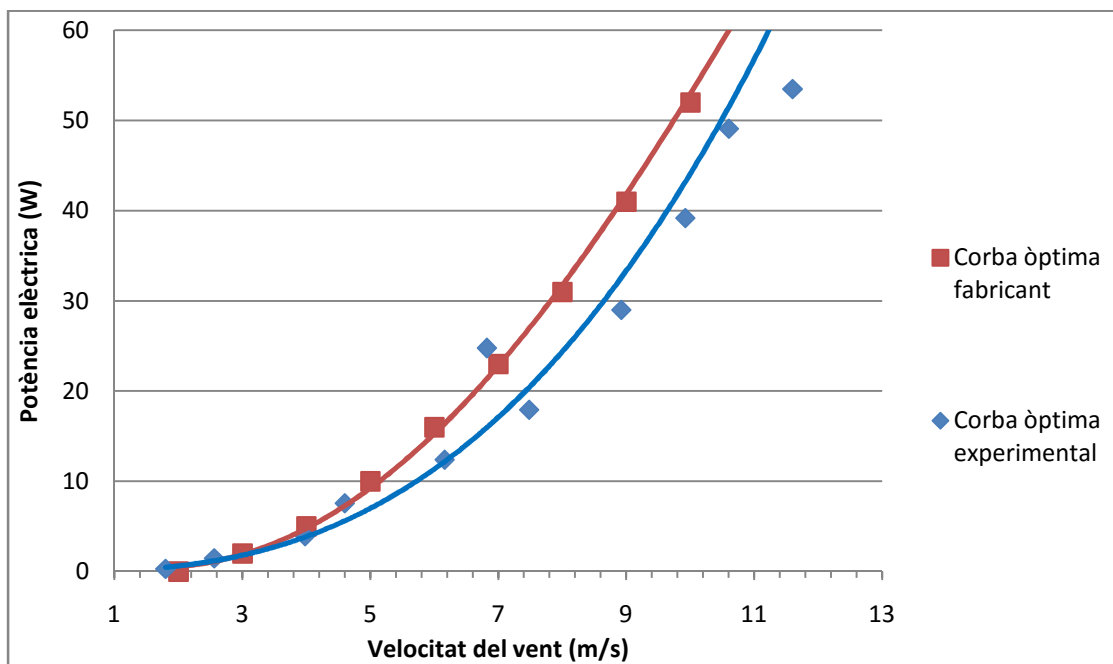


Figura 26: corba de potència òptima experimental

Amb l'ajuda de Microsoft Excel, s'ha trobat la següent corba potencial, que té un grau de representació dels valors obtinguts del 97.8% (R^2):

$$P_{el\grave{e}ct}(u) = 0.097 \cdot u^{2.655}$$

On u és la velocitat del vent incident en m/s.

Seguidament es poden extreure conclusions a partir de la Figura 26 on, tal i com es pot observar, la gràfica obtinguda de forma experimental només representa un tram de la corba facilitada pel fabricant. Això és degut al fet que al laboratori només es van poder arribar a simular punts de funcionament de fins a 12 m/s, ja que es va arribar a les condicions nominals del ventilador.

Per altra banda, si s'analitzen els valors de potència de les dues corbes, es pot considerar que els resultats obtinguts són coherents i són bastant pròxims amb els punts facilitats pel fabricant. No obstant això, es pot observar que els errors relatius obtinguts s'incrementen per a velocitats del vent més elevades, fet que confirma l'error en la mesura de les velocitats. Per a velocitats baixes, els resultats obtinguts han estat més exactes, ja que les turbulències que hi havia eren menors. En canvi, per a freqüències més elevades del ventilador, les vorticitats i turbulències augmentaven en el túnel de vent contribuint a un increment en l'error de la mesura de velocitats. Tenint

en compte aquest factor de turbulència, els errors obtinguts es comporten tal i com s'havia previst.

Per a altes velocitats, el valor dels factors d'inducció calculats en els assajos recolzen la teoria que les mesures realitzades del vent no són del tot precises. Paral·lelament a aquest fet, és necessari considerar la possibilitat que els valors facilitats pel fabricant no siguin del tot exactes, ja que, com es comentarà més endavant, l'aparell presenta poques fiabilitats.

No obstant això, es donarà la corba com a vàlida si es té en compte que la metodologia de la presa de dades és la bona i que les dues corbes presenten comportaments similars.

De totes maneres, si es volguessin repetir els assajos per obtenir millors resultats, seria imperatiu prendre les següents mesures:

- Aconseguir un túnel de vent de majors dimensions. Idealment les dimensions haurien de ser les que es troben facilitades a la Figura 29.
- Aconseguir un ventilador de major potència, per tal de poder simular les condicions de funcionament del ventilador per a velocitats del vent incident més elevades. Així mateix, seria necessari que aquest nou ventilador impulsés l'aire amb les menors vorticitats possibles, ja que, si no, les mesures de velocitat es veuen molt compromeses.
- Utilitzar un reòstat amb un valor de resistència major, necessari pels assajos a baixes velocitats del vent.
- Realitzar un nombre de mesures molt més elevat a partir de variacions més petites en la freqüència d'alimentació del ventilador.
- Disposar d'uns mòduls d'adquisició de dades que permetin registrar valors d'intensitat més elevats.
- Instal·lar tubs de pitot de mesura electrònica, per a registrar de forma més precisa la velocitat just abans de l'aerogenerador i just després.

A partir dels resultats experimentals obtinguts, es procedeix a realitzar les simulacions amb l'OpenFOAM per tal d'obtenir una base de dades més àmplia a l'hora d'extreure conclusions. A diferència dels resultats que s'han obtingut al banc de proves, les simulacions amb l'OpenFOAM facilitaran valors de potència mecànica; així doncs, serà interessant comparar els valors experimentals amb els teòrics simulats per tal d'establir un rendiment de conversió de l'energia mecànica a l'energia elèctrica.

4. SIMULACIONS AMB L'OPENFOAM

En aquest capítol es realitzarà una descripció de les simulacions realitzades amb programari CFD, que permet resoldre casos de dinàmica de fluids de forma molt ajustada a la realitat. Aquestes simulacions es basen en dividir l'espai de treball, corresponent al volum de control del cas d'estudi, en una malla formada per volums finits, anomenats cel·les.

Depenent de la complexitat de la geometria, les variacions de les propietats físiques del fluid i el grau d'exactitud que es vulgui obtenir en la solució, es veurà directament compromès el número total de cel·les que conformaran el mallat. Així doncs, com més elevat sigui aquest número, més elevada serà la potència de càlcul requerida.

4.1 PROGRAMARI

La resolució d'un cas amb dinàmica de fluids computacional té certa complexitat, ja que són molts els paràmetres a configurar i és necessari construir, estructurar i executar la simulació de forma ordenada. Així doncs, en tota simulació es poden distingir tres etapes bàsiques: pre-procés, càlcul i post-procés. Per tal de realitzar-les, es requeriran diversos programes, presentats a continuació.

4.1.1 SolidWorks 2014

La primera etapa consisteix en la preparació de l'entorn on es realitzarà el càlcul: la malla, que es generarà a partir de l'OpenFOAM. No obstant, com que cal indicar-li al programa on ha de mallar, és necessari la creació i importació d'una geometria i, per això, es requereix un programa de disseny assistit per ordinador.

El SolidWorks és un software CAD per al modelat mecànic en 3D i és àmpliament conegut en el camp tecnològic, ja que permet modelar peces de forma molt senzilla i intuïtiva. Un dels grans avantatges que presenta és la gran varietat de formats en els quals es poden exportar les geometries i, concretament, per a aquest cas s'exportarà la geometria generada en un format .IGS, que correspon al volum sòlid.

4.1.2 ParaView

El ParaView és un programa de codi lliure que ve facilitat juntament amb l'OpenFOAM i és una eina que permet la visualització de la malla i els resultats del cas. Ha estat especialment dissenyat per treballar de forma paral·lela en memòria compartida o bé

en clústers, donant lloc a una eina ideal per a la visualització de resultats de casos molt complexos i que requereixen de molta potència de càlcul.

S'ha emprat la versió 4.4.0, que correspon a l'última versió actualitzada.

4.2 PRE-PROCÉS

A continuació es descriurà breument cada una de les etapes seguides per a realitzar la preparació del càlcul de les simulacions.

4.2.1 Generació de la geometria i preparació del cas

El primer pas consisteix a generar la geometria de l'aerogenerador amb l'ajuda del SolidWorks.



Figura 27: renderitzat de la geometria final Guangmang M-300

Tal i com es pot observar en la Figura 27, s'han realitzat importants modificacions en la geometria per tal de simplificar no només la seva creació, sinó també per a l'elaboració de la malla i el posterior càlcul.

A l'hora de mallar amb l'*snappyHexMesh*, és important que detecti la geometria totalment tancada, ja que, si no, condueix a l'aparició de problemes quan elimina les cel·les de l'interior de la geometria. Així doncs, s'ha optat per crear l'aerogenerador com a dos sòlids: un primer cos que inclou el *hub* i les sis pales i un segon cos, el suport.

Un cop desenvolupada la geometria, es realitza una fragmentació de la superfície de l'aerogenerador en diverses parts: GUANGMANG_HUB, GUANGMANG_PALES, GUANGMANG_SUPOORT, GUANGMANG_PUNTES. És especialment important

realitzar aquesta fragmentació quan es treballa amb geometries complexes per tal d'assignar diferents nivells de refinament en la malla, ja que el desitja obtenir és una bona relació entre la qualitat de la malla i la potència de càlcul.

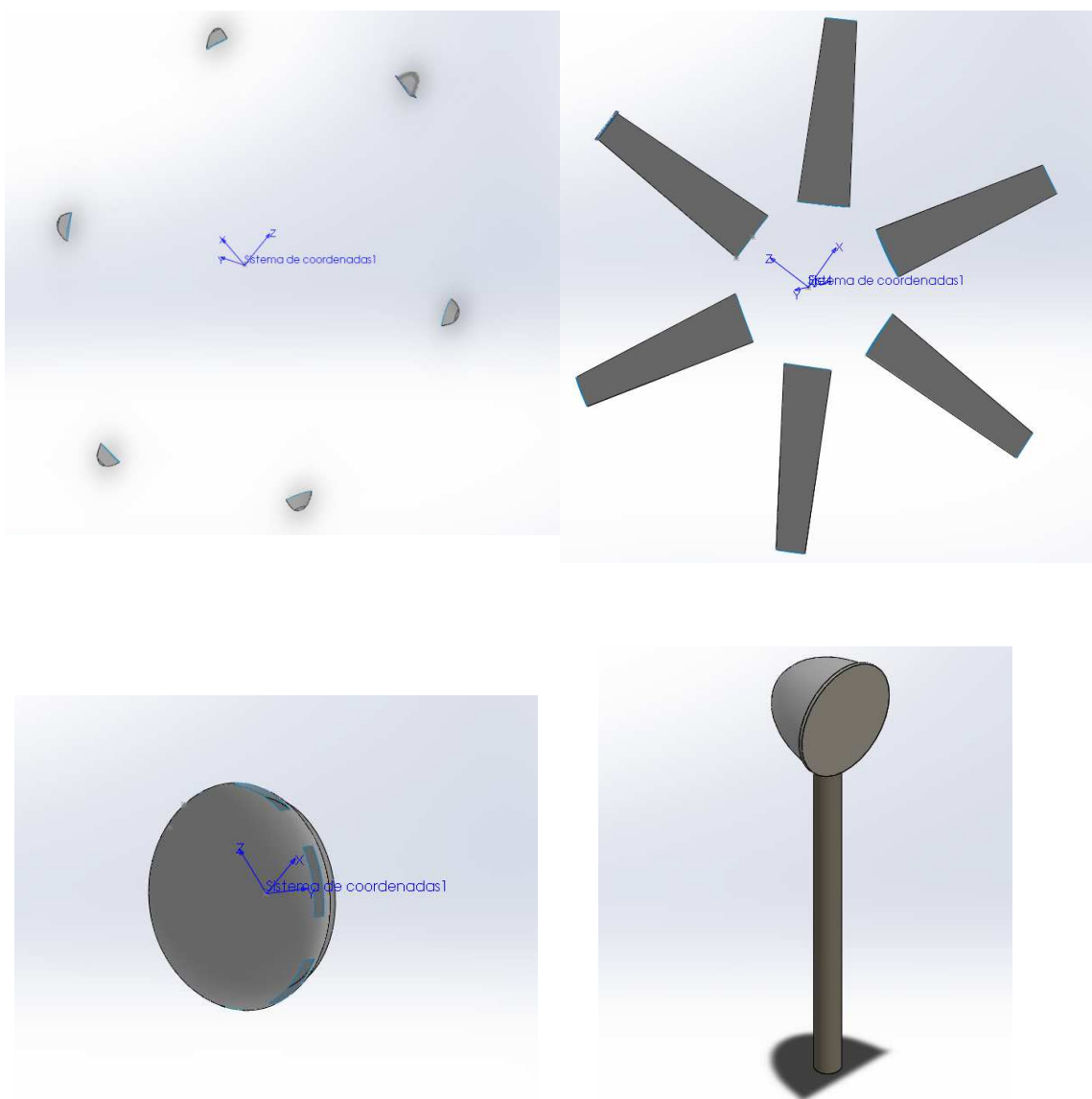


Figura 28: fragmentació de la superfície de l'aerogenerador per a la preparació del refinament de la malla

En el document *snappyHexMesh* de l'annex C.3.9 es pot apreciar quins nivells de refinament s'han aplicat per a cada part de la superfície de l'aparell.

4.2.2 Creació i anàlisi del mallat

En aquesta segona etapa es comença a preparar el mallat a partir de les següents utilitats de l'openFOAM: *blockMesh* i *snappyHexMesh*. La primera d'aquestes utilitats és la responsable de crear la malla base i, en certa manera, és l'espai sobre el qual es treballarà. Com que és una forma "bastant abrupte" de crear la malla i poc precisa, es precisa d'una altra eina, l'*snappyHexMesh*. Aquesta eina permet importar la geometria que s'ha creat anteriorment a partir d'un format .stl i escollir diferents zones i nivells de refinat. Al document *snappyHexMesh* de l'annex C.3.9 es pot observar amb més detall el contingut d'aquesta utilitat.

Degut a la tipologia de cas que es vol resoldre, és necessari un mallat mol refinat i, per això, és necessari provar varies versions de malla fins a trobar la versió més econòmica, des del punt de vista de la potència de càlcul. A més a més, cal preparar el mallat per tal de poder executar un MRF (*Multiple Reference Frame*), ja que s'implementarà la funció de malla dinàmica. La part rotatòria de l'aerogenerador haurà d'estar compresa a l'interior d'un volum de malla anomenada *cellZone*, i posteriorment, s'indicarà que la zona gira amb una determinada velocitat angular. Així doncs, és necessari que el límit de la part rotativa de l'aerogenerador coincideixi de forma exacta amb el límit de la *cellZone*. Pel que fa al volum de control, que no és cap altra cosa que les dimensions del canal d'aire que contindrà l'aerogenerador, disposarà d'unes dimensions definides a partir d'un informe publicat pel Centro Nacional de Energias Renovables (CENER), tal i com es mostra a la Figura 29.

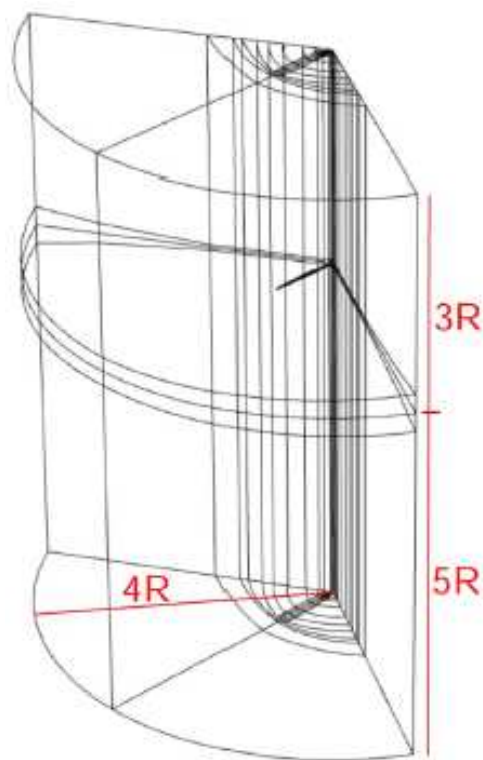


Figura 29: dimensions del canal d'aire

Font: *Uso de Simulación Numérica en Diseño de Aerogeneradores*. CENER. Santiago de Compostela 2010.

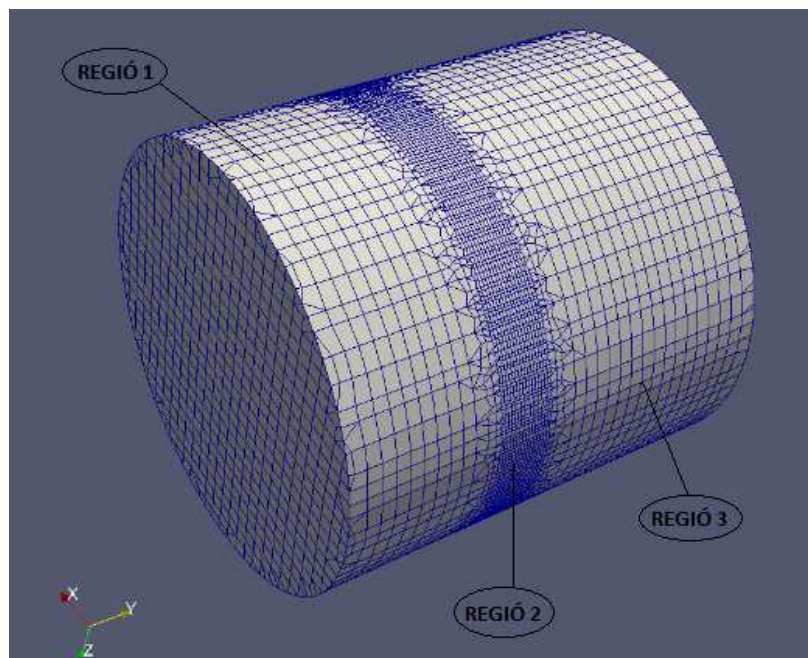


Figura 30: volum de control del canal d'aire

La finalitat de dividir el volum de control en tres regions de malla ha estat bàsicament per raons d'estalvi en la potència de càlcul. S'ha optat per refinar de forma molt més acurada la regió 2, ja que són les proximitats de la zona on hi ha l'aerogenerador i és necessari definir molt més punts de càlcul per tal d'obtenir una solució vàlida.

Abans de donar el mallat com a bo és molt important executar un *checkMesh*, que és una execució d'OpenFOAM encarregada de comprovar que totes les premisses de la qualitat de la malla es compleixen (aquestes es defineixen al document *snappyHexMesh*, a la secció *meshQualityControls*). Si per exemple, apareixen cel·les amb una forma que no és l'apropiada, llavors és probable que el resultat no arribi a convergir i finalitzi la simulació abans d'hora amb un error de sortida. Un error molt comú que es pot experimentar és quan apareixen cel·les amb angles molt aguts (recollit pel paràmetre *skewness*), principal causant que el programa acabi realitzant divisions entre zero.

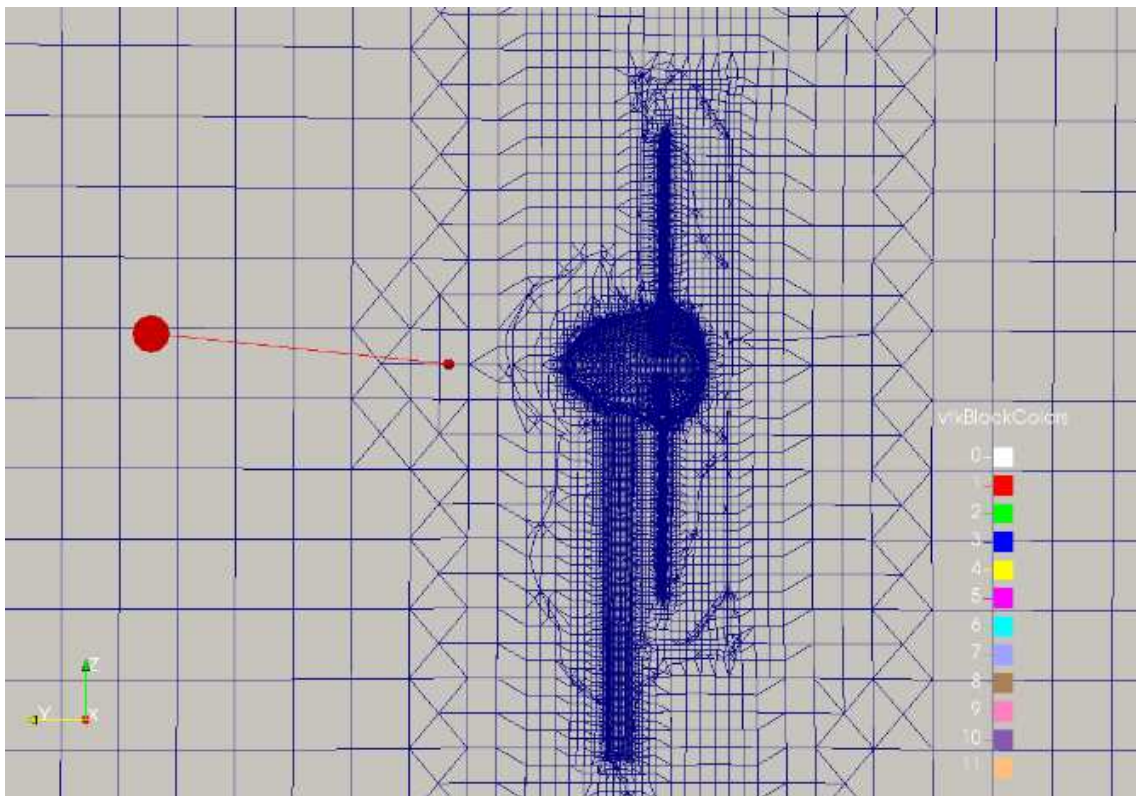


Figura 31: refinament de la malla a les zones properes a l'aerogenerador

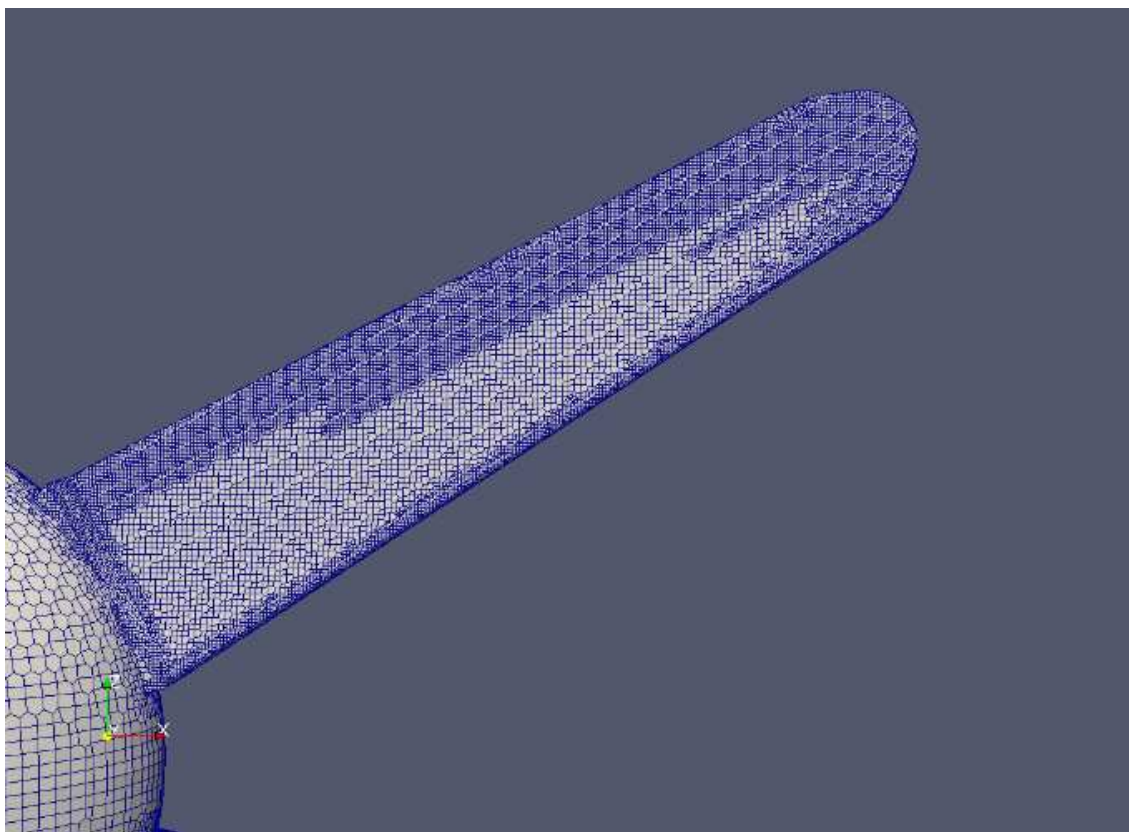


Figura 32: refinament de la malla en les seccions més crítiques de les pales

A la Figura 33 es mostra el número total de cel·les que conformen la malla del cas d'estudi. Es pot observar que la totalitat del mallat està formada per 847.959 cel·les, de les quals 683.461 són hexaedres. La millor manera de mallar la superfície de l'aerogenerador hauria estat amb tetraedres, ja que s'adapten més fàcilment a geometries complexes i hauria permès una reducció considerable del número total de cel·les. No obstant, això no és possible ja que *snappyHexMesh* només permet treballar amb hexaedres.

Pel que fa als altres resultats de qualitat de la malla, a la Figura 35 se'n mostren les característiques, obtingudes a partir de l'execució del *checkMesh*.

```
Mesh stats
points:      1112563
faces:       2787940
internal faces: 2585130
cells:       847959
faces per cell: 6.33647
boundary patches: 9
point zones: 0
face zones:  1
cell zones:  1
```

Figura 33: cel·les i *patches* continguts en la malla

```

Overall number of cells of each type:
hexahedra:      683461
prisms:         18629
wedges:         0
pyramids:       0
tet wedges:     749
tetrahedra:     1
polyhedra:      145119
Breakdown of polyhedra by number of faces:
  faces  number of cells
    4    13491
    5    12549
    6    34304
    7     588
    8     283
    9    61144
   10     125
   11     208
   12   14660
   13      13
   14      82
   15   7302
   16       2
   17      11
   18     357

```

Figura 34: classificació dels tipus de cel·les que conformen la malla

```

Checking topology...
  Boundary definition OK.
  Cell to face addressing OK.
  Point usage OK.
  Upper triangular ordering OK.
  Face vertices OK.
  *Number of regions: 2
  The mesh has multiple regions which are not connected by any face.
  <<Writing region information to "0/cellToRegion"
  <<Writing region 0 with 222025 cells to cellSet region0
  <<Writing region 1 with 625934 cells to cellSet region1

Checking patch topology for multiply connected surfaces...
  Patch      Faces    Points    Surface topology
  GUANGMANG_PUNTES  11024  12523  ok (non-closed singly connected)
  GUANGMANG_BLADES  143582  159686  ok (non-closed singly connected)
  GUANGMANG_HUB      8287  11434  ok (non-closed singly connected)
  GUANGMANG_SUPPORT  11013  12386  ok (non-closed singly connected)
  VolumControl       7440  7864  ok (non-closed singly connected)
  AMI1               10691  11107  ok (non-closed singly connected)
  AMI2               9667  9986  ok (non-closed singly connected)
  inlet              553  572  ok (non-closed singly connected)
  outlet             553  572  ok (non-closed singly connected)

Checking geometry...
  Overall domain bounding box (-1.64141 -1.35415 -1.64141) (1.64141 2.05 1.64141)
  Mesh has 3 geometric (non-empty/wedge) directions (1 1 1)
  Mesh has 3 solution (non-empty) directions (1 1 1)
  Boundary openness (-2.61683e-18 -8.79545e-17 1.43037e-16) OK.
  Max cell openness = 3.39418e-16 OK.
  Max aspect ratio = 14.2489 OK.
  Minimum face area = 8.72242e-10. Maximum face area = 0.0195155. Face area magnitudes OK.
  Min volume = 3.83635e-11. Max volume = 0.00206327. Total volume = 28.712. Cell volumes OK.
  Mesh non-orthogonality Max: 64.988 average: 12.5496
  Non-orthogonality check OK.
  Face pyramids OK.
  ***Max skewness = 5.99662, 8 highly skew faces detected which may impair the quality of the results
  <<Writing 8 skew faces to set skewFaces
  Coupled point location match (average 0) OK.

Failed 1 mesh checks.

```

Figura 35: execució del *checkMesh*

Després d'executar la comanda d'anàlisi del mallat, es pot observar que es respecten totes les premisses de qualitat de malla que venien establertes per defecte, a excepció d'una característica, l'obliquïtat màxima d'alguna cel·la. Concretament l'anàlisi identifica un total de 8 cares on s'ha superat el valor de 4. No obstant, com que el valor màxim obtingut d'aquest paràmetre no és molt elevat, els resultats no es veuran compromesos.

Òbviament el número de cel·les que conforma la malla no és molt elevat, ja que amb prou feines s'arriba al milió d'elements i, si es volguessin obtenir uns resultats molt més acurats, la malla hauria de ser molt més fina. No obstant, considerant que el nombre de simulacions totals que s'han de realitzar és elevada i la potència de càlcul és limitada, així com el temps per a la realització de l'estudi, s'ha donat la malla actual com a vàlida.

Idealment per a realitzar aquests tipus de simulacions el més adequat seria considerar únicament un sector circular, dintre del qual es compregués una única pala de l'aerogenerador. Partint d'aquesta geometria especificada, seria necessari aplicar condicions de simetria, tal i com es mostra a la Figura 36. Per a realitzar les simulacions, es va intentar implementar aquesta condició de simetria, però no va resultar factible ja que la dificultat de la preparació del cas s'elevava de forma considerable. En cas que és volgués aplicar, seria necessari canviar el *solver* *pimpleDyMFoam*, el que s'ha emprat a les simulacions, per un nou *solver* conegut com a *simpleFoam*. Amb aquest nou *solver*, en lloc de tenir una malla lliscant s'aplicarien unes condicions de contorn variables, en les quals s'aplicaria una velocitat relativa de la pala igual a 0. Tot i que ja es disposava d'un tutorial amb condicions similars de simetria, era necessari modificar els esquemes numèrics emprats per al càlcul, així com les condicions de contorn i generar una nova malla molt més refinada que suportés aquest cas.

Davant de totes aquestes dificultats que es van presentar, es va optar finalment per fer un mallat més simple i treballar amb la geometria completa de l'aerogenerador, que ha estat la manera de procedir del present estudi.

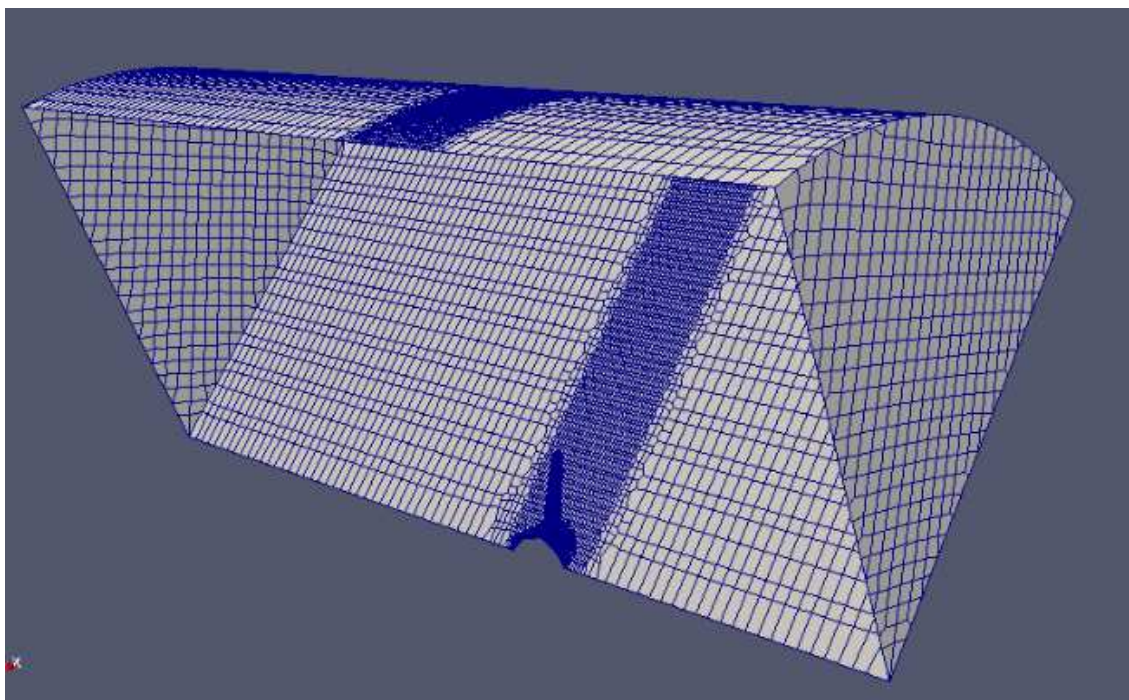


Figura 36: mallat del volum de control aplicant condicions de simetria

4.2.4 Configuració de les condicions de contorn

Un cop construïda la malla, es procedeix a determinar les condicions de contorn de la simulació, que es determinaran a la carpeta '0' del cas.



Figura 37: estructura bàsica del cas

A la carpeta '0' hi haurà un arxiu per a la definició de cada una de les següents variables: ' k ', ' ω ', ν_t , ' p ' i ' U ', que fan referència a l'energia cinètica turbulent, la taxa de dissipació turbulent específica, la viscositat turbulent, la pressió i la velocitat, respectivament.

A l'annex C es pot observar amb més detall quines condicions de contorn s'han aplicat a cada tipus de "patch".

4.3 CÀLCUL

Un cop construït el cas d'estudi, es procedeix a definir les condicions amb les quals s'executarà la simulació. Per fer-ho, és necessari configurar l'arxiu *controlDict*, on es determinen paràmetres com: *solver* a utilitzar, temps total d'execució, el *timestep* i

cada quant es volen guardar resultats. Per altra banda, també s'han de definir els arxius *fvSchemes*, on es defineixen els mètodes numèrics que s'utilitzaran per a realitzar les interpolacions i també el fitxer *fvSolution*, on es defineix el solver matemàtic a utilitzar i els residuals admissibles.

4.3.1 Elecció del solver de l'OpenFOAM i configuració de les condicions d'execució

Actualment la varietat de solvers d'OpenFOAM disponibles per escollir és bastant àmplia i està en continu desenvolupament i ampliació. Els solvers es divideixen en els següents grups, segons quina sigui la naturalesa del cas: per a codi CFD "bàsic", flux incompressible, flux compressible, flux amb multi fase, Direct Numerical Simulation (DNS), combustió, transferència de calor, fluxos de partícules de seguiment, mètodes de dinàmica molecular, Direct Simulation Monte Carlo (DSMC), electromagnètic, anàlisi d'esforços en sòlids i per últim un solver per a finances.

Òbviament, pel present estudi es limitarà l'elecció entre els possibles solvers dins del grup de flux incompressible. Així doncs, dintre d'aquest grup s'escull el *pimpleDyMFoam*, ja que permet treballar en règim transitori, malla dinàmica i fluxos turbulents per a fluids Newtonians. És molt recomanable que per a construir un cas amb OpenFOAM s'usi un tutorial del mateix tipus de solver a utilitzar, ja que, d'aquesta manera, només és necessari canviar les carpetes del directori '0', crear el nou mallat a la carpeta constant i realitzar les respectives modificacions als fitxers del directori *system*. Per a aquest cas, s'ha consultat el tutorial *propeller* del solver *pimpleDyMFoam*.

A l'annex C es realitza una descripció més detallada de totes les modificacions realitzades en el cas.

4.3.2 Determinació dels paràmetres a variar en les simulacions

Un cop definit per complet el cas, es determinen els paràmetres que s'hauran de variar a la simulació, ja que, finalment, el que es busca és la determinació de la corba de potència. Així doncs, les simulacions es centraran en l'obtenció d'una corba de potència per a cada velocitat del vent. Es començarà fixant la velocitat d'entrada del vent al volum de control (la velocitat de la *inlet*, així com les condicions de turbulència) i es realitzaran diverses simulacions tot variant el règim de gir de les pales. Seguint aquesta metodologia es voldrà obtenir diverses corbes de potència que cobreixin el rang de funcionament de l'aerogenerador. Finalment, es superposaran aquestes

corbes i s'uniran els punts de màxima potència per a cada velocitat del vent. D'aquesta manera s'obtindrà la corba potència màxima–velocitat de gir òptima, la qual hauria de concordar amb els resultats facilitats pel fabricant.

4.4 POST-PROCÉS

Finalitzades les simulacions, es procedeix a analitzar-ne els resultats obtinguts mitjançant el paraView, que és un programa que permet representar valors de forma gràfica directament sobre el nostre volum de control. En aquest capítol s'analitzaran els resultats obtinguts per al cas d'un vent incident de 7 metres per segon i una velocitat de rotació de l'aerogenerador (la freqüència de gir teòrica, segons el Tip Speed Ratio) de 340 rpm. Es determinarà la validesa dels resultats per a aquest cas en concret i, a partir d'aquí, s'extrapolarà per a tots els altres casos.

Abans d'entrar en detall en l'anàlisi de les velocitats i de les pressions, es realitza una breu anàlisi del comportament d'aquestes variables al llarg del volum de control, per tal de predir si els resultats de les simulacions són coherents.

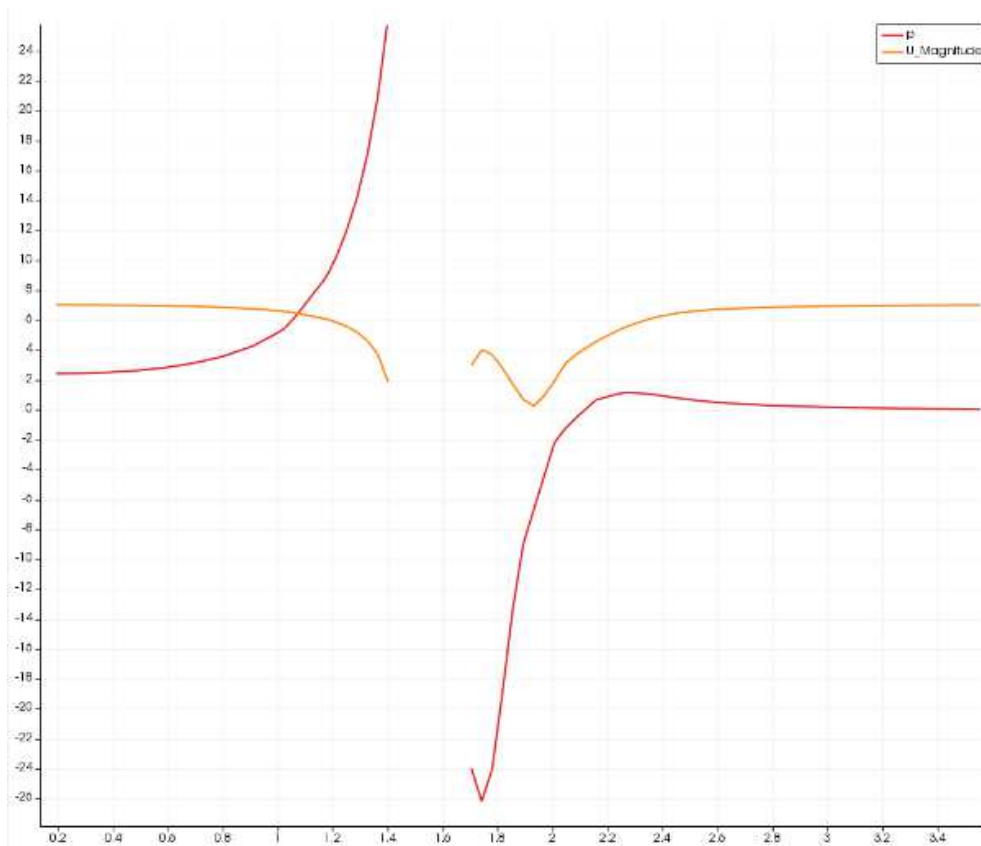


Figura 38: evolució de les pressions i les velocitats al llarg del volum de control

La Figura 38 mostra com evolucionen les pressions i les velocitats al llarg de la línia longitudinal que travessa tot el volum de control, passant pel centre de rotació de l'aerogenerador. A l'eix horitzontal es representa la distància longitudinal del volum de control, expressada en metres i, a l'eix vertical, es representen els valors de la velocitat en m/s i els valors de la pressió en Pascals.

Comparant la Figura 38 amb la gràfica presentada a l'inici de l'apartat 2, concretament a la Figura 3, es pot afirmar que els valors simulats són coherents, ja que, just abans de l'aerogenerador, hi ha un augment de la pressió, provocat per la caiguda de la velocitat. Aigües avall de l'aerogenerador la pressió experimenta un descens prenent valors per sota de la pressió atmosfèrica. Aquesta caiguda de pressió és deguda fonamentalment pel treball realitzat per l'aire sobre l'aerogenerador.

Pel que fa a la velocitat, l'aire experimenta una reducció quan s'apropa a l'aerogenerador. Aigües avall de l'aerogenerador es pot observar una irregularitat en les velocitats provocades per les turbulències.

Després d'aquest primer anàlisi, es procedeix a analitzar amb més detall els valors de velocitat i pressions per a tots els punts del volum de control i a verificar-ne el seu valor.

4.4.1 Velocitats

A continuació es realitza un estudi de les velocitats simulades per tal d'analitzar la validesa dels resultats obtinguts. Concretament, a la Figura 39 es pot apreciar la velocitat del vent en cada punt del canal d'aire per a una velocitat a l'entrada de 7 m/s.

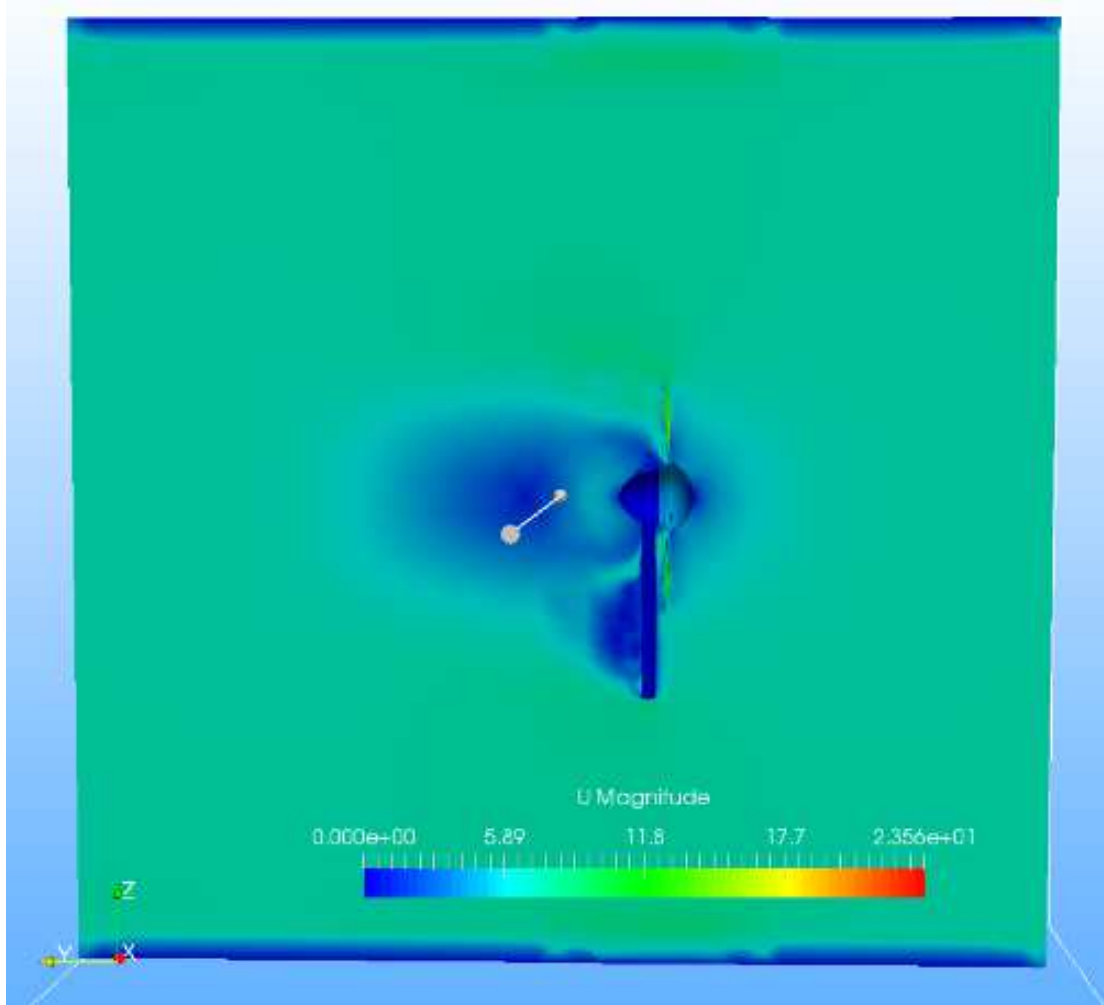


Figura 39: velocitats del vent simulades obtingudes en el canal d'aire (vista longitudinal)

Si s'observen amb deteniment els valors dels resultats, la velocitat en les zones llunyanes de l'aerogenerador és pràcticament la mateixa a la de l'entrada, de 7 m/s. Això indica que les dimensions del volum de control són suficientment grans com per associar aquesta simulació al funcionament real de l'aparell a l'aire lliure.

Tal i com s'ha demostrat teòricament a l'apartat 2.1.2, la velocitat de l'aire va disminuint a mesura que s'apropa a l'aerogenerador. Aigües avall de l'aerogenerador, la velocitat de l'aire disminueix fins a valors nuls o bé negatius perquè experimenta canvis de direcció i sentit a causa de les turbulències generades pel moviment de les pales. Aquestes turbulències es poden apreciar a la Figura 41, on es representen les vorticitats que experimenta l'aire al passar per l'aerogenerador.

Per altra banda, si s'analitza amb deteniment l'escala de valors obtinguts, s'observa que s'ha registrat un valor màxim de velocitat equivalent a 23.56 m/s. A la Figura 40 s'observa de forma més clara la causa d'aquests resultats, produïts pels alts nombres

de Reynolds que s'obtenen a les puntes de les pales. És precisament a les puntes de les pales on s'ha de prestar especial atenció en el disseny dels aerogeneradors, ja que quan s'obtenen valors crítics de velocitats es poden obtenir problemes acústics.

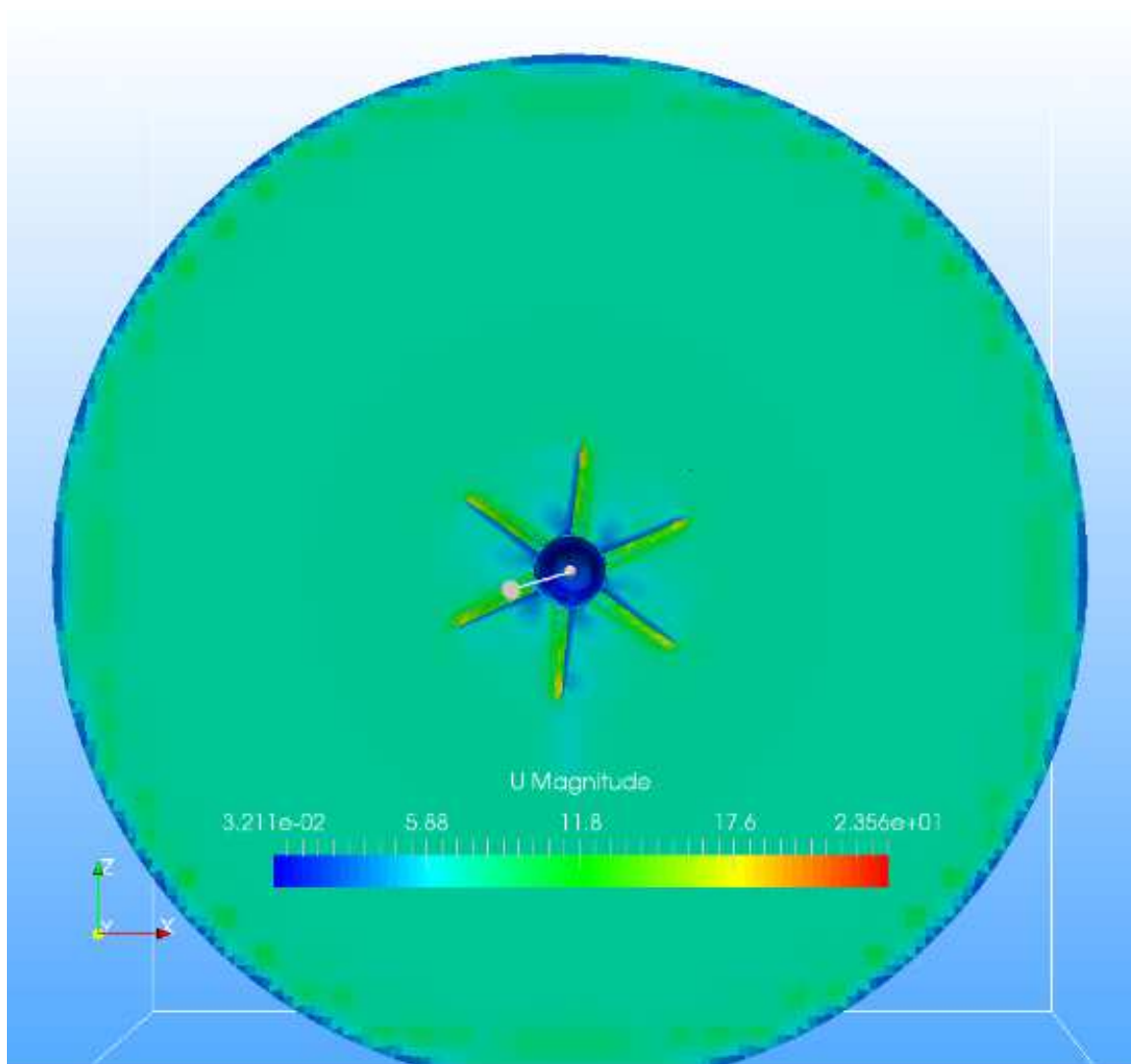


Figura 40: velocitats del vent simulades obtingudes en el canal d'aire (vista transversal)

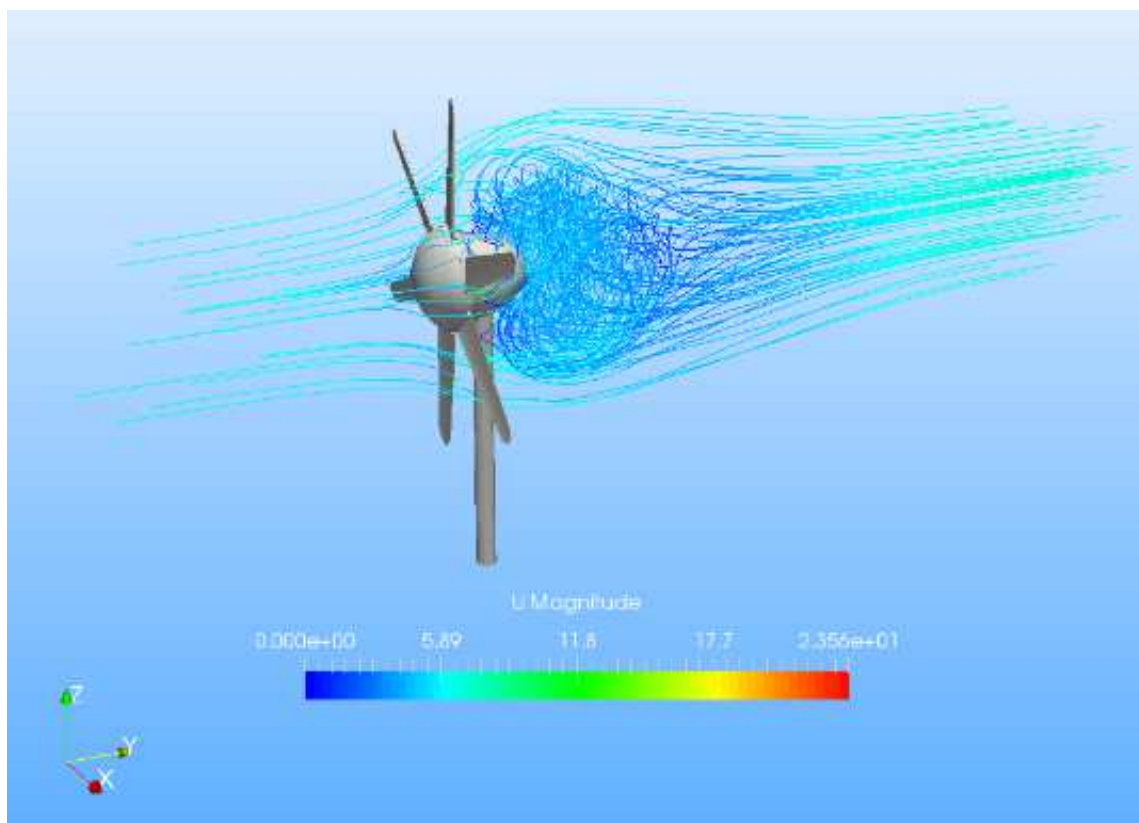


Figura 41: vorticitats de l'aire simulades dins del canal d'aire

4.4.2 Pressions

Si s'analitzen les pressions produïdes per l'aire sobre l'aerogenerador a la Figura 42, es pot observar que a la punt del *hub* s'obtenen sobrepressions amb valors màxims de 123 Pa. No obstant, la zona que resulta de més interès per a l'estudi de les pressions es localitza als contorns de les pales, concretament sobre el perfil aerodinàmic.

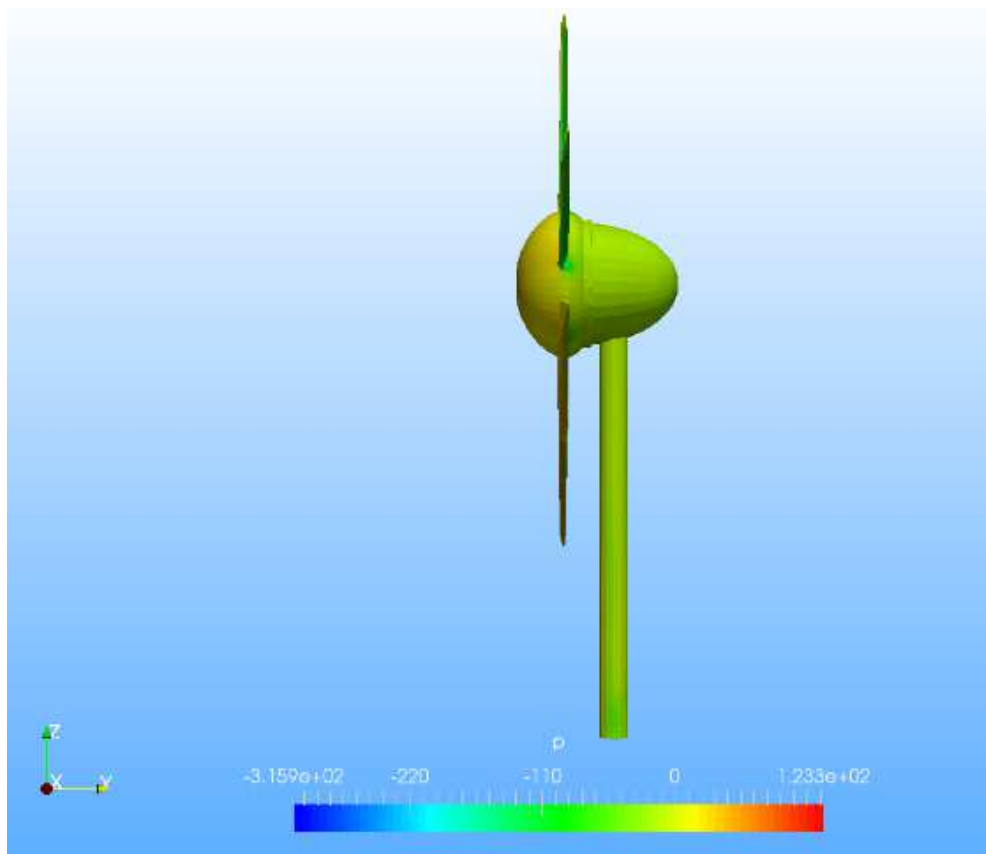


Figura 42: distribució de pressions a la superfície de l'aerogenerador (vista global)

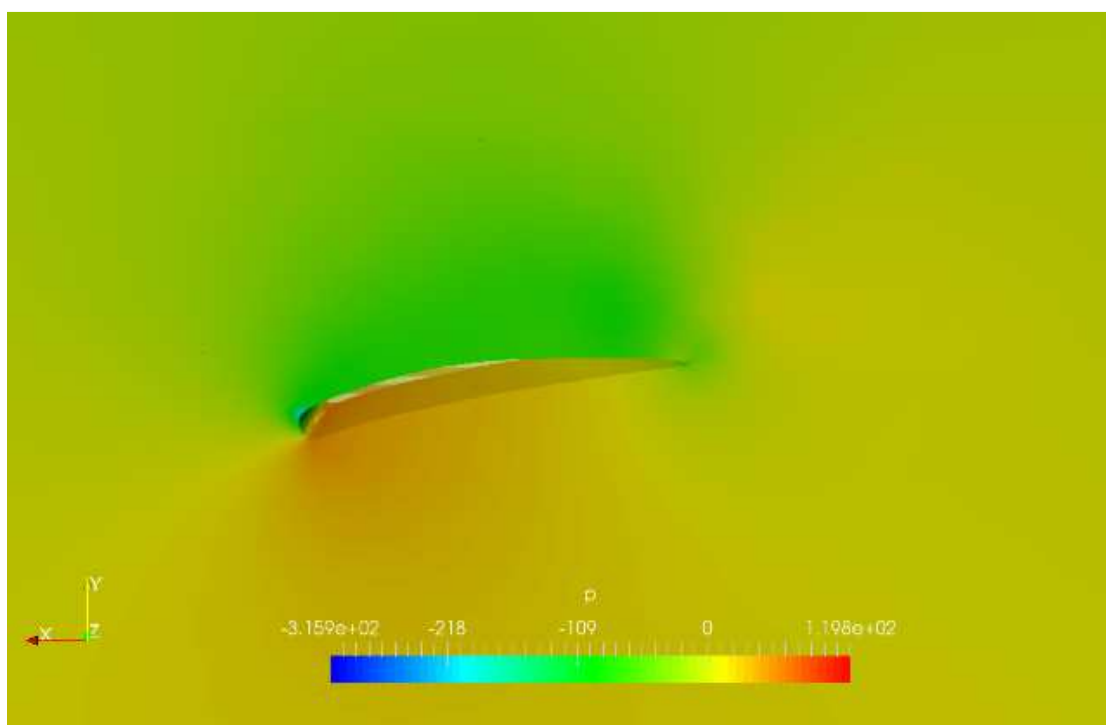


Figura 43: distribució de pressions al perfil aerodinàmic

El vent incideix sobre el perfil aerodinàmic en la direcció de les y positives, d'aquí s'explica que a l'intradós del perfil hi hagi sobrepressions. L'interacció de l'aire sobre el perfil genera una força de component perpendicular a la direcció del vent, coneguda com la força de sustentació o *lift*, que és la responsable del parell mecànic que es produeix sobre l'eix de rotació. No obstant, també apareix una força paral·lela a la direcció del vent, la força d'arrossegament o *drag*. L'objectiu que es busca en el disseny dels perfils és el de reduir el màxim possible el *drag* i maximitzar el valor del *lift*.

Aquesta força de sustentació s'origina com a resultat de la interacció de la circulació de l'aire al voltant del perfil i de la direcció de l'aire de la *inlet*, tal i com es representa a la Figura 44.

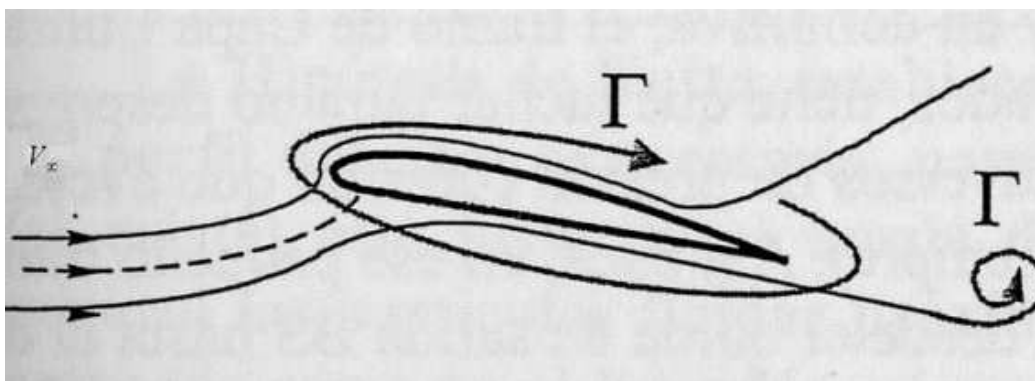


Figura 44: fluid real amb viscositat al voltant d'un perfil que per reacció crea una corrent igual a Γ i de sentit contrari

Font: VIRGIL I NARANJO, MARÍA. Cálculo del flujo potencial compresible alrededor de perfiles aerodinámicos. Projecte/ Treball Fi de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid.

A la pràctica, el fluid intenta fer la volta al perfil però, quan arriba a la punta de darrera del perfil, es forma un remolí que es desprèn i es desplaça aigües avall. Per teoremes de conservació de la circulació es crea al voltant del perfil una circulació justament d'igual intensitat i sentit contrari. A partir de la combinació d'aquests factors es justifica que a la punta de l'intradós hi hagi sobrepressions, mentre que a la punta de l'extradós es produeixen depressions, que van disminuint conforme s'allunyen de la punta. Aquesta distribució de pressions sobre el perfil també es pot observar de forma clara a la Figura 45.

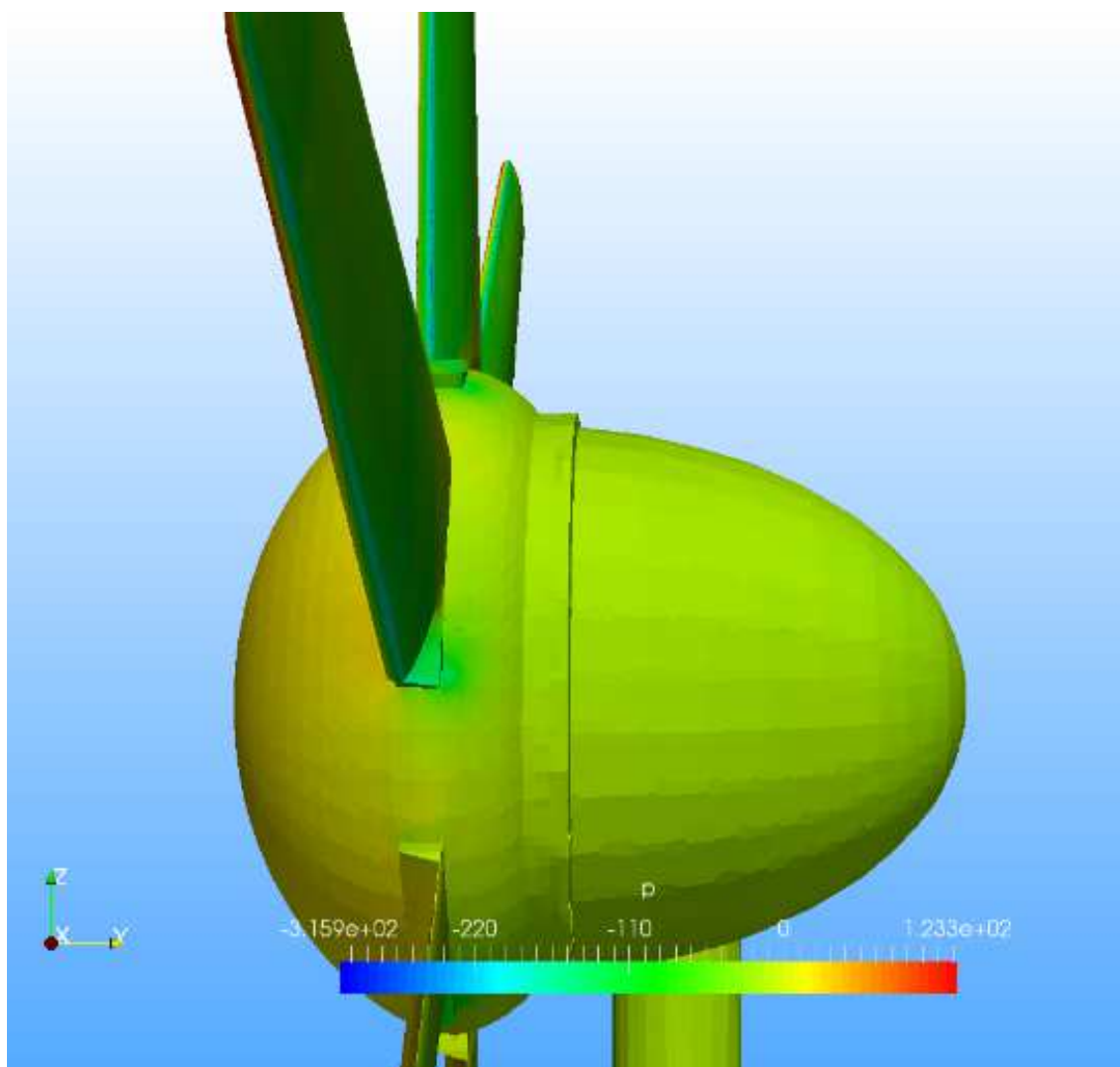


Figura 45: distribució de pressions a les pales de l'aerogenerador en detall

Com que tant els resultats de pressions com els de velocitats obtinguts en la simulació resulten coherents, es procedirà a analitzar els valors de forces i moments obtinguts sobre l'eix de rotació.

4.4.3 Moments

Els resultats de les forces i els moments es guarden en un fitxer de format .dat i es guarda el valor per cada *timestep*. Tal i com es pot observar en la gràfica de la Figura 46, és necessari realitzar un nombre elevat d'interval de temps en el càlcul (*timesteps*) per tal d'estabilitzar el valor mitjà del moment obtingut.

En el fitxer esmentat es faciliten els següents valors per a cada interval de temps: per una banda, les forces i moments deguts a la pressió i, per altra banda, els valors dels moments i forces viscoses, que són produïts pel fregament del fluid al entrar en

contacte amb el cos. Així doncs, el moment que es considera és la suma dels dos tipus de moments produïts en l'eix y, que és l'eix de rotació de l'aerogenerador.

Per a calcular la potència mecànica generada es pren el moment mitjà de cada simulació, sense tenir en consideració el sobrepic inicial. En aquest cas específic, el moment mitjà equival a 0.643 N·m.

Seguint aquesta metodologia d'anàlisi de resultats, a l'annex B es recullen els resultats dels moments de totes les simulacions.

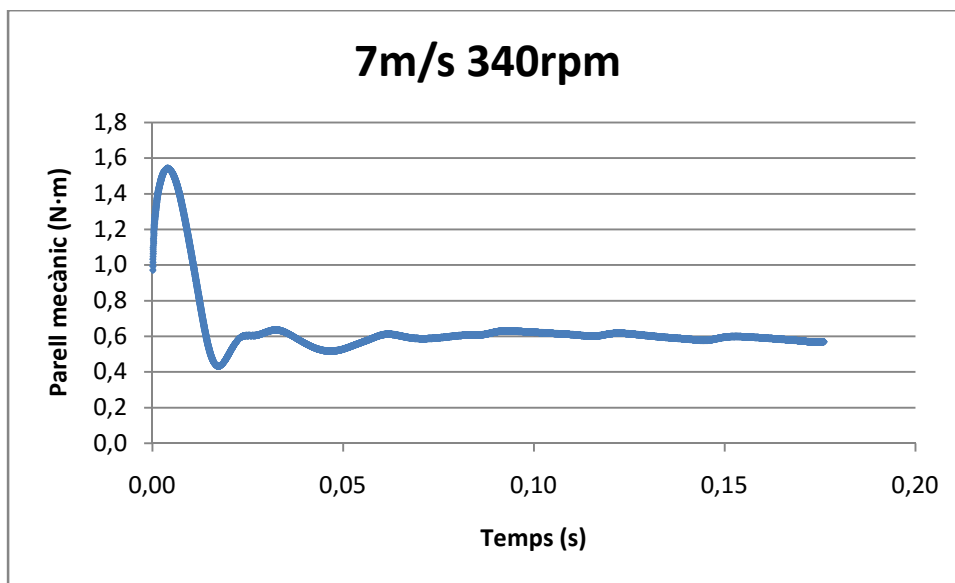


Figura 46: parell mecànic instantani provocat sobre l'eix de rotació

4.5 OBTENCIÓ DE LA CORBA DE POTÈNCIA

Per a la obtenció de la corba de potència es segueix una metodologia similar a la utilitzada en les mesures experimentals. En primer lloc, es procedeix a la construcció de les corbes de potència obtingudes per a cada velocitat del vent i, en segon lloc, es representen totes aquestes sobre una mateixa gràfica.

Així doncs, procedint amb la metodologia descrita s'obté la gràfica de la Figura 47.

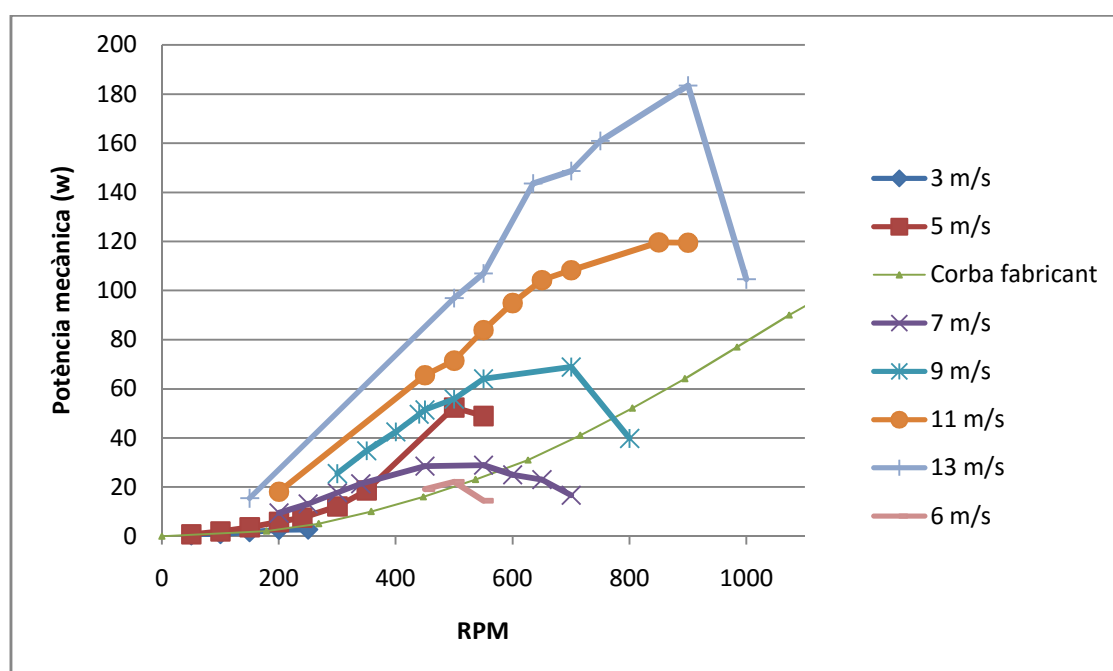


Figura 47: superposició de les corbes de potència simulades

Unint els punts de màxima potència per a cada velocitat del vent, s'obté la corba òptima, representada a la Figura 48.

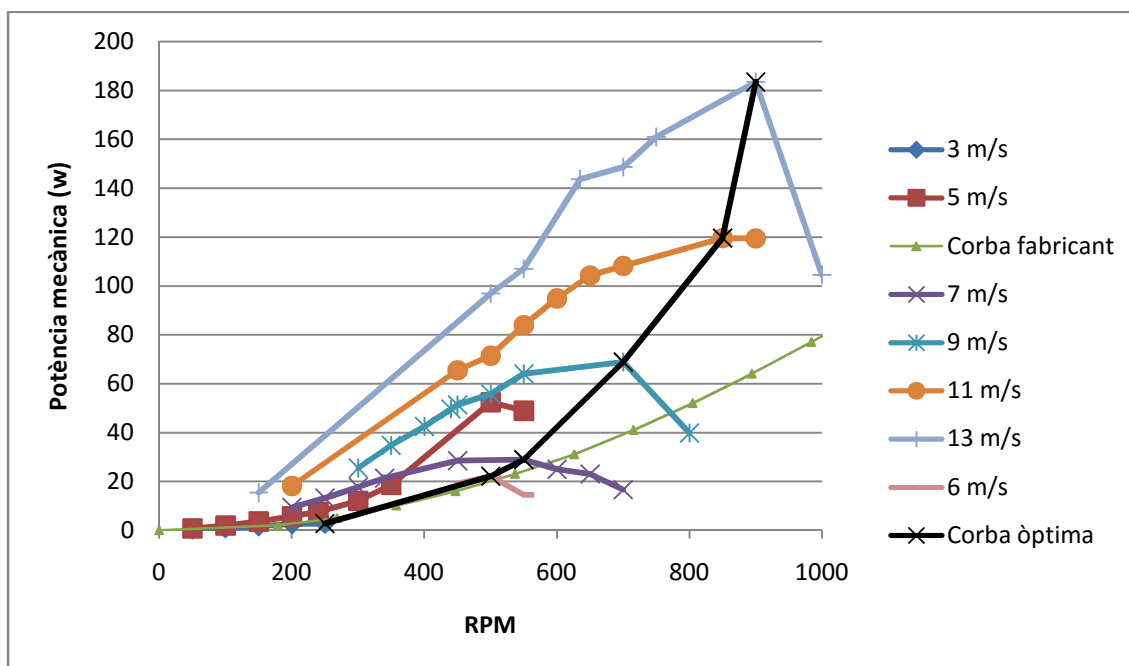


Figura 48: corba òptima simulada potència mecànica – freqüència de gir

Si es representen els punts de màxima potència de cada velocitat simulada s'obté la distribució representada a la gràfica de la Figura 49.

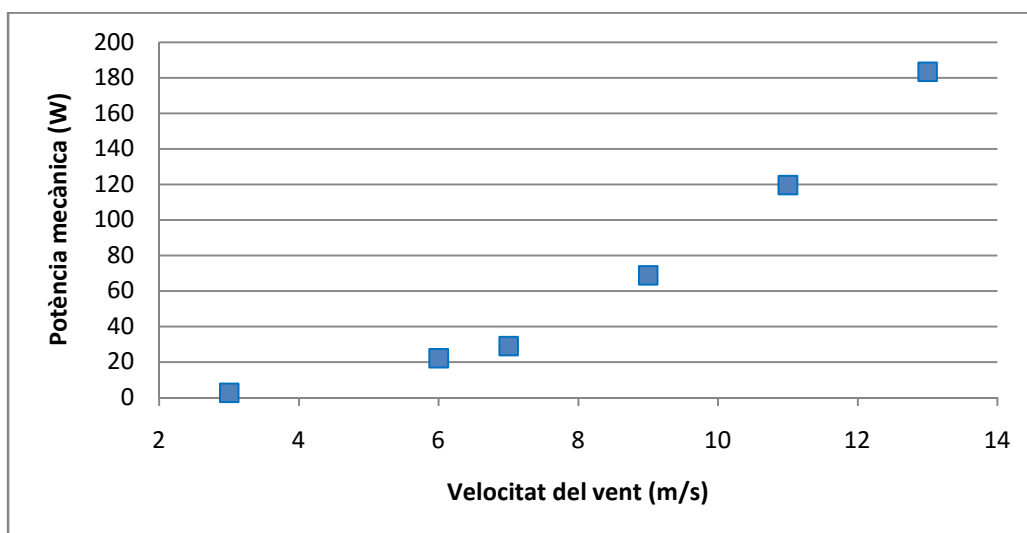


Figura 49: distribució potència mecànica simulada – velocitat del vent incident

Utilitzant l'eina Microsoft Excell, es realitza una interpolació potencial dels punts de màxima potència trobats amb un grau de representació (R^2) del 99.8 %:

$$P_{mec}(u) = 0.116 \cdot u^{2.883}$$

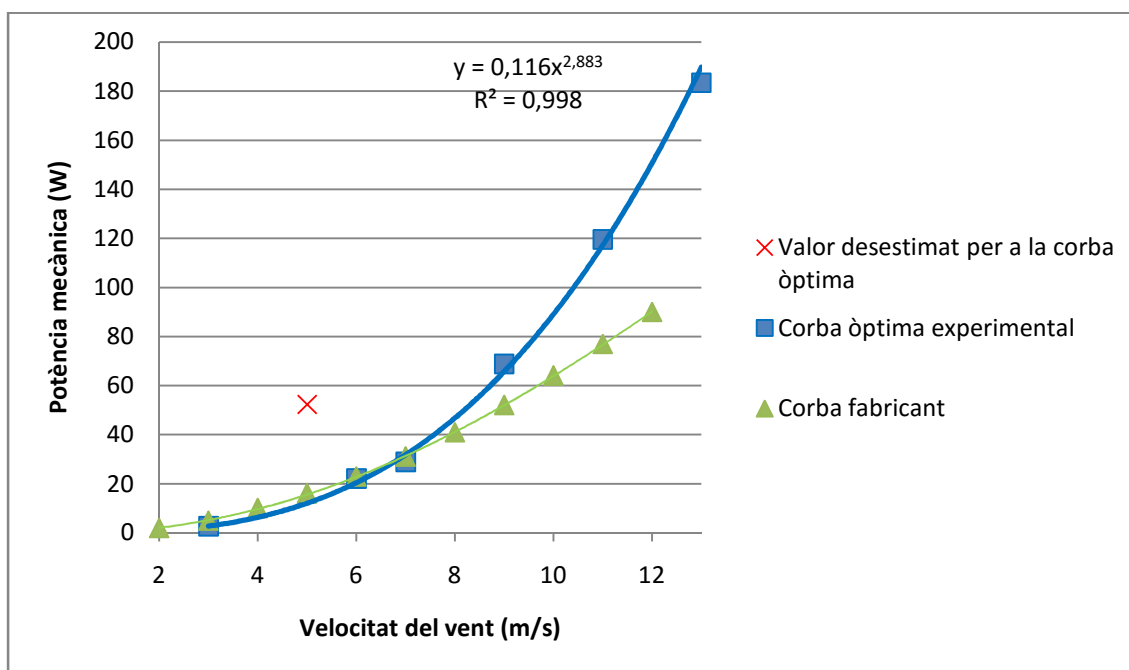


Figura 50: comparació corba de potència simulada amb la corba facilitada pel fabricant

Tal i com es pot observar a la Figura 50, es compara la corba de potència trobada a partir de les simulacions, que representa la potència mecànica, amb la corba facilitada pel fabricant, que correspon a la potència elèctrica. Cal destacar que s'ha identificat el valor de la potència per a la velocitat de 5 m/s com a dada atípica, ja que s'allunya massa del comportament exponencial esperat.

5. SÍNTESI DE RESULTATS

Un cop calculada la corba de potència mecànica, obtinguda a l'eix de rotació de l'aerogenerador a partir de les simulacions, i calculada la corba de potència elèctrica, obtinguda al banc de proves, resulta de gran interès realitzar una comparació final entre les corbes interpolades. Aquesta comparació permet obtenir un rendiment en la conversió de la potència mecànica a la potència elèctrica, tal i com es pot observar a la Figura 51.

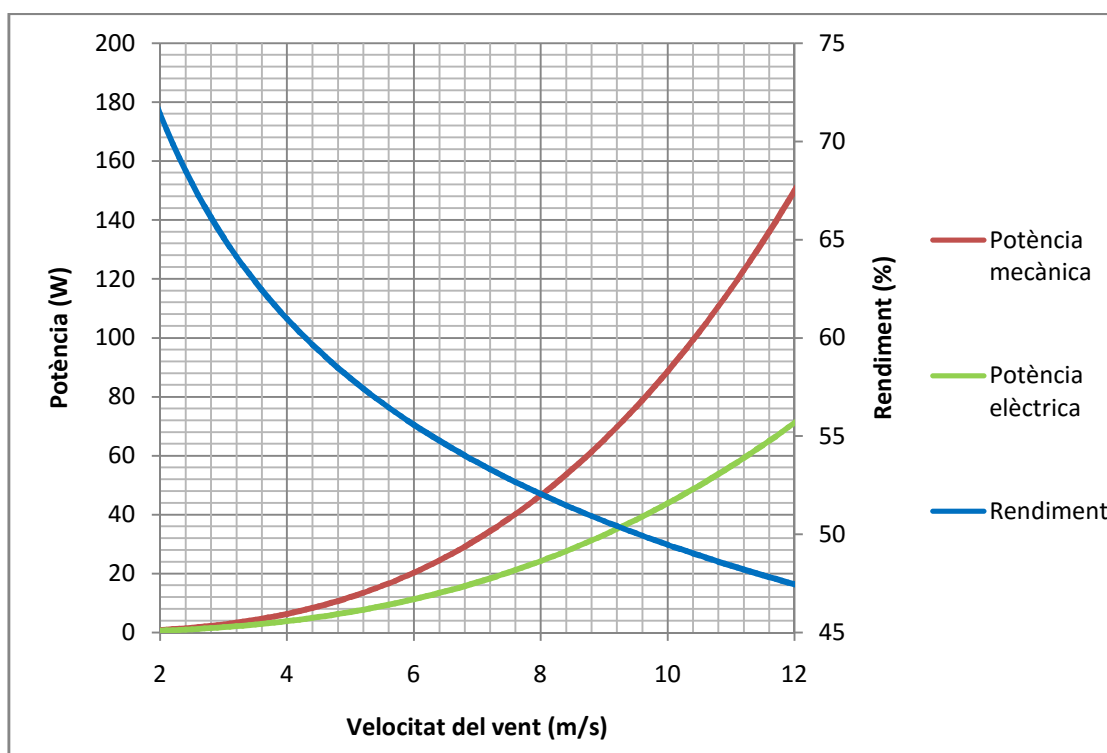


Figura 51: corba de rendiment en la conversió de potència mecànica a elèctrica

Si es realitza una anàlisi detallada de la corba de rendiment, s'observa que per a valors baixos de velocitats del vent (2-4 m/s), la taxa de conversió d'energia mecànica a energia elèctrica és prou bona, ja que en aquest interval bàsicament només hi intervenen les pèrdues mecàniques produïdes pels fregaments entre components. No obstant, per a valors més elevats de la velocitat del vent, el rendiment energètic de l'aerogenerador decau en picat, provocat bàsicament per una caiguda en l'eficiència del generador de pols magnètics permanents.

6. RESUM DEL PRESSUPOST

El pressupost d'execució d'aquest estudi suma la quantitat de **CINC MIL VUITANTA-CINC AMB QUARANTA-CINC CÈNTIMS (5.085,45 EUROS)** , que sumant-hi el 13% en concepte de Despeses Generals d'Empresa, el 6% en concepte de Benefici Industrial i l'increment del 21% d'I.V.A., s'obté un pressupost total de **SET MIL TRES-CENTS VINT-I-DOS AMB CINQUANTA-CINC CÈNTIMS (7.322,55 EUROS)**.

7. CONCLUSIONS FINALS

El principal objectiu que s'ha plantejat aquest estudi ha estat el de determinar i comprovar la validesa de la corba de potència de l'aerogenerador Guangmang M-300, situat al laboratori d'energies de l'EPS. Si bé de bon començament semblava una fita relativament senzilla i assequible d'executar, a mesura que s'ha anat avançant i aprofundint en el tema s'ha apreciat l'elevada dificultat, tant del tema estudiat com del material i els programes utilitzats.

Des de la fase inicial del treball s'ha plantejat com a premissa bàsica l'ús del programa OpenFOAM, ja que resulta de gran interès realitzar un estudi de caire fluidomecànic prescindint de les llicències comercials, l'adquisició de les quals representa una aportació econòmica molt important. Si bé hauria estat possible realitzar el treball amb una versió acadèmica de l'ANSYS, sempre s'hauria comptat amb el problema de la limitació de punts de càlcul, la qual cosa en segons quins casos acaba originant problemes de precisió de resultats.

Un dels primers obstacles que s'ha evidenciat en la fase inicial ha estat l'aprenentatge amb l'entorn de treball de l'OpenFOAM. A diferència d'altres programes comercials, aquest últim no disposa d'entorn gràfic, ja que totes les variables s'entren directament a partir de biblioteques i codis informàtics en llenguatge C++. Per altra banda, al principi és significativament complex familiaritzar-se amb el procés de creació de la malla i el refinament. Aquest temps d'aprenentatge s'ha vist incrementat pel fet que aquest programa no és tant conegut com els altres programes comercials, la qual cosa complica trobar molta informació que resulta imprescindible per a la creació de molts casos de treball. De forma paral·lela a aquest procés, s'ha investigat com construir el cas específic per a la simulació que, tal i com es comenta a l'apartat 2.2.2, s'ha optat per simular el cas amb malla dinàmica.

Per altra banda, una de les grans complicacions que s'han presentat en aquest treball ha estat la construcció de la malla, ja que s'han hagut de construir i provar moltes versions d'aquestes fins a trobar una versió estable, que també presentés una bona relació entre precisió de resultats i temps de càlcul requerit. Els primers resultats de moments que es van registrar resultaven incoherents, ja que la magnitud d'aquests no era l'esperada. Analitzant amb més deteniment el problema, es va determinar que l'error era atribuït a un model de turbulència que no era adequat pel cas d'estudi. Així

doncs, es va canviar el model de turbulència emprat del k-epsilon al kOmegaSST, que és el model que s'ha utilitzat finalment en les simulacions.

Paral·lelament, una altre obstacle que es va presentar, i potser el més important, va ser la determinació del perfil aerodinàmic de les pales. Existeixen molts perfils aerodinàmics i si no es disposa de la referència exacta, per molt petita que sigui la variació de la forma, apareixen grans diferències en els resultats de les simulacions. Si bé en diverses ocasions es va intentar establir contacte amb el fabricant intentant sol·licitar la referència del perfil, no es va obtenir resposta. Així doncs, l'única manera de procedir era la d'intentar extreure de forma directa el perfil a partir de mesures realitzades sobre la pala. Per fer-ho, se'n va construir un motlle mitjançant un material deformable per tal d'aconseguir la forma del perfil. Una vegada aconseguit aquest perfil es va intentar comparar-lo amb tots els perfils aerodinàmics disponibles en una base de dades de perfils. Com que no es va trobar cap similitud amb cap perfil en concret, es va haver d'importar la forma aproximada del perfil i, com s'ha pogut apreciar en els resultats de les simulacions, el fet de no tenir un perfil exacte ha contribuït a l'aparició d'errors per a nombres elevats de velocitats del vent.

Pel que fa als resultats que s'han obtingut de forma experimental, s'han donat com a vàlids i s'ha confirmat que, degut a la semblança obtinguda entre les mesures i els resultats facilitats pel fabricant, la metodologia en la presa de dades ha estat la correcta. Si bé durant les primeres etapes del treball no es sabia del cert si la potència facilitada pel fabricant en la corba de potència corresponia a la potència mecànica o bé a la potència elèctrica, després de realitzar aquests assajos al banc de proves i realitzar el posterior tractament de dades, s'ha determinat que els resultats corresponen directament a la potència elèctrica.

La part experimental del treball ha resultat imprescindible, ja que els resultats obtinguts en les simulacions corresponen a la potència mecànica, i no pas l'elèctrica. Així doncs, si es realitza una comparació entre els resultats experimentals i els resultats simulats o, dit d'una altra manera, si es compara la potència elèctrica i la potència mecànica, és possible determinar el factor de conversió d'energia.

Tal i com s'ha pogut comprovar, la diferència entre la potència mecànica i la potència elèctrica es va accentuant a mesura que augmenta la velocitat del vent incident i, en conseqüència, de la freqüència de gir de l'aerogenerador. Així doncs, resulta coherent afirmar que el rendiment de conversió de potència mecànica a potència elèctrica va disminuint a mesura que augmenta la velocitat del vent, ja que s'han assolit valors

inferiors al 50% de rendiment. Aquesta afirmació, demostra que el generador de pols magnètics permanents de l'aerogenerador és de baixa qualitat, tal i com s'havia suposat des de bon començament. És important destacar que també s'ha de tenir en consideració el fet que aquesta diferència de resultats per a nombres elevats del vent també es deu a la imprecisió del perfil aerodinàmic utilitzat.

Altrament és important tenir en compte i qüestionar la total precisió dels valors aportats pel fabricant que, en varis aspectes indueix a atribuir certs errors a la poca fiabilitat i qualitat del producte. Els més importants a destacar són: la baixa qualitat del generador de pols magnètics permanents, que ofereix una mala taxa de conversió d'energia mecànica a energia elèctrica, i que el model no disposa de controlador de velocitat. A la fitxa tècnica de la parell s'indica que la màquina disposa d'un controlador de velocitat però, després d'examinar-lo detingudament, no s'ha pogut localitzar cap mecanisme per a la limitació de la velocitat de gir.

Si es volguessin millorar els resultats obtinguts en el present estudi, seria imprescindible realitzar un nombre molt més elevat de simulacions. Per una banda, s'hauria de refinar més la malla al voltant del perfil aerodinàmic i, per altra banda, s'hauria de calcular la corba de potència per a cada velocitat del vent compresa en l'interval de 2-20 m/s.

En resum, gràcies a la realització del present estudi, s'ha pogut determinar la validesa de la metodologia emprada en l'obtenció dels resultats teòrics i experimentals. Ambdós resultats s'han pogut relacionar i justificar entre sí. Pel que fa a l'ús del programa OpenFOAM, resulta de gran utilitat ja que ofereix una gran potència de càlcul i una gran llibertat a l'hora de manipular les condicions de les simulacions. No obstant, utilitzar aquest programa requereix una enorme despesa inicial de temps per tal d'assolir els coneixements necessaris.

Signat

L'autor, Xavier Orri Vila

Girona, 1 de setembre de 2016

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] BERENGUER VILAMITJANA, MARC. Anàlisi mitjançant mecànica de fluids computacional d'un aerogenerador minieòlic. Projecte/ Treball Fi de Carrera. Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial. Escola Politècnica Superior. Universitat de Girona. Setembre de 2014.
- [2] BOVER I PAGÈS, NIL. Simulació fluídica amb programari de codi lliure del sistema d'assecatge d'un jet d'aire per a l'escalfament d'un element plàstic. Projecte/ Treball Fi de Carrera. Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial. Escola Politècnica Superior. Universitat de Girona. Setembre de 2015.
- [3] CFD ONLINE. Turbulence free-stream boundary conditions. (http://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_free-stream_boundary_conditions, recuperat el juny de 2016).
- [4] CFD ONLINE. Turbulence intensity.

(http://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_intensity, recuperat el juny de 2016).
- [5] CFD ONLINE. Turbulence length scale.

(http://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulent_length_scale, recuperat el juny de 2016).
- [6] CHRISTOPHER J. GREENSHIELDS, CFD Direct Ltd. OpenFOAM User Guide. 2015 OpenFOAM Foundation Ltd.
- [7] J.L. RODRÍGUEZ AMENEDO, J.C. BURGOS DÍAZ, S. ARNALTE GÓMEZ. Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica. Editorial Rueda S.L. Madrid. 2003.
- [8] L. LÓPEZ ZAMORA I J.L. MUÑOZ-COBO. Estudio de la Turbulencia a través del modelo k-e, mediante un código tridimensional con esquemas de alto orden. Información tecnológica. Vol. 15. No. 2. p 25-28. 2004.

- [9] M. RAGHEB. Optimal rotor Tip Speed Ratio.
(<http://mragheb.com/NPRE%20475%20Wind%20Power%20Systems/Optimal%20Rotor%20Tip%20Speed%20Ratio.pdf>, recuperat el juny de 2016).
- [10] NOZAKI, FUMIYA. CFD for Rotating Machinery
(<http://es.slideshare.net/fumiyanozaki96/cfd-for-rotating-machinery-using-openfoam>, recuperat el juny de 2016).
- [11] RICART I FERRER, JOSEP. Estudi de viabilitat tècnica d'un aerogenerador de baixa potència per a generació d'aire comprimit. Projecte/ Treball Fi de Carrera. Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial. Escola Politècnica Superior. Universitat de Girona. Setembre de 2007.
- [12] RICART I FERRER, JOSEP. Estudi de viabilitat tècnica d'un aerogenerador de baixa potència per a generació d'aire comprimit. Projecte/ Treball Fi de Carrera. Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial. Escola Politècnica Superior. Universitat de Girona. Setembre de 2007.
- [13] TONY BURTON, NICK JENKINS. Wind Energy Handbook. Segona edició. John Wiley & Sons. 2011
- [14] UNIVERSITAT DE GIRONA. Pràctica de lubricants i combustibles. Girona. 2013.
- [15] VIRGIL I NARANJO, MARÍA. Cálculo del flujo potencial compresible alrededor de perfiles aerodinámicos. Projecte/ Treball Fi de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid.

9. ÍNDEX DE DOCUMENTS

Aquest estudi consta dels següents documents:

- Document 1: Memòria i annexos
- Fulla de càlcul 1: Resultats laboratori
- Fulla de càlcul 2: Resultats OpenFOAM
- Fulla de càlcul 3: Rendiments Guangmang M-300

ANNEX A: CÀLCUL CONDICIONS INICIALS DE LES SIMULACIONS

En aquest apartat es presentaran els càlculs utilitzats per a trobar les condicions inicials de les simulacions. Primerament, s'ha calculat la freqüència de gir en la qual s'hauria d'obtenir la potència màxima per a cada velocitat del vent. Per tal d'aconseguir-ho, es calcula la *Tip Speed Ratio* òptima a partir de la següent fórmula, obtinguda d'una font bibliogràfica:

$$\lambda_{opt} = \frac{4\pi}{n}$$

On n és el número de pales de l'aerogenerador.

Es recorda que la Tip Speed Ratio (λ), es un coeficient que relaciona la velocitat de la punta de la pala i la velocitat del vent incident.

Substituint n per 6, que són el número de pales que conformen l'aerogenerador, s'obté una λ_{opt} de 2.09. Una vegada conegut aquest valor, s'aplica la següent relació:

$$\lambda = \frac{\omega D}{2 \cdot V_{\infty}}$$

On ω és la freqüència de gir de l'aerogenerador en rad/s, D és el diàmetre de l'aparell i V_{∞} la velocitat del vent incident. Emprant aquesta relació per a cada velocitat del vent s'obtenen els resultats de la Taula 4.

v (m/s)	ω òptima (rad/s)	n (rpm)
1.5	7.6624	73.1845
2	10.2165	97.5793
3	15.3248	146.3690
4	20.4331	195.1587
5	25.5414	243.9484
6	30.6496	292.7381
7	35.7579	341.5278
8	40.8662	390.3175
9	45.9745	439.1072

-Continua a la pàgina següent-

10	51.0828	487.8969
11	56.1910	536.6866
12	61.2993	585.4763
13	66.4076	634.2659
14	71.5159	683.0556
15	76.6242	731.8453
16	81.7324	780.6350
17	86.8407	829.4247
18	91.9490	878.2144
19	97.0573	927.0041
20	102.1656	975.7938

Taula 4: càlcul de la freqüència de gir òptima a partir de la T.S.R

Els resultats calculats a la Taula 4 només serviran com a punt de referència per a iniciar les simulacions, ja que la T.S.R calculada a partir d'aquesta fórmula es pot allunyar significativament del valor real. Així doncs, en les simulacions, es realitzaran assajos per a freqüències de gir que es trobin al voltant d'aquestes freqüències de gir calculades.

Un cop determinada la velocitat a la qual giraran les pales de l'aerogenerador, es procedeix a calcular les variables necessàries per a definir el model de turbulència kOmegaSST per a cada velocitat del vent. Emprant les fórmules presentades a l'apartat 2.3, s'obtenen els resultats de la Taula 5.

Velocitat vent (m/s)	Re	I	k (m ² /s ²)	L (m)	ϵ (m ² /s ³)	ω (1/s)
1	217060	0.0344	0.0018	0.2296	0.0001	0.3354
2	434121	0.0316	0.0060	0.2296	0.0003	0.6151
3	651181	0.0300	0.0122	0.2296	0.0010	0.8771
4	868242	0.0290	0.0201	0.2296	0.0020	1.1281
5	1085302	0.0282	0.0297	0.2296	0.0037	1.3714
6	1302363	0.0275	0.0409	0.2296	0.0059	1.6086
7	1519423	0.0270	0.0536	0.2296	0.0089	1.8409
8	1736483	0.0266	0.0677	0.2296	0.0126	2.0690
9	1953544	0.0262	0.0832	0.2296	0.0172	2.2936
10	2170604	0.0258	0.1000	0.2296	0.0226	2.5151
11	2387665	0.0255	0.1182	0.2296	0.0291	2.7339
12	2604725	0.0252	0.1376	0.2296	0.0365	2.9502
13	2821785	0.0250	0.1583	0.2296	0.0451	3.1642
14	3038846	0.0248	0.1803	0.2296	0.0548	3.3762
15	3255906	0.0245	0.2034	0.2296	0.0656	3.5862
16	3472967	0.0244	0.2277	0.2296	0.0778	3.7946
17	3690027	0.0242	0.2532	0.2296	0.0912	4.0013
18	3907088	0.0240	0.2798	0.2296	0.1059	4.2065
19	4124148	0.0238	0.3076	0.2296	0.1221	4.4103
20	4341208	0.0237	0.3365	0.2296	0.1397	4.6128

Taula 5: valors de les variables turbulents per a cada velocitat del vent

ANNEX B: RESULTATS DE LES SIMULACIONS

A continuació es realitza un recull de totes les simulacions realitzades amb l'OpenFOAM agrupades per velocitats a la Taula 6. Addicionalment, es representen els valors tabulats en forma de gràfiques per a cada velocitat del vent incident.

Velocitat (m/s)	Freqüència de gir (rpm)	Parell (N·m)	Potència (W)
3	50	0.072	0.377
	100	0.087	0.911
	150	0.106	1.665
	200	0.121	2.534
	250	0.104	2.723
	300	0.059	1.854
5	50	0.149	0.780
	100	0.183	1.916
	150	0.230	3.613
	200	0.275	5.760
	240	0.300	7.540
	300	0.384	12.064
	350	0.507	18.583
	500	1.000	52.360
	550	0.849	48.899
6	450	0.406	19.132
	500	0.423	22.148
	550	0.251	14.457
7	200	0.449	9.404
	250	0.503	13.169
	300	0.562	17.656
	340	0.599	21.327
	450	0.604	28.463
	550	0.502	28.913
	600	0.397	24.944
	650	0.338	23.007
	700	0.227	16.640
9	300	0.810	25.447
	350	0.948	34.746
	400	1.014	42.474
	440	1.077	49.625
	450	1.090	51.365
	500	1.066	55.816

	550	1.111	63.989
	700	0.939	68.832
	800	0.475	39.794
11	200	0.865	18.117
	450	1.390	65.502
	500	1.364	71.419
	550	1.457	83.917
	600	1.510	94.876
	650	1.531	104.212
	700	1.476	108.196
	850	1.343	119.543
	900	1.267	119.412
13	150	0.980	15.394
	500	1.850	96.866
	550	1.857	106.956
	635	2.159	143.567
	700	2.027	148.587
	750	2.048	160.850
	900	1.946	183.406
	1000	0.998	104.510

Taula 6: resultats de les simulacions

A la pàgina següent s'adjunten les gràfiques de potència mecànica simulada i el parell mecànic simulat, en funció de la freqüència de gir de l'aerogenerador.

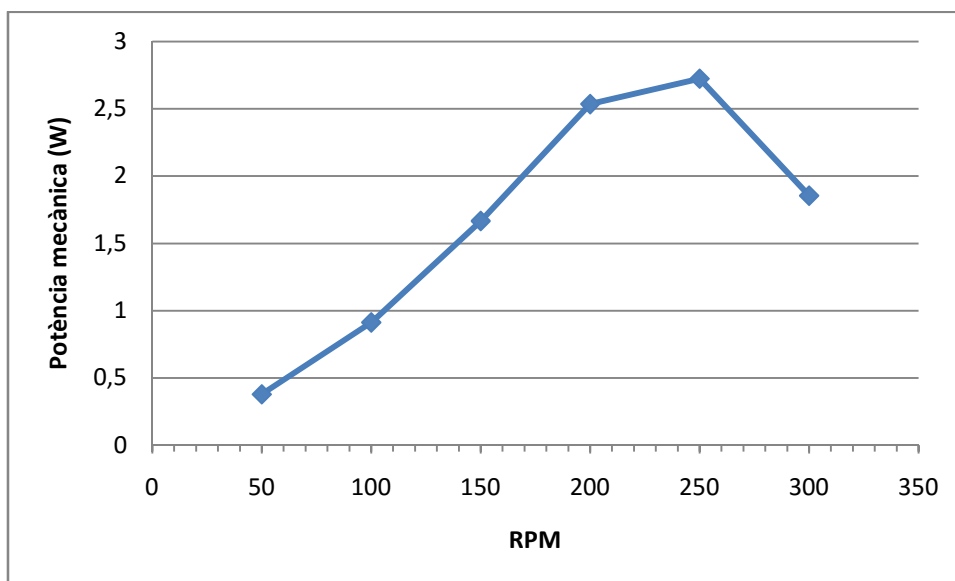


Figura 52: potència mecànica simulada – revolucions per minut per a un vent incident de 3 m/s

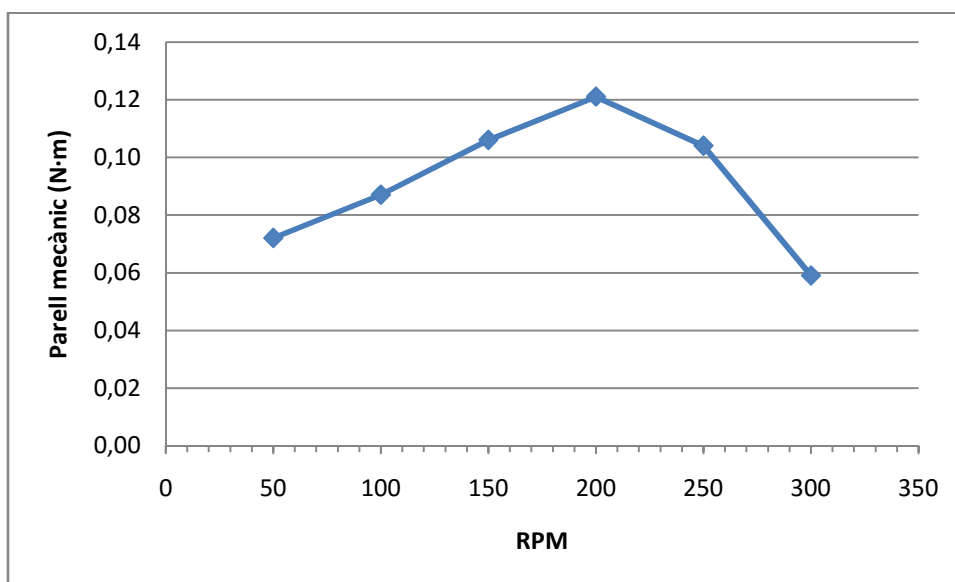


Figura 53: parell mecànic simulat – revolucions per minut per a un vent incident de 3 m/s

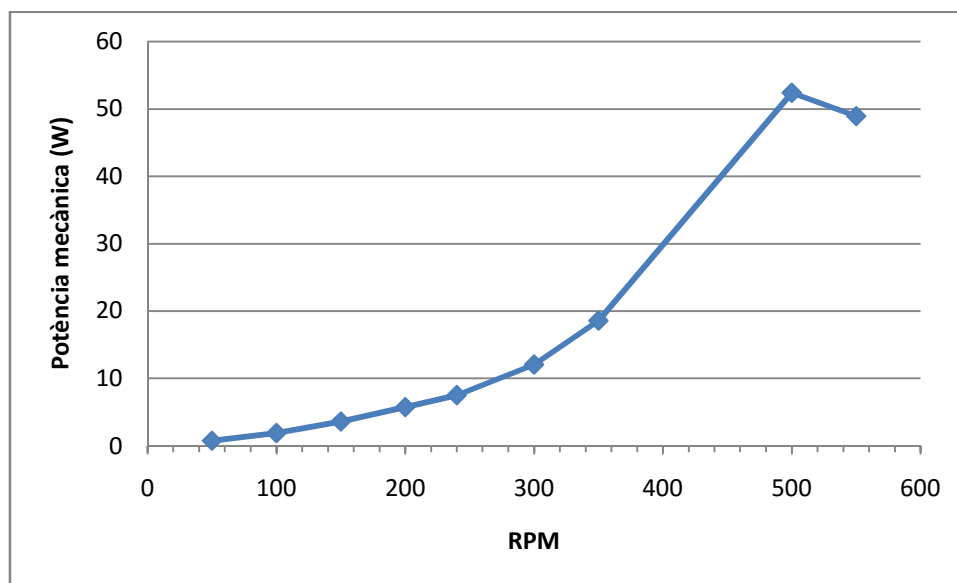


Figura 54: potència mecànica simulada – revolucions per minut per a un vent incident de 5 m/s

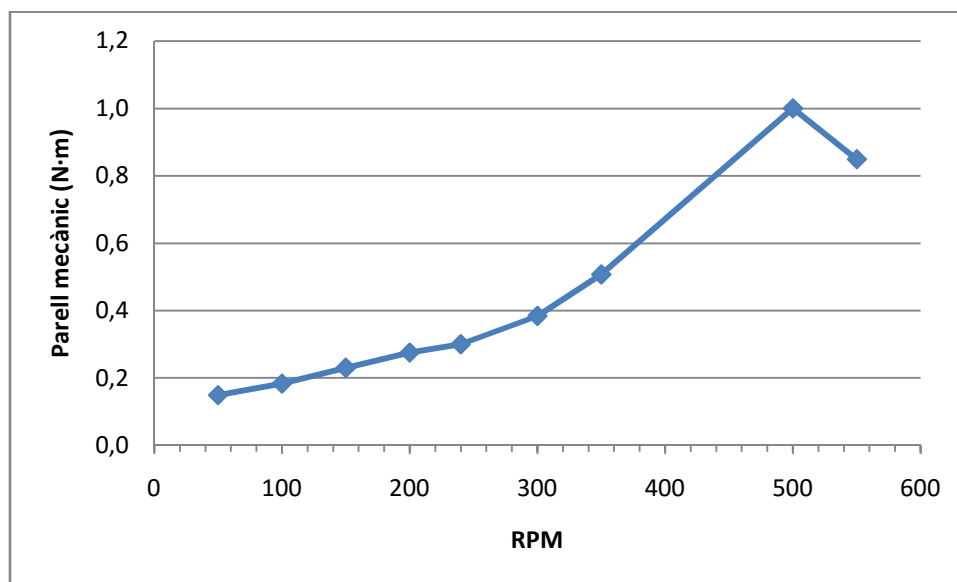


Figura 55: parell mecànic simulat – revolucions per minut per a un vent incident de 5 m/s

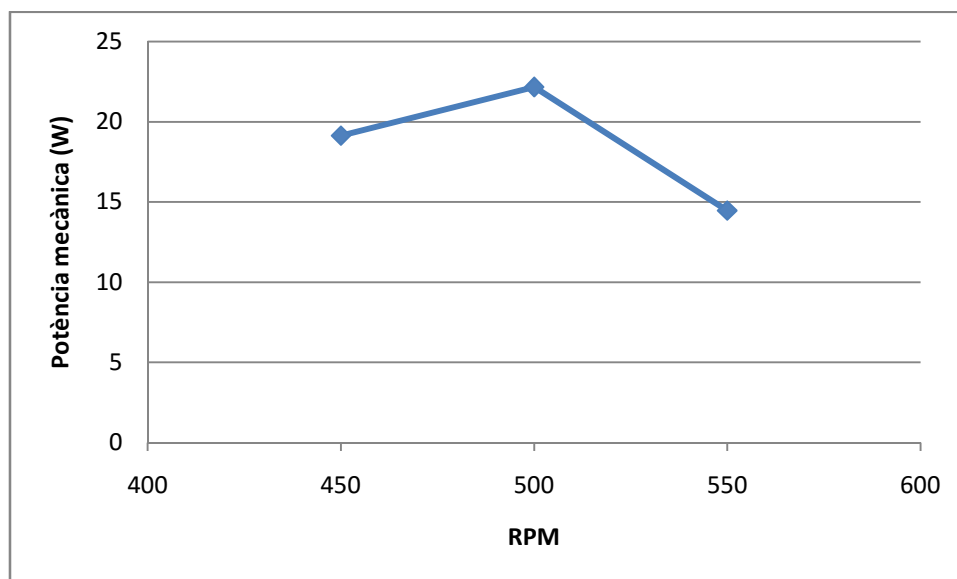


Figura 56: potència mecànica simulada – revolucions per minut per a un vent incident de 6 m/s

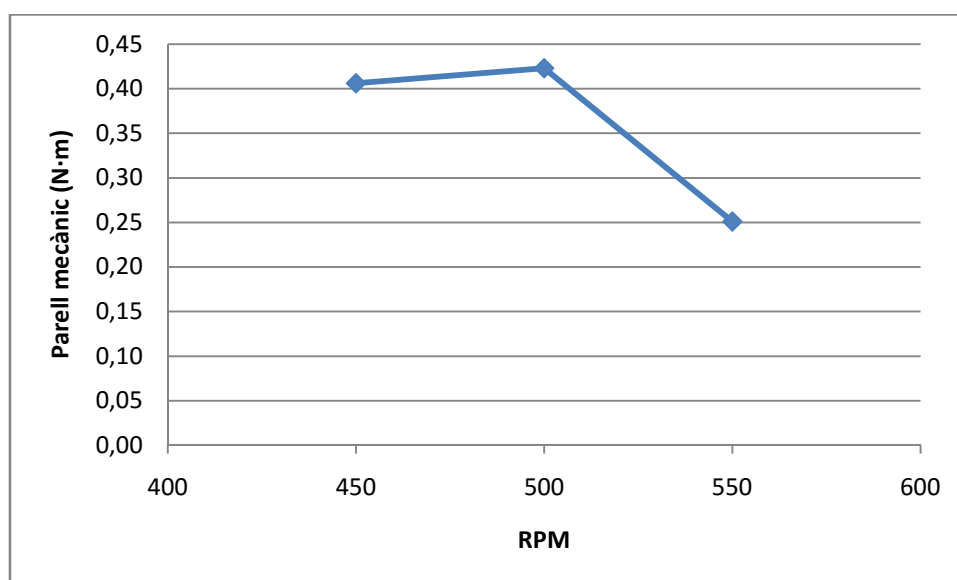


Figura 57: parell mecànic simulat – revolucions per minut per a un vent incident de 6 m/s

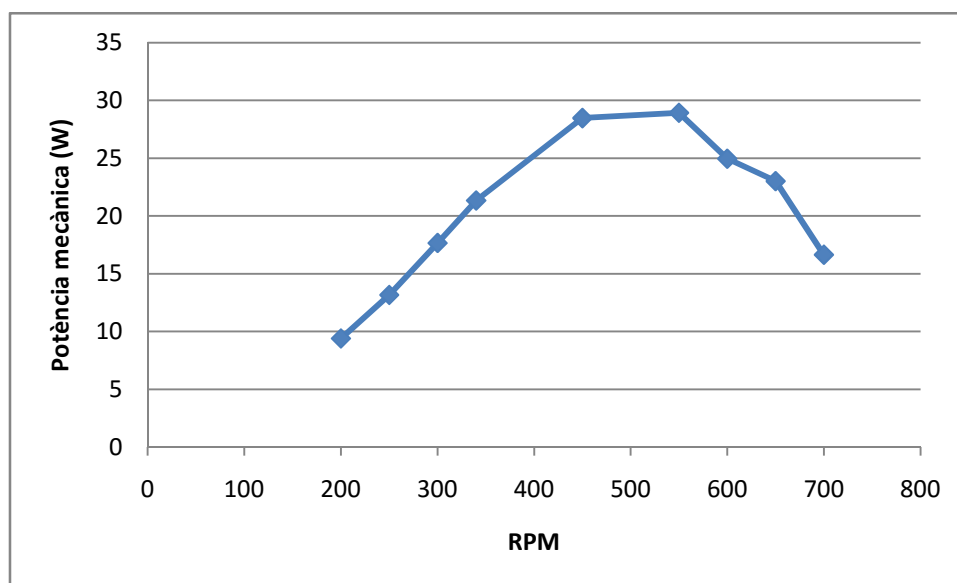


Figura 58: potència mecànica simulada – revolucions per minut per a un vent incident de 7 m/s

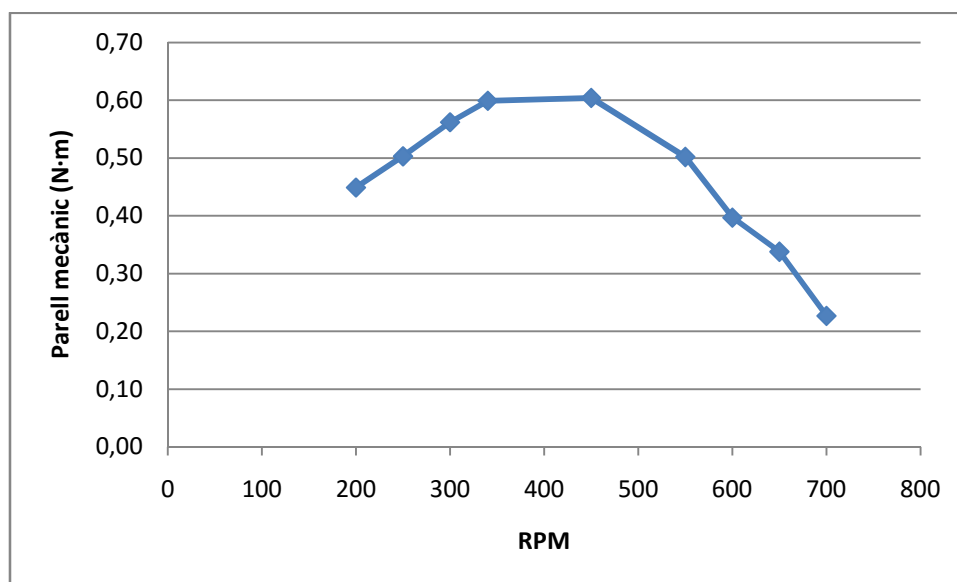


Figura 59: parell mecànic simulat – revolucions per minut per a un vent incident de 7 m/s

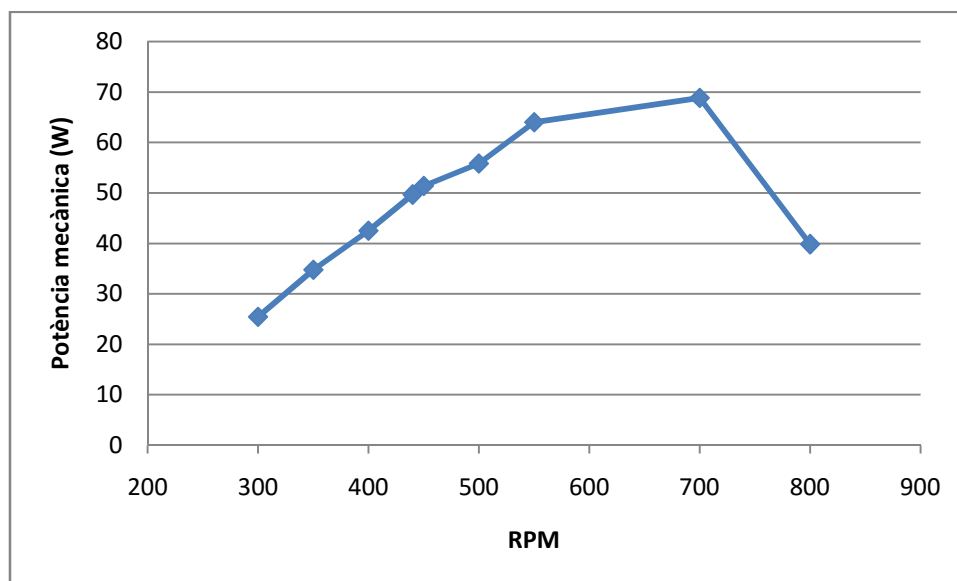


Figura 60: potència mecànica simulada – revolucions per minut per a un vent incident de 9 m/s

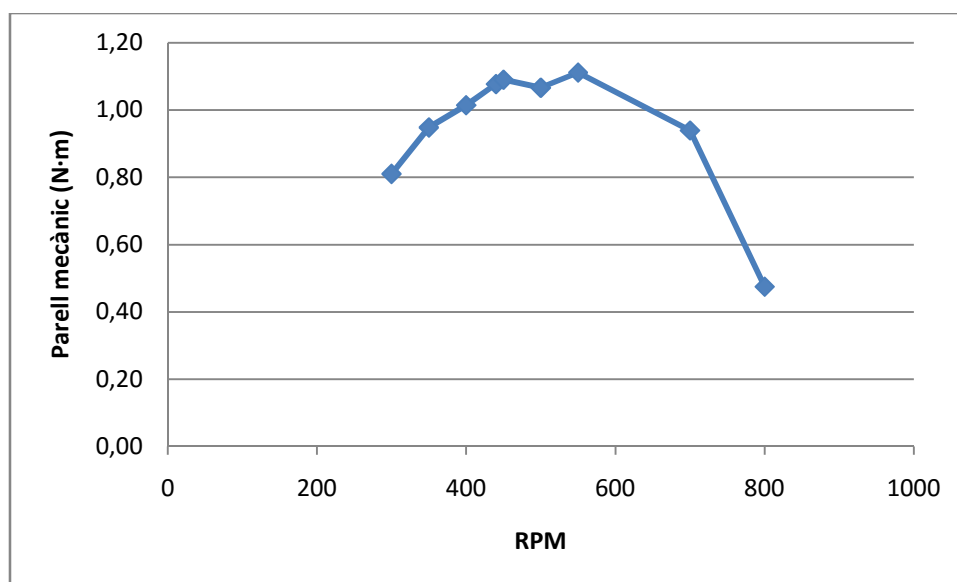


Figura 61: parell mecànic simulat – revolucions per minut per a un vent incident de 9 m/s

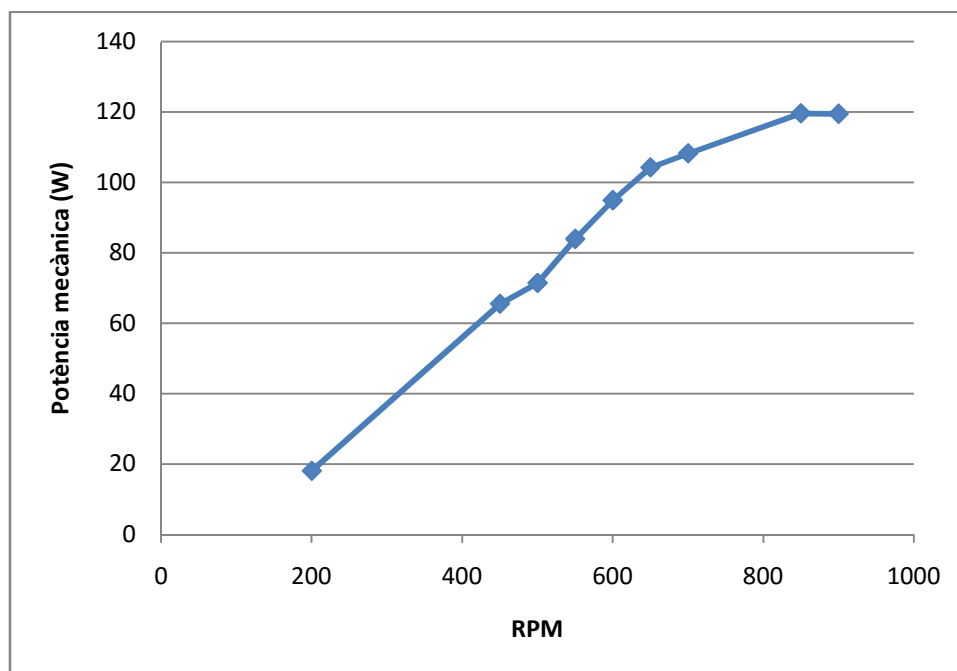


Figura 62: potència mecànica simulada – revolucions per minut per a un vent incident de 11 m/s

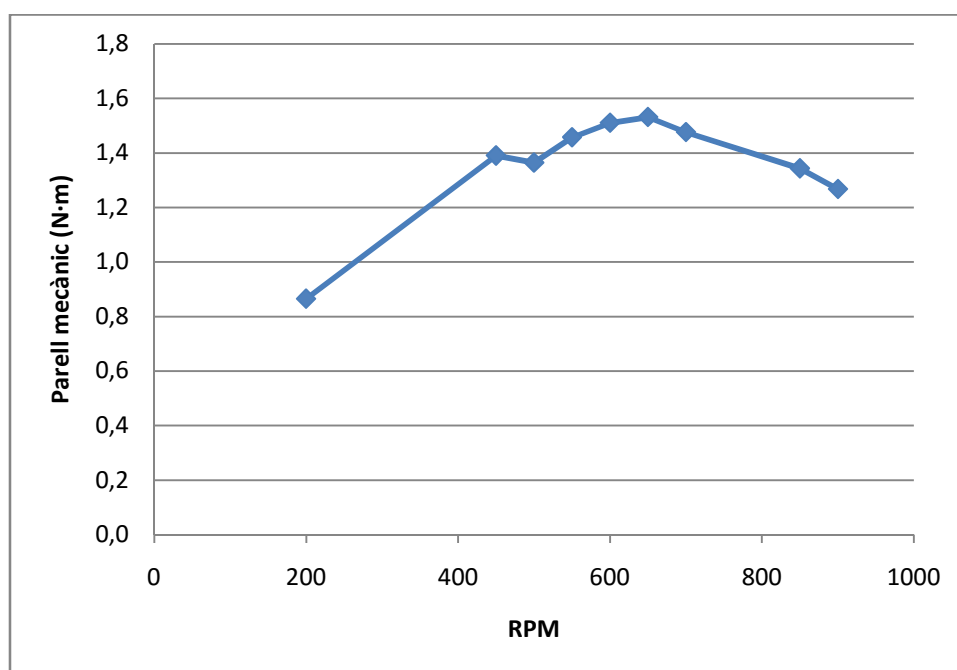


Figura 63: parell mecànic simulat – revolucions per minut per a un vent incident de 11 m/s

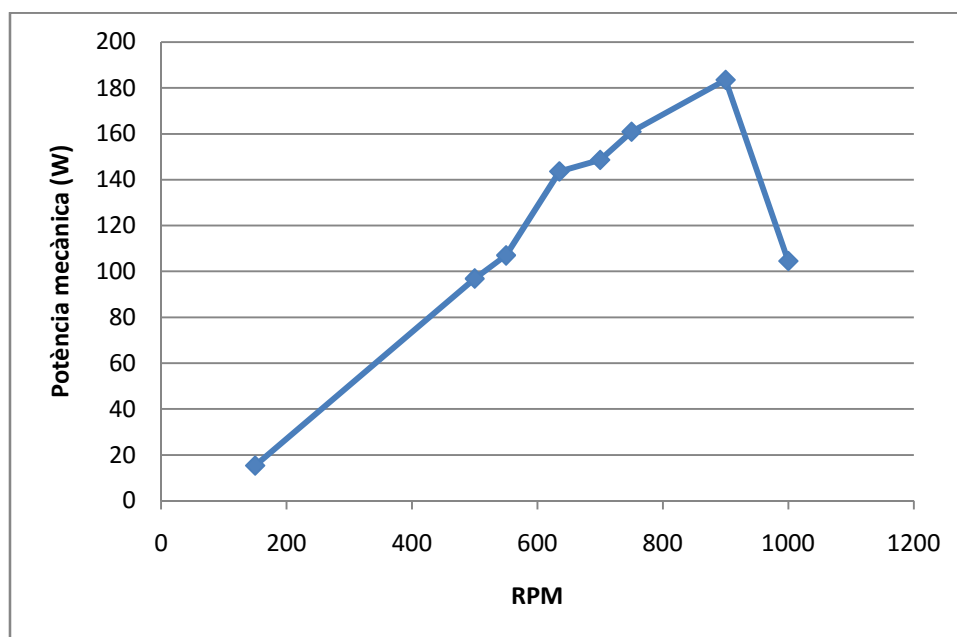


Figura 64: potència mecànica simulada – revolucions per minut per a un vent incident de 13 m/s

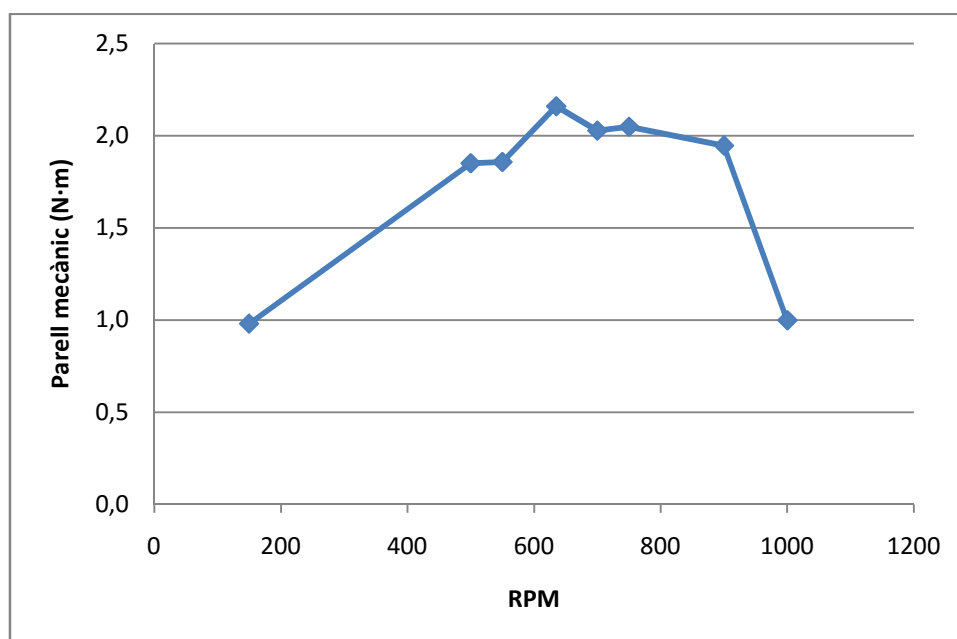


Figura 65: parell mecànic simulat – revolucions per minut per a un vent incident de 13 m/s

ANNEX C: DOCUMENTACIÓ OPENFOAM

Seguidament s'adjunten tots els fitxers utilitzats per a construir el cas a simular. La informació s'agrupa en tres grans grups: els arxius continguts a la carpeta *0*, els continguts a la carpeta *constant* i per últim, els de la carpeta *system*.

C.1 CARPETA “0”

En la carpeta “0” es defineixen les propietats físiques de les condicions de contorn en l'instant inicial, ja siguin pressions, velocitats i condicions de turbulència.

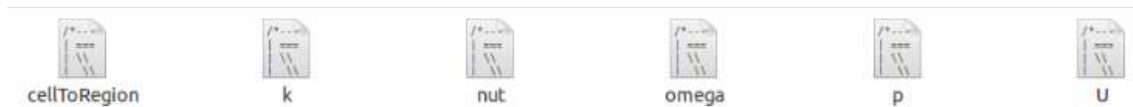


Figura 66: estructura carpeta 0

C.1.1 Arxiu “k”

En aquest document es defineix el valor de l'energia cinètica turbulent “k”.

```

/*-----* C++ *-----*/
|=====|
| \ \ / / | F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
| \ \ / / | O p e r a t i o n | Version: 3.0.1
| \ \ / / | A n d | Web: www.OpenFOAM.org
| \ \ / / | M a n i p u l a t i o n |
|=====|
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0";
    object       k;
}
// *****

dimensions      [0 2 -2 0 0 0 0];

internalField    uniform 0.05359295;

boundaryField
{
    //- Set patchGroups for constraint patches
    #includeEtc "caseDicts/setConstraintTypes"

    inlet
    {
        type      fixedValue;
        value      $internalField;
    }

    outlet
    {
        type      zeroGradient;
    }

    "GUANGMANG.*"
    {
        type      kqRWallFunction;
        value      $internalField;
    }

    VolumControl
    {
        type      zeroGradient;
    }
}

// *****

```

C.1.2 Arxiu “nut”

A l'arxiu “nut” es declara el valor de la viscositat turbulent que en aquest cas, per defecte es deixa amb valor 0. Per altra banda, és en aquest mateix document on es declara la rugositat superficial del material de l'aerogenerador. Tal i com es pot

observar, per a tots els “patches” que pertanyen a l'aerogenerador se'ls hi ha assignat el tipus “nutkRoughWallFunction”. El valor de la rugositat correspon a la rugositat absoluta del plàstic, equivalent a $1,5\text{e-}6$ m.

```

/*----- C++ -----*/
=====
\\      F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\      O peration  | Version:  3.0.1
\\      A nd        | Web:      www.OpenFOAM.org
\\      M anipulation|
/*-----*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0";
    object       nut;
}
// *****

/*
Description
    This boundary condition provides a turbulent kinematic viscosity condition
    when using wall functions for rough walls, based on turbulence kinetic
    energy. The condition manipulates the E parameter to account for roughness
    effects.

    Parameter ranges
    - roughness height = sand-grain roughness (0 for smooth walls)
    - roughness constant = 0.5-1.0

    \heading Patch usage

    \table
      Property      | Description                  | Required | Default value
      Ks             | sand-grain roughness height | yes      |
      Cs             | roughness constant          | yes      |
    \endtable

```

```

Example of the boundary condition specification:
\verbatim
myPatch
{
    type            nutkRoughWallFunction;
    Ks              uniform 0;
    Cs              uniform 0.5;
}
*/
dimensions        [0 2 -1 0 0 0 0];
internalField      uniform 0;
boundaryField
{
    //- Set patchGroups for constraint patches
    #includeEtc "caseDicts/setConstraintTypes"

    inlet
    {
        type        calculated;
        value        uniform 0;
    }

    outlet
    {
        type        calculated;
        value        uniform 0;
    }
}

VolumControl
{
    type            nutkWallFunction;
    value           uniform 0;
}

"GUANGMANG.*"
{
    type            nutkRoughWallFunction;

    // This boundary condition provides a turbulent kinematic viscosity condition
    // when using wall functions for rough walls, based on turbulence kinetic
    // energy. The condition manipulates the E parameter to account for roughness
    // effects.

    Ks              uniform 1.5e-6; // sand-grain roughness height
    Cs              uniform 0.5;    // roughness constant
    value           uniform 0;
}
}

// ***** //

```

C.1.3 Arxiu “omega”

En aquest document es declara el valor de la variable turbulent omega, que és la taxa de dissipació turbulent específica.

```

/*-----* C++ *-----*/
|=====|
| \ \ / / | F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
| \ \ / / | O peration  | Version: 3.0.1
| \ \ / / | A nd        | Web: www.OpenFOAM.org
| \ \ / / | M anipulation|
|=====|
/*-----*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    object       epsilon;
}
// *****

dimensions      [0 0 -1 0 0 0];

internalField    uniform 1.84086231;

boundaryField
{
    //- Set patchGroups for constraint patches
    #includeEtc "caseDicts/setConstraintTypes"

    outlet
    {
        type            zeroGradient;
    }

    inlet
    {
        type            fixedValue;
        value            $internalField;
    }

    "GUANGMANG.*"
    {
        type            omegaWallFunction;
        value            $internalField;
    }

    VolumControl
    {
        type            zeroGradient;
    }
}

// *****

```

C.1.4 Arxiu “p”

En aquest arxiu es declaren els valors de les pressions dels “patches”.

```

/*-----*- C++ -*-----*/
|=====|
| \ \ \ \ | F i e l d | | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \ \ \ \ | O p e r a t i o n | | Version: 3.0.1 |
| \ \ \ \ | A n d | | Web: www.OpenFOAM.org |
| \ \ \ \ | M a n i p u l a t i o n | |
|-----|
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0";
    object       p;
}
// *****

dimensions      [0 2 -2 0 0 0 0];

internalField    uniform 0;

boundaryField
{
    //- Set patchGroups for constraint patches
    #includeEtc "caseDicts/setConstraintTypes"

    inlet
    {
        type      zeroGradient;
    }

    outlet
    {
        type      fixedValue;
        value      uniform 0;
    }

    wall
    {
        type      zeroGradient;
    }
}

// *****

```


C.1.5 Arxiu “u”

En aquest arxiu es declaren els valors de les velocitats dels *patches*.

```

/*-----* C++ *-----*/
=====
\\      F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\      O peration  | Version: 3.0.1
\\      A nd        | Web: www.OpenFOAM.org
\\      M anipulation
/*-----*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volVectorField;
    location     "0";
    object       U;
}
// ***** //

dimensions      [0 1 -1 0 0 0];

internalField    uniform (0 0 0);

boundaryField
{
    //- Set patchGroups for constraint patches
    #includeEtc "caseDicts/setConstraintTypes"

    inlet
    {
        type            fixedValue;
        value            uniform (0 7 0); //velocitat d'entrada a l'inlet de 7 m/s
    }

    outlet
    {
        type            inletOutlet;
        inletValue       uniform (0 0 0);
        value            uniform (0 0 0);
    }

    VolumControl
    {
        type            fixedValue;
        value            uniform (0 0 0);
    }

    "GUANGMANG.*"
    {
        type            movingWallVelocity; //per geometries cíclics del solver pimpleDyMFoam
        value            uniform (0 0 0);
    }
}

// ***** //

```

C.2 CARPETA “CONSTANT”

A continuació es mostra l'estructura bàsica de la carpeta constant, on es declara el mallat i les condicions que es mantenen constants durant el transcurs de la simulació, com ara la velocitat de rotació de la *cellZone*, la viscositat del fluid i el model de turbulència emprat.

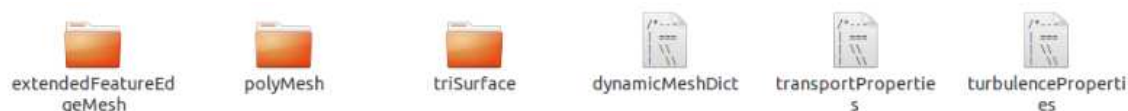


Figura 67: estructura carpeta constant

C.2.1 Carpeta “triSurface”

La carpeta triSurface conté els arxius .stl necessaris per a crear un altre document amb format .eMesh, que és l'arxiu que l'OpenFoam reconeix per a crear la malla. Aquest nou document amb format .eMesh es crea a partir de la utilitat *surfaceFeatureExtract*.



Figura 68: estructura carpeta triSurface

C.2.2 Arxiu “dynamicMeshDict”

En aquest arxiu es declara que la *cellZone* “DYNAMIC” és la part de la malla que gira amb una velocitat angular. És aquí on es permet definir a quina velocitat angular gira, en radians per segon, respecte quin eix i si gira en sentit horari o bé antihorari.

```

/*-----*-- C++ -*--*/
|=====| | F i e l d | | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \ \ \ \ | | O p e r a t i o n | | Version: 3.0.1 |
| \ \ \ \ | | A n d | | Web: www.OpenFOAM.org |
| \ \ \ \ | | M a n i p u l a t i o n | | |
/*-----*--*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "constant";
    object       dynamicMeshDict;
}
// *****

dynamicFvMesh    solidBodyMotionFvMesh;

motionSolverLibs ( "libfvMotionSolvers.so" );

solidBodyMotionFvMeshCoeffs
{
    cellZone      DYNAMIC;

    solidBodyMotionFunction    rotatingMotion;
    rotatingMotionCoeffs
    {
        origin      (0 0 0);
        axis        (0 1 0);
        omega       35.605; // rad/s 340rpm
    }
}

// *****

```

C.2.3 Arxiu “transportProperties”

A l'arxiu *transport properties* s'introdueix el valor de la densitat del fluid, que en aquest cas correspon a l'aire a 20 °C.

```

/*----- C++ -----*/
//
//      F i e l d
//      O p e r a t i o n
//      A n d
//      M a n i p u l a t i o n
//
//      OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
//      Version: 3.0.1
//      Web: www.OpenFOAM.org
//
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "constant";
    object       transportProperties;
}
// ***** //

transportModel  Newtonian;

nu              [0 2 -1 0 0 0] 1.5111e-05; //viscositat cinemàtica aire en m2/s a 20°C
// ***** //

```

C.2.4 Arxiu “turbulenceProperties”

En aquest arxiu es selecciona el model de turbulència a aplicar i per a aquest cas s'ha seleccionat el *kOmegaSST* (*Shear Stress Transport*).

```

/*-----*- C++ -*/
|=====|
| \ \ \ \ | F ield | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \ \ \ \ | O peration | Version: 3.0.1 |
| \ \ \ \ | A nd | Web: www.OpenFOAM.org |
| \ \ \ \ | M anipulation |
|-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "constant";
    object       turbulenceProperties;
}
// ***** //

simulationType RAS;

RAS
{
    RASModel      kOmegaSST;

    turbulence     on;

    printCoeffs   on;
}

// ***** //

```

C.3 CARPETA “SYSTEM”

A la següent imatge es mostra l'estructura que conforma la carpeta system de les simulacions:

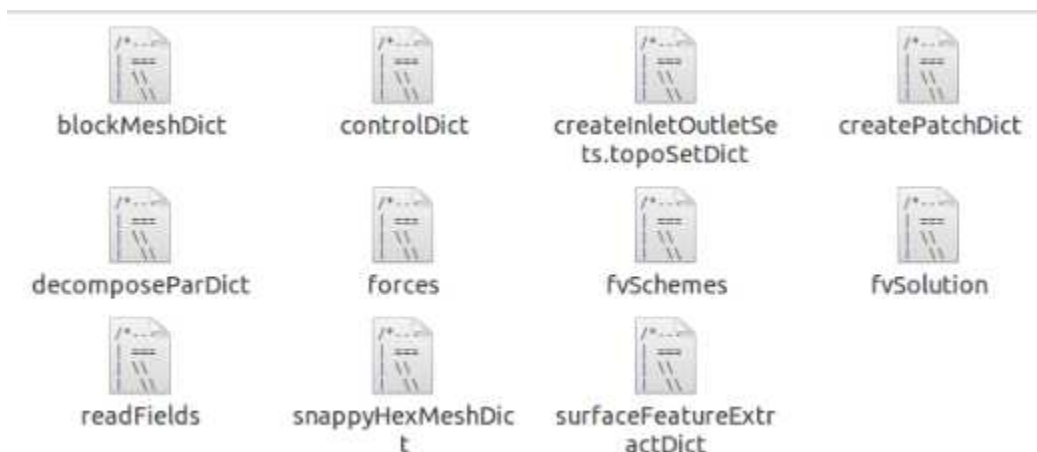


Figura 69: estructura carpeta system

C.3.1 Arxiu “blockMeshDict”

En l'arxiu *blockMeshDict* es crea el mallat base i, posteriorment, s'hi aplicarà un refinament amb l'eina *snappyHexMesh*.

```

/*----- C++ -----*/
//
//  F i e l d      |   OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
//  O p e r a t i o n   |   Version: 3.0.1
//  A n d             |   Web: www.OpenFOAM.org
//  M a n i p u l a t i o n
//
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       blockMeshDict;
}
// *****

backgroundMesh
{
    xMin        -1.8;
    xMax         1.8;
    yMin        -2.50;
    yMax         2.50;
    zMin        -1.8;
    zMax         1.8;
    xCells       29;
    yCells       48;
    zCells       29;
}

convertToMeters 1;
  
```

```
vertices
(
    ($:backgroundMesh.xMin $:backgroundMesh.yMin $:backgroundMesh.zMin)
    ($:backgroundMesh.xMax $:backgroundMesh.yMin $:backgroundMesh.zMin)
    ($:backgroundMesh.xMax $:backgroundMesh.yMax $:backgroundMesh.zMin)
    ($:backgroundMesh.xMin $:backgroundMesh.yMax $:backgroundMesh.zMin)

    ($:backgroundMesh.xMin $:backgroundMesh.yMin $:backgroundMesh.zMax)
    ($:backgroundMesh.xMax $:backgroundMesh.yMin $:backgroundMesh.zMax)
    ($:backgroundMesh.xMax $:backgroundMesh.yMax $:backgroundMesh.zMax)
    ($:backgroundMesh.xMin $:backgroundMesh.yMax $:backgroundMesh.zMax)
);

blocks
(
    hex (0 1 2 3 4 5 6 7)
    (
        $:backgroundMesh.xCells
        $:backgroundMesh.yCells
        $:backgroundMesh.zCells
    )
    simpleGrading (1 1 1)
);
edges
(
);
boundary
(
);
mergePatchPairs
(
);

// ***** //
```

C.3.2 Arxiu “controlDict”

A l'arxiu *controlDict* es seleccionen els paràmetres bàsics que controla l'execució del càlcul. Entre d'altres es selecciona quin solver d'OpenFOAM s'aplica, des de quin instant de temps es comença la simulació, quin és l'instant de temps final, el Courant Number, el període de temps en el qual es guarden resultats...

```

/*-----*- C++ -*-----*/
|=====|
| \ \ / \ F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
| \ \ / \ O p e r a t i o n | Version: 3.0.1
| \ \ / \ A n d | Web: www.OpenFOAM.org
| \ \ / \ M a n i p u l a t i o n |
|=====|
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "system";
    object       controlDict;
}
// *****

application      pimpleDyMFoam;

startFrom        latestTime;

startTime        0;

stopAt           endTime;

endTime          0.176;

deltaT           1e-6;
writeControl     adjustableRunTime;
writeInterval    0.01;

////- For testing with moveDynamicMesh
//deltaT         0.01;
//writeControl   timeStep;
//writeInterval  1;

```

```
purgeWrite      0;
writeFormat     binary;
writePrecision  6;
writeCompression off;
timeFormat      general;
timePrecision   6;
runTimeModifiable true;
adjustTimeStep  yes;
maxCo          3;

functions
{
    #include "readFields"
    #include "forces"
}

// ***** //
```

C.3.3 Arxiu “createPatchDict”

Aquest arxiu és indispensable per a crear les condicions de contorn ja que, quan es crea la malla, s'han de generar els *patches* en els quals ens interessa definir restriccions. Per crear aquests *patches* és necessari definir i executar de forma prèvia el document *createinletoutletsets.toposetdict*. A partir d'aquest fitxer *.toposetdict* es poden extreure les cares de les cel·les que ens interessin i, d'aquesta manera, amb la utilitat *createpatch* es converteixen aquests grups de cares extretes de la malla en “patches”.

Un cop executat el *.toposetdict*, es crea el *patch* AMI1 (*Arbitrary Mesh Interface*) i AMI2, conegut com el *patch* esclau. El primer d'aquests *patches* correspon a les cares més externes de les cel·les de la zona de la malla dinàmica i el segon *patch*, l'AMI2, correspon a les cares de les cel·les de la malla estàtica que coincideixen amb l'AMI1.

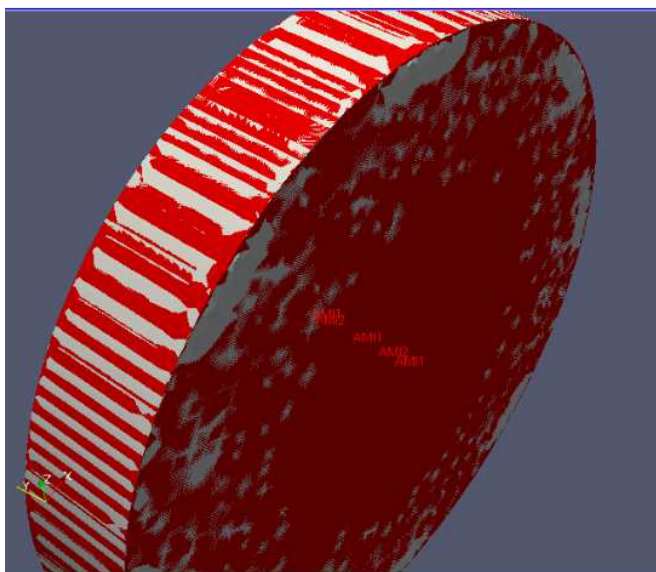


Figura 70: zona de contacte dels AMI

És necessari crear aquest dos *patches* ja que per a cada petit moviment de la malla dinàmica s'han de “lligar” els valors de la part estàtica amb la part dinàmica.

Posteriorment es creen els *patches inlet* i *outlet* de la mateixa manera: extraient primerament les cares de les cel·les amb la utilitat *toposet* i posteriorment es converteixen aquests grups de cares en *patches* amb la utilitat *createPatch*. És important destacar que resulta indispensable treballar amb *patches* per tal d'assignar condicions de contorn.


```

/*-----* C++ *-----*/
|=====|
| \ \ / F ield | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
| \ \ / O peration | Version: 3.0.1
| \ \ / A nd | Web: www.OpenFOAM.org
| \ \ / M anipulation |
/*-----*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       createPatchDict;
}
// ***** //

// Do a synchronisation of coupled points after creation of any patches.
// Note: this does not work with points that are on multiple coupled patches
// with transformations (i.e. cyclics).
pointSync false;

// Patches to create.
patches
(
    {
        //- Master side patch
        name          AMI1;
        patchInfo
        {
            type        cyclicAMI;
            matchTolerance 0.0001;
            neighbourPatch AMI2;
            transform    noOrdering;
        }
        constructFrom patches;
        patches (DYNAMIC);
    }
)

```

```
{
  //- Slave side patch
  name      AMI2;
  patchInfo
  {
    type      cyclicAMI;
    matchTolerance 0.0001;
    neighbourPatch AMI1;
    transform  noOrdering;
  }
  constructFrom patches;
  patches (DYNAMIC_slave);
}
{
  name inlet;
  patchInfo
  {
    type      patch;
  }
  constructFrom set;
  set inletFaces;
}
{
  name outlet;
  patchInfo
  {
    type      patch;
  }
  constructFrom set;
  set outletFaces;
}
};
// ***** //
```

C.3.4 Arxiu “decomposeParDict”

En aquest arxiu es determina la descomposició del cas en processadors. Com es pot observar, s'ha dividit el volum de control (es recorda que és cilíndric) en 8 discos d'igual mida.

```

/*-----*- C++ -*-----*/
|=====|
| \ \ / \ | F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
| \ \ / \ | O peration  | Version: 3.0.1
| \ \ / \ | A nd        | Web:      www.OpenFOAM.org
| \ \ / \ | M anipulation|
|=====|
/*-----*- C++ -*-----*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       decomposeParDict;
}

// *****

numberOfSubdomains 8;

method            hierarchical;

hierarchicalCoeffs
{
    n              (1 8 1);
    delta          0.001;
    order          xyz;
}

// *****

```

C.3.5 Arxiu “forces”

Aquest arxiu correspon a un document de post-procés, ja que és aquí on es calculen les forces i moments realitzats pel vent sobre l'eix de rotació de l'aerogenerador. En aquest cas s'ha indicat que es vol calcular el moment generat pels *patches* GUANGMANG_PUNTES i GUANGMANG_BLADES.

A més de definir aquest arxiu en la carpeta *system* cal declarar-la en el document *controlDict* com a una funció.

```

/*-----*-- C++ -*-----*/
|=====|
| \ \ \ \ | F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
| \ \ \ \ | O peration  | Version: 3.0.1
| \ \ \ \ | A nd        | Web:      www.OpenFOAM.org
| \ \ \ \ | M anipulation|
|=====|
/*-----*-- C++ -*-----*/

forces
{
    type            forces;

    functionObjectLibs ( "libforces.so" );

    outputControl    timeStep;
    timeInterval     1;

    log              yes;

    patches          ( GUANGMANG_PUNTES GUANGMANG_BLADES );
    pName            p;
    UName            U;
    rhoName          rhoInf;      // Indicates incompressible
    log              true;
    rhoInf           1.2047;      // Redundant for incompressible

    CofR             (0 0 0);     // Rotation around centre line of propeller
    pitchAxis        (0 1 0);
}

// ***** //

```

C.3.6 Arxiu “fvSchemes”

Aquest arxiu especifica els esquemes numèrics utilitzats per a la interpolació dels punts de càlcul. No s'ha realitzat cap modificació sobre aquest document respecte al tutorial del qual s'ha extret.

```

/*-----* C++ */
|=====|
| \ \ \ \ | F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
| \ \ \ \ | O peration  | Version: 3.0.1
| \ \ \ \ | A nd        | Web: www.OpenFOAM.org
| \ \ \ \ | M anipulation|
|=====|
/*-----*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       fvSchemes;
}

// *****

ddtSchemes
{
    default Euler;
}

gradSchemes
{
    default Gauss linear;
    grad(p) Gauss linear;
    grad(U) Gauss linear;
}

divSchemes
{
    default none;
    div(phi,U) Gauss linearUpwind grad(U);
    div(phi,k) Gauss limitedLinear 1;
    div(phi,omega) Gauss limitedLinear 1;
    div((nuEff*dev2(T(grad(U)))) Gauss linear;
}

```

```

laplacianSchemes
{
    default          Gauss linear limited corrected 0.5;
}

interpolationSchemes
{
    default          linear;
}

snGradSchemes
{
    default          corrected;
}

wallDist
{
    method meshWave;
}

// *****

```

C.3.7 Arxiu “fvSolution”

Aquest document també s'ha deixat per defecte tal i com s'ha recuperat del tutorial. L'arxiu defineix el *solver* utilitzat, així com els errors i toleràncies.

```

/*----- C++ -----*/
|=====|
| \  /  | F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
| \  /  | O peration  | Version: 3.0.1
| \  /  | A nd        | Web: www.OpenFOAM.org
| \  /  | M anipulation|
|=====|
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       fvSolution;
}
// *****

solvers
{
    pcorr
    {
        solver          GAMG;
        tolerance        1e-2;
        relTol          0;
        smoother         GaussSeidel;
        nPreSweeps        0;
        nPostSweeps       2;
        cacheAgglomeration true;
        agglomerator       faceAreaPair;
        nCellsInCoarsestLevel 10;
        mergeLevels        1;
    }
}

```

```
p
{
    $pcorr
    tolerance      1e-7;
    relTol         0.01;
}

pFinal
{
    $p;
    tolerance      1e-7;
    relTol         0;
}

"(U|k|omega)"
{
    solver          smoothSolver;
    smoother        symGaussSeidel;
    tolerance        1e-07;
    relTol          0.1;
}

"(U|k|omega)Final"
{
    $U;
    tolerance        1e-07;
    relTol          0;
}
```

```
cellDisplacement
{
    solver          GAMG;
    tolerance       1e-5;
    relTol          0;
    smoother        GaussSeidel;
    cacheAgglomeration true;
    nCellsInCoarsestLevel 10;
    agglomerator     faceAreaPair;
    mergeLevels      1;
}
}

PIMPLE
{
    correctPhi       yes;
    nOuterCorrectors 2;
    nCorrectors       1;
    nNonOrthogonalCorrectors 0;
}

relaxationFactors
{
    fields
    {
        p          0.3;
    }
    equations
    {
        "(U|k|omega)" 0.7;
        "(U|k|omega)Final" 1.0;
    }
}

cache
{
    grad(U);
}

// ***** //
```


C.3.8 Arxiu “readFields”

```
/*-----*- C++ -*-----*/
|=====|
| \ \ / / | F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
| \ \ / / | O peration  | Version: 3.0.1
| \ \ / / | A nd        | Web: www.OpenFOAM.org
| \ \ / / | M anipulation|
|-----|

// Make sure all fields for functionObjects are loaded. Prevents any
// problems running with execFlowFunctionObjects.
readFields
{
    // Where to load it from (if not already in solver)
    functionObjectLibs ("libfieldFunctionObjects.so");

    type          readFields;
    fields        (p U k);
}

// ***** //
```

C.3.9 Arxiu “snappyHexMeshDict”

El document *snappyHexMeshDict* defineix el funcionament de la utilitat *snappyHexMesh*, que és una eina molt útil que té OpenFOAM per a refinar malles. Entre d'altres es controla el nivell de refinament superficial dels *patches*, refinaments de volums a partir de *cellZones*, paràmetres específics de qualitat de cel·les i un conjunt d'eines que permeten afegir capes de refinament en zones on es cregui oportú.

```

/*-----* C++ -*-----*/
=====
\\  F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\  O peration  | Version:  3.0.1
\\  A nd        | Web:      www.OpenFOAM.org
\\  M anipulation|
/*-----*/

FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       dictionary;
    object      snappyHexMeshDict;
}
// *****

// Which of the steps to run
castellatedMesh true;
snap            true;
addLayers       false;

// Geometry. Definition of all surfaces. All surfaces are of class
// searchableSurface.
// Surfaces are used
// - to specify refinement for any mesh cell intersecting it
// - to specify refinement for any mesh cell inside/outside/near
// - to 'snap' the mesh boundary to the surface
geometry
{
    GUANGMANG.stl
    {
        type      triSurfaceMesh;
        name      GUANGMANG;
    }
}

```

```

VolumControl.stl
{
    type triSurfaceMesh;
    name VolumControl;
}

REGIO1
{
    type searchableCylinder;
    point1 (0 -0.2 0);
    point2 (0 -1.43 0);
    radius 1.64;
}

REGIO2
{
    type searchableCylinder;
    point1 (0 0.2 0);
    point2 (0 -0.2 0);
    radius 1.64;
}

REGIO3
{
    type searchableCylinder;
    point1 (0 0.2 0);
    point2 (0 2.25 0);
    radius 1.64;
}

DYNAMIC
{
    type searchableCylinder;
    point1 (0 0.00565 0);
    point2 (0 -0.15 0);
    radius 0.5;
}

};

// Settings for the castellatedMesh generation.
castellatedMeshControls
{
    // Refinement parameters
    //
    // If local number of cells is >= maxLocalCells on any processor
    // switches from from refinement followed by balancing
    // (current method) to (weighted) balancing before refinement.
    maxLocalCells 100000;

    // Overall cell limit (approximately). Refinement will stop immediately
    // upon reaching this number so a refinement level might not complete.
    // Note that this is the number of cells before removing the part which
    // is not 'visible' from the keepPoint. The final number of cells might
    // actually be a lot less.
    maxGlobalCells 2000000;
}

```

```

// The surface refinement loop might spend lots of iterations refining just a
// few cells. This setting will cause refinement to stop if <= minimumRefine
// are selected for refinement. Note: it will at least do one iteration
// (unless the number of cells to refine is 0)
minRefinementCells 0;

// Allow a certain level of imbalance during refining
// (since balancing is quite expensive)
// Expressed as fraction of perfect balance (= overall number of cells /
// nProcs). 0=balance always.
maxLoadUnbalance 0.10;

// Number of buffer layers between different levels.
// 1 means normal 2:1 refinement restriction, larger means slower
// refinement.
nCellsBetweenLevels 2;

// Explicit feature edge refinement
// ~~~~~

// Specifies a level for any cell intersected by its edges.
// This is a featureEdgeMesh, read from constant/triSurface for now.
features
(
    {
        file      "GUANGMANG.eMesh";
        level     5;
    }

    {
        file      "VolumControl.eMesh";
        level     0;
    }
);

// Surface based refinement
// ~~~~~

// Specifies two levels for every surface. The first is the minimum level,
// every cell intersecting a surface gets refined up to the minimum level.
// The second level is the maximum level. Cells that 'see' multiple
// intersections where the intersections make an
// angle > resolveFeatureAngle get refined up to the maximum level.

refinementSurfaces
{
    DYNAMIC
    {
        level     (3 3);

        faceType   boundary;
        cellZone   DYNAMIC;
        faceZone   DYNAMIC;
        cellZoneInside inside;
    }

    VolumControl
    {
        level     (0 0);
    }
}

```

```

GUANGMANG
{
    level      (4 4);
    regions
    {
        BLADES
        {
            level (6 7);
            patchInfo {type wall;}
        }
        PUNTES
        {
            level (7 7);
            patchInfo {type wall;}
        }
        HUB
        {
            level (4 5);
            patchInfo {type wall;}
        }
        SUPORT
        {
            level (5 5);
            patchInfo {type wall;}
        }
    }
}

// Resolve sharp angles
resolveFeatureAngle 30; //Paràmetre que controla el refinament local de curvatura

// Region-wise refinement
// ~~~~~

// Specifies refinement level for cells in relation to a surface. One of
// three modes
// - distance. 'levels' specifies per distance to the surface the
//   wanted refinement level. The distances need to be specified in
//   descending order.
// - inside. 'levels' is only one entry and only the level is used. All
//   cells inside the surface get refined up to the level. The surface
//   needs to be closed for this to be possible.
// - outside. Same but cells outside.
refinementRegions
{
    REGIO1
    {
        mode      inside;
        levels     ((1E15 0));
    }
    REGIO2
    {
        mode      inside;
        levels     ((1E15 2));
    }
    REGIO3
    {
        mode      inside;
        levels     ((1E15 0));
    }
}

```

```
- DYNAMIC
{
    mode        inside;
    levels      ((1E15 3));
}

}

// Mesh selection
// ~~~~~

// After refinement patches get added for all refinementSurfaces and
// all cells intersecting the surfaces get put into these patches. The
// section reachable from the locationInMesh is kept.
// NOTE: This point should never be on a face, always inside a cell, even
// after refinement.
locationInMesh (0 -1.222 0);

// Whether any faceZones (as specified in the refinementSurfaces)
// are only on the boundary of corresponding cellZones or also allow
// free-standing zone faces. Not used if there are no faceZones.
allowFreeStandingZoneFaces false;
}

// Settings for the snapping.
snapControls
{
    //- Number of patch smoothing iterations before finding correspondence
    // to surface
    nSmoothPatch 3;

    //- Relative distance for points to be attracted by surface feature point
    // or edge. True distance is this factor times local
    // maximum edge length.
    tolerance 4.0; // 1.0;

    //- Number of mesh displacement relaxation iterations.
    nSolveIter 300;

    //- Maximum number of snapping relaxation iterations. Should stop
    // before upon reaching a correct mesh.
    nRelaxIter 5;

    // Feature snapping

    // Number of feature edge snapping iterations.
    // Leave out altogether to disable.
    nFeatureSnapIter 10;

    // Detect (geometric only) features by sampling the surface
    // (default=false).
    implicitFeatureSnap true;

    // Use castellatedMeshControls::features (default = true)
    explicitFeatureSnap false;
}
```



```
// Detect features between multiple surfaces
// (only for explicitFeatureSnap, default = false)
multiRegionFeatureSnap true;
}

// Settings for the layer addition.
addLayersControls
{
    // Are the thickness parameters below relative to the undistorted
    // size of the refined cell outside layer (true) or absolute sizes (false).
    relativeSizes true;

    // Per final patch (so not geometry!) the layer information
    layers
    {
    }

    // Expansion factor for layer mesh
    expansionRatio 1.0;

    // Wanted thickness of final added cell layer. If multiple layers
    // is the thickness of the layer furthest away from the wall.
    // Relative to undistorted size of cell outside layer.
    // See relativeSizes parameter.
    finalLayerThickness 0.3;

    // Minimum thickness of cell layer. If for any reason layer
    // cannot be above minThickness do not add layer.
    // Relative to undistorted size of cell outside layer.
    // See relativeSizes parameter.
    finalLayerThickness 0.3;

    // Minimum thickness of cell layer. If for any reason layer
    // cannot be above minThickness do not add layer.
    // Relative to undistorted size of cell outside layer.
    minThickness 0.1;

    // If points get not extruded do nGrow layers of connected faces that are
    // also not grown. This helps convergence of the layer addition process
    // close to features.
    // Note: changed(corrected) w.r.t 17x! (didn't do anything in 17x)
    nGrow 0;

    // Advanced settings

    // When not to extrude surface. 0 is flat surface, 90 is when two faces
    // are perpendicular
    featureAngle 45;

    // Maximum number of snapping relaxation iterations. Should stop
    // before upon reaching a correct mesh.
    nRelaxIter 3;

    // Number of smoothing iterations of surface normals
    nSmoothSurfaceNormals 1;
```

```
// Number of smoothing iterations of interior mesh movement direction
nSmoothNormals 3;

// Smooth layer thickness over surface patches
nSmoothThickness 10;

// Stop layer growth on highly warped cells
maxFaceThicknessRatio 0.5;

// Reduce layer growth where ratio thickness to medial
// distance is large
maxThicknessToMedialRatio 0.3;

// Angle used to pick up medial axis points
// Note: changed(corrected) w.r.t 17x! 90 degrees corresponds to 130 in 17x.
minMedianAxisAngle 90;

// Create buffer region for new layer terminations
nBufferCellsNoExtrude 0;

// Overall max number of layer addition iterations. The mesher will exit
// if it reaches this number of iterations; possibly with an illegal
// mesh.
nLayerIter 50;
}

// Generic mesh quality settings. At any undoable phase these determine
// where to undo.
meshQualityControls
{
    //- Maximum non-orthogonality allowed. Set to 180 to disable.
    maxNonOrtho 65;

    //- Max skewness allowed. Set to <0 to disable.
    maxBoundarySkewness 20;
    maxInternalSkewness 4;

    //- Max concaveness allowed. Is angle (in degrees) below which concavity
    // is allowed. 0 is straight face, <0 would be convex face.
    // Set to 180 to disable.
    maxConcave 80;

    //- Minimum pyramid volume. Is absolute volume of cell pyramid.
    // Set to a sensible fraction of the smallest cell volume expected.
    // Set to very negative number (e.g. -1E30) to disable.
    minVol 1e-13;

    //- Minimum quality of the tet formed by the face-centre
    // and variable base point minimum decomposition triangles and
    // the cell centre. This has to be a positive number for tracking
    // to work. Set to very negative number (e.g. -1E30) to
    // disable.
    // <0 = inside out tet,
    // 0 = flat tet
    // 1 = regular tet
    minTetQuality -1; // 1e-30;
```



```
//- Minimum face area. Set to <0 to disable.
minArea -1;

//- Minimum face twist. Set to <-1 to disable. dot product of face normal
// and face centre triangles normal
minTwist 0.01;

//- Minimum normalised cell determinant
// 1 = hex, <= 0 = folded or flattened illegal cell
minDeterminant 0.001;

//- minFaceWeight (0 -> 0.5)
minFaceWeight 0.05;

//- minVolRatio (0 -> 1)
minVolRatio 0.01;

//must be >0 for Fluent compatibility
minTriangleTwist -1;

// Advanced

//- Number of error distribution iterations
nSmoothScale 4;
//- Amount to scale back displacement at error points
errorReduction 0.75;

// Optional : some meshing phases allow usage of relaxed rules.
// See e.g. addLayersControls::nRelaxedIter.
relaxed
{
    //- Maximum non-orthogonality allowed. Set to 180 to disable.
    maxNonOrtho 75;
}

// Merge tolerance. Is fraction of overall bounding box of initial mesh.
// Note: the write tolerance needs to be higher than this.
mergeTolerance 1e-6;

// ***** //
```

C.3.10 Arxiu “surfaceFeatureExtractDict”

En aquest document s'identifiquen els .stl que es volen utilitzar per tal que la utilitat *surfaceFeature* pugui extreure la informació necessària de la geometria i la converteixi en un format .eMesh, que és un format necessari per a utilitzar determinades eines de l'*snappyHexMesh*.

```

/*-----*- C++ -*-----*/
\
\\      /  F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\      /  O peration  | Version: 3.0.1
\\      /  A nd        | Web: www.OpenFOAM.org
\\      /  M anipulation|
\

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       surfaceFeatureExtractDict;
}
// *****

VolumControl.stl
{
    extractionMethod    extractFromSurface;

    extractFromSurfaceCoeffs
    {
        // Mark edges whose adjacent surface normals are at an angle less
        // than includedAngle as features
        // - 0 : selects no edges
        // - 180: selects all edges
        includedAngle    150;
    }

    // Write options
    writeFeatureEdgeMesh    yes;
}

GUANGMANG.stl
{
    extractionMethod    extractFromSurface;

    extractFromSurfaceCoeffs
    {
        // Mark edges whose adjacent surface normals are at an angle less
        // than includedAngle as features
        // - 0 : selects no edges
        // - 180: selects all edges
        includedAngle    180;
    }

    // Write options
    writeFeatureEdgeMesh    yes;
}
// *****

```

C.3.11 Arxiu “createInletOutletSets.topoSetDict”

Tal i com s'ha comentat en l'apartat de l'arxiu *createPatchDict*, el present document extreu les cares de les cel·les que són d'interès i les converteix en un format anomenat .toposet.

```

/*----- C++ -----*/
// =====
//      F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
//      O peration  | Version: 3.0.1
//      A nd        | Web: www.OpenFOAM.org
//      M anipulation
// =====
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       topoSetDict;
}

// *****

actions
(
    {
        name      boundaryFaces;
        type      faceSet;
        action     new;
        source     patchToFace;
        sourceInfo
        {
            name VolumControl;
        }
    }

    {
        name      outletFaces;
        type      faceSet;
        action     new;
        source     faceToFace;
        sourceInfo
        {
            set boundaryFaces;
        }
    }

    {
        name      inletFaces;
        type      faceSet;
        action     new;
        source     faceToFace;
        sourceInfo
        {
            set boundaryFaces;
        }
    }
)

```

```

{
    name    outletFaces;
    type    faceSet;
    action  subset;
    source  normalToFace;
    sourceInfo
    {
        normal (0 1 0); // Vector
        cos    0.3;     // Tolerance (max cos of angle)
    }
}

{
    name    inletFaces;
    type    faceSet;
    action  subset;
    source  normalToFace;
    sourceInfo
    {
        normal (0 -1 0); // Vector
        cos    0.3;     // Tolerance (max cos of angle)
    }
}
);

// ***** //

```

C.4 ARXIU “MACHINES”

Aquest arxiu és indispensable per a treballar amb servidors LINUX. Concretament, en aquest estudi s'ha utilitzat per a realitzar les simulacions al FRAM de la UdG, que és un servidor format per 10 nodes amb 8 nuclis cada un. Amb aquest arxiu s'identifica a quin node del servidor es vol realitzar el càlcul, així com el número de nuclis que s'utilitzaran per a realitzar el càlcul.

El contingut de la carpeta *machines*, d'acord amb la Figura 71, és el que segueix:

nodo9 cpu=8

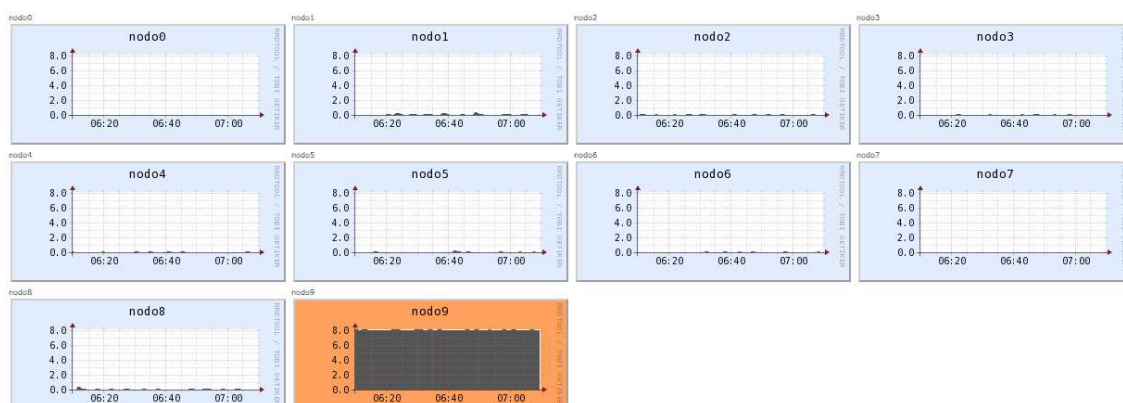


Figura 71: estructura del FRAM de la UdG

C.5 COMANDES UTILITZADES PER A EXECUTAR LES SIMULACIONS

Creació de la malla:

- ```
>> blockMesh
>> surfaceFeatureExtract
>> decomposePar
>> mpirun --hostfile machines --np 8 snappyHexMesh -overwrite -parallel &

// el símbol & col·locat al final de cada comanda en un servidor LINUX serveix
per continuar el procés encara que es tanqui la connexió amb el FRAM.

>> reconstructParMesh -constant //s'uneix el resultat descompost dels 8
processadors a la carpeta "constant".
```

Creació dels *patches* per a les condicions de contorn:

- ```
>> topoSet -dict system/createInletOutletSets.topoSetDict
>> createPatch -overwrite
>> decomposePar
>> mpirun -hostfile machines -np 8 renumberMesh -overwrite -parallel
```

// després de dividir la malla en 8 subdominis es torna a enumerar la malla per tal de millorar l'eficiència del càlcul.

```
>> mpirun -hostfile machines -np 8 pimpleDyMFoam -parallel &
```

Ajuntar resultats i visualitzar-los amb el paraView:

```
>> reconstructPar
```

```
>> paraFoam
```

ANNEX D: RESULTATS SIMULACIONS AL TÚNEL DE VENT

A continuació s'adjunten els resultats obtinguts al banc de proves de la Universitat de Girona. Primerament, es faciliten els resultats tabulats i seguidament es representen aquests mateixos resultats en forma de gràfiques, per tal d'extreure'n les respectives conclusions.

Freq (Hz)	Resistència (Ω)	RPM	U vent aigües amunt (m/s)	U vent aigües avall (m/s)	Coefficient de velocitat induïda (a)	Tip Speed Ratio (λ)	Potència (W)	Cp
10	24.8	135	1.8	1.25	0.15	3.22	0.31	0.166
	22.65	128		1.2	0.17	3.05	0.29	0.158
	20.42	123		1.21	0.16	2.93	0.25	0.133
	17.38	113		1.6	0.06	2.69	0.21	0.112
	14.49	104		1.6	0.06	2.48	0.17	0.093
	12.25	97		1.7	0.03	2.31	0.15	0.079
	9.62	89		1.8	0.00	2.12	0.12	0.062
	6.88	80		1.85	-0.01	1.91	0.09	0.049
	4.43	72		2	-0.06	1.72	0.06	0.033
	1.88	61		2.1	-0.08	1.45	0.02	0.013
	0.14	55		2.2	-0.11	1.31	0.01	0.003

MITJANA 0.03

Taula 7: valors experimentals amb alimentació del ventilador a 10 Hz

Freq (Hz)	Resistència (Ω)	RPM	U vent aigües amunt (m/s)	U vent aigües avall (m/s)	Coefficient de velocitat induïda (a)	Tip Speed Ratio (λ)	Potència (W)	Cp
14	24.8	245	2.56	0.6	0.38	4.11	1.46	0.273
	22.65	240		0.8	0.34	4.02	1.41	0.265
	20.42	220		1.4	0.23	3.69	1.21	0.227
	17.38	205		1.1	0.29	3.44	1.13	0.212
	14.49	190		1.4	0.23	3.19	0.93	0.174
	12.25	175		1.4	0.23	2.93	0.83	0.155
	9.62	150		1.7	0.17	2.52	0.60	0.112
	6.88	132		2	0.11	2.21	0.46	0.085
	4.43	106		2.4	0.03	1.78	0.25	0.047
	1.88	86		2.6	-0.01	1.44	0.11	0.020
	0.14	73		2.8	-0.05	1.22	0.02	0.004

MITJANA

0.18

Taula 8: valors experimentals amb alimentació del ventilador a 14 Hz

Freq (Hz)	Resist. (Ω)	RPM	U vent aigües amunt (m/s)	U vent aigües avall (m/s)	Coefficient de velocitat induïda (a)	Tip Speed Ratio (λ)	Potència (W)	Cp
18	24.8	375	3.98	0.71	0.41	4.04	3.92	0.195
	22.65	360		0.6	0.42	3.88	3.88	0.194
	20.42	350		0.6	0.42	3.77	3.75	0.187
	17.38	330		0.5	0.44	3.56	3.53	0.176
	14.49	290		1	0.37	3.13	2.96	0.148
	12.25	270		1.3	0.34	2.91	2.64	0.132
	9.62	235		1.8	0.27	2.53	1.93	0.096
	6.88	200		2.2	0.22	2.16	1.47	0.073
	4.43	165		2.9	0.14	1.78	0.85	0.042
	1.88	125		3.2	0.10	1.35	0.85	0.042
	0.14	95		3.5	0.06	1.02	0.04	0.002

MITJANA

0.29

Taula 9: valors experimentals amb alimentació del ventilador a 18 Hz

Freq (Hz)	Resistència (Ω)	RPM	U vent aigües amunt (m/s)	U vent aigües avall (m/s)	Coefficient de velocitat induïda (a)	Tip Speed Ratio (λ)	Potència (W)	Cp
22	24.8	494	4.6	0.7	0.42	4.61	7.40	0.239
	22.65	480		0.7	0.42	4.48	7.57	0.245
	20.42	470		0.9	0.40	4.39	7.56	0.244
	17.38	445		0.7	0.42	4.15	7.40	0.239
	14.49	410		0.8	0.41	3.83	6.82	0.220
	12.25	380		0.7	0.42	3.55	6.18	0.199
	9.62	340		1.1	0.38	3.17	5.17	0.167
	6.88	280		2	0.28	2.61	3.64	0.117
	4.43	210		2.9	0.18	1.96	2.02	0.065
	1.88	150		3.9	0.08	1.40	0.61	0.020
	0.14	115		4.2	0.04	1.07	0.07	0.002

MITJANA

0.32

Taula 10: valors experimentals amb alimentació del ventilador a 22 Hz

Freq (Hz)	Resistència (Ω)	RPM	U vent aigües amunt (m/s)	U vent aigües avall (m/s)	Coeficient de velocitat induïda (a)	Tip Speed Ratio (λ)	Potència (W)	Cp
26	24.8	500	6.16	0.9	0.43	3.48	7.76	0.104
	22.65	505		1	0.42	3.52	8.50	0.114
	20.42	513		0.8	0.44	3.57	9.29	0.125
	17.38	526		0.9	0.43	3.67	10.79	0.145
	14.49	540		1.1	0.41	3.76	12.40	0.167
	12.25	505		1	0.42	3.52	11.81	0.159
	9.62	460		0.9	0.43	3.21	10.40	0.140
	6.88	390		1.3	0.39	2.72	7.92	0.107
	4.43	290		2.4	0.31	2.02	4.46	0.060
	1.88	210		4	0.18	1.46	1.55	0.021
	0.14	135		4.8	0.11	0.94	0.09	0.001

MITJANA 0.36

Taula 11: valors experimentals amb alimentació del ventilador a 26 Hz

Freq (Hz)	Resistència (Ω)	RPM	U vent aigües amunt (m/s)	U vent aigües avall (m/s)	Coeficient de velocitat induïda (a)	Tip Speed Ratio (λ)	Potència (W)	Cp
30	24.8	510	7.48	0.85	0.44	2.93	7.79	0.058
	22.65	515		1.15	0.42	2.96	8.37	0.063
	20.42	525		0.8	0.45	3.01	9.35	0.070
	17.38	535		1.2	0.42	3.07	10.94	0.082
	14.49	555		1.1	0.43	3.19	12.83	0.096
	12.25	575		1	0.43	3.30	15.11	0.113
	9.62	600		1.2	0.42	3.44	17.94	0.135
	6.88	515		1	0.43	2.96	15.28	0.115
	4.43	385		2.2	0.35	2.21	8.05	0.060
	1.88	245		4.1	0.23	1.41	2.69	0.020
	0.14	175		5.3	0.15	1.00	0.14	0.001

MITJANA 0.38

Taula 12: valors experimentals amb alimentació del ventilador a 30 Hz

Freq (Hz)	Resistència (Ω)	RPM	U vent aigües amunt (m/s)	U vent aigües avall (m/s)	Coeficient de velocitat induïda (a)	Tip Speed Ratio (λ)	Potència (W)	Cp
34	24.8	515	6.82	1.25	0.41	3.24	7.84	0.078
	22.65	525		1.4	0.40	3.30	8.54	0.085
	20.42	535		1	0.43	3.37	9.73	0.096
	17.38	550		1.2	0.41	3.46	11.09	0.110
	14.49	560		1.1	0.42	3.52	12.82	0.127
	12.25	580		1	0.43	3.65	15.11	0.150
	9.62	610		1.1	0.42	3.84	18.84	0.187
	6.88	650		1.3	0.40	4.09	24.76	0.245
	4.43	510		1.5	0.39	3.21	15.25	0.151
	1.88	325		3.8	0.22	2.05	4.77	0.047
	0.14	225		5.2	0.12	1.42	0.27	0.003

MITJANA 0.37

Taula 13: valors experimentals amb alimentació del ventilador a 34 Hz

Freq (Hz)	Resistència (Ω)	RPM	U vent aigües amunt (m/s)	U vent aigües avall (m/s)	Coeficient de velocitat induïda (a)	Tip Speed Ratio (λ)	Potència (W)	Cp
38	24.8	550	8.92	1.4	0.42	2.65	7.69	0.034
	22.65	560		1.2	0.43	2.69	8.45	0.037
	20.42	575		1.1	0.44	2.77	9.35	0.041
	17.38	590		1.2	0.43	2.84	11.18	0.050
	14.49	612		1.4	0.42	2.95	12.93	0.057
	12.25	638		1.4	0.42	3.07	15.73	0.070
	9.62	660		1.4	0.42	3.18	19.02	0.084
	6.88	705		1.7	0.40	3.39	25.75	0.114
	4.43	690		1.7	0.40	3.32	29.00	0.128
	1.88	485		2.1	0.38	2.33	11.55	0.051
	1.25	560		1.3	0.43	2.69	11.07	0.049
	0.14	370		3.7	0.29	1.78	0.27	0.001

MITJANA 0.41

Taula 14: valors experimentals amb alimentació del ventilador a 38 Hz

Freq (Hz)	Resistència (Ω)	RPM	U vent aigües amunt (m/s)	U vent aigües avall (m/s)	Coeficient de velocitat induïda (a)	Tip Speed Ratio (λ)	Potència (W)	Cp
42	24.8	600	9.92	1.4	0.43	2.60	7.54	0.024
	22.65	616		1.2	0.44	2.67	8.31	0.027
	20.42	628		1.3	0.43	2.72	9.35	0.030
	17.38	650		1.5	0.42	2.81	10.65	0.034
	14.49	680		1.5	0.42	2.94	12.93	0.042
	12.25	700		1.4	0.43	3.03	14.97	0.048
	9.62	735		1.6	0.42	3.18	18.49	0.060
	6.88	785		1.7	0.41	3.40	24.68	0.079
	4.43	825		2.2	0.39	3.57	39.19	0.126
	1.88	720		1.3	0.43	3.12	21.65	0.070
	1.25	520		2.6	0.37	2.25	1.87	0.006

MITJANA 0.42

Taula 15: valors experimentals amb alimentació del ventilador a 42 Hz

Freq (Hz)	Resistència (Ω)	RPM	U vent aigües amunt (m/s)	U vent aigües avall (m/s)	Coeficient de velocitat induïda (a)	Tip Speed Ratio (λ)	Potència (W)	Cp
46	24.8	700	10.6	1.8	0.42	2.83	7.71	0.020
	22.65	700		1.4	0.43	2.83	8.46	0.022
	20.42	710		1.5	0.43	2.88	9.37	0.025
	17.38	725		1.3	0.44	2.94	11.01	0.029
	14.49	750		1.5	0.43	3.04	12.93	0.034
	12.25	775		1.8	0.42	3.14	14.60	0.039
	9.62	825		1.9	0.41	3.34	18.70	0.049
	6.88	890		2.1	0.40	3.60	25.36	0.067
	4.43	950		2	0.41	3.85	41.81	0.110
	2.89	970		2	0.41	3.93	49.10	0.130
	1.88	885		1.8	0.42	3.58	31.60	0.083
	1.25	820		1.5	0.43	3.32	21.82	0.058
	0.14	650		1.2	0.44	2.63	0.60	0.002

MITJANA 0.42

Taula 16: valors experimentals amb alimentació del ventilador a 46 Hz

Freq (Hz)	Resistència (Ω)	RPM	U vent aigües amunt (m/s)	U vent aigües avall (m/s)	Coeficient de velocitat induïda (a)	Tip Speed Ratio (λ)	Potència (W)	Cp
50	24.8	830	11.6	1.5	0.44	3.07	8.43	0.017
	22.65	860		1.6	0.43	3.18	9.16	0.018
	20.42	885		1.6	0.43	3.28	10.23	0.021
	17.38	905		1.8	0.42	3.35	11.79	0.024
	14.49	925		1.7	0.43	3.42	13.94	0.028
	12.25	960		1.6	0.43	3.55	16.31	0.033
	9.62	1000		2	0.41	3.70	20.13	0.041
	6.88	1050		1.9	0.42	3.89	27.15	0.055
	4.43	1150		2.1	0.41	4.26	44.62	0.090
	2.89	1160		1.8	0.42	4.29	53.48	0.108
	1.88	1050		2.1	0.41	3.89	44.98	0.091
	1.25	950		1.4	0.44	3.52	24.64	0.050
	0.14	850		1.8	0.42	3.15	0.88	0.002

MITJANA

0.42

Taula 17: valors experimentals amb alimentació del ventilador a 50 Hz

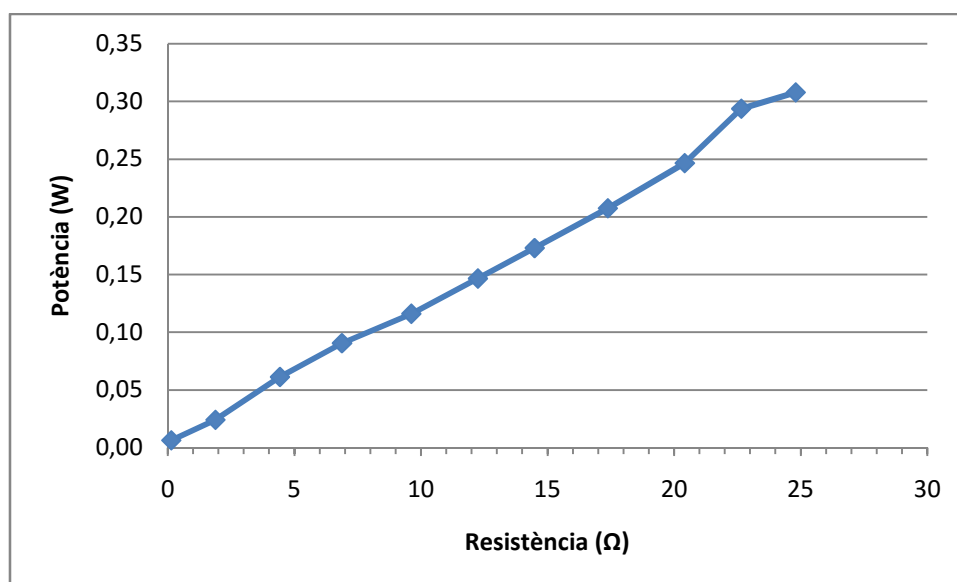


Figura 72: potència elèctrica mesurada – resistència amb alimentació del ventilador a 10 Hz

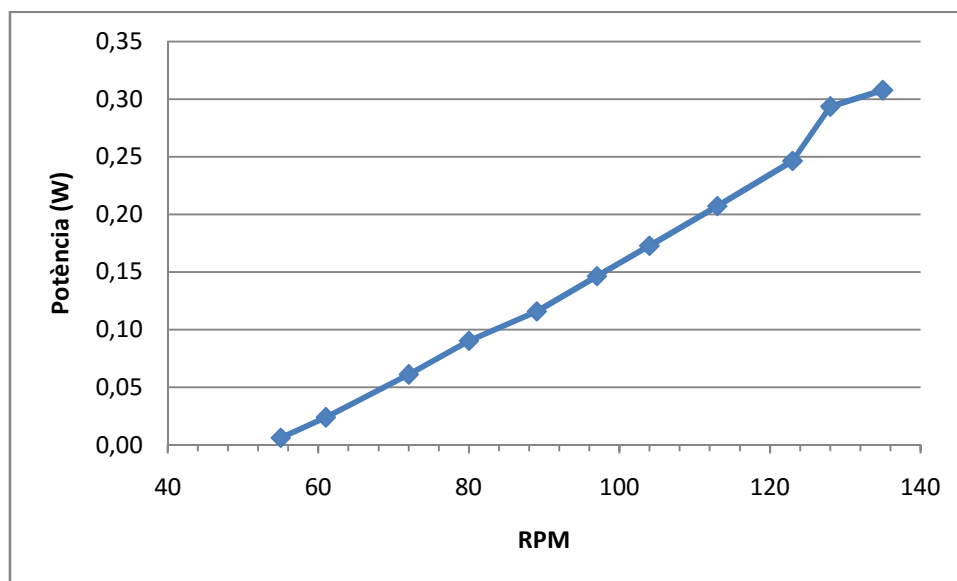


Figura 73: potència elèctrica mesurada – revolucions per minut amb alimentació del ventilador a 10 Hz

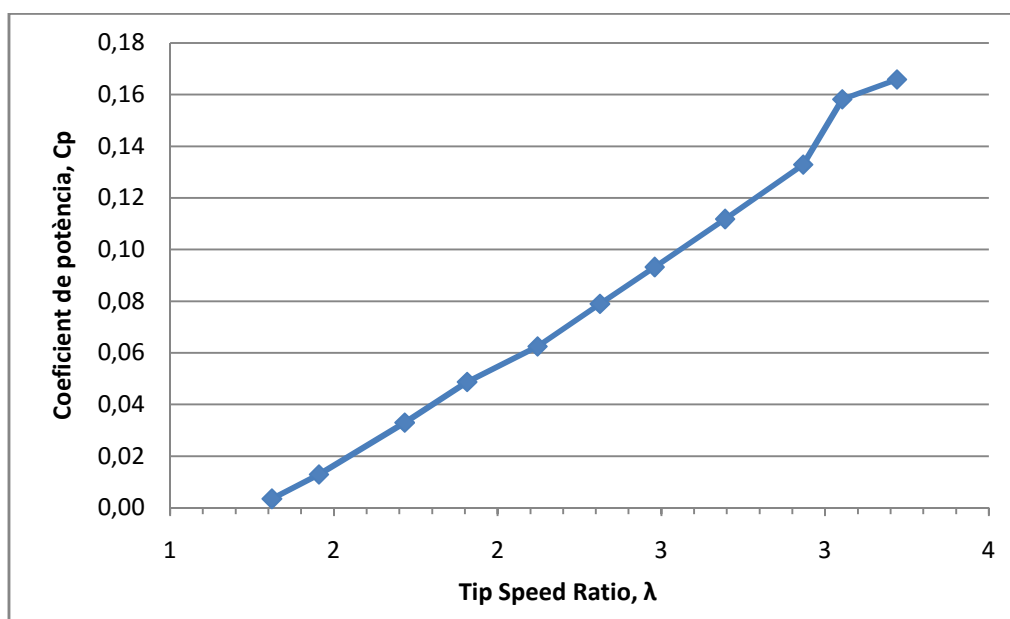


Figura 74: coeficient de potència – Tip Speed Ratio amb alimentació del ventilador a 10 Hz

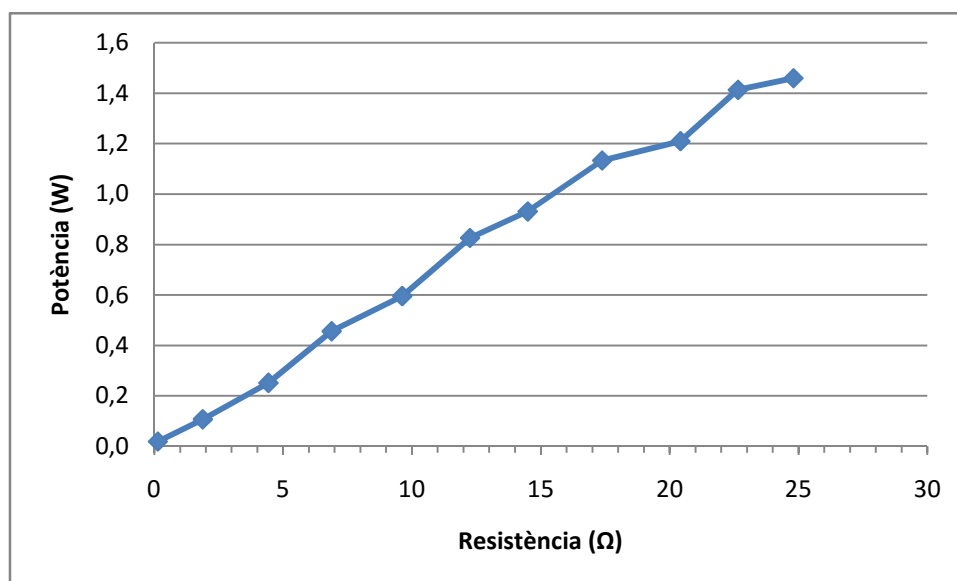


Figura 75: potència elèctrica mesurada – resistència amb alimentació del ventilador a 14 Hz

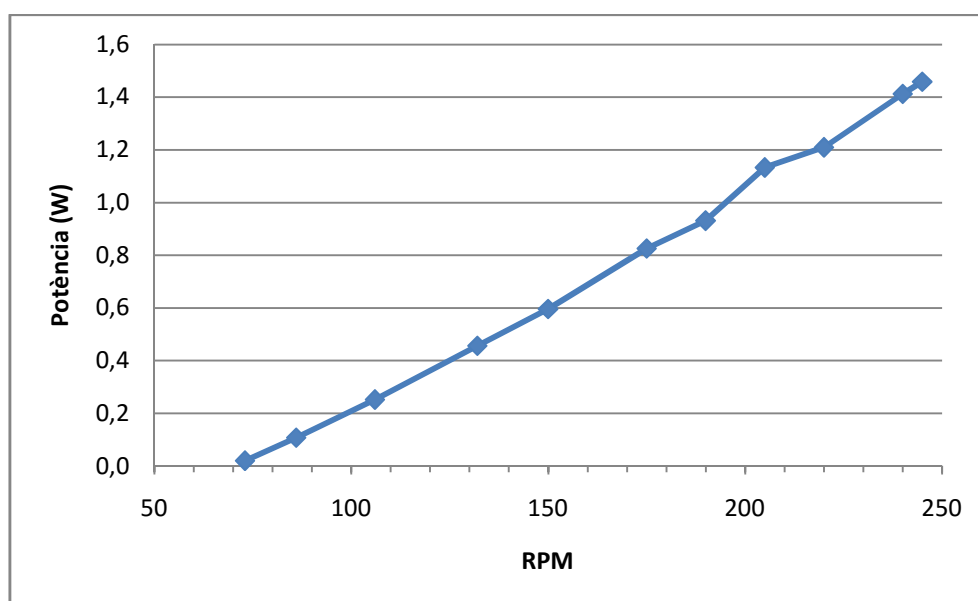


Figura 76: potència elèctrica mesurada – revolucions per minut amb alimentació del ventilador a 14 Hz

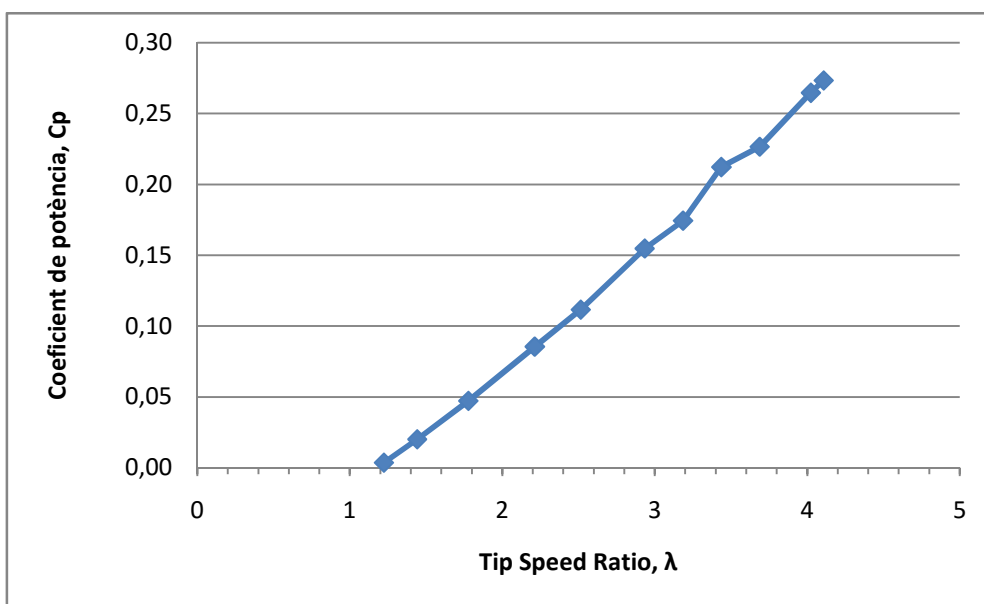


Figura 77: coeficient de potència – Tip Speed Ratio amb alimentació del ventilador a 14 Hz

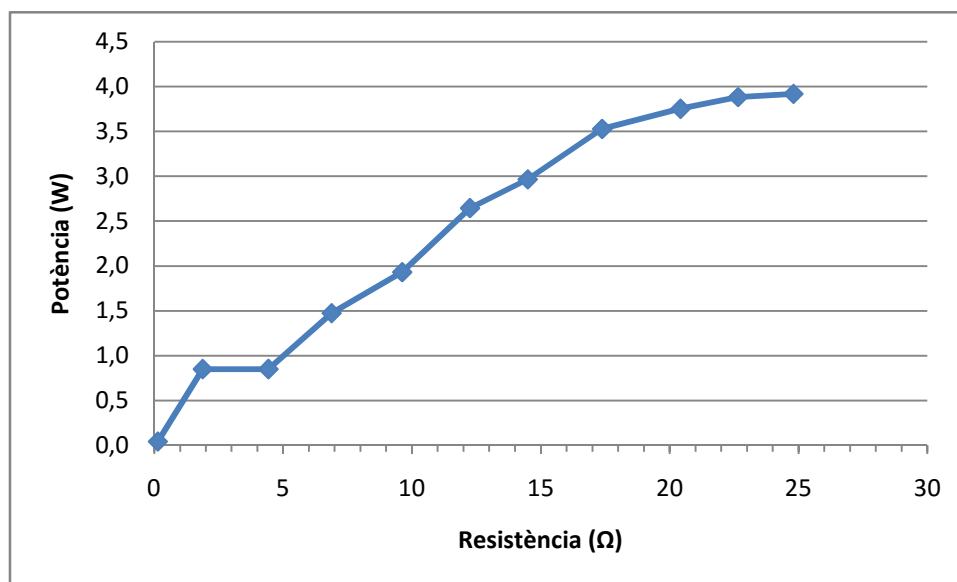


Figura 78: potència elèctrica mesurada – resistència amb alimentació del ventilador a 18 Hz

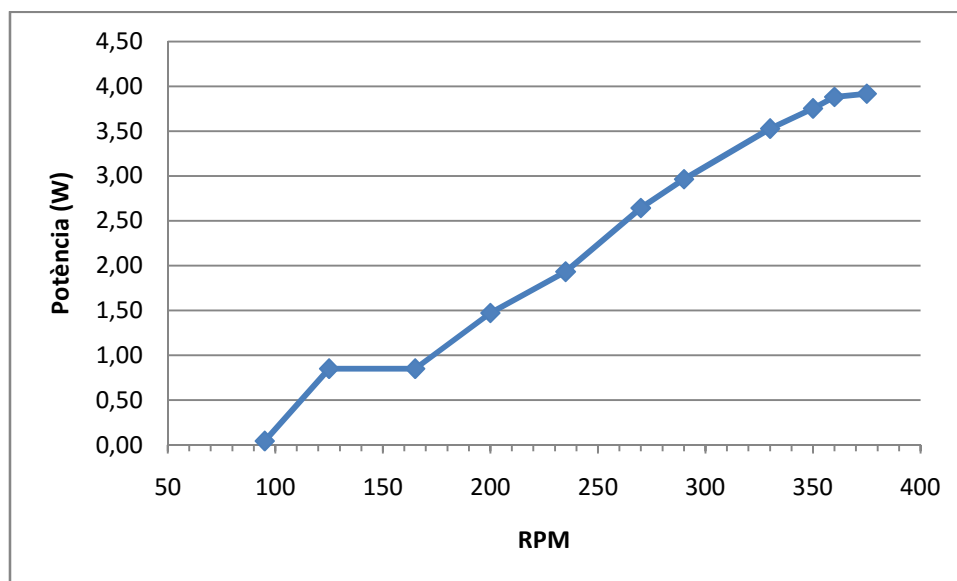


Figura 79: potència elèctrica mesurada – revolucions per minut amb alimentació del ventilador a 18 Hz

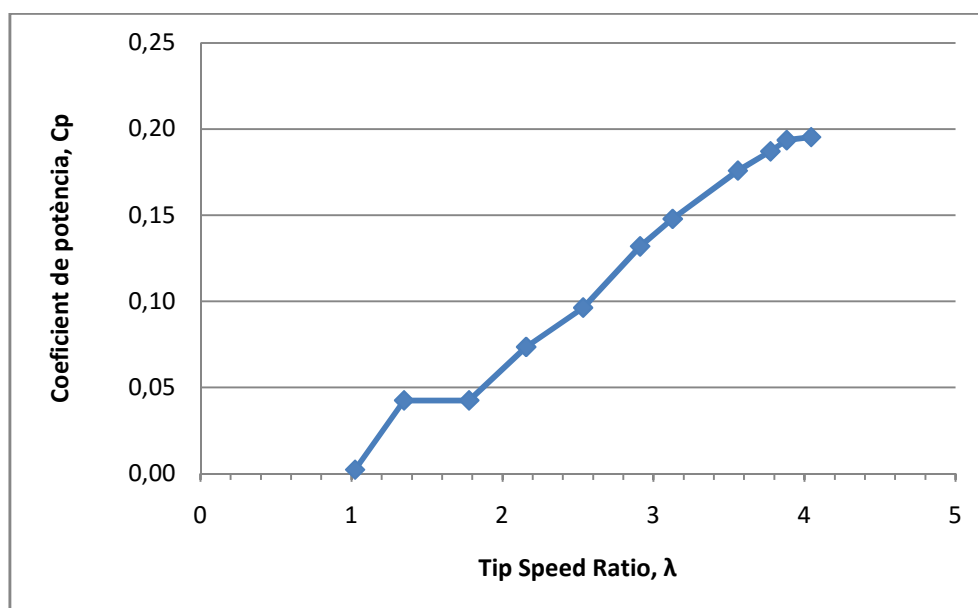


Figura 80: coeficient de potència – Tip Speed Ratio amb alimentació del ventilador a 18 Hz

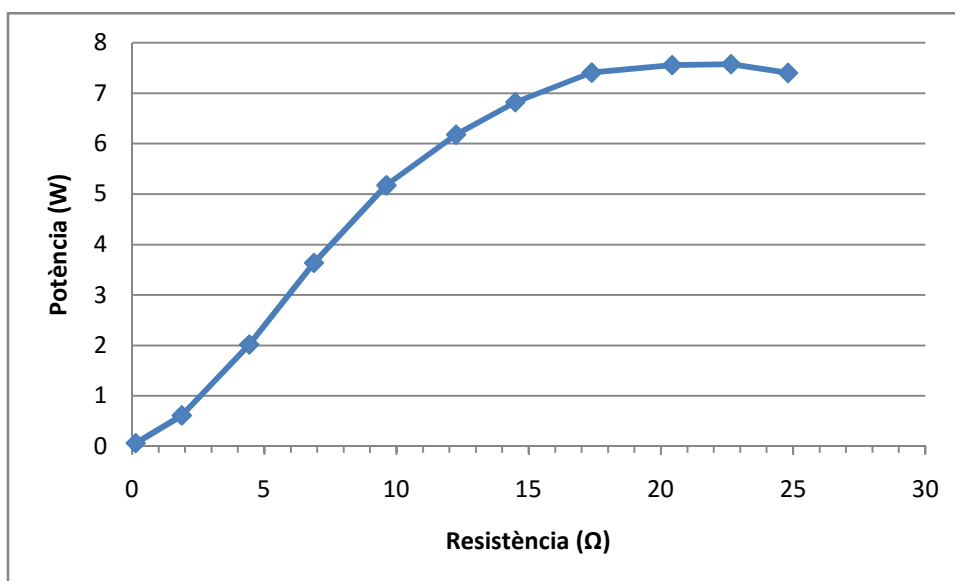


Figura 81: potència elèctrica mesurada – resistència amb alimentació del ventilador a 22 Hz

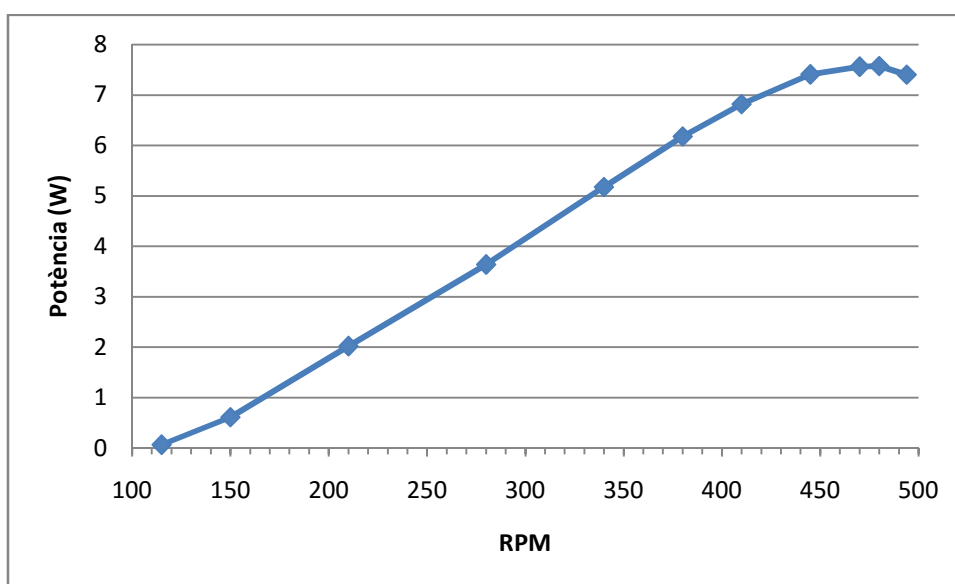


Figura 82: potència elèctrica mesurada – revolucions per minut amb alimentació del ventilador a 22 Hz

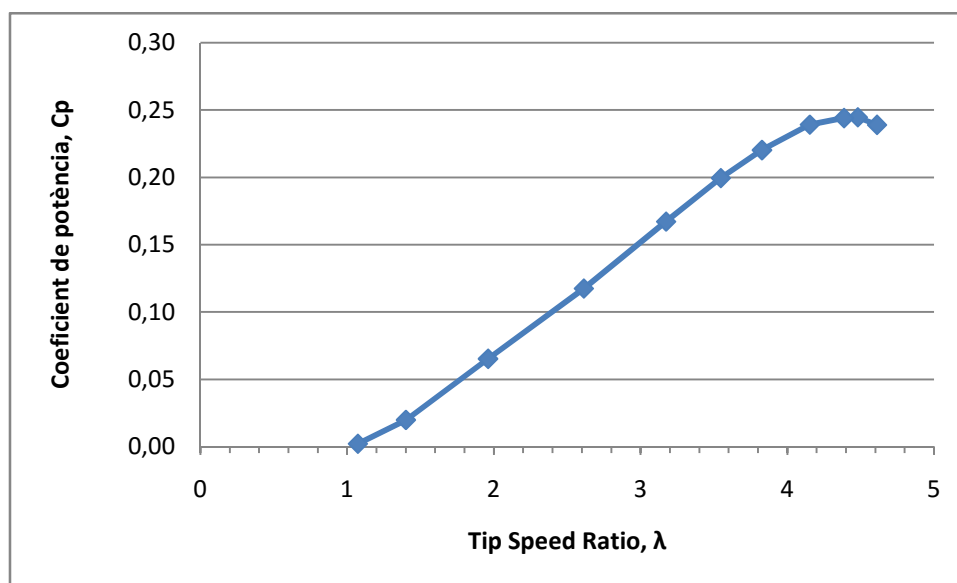


Figura 83: coeficient de potència – *Tip Speed Ratio* amb alimentació del ventilador a 22 Hz

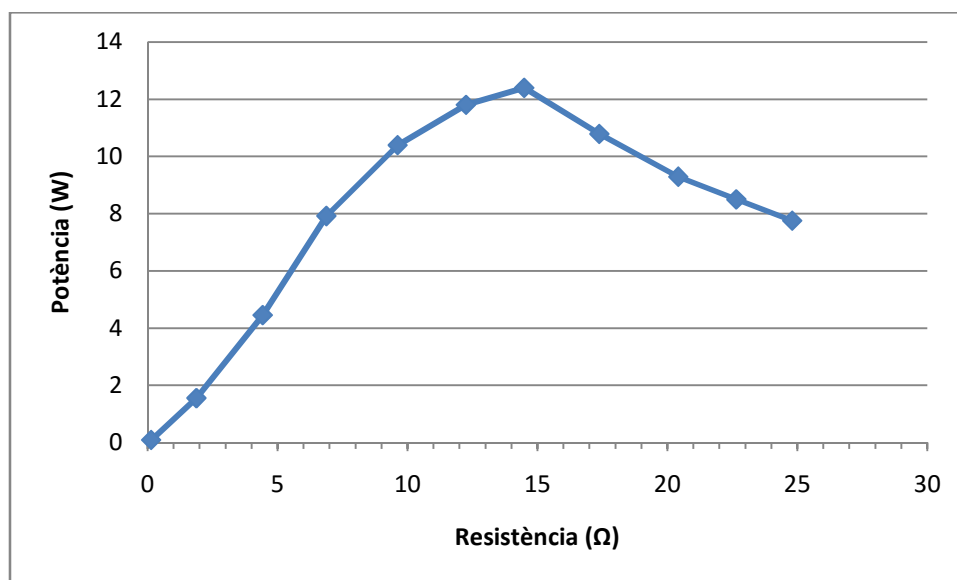


Figura 84: potència elèctrica mesurada – resistència amb alimentació del ventilador a 26 Hz

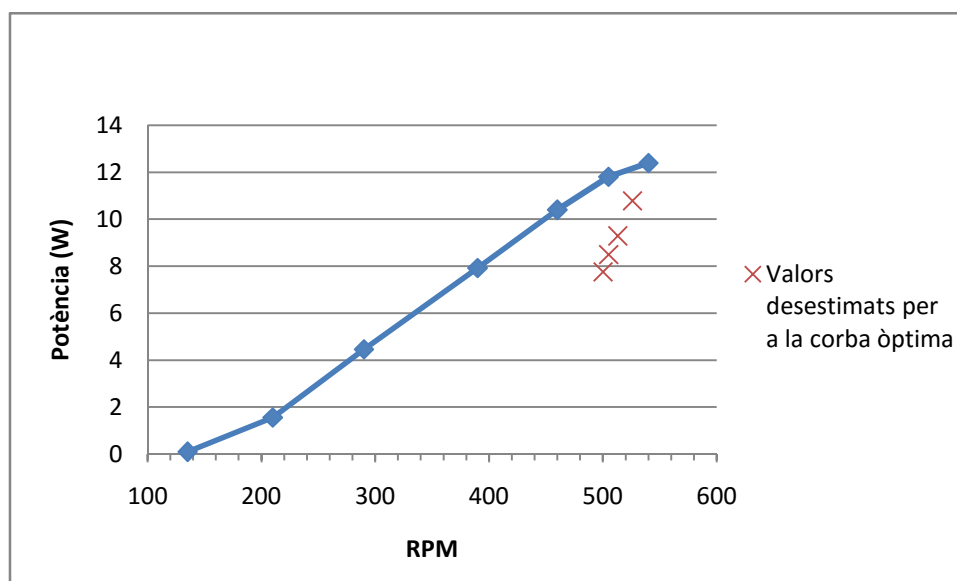


Figura 85: potència elèctrica mesurada – revolucions per minut amb alimentació del ventilador a 26 Hz

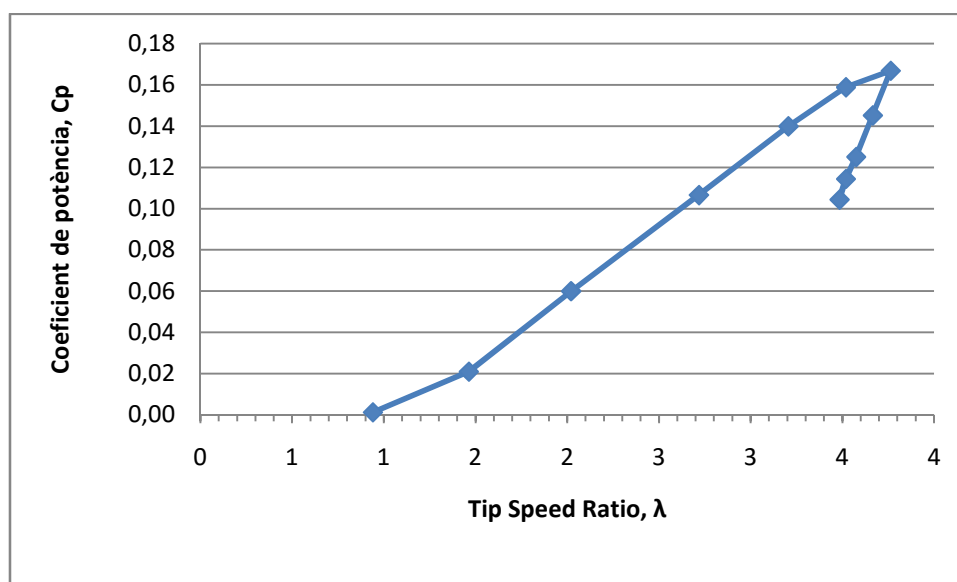


Figura 86: coeficient de potència – Tip Speed Ratio amb alimentació del ventilador a 26 Hz

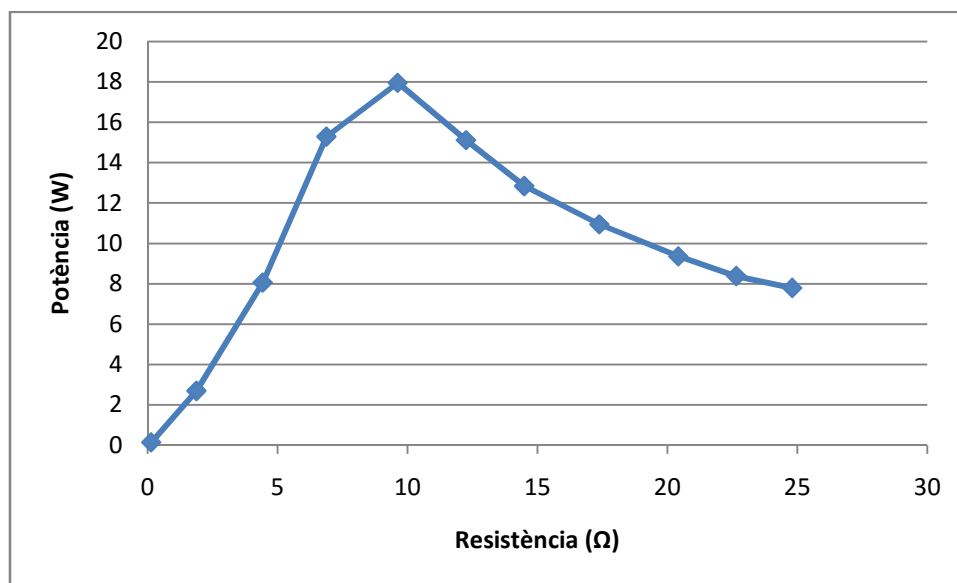


Figura 87: potència elèctrica mesurada – resistència amb alimentació del ventilador a 30 Hz

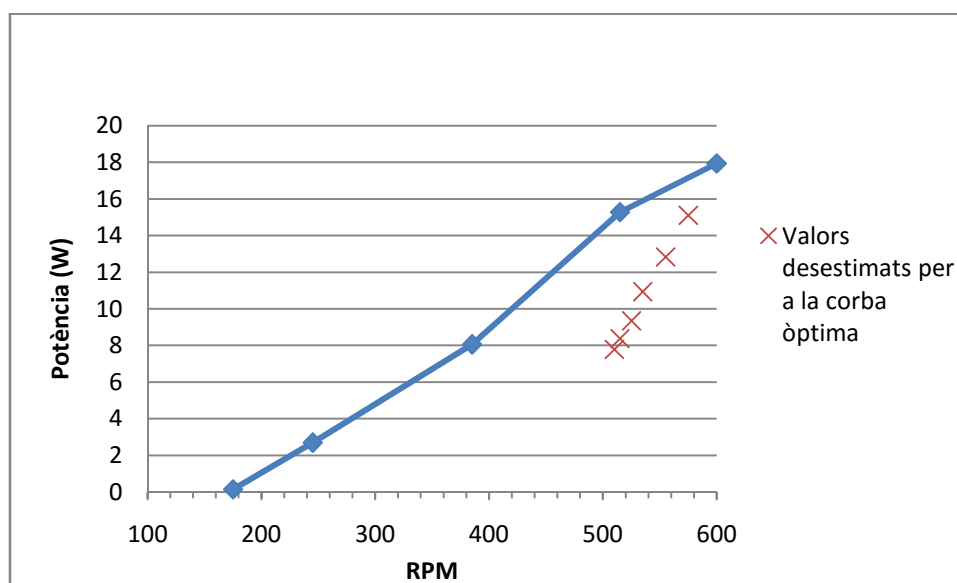


Figura 88: potència elèctrica mesurada – revolucions per minut amb alimentació del ventilador a 30 Hz

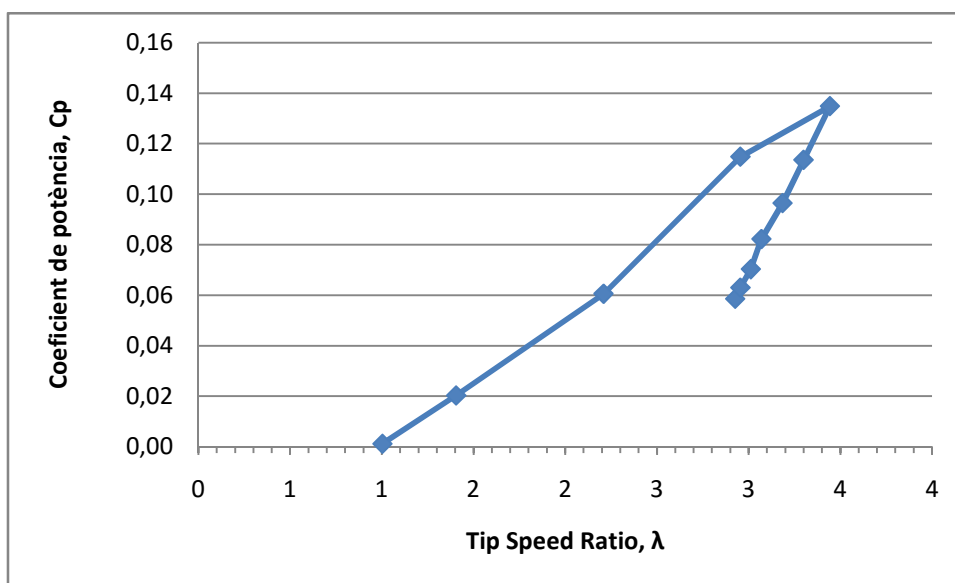


Figura 89: coeficient de potència – *Tip Speed Ratio* amb alimentació del ventilador a 30 Hz

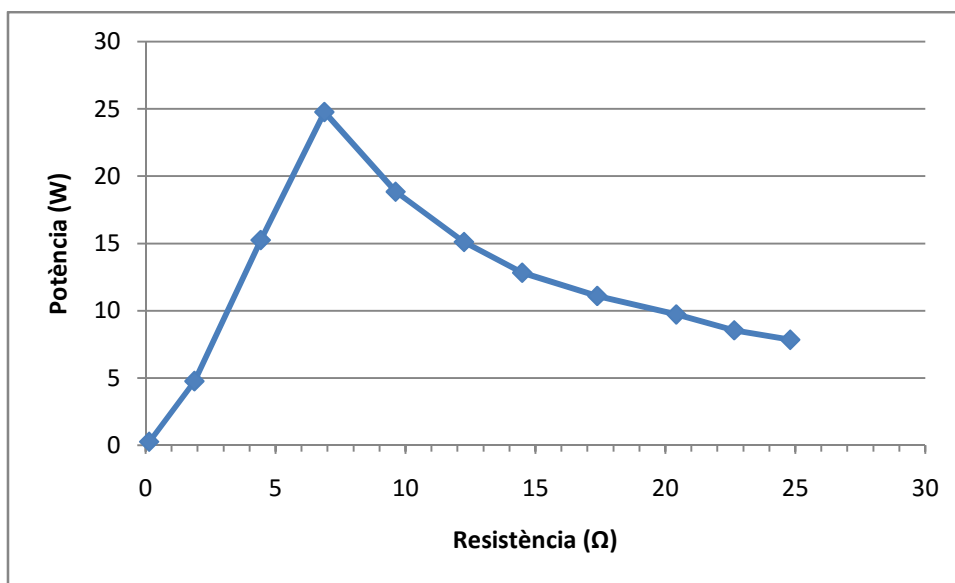


Figura 90: potència elèctrica mesurada – resistència amb alimentació del ventilador a 34 Hz

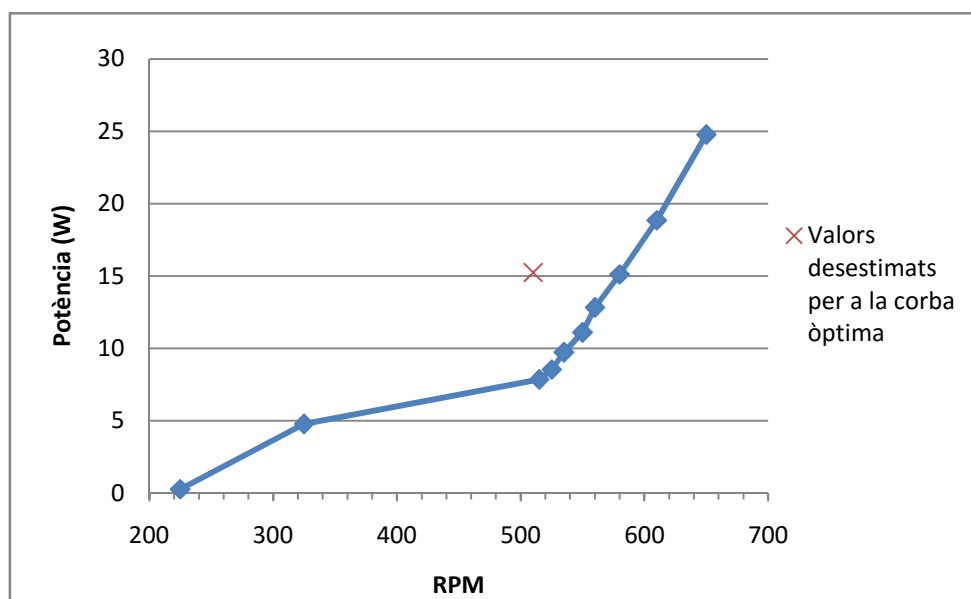


Figura 91: potència elèctrica mesurada – revolucions per minut amb alimentació del ventilador a 34 Hz

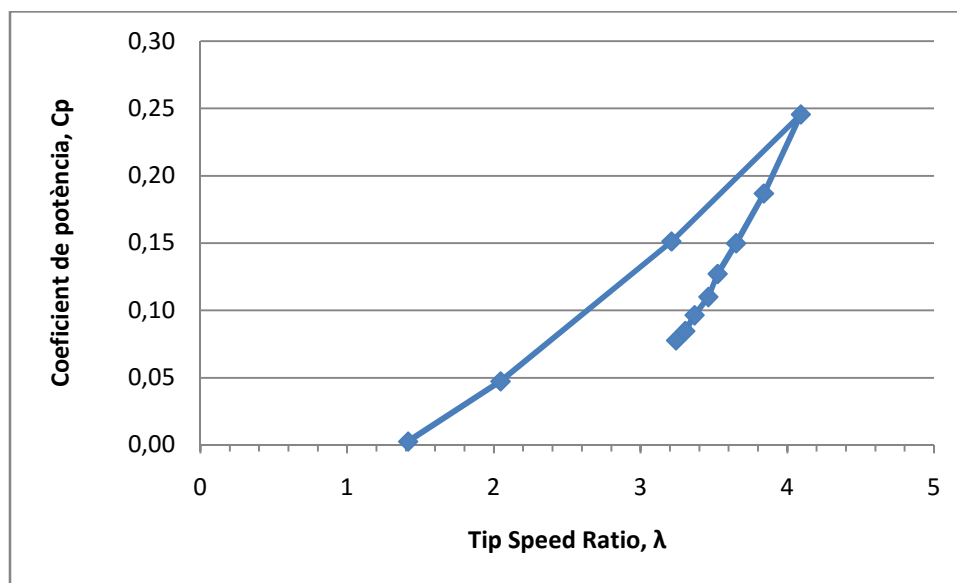


Figura 92: coeficient de potència – Tip Speed Ratio amb alimentació del ventilador a 34 Hz

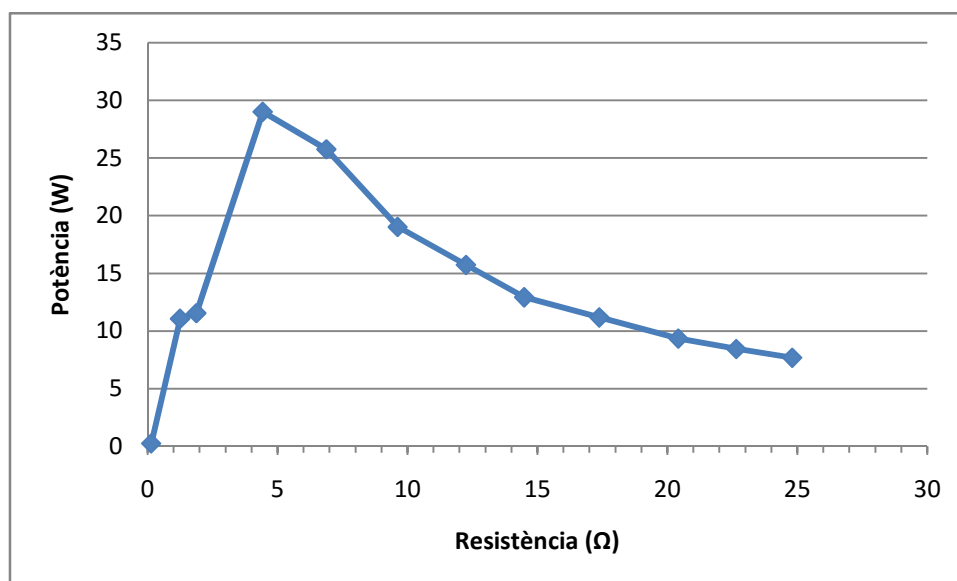


Figura 93: potència elèctrica mesurada – resistència amb alimentació del ventilador a 38 Hz

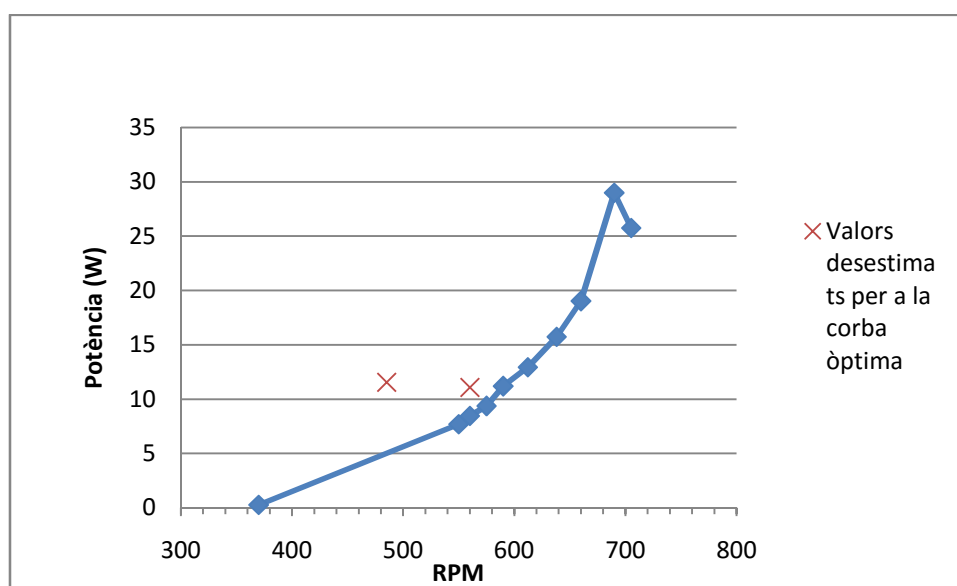


Figura 94: potència elèctrica mesurada – revolucions per minut amb alimentació del ventilador a 38 Hz

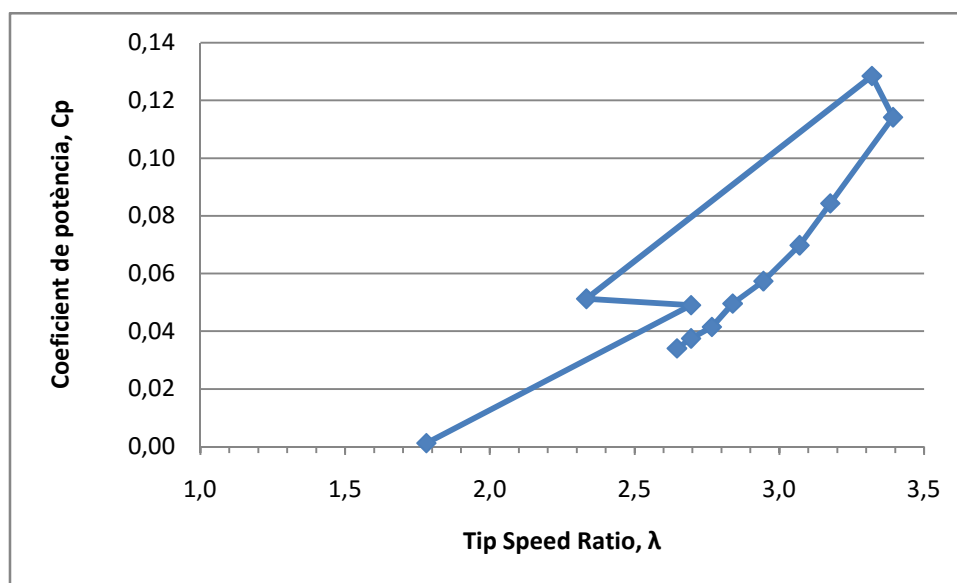
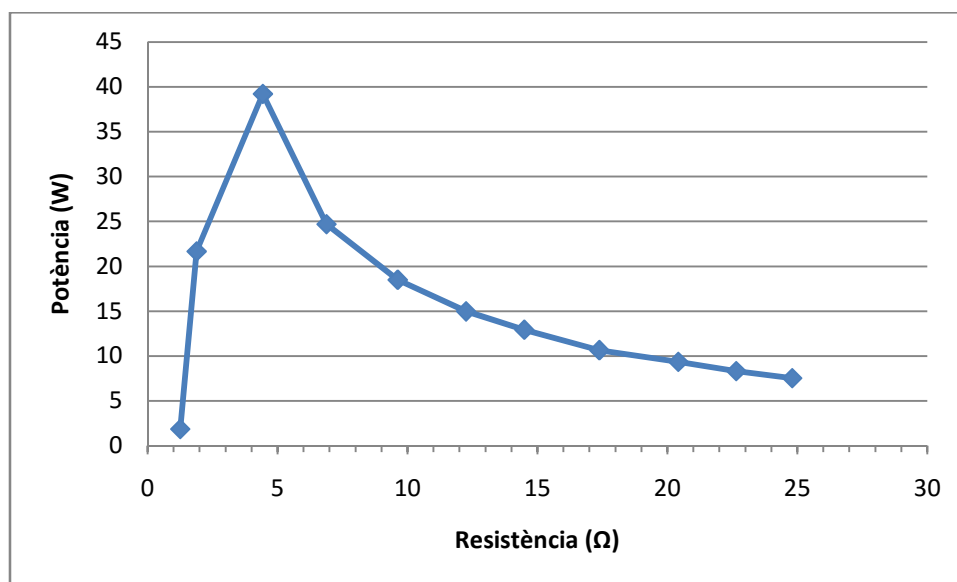
Figura 95: coeficient de potència – *Tip Speed Ratio* amb alimentació del ventilador a 38 Hz

Figura 96: potència elèctrica mesurada – resistència amb alimentació del ventilador a 42 Hz

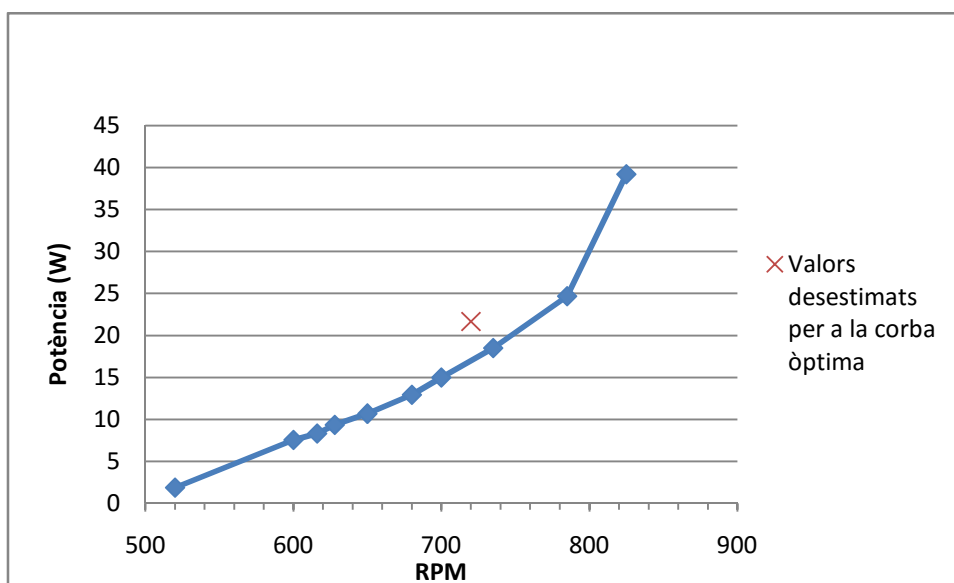


Figura 97: potència elèctrica mesurada – revolucions per minut amb alimentació del ventilador a 42 Hz

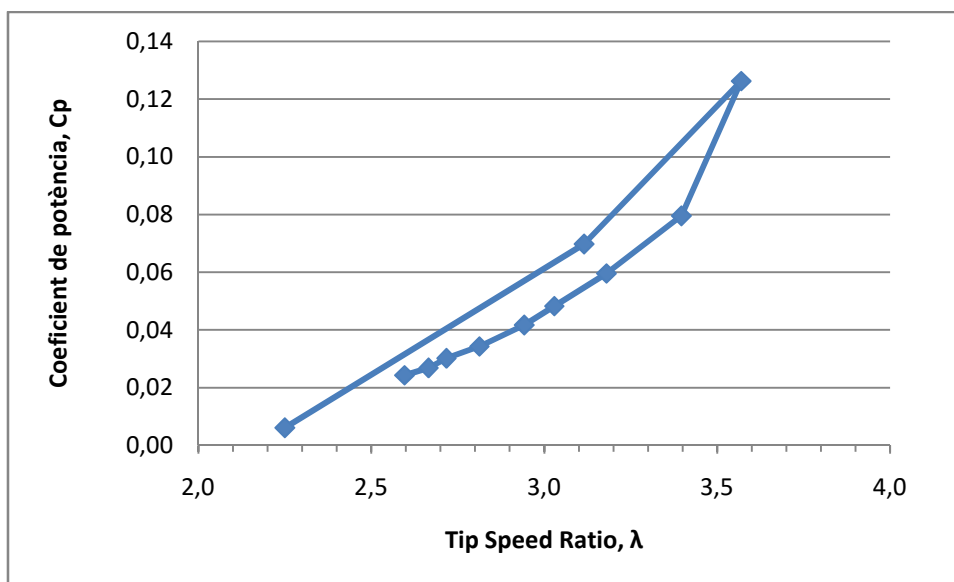


Figura 98: coeficient de potència – Tip Speed Ratio amb alimentació del ventilador a 42 Hz

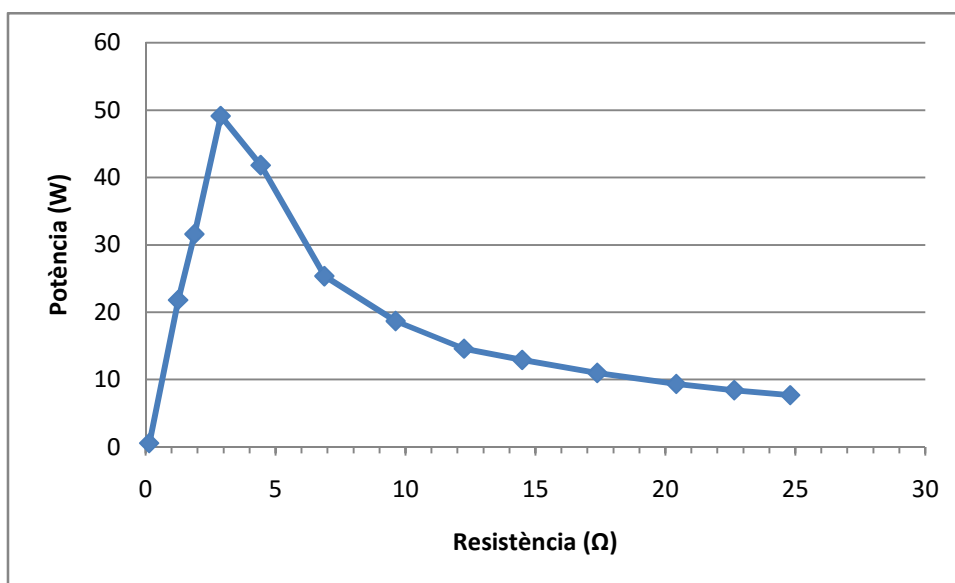


Figura 99: potència elèctrica mesurada – resistència amb alimentació del ventilador a 46 Hz

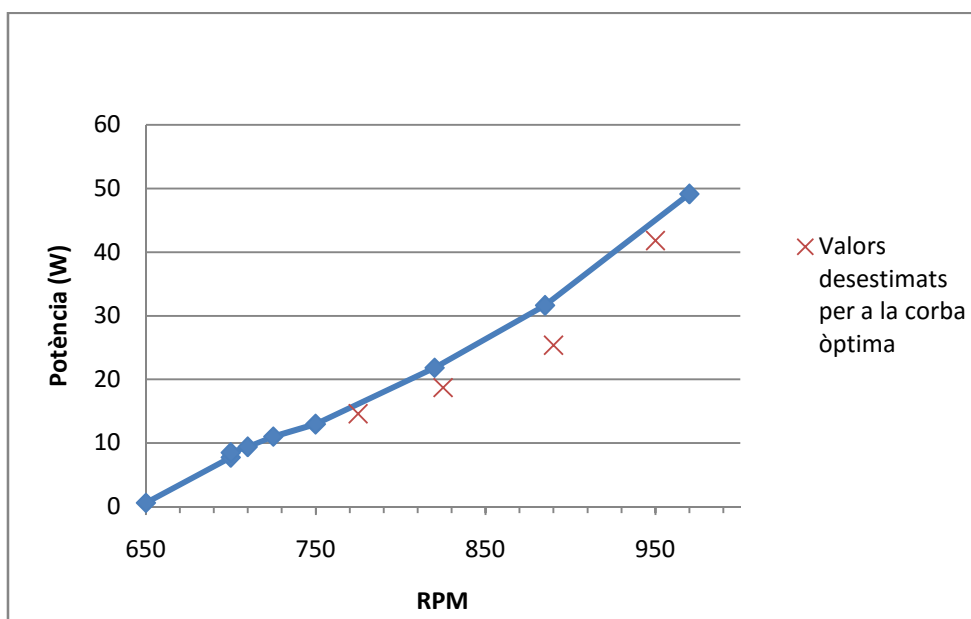


Figura 100: potència elèctrica mesurada – revolucions per minut amb alimentació del ventilador a 46 Hz

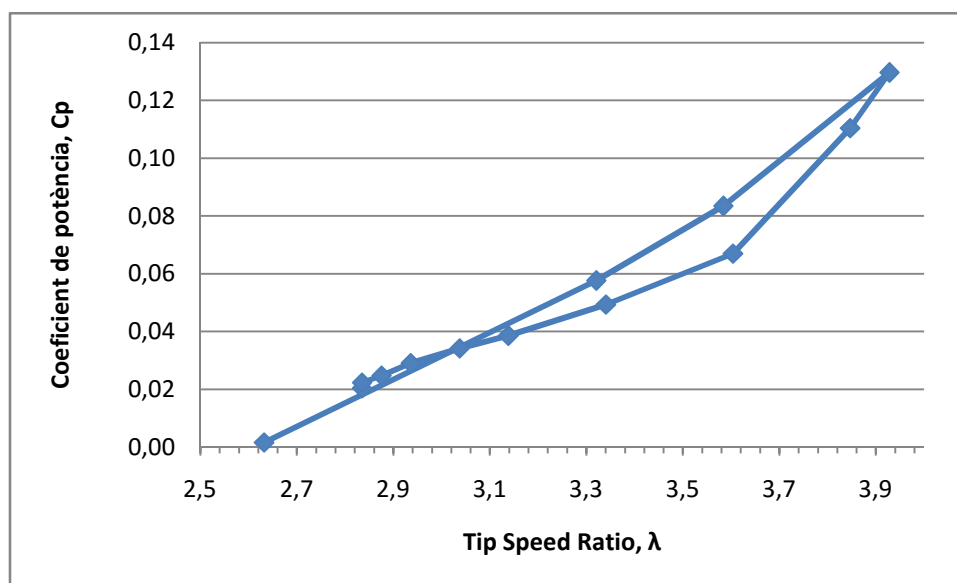


Figura 101: coeficient de potència – Tip Speed Ratio amb alimentació del ventilador a 46 Hz

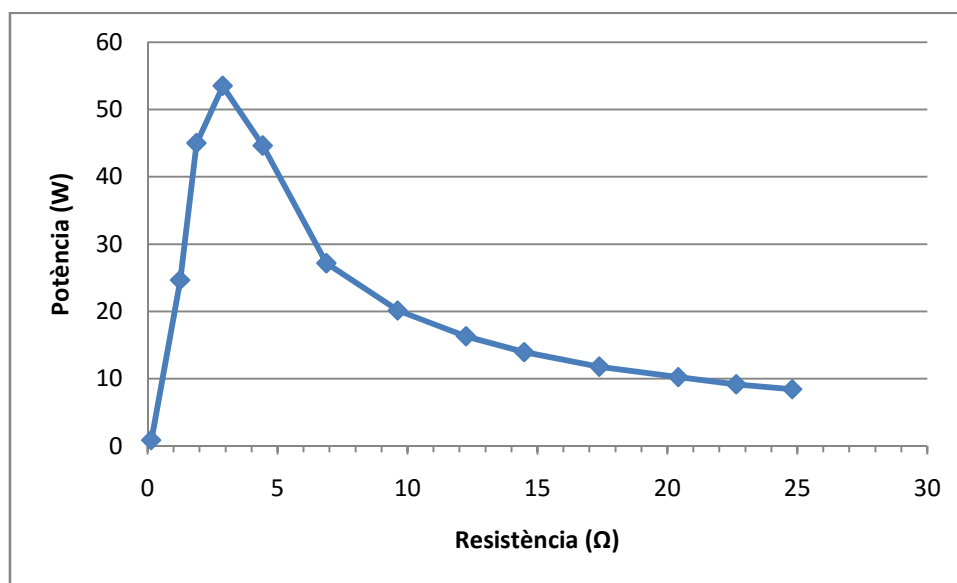


Figura 102: potència elèctrica mesurada – resistència amb alimentació del ventilador a 50 Hz

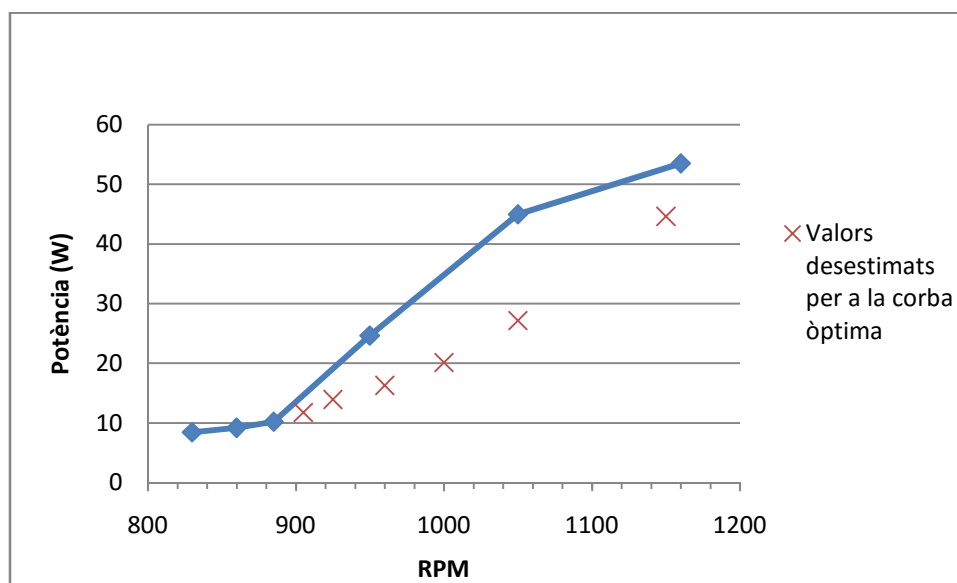


Figura 103: potència elèctrica mesurada – revolucions per minut amb alimentació del ventilador a 50 Hz

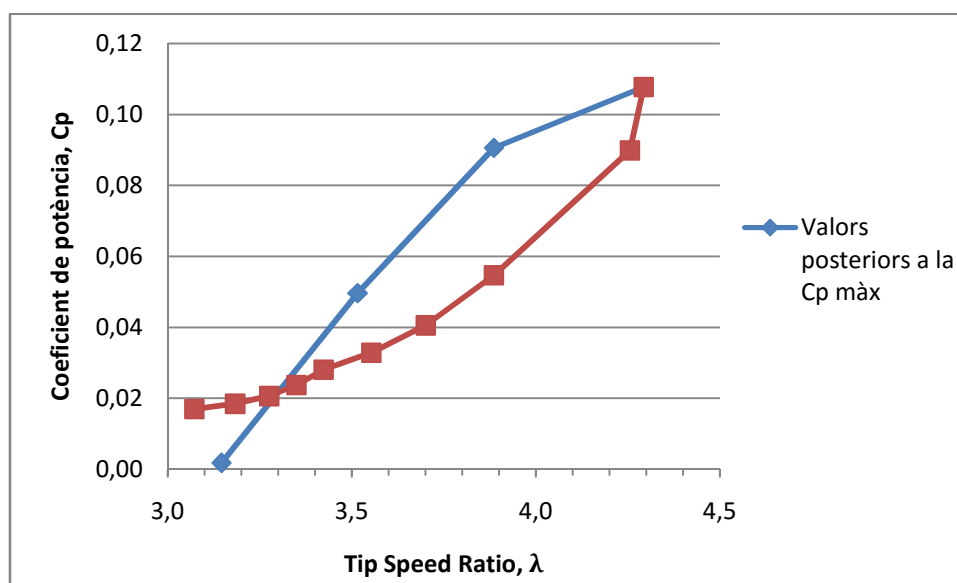


Figura 104: coeficient de potència – Tip Speed Ratio amb alimentació del ventilador a 50 Hz

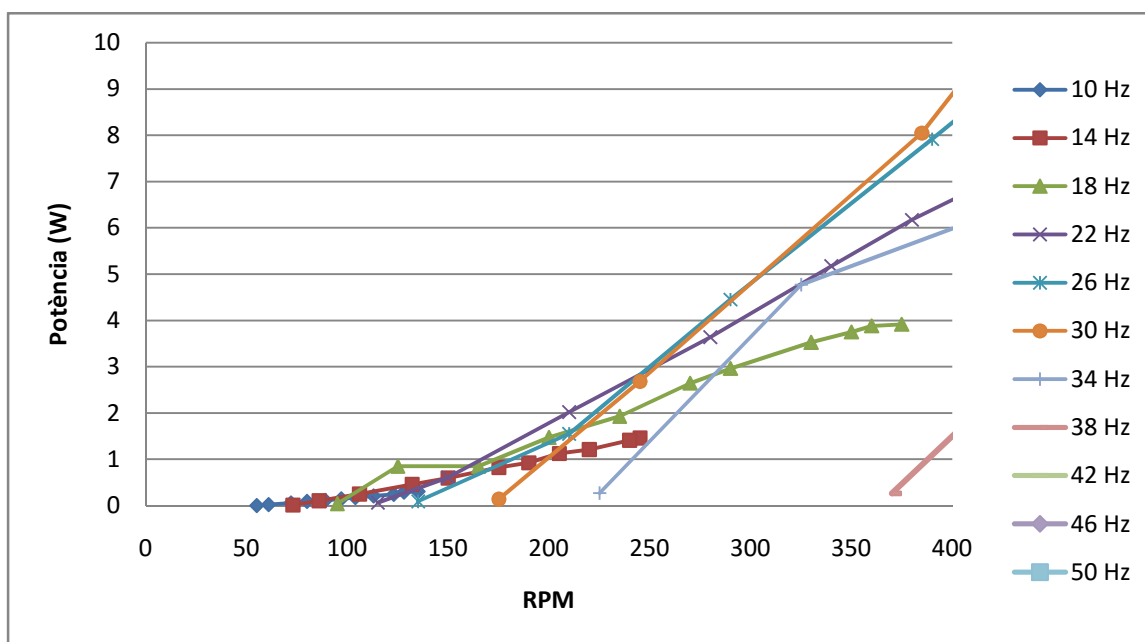
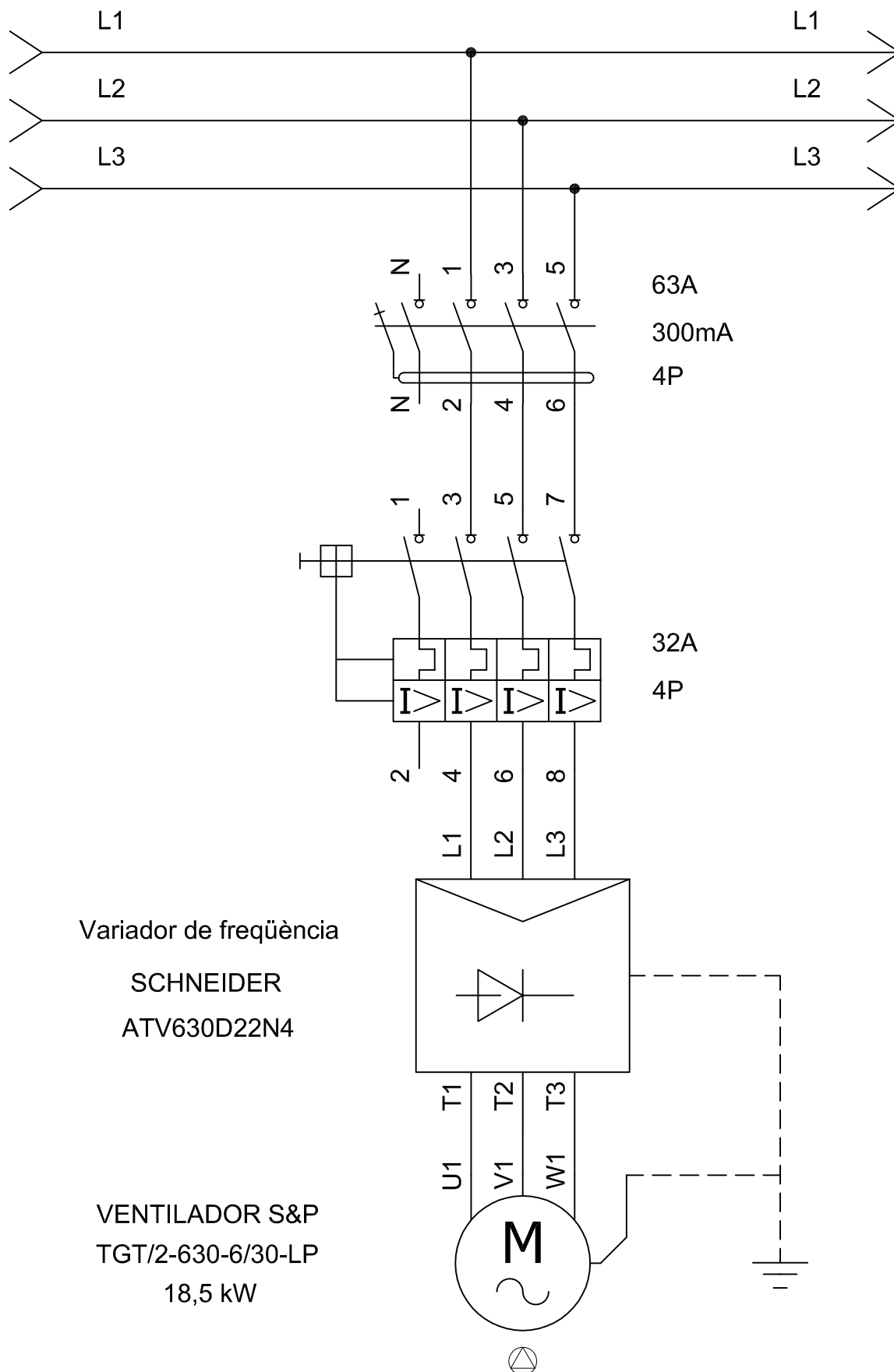


Figura 105: ampliació de la superposició a baixes revolucions de les corbes òptimes obtingudes al banc de proves

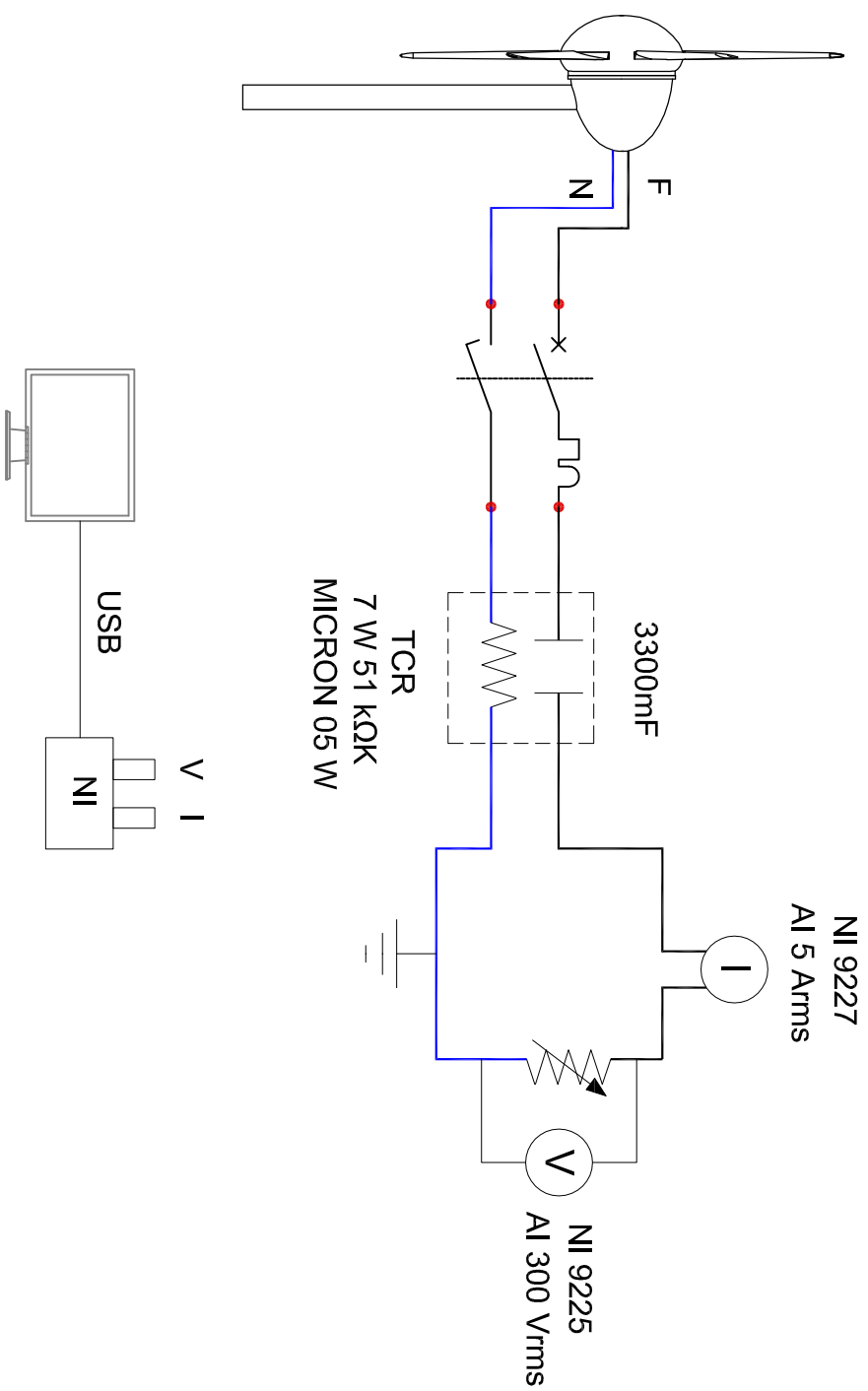
Tip Speed Ratio (λ)	RPM	U vent incident mesurada (m/s)	U vent incident calculada (m/s)	Potència elèctrica experimental (W)
3.84	135	1.80	1.51	0.31
	245	2.56	2.74	1.46
	375	3.98	4.19	3.92
	480	4.60	5.36	7.57
	540	6.16	6.03	12.40
	600	7.48	6.71	17.94
	650	6.82	7.26	24.76
	690	8.92	7.71	29.00
	825	9.92	9.22	39.19
	970	10.60	10.84	49.10
	1160	11.60	12.96	53.48

Taula 18: valors representatius de la corba òptima obtinguda al banc de proves

ANNEX E: PLÀNOLS



	Data	Nom		 Universitat de Girona	Escola Politècnica Superior
Dibuixat	6/06/16	XAVIER	ORRI		
Compro.					
Escala S. E.	Esquema muntatge experimental				Nº plànol 1
					Substitueix a:
					Especialitat GETI



	Data	Nom		Universitat de Girona	Escola Politècnica Superior
Dibuixat	6/06/16	XAVIER	ORRI		
Compro.					

Escola S. E.	Esquema muntatge experimental				Nº plànol 2
					Substitueix a:
					Especialitat GETI

ANNEX F: INFORMACIÓ TÈCNICA DEL VENTILADOR

TGT



TGT/2-630-6/30-LP-18,5kW-400/690-3V-50Hz-3

Ventiladores helicoidales tubulares con protección anticorrosiva en la camisa, mediante galvanizado en caliente, álabes de aluminio tipo "aerofoil", con casquillo de arrastre de acero, y motor trifásico IP55, clase F.

Pueden instalarse en posición horizontal o vertical. Modelos de camisa larga que incorporan puerta de inspección (para facilitar el acceso al motor).

Marca S&P modelo TGT/2-630-6/30-LP-18,5kW-400/690-3V-50Hz-3 para un caudal 34.200 m³/h y presión estática 506 Pa.

Punto de trabajo requerido

Caudal	34.000 m³/h
Presión estática	500 Pa
Temperatura	20 °C
Altitud	0 m
Densidad	1,2 kg/m³
Frecuencia	50 Hz
Tensión	400/690-3 V

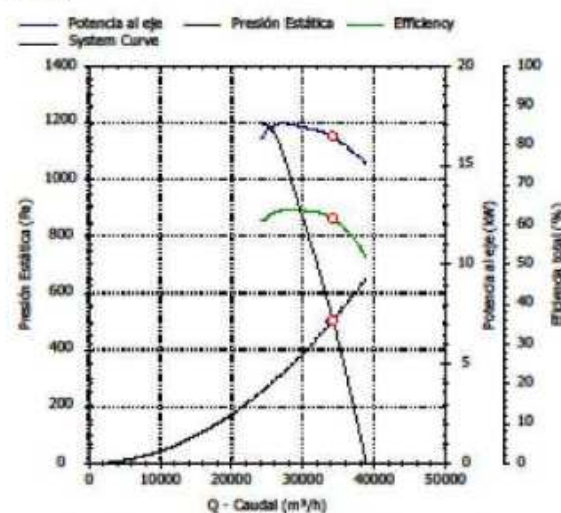
Punto trabajo

Caudal	34.200 m³/h
Presión estática	506 Pa
Presión dinámica	560 Pa
Presión total	1.066 Pa
Potencia útil	16,4 kW
Rend Total	61,6 %
Velocidad descarga	30,5 m/s
Velocidad ventilador	2957 rpm
Potencia específica	1,89 W/l/s
Potencia útil (eje) máx	17,1 kW

Construcción

Diámetro	630 mm
Palas	6
Peso	187,00 kg
Inclinación	30°

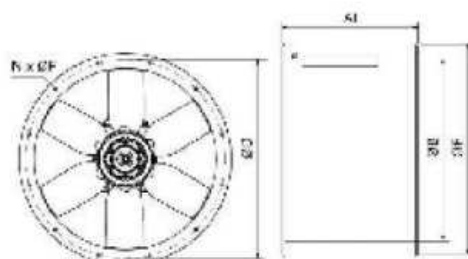
Curva



Motores

Número de Polos	2
Potencia motor	18,5 kW
Tensión	400/690-3
Intensidad motor	33,7 A / 19,5 A
Índice de protección	IP55
Clase motor	F

Dimensiones



AL	B	D	E	F	N
600	630	690	725	12	12

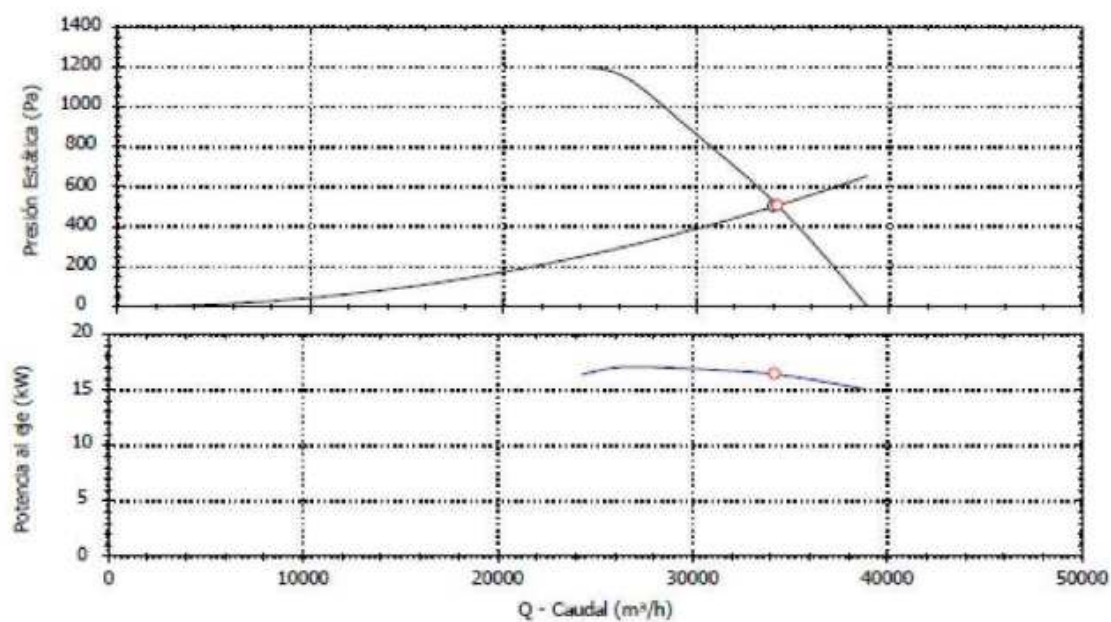
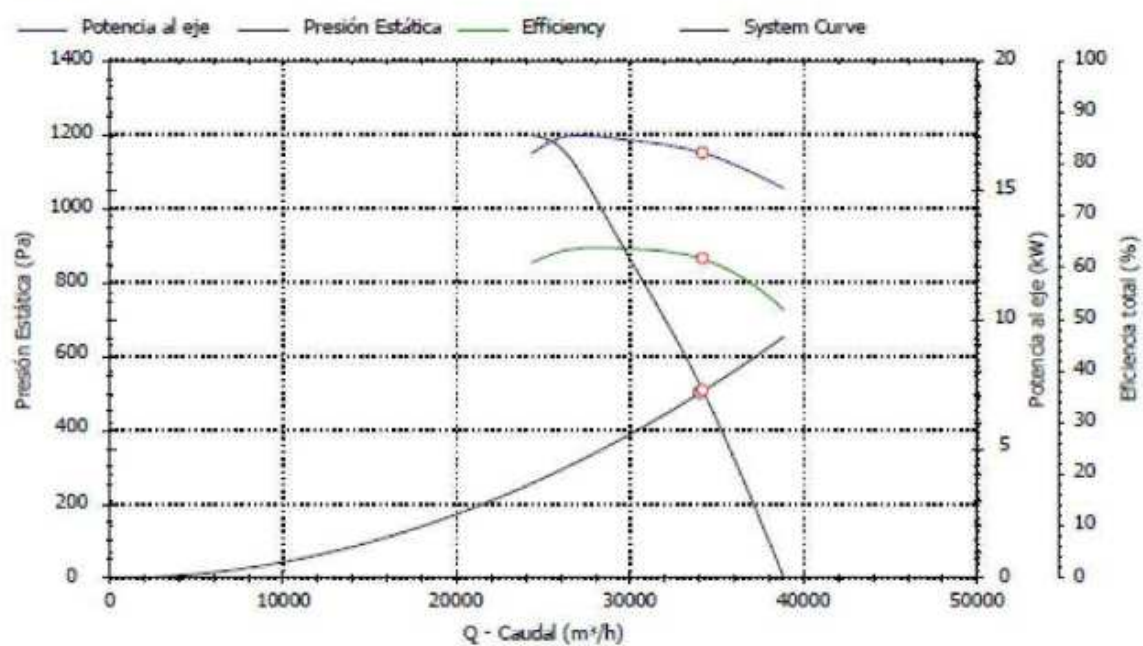
YN	MC	IC	N	VSD	Marca	RTT
16,7	D	Total	NSA.3	+	S&P	PV01033130
[kW]	[n.º/1/s]	[Pa]	[RPM]	SR		
18,475	29,758	1.310	2956	1		
YN	Rendimiento máximo (%)					
MC	Tipo de instalación					
IC	Categoría de Eficiencia					
N						

Características acústicas

	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	Total
Aspiración (LwA)	69	82	91	97	100	100	97	91	105
Aspiración LpA @ 1,5m	55	68	77	83	86	86	83	77	91



Curva



ANNEX G: PRESSUPOST

El pressupost per a la realització del present estudi, desglossat en els seus conceptes principals ha estat de:

Número	Codi	U.A.	Descripció	Cost unitari	Cost total
62	B00	h	Tècnic mig o superior. Concepte en redacció del projecte	20	1240
30	B01	h	Recerca d'informació i investigació (llibres, Internet, consulta)	0	0
170	B02	h	Aprenentatge ús programari OpenFOAM	0	0
40	B03	h	Generació geometries	15	600
30	B04	h	Mallat del model		0
10	B05	h	Estructuració, preparació i càlcul de les condicions inicials del cas OpenFOAM Simulacions: 45h /simulació	15	150
1170	B06	h	Amortització del hardware (simulació amb el programa OpenFOAM): PC personal i7 3.4 GHz i 8 CPUs Simulacions: 72h/simulació	0.76	886.36
1944	B07	h	Amortització del hardware (simulació amb el programa OpenFOAM): FRAM UdG de 10 nodes a 1.595 GHz i 8 CPUs	1.14	2209.09
Pressupost d'Execució Material (PEM)					5,085.45 €
Despeses Generals d'Empresa (13%)					661.11 €
Benefici Industrial (6%)					305.13 €
Pressupost d'execució per Contracte a falta d'I.V.A. (PEC)					6,051.69 €
I.V.A. (21%)					1,270.86 €
Total					7,322.55 €

Signat

L'autor, Xavier Orri Vila

Girona, 1 de setembre de 2016