

Universitat de Girona
Escola Politècnica Superior

Treball final de grau

Estudi: Grau en Tecnologies Industrials

Títol: Estudi aerodinàmic d'un aerogenerador estàtic sense pales

Document: Memòria i annexos

Alumne: Àlex Monells Guenes

Tutor: Dr. Jose Ramon González Castro

Departament: Enginyeria mecànica i de la construcció industrial

Àrea: Mecànica de fluids

Convocatòria (mes/any): Juny 2023

Agraïments

En primer lloc, vull agrair al meu tutor, el Dr. Josep Ramon González, que em va proposar aquest tema després i m'ha ajudat en tot moment.

Agraeixo també a la Universitat de Girona per cedir els seus ordinadors i programes informàtics necessaris per a la realització d'aquest projecte.

En últim lloc, vull agrair a totes les persones que m'han donat el seu suport durant la realització d'aquest projecte, siguin companys, familiars o altres professors.

ÍNDIX

Índex.....	i
Índex de figures.....	iv
Índex de Taules.....	ix
1 Introducció.....	11
1.1 Antecedents.....	12
1.2 Objecte.....	14
1.3 Abast i especificacions.....	14
1.3.1 Abast.....	14
1.3.2 Especificacions.....	14
2 Descripció de la solució.....	17
2.1 Geometries inicials.....	17
2.2 Modificació de perfils.....	22
2.3 Túnel de vent.....	23
3 Discussió de resultats.....	25
3.1 Resultats i comparativa dels tres primers prototips.....	25
3.2 Anàlisi de l'evolució del flux en el prototip 2.....	29
3.3 Resultats per a diferents posicions dels perfils en el prototip 2.....	31
3.4 Estudi del prototip 2 per a diferents velocitats.....	32
3.4.1 Velocitat d'entrada de 6 m/s.....	32
3.4.2 Velocitat d'entrada de 8 m/s.....	35
3.5 Resultats amb el perfil NACA9508.....	38
3.5.1 Velocitat d'entrada de 4 m/s.....	38

Estudi aerodinàmic d'un aerogenerador sense aspes

3.5.2	Velocitat d'entrada de 6 m/s.....	39
3.5.3	Velocitat d'entrada de 8 m/s.....	39
3.6	Resultats amb la configuració H del perfil NACA0024.....	40
3.6.1	Velocitat d'entrada de 4 m/s.....	40
3.6.2	Velocitat d'entrada de 6 m/s.....	41
3.6.3	Velocitat d'entrada de 8 m/s.....	44
3.7	Resultats amb la configuració I del perfil NACA0024.....	44
3.7.1	Velocitat d'entrada de 4 m/s.....	44
3.7.2	Velocitat d'entrada de 6 m/s.....	45
3.7.3	Velocitat d'entrada de 8 m/s.....	46
3.8	Comparacions dels diferents perfils per a cada velocitat	47
3.8.1	Comparació a 4 m/s	47
3.8.2	Comparació a 6 m/s	51
3.8.3	Comparació a 8 m/s	53
3.8.4	Comparació numèrica respecte a la velocitat d'entrada	55
4	Resum del pressupost.....	57
5	Conclusions.....	59
6	Relació de documents	61
7	Bibliografia	63
8	Glossari	65
Annexos.....		67
Annex A: Descripció del procediment de la simulació.....		67
A.1 Generació de la geometria amb SOLIDWORKS		67
A.2 Generació del túnel virtual amb ANSYS WORKBENCH		71
A.3 Mallat		74

A.4 Setup.....	78
A.5 Obtenció de les dades	82
Annex B: Informació sobre els perfils emprats.....	83
B.1 S1210 12%	83
B.2 NACA0030.....	84
B.3 NACA9508.....	84
B.4 NACA0024.....	85
Annex C: Comparativa dels resultats obtinguts per a la modificació de la zona superior de la part central.....	87
Annex D: Estudi econòmic	89

ÍNDIX DE FIGURES

Figura 1. Exemples d'aerogeneradors d'eix vertical: (a) Savonius [8]; (b) Darrieus [9].	12
Figura 2. Prototip inicial de l'aerogenerador d'Aeromine. [4].	13
Figura 3. Model actual d'aerogenerador Aeromine: (a) representació del comportament del flux [2]; (b) imatge d'un model ja fabricat [10].	13
Figura 4. Perfil S1210 12% usat.	17
Figura 5. Perfil NACA0030 usat.	18
Figura 6. Vistes del model generat amb SOLIDWORKS: (a) vista frontal; (b) vista lateral; (c) vista superior i (d) vista isomètrica.	19
Figura 7. Geometria per al prototip 1.	19
Figura 8. Geometria per al prototip 2.	20
Figura 9. Geometria per al prototip 3.	20
Figura 10. Nomenclatura de les posicions dels perfils.	21
Figura 11. Comparació del perfil S1210 12% (vermell) amb el perfil NACA9508 (daurat).	22
Figura 12. Comparació entre el perfil S1210 12% (vermell), el perfil NACA9508 (daurat) i el perfil NACA0024 (blau).	22
Figura 13. Mesures del túnel de vent virtual.	24
Figura 14. Gràfica de la velocitat mitjana respecte al temps per als tres prototips inicials.	25
Figura 15. Distribució de velocitats al pla de simetria per als 3 prototips inicials a l'instant de 80 segons de simulació: (a) prototip 1, (b) prototip 2 i (c) prototip 3.	26
Figura 16. Distribució de velocitats en el pla paral·lel a la planta amb una alçada de 2 metres a per l'instant de 80 s de simulació: (a) prototip 1, (b) prototip 2 i (c) prototip 3.	27
Figura 17. Distribució de velocitats al pla on s'estudia la velocitat mitjana per a l'instant de 80 s de simulació: (a) prototip 1, (b) prototip 2 i (c) prototip 3.	28
Figura 18. Distribució de velocitats per a diferents instants en el pla paral·lel a la planta amb una alçada de 2 metres amb la configuració inicial: (a) 40 s, (b) 50 s, (c) 51 s, (d) 52 s, (e) 53 s, (f) 54 s.	30
Figura 19. Gràfica de la velocitat mitjana respecte al temps per a les configuracions A,B,C,D,E,F i G en el prototip 2 pel perfil S1210 12% per una velocitat d'entrada de 4 m/s.	31

Figura 20. Gràfica de la velocitat mitjana respecte al temps per al prototip 2 amb la configuració D amb el perfil S1210 12% amb una velocitat d'entrada de 6 m/s.33

Figura 21. Distribució de velocitats al pla paral·lel a la planta amb una altura de 2 metres per el prototip 2 amb la configuració D amb una velocitat d'entrada de 6 m/s: (a) 20 s, (b) 25 s, (c) 26 s,(d) 27 s i (e) 28 s.....34

Figura 22. Gràfica de la velocitat mitjana respecte al temps per al prototip 2 amb la configuració D amb el perfil S1210 12% amb una velocitat d'entrada de 8 m/s.35

Figura 23. Distribució de velocitats al pla paral·lel a la planta amb una altura de 2 metres per el prototip 2 amb la configuració D amb el perfil S1210 12% amb una velocitat d'entrada de 8 m/s: (a) 1 s, (b) 2 s i (c) 3 s.....36

Figura 24. Distribució de velocitats al pla de simetria per el prototip 2 amb la configuració D amb el perfil S1210 12% amb una velocitat d'entrada de 8 m/s: (a) 1 s, (b) 2 s i (c) 3 s.....37

Figura 25. Gràfica de la velocitat mitjana respecte al temps per al prototip 2 amb la configuració D amb el perfil NACA9508 amb una velocitat d'entrada de 4 m/s.....38

Figura 26. Gràfica de la velocitat mitjana respecte al temps per al prototip 2 amb la configuració D amb el perfil NACA9508 amb una velocitat d'entrada de 6 m/s.....39

Figura 27. Gràfica de la velocitat mitjana respecte al temps per al prototip 2 amb la configuració D amb el perfil NACA9508 amb una velocitat d'entrada de 8 m/s.....40

Figura 28. Gràfica de la velocitat mitjana respecte al temps per al prototip 2 amb la configuració H amb el perfil NACA0024 amb una velocitat d'entrada de 4 m/s.....41

Figura 29. Gràfica de la velocitat mitjana respecte al temps per al prototip 2 amb la configuració H amb el perfil NACA0024 amb una velocitat d'entrada de 6 m/s.....42

Figura 30. Distribució de velocitats al pla de simetria per el prototip 2 amb la configuració H amb el perfil NACA0024 amb una velocitat d'entrada de 6 m/s: (a) 10 s, (b) 31 s i (c) 35 s.....43

Figura 31. Gràfica de la velocitat mitjana respecte al temps per al prototip 2 amb la configuració H amb el perfil NACA0024 amb una velocitat d'entrada de 8 m/s.....44

Figura 32. Gràfica de la velocitat mitjana respecte al temps per al prototip 2 amb la configuració I amb el perfil NACA0024 amb una velocitat d'entrada de 4 m/s.....45

Figura 33. Gràfica de la velocitat mitjana respecte al temps per al prototip 2 amb la configuració I amb el perfil NACA0024 amb una velocitat d'entrada de 6 m/s.....46

Figura 34. Gràfica de la velocitat mitjana respecte al temps per al prototip 2 amb la configuració I amb el perfil NACA0024 amb una velocitat d'entrada de 8 m/s.....	46
Figura 35. Comparativa dels diferents casos estudiats per a una velocitat d'entrada de 4 m/s.	47
Figura 36. Comparació del comportament del flux en el pla paral·lel a la planta a una altura de 2 metres per a diferents posicions i diferents perfils a partir del prototip 2 a 4 m/s: (a) S1210 12% Configuració D, (b) NACA9508 Configuració D, (c) NACA0024 Configuració H i (d) NACA0024 configuració I.	48
Figura 37. Comparació del comportament del flux en el pla de simetria per a diferents posicions i diferents perfils a partir del prototip 2 a 4 m/s: (a) S1210 12% Configuració D, (b) NACA9508 Configuració D, (c) NACA0024 Configuració H i (d) NACA0024 configuració I.	50
Figura 38. Comparativa dels diferents casos estudiats per a una velocitat d'entrada de 6 m/s.	51
Figura 39. Comparació del comportament del flux en el pla paral·lel a la planta a una altura de 2 metres per a diferents posicions i diferents perfils a partir del prototip 2 a 6 m/s: (a) S1210 12% Configuració D, (b) NACA9508 Configuració D, (c) NACA0024 Configuració H i (d) NACA0024 configuració I.	52
Figura 40. Comparativa dels diferents casos estudiats per a una velocitat d'entrada de 8 m/s.	53
Figura 41. Comparació del comportament del flux en el pla paral·lel a la planta a una altura de 2 metres per a diferents posicions i diferents perfils a partir del prototip 2 a 8 m/s: (a) S1210 12% Configuració D, (b) NACA9508 Configuració D, (c) NACA0024 Configuració H i (d) NACA0024 configuració I.	54
Figura 42. Gràfic de barres del percentatge de diferència obtingut amb cada perfil per a diferents velocitats d'entrada.	55
Figura 43. Format inicial de les dades exportades a EXCEL.....	67
Figura 44. Opcions per a dividir les dades en columnes.	67
Figura 45. Format de les coordenades correcte per a exportar.....	68
Figura 46. Operació per a crear una corba a partir de punts.....	68
Figura 47. Finestra a on carregar el format ".txt" de les coordenades.	68
Figura 48. Conversió dels punts importats a un croquis.	69

Figura 49. Procés d'extrusió del croquis.	69
Figura 50. Perfil S1210 12% amb el tall fet.	70
Figura 51. Arrodoniment aplicat al perfil S1210 12%.	70
Figura 52. Perfil NACA9508 amb el tall fet.....	70
Figura 53. Perfil NACA0030 amb el tall fet.....	71
Figura 54. Components de l'assemblatge: (a) base; (b) perfil central; (c) perfil lateral.	71
Figura 55. Dades introduïdes per a l'extrusió del túnel de vent virtual.	72
Figura 56. Operació booleana per al túnel de vent virtual.	72
Figura 57. Mides del primer "body of influence".....	73
Figura 58. Mides del segon "body of influence".....	74
Figura 59. Cares seleccionades per al "face sizing": (a) vista posterior; (b) vista frontal.....	75
Figura 60. Superfície on s'ha aplicat el "face sizing 2", de menor mida d'element.	75
Figura 61. Setup del model de turbulència emprat, el k-epsilon.	78
Figura 62. Introducció de dades de velocitat d'entrada pel setup.	79
Figura 63. Introducció de dades per la sortida del túnel de vent virtual.....	79
Figura 64. Setup introduït per a les parets lliscants.....	80
Figura 65. Criteris de convergència.....	80
Figura 66. Finestra per introduir la configuració de guardat automàtic.....	81
Figura 67. Configuració d'inicialització d'una simulació transitòria.....	81
Figura 68. Generació del pla en el qual es calculen les velocitats mitjanes.....	82
Figura 69. Mètode de càlcul de la velocitat mitjana.....	82
Figura 70. Perfil S1210 12% original.....	83
Figura 71. Coeficient de "lift" segons l'angle d'incidència per al perfil S1210 12%. La línia lila correspon a un Reynolds de 500.000 i la daurada a un de 200.000.	83
Figura 72. Representació de l'angle d'incidència.....	84
Figura 73. Perfil NACA0030 original.	84
Figura 74. Perfil NACA9508 original.	84
Figura 75. Perfil NACA0024 original.	85
Figura 76. Coeficient de "lift segons l'angle d'incidència per al perfil NACA0024. La línia lila correspon a un Reynolds de 500.000 i la daurada a un de 200.000.	85
Figura 77. Comparació del valor objectiu entre el prototip 2 inicial i el prototip 2 versió 2.	87

ÍNDEX DE TAULES

Taula 1. Diferents casos aerodinàmics que s'estudiaran.	15
Taula 2. Diferents posicions en les quals s'estudiarà l'aerogenerador.....	21
Taula 3. Noves posicions per al perfil NACA0024.....	23
Taula 4. Velocitats mitjanes obtingudes per a les diferents configuracions del prototip 2 amb el perfil S1210 12%.	32
Taula 5. Operacions realitzades al mallat als tres primers prototips.....	76
Taula 6. Informació i característiques del mallats dels primers prototips.....	76
Taula 7. Operacions realitzades al mallat per a les configuracions finals.	77
Taula 8. Dades dels mallats de les geometries finals.....	77
Taula 9. Amidaments.....	89
Taula 10. Imports per a cada partida.	89
Taula 11. Import total de l'estudi.....	90

1 INTRODUCCIÓ

Des d'aproximadament, l'any 1950, hi ha hagut un creixement exponencial del consum d'energia global [1]. El petroli i el carbó sempre han estat dos dels combustibles fòssils més usats, però, en ser combustibles fòssils, els seus recursos són limitats, amb l'agreujant que això suposa. Tanmateix, són recursos que, en ser emprats, contaminen significativament l'entorn i el medi ambient.

Aleshores, al llarg dels últims anys, a causa d'aquest augment de l'energia consumida, del canvi climàtic i el corresponent perill mediambiental que aquest significa, s'ha intentat iniciar una transició pel que fa als mètodes de generació d'energia arreu del món.

A Europa sobretot, des de fa anys, s'estan incentivant polítiques sobre el canvi climàtic, per exemple, s'està intentant una transició cap a vehicles elèctrics en detriment dels vehicles de combustió. Això implica que en el futur, si tot continua al mateix ritme, el consum d'energia elèctrica augmentarà i, per tant, s'hauran de generar més energia elèctrica amb fonts d'energies renovables.

Les energies renovables com a tal, ja han existit des de fa molts segles, dos clars exemples en serien els molins d'aigua i els molins de vent, que no han estat gaire utilitzades a causa del nivell tecnològic inferior. Avui en dia, però, amb els avenços actuals, hi ha diferents energies renovables que cada cop es fan servir més. Entre les més comunes es troben:

- Energia solar
- Energia hidràulica
- Energia eòlica

Aquest projecte tractarà d'analitzar un nou model per obtenir energia eòlica a partir d'un posicionament estratègic de perfils aerodinàmics per tal d'accelerar el vent. Aquesta tecnologia està impulsada per l'empresa estatunidenca Aeromine [2], on no hi ha les habituals pales dels aerogeneradors de grans mesures, sinó que només hi ha una turbina de menors mesures com a element mòbil de tal manera que el manteniment és més fàcil.

1.1 Antecedents

Durant els últims anys s'han desenvolupat diferents models d'aerogeneradors, els quals se solen dividir segons la posició de l'eix de rotació (horitzontal o vertical). En el model d'Aeromine la posició de l'eix és vertical, però amb un funcionament bastant diferent dels models de rotació amb eix vertical com poden ser el "Savonius" o el "Darrieus" [3], observables a la figura 1, on es veu clarament l'element que gira i com està amb contacte directe amb el vent.



(a)



(b)

Figura 1. Exemples d'aerogeneradors d'eix vertical: (a) Savonius [8]; (b) Darrieus [9].

Els primers models de l'empresa difereixen del model actual, el primer prototip consistia en dos perfils aerodinàmics asimètrics amb orificis a la part interior dels perfils, intentant un arrossegament a partir de l'acceleració del vent a causa de la posició dels perfils [4]. Aquest funcionament es pot observar a la Figura 2.

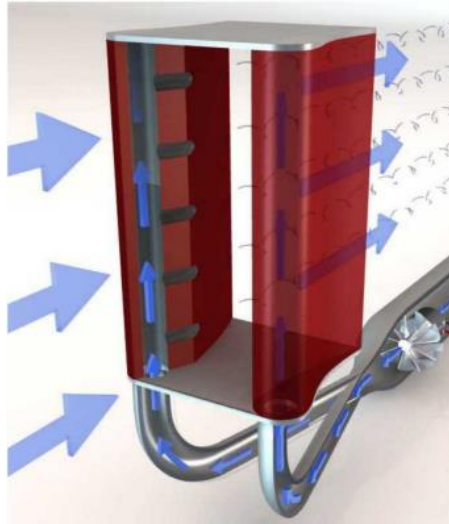


Figura 2. Prototip inicial de l'aerogenerador d'Aeromine. [4].

Posteriorment, el nou model desenvolupat varia la manera de fer arribar el vent a la turbina, utilitzant un perfil aerodinàmic simètric al centre i dos perfils laterals de més. La turbina s'ubica sota el perfil central. La intenció de la col·locació dels perfils és generar una velocitat més elevada entre els perfils laterals i central i mitjançant un orifici central, comunicar l'aire que passa per la turbina amb la part posterior del perfil central. En les imatges de la figura 3 es dedueix l'eliminació dels orificis als perfils laterals, ja que no estan amb contacte amb la turbina, però, no es veu la geometria exacta de la connexió entre la turbina i la zona d'acceleració de l'aire, fet que requerirà un estudi previ de les possibles geometries de sortida. Tanmateix, es pot observar com la turbina està situada a la zona de sota el perfil central.



Figura 3. Model actual d'aerogenerador Aeromine: (a) representació del comportament del flux [2]; (b) imatge d'un model ja fabricat [10].

1.2 Objecte

L'objecte del treball és analitzar la velocitat que es genera a la zona on s'ubicaria la turbina utilitzant diferents angles d'incidència i diferents perfils NACA (National Advisory Committee for Aeronautics).

1.3 Abast i especificacions

1.3.1 Abast

Per a elaborar l'anàlisi es crearan les geometries amb el programari SOLIDWORKS i la simulació del model es realitzarà amb el programa ANSYS amb software FLUENT. El valor objectiu de les simulacions serà la velocitat mitjana en la component vertical de l'aire en la secció on hi hauria la turbina, que no consta a la geometria a causa del poder computacional extra que requeriria i no assumible.

1.3.2 Especificacions

El camí a seguir de l'anàlisi serà buscar la geometria que doni un rendiment estable més alt a la velocitat de 4 m/s. S'escull aquesta velocitat, ja que es tracta d'aproximadament la velocitat mínima que necessiten els aerogeneradors de pales comunament emprats per començar a generar energia [5], tot i que, segons l'empresa, els aerogeneradors estan pensats per a funcionar a partir d'aproximadament 2,5 m/s [2]. Es crearan tres geometries amb tractaments d'aire diferents de la sortida amb uns angles d'incidència semblants als del model original.

En aquesta primera anàlisi es determinarà quina geometria tendeix a ser la més favorable. Un cop escollida aquesta part de la geometria, es faran petits canvis d'angles d'incidència i posició en ambdós perfils laterals per veure quina combinació obté el valor objectiu més gran per a continuar amb les simulacions. Hi ha la possibilitat d'aconseguir una disposició que, en la direcció ideal del flux, sigui la més beneficiosa, però, alhora, sigui més sensible a petits canvis d'incidència del vent, resultant ser una solució menys polivalent. Tot i això, a causa de les limitacions computacionals, s'escull aquest mètode.

Un cop definida la geometria base es procedirà a estudiar la geometria per a diferents valors de velocitat de l'aire. Els casos seran els que es poden observar a la taula 1. Posteriorment, s'estudiarà l'aerogenerador per a diferents perfils NACA.

Cas	Velocitat del vent (m/s)	Angle d'incidència de l'aire
A	4	0°
B	6	0°
C	8	0°

Taula 1. Diferents casos aerodinàmics que s'estudiaran.

No s'analitzarà un vent lateralitzat, ja que requeriria, com a mínim, el doble de poder computacional perquè no es pot aplicar la condició de simetria a l'ANSYS.

Les velocitats escollides són valors comuns que es donen sovint en zones on s'ubiquen aerogeneradors.

2 DESCRIPCIÓ DE LA SOLUCIÓ

2.1 Geometries inicials

Tal com s'ha esmentat, es partiran de geometries base on es farà un primer estudi per escollir la geometria de la part no observable en les imatges. S'escolliran 3 geometries inicials en què les mides generals seran les mateixes.

L'altura total de la geometria és de 3 metres, contant la distància entre la part inferior i el sòl del túnel de vent. El diàmetre de l'orifici on hi hauria col·locada la turbina és de 0,6 metres. Els perfils aerodinàmics utilitzats són:

-S1210 12% per als perfils laterals. L'elecció es basa en el fet que va ser un perfil emprat en les primeres proves de l'aerogenerador [4], que, tot i tenir un tractament de l'aire diferent, la forma és relativament semblant a les imatges disponibles i, com que no es tenia cap altra referència s'ha escollit aquest (Consulteu Annex B.1 S1210 12%). La longitud de la corda és de 0,8 metres, però, per motius de mallat, s'ha fet un tall a la part final amb un posterior arrodoniment, fent que la longitud sigui de 0,720 metres sense contar el petit arrodoniment a la part final de mesures poc significatives (Consulteu Document núm. 2: Plànols). Es pot observar el perfil a la figura 4.

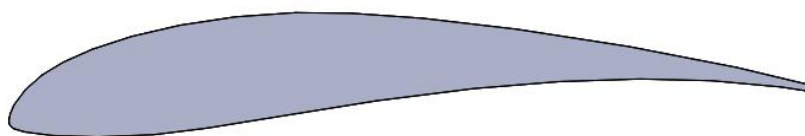


Figura 4. Perfil S1210 12% usat.

-NACA0030 per al perfil central. En aquest cas no hi ha cap referència possible al perfil i s'ha optat per aquest perfil a causa de l'alta àrea frontal i la simetria que presenta (Consulteu Annex B.2 NACA0030). La longitud del perfil és d'1,8 metres. El tall s'ha realitzat a la distància de 0,650 metres. El perfil es pot veure a la figura 5.

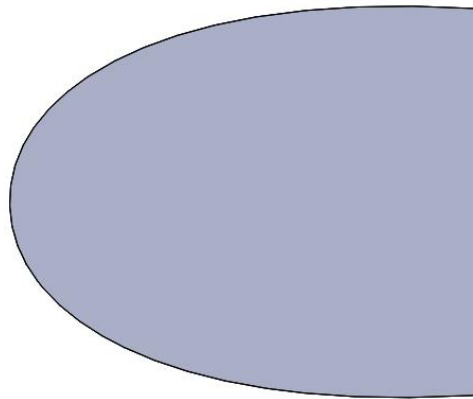


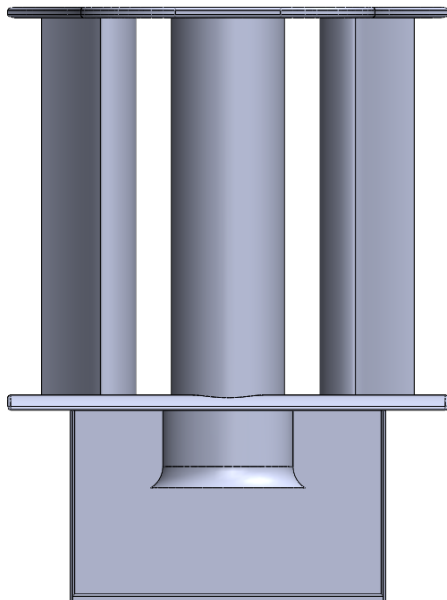
Figura 5. Perfil NACA0030 usat.

S'ha dissenyat també la petita curvatura que hi ha a l'inici de l'aerogenerador, que serveix per redirigir més flux a la zona dels perfils laterals. El perfil central s'adapta a aquesta petita curvatura.

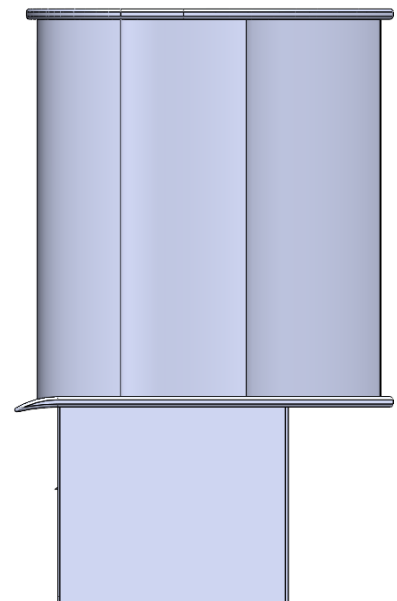
Els perfils laterals tenen una altura d'1,8 metres i, el central, en la major part també. En la zona de la curvatura aquesta distància augmenta lleugerament (Consulteu Document núm. 2: Plànols).

S'ha decidit prescindir dels suports de l'estructura per simplificar la geometria, ja que és una part poc important per a l'anàlisi aerodinàmica. A més, s'ha aplicat un arrodoniment a les arestes més conflictives per millorar tant el comportament del flux com la discretització del domini.

La geometria descrita es pot observar a la figura 6.



(a)



(b)

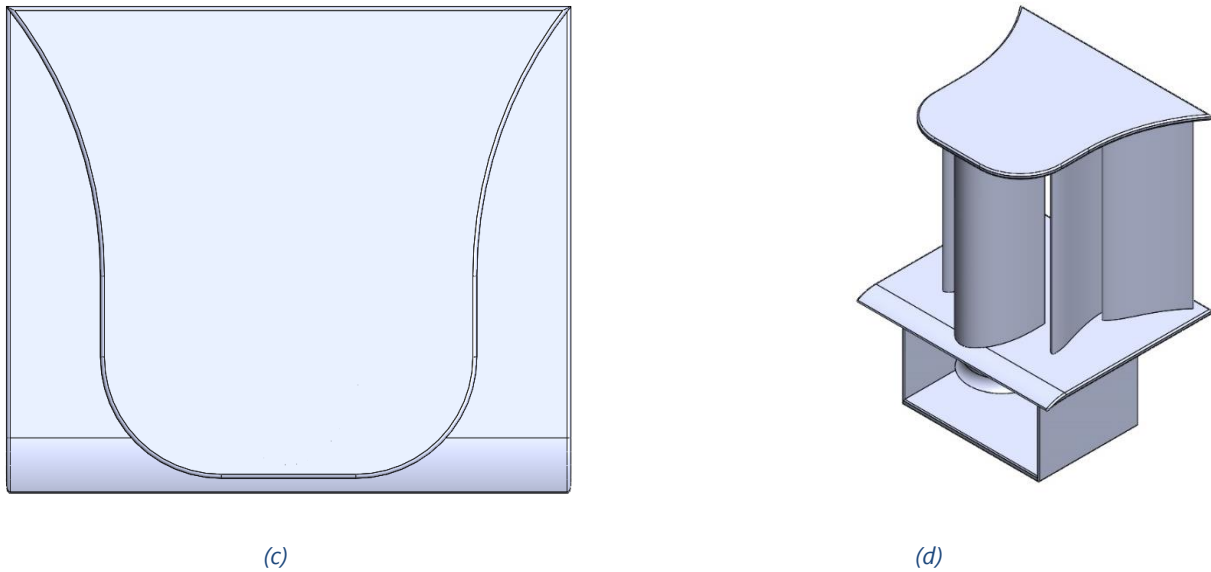


Figura 6. Vistes del model generat amb SOLIDWORKS: (a) vista frontal; (b) vista lateral; (c) vista superior i (d) vista isomètrica.

A la part posterior, on hi ha la connexió entre flux que passa per la turbina i el flux accelerat, s'ha optat per un primer prototip on el forat inicial a la part inferior és constant en tot el perfil, corresponent a la figura 7.

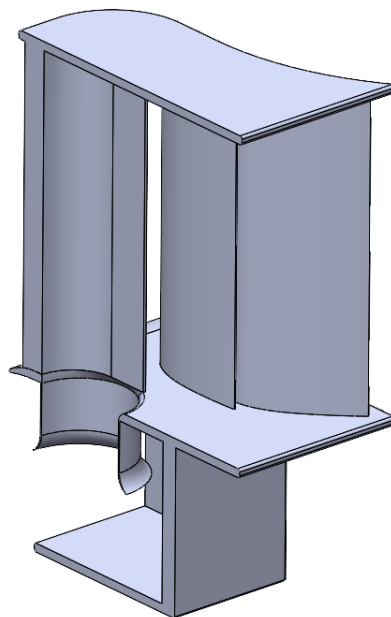


Figura 7. Geometria per al prototip 1.

En el segon prototip, la geometria redirigeix lleugerament l'aire en la mateixa direcció del vent com s'observa a la figura 8.

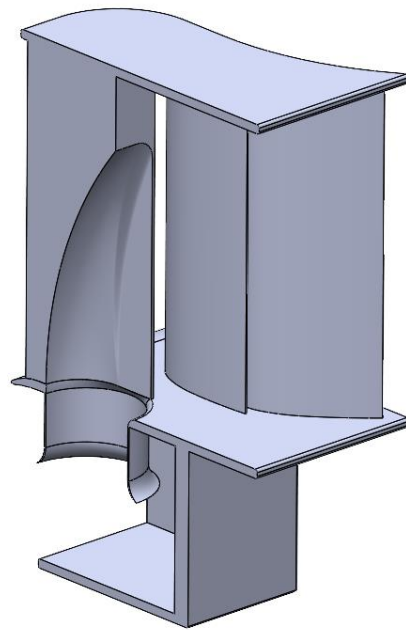


Figura 8. Geometria per al prototip 2.

Finalment, en el tercer s'ha intentat simular els forats dels primers prototips d'Aeromine, però amb els orificis a l'aleró central, la geometria corresponent és la de la figura 9.

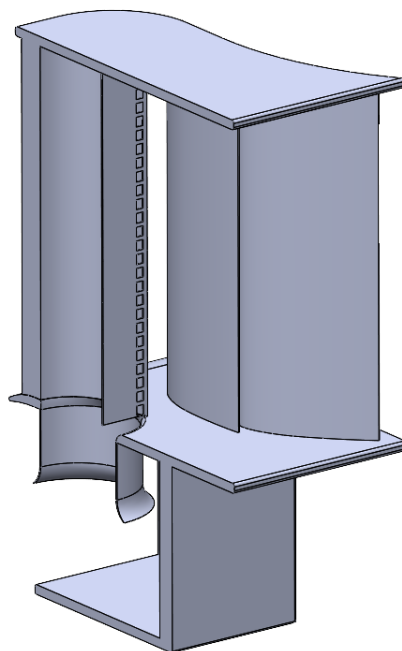


Figura 9. Geometria per al prototip 3.

En els tres casos, l'orifici de la base que connecta amb el perfil central, que tampoc es pot observar en el model original, és el mateix. S'ha optat per donar una petita curvatura per facilitar el corrent d'aire.

Un cop escollit la sortida d'aire més beneficiosa es procedirà a modificar lleugerament la posició dels perfils. S'utilitzarà la nomenclatura que s'observa a la figura 10.

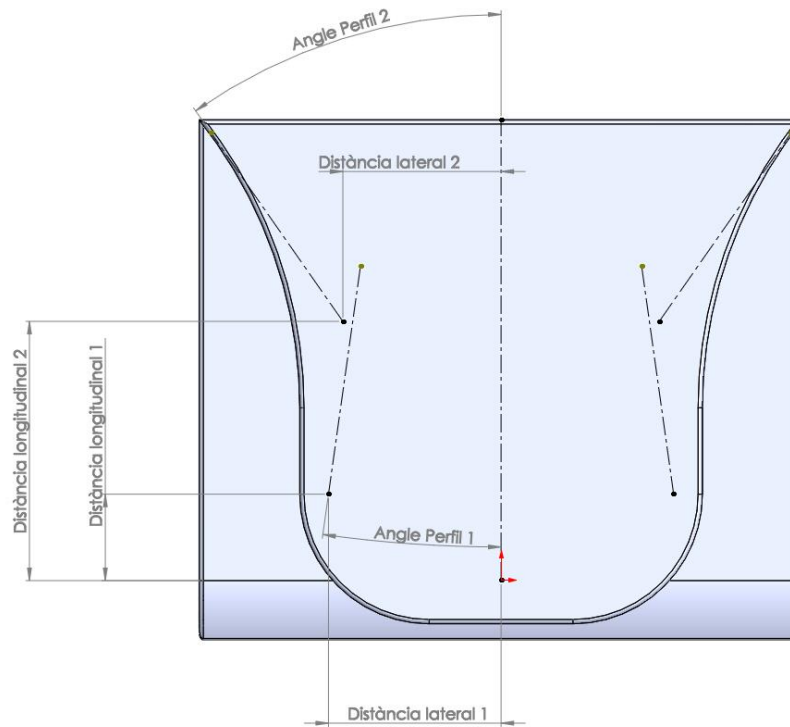


Figura 10. Nomenclatura de les posicions dels perfils.

Les posicions que s'estudiaran inicialment són les de la taula 2:

Configuració	Distància lateral 1 (mm)	Distància longitudinal 1 (mm)	Distància lateral 2 (mm)	Distància longitudinal 2 (mm)	Angle perfil 1 (mm)	Angle perfil 2 (mm)
A (inicial)	600	300	550	900	8	35
B	650	300	600	900	8	35
C	550	300	500	900	8	35
D	600	350	550	950	8	35
E	600	250	550	850	8	35
F	600	300	550	900	6	40
G	600	300	550	900	10	30

Taula 2. Diferents posicions en les quals s'estudiarà l'aerogenerador.

Es pot observar com per a cada mesura o angle hi ha 3 opcions.

2.2 Modificació de perfils

Posteriorment, s'ha utilitzat dos perfils alternatius pels perfils laterals, concretament el perfil NACA9508 i el perfil NACA0024 (Consulteu Annex B: Informació sobre els perfils emprats). S'ha optat per perfils amb característiques diferents de l'inicial per poder entendre més bé la geometria ideal.

Mitjançant un generador de perfils [6] s'ha generat el primer perfil. En aquest, es buscava un gruix menor al del primer perfil per intentar reduir l'àrea frontal. Per variar més la geometria respecte al S1210 12%, s'ha decidit situar la curvatura màxima al 50% de la corda, generant així un perfil més continu. Amb aquesta valoració s'ha escollit el perfil NACA9508. Es pot veure la comparació a la figura 11.

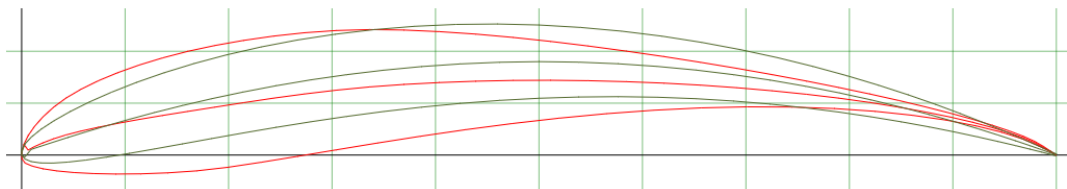


Figura 11. Comparació del perfil S1210 12% (vermell) amb el perfil NACA9508 (daurat).

Es poden apreciar les característiques mencionades anteriorment. S'estudiarà amb la mateixa configuració òptima que el primer perfil.

Per al tercer perfil s'ha optat per fer una recerca a la base de dades de la mateixa pàgina [6], on hi ha informació d'alguns perfils NACA amb les gràfiques corresponents a la variació del coeficient de "lift". L'objectiu era trobar un perfil on el coeficient fos dels més alts disponibles i que aquest no tingués un mal rendiment per angles d'incidència superiors a 15°. El perfil seleccionat que reunia millor les característiques és el perfil simètric NACA0024, perfil visiblement diferent dels dos anteriors com es pot veure a la comparativa de la figura 12.

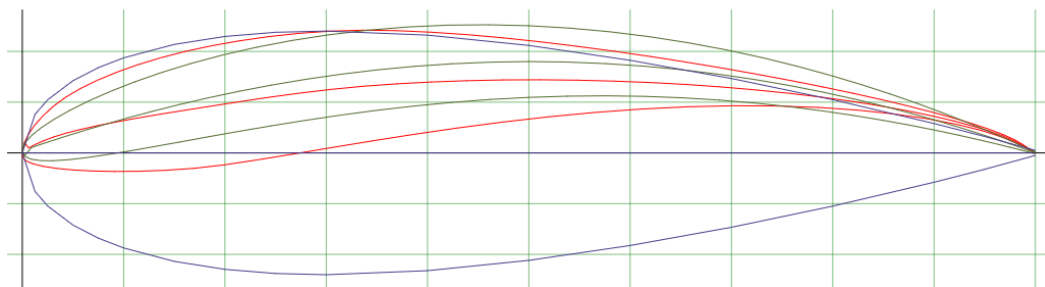


Figura 12. Comparació entre el perfil S1210 12% (vermell), el perfil NACA9508 (daurat) i el perfil NACA0024 (blau).

Donada la geometria del perfil no s'ha pogut utilitzar la configuració més favorable pels perfils anteriors, llavors s'han modificat les distàncies per a intentar replicar aproximadament les distàncies entre perfils dels casos previs. A més a més, com s'observarà posteriorment, les variacions de posició no són molt influents en el valor objectiu i , per tant, no es farà un estudi de la comparativa per a diferents posicions. Aquesta serà la configuració H i llavors, a l'haver-hi valors del coeficient de "lift" fins a angles de 20° es farà una variació en l'angle posterior, on l'angle d'incidència del segon perfil respecte del primer serà de 20° . Es referirà a aquesta nova disposició com a configuració I. Les dues noves configuracions es poden veure a la taula 3.

	<i>Distància lateral 1 (mm)</i>	<i>Distància longitudinal 1 (mm)</i>	<i>Distància lateral 2 (mm)</i>	<i>Distància longitudinal 2 (mm)</i>	<i>Angle perfil 1 (mm)</i>	<i>Angle perfil 2 (mm)</i>
NACA0024 Configuració H	550	350	600	950	8	35
NACA0024 Configuració I	550	350	600	950	8	12

Taula 3. Noves posicions per al perfil NACA0024.

2.3 Túnel de vent

Per a realitzar la simulació es crearà un túnel de vent virtual de forma paral·lelepípede rectangular. Dins aquest túnel hi haurà la geometria a estudiar. Per a poder fer un estudi precís, el túnel ha de tenir dimensions considerablement superiors a la geometria a analitzar per tal d'obtenir resultats fiables. La geometria del túnel en els casos on s'ha aplicat la simetria es pot observar a la figura 13, on s'aprecia la divisió de la geometria.

Estudi aerodinàmic d'un aerogenerador sense aspes

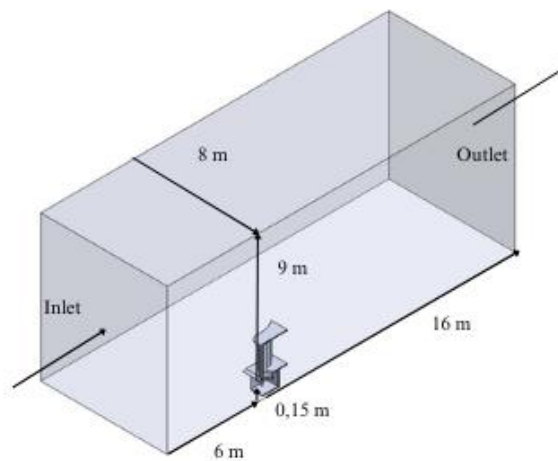


Figura 13. Mesures del túnel de vent virtual.

Es pot observar com hi ha una distància de 6 metres abans de la geometria a estudiar i 16 després, fent una longitud total de 22 metres. L'amplada és de 8 metres. Per a la part inferior, des de la base de l'aerogenerador fins a la base del túnel hi ha 0,15 metres, distància corresponent a l'altura aproximada que hi hauria entre els suports de l'estructura i el terra. L'altura a partir de la base de la geometria és de 9 metres, fent així una alçada total de 9,15 metres.

La geometria està ubicada més a prop de l'entrada (referenciada com "inlet") que de la sortida "outlet", aquesta disposició es deu a la importància de tractar el comportament del flux un cop ha "travessat" la geometria.

3 DISCUSSIÓ DE RESULTATS

3.1 Resultats i comparativa dels tres primers prototips

Els resultats obtinguts durant l'anàlisi transitòria dels primers 3 prototips a la velocitat de 4 m/s són els que es poden observar a la figura 14.

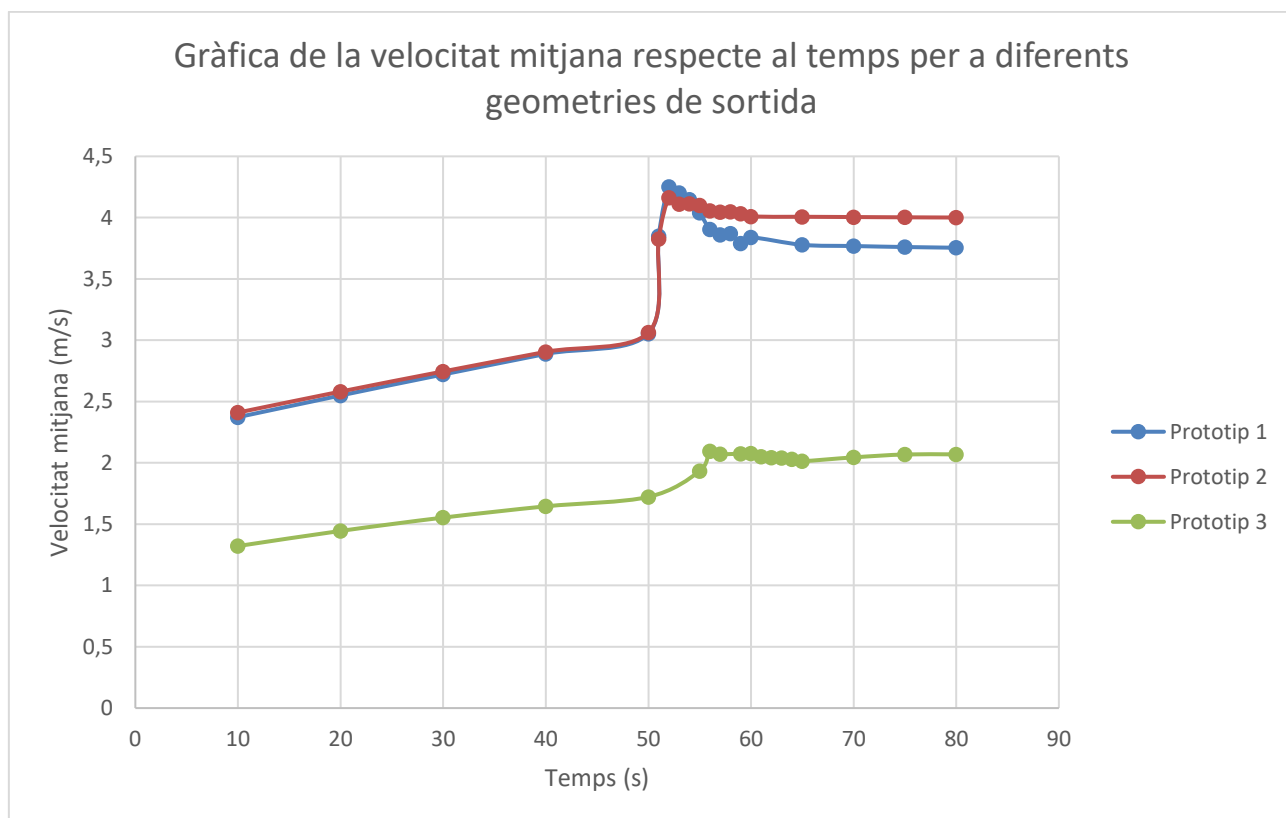


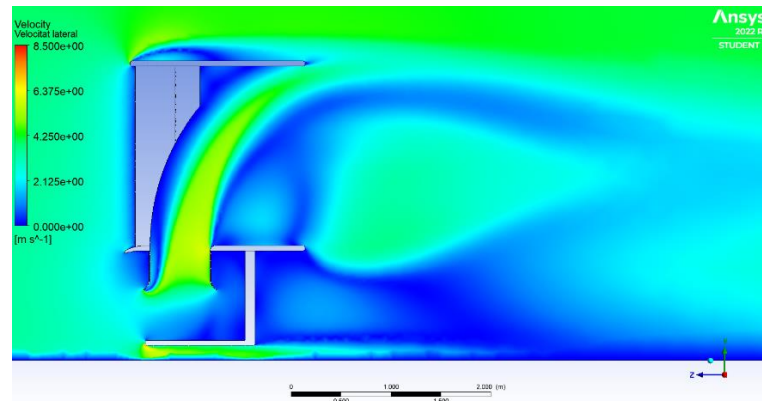
Figura 14. Gràfica de la velocitat mitjana respecte al temps per als tres prototips inicials.

Es pot observar com l'evolució de la velocitat mitjana no és lineal, fins als 50 segons de simulació la velocitat sí que incrementa linealment, però seguidament experimenta un brusc canvi de velocitat per llavors estabilitzar-se.

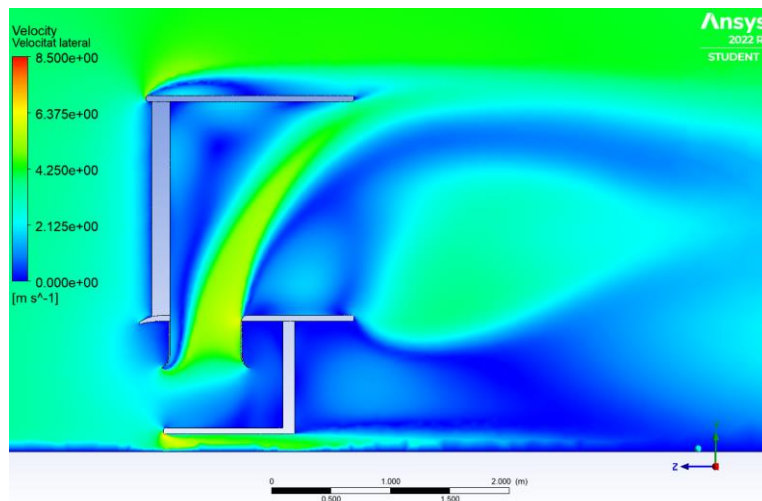
Es pot apreciar com els dos primers prototips tenen un comportament molt semblant, arribant a superar el valor de 4 m/s, en canvi, el tercer no supera el valor de 2,5 m/s per a 80 segons de simulació. Si s'analitza amb més detall el comportament en els dos primers prototips es pot veure una velocitat poc més gran per al prototip 1, tot i que amb el pas del temps el prototip 2 manté una velocitat mitjana més elevada, que és al voltant de 4 m/s.

Estudi aerodinàmic d'un aerogenerador sense aspes

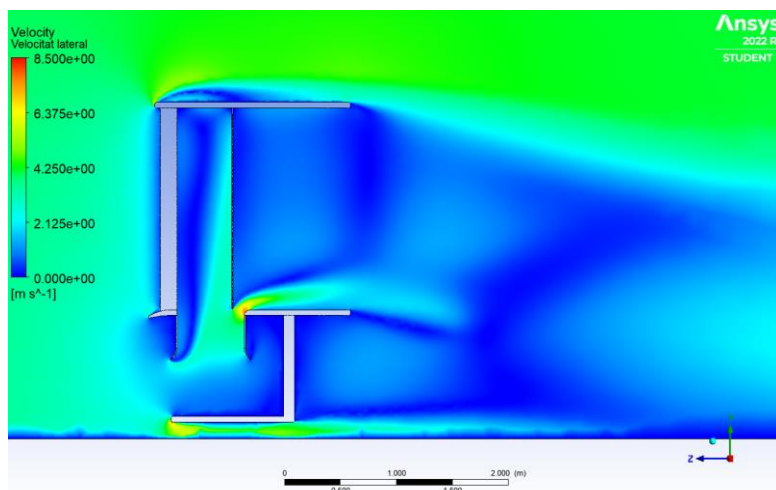
Per a comparar el comportament del vent, es representa a la figura 15 la distribució de velocitats al pla de simetria a 80 segons de simulació pels tres casos.



(a)



(b)



(c)

Figura 15. Distribució de velocitats al pla de simetria per als 3 prototips inicials a l'instant de 80 segons de simulació: (a) prototip 1, (b) prototip 2 i (c) prototip 3.

Es pot apreciar com en els dos primers prototips la velocitat és molt semblant, mentre que, el tercer té un comportament de flux totalment diferent. En el prototip 1 i 2 hi ha un llarg corrent de velocitat alta en tota la part de sortida, mentre que, en el tercer prototip només hi ha velocitat alta a la part inferior de la sortida.

La distribució des de la vista superior a una alçada de 2 metres, on el comportament del flux amb els perfils es pot apreciar clarament, s'observa a les imatges de la figura 16.

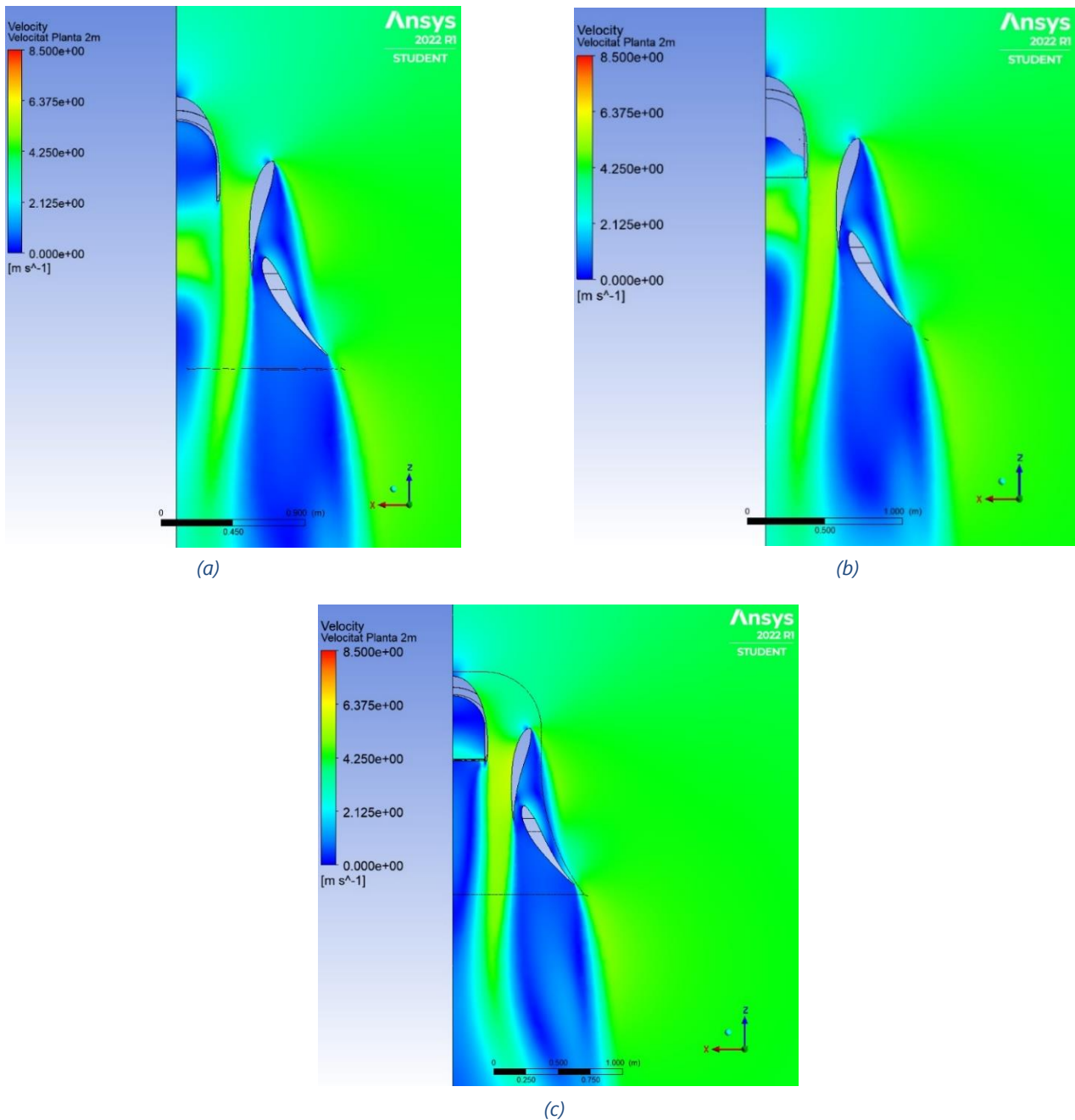


Figura 16. Distribució de velocitats en el pla paral·lel a la planta amb una alçada de 2 metres a per l'instant de 80 s de simulació: (a) prototip 1, (b) prototip 2 i (c) prototip 3.

Estudi aerodinàmic d'un aerogenerador sense aspes

Es pot observar com en els tres casos el flux s'accelera de forma semblant entre el perfil central i lateral, però, en els dos primers prototips es genera el flux d'alta velocitat a la sortida del perfil central.

Una diferència que es pot observar entre el prototip 1 i 2 és la diferent posició del flux accelerat central. En el primer prototip el corrent està ubicat en una posició més posterior que en el segon prototip, això ens indica que el flux segueix lleugerament la forma de la superfície, provocant que el corrent sigui lleugerament més vertical, augmentant així la velocitat vertical on hi hauria la turbina.

Si analitzem la distribució de velocitats al pla on hi hauria la turbina, els resultats són els de la figura 17.

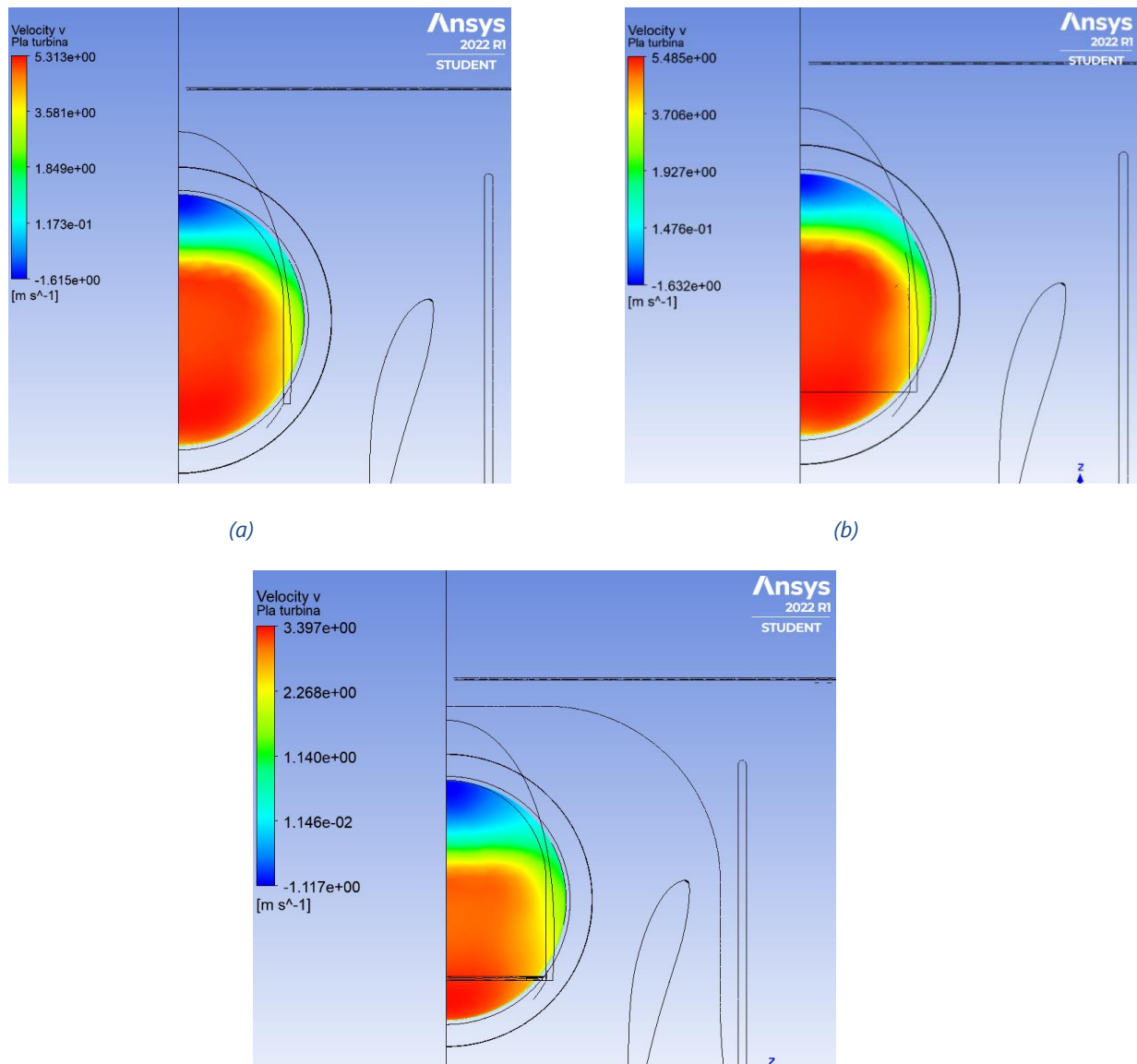


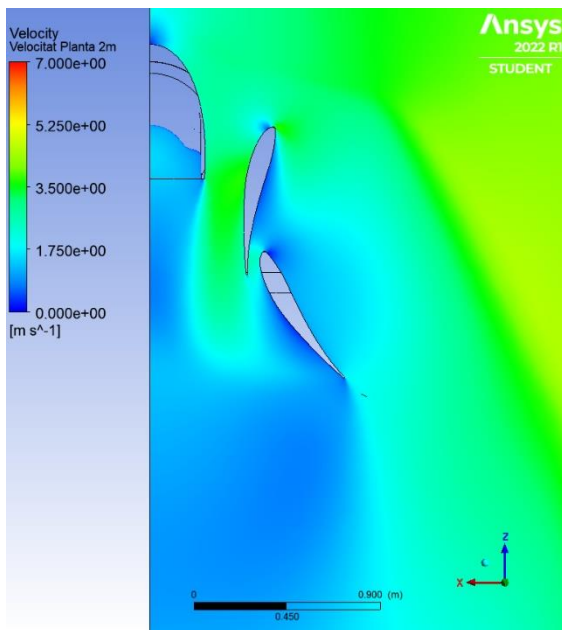
Figura 17. Distribució de velocitats al pla on s'estudia la velocitat mitjana per a l'instant de 80 s de simulació: (a) prototip 1, (b) prototip 2 i (c) prototip 3.

Es pot veure com en els tres casos la distribució és molt semblant. La zona posterior té una velocitat superior molt superior a la velocitat en l'inici del pla, que és pràcticament nul·la. Aquesta distribució no és l'òptima per una turbina, ja que no és la velocitat constant en tot el pla.

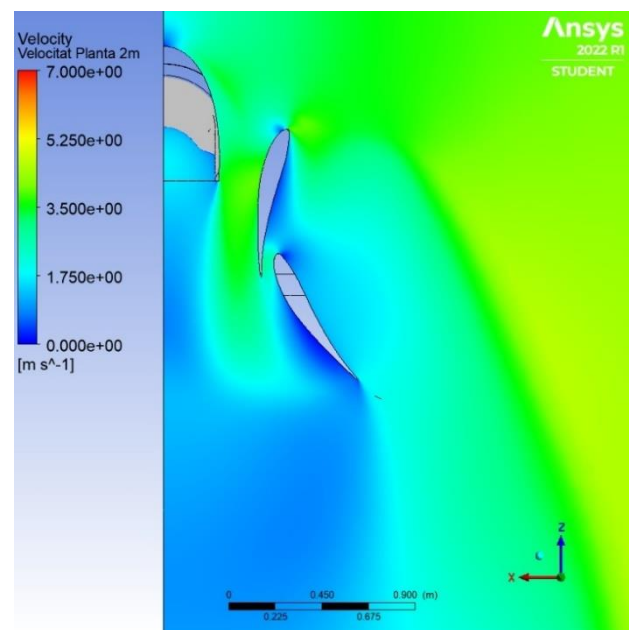
Amb les dades recollides es pot concloure que el prototip 2, on la geometria a la part posterior redirigeix el flux, és la més beneficiosa per a la velocitat de 4 m/s amb el pas del temps i, per tant, serà la base per als pròxims estudis.

3.2 Anàlisi de l'evolució del flux en el prototip 2

Per entendre el que passa durant l'augment notable de velocitat al voltant de 50 segons es representa la velocitat en el pla paral·lel a la planta amb 2 metres d'alçada per a diferents instants a la figura 18.

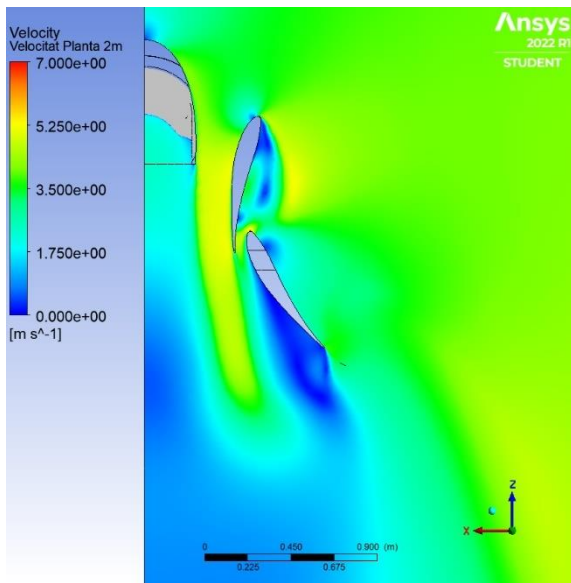


(a)

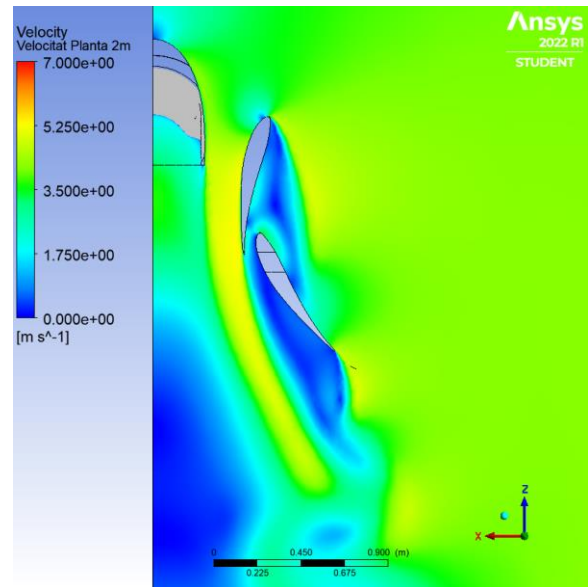


(b)

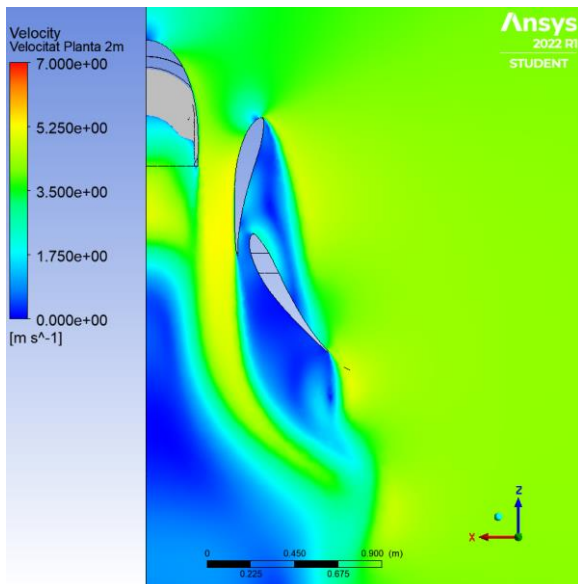
Estudi aerodinàmic d'un aerogenerador sense aspes



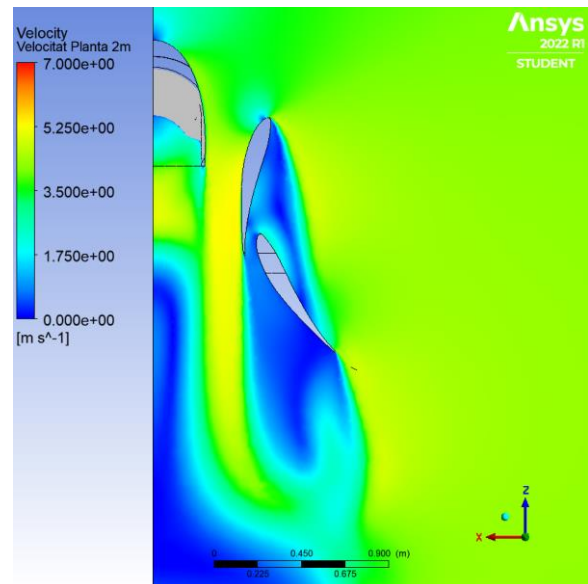
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 18. Distribució de velocitats per a diferents instants en el pla paral·lel a la planta amb una alçada de 2 metres amb la configuració inicial: (a) 40 s, (b) 50 s, (c) 51 s, (d) 52 s, (e) 53 s, (f) 54 s.

Es pot observar com a la figura 18.c a la vora d'atac del segon perfil es produeix un lleuger increment de velocitat que fa augmentar la llargada de l'estela d'alta velocitat per a les figures 18.d, 18.e i 18.f. A l'allargar-se l'estela, aquesta comença a generar una velocitat superior a la part posterior de l'aleró central, fet que comporta un augment de la velocitat mitjana a la secció. Es pot observar com a mesura que la velocitat mitjana és més alta hi ha una diferència de velocitat més gran entre el pla superior i inferior del primer perfil. Un cop establitzada la velocitat mitjana a la zona

de la turbina, el segon perfil genera una estela de velocitat amb velocitat més baixa que en instants previs.

3.3 Resultats per a diferents posicions dels perfils en el prototip 2

Un cop escollit el segon prototip s'han aplicat les diferents configuracions de posició de la taula 2. A causa dels canvi de posicions s'ha hagut de modificar lleugerament la part central del prototip 2 on la part superior consta de més superfície (Consulteu Document núm. 2: Plànols). Per a poder veure si hi havia un impacte negatiu en els resultats s'ha comparat els valors objectius obtinguts amb el prototip 2 inicial i amb la versió 2 amb la mateixa disposició de perfils (configuració inicial A). S'ha pogut observar com els canvis són mínims i, per tant, no afecta els càlculs posteriors (Consulteu Annex C: Comparativa dels resultats obtinguts per a la modificació de la zona superior de la part central).

Els resultats aconseguits per a les diferents configuracions en la simulació transitòria a 4 m/s es poden observar a la figura 19.

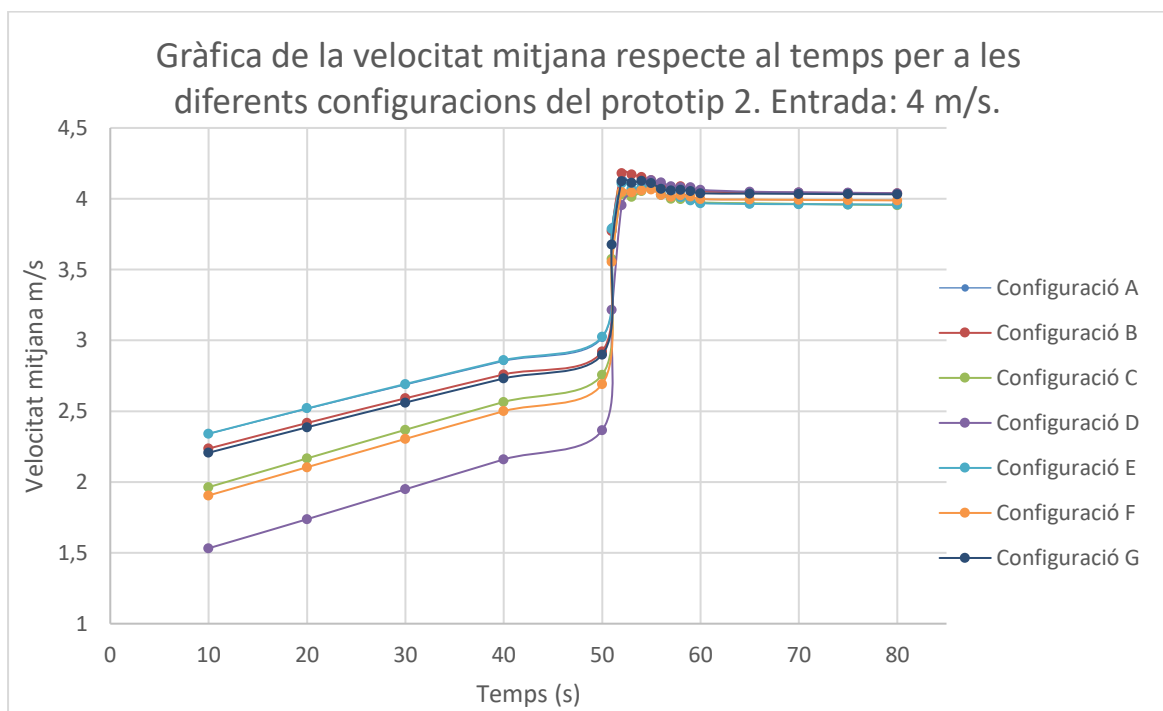


Figura 19. Gràfica de la velocitat mitjana respecte al temps per a les configuracions A,B,C,D,E,F i G en el prototip 2 pel perfil S1210 12% per una velocitat d'entrada de 4 m/s.

Es pot veure com les variacions són mínimes, i, per tant, petits canvis no afecten la velocitat considerablement.

Per quantificar les diferències de velocitat entre les configuracions a partir de 50 segons, poc apreciables a la figura 19, es representen els valors a la taula 4.

	Velocitat mitjana a les configuracions (m/s)						
Temps(s)	A	B	C	D	E	F	G
50	3,0173	2,9208	2,7574	2,3652	3,0256	2,6915	2,8995
51	3,8032	3,7710	3,5751	3,2155	3,7878	3,5543	3,6768
52	4,1458	4,1820	4,0326	3,9557	4,1089	4,0470	4,1240
53	4,1022	4,1717	4,0127	4,0473	4,0699	4,0448	4,1125
54	4,1076	4,1534	4,0536	4,0731	4,0799	4,0580	4,1274
55	4,1109	4,1309	4,0861	4,1306	4,0739	4,0663	4,1105
56	4,0667	4,0918	4,0304	4,1151	4,0305	4,0268	4,0702
57	4,0443	4,0810	3,9994	4,0880	4,0166	4,0127	4,0587
58	4,0383	4,0878	3,9984	4,0817	4,0107	4,0241	4,0623
59	4,0194	4,0756	3,9924	4,0817	3,9896	4,0161	4,0536
60	3,9970	4,0532	3,9740	4,0630	3,9694	3,9973	4,0384
65	3,9946	4,0447	3,9688	4,0500	3,9634	3,9946	4,0365
70	3,9923	4,0425	3,9637	4,0462	3,9619	3,9923	4,0346
75	3,9902	4,0404	3,9592	4,0426	3,9604	3,9902	4,0329
80	3,9885	4,0386	3,9558	4,0393	3,9591	3,9885	4,0314

Taula 4. Velocitats mitjanes obtingudes per a les diferents configuracions del prototip 2 amb el perfil S1210 12%.

Les tres configuracions òptimes són la configuració B, D i G, establintant-se a valors pràcticament idèntics, sent, però, la configuració D la que aconseguix millor resultats. La velocitat mitjana és molt semblant a la velocitat d'entrada al túnel de vent, per tant, no hi ha un augment de velocitat.

Per a fer més simulacions s'ha decidit escollir la configuració D, tot i que es pot observar com realment totes les configuracions es podrien utilitzar en l'obtenir valors molt semblants que no difereixen en més de 0,1 m/s.

3.4 Estudi del prototip 2 per a diferents velocitats

Per a tenir una visió més general del funcionament de l'aerogenerador s'han fet simulacions a 6 i 8 m/s a partir de la configuració D del prototip 2.

3.4.1 Velocitat d'entrada de 6 m/s

L'evolució de la velocitat per a 6 m/s és la que es pot observar a la figura 20.

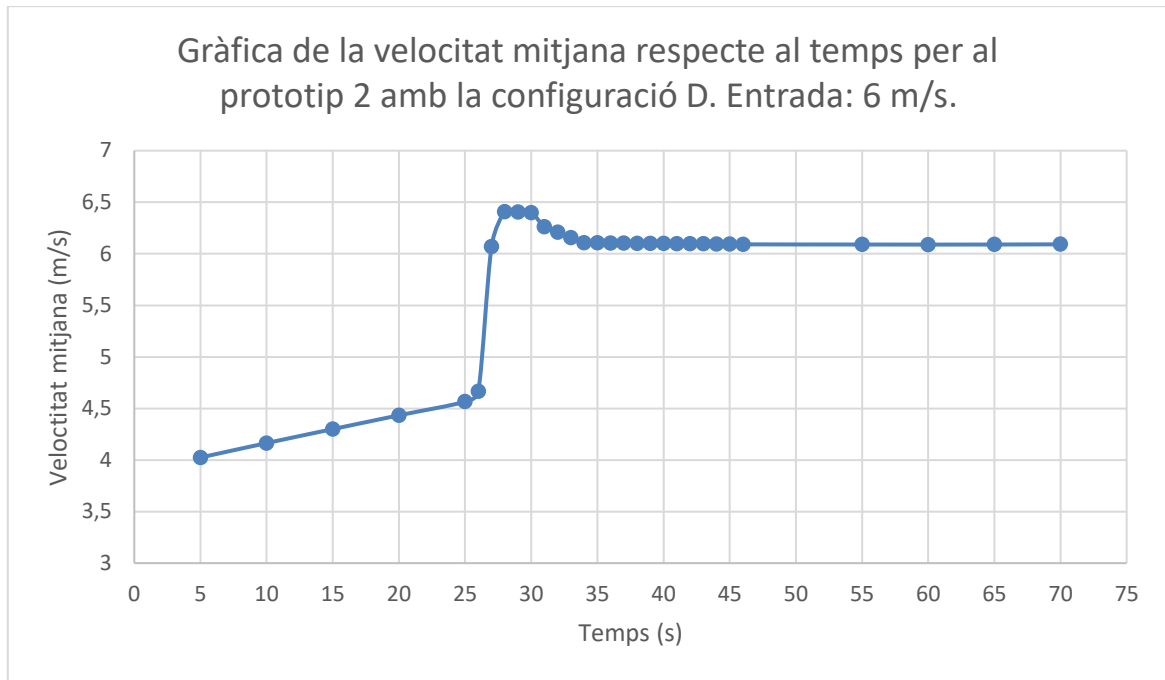
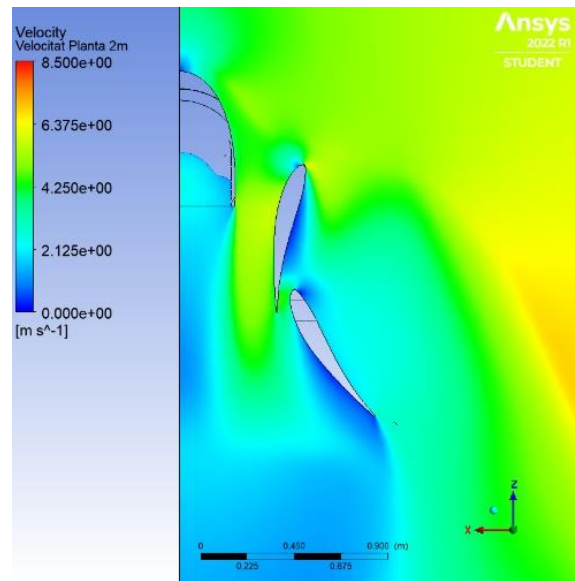
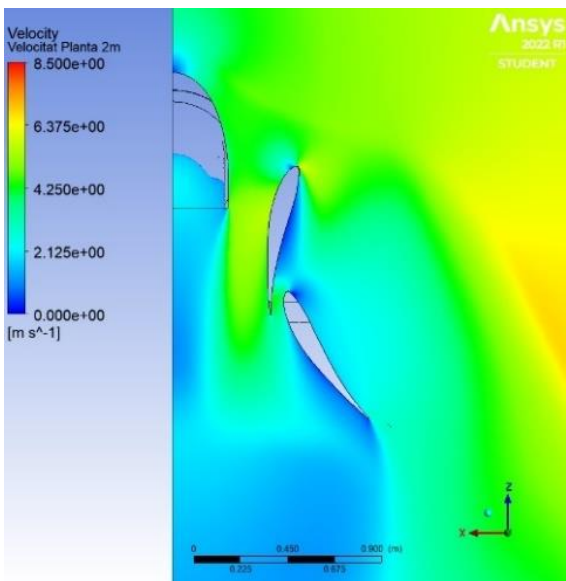


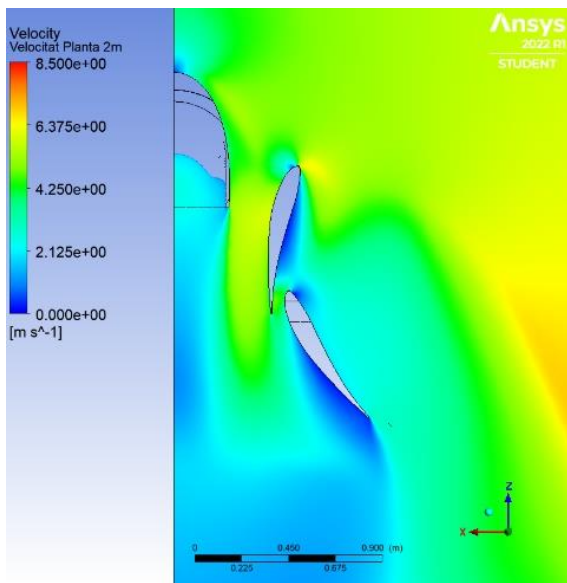
Figura 20. Gràfica de la velocitat mitjana respecte al temps per al prototip 2 amb la configuració D amb el perfil S1210 12% amb una velocitat d'entrada de 6 m/s.

Es pot observar com l'evolució del flux segueix la mateixa tendència que en el cas de 4 m/s. Com a diferència, el salt notable de velocitat no es produeix cap als 50 segons sinó al voltant dels 26 segons. La velocitat s'estabilitza lleugerament per sobre dels 6 m/s d'entrada tot i que la millora és molt petita.

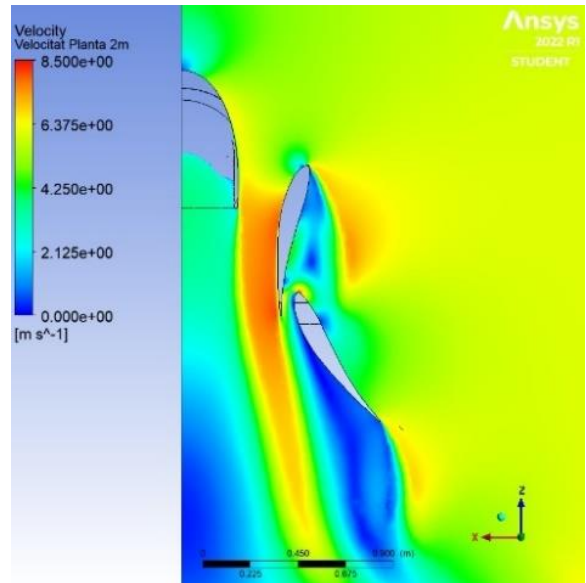
Les velocitats en el pla paral·lel a la planta en els instants de 20,25,26,27 i 28 segons es poden veure a la figura 21.



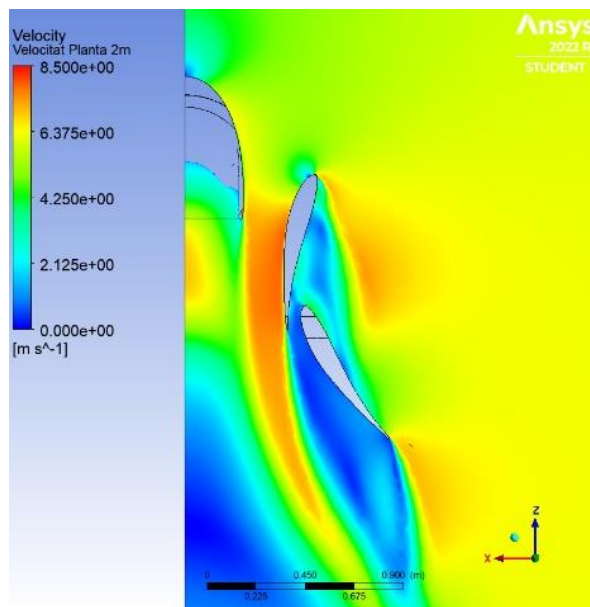
Estudi aerodinàmic d'un aerogenerador sense aspes



(c)



(d)



(e)

Figura 21. Distribució de velocitats al pla paral·lel a la planta amb una altura de 2 metres per el prototip 2 amb la configuració D amb una velocitat d'entrada de 6 m/s: (a) 20 s, (b) 25 s, (c) 26 s, (d) 27 s i (e) 28 s.

Es pot apreciar com a les figures 21.a, 21.b i 21.c la distribució és molt semblant, i, a partir de 27 segons, la velocitat del flux entre el perfil central i lateral augmenta significativament, generant una distribució d'alta velocitat considerablement més gran.

3.4.2 Velocitat d'entrada de 8 m/s

L'evolució de la velocitat per a 8 m/s a l'entrada es pot observar a la figura 22.

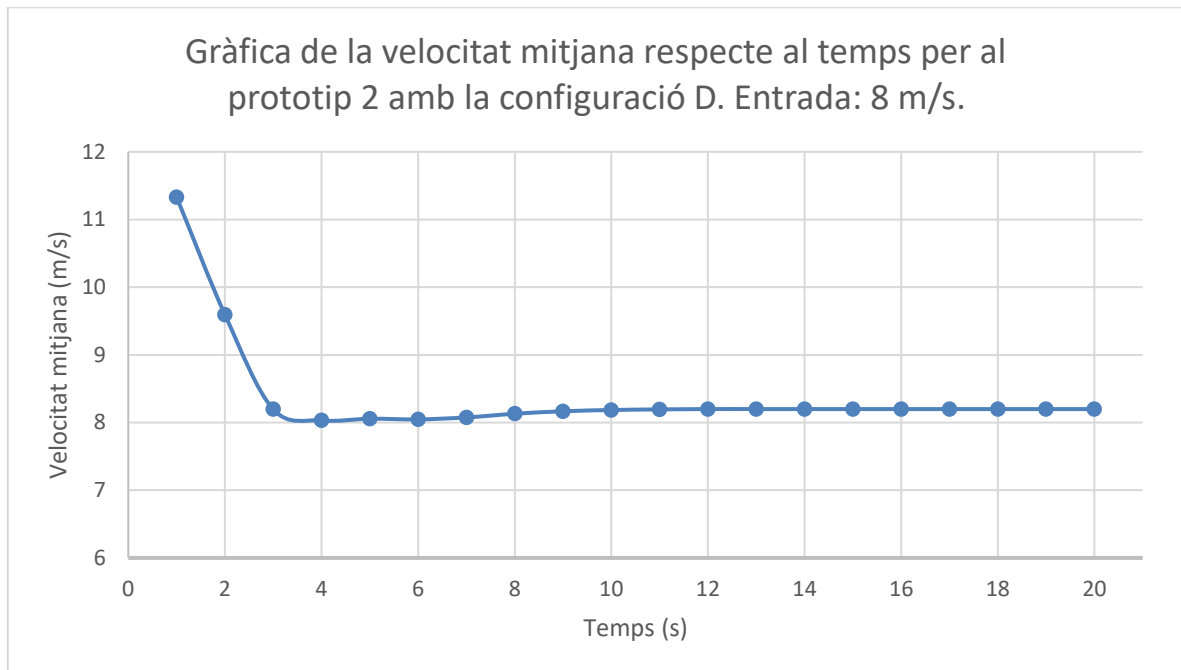


Figura 22. Gràfica de la velocitat mitjana respecte al temps per al prototip 2 amb la configuració D amb el perfil S1210 12% amb una velocitat d'entrada de 8 m/s.

Es pot apreciar com la gràfica té una tendència diferent dels anteriors dos casos. En 1 segon de simulació, on el flux ja ha entrat en contacte amb la geometria a l'haver-hi només 6 metres entre l'entrada del túnel del vent i l'aerogenerador, la velocitat ja supera la velocitat d'entrada. Posteriorment, la velocitat va disminuint i a partir d'aproximadament 3 segons de simulació la velocitat es manté lleugerament per sobre els 8 m/s, sent l'augment poc significatiu.

A la figura 23 es representa la velocitat en un pla paral·lel a la planta a una altura de 2 metres en els instants d'1,2 i 3 segons, que són els instants on el valor objectiu experimenta canvis més significatius.

Estudi aerodinàmic d'un aerogenerador sense aspes

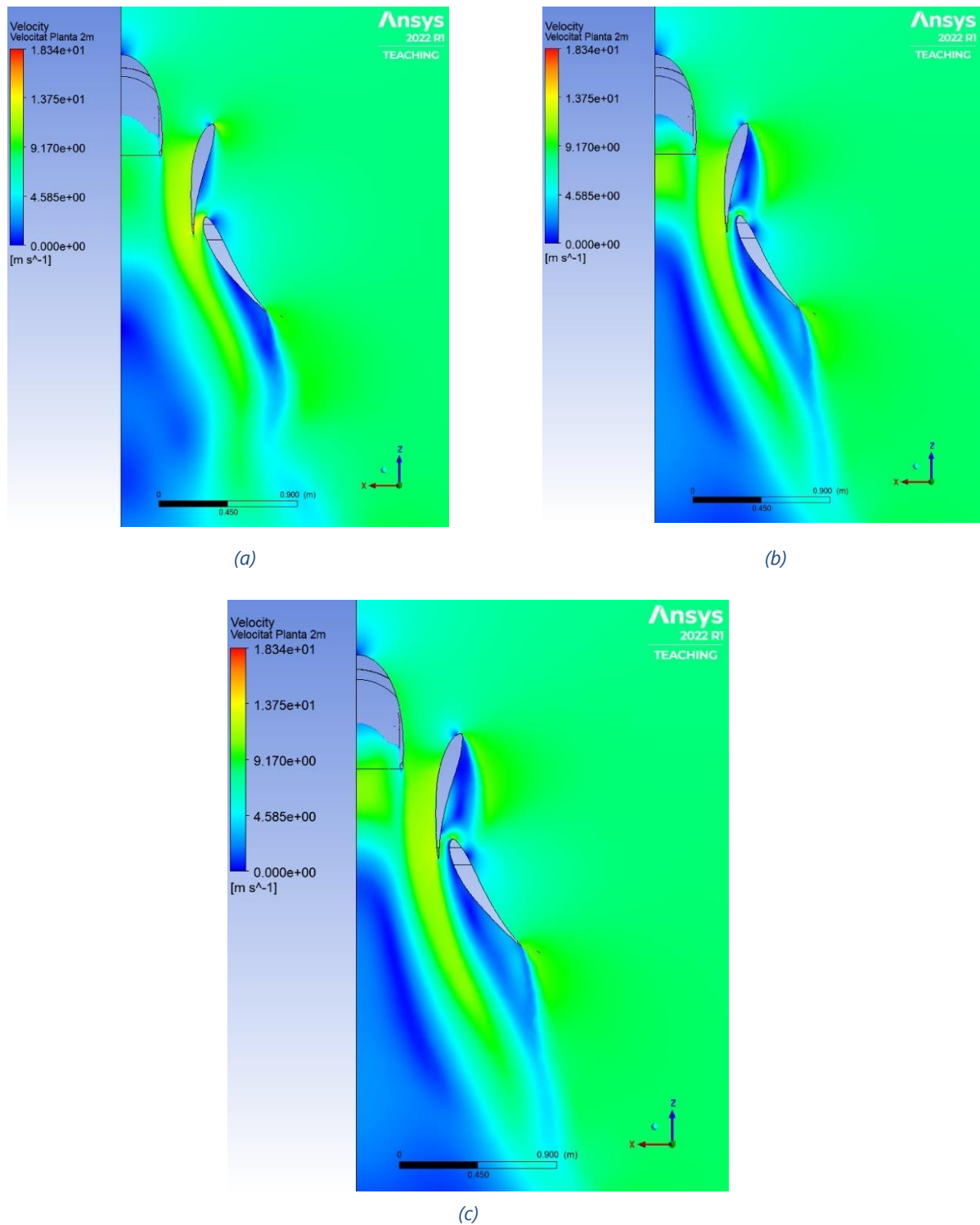


Figura 23. Distribució de velocitats al pla paral·lel a la planta amb una altura de 2 metres per el prototip 2 amb la configuració D amb el perfil S1210 12% amb una velocitat d'entrada de 8 m/s: (a) 1 s, (b) 2 s i (c) 3 s.

Es pot observar com en el primer segon (figura 23.a) hi ha una velocitat superior entre els dos perfils laterals, tot i això, la distribució del flux al voltant dels perfils laterals és molt semblant. A part, si s'observa una diferència és a la distribució de velocitats a la part posterior del perfil central, on a

la figura 21.a la velocitat màxima és la inferior dels 3 instants, però, la superfície amb el flux accelerat és la major.

Per entendre millor el comportament del flux es representa a la figura 24 la velocitat al pla on hi ha aplicada la simetria de la geometria pels mateixos instants de temps.

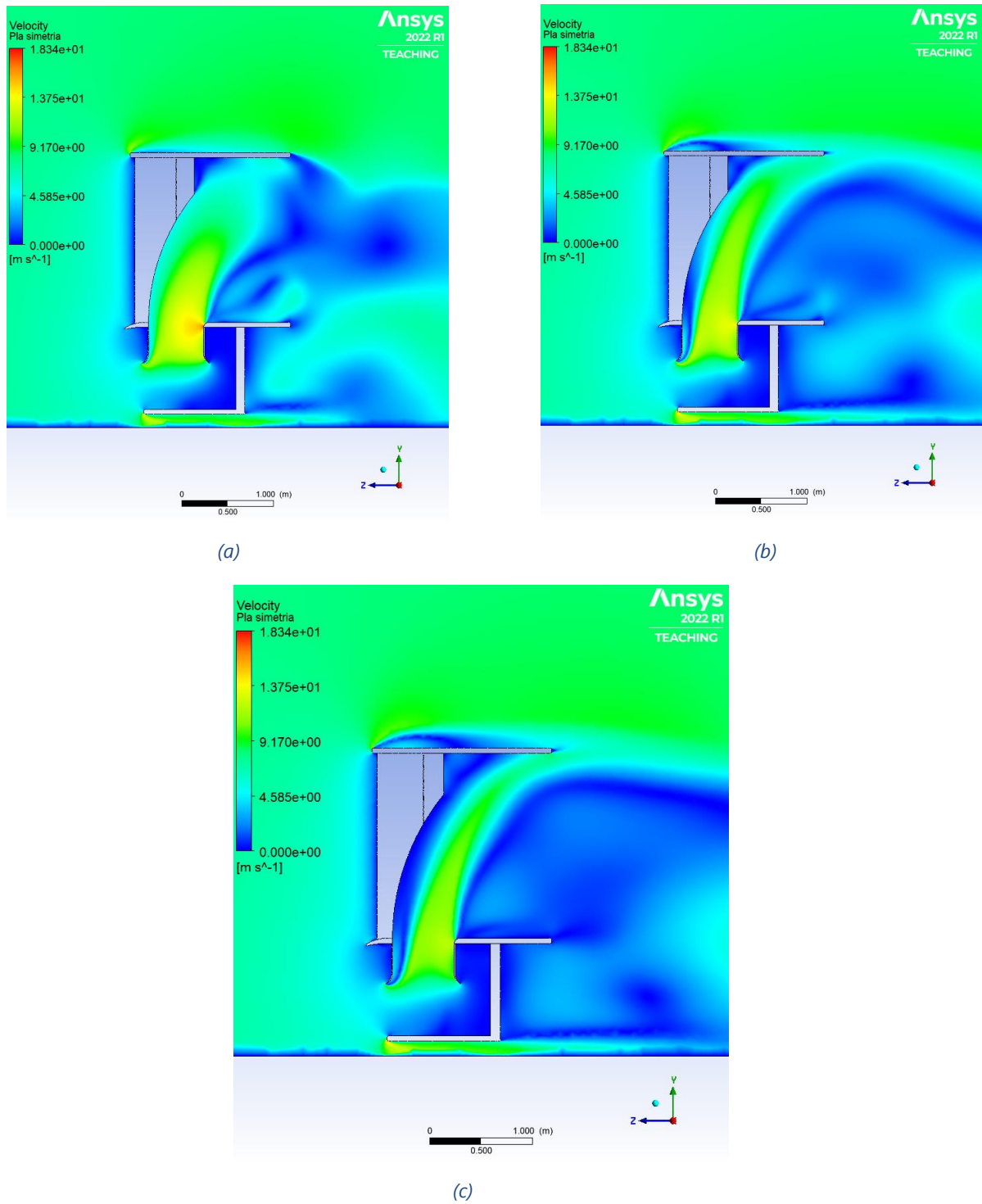


Figura 24. Distribució de velocitats al pla de simetria per el prototip 2 amb la configuració D amb el perfil S1210 12% amb una velocitat d'entrada de 8 m/s: (a) 1 s, (b) 2 s i (c) 3 s.

S'observa clarament com el flux de sortida té una secció molt àmplia en l'instant d'1 segon, mentre que, pels següents instants, la secció es va reduint. Això explica el motiu de l'elevada velocitat, que és que, en tenir la velocitat una secció de velocitat accelerada més gran, la mitjana és superior tot i que la velocitat poc no sigui la més elevada.

Una possible explicació a aquest fenomen és que la velocitat d'entrada al llarg del temps arrossega horitzontalment de forma excessiva el flux a la sortida de la part central, fent així que a la secció on hi hauria la turbina no hi hagi una distribució òptima de velocitats.

3.5 Resultats amb el perfil NACA9508

Tal com s'ha esmentat prèviament, s'ha decidit elaborar les mateixes anàlisis modificant el perfil S1210 12% pel perfil NACA9508.

La posició dels perfils és la mateixa que en els casos anteriors, és a dir, la configuració D.

3.5.1 Velocitat d'entrada de 4 m/s

Per a 4 m/s, l'evolució de la velocitat mitjana és la que s'observa la figura 25.

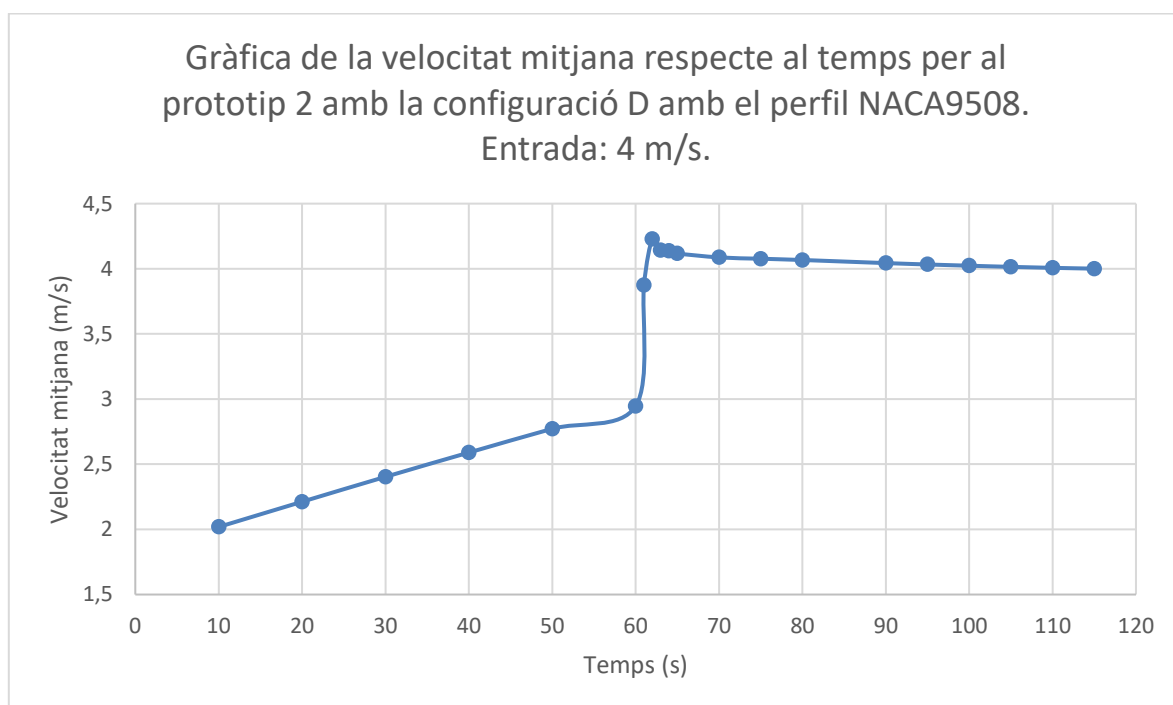


Figura 25. Gràfica de la velocitat mitjana respecte al temps per al prototip 2 amb la configuració D amb el perfil NACA9508 amb una velocitat d'entrada de 4 m/s.

Es veu com la velocitat augmenta significativament a partir d'aproximadament 60 segons i, durant els següents 50 segons, la velocitat mitjana es va reduint fins a estabilitzar-se aproximadament al voltant de 4 m/s, que és la velocitat d'entrada. Tot i que, la tendència va

lleugerament cap a la baixa, s'ha decidit no estudiar el flux en més instants, perquè ja es disposa d'una idea del seu comportament.

3.5.2 Velocitat d'entrada de 6 m/s

Per a 6 m/s, l'evolució de la velocitat mitjana és la que s'observa la figura 26.

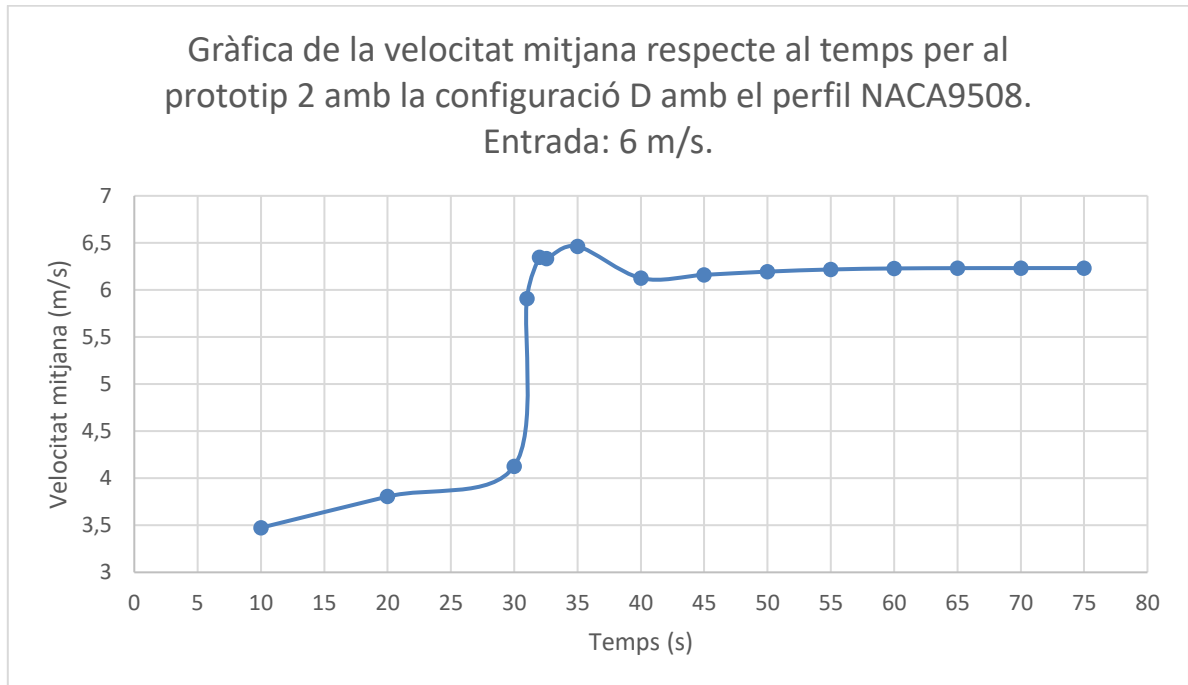


Figura 26. Gràfica de la velocitat mitjana respecte al temps per al prototip 2 amb la configuració D amb el perfil NACA9508 amb una velocitat d'entrada de 6 m/s.

S'aprecia com la tendència de la velocitat mitjana és semblant al cas de 4 m/s, on hi ha un sobtat increment de la velocitat, que, en aquest cas, es produeix al voltant dels 30 segons. La velocitat s'estabilitza lleugerament per sobre els 6 m/s.

3.5.3 Velocitat d'entrada de 8 m/s

Per a 8 m/s, l'evolució de la velocitat es pot observar a la figura 27.

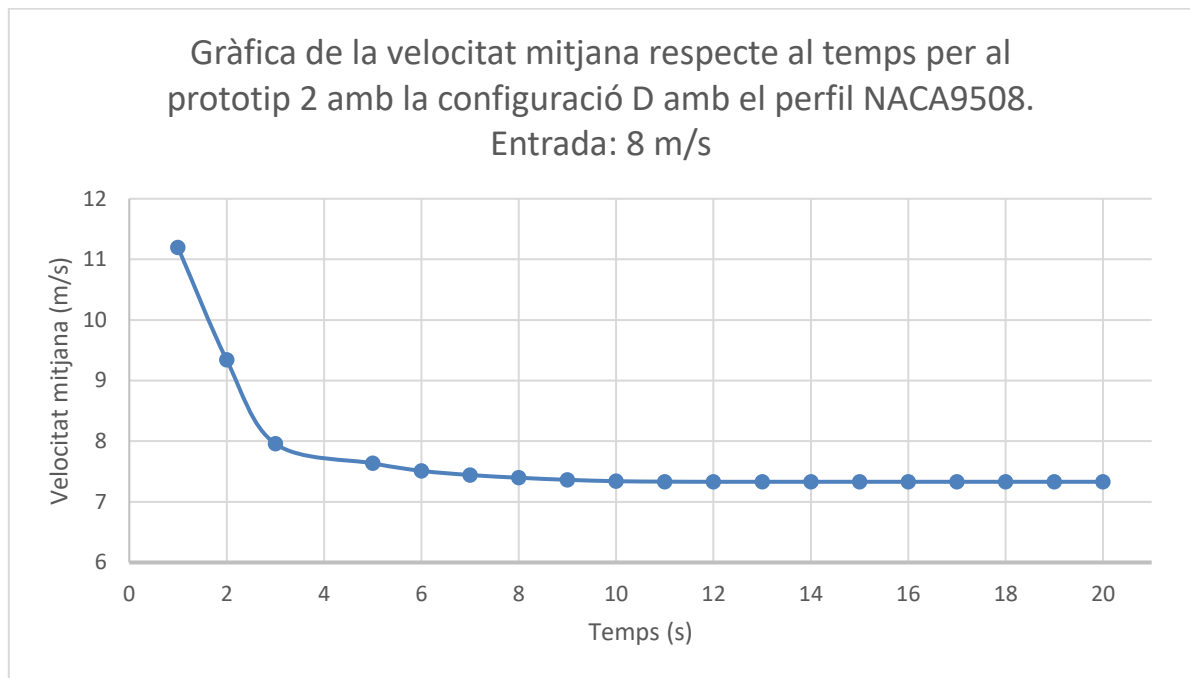


Figura 27. Gràfica de la velocitat mitjana respecte al temps per al prototip 2 amb la configuració D amb el perfil NACA9508 amb una velocitat d'entrada de 8 m/s.

Es pot observar com l'evolució del valor objectiu és molt semblant al cas amb el perfil S1210 12% disponible a la Figura 22, obtenint el valor més alt a l'inici de la simulació i estabilitzant-se a un valor inferior. En aquest cas es pot observar, però com la velocitat final no supera els 8 m/s de l'entrada.

3.6 Resultats amb la configuració H del perfil NACA0024

A part del perfil NACA9508, s'ha decidit estudiar també el comportament del flux amb el perfil NACA0024.

3.6.1 Velocitat d'entrada de 4 m/s

Els resultats per aquesta configuració amb una velocitat d'entrada de 4 m/s són els que es mostren a la figura 28.

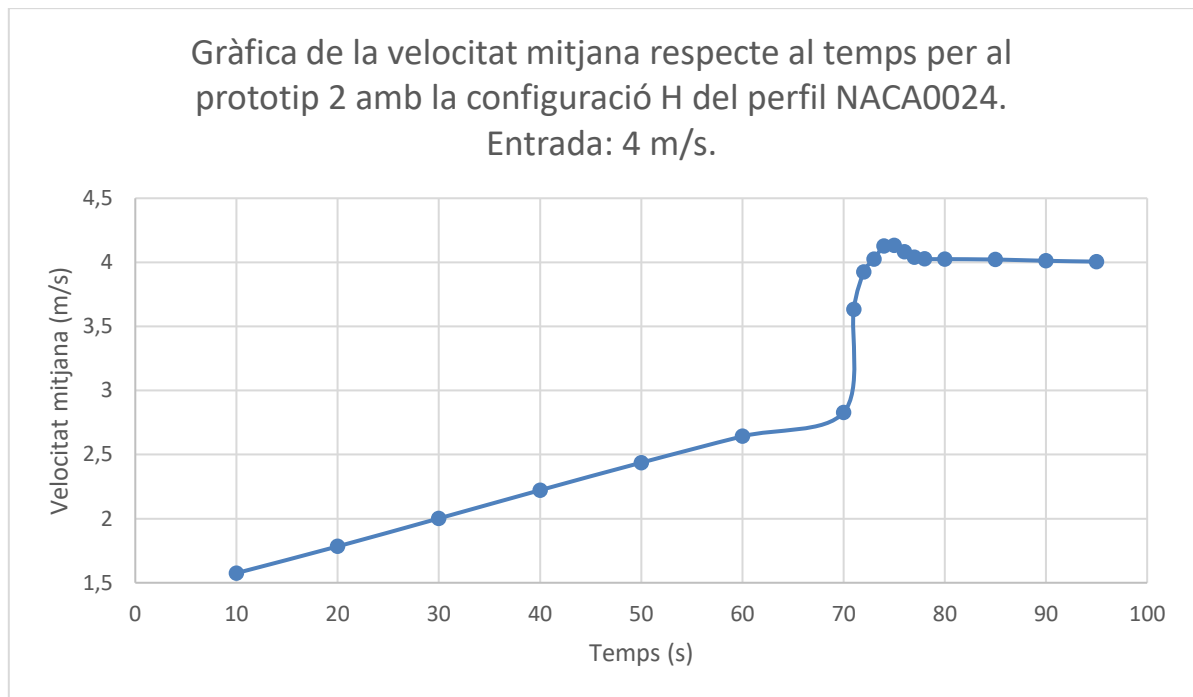


Figura 28. Gràfica de la velocitat mitjana respecte al temps per al prototip 2 amb la configuració H amb el perfil NACA0024 amb una velocitat d'entrada de 4 m/s.

Es pot observar com a partir dels 60 segons de simulació la velocitat incrementa amb un pendent major que els instants previs i s'estabilitza a partir dels 80 segons a una velocitat d'aproximadament 4 m/s. L'evolució en línies generals és semblant a les altres simulacions a 4 m/s.

3.6.2 Velocitat d'entrada de 6 m/s

Els resultats per a la velocitat d'entrada de 6 m/s són els que es mostren a la figura 29.

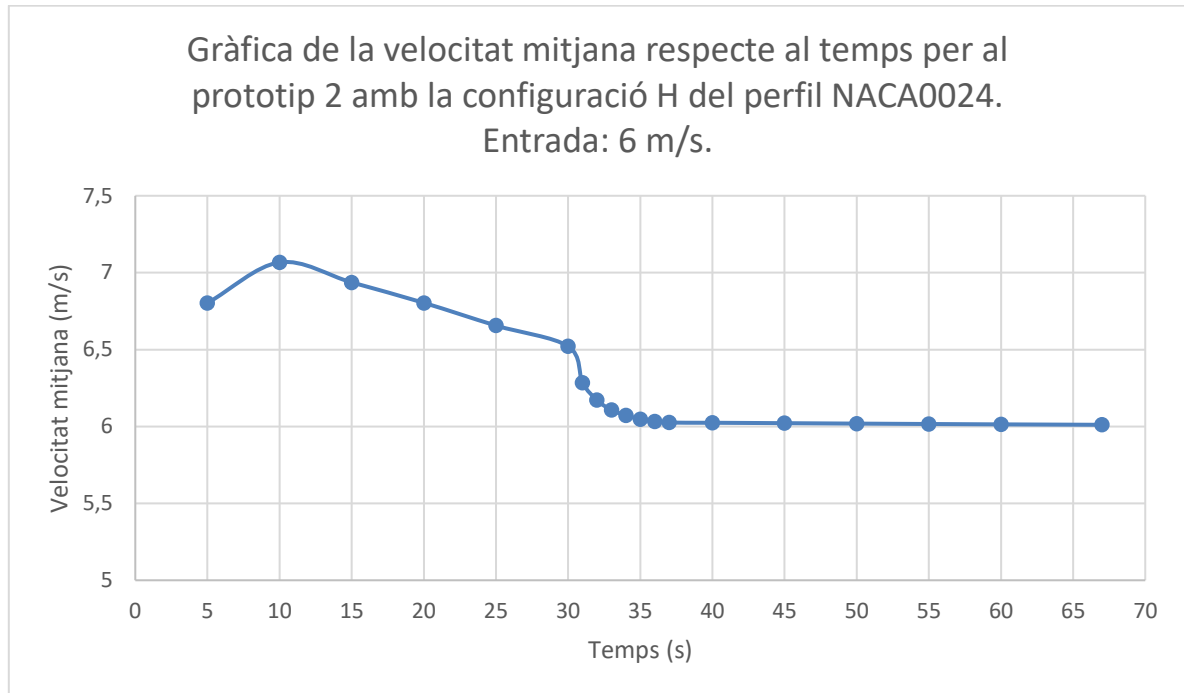
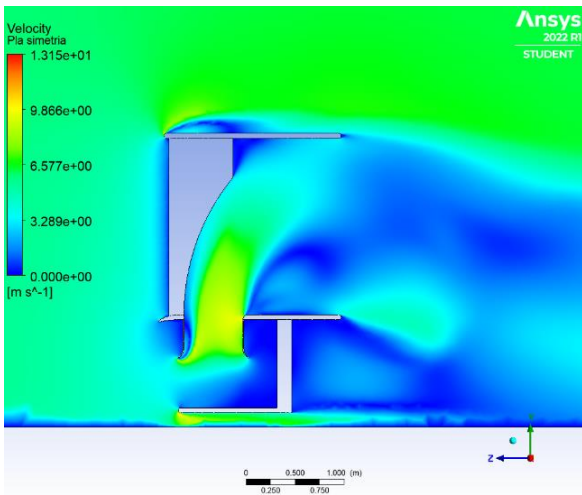


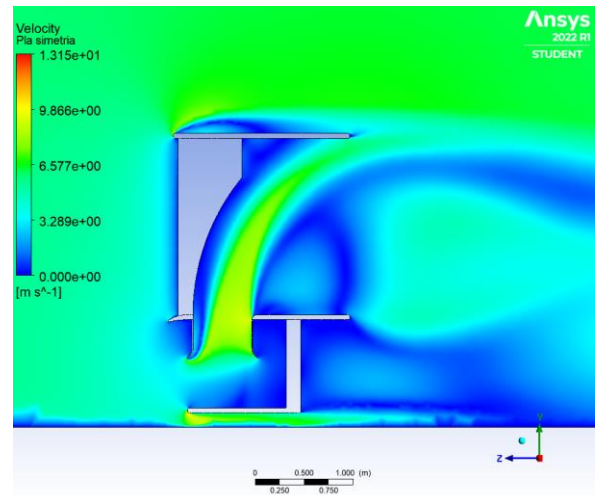
Figura 29. Gràfica de la velocitat mitjana respecte al temps per al prototip 2 amb la configuració H amb el perfil NACA0024 amb una velocitat d'entrada de 6 m/s.

Es pot observar com la velocitat mitjana no incrementa amb el pas del temps sinó que disminueix fins a establir-se a una velocitat lleugerament superior als 6 m/s de l'entrada.

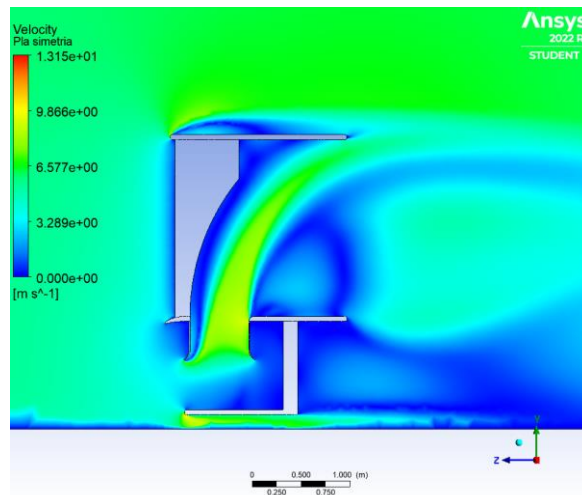
Per entendre en comportament del flux es pot observar la distribució de velocitat al pla de simetria per als temps de simulació de 10, 31 i 35 segons a la figura 30. S'escullen aquests instants al observar com aproximadament la velocitat mitjana màxima s'aconsegueix a l'instant de 10 segons, on llavors la velocitat disminueix linealment fins al instant de 31 segons, on posteriorment la velocitat obtinguda es redueix bruscament fins a establir-se aproximadament a partir del segon 35 de simulació.



(a)



(b)



(c)

Figura 30. Distribució de velocitats al pla de simetria per el prototip 2 amb la configuració H amb el perfil NACA0024 amb una velocitat d'entrada de 6 m/s: (a) 10 s, (b) 31 s i (c) 35 s.

Es pot observar clarament com el comportament és el mateix que en el cas de velocitat d'entrada de 8 m/s per al perfil S1210 12% disponible a la figura 24, on en el pla d'estudi, la distribució de velocitat elevada té una superfície més gran a l'inici i, a mesura que avança el temps, es va reduint. Es pot també apreciar com a primera vista les figures 30,b i 30.c són pràcticament iguals, però el valor objectiu no ho indica així.

3.6.3 Velocitat d'entrada de 8 m/s

Els resultats per a la velocitat d'entrada de 8 m/s són els que es mostren a la figura 31.

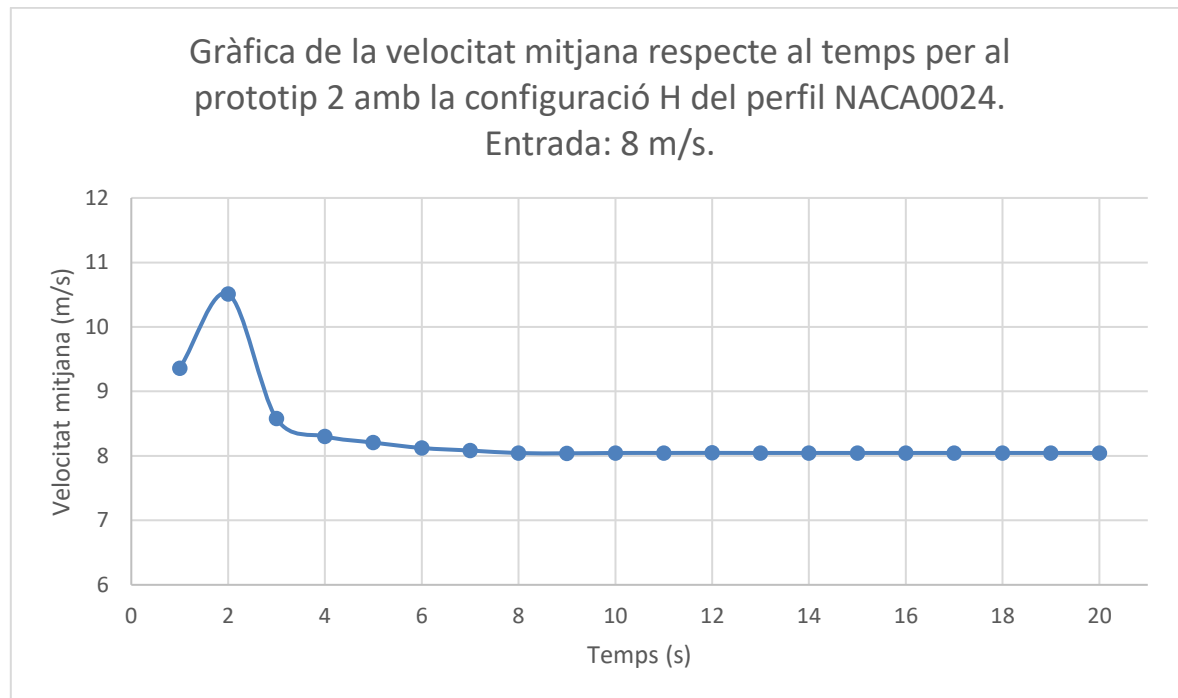


Figura 31. Gràfica de la velocitat mitjana respecte al temps per al prototip 2 amb la configuració H amb el perfil NACA0024 amb una velocitat d'entrada de 8 m/s.

S'aprecia com el comportament del flux és molt semblant als dels casos pels perfils S1210 12% i NACA 9508, disponibles a la figura 22 i a la figura 27 respectivament, on els valors objectius inicials són superiors als valors objectius estabilitzats. La velocitat s'estabilitza al voltant de la velocitat d'entrada, de 8 m/s.

3.7 Resultats amb la configuració I del perfil NACA0024

Tal com s'ha esmentat prèviament, a la configuració I, els angles d'incidència entre els dos perfils fan 20°, disposició disponible a la Taula 3.

3.7.1 Velocitat d'entrada de 4 m/s

Els resultats per a la velocitat d'entrada de 4 m/s són els que s'observen a la figura 32.

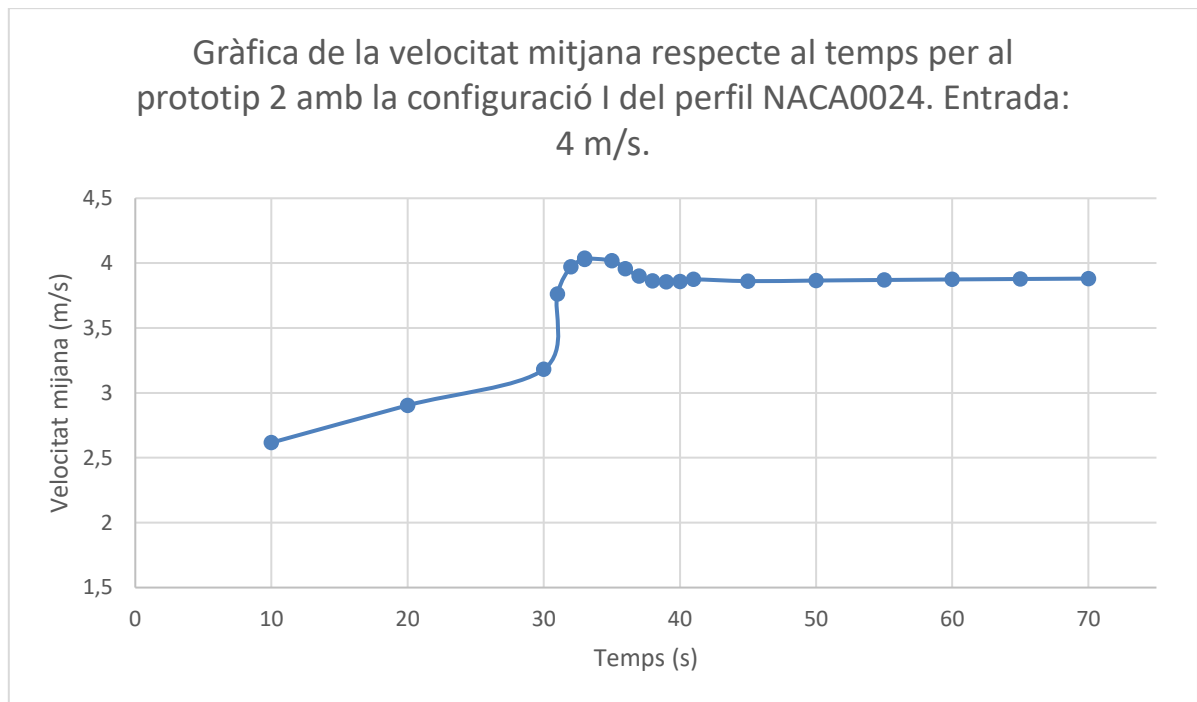


Figura 32. Gràfica de la velocitat mitjana respecte al temps per al prototip 2 amb la configuració I amb el perfil NACA0024 amb una velocitat d'entrada de 4 m/s.

Es pot observar com la velocitat s'estabilitza per sota els 4 m/s a partir dels 40 segons. La tendència del comportament és semblant a la configuració H, disponible a la Figura 28, tot i que, al cap de 10 segons, la velocitat és 1 m/s superior i s'estabilitza amb la meitat del temps.

3.7.2 Velocitat d'entrada de 6 m/s

Els resultats per a la velocitat d'entrada de 6 m/s són els que s'aprecien a la figura 33.

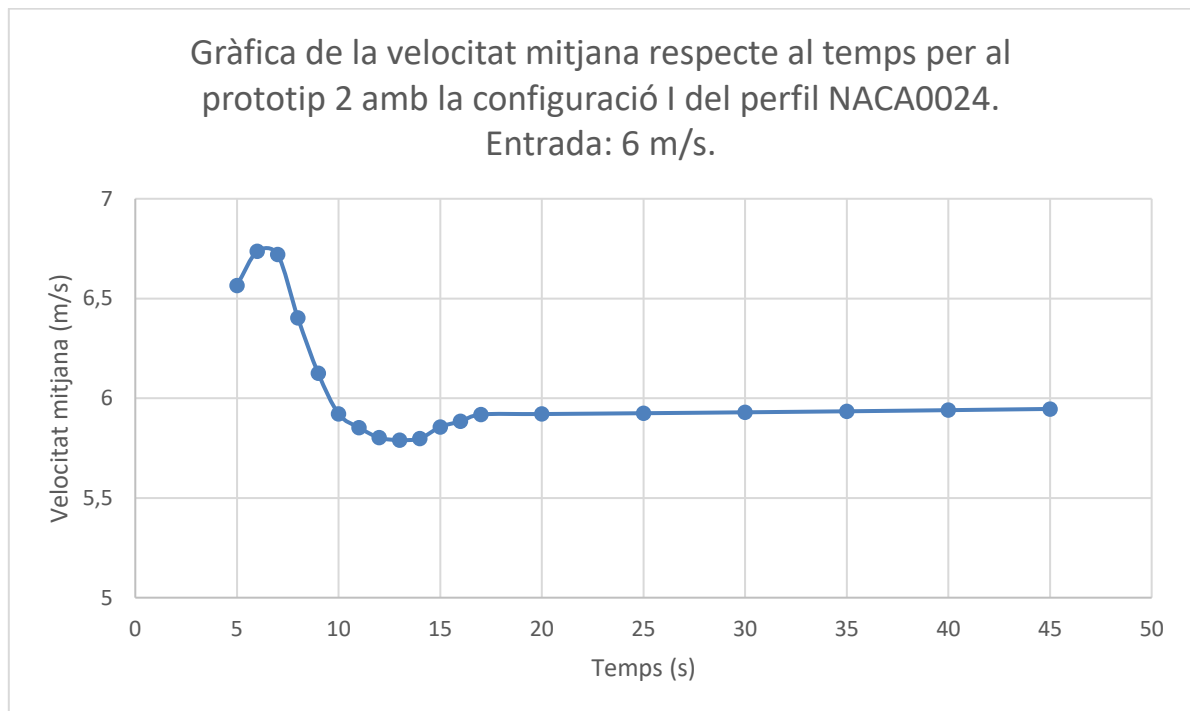


Figura 33. Gràfica de la velocitat mitjana respecte al temps per al prototip 2 amb la configuració I amb el perfil NACA0024 amb una velocitat d'entrada de 6 m/s.

Es pot observar com la velocitat en els primers instants és superior a la velocitat a la qual s'estabilitza el valor objectiu, lleugerament inferior als 6 m/s.

3.7.3 Velocitat d'entrada de 8 m/s

Els resultats per a la velocitat d'entrada de 8 m/s són els que es mostren a la figura 34.

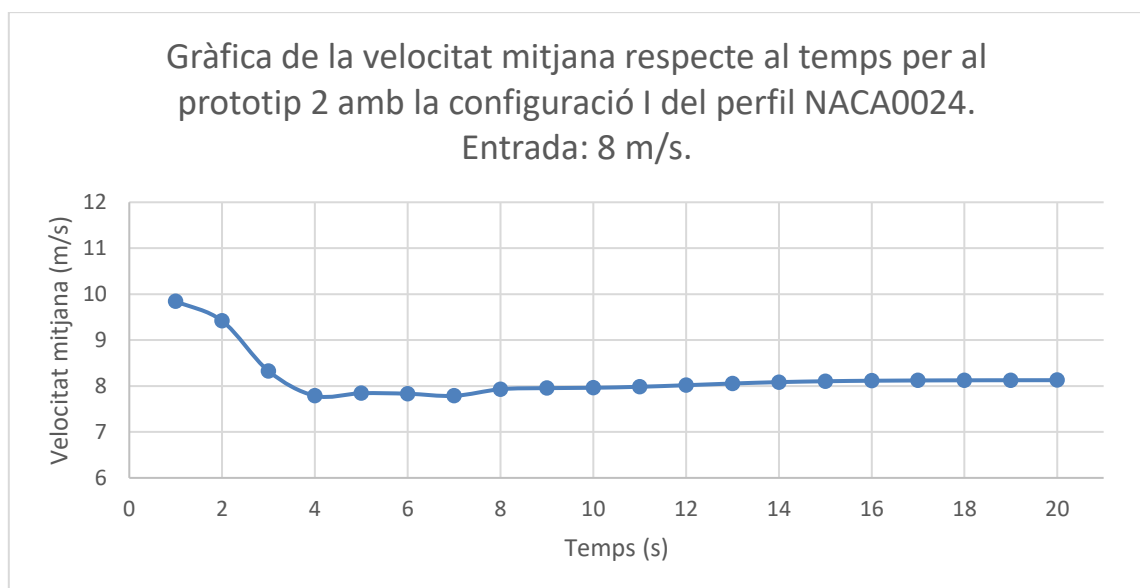


Figura 34. Gràfica de la velocitat mitjana respecte al temps per al prototip 2 amb la configuració I amb el perfil NACA0024 amb una velocitat d'entrada de 8 m/s.

S'aprecia com el valor objectiu tendeix també a disminuir al llarg del temps. El valor final obtingut és lleugerament superior als 8 m/s d'entrada, tot i que des del segon 4 fins al segon 11 el valor és inferior a 8 m/s.

3.8 Comparacions dels diferents perfils per a cada velocitat

Per a poder observar les diferències de comportament del flux es representarà l'evolució de la velocitat per a les diferents geometries a cada velocitat estudiada i es representaran les distribucions de velocitat al pla paral·lel a la planta a una altura de 2 metres.

3.8.1 Comparació a 4 m/s

Per a la velocitat d'entrada de 4 m/s es pot veure la gràfica corresponent a la figura 35.

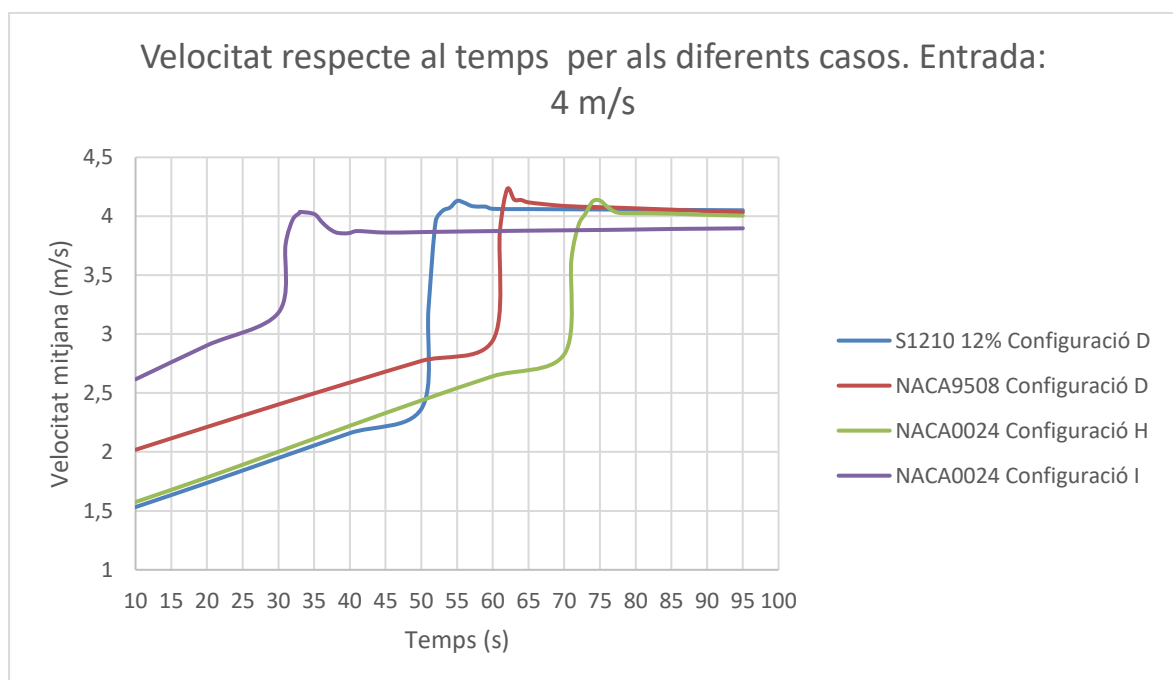


Figura 35. Comparativa dels diferents casos estudiats per a una velocitat d'entrada de 4 m/s.

S'observa com les configuracions amb el perfil S1210 12%, el perfil NACA9508 i el perfil NACA0024 amb la configuració H donen resultats molt semblants, lleugerament superiors als 4 m/s de l'entrada, sent, però, el perfil S1210 12%, lleugerament superior. El perfil NACA0024 amb la configuració I obté una velocitat inferior als 4 m/s. No obstant això, el perfil que per als primers instants té una velocitat superior i s'estabilitza abans.

Tot i les diferències de valors, l'evolució del valor objectiu és semblant en tots els casos: inicialment la mitjana incrementa linealment fins a arribar a un canvi bruscat de velocitat per posteriorment, estabilitzar-se a valors lleugerament inferiors al pic de velocitat objectiu.

A la figura 36 es veu la comparació de les distribucions de velocitat en el pla zenital a una altura de 2 metres un cop establitzat el valor objectiu.

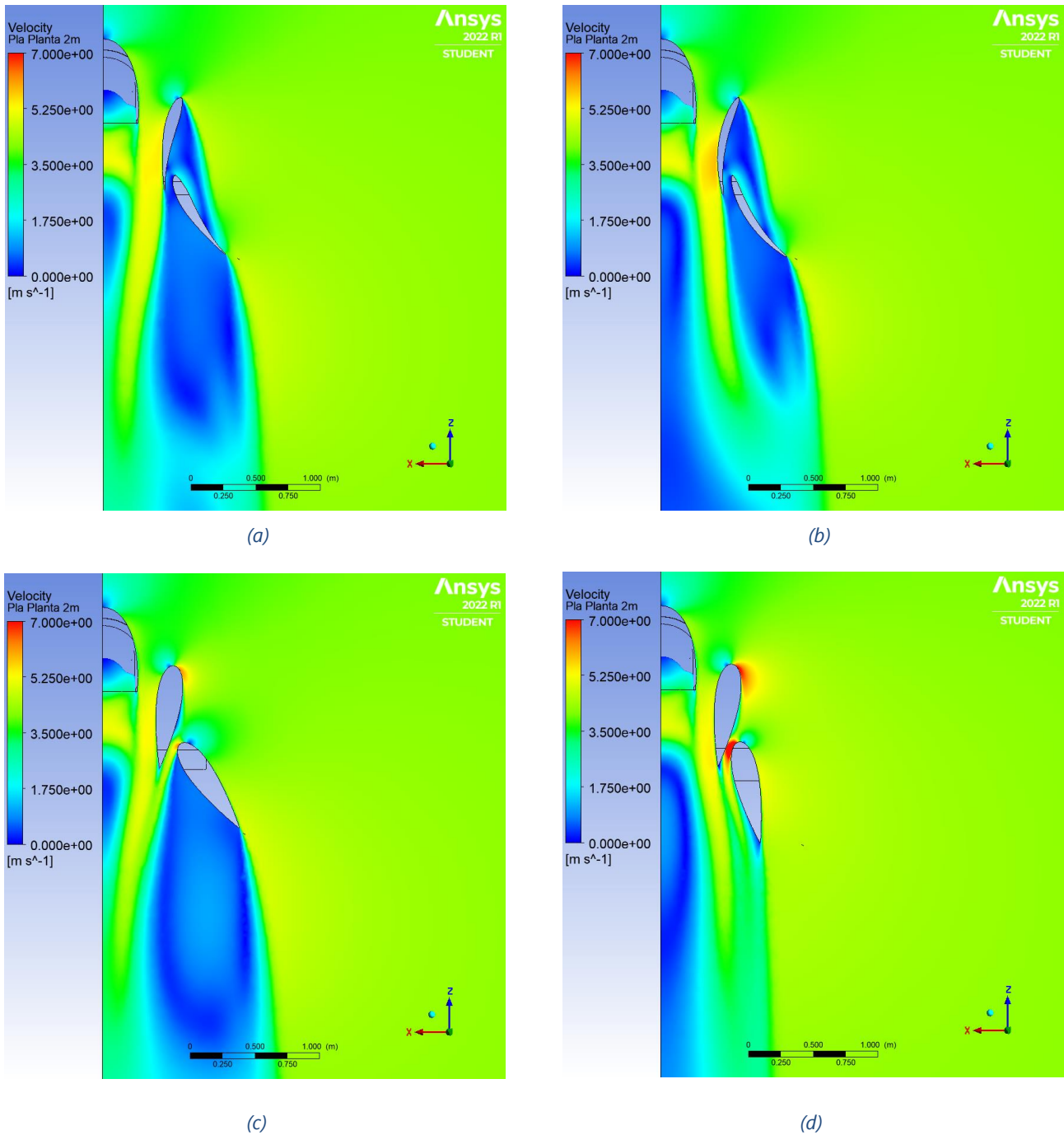


Figura 36. Comparació del comportament del flux en el pla paral·lel a la planta a una altura de 2 metres per a diferents posicions i diferents perfils a partir del prototip 2 a 4 m/s: (a) S1210 12% Configuració D, (b) NACA9508 Configuració D, (c) NACA0024 Configuració H i (d) NACA0024 configuració I.

S'aprecia com tots els casos tenen diferències significatives. A la figura 36.a i 37.c la distribució de velocitat accelerada tendeix a ajuntar-se amb l'altra part no observable a causa de la condició de simetria, mentre que, en les figures 31.b i 32.d, es genera una distribució de velocitat pràcticament

nul·la en tota la part posterior observable. Les velocitats més altes es generen a la configuració I amb el perfil NACA0024. Tot i això és la disposició menys eficaç. Una possible causa és que al tenir un angle d'incidència menor que en els altres casos en el segon perfil lateral (12° envers 35°), aquest no genera una estela de velocitat baixa que es comprova que és beneficiosa.

Si es comparen els dos casos geomètricament més semblants, els casos pels perfils S1210 12% i NACA9508, s'observa com el segon aconseguix accelerar més el vent, però el valor objectiu és inferior. Un possible motiu és que és òptim que els corrents de velocitat accelerada s'ajuntin en comptes que siguin dos corrents separats al llarg de la part posterior.

Per complementar el comportament del flux es representa la distribució de velocitats al pla de simetria per als 4 casos a la figura 37.

Estudi aerodinàmic d'un aerogenerador sense aspes

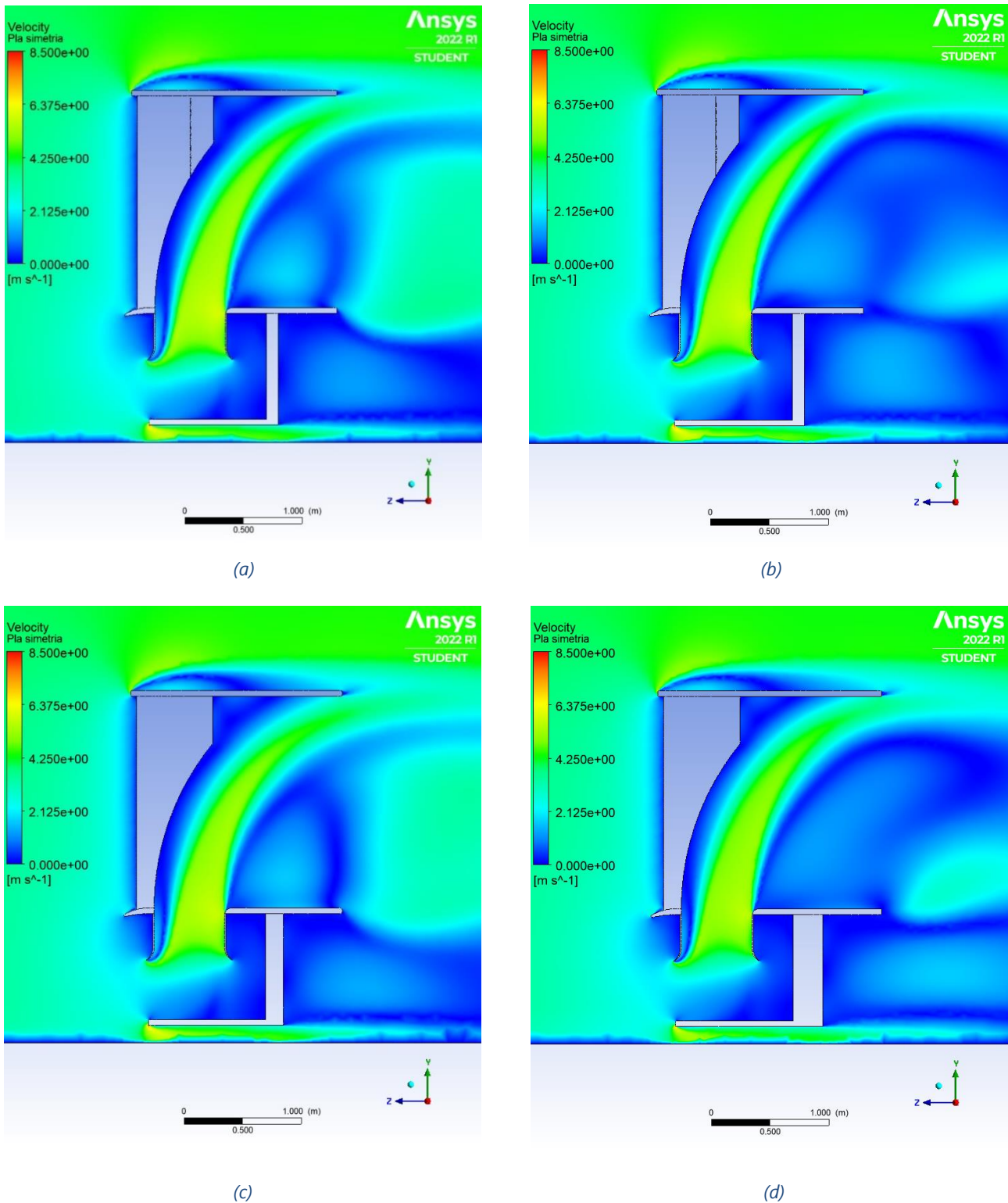


Figura 37. Comparació del comportament del flux en el pla de simetria per a diferents posicions i diferents perfils a partir del prototip 2 a 4 m/s: (a) S1210 12% Configuració D, (b) NACA9508 Configuració D, (c) NACA0024 Configuració H i (d) NACA0024 configuració I.

Es pot observar com en els 4 casos el comportament del flux a la sortida és pràcticament idèntic, i, per tant, les diferents geometries no influeixen excessivament. No obstant això, es pot

observar com anteriorment s'ha mencionat, que els casos del perfil S1210 12% i del NACA0024 amb la configuració H aconseguen unir els dos corrents de velocitat accelerada-

3.8.2 Comparació a 6 m/s

Per a la velocitat d'entrada de 6 m/s es pot veure la gràfica corresponent a la figura 38.

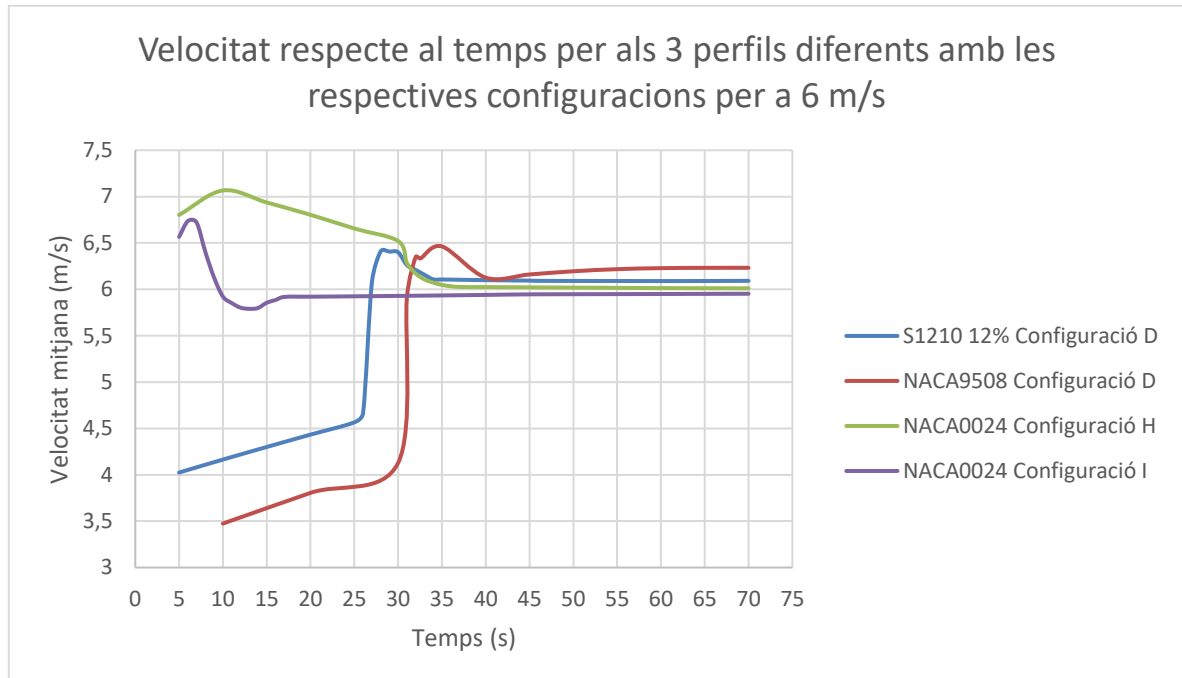
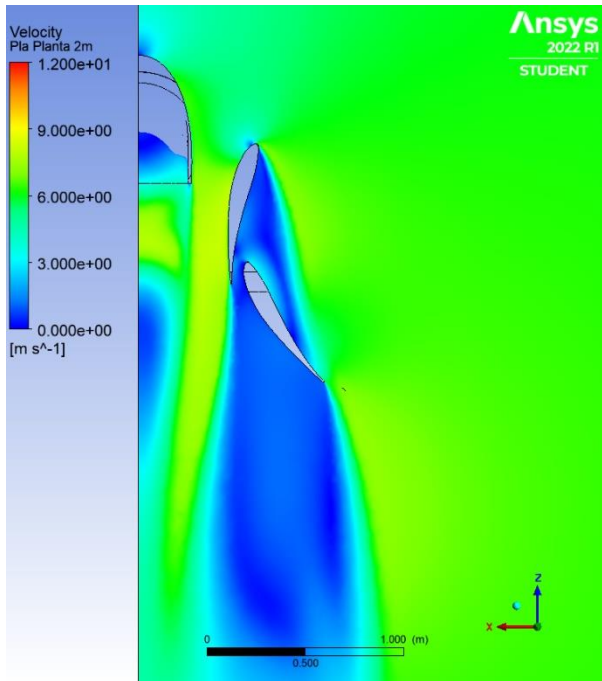


Figura 38. Comparativa dels diferents casos estudiats per a una velocitat d'entrada de 6 m/s.

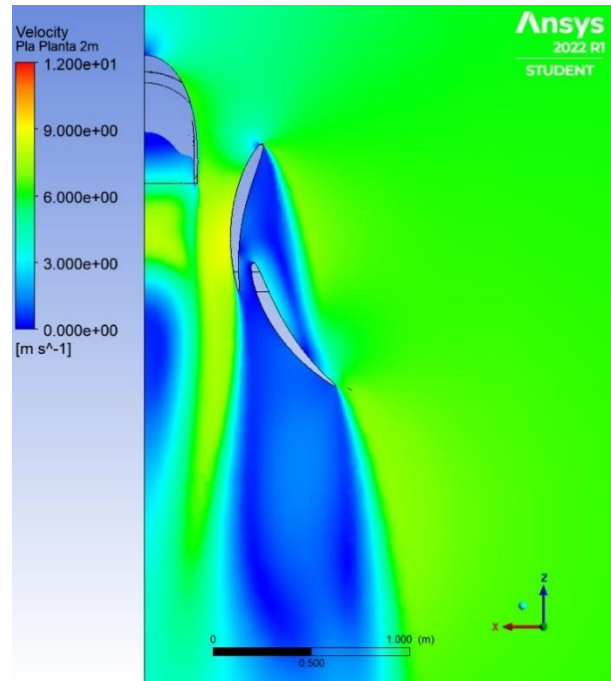
Es pot observar com tots els casos s'estabilitzen al voltant dels 6 m/s. La configuració més favorable és la del perfil NACA9508, seguida per la del perfil S1210 12%. Veiem com les configuracions amb el perfil NACA0024 tenen una velocitat superior a l'inici de la simulació i el valor va disminuint a mesura que passa el temps, comportament contrari als dos altres casos, on la velocitat va augmentant al llarg del temps.

Per analitzar el comportament del flux es representen les distribucions de velocitat en el pla zenital a una altura de 2 metres un cop estabilitzat el valor objectiu a la figura 39.

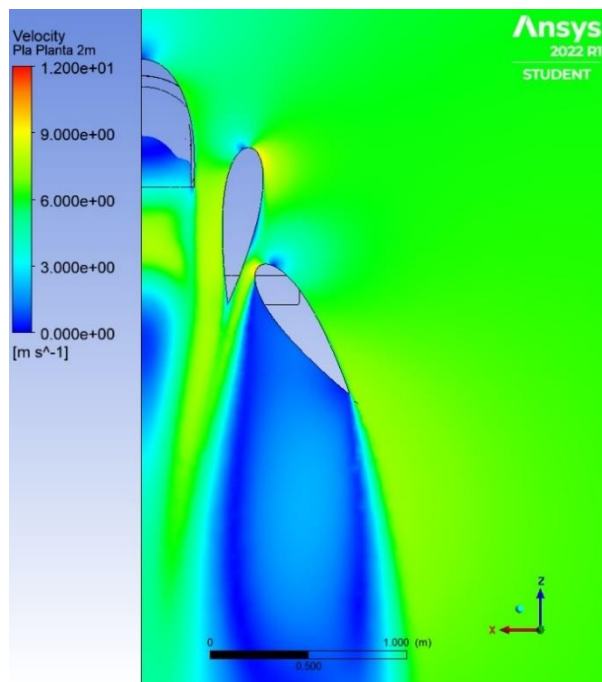
Estudi aerodinàmic d'un aerogenerador sense aspes



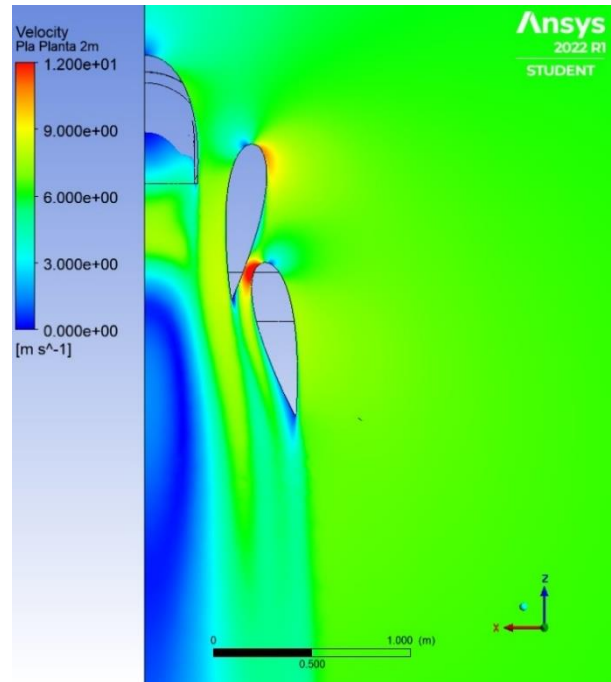
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 39. Comparació del comportament del flux en el pla paral·lel a la planta a una altura de 2 metres per a diferents posicions i diferents perfils a partir del prototip 2 a 6 m/s: (a) S1210 12% Configuració D, (b) NACA9508 Configuració D, (c) NACA0024 Configuració H i (d) NACA0024 configuració I.

Es pot apreciar com a la figura 39.b, corresponent a la configuració amb el perfil NACA9508, hi ha la velocitat més alta entre el perfil central i lateral i, a més a més, si comparem aquesta

distribució de flux amb la de la Figura 36.b, observem com el flux ara si tendeix a ajuntar-se a la part posterior. La suma d'aquests factors fa que sigui la configuració òptima.

3.8.3 Comparació a 8 m/s

Per a la velocitat d'entrada de 8 m/s es pot veure la gràfica corresponent a la figura 40.

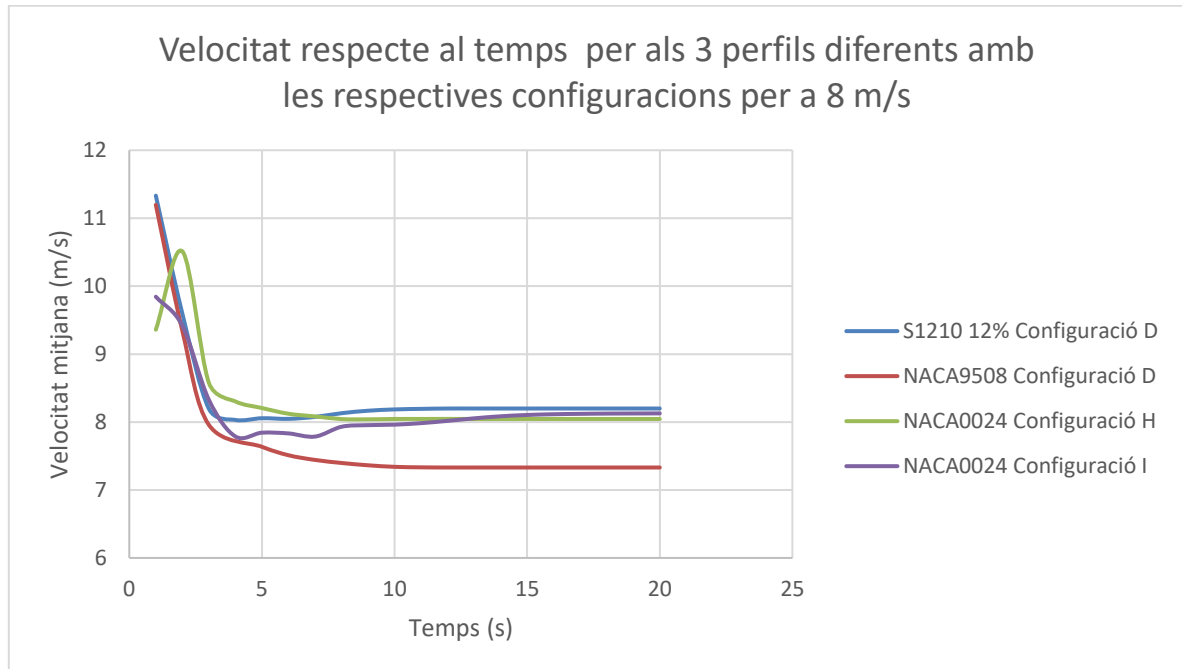


Figura 40. Comparativa dels diferents casos estudiats per a una velocitat d'entrada de 8 m/s.

Es pot apreciar com les configuracions amb els perfils S1210 12% i NACA0024 s'estabilitzen per a valors lleugerament superiors a 8 m/s, mentre que, la configuració D amb el perfil NACA9508 s'estabilitza a valors més propers a 7 m/s.

La configuració lleugerament òptima per la velocitat d'entrada de 8 m/s és la configuració D amb el perfil S1210 12%. Totes les primeres dades recollides a 1 segon mostren una velocitat mitjana superior a 9 m/s.

És interessant observar com els casos amb la configuració D el valor objectiu és molt semblant fins a aproximadament 3 segons de simulació, o llavors el cas amb el perfil S1210 12% es manté mentre que el cas amb el perfil NACA9508 continua disminuint.

Per analitzar el comportament del flux es representen les distribucions de velocitat en el pla zenital a una altura de 2 metres un cop estabilitzat el valor objectiu a la figura 41.

Estudi aerodinàmic d'un aerogenerador sense aspes

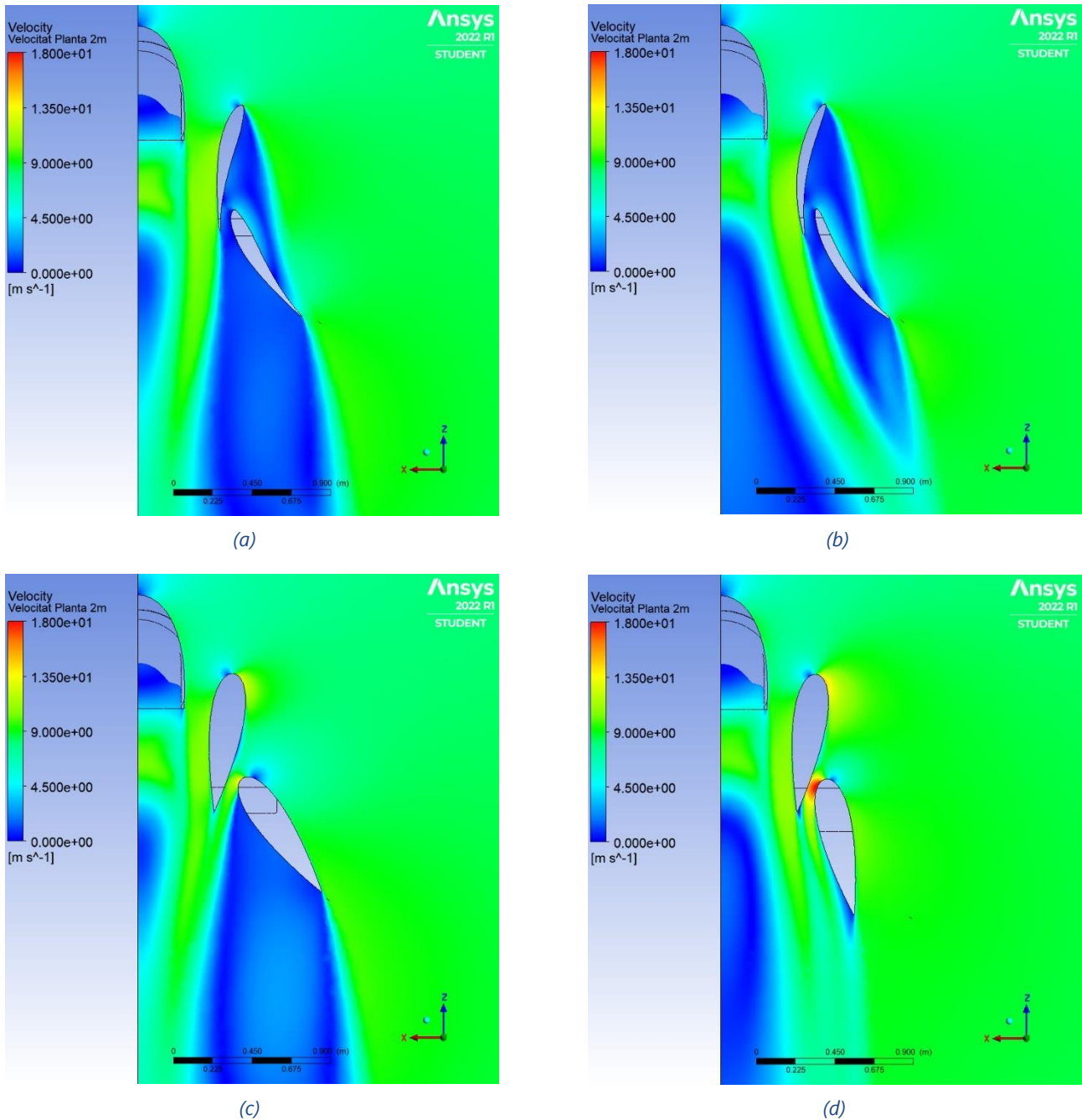


Figura 41. Comparació del comportament del flux en el pla paral·lel a la planta a una altura de 2 metres per a diferents posicions i diferents perfils a partir del prototip 2 a 8 m/s: (a) S1210 12% Configuració D, (b) NACA9508 Configuració D, (c) NACA0024 Configuració H i (d) NACA0024 configuració I.

Es pot apreciar com en els casos de les figures 41.a i 41.c la distribució de velocitat accelerada tendeix a ajuntar-se amb l'altra part de la simetria mentre que pels altres casos no. No obstant això, la configuració I amb el perfil NACA0024 no segueix aquesta directriu, on la velocitat obtinguda al pla on hi hauria la turbina és molt semblant. Això ens indica com és una geometria que treballa diferent dels altres casos.

Per la geometria amb el perfil NACA9508, l'òptima i observable a la figura 41.b, s'aprecia com el corrent de velocitat segueix la curvatura del perfil i tendeix a anar cap al lateral allunyant-se del pla de simetria. Aquesta tendència ja s'ha pogut demostrar per altres velocitats que no és el comportament del flux òptim.

3.8.4 Comparació numèrica respecte a la velocitat d'entrada

Per poder posar en context quina és la diferència de velocitat mitjana obtinguda respecte la velocitat d'entrada es mostren els percentatges de diferències a la figura 42.

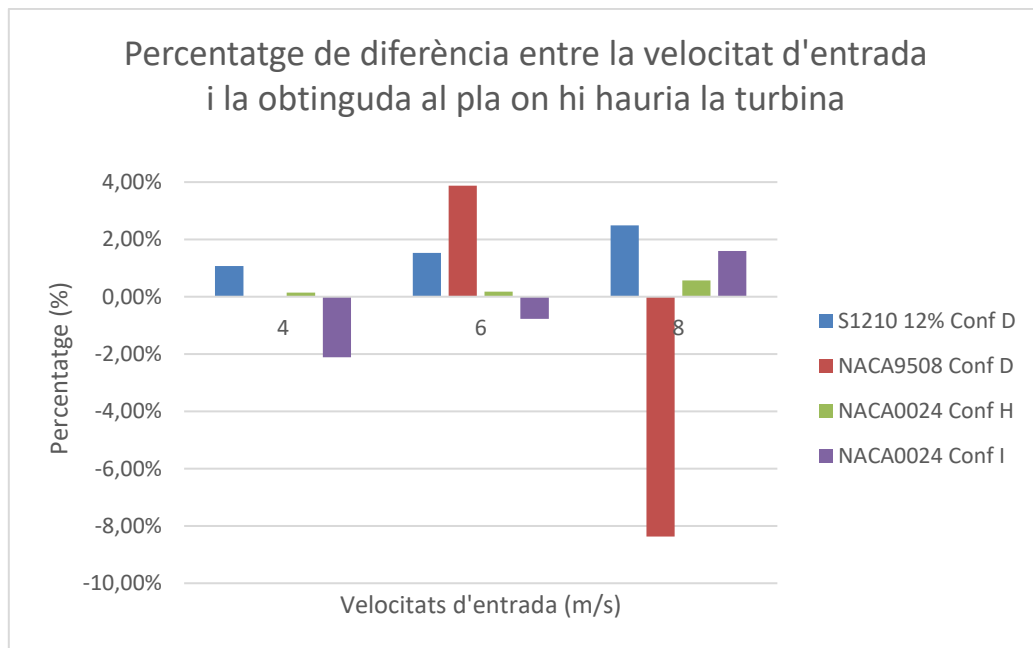


Figura 42. Gràfic de barres del percentatge de diferència obtingut amb cada perfil per a diferents velocitats d'entrada.

El perfil S1210 12% amb la configuració D mostra un augment de rendiment per a les tres velocitats, sent l'increment progressiu. De les tres velocitats estudiades és la configuració òptima per a 4 m/s i 8 m/s.

El perfil NACA9805 amb la configuració D té un comportament inestable: per a 4 m/s, la millora és insignificant, del 0,03%. Llavors, per a 6 m/s, s'obté amb diferència el percentatge més alt, sent aquest més del doble que el següent, del 3,88%. Per l'última velocitat, de 8 m/s, assoleix l'únic percentatge negatiu i el més gran en tots els casos, del 8,36%.

El perfil NACA0024 amb la configuració H, com també el perfil S1210 12%, aconsegueix una millora per a les tres velocitats, sent, però, molt petita.

Finalment, el perfil NACA0024 amb la configuració I aconsegueix percentatges negatius per als dos primers casos, mentre que, per a la velocitat d'entrada de 8 m/s hi ha la segona millor millora.

Estudi aerodinàmic d'un aerogenerador sense aspes

Observant les dades conjuntament s'arriba a la conclusió que el perfil S1210 12% és l'òptim pel rang de velocitats estudiades a l'obtenir sempre una millora i ser aquesta progressiva. El perfil NACA9508 presenta valors molt inestables, mostrant així una alta sensibilitat a la velocitat del vent. La configuració H amb el perfil NACA0024 és una geometria estable però amb un marge de millora molt petit. Finalment, la configuració I amb el perfil NACA0024 mostra que necessita velocitat de vent alta per a assolir un increment de velocitat respecte a la velocitat d'entrada, fet que indica que la geometria és poc polivalent i, per tant, d'aplicació limitada.

4 RESUM DEL PRESSUPOST

El cost del projecte es troba desglossat a l'Annex D: Valoració econòmica. El cost total és de SIS MIL CENT SETANTA-NOU EUROS AMB SETANTA-U CÈNTIMS. (6.179,71 €). (Consulteu Annex D: Estudi econòmic).

5 CONCLUSIONS

Al llarg de la investigació d'aquest projecte s'ha pogut observar com funciona de manera aproximada el model d'aerogenerador creat per l'empresa Aeromine, del qual no es té tota la informació disponible. Per aquesta raó, s'han hagut de fer processos previs per tal de determinar possibles geometries del model i aproximacions de mesures.

En primer lloc, s'ha pogut estudiar el funcionament de l'aerogenerador. Entre el perfil central i lateral es genera una velocitat superior, que, a la vegada, arrossega el corrent de vent que circula per la part posterior del perfil central. Aquest últim té un orifici que connecta amb la zona on s'ubica la turbina generadora.

En les primeres simulacions, a 4 m/s, s'ha pogut apreciar com la velocitat generada a la zona de la turbina no tenia un augment significatiu respecte a la velocitat d'entrada a la geometria. S'ha observat, però, la gran importància de la geometria interna al perfil central, on els resultats obtinguts per als primers 3 prototips generaven velocitats mitjanes a la zona de la turbina visiblement diferents.

El concepte òptim assolit ha estat la geometria amb una curvatura per redirigir l'aire cap a la sortida, aconseguint d'aquesta manera una velocitat major en la component vertical. La geometria es pot veure a la figura 8. No obstant això, s'hauria d'optimitzar encara més per tal de mantenir el flux més vertical en ser l'augment de velocitat molt menor.

Relacionat amb l'anteriorment comentat, la geometria de sortida també hauria de millorar la distribució de velocitats al pla de la turbina, on s'ha observat que la distribució no és uniforme, sinó que, per la zona més posterior, la velocitat és molt més elevada que per la zona més propera a l'entrada del flux. Aquí, la velocitat és pràcticament nul·la i, per tant, fa disminuir la velocitat mitjana considerablement. Aquesta distribució en els tres primers prototips es pot veure a la figura 17.

Estudiant l'aerogenerador per a diferents velocitats i diferents configuracions aerodinàmiques s'ha observat com, per a velocitats baixes, hi ha un procés transitori de com a mínim 20 segons fins a arribar a velocitats mitjanes iguals a la velocitat d'entrada del vent per a les configuracions òptimes, sent això un gran inconvenient, ja que no es poden aprofitar correctament petites ràfegues de vent.

El comportament a velocitats més altes és diferent: les ràfegues de vent per a aquestes característiques generen una velocitat mitjana superior als primers instants. Això es deu al fet que el

vent que passa per la zona interior del perfil central té una distribució òptima que la distribució un cop s'ha estabilitzat el model. Es pot observar la diferència de velocitats per a 8 m/s en els primers instants i un cop estabilitzat el flux a la figura 24. Aquest fenomen es deu a un arrossegament horitzontal per part del vent a mesura que avança el temps. Aquest arrossegament tendeix a fer més horitzontal la distribució de velocitats a la sortida de l'aerogenerador.

La modificació dels perfils i els angles ha permès analitzar la funció dels perfils i quins comportaments del flux a la zona d'aquests és més beneficiosa. La funció del primer perfil és accelerar el flux mentre que la funció del segon perfil és generar una estela de velocitats molt baixes a la seva part posterior, generant així un canal de velocitat accelerada més marcat.

Un comportament del flux que s'ha observat avantatjós ha estat la unió dels corrents accelerats pels primers perfils i el central. En altres paraules, a la part posterior de l'aerogenerador és interessant que conflueixin els dos corrents i no siguin redirigits lateralment cap a fora. L'exemple més clar és el de la figura 41.a i figura 41.b, on en el primer cas la velocitat generada és àmpliament superior que en el segon cas.

Havent analitzat els casos, la geometria ideal hauria de complir els següents requisits:

- Aconseguir una distribució a la zona de la sortida el més vertical possible.
- Aconseguir una distribució més uniforme a la zona de la turbina.
- Augmentar la velocitat accelerada entre el perfil lateral i central respecte a la velocitat d'entrada sense comprometre el cabal de vent que hi travessa.
- Redirigir el flux cap al centre de la part posterior per tal d'unir els dos corrents accelerats.
- Fer treballar el segon perfil de tal manera que generi una estela de velocitat molt baixa per no interferir amb la velocitat accelerada.

Observant els valors obtinguts es conclou que l'aerogenerador és capaç de generar una velocitat superior a la zona de la turbina respecte a la velocitat d'entrada, sent, però, molt petita la millora. Per tal que l'augment faci factible el seu ús, s'ha d'optimitzar més la geometria.

6 RELACIÓ DE DOCUMENTS

El projecte consta dels següents documents:

Document núm. 1: Memòria i annexos

- Memòria
- Annexos

Annex A: Descripció del procediment de la simulació

Annex B: Informació sobre els perfils emprats

Annex C: Comparativa dels resultats obtinguts per a la modificació de la zona superior central

Annex D: Estudi econòmic

Document núm. 2: Plànols

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] H. Ritchie, M. Roser i P. Rosado, «Our World in Data,» 2022. [En línia]. Disponible: <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption#licence>.
- [2] Aeromine technologies, «Aeromine technologies,» 2023. [En línia]. Disponible: <https://www.aerominetechologies.com/>.
- [3] Luvsid, «Luvsid,» 2023. [En línia]. Disponible: <https://www.luvsid.de/en/what-is-vawt/>.
- [4] S. Pol, B. C. Houchens, D. V. Marian i C. H. Westergaard, «OSTI.GOV,» 01 01 2020. [En línia]. Disponible: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1760982>.
- [5] U.S Energy Information Administration, «U.S Energy Information Administration,» 20 04 2023. [En línia]. Disponible: <https://www.eia.gov/energyexplained/wind/where-wind-power-is-harnessed.php>.
- [6] Airfoil Tools, «Airfoil Tools,» 2023. [En línia]. Disponible: <http://airfoiltools.com/>.
- [7] M. Selig, «Michael Selig,» 2023. [En línia]. Disponible: <https://www.michaelselig.com/>.
- [8] VIRTUALEXPOGROUP, «ARCHIEXPO,» 2023. [En línia]. Disponible: <https://www.archiexpo.es/prod/windside/product-88530-959470.html>.
- [9] B. Lucas i S. Matysik, «Wind turbine models,» 2023. [En línia]. Disponible: <https://es.wind-turbine-models.com/turbines/93-dornier-darrieus-55>.
- [10] N. Parsi, «Building Desing Construction,» 08 02 2023. [En línia]. Disponible: <https://www.bdcnetwork.com/wind-energy-system-without-blades-can-be-placed-commercial-building-rooftops>.

8 GLOSSARI

- **Coefficient de lift:** mesura adimensional de la força sustentadora generada per un perfil.
- **Corda:** distància en línia recta entre la vora d'atac amb la vora de sortida d'un perfil aerodinàmic.
- **Inflation:** operació de mallat per a realitzar diverses capes d'elements molt fins per a poder captar el comportament d'un flux a prop d'una superfície d'estudi.
- **Inlet:** Entrada.
- **Lift:** força aerodinàmica que actua generant una sustentació.
- **Mallat:** discretització d'una regió geomètrica per tal de poder aplicar càlculs numèrics.
- **Outlet:** Sortida.
- **Perfil aerodinàmic:** forma geomètrica que modifica el comportament d'un flux en aquest incidir a la superfície d'aquest, generant canvis de velocitats i pressions.

ANNEXOS

Annex A: Descripció del procediment de la simulació

A.1 Generació de la geometria amb SOLIDWORKS

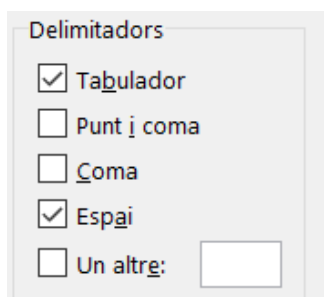
A.1.1 Obtenció dels perfils aerodinàmics

Per a l'obtenció dels perfils s'ha emprat un generador de perfils [6] que disposa d'una llibreria molt extensa. Un cop s'entra a la pàgina concreta d'un perfil, hi ha les coordenades del perfil en escala d'1. Aquestes dades es copien en un EXCEL on apareixeran les dades només en una columna com es mostra a la figura 43.

	A
1	1.00000 0.00000
2	0.99837 0.00101
3	0.99398 0.00397
4	0.98753 0.00832
5	0.97908 0.01317
6	0.96811 0.01811
7	0.95437 0.02328
8	0.93796 0.02874
9	0.91898 0.03443
10	0.89754 0.04032

Figura 43. Format inicial de les dades exportades a EXCEL.

Per tal de dividir les cel·les, se seleccionen aquestes i s'escull a "Dades" l'opció "Text en columnes" on s'han d'especificar les opcions de "Tabulador" i "Espai", que es mostren a la figura 44.



Delimitadors

- Tabulador
- Punt i coma
- Coma
- Espai
- Un altre:

Figura 44. Opcions per a dividir les dades en columnes.

Amb aquest pas es dividiran les dades en dues files corresponents. Seguidament, es procedirà a afegir la coordenada Z corresponent a 0 en tots els punts com es mostra a la figura 45.

1	0	0
0,99837	0,00101	0
0,99398	0,00397	0
0,98753	0,00832	0
0,97908	0,01317	0
0,96811	0,01811	0
0,95437	0,02328	0
0,93796	0,02874	0
0,91898	0,03443	0
0,89754	0,04032	0

Figura 45. Format de les coordenades correcte per a exportar.

Per tal d'aplicar l'escala es multiplicaran els valors en columnes auxiliars i s'inseriran les noves coordenades en un nou arxiu EXCEL. Finalment, es guardarà el document en format ".txt" dividit per tabulacions.

A.1.1.2 Generació dels perfils al SOLIDWORKS

Un cop generat el document de text, en el SOLIDWORKS es selecciona l'opció "Curva por puntos XYZ", observable a la figura 46.

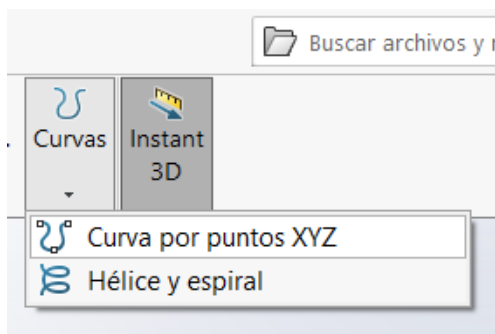


Figura 46. Operació per a crear una corba a partir de punts.

Seguidament, s'obrirà una pestanya on es seleccionarà "examinar" i es seleccionarà l'arxiu corresponent.

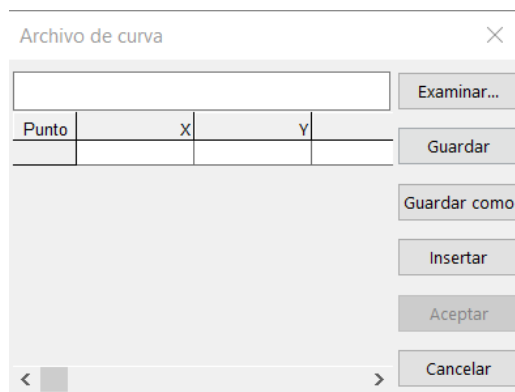


Figura 47. Finestra a on carregar el format ".txt" de les coordenades.

Aquest procediment generarà una corba, però, no un croquis al qual es poden efectuar operacions. Per tant, s'haurà de generar un croquis a l'alçat, pla que conté la corba. S'utilitzarà l'opció "Convertir entidades" on se seleccionarà la corba. Es pot observar el procediment descrit a la figura 48.

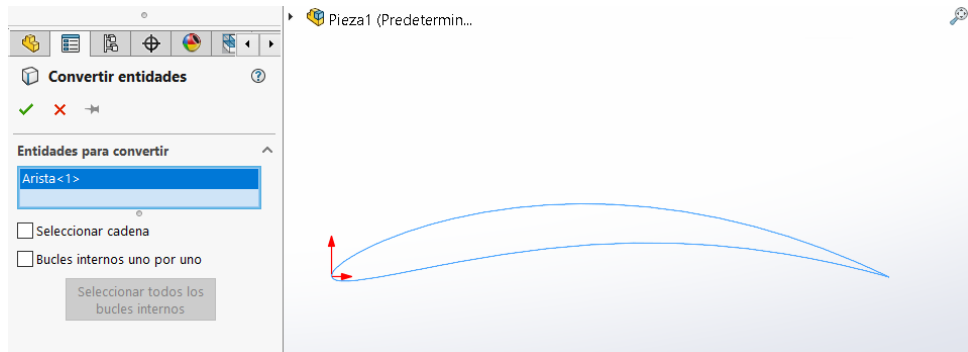


Figura 48. Conversió dels punts importats a un croquis.

Posteriorment, es generarà el croquis en el qual es podrà fer l'operació d'extrusió, visible a la figura 49.

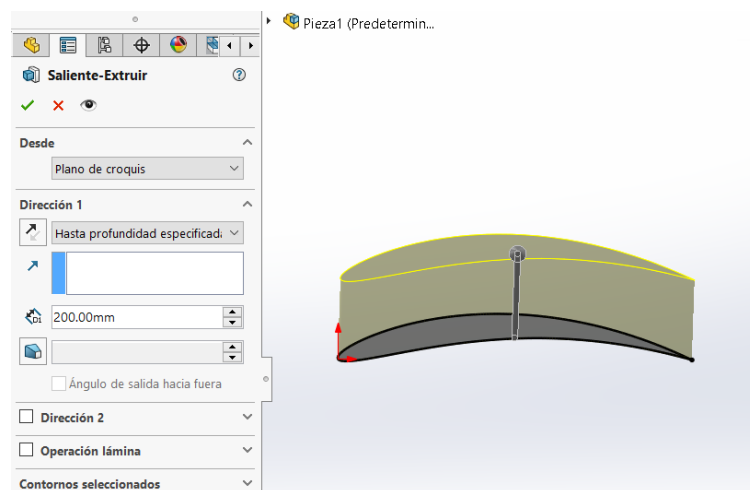


Figura 49. Procés d'extrusió del croquis.

A.1.2 Modificació dels perfils laterals

Com s'ha esmentat en l'apartat 2.1 Geometries inicials, s'ha hagut de realitzar un tall a causa dels problemes a l'hora de mallar parts primes.

En cas del perfil inicial S1210 12% de 0,8 metres de corda, el tall dut a terme es pot apreciar a la figura 50. El tall s'ubica a 0,720 metres de l'inici del perfil.

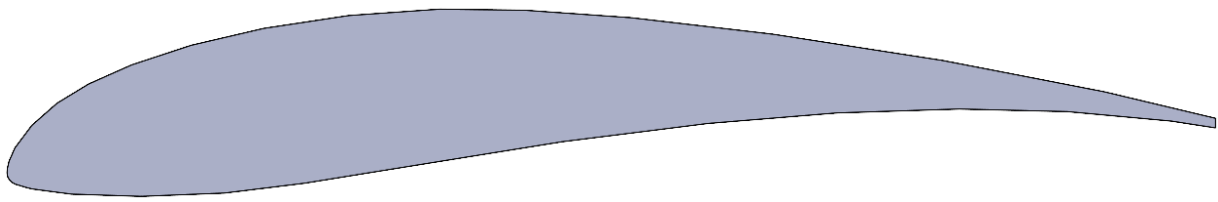


Figura 50. Perfil S1210 12% amb el tall fet.

Però, per tal de no deixar un tall sense cap mena d'arrodoniment, s'ha generat una extrusió a la part final amb un arc de radi 3 mil·límetres, observable a la figura 51.

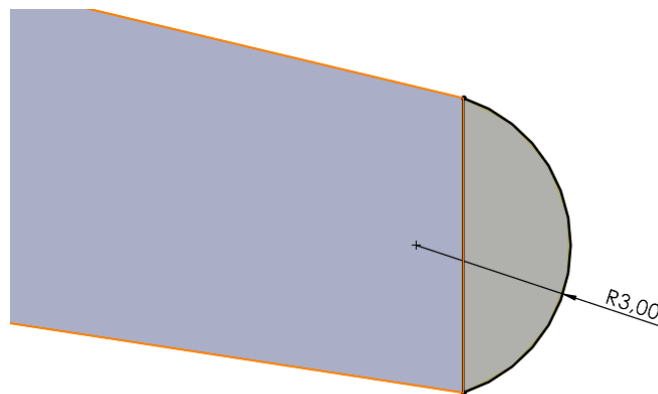


Figura 51. Arrodoniment aplicat al perfil S1210 12%.

En el cas del perfil NACA9508, s'ha optat per un tall a la distància de 0,750 metres i amb un arrodoniment tangencial. A la figura 52 es pot observar el perfil utilitzat després de les modificacions.

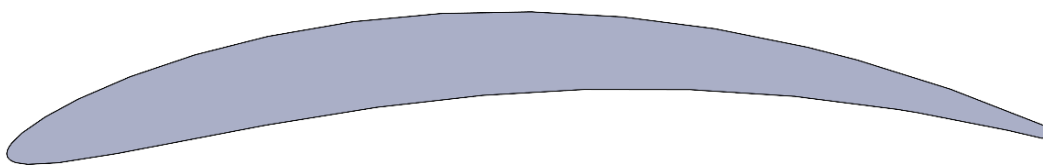


Figura 52. Perfil NACA9508 amb el tall fet.

En el perfil NACA0024 s'ha realitzat un tall a la distància de 0,790 metres, posició més posterior que en els dos altres perfils perquè el gruix del NACA0024 és superior. Un cop fet el tall s'ha generat un arrodoniment tangencial. A la figura 53 és pot observar el perfil utilitzat un cop dut a terme el tall.

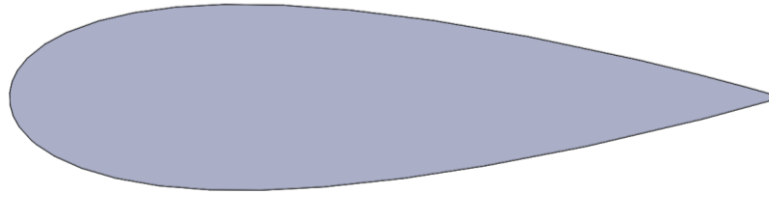


Figura 53. Perfil NACA0030 amb el tall fet.

A.1.3 Assemblatge dels components

Per tal de facilitar la construcció de la geometria s'ha optat per generar un assemblatge amb diferents peces, fet que permet modificar els angles d'incidència fàcilment.

Hi ha 3 peces, l'anomenada base, la part central, i els perfils laterals, que n'hi ha 4. Aquests es poden observar a la figura 54. (Consulteu Document núm.2: Plànols).

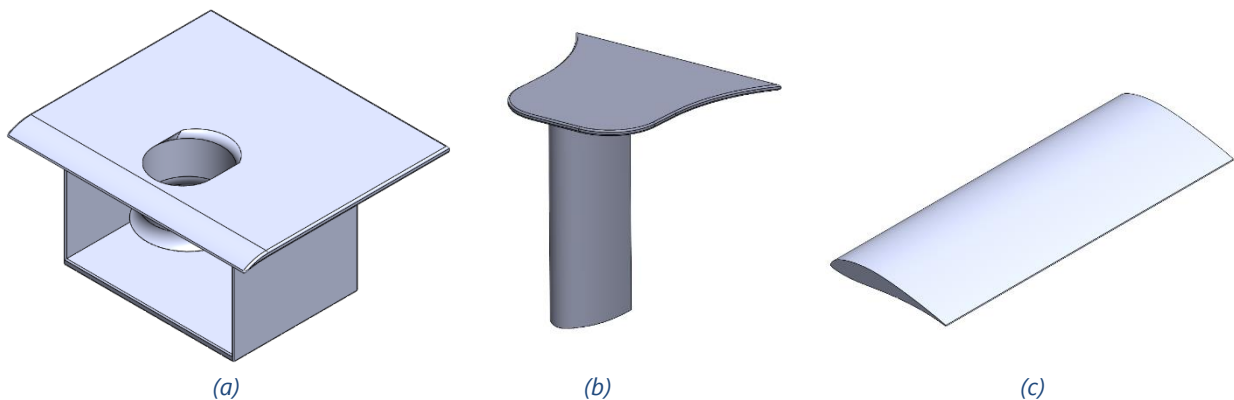


Figura 54. Components de l'assemblatge: (a) base; (b) perfil central; (c) perfil lateral.

A.1.4 Procés d'exportació de la geometria

Un cop creat l'assemblatge, per tal que no hi hagi errors entre les superfícies en contacte, s'ha generat una peça a partir de l'assemblatge. D'aquesta forma es pot aplicar l'operació "Intersecció", que permet fusionar diversos sòlids. Amb aquest procediment la peça és reconeguda com 1 sol sòlid i no diferents sòlids. A causa a la naturalesa de la geometria, aquesta operació s'ha de realitzar dos cops: el primer cop s'ha fusionat la base amb els perfils lateral i, finalment, s'ha fusionat el sòlid obtingut a causa a la primera intersecció amb el perfil central. Un cop acabat el procés, s'ha exportat la geometria en el tipus d'arxiu STEP AP214 (".step").

A.2 Generació del túnel virtual amb ANSYS WORKBENCH

Per a generar el túnel virtual en l'ANSYS s'utilitza el "Design Modeler", que permet crear geometries simples.

El primer pas és importar la geometria de l'aerogenerador. En l'apartat "File" es seleccionarà l'opció "Import External Geometry File". Un cop carregada la geometria es procedirà a fer el croquis sobre el pla de simetria, en el cas d'aquesta geometria, el pla YZ.

Un cop introduïdes les mesures es realitzarà l'operació "Extrude" on s'haurà d'introduir l'operació de "Add Frozen". La direcció haurà de ser "Reversed" a causa a la naturalesa de l'arxiu importat. S'establirà l'anteriorment mencionada amplada de 8 metres. Les dades es poden observar a la figura 55.

Details View	
[-] Details of Extrude1	
Extrude	Extrude1
Geometry	Sketch1
Operation	Add Frozen
Direction Vector	None (Normal)
Direction	Reversed
Extent Type	Fixed
<input type="checkbox"/> FD1, Depth (>0)	8 m
As Thin/Surface?	No
Merge Topology?	Yes
[-] Geometry Selection: 1	
Sketch	Sketch1

Figura 55. Dades introduïdes per a l'extrusió del túnel de vent virtual.

Un cop generada l'extrusió s'haurà d'aplicar una condició booleana situada a l'apartat "Create". Aquesta operació es pot configurar per a fer resta de geometries. Es restarà la geometria de l'aerogenerador al túnel de vent virtual. Per a fer-ho, es seleccionarà l'opció "Substract", on el "target body" és el túnel de vent i el "tool body" és la geometria de l'aerogenerador. Es pot observar les dades introduïdes a l'ANSYS a la figura 56.

Details View	
[-] Details of Boolean1	
Boolean	Boolean1
Operation	Subtract
Target Bodies	1 Body
Tool Bodies	1 Body
Preserve Tool Bodies?	No

Figura 56. Operació booleana per al túnel de vent virtual.

Seguidament, es realitzarà el mateix procés d'extrusió de la figura 55, però per a generar dos "body of influence" que serviran pel mallat, en aquests cossos, que no intervenen a la simulació, s'hi aplicarà un mallat més fi.

Finalment, es crearan les "Named Selection" necessàries, que són regions per a poder aplicar condicions de contorn, diferents operacions de mallat o per a calcular expressions.

Les "Named Selection" que es realitzaran seran les següents:

-Inlet: per a referenciar l'entrada.

-Outlet: per a referenciar la sortida.

-Slip: per a referenciar les cares del túnel de vent virtual que realment no són parets i on, per tant, no hi hauria d'haver tensió tallant.

-Symmetry: per a la cara del túnel de vent virtual on s'aplica la simetria.

-Inflation: per a les zones de la geometria on posteriorment s'aplicaran capes "inflation" en el mallat.

A.2.1 "Body of influence" generats

El primer "body of influence", que és el de dimensions majors, es pot observar la figura 57.

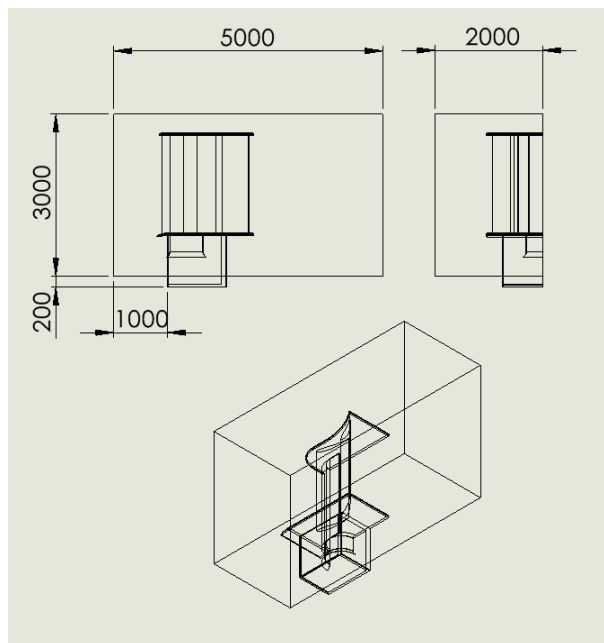


Figura 57. Mides del primer "body of influence".

El segon "body of influence", més petit, es pot observar a la figura 58.

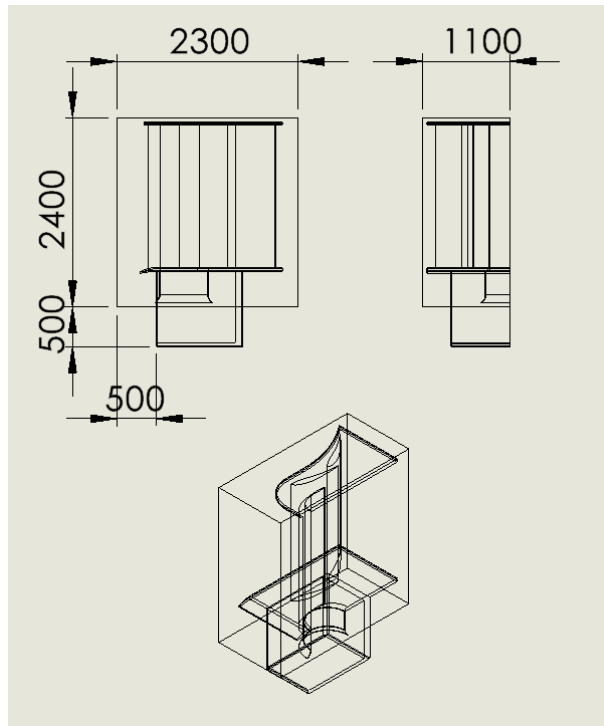


Figura 58. Mides del segon "body of influence".

A.3 Mallat

En aquest procés es discretitza el domini per tal de poder aplicar equacions per resoldre el comportament del flux. Com més petits siguin els elements que divideixen el domini, el resultat serà més precís.

Per a la malla dels dos primers prototips s'ha aplicat una mida d'element de 0,3 metres i una ràtio de creixement d'1,2.

En el primer "body of influence" s'ha aplicat una mida d'element de 5 centímetres. En el segon "body of influence" la mida de l'element és de 3 centímetres. Posteriorment, s'ha realitzat una mida d'element a les cares més importants de l'aerogenerador ("face sizing"). Les cares es mostren a la figura 59, on la mida d'element aplicada és d'1 centímetre.

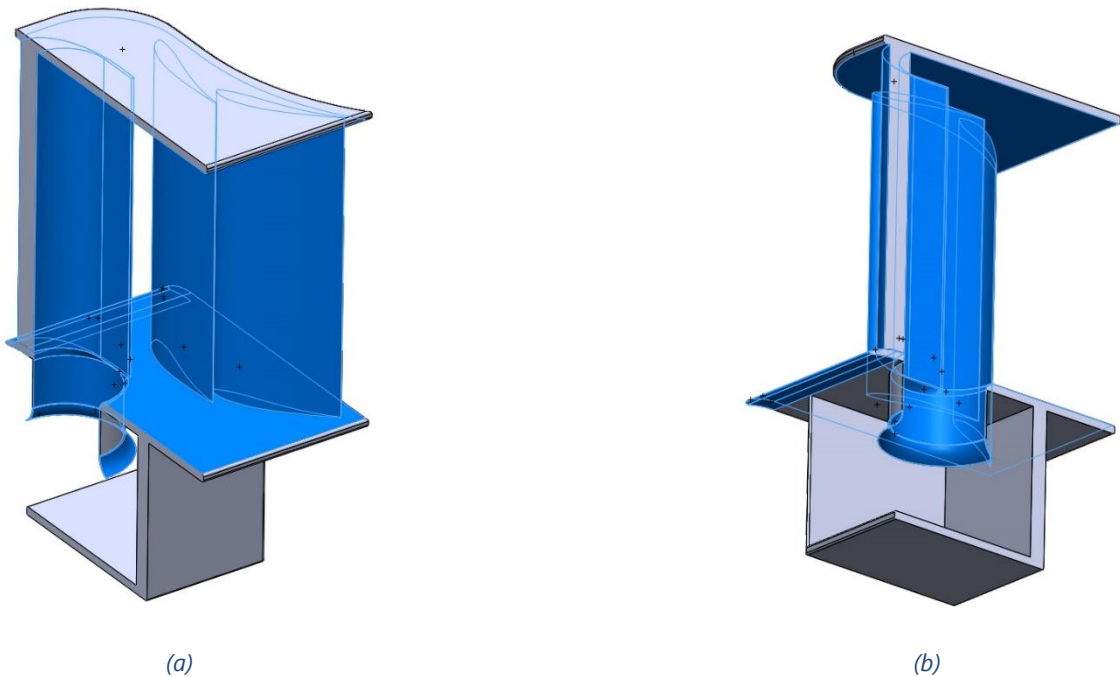


Figura 59. Cares seleccionades per al "face sizing": (a) vista posterior; (b) vista frontal.

En totes les cares de la geometria de l'aerogenerador s'ha generat un "inflation", on la mida total és d'1 centímetre en 10 capes o 5 capes depenent de la geometria. L'objectiu de l'operació "inflation" és captar amb millor precisió el comportament del flux a les zones properes a les parets.

Finalment, en càlculs posteriors als tres primers prototips, per temes de qualitat de mallat, s'ha aplicat una mida d'element de 5 mil·límetres a la part més crítica de la zona d'entrada la turbina: la superfície que delimita la cara exterior amb la interior, observable a la figura 60. Es referirà a aquesta operació com a "face sizing 2".

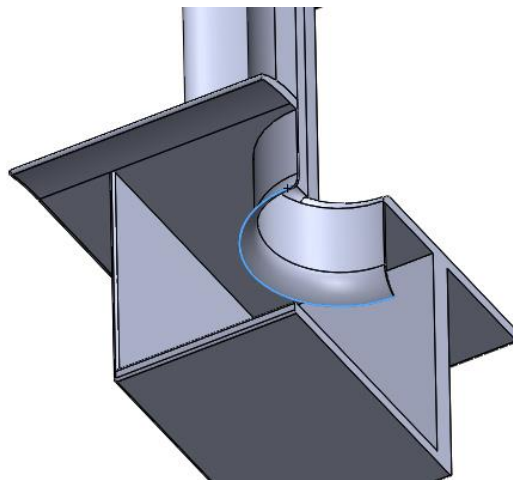


Figura 60. Superfície on s'ha aplicat el "face sizing 2", de menor mida d'element.

Estudi aerodinàmic d'un aerogenerador sense aspes

Per al tercer prototip, al ser la geometria bastant diferent, s'ha modificat el mallat: en el "face sizing" s'han seleccionat totes les cares que hi ha de més a la sortida del flux i s'ha disminuït de 10 a 5 les capes de l'operació "inflation".

Per als 3 primers prototips, les operacions realitzades per obtenir malla es poden observar a la taula 5.

	Mida "Body of influence 1" (mm)	Mida "Body of influence 2" (mm)	Mida "Face sizing" (mm)	Mida "Inflation" (mm)
Prototip 1	50	30	10	10 (10 capes)
Prototip 2	50	30	10	10 (10 capes)
Prototip 3	50	30	10	10 (5 capes)

Taula 5. Operacions realitzades al mallat als tres primers prototips.

Per als 3 primers prototips, les dades de la malla es poden observar a la taula 6.

	Nombre d'elements	Màxim valor de "Orthogonal quality"	Màxim valor de "Skewness"	Màxim valor de "Aspect ratio"
Prototip 1	11.232.069	0,088	0,897	259,26
Prototip 2	11.171.869	0,086	0,884	261,42
Prototip 3	9.514.039	0,064	0,936	52,71

Taula 6. Informació i característiques del mallats dels primers prototips.

Per les 4 configuracions que s'han estudiat exhaustivament, que són amb els perfils S1210 12% i el NACA9508 amb la configuració D i el perfil 0024 amb les configuracions H i I, les operacions de la malla són les que s'observen a la taula 7.

	Mida "Body of influence 1" (mm)	Mida "Body of influence 2" (mm)	Mida "Face sizing" (mm)	Mida "Face sizing 2" (mm)	Mida "Inflation" (mm)
S1210 12% Configuració D	50	30	10	5	10 (10 capes)
NACA9508 Configuració D	50	30	10	5	10 (10 capes)
NACA0024 Configuració H	50	30	10	5	10 (10 capes)
NACA0024 Configuració I	50	30	10	5	10 (10 capes)

Taula 7. Operacions realitzades al mallat per a les configuracions finals.

Les dades de les malles obtingudes per aquestes geometries són les de la taula 8.

	Nombre d'elements	Mínim valor de "Orthogonal quality"	Màxim valor de "Skewness"	Màxim valor de "Aspect ratio"
S1210 12% Configuració D	11.101.814	0,075	0,897	260,51
NACA9508 Configuració D	11.171.869	0,087	0,892	262,06
NACA0024 Configuració H	11.390.527	0,086	0,909	306,52
NACA0024 Configuració I	11.512.026	0,086	0,898	304,42

Taula 8. Dades dels mallats de les geometries finals.

A.3.1 Qualitat del mallat

Per determinar la qualitat d'un mallat hi ha diferents criteris que difereixen en valors mínims i màxims sobre mètriques de la discretització, tot i les diferències, es pot considerar un mallat correcte si es compleix els següents requisits:

- -"Orthogonal quality" $> 0,001$
- -"Skewness" $> 0,98$
- -"Aspect Ratio" < 50

Comparant amb els valors obtinguts s'observa com es compleixen els dos primers requisits, però, el criteri de "aspect ratio" no. No obstant això, s'ha decidit continuar amb aquest mallat a causa de l'augment exponencial del nombre d'elements si es vol reduir aquest valor, que amb els recursos disponibles, no és assumible.

A.4 Setup

El primer pas serà establir la simulació com a transitòria donada la naturalesa de la geometria, que no permet fer una anàlisi estacionari. El model de turbulència escollit és el model k-epsilon Standard, àmpliament usat en els estudis de dinàmica de fluids computacionals. S'empraran les constants definides per defecte, observables a la figura 61.

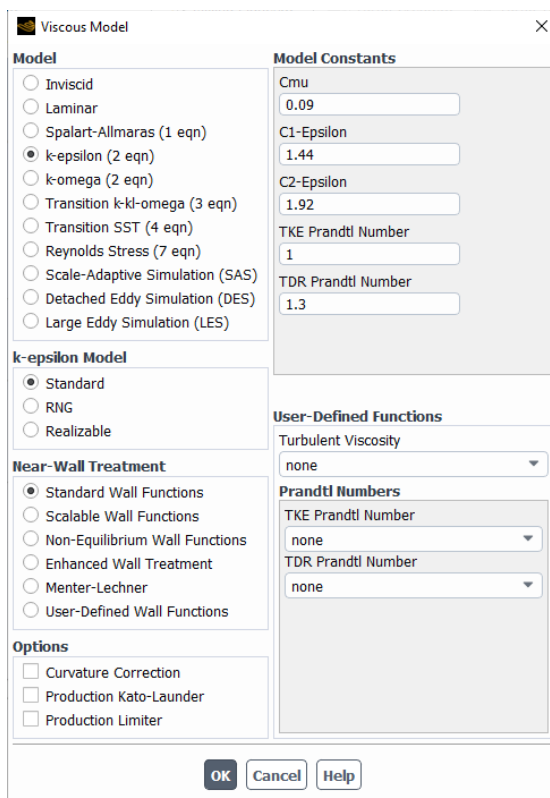


Figura 61. Setup del model de turbulència emprat, el k-epsilon.

Seguidament, s'establiran les condicions de contorn "inlet", "outlet", i "slip". En el "inlet" es definirà la velocitat d'entrada amb coordenades cartesianes a causa de la naturalesa de la geometria, on la direcció del vent té la component negativa de l'eix Z. Les dades introduïdes es poden observar a la figura 62, on en aquest cas la velocitat d'entrada és de 4 m/s.

Velocity Inlet

Zone Name: inlet

Momentum | Thermal | Radiation | Species | DPM | Multiphase | Potential | Structure | UDS

Velocity Specification Method: Magnitude and Direction

Reference Frame: Absolute

Velocity Magnitude [m/s]: 4

Supersonic/Initial Gauge Pressure [Pa]: 0

Coordinate System: Cartesian (X, Y, Z)

X-Component of Flow Direction: 0

Y-Component of Flow Direction: 0

Z-Component of Flow Direction: -1

Turbulence

Specification Method: Intensity and Viscosity Ratio

Turbulent Intensity [%]: 5

Turbulent Viscosity Ratio: 10

Apply Close Help

Figura 62. Introducció de dades de velocitat d'entrada pel setup.

Per a la sortida es definirà que la pressió relativa és 0. Es mostren les dades corresponents a la figura 63.

Pressure Outlet

Zone Name: outlet

Momentum | Thermal | Radiation | Species | DPM | Multiphase | Potential | Structure | UDS

Backflow Reference Frame: Relative to Adjacent Cell Zone

Gauge Pressure [Pa]: 0

Pressure Profile Multiplier: 1

Backflow Direction Specification Method: Normal to Boundary

Backflow Pressure Specification: Total Pressure

Prevent Reverse Flow

Radial Equilibrium Pressure Distribution

Average Pressure Specification

Target Mass Flow Rate

Turbulence

Specification Method: Intensity and Viscosity Ratio

Backflow Turbulent Intensity [%]: 5

Backflow Turbulent Viscosity Ratio: 10

Apply Close Help

Figura 63. Introducció de dades per la sortida del túnel de vent virtual.

Estudi aerodinàmic d'un aerogenerador sense aspes

Llavors es definiran les parets sense tensió tallant referenciades com "slip". La configuració introduïda es pot observar a la figura 64.

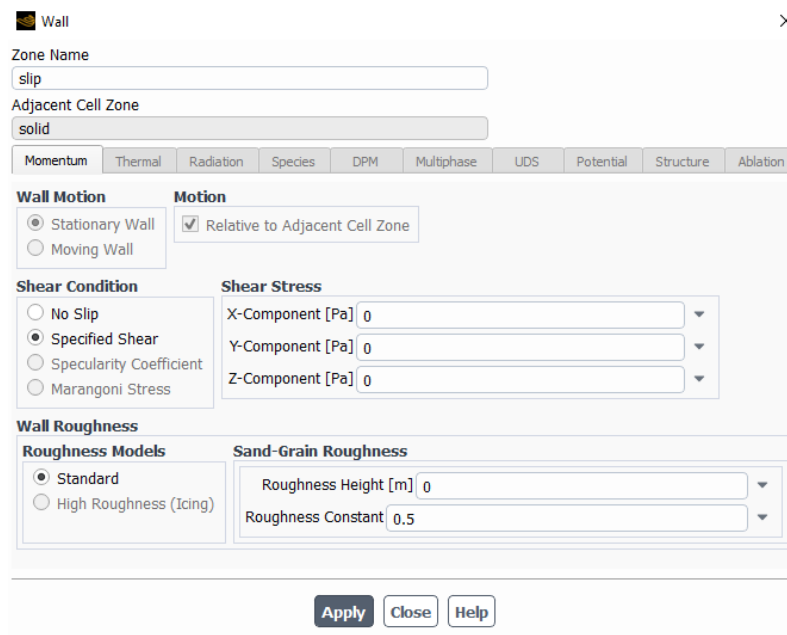


Figura 64. Setup introduït per a les parets lliscants.

Un cop definides les condicions de contorn es defineixen els criteris de convergència. S'ha optat per emprar els que hi ha per defecte, d' $1 * 10^{-3}$, observables a la figura 65.

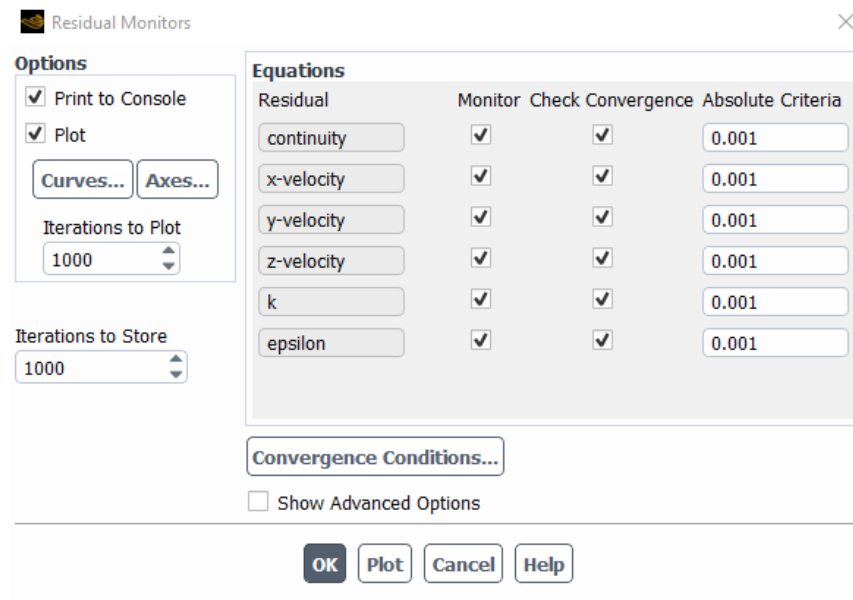


Figura 65. Criteris de convergència.

Per tal de fer possible la recopilació i el guardat de resultats al llarg del projecte, s'ha activat i utilitzat el guardat automàtic. Aquest guarda de manera automàtica el projecte segons l'interval de

temps seleccionat prèviament, que ha anat variant en les diverses simulacions. La finestra per a configurar-ho es mostra a la figura 66.

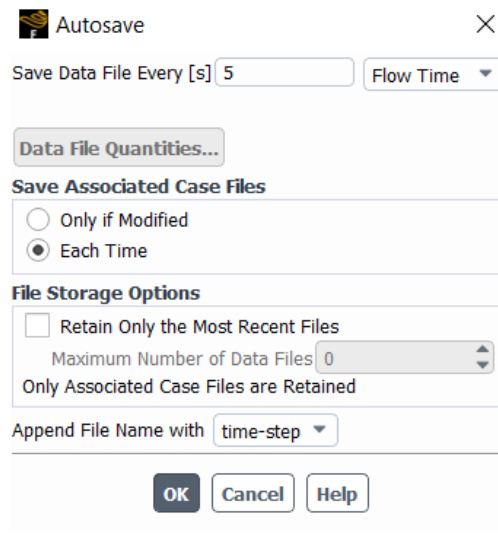


Figura 66. Finestra per introduir la configuració de guardat automàtic..

Finalment, per a realitzar cada càlcul s'ha d'especificar el nombre d'iteracions, el "time step", (pas de temps entre cada iteració), i les iteracions màximes per a cada pas de temps. Els "time step" han variat entre 0,2 i 0,001 segons. La diferència d'aquests valors es deu a l'alta turbulència en certs instants de les simulacions. En certs moments, per passos de temps superiors a 0,001 segons, la simulació no aconseguir convergir. Les iteracions màximes a cada "time step" sempre s'han configurat a 100, nombre el qual en cap simulació ha arribat en convergir amb menys iteracions. La figura 67 és un exemple d'una configuració emprada en algunes simulacions.

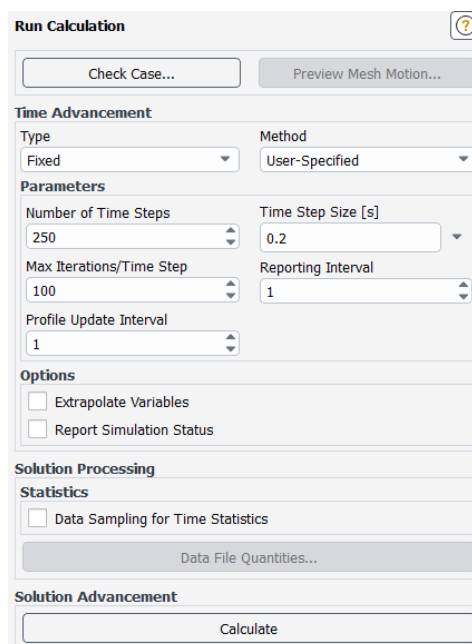


Figura 67. Configuració d'inicialització d'una simulació transitòria.

A.5 Obtenció de les dades

Per a obtenir els valors de la velocitat mitjana en el CFD-Post, s'ha creat un pla amb les coordenades que es poden observar a la figura 68. Aquestes dades formen un pla circular de 0,6 metres que s'ubica a la zona on hi hauria la turbina.

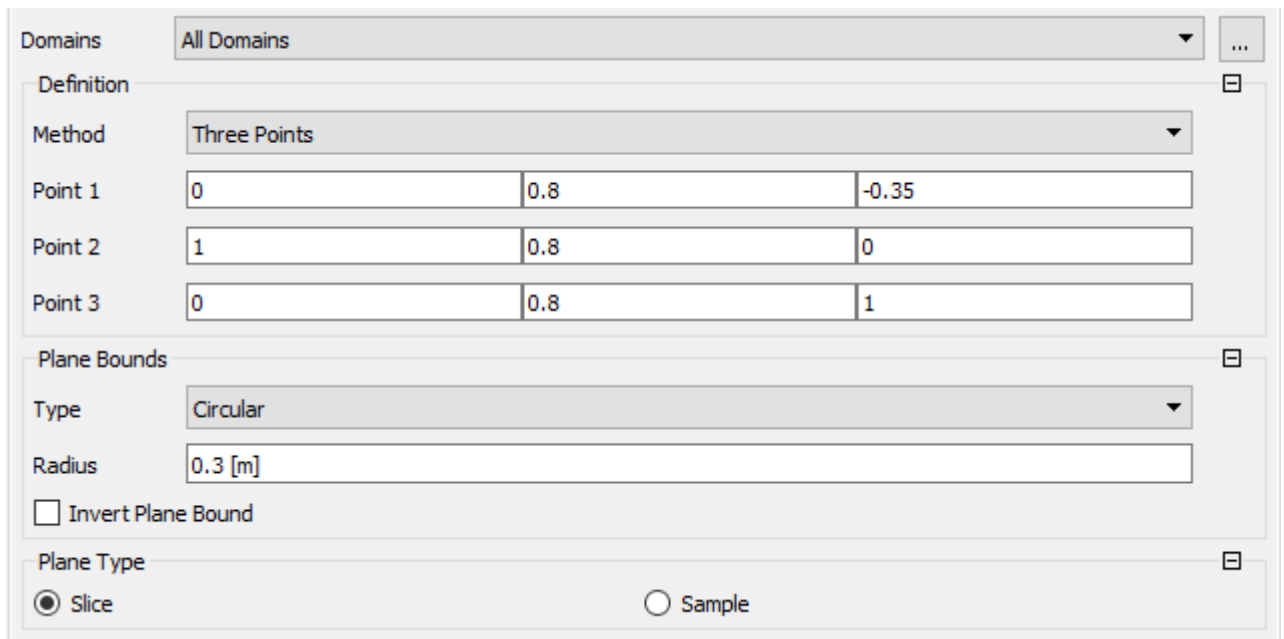


Figura 68. Generació del pla en el qual es calculen les velocitats mitjanes.

Un cop general el pla, es procedeix a calcular la velocitat mitjana la component vertical, tal com s'aprecia a la figura 69.

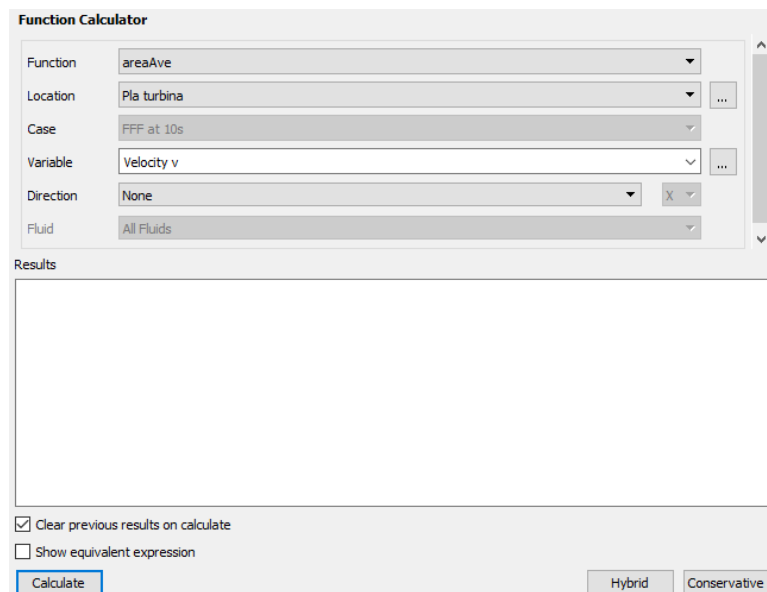


Figura 69. Mètode de càlcul de la velocitat mitjana.

Annex B: Informació sobre els perfils emprats

B.1 S1210 12%

El perfil S1210 12%, també conegut com a Selig S1210 és un perfil creat pel professor a la universitat d'Illinois Michael Selig [7], especialitzat en el disseny de perfils aerodinàmics per a la generació d'energia eòlica. La característica principal d'aquest perfil és el seu alt coeficient de "lift" per a angles d'incidència positius, arribant a superar el valor de 2 per a diferents nombres de Reynolds. A la figura 70 es pot apreciar el perfil.

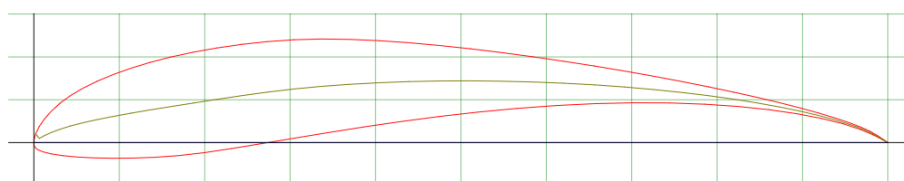


Figura 70. Perfil S1210 12% original.

Els valors de "lift" respecte de l'angle d'incidència es poden observar a la figura 71, on la línia lila correspon a un Reynolds de 500.000 i la daurada a un Reynolds de 200.000.

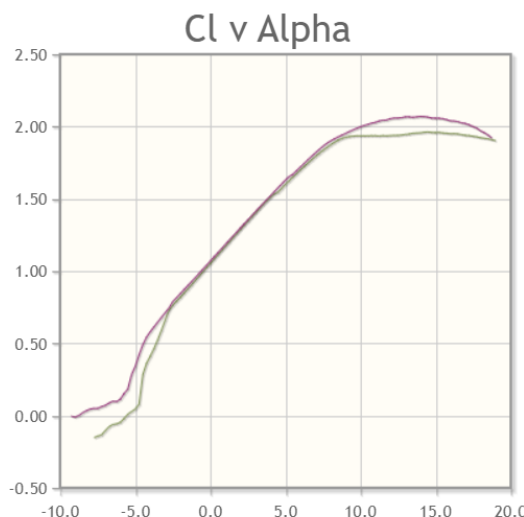


Figura 71. Coeficient de "lift" segons l'angle d'incidència per al perfil S1210 12%. La línia lila correspon a un Reynolds de 500.000 i la daurada a un de 200.000.

Es pot veure com per a valors d'entre 10° i 20° (eix horitzontal) el coeficient és àmpliament superior a 1,5. Per a angles d'incidència negatius també es pot observar com el coeficient de "lift" és positiu fins a aproximadament -5° , i per a angles majors és aproximadament 0. La interpretació del signe positiu o negatiu de l'angle d'incidència es pot observar a la figura 72, on l'angle és positiu.

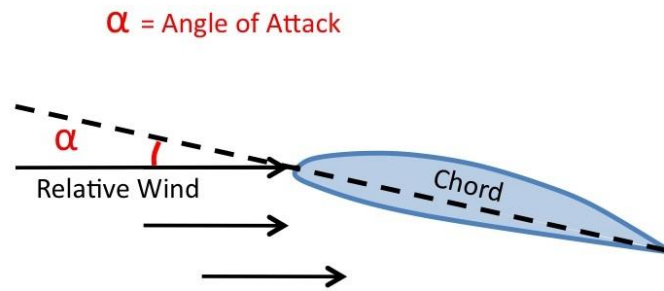


Figura 72. Representació de l'angle d'incidència.

B.2 NACA0030

El perfil NACA0030 pertany a la sèrie de perfils de 4 dígits del *National Advisory Committte for Aeronautics*. La nomenclatura ens indica que és un perfil simètric i té un gruix del 30% respecte a la longitud de la corda, a la figura 73 es pot observar el perfil.

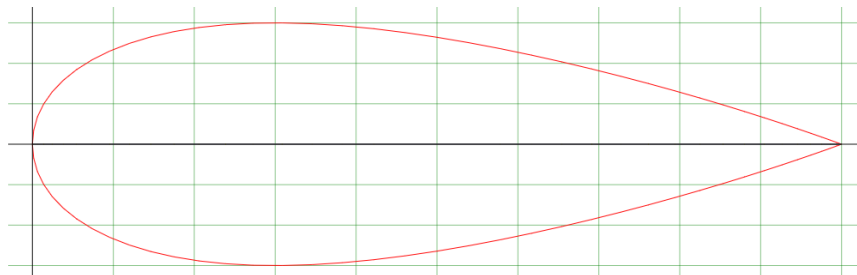


Figura 73. Perfil NACA0030 original.

B.3 NACA9508

El perfil NACA9508 també pertany a la sèrie de perfils de 4 dígits del *National Advisory Committte for Aeronautics*. La nomenclatura defineix certs aspectes: el 9 indica la curvatura màxima, del 9% de la longitud de la corda, referenciada com a "chord" a la figura 72. El 5 indica a on està ubicada la curvatura màxima, que en aquest cas està al 50% de la longitud de la corda. El 08 indica el percentatge del gruix màxim respecte la longitud de la corda, del 8%, que en aquest cas és un valor petit, ja que l'interval és d'entre un 1 i un 40%. El perfil es pot observar a la figura 74.

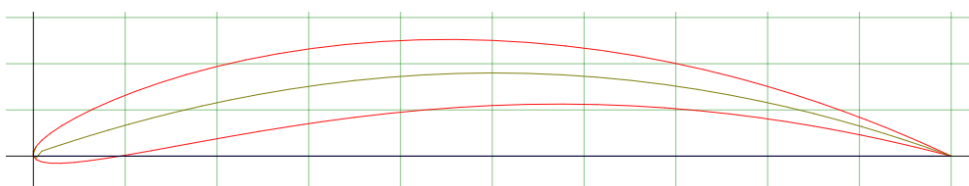


Figura 74. Perfil NACA9508 original.

B.4 NACA0024

El perfil NACA0024, com els dos perfils anteriors, pertany a la sèrie de perfils de 4 dígits del *National Advisory Committte for Aeronautics*. La nomenclatura ens indica que és un perfil simètric i té un gruix del 24% respecte a la longitud de la corda, es pot observar com el valor és molt superior al perfil NACA9508. El perfil descrit es pot veure a la figura 75.

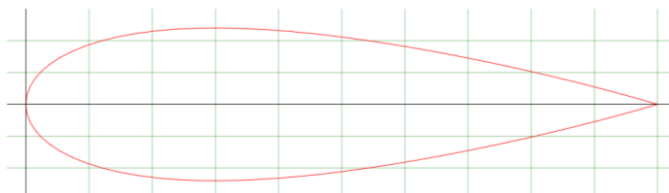


Figura 75. Perfil NACA0024 original.

El gràfic del coeficient "lift" segons l'angle d'atac es pot veure a la figura 76, on es representen les dades per al nombre de Reynolds de 500.000 (línia lila) i de 200.000 (línia daurada).

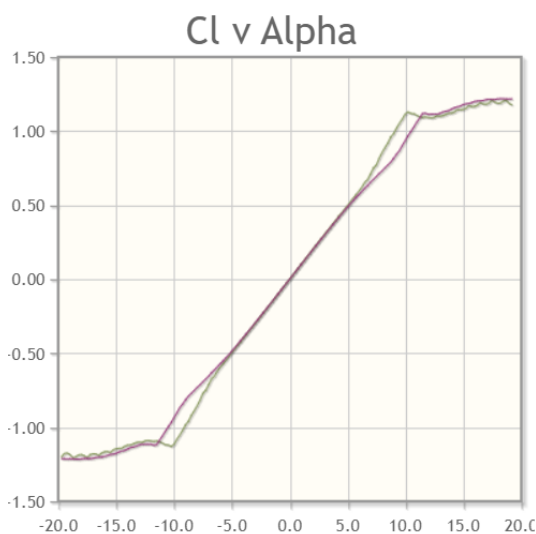


Figura 76. Coeficient de "lift" segons l'angle d'incidència per al perfil NACA0024. La línia lila correspon a un Reynolds de 500.000 i la daurada a un de 200.000.

Es pot apreciar com per a angles elevats el coeficient de "lift" va incrementant i no hi ha cap moment fins als 20° on el coeficient disminueixi per un augment de l'angle. Els valors de "lift" per al mateix d'angle d'incidència positiu o negatiu són els mateixos amb signe contrari al tractar-se d'un perfil simètric.

Annex C: Comparativa dels resultats obtinguts per a la modificació de la zona superior de la part central

A la figura 77 es representa l'evolució de la velocitat mitjana respecte al temps pels dos casos.

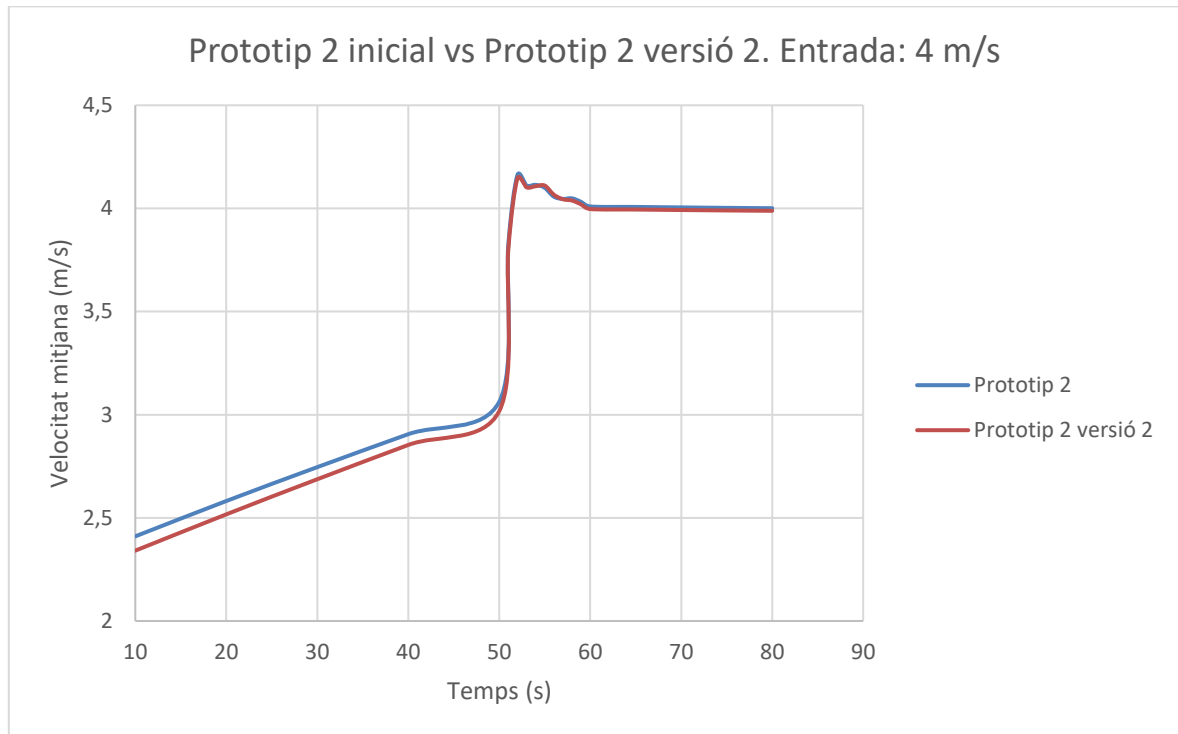


Figura 77. Comparació del valor objectiu entre el prototip 2 inicial i el prototip 2 versió 2.

Es pot observar com les diferències són mínimes tot i que en l'inici de la simulació el prototip 2 inicial és lleugerament superior. Un cop establitzada la velocitat mitjana, s'ha calculat com aproximadament la diferència és del 0,3%, valor negligible.

Annex D: Estudi econòmic

Per tal de poder valorar econòmicament el treball s'han dut a terme els amidaments que s'observen a la taula 9.

Disseny Solidworks	Num	Codi	UA	Descripció	Amidament
	1	1.1	h	Hores dedicades al disseny 3D	40
Optimització del mallat	Num	Codi	UA	Descripció	Amidament
	1	2.1	h	Hores dedicades al mallat	10
Càlcul del mallat	Num	Codi	UA	Descripció	Amidament
	1	2.2	h	Temps de càlcul del mallat	4
Setup	Num	Codi	UA	Descripció	Amidament
	1	2.3	h	Configuració del solver	2
Càlcul dels casos	Num	Codi	UA	Descripció	Amidament
	21	2.4	h	Temps de càlcul	16
Post-Procés	Num	Codi	UA	Descripció	Amidament
	21	2.5	h	Obtenció de resultats	2
Redacció del projecte	Num	Codi	UA	Descripció	Amidament
	1	3.1	h	Redacció del document	90

Taula 9. Amidaments.

Amb aquestes dades i la valoració per a cada partida s'obtenen els imports de la taula 10:

	Unitats (h)	Preu Unitari (€/h)	Preu Partida (€)
1. SOLIDWORKS			
1.1 Disseny Solidworks	40	15	600,00 €
2. ANSYS			
2.1 Optimització del mallat	10	12	120,00 €
2.2 Càlcul del mallat	4	8	32,00 €
2.3 Setup	2	10	20,00 €
2.4 Càlcul dels casos	336	8	2.688,00 €
2.5 Post-procés	42	12	504,00 €
3. Redacció			
3.1 Redacció del projecte	90	10	900,00 €

Taula 10. Imports per a cada partida.

Finalment, resumint per capítols i aplicant percentatges de benefici i IVA, s'obté l'import de 6.179,71 € tal com es mostra a la taula 11.

Estudi aerodinàmic d'un aerogenerador sense aspes

Capítols	Preu (€)
SOLIDWORKS	600,00
ANSYS	3.364,00
Redacció	900,00
Subtotal	4.864,00
Benefici (5%)	243,20
Subtotal	5.107,20
IVA (21%)	1.072,51
TOTAL	6.179,71 €

Taula 11. Import total de l'estudi.