



EPS

Escola Politècnica
Superior

Estudis: GRAU EN ENGINYERIA MECÀNICA

Títol: DETERMINACIÓ DE LA GEOMETRIA D'UN MOMOPLAÇA DE LA FÓRMULA STUDENT MITJANÇANT SIMULACIÓ SENSE MALLA

Document: MEMÒRIA I ANNEXOS

Alumnes: MARC SOLÉ LAMICH

Director/Tutor: Dr. Josep Ramón González Castro

Departament: Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Mecànica de Fluids

Convocatòria: Setembre 2014

ÍNDIX

1. INTRODUCCIÓ	3
1.1 Antecedents	3
1.1.1 Peticionari	3
1.1.2 Necessitat	5
1.2 Objecte	5
1.3 Especificacions i abast	5
1.3.1 Especificacions	5
1.3.2 Abast	6
2. PLANTEJAMENT	7
2.1 Coeficients aerodinàmics	7
2.1.1 Anàlisi competició	8
2.2 Normativa i limitacions	9
2.3 Parts del monoplaça creades	10
2.4 Software utilitzat	10
3. PROCEDIMENT	11
3.1 General	11
3.2 Palabos i Paraview	12
3.3 Programa comercial basat en Lattice-Boltzmann	13
4. DISSENY DEL MONOPLAÇA DE FÒRMULA STUDENT	14
4.1 Conjunt final	14
4.1.1 Característiques	14
4.1.2 Disseny gràfic	15
4.2 Carrosseria	16
4.2.1 Anàlisi de la competència	17
4.2.2 Disseny final	19
4.2.2.1 Geometria de partida	20
4.2.2.2 Alçada de nas	20
4.2.2.3 Pontons	21
4.2.2.4 Cul del vehicle	23
4.3 Difusor i fons pla	24
4.3.1 Introducció	24
4.3.1.1 Funcionament	25
4.3.1.2 Criteris de disseny	25
4.3.2 Anàlisi de la competència	27
4.3.3 Disseny final	28

4.3.3.1 Primera aproximació	29
4.3.3.2 Modificacions	30
a) Kit A	31
b) Kit B	32
c) Kit C	33
d) Kit D	34
5. RESUM DE PRESSUPOST	35
6. CONCLUSIONS	36
7. RELACIÓ DE DOCUMENTS	38
8. BIBLIOGRAFIA	39
ANNEX A NORMATIVA	41
ANNEX B SIMULACIÓ DE FLUIDS COMPUTACIONAL	45
B.1 Introducció al CDF	45
B.2 Lattice-Boltzmann	46
B.3 Conclusions	48
ANNEX C FUNCIONAMENT DE PALABOS	49
C.1 Funcionament	49
C.2 Execució	49
C.3 Paràmetres	51
ANNEX D VALIDACIÓ DE RESULTATS DE PALABOS	53
D.1 Paràmetres crítics per a la simulació	53
D.2 Validació de la esfera	56
ANNEX E PARALLELITZACIÓ DE PALABOS	62
E.1 Introducció	62
E.2 Parallelització mitjançant la comanda Unix	62
E.3 Nombre de Cores Òptim	63
ANNEX F DISSENY DE LA CARROSSERIA	66
F.1 Anàlisi de la competència	66
F.2 Alçada de nas	70
F.3 Dimensionament de la entrada d'aire dels pontons	73
F.4 Simulació de la carrosseria amb pontons	77
F.5 Simulació de la carrosseria sense pontons amb Palabos	81
ANNEX G DISSENY DEL DIFUSOR	86
G.1 Primera aproximació	86
G.2 Modificacions del difusor	88
ANNEX H SIMULACIÓ CONJUNT FINAL	96
ANNEX I FABRICACIÓ DELS ELEMENTS AERODINÀMICS	99

INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

1.1.1 Peticionari

Enguany a l'Escola Politècnica Superior de la Universitat de Girona s'ha creat un grup d'estudiants, anomenat UdG Racing Team, que té com a objectiu participar en la Fórmula Student de l'any vinent.

La Fórmula Student és una competició universitària d'automòbils esportius on cada universitat crea el seu propi monoplaça. La Fórmula Student és una competició internacional que se celebra cada any al circuit de Silverstone (Regne Unit) la primera setmana de Juliol. L'objectiu de la competició és simular una situació real en la qual l'empresa de competició contracta enginyers per a desenvolupar un prototip. El cotxe ha de satisfer unes prestacions elevades d'acceleració, frenada i estabilitat però també ha de ser fiable, econòmic i fàcil de mantenir.

L'equip UdG Racing Team té com a objectiu participar en la categoria de Classe 1. En aquesta categoria participen monoplaçes totalment construïts i que són capaços de moure's. Aquesta categoria és la més important de totes, on els equips estan obligats a modificar any rere any el seu cotxe per poder-hi participar.

L'equip UdG Racing Team està format per 35 estudiants de la universitat de Girona. Aquests universitaris estudien graus diferents per tal de treballar millor les diferents disciplines que es necessiten per desenvolupar el monoplaça. Per tal de distribuir millor la feina, l'equip té una estructura jeràrquica on hi ha dirigents o comitès de decisions tècniques i dirigents de coordinació generals. Aquests són els representats en la taula 1.1 i la taula 1.2.

Taula 1.1: Comitès del equip UdG Racing Team

Comitè de coordinació generals	Comitè de decisions tècniques
Alguns membres de l'equip	Comitè de decisions mecàniques Comitè de decisions electròniques Comitè de decisions elèctriques

Taula 1.2: Responsables comitès del equip UdG Racing Team

Comitè de decisions mecàniques	Comitè de decisions electròniques	Comitè de decisions elèctriques
<ul style="list-style-type: none"> · Responsable mecànica · Responsable de Xassís · Responsable de dinàmica i suspensions / transmissió · Responsable de direcció /frens / rodes · Responsable d'aerodinàmica 	<ul style="list-style-type: none"> · Responsable electrònica · Responsable Adquisició de dades · Responsable Controlador · Responsable Instrumentació 	<ul style="list-style-type: none"> · Responsable elèctric · Responsable motor · Responsable bateria · Responsable seguretat i cablejat

De manera gràfica el equip està estructurat segons l'organigrama de la figura 1.1.

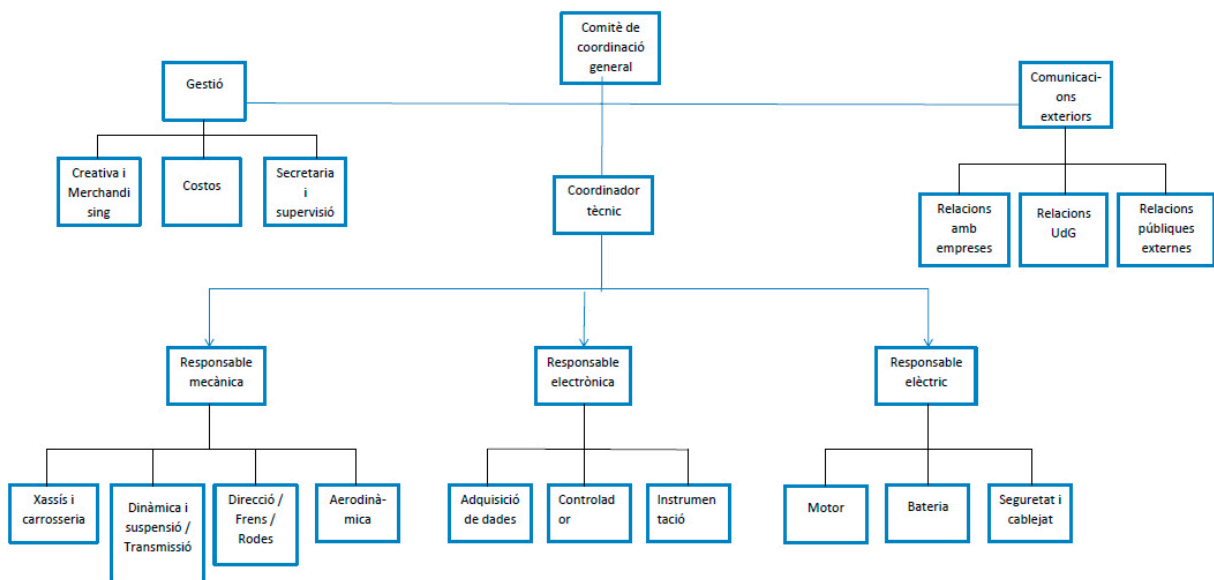


Figura 1.1: Organigrama UdG Racing Team

La secció d'aerodinàmica està formada per 7 estudiants, dels quals 3 realitzen el treball fi de grau sobre l'aerodinàmica del monoplaça. Dels altres dos treballs de fi de grau, un es dedica al sistema de refrigeració intern i l'altre es dedica a l'estudi de la geometria externa utilitzant software convencional.

Aquest projecte és un projecte inicial, a partir del qual se'n faran d'altres referents a l'encolatge de les diferents parts i de altres apèndixs aerodinàmics.

1.1.2 Necessitat

L'equip UdG Racing Team té la necessitat d'obtenir un disseny generat amb CAD tridimensional d'una carrosseria i difusor partint de zero. La carrosseria i difusor ha de complir amb el reglament de la competició i amb les limitacions imposades per l'equip amb els millors coeficients aerodinàmics possibles.

1.2 Objecte

Dissenyar la carrosseria i difusor del monoplaça. Extreure'n els valors dels coeficients aerodinàmics (resistència a l'avanç i coeficient de sustentació) i la força total que generen aquests coeficients per a velocitats de 20, 25 i 30 metres per segon expressada en Newtons. També elaborar un pressupost de fabricació aproximat per tenir uns costos de referència.

1.3 Especificacions i abast

1.3.1 Especificacions

Tema	R/D ¹	Descripció
Funció	R	Tenir uns bons coeficients aerodinàmics
	D	Tenir un alt coeficient de càrrega aerodinàmica
Dimensions	R	Complir les dimensions reglamentàries imposades per la normativa.
	R	Complir les dimensions de batalla 1600mm i d'eix de davant i de darrere de 1220 i 1180mm respectivament
Simulació	R	Utilitzar software de simulació basat en el mètode Lattice-Boltzmann
Refrigeració	D	Tenir una bona refrigeració del motor utilitzant entrades d'aire als pontons
Disseny	D	Tenir un bon disseny visual
	D	Utilitzar els colors de la universitat de Girona (blanc i blau)
	R	Complir amb la normativa establerta per la competició en aspectes de disseny
Costos	R	Costos de material de fabricació inferiors a 3000€

¹ Requeriment o Desig

1.3.2 Abast

Generar la geometria tridimensional d'un monoplaça (carrosseria i difusor) de Fórmula Student. Analitzar la geometria mitjançant software CFD basat en el mètode de Lattice-Boltzmann per extreure'n els valors del coeficient de resistència a l'avanç i del coeficient de càrrega aerodinàmica.

En aquest projecte no s'inclou la fabricació de cap part del vehicle ni els plànols de fabricació d'aquest. Tampoc es determinarà com s'ha de dur a terme la fabricació de les diferents parts del vehicle, ni la connexió de les diferents parts al xassís o les diferents parts entre elles. Ja que aquest apartat d'ancoratge i fabricació correspondrà a un nou projecte. Únicament es requereixen les geometries tridimensionals generades amb format *3dm* i *stl*.

Realitzar pressupost aproximat dels costos de fabricació de la carrosseria i del difusor per tindre valors de cost de referència.

Únicament es dissenyarà l'exterior de la carrosseria i el difusor. Les altres parts aerodinàmiques del monoplaça (alerons i apèndix) es dissenyaran en projectes posteriors.

2. PLANTEJAMENT

2.1 Coeficients aerodinàmics

En tot estudi aerodinàmic, abans de generar la geometria, s'ha de determinar que es vol aconseguir amb aquesta. Existeixen dos coeficients aerodinàmics de vital importància en automoció: el coeficient de resistència a l'avanç C_d (comunament anomenat "drag") i el coeficient de sustentació C_l (anomenat "lift"). Aquests dos coeficients estan relacionats amb la força total exercida del vehicle sobre el flux. El coeficient aerodinàmic de resistència a l'avanç està relacionat amb la força total resistent en la direcció d'avanç del vehicle. Mentre que el coeficient de sustentació és la força total en la direcció vertical ascendent. Amb automoció el que interessa és obtenir sustentació negativa per tal que l'automòbil aconsegueixi major adherència a la pista. De tal manera que aquest coeficient es passa a anomenar càrrega aerodinàmica i el valor de C_l serà negatiu. Existeix un altre coeficient que completaria els tres eixos ortogonals, aquest no és d'importància per a l'estudi del monoplaça, ja que aquest es mourà en una direcció. Les forces laterals seran degudes al vent i són de direcció variant i de poca magnitud, ja que la velocitat del vent serà baixa en comparació amb la velocitat del vehicle [1,2].

En dissenyar un automòbil de competició es pot intentar reduir la resistència a l'avanç, per tal d'obtenir una velocitat punta més elevada o augmentar la càrrega aerodinàmica per tal de poder augmentar la velocitat en les corbes i intentar reduir el pas per volta. En augmentar el coeficient de càrrega aerodinàmica també augmentem el coeficient de resistència a l'avanç, de tal manera que s'ha de buscar una relació de compromís. Depenent de les característiques de la competició interessa tindre un monoplaça amb menys càrrega aerodinàmica però una resistència a l'avanç molt baixa (competicions de baix consum de carburant) o bé augmentar el coeficient de càrrega aerodinàmica encara que la resistència a l'avanç se'n vegi perjudicada (per exemple la Fórmula 1).

Per tal de saber la relació de sacrifici que ha de tenir el monoplaça de la Fórmula Student s'ha d'estudiar la competició, quines són les diverses proves en què competeix el monoplaça i quin coeficient aerodinàmic ajuda a obtenir millors resultats. A més s'ha d'estudiar si el motor és capaç de suportar la resistència a l'avanç i com l'afecta.

Un cop fet l'anàlisi s'arriba a la conclusió que el més important és obtenir un bon coeficient de càrrega aerodinàmica i que el coeficient de resistència a l'avanç no és gaire important.

2.1.1 Anàlisi competició

Tal com s'ha esmentat en anterioritat s'ha d'estudiar la competició per tal de determinar els coeficients aerodinàmics més adients. En la Formula Student els aspectes que s'avaluen són els següents:

Aspectes estàtics	325 punts
- Disseny	150 punts
- Anàlisi de costos	100 punts
- Presentació de l'equip	75 punts
Aspectes dinàmics	675 punts
- Skidpad	50 punts
- Acceleració	75 punts
- Autocross	150 punts
- Resistència	400 punts
Total	1000 punts

Els diferents aspectes avaluats tenen una importància diferent dins de la competició. Cada un dels aspectes avaluats té un nombre de punts assignats. L'equip que aconsegueixi sumar més punts serà l'equip vencedor. Per avaluar els aspectes dinàmics es realitzen 4 proves, una per a cada aspecte avaluat.

La primera prova, anomenada Skidpad, consisteix a fer una figura de 8 sobre asfalt amb el menor temps possible. Aquesta prova és clarament de càrrega aerodinàmica. La segona prova és la prova d'acceleració del vehicle, on qui aconsegueixi fer en línia recta 75 metres en menor temps guanya. La segona prova afavoreix als cotxes amb baix coeficient de resistència a l'avanç. La tercera prova és la de autocross/sprint, aquesta consisteix a realitzar una volta de 1 km amb el menor temps possible. El circuit és de conus i es penalitza tocar-los. El circuit no té rectes així que el que importa és la càrrega aerodinàmica per tal de poder esquivar els conus a la velocitat més gran possible. Finalment, en l'última prova s'avalua la resistència del vehicle. Aquesta prova consisteix a rodar 22 km en el circuit en el menor temps possible. També beneficia tindre un alt coeficient de càrrega aerodinàmica però s'ha de vigilar amb la fiabilitat.

Per tant, 75 punts de 1000 són per a la resistència a l'avanç i la resta són de càrrega aerodinàmica. En conclusió, es buscarà que el vehicle tingui la major càrrega aerodinàmica

sacrificant la resistència a l'avanç. Ara bé, si les millores comporten molt poca càrrega aerodinàmica i penalitzen molt la resistència a l'avanç s'hauran d'avaluar.

Altres aspectes a tenir en compte són els aspectes estàtics de disseny i anàlisi de costos. El disseny és important, implica un 15% del còmput de punts i està molt relacionat amb l'aerodinàmica, ja que les parts aerodinàmiques són exteriors i determinen el disseny del monoplaça. Els costos no són molt importants, ja que en fer el monoplaça de forma manual el que més incrementa el preu és el material seleccionat i no les formes geomètriques.

La normativa imposa un límit de potència de 40 kW per roda motriu, és a dir, 80 kW en total. La potència de 80 kW és molt gran per a les velocitats que pot agafar el monoplaça en circuit així que s'utilitzarà part de la potència per a superar la força deguda a la resistència a l'avanç sense gairebé penalització de temps per volta.

2.2 Normativa i limitacions

Per al disseny del monoplaça és molt important complir la normativa, ja que si no la compleix, el monoplaça queda desqualificat de la competició. Quant a geometria exterior del monoplaça hi ha diverses restriccions adjuntades en l'annex A.

També és important respectar els acords dimensionals que s'ha pres amb la resta de l'equip. Aquestes restriccions són:

- Batalla del vehicle (distància entre eixos): 1600 mm
- Eix davanter: 1220 mm
- Eix darrere: 1180 mm
- Pneumàtics davanters com posteriors: 20,5x7x13" (diàmetre: 520,7mm) (Hoosier Formula Student, tipus de roda proporcionat per la competició)
- Xassís: la geometria tridimensional del xassís ja està generada. No hi pot haver interferències entre el xassís i la carrosseria.

Aquestes limitacions junt amb la normativa marcaran de manera significativa el disseny del cotxe.

2.3 Parts del monoplaça creades

D'un automòbil de competició se'n trien les parts més importants que ha de tenir un monoplaça de Formula Student. Aquestes són: la carrosseria amb pontons, difusor, alerons davanters i posteriors i altres apèndixs aerodinàmics que cuidin el conjunt del monoplaça.

Cada una de les diferents parts s'estudia per separat. Un cop es tenen les geometries de les diferents parts generades s'ajunten i es calcula el coeficient aerodinàmic total. A partir d'aquesta última simulació se'n fa una anàlisi i se'n proposen millores que afavoreixin l'aerodinàmica del conjunt total. En aquest projecte només s'estudia la carrosseria i difusor.

2.4 Software utilitzat

Actualment s'està implementant en el mercat un nou sistema de software CFD (Dinàmica de Fluids Computacional) per a la simulació de fluids. Aquest software es basa en el mètode Lattice-Boltzmann que utilitza un sistema de punts en comptes del mallat tradicional per assolir els resultats de la simulació. Presenta com a principal avantatge que la implementació de geometries complexes és més senzilla que la del mètode de simulació tradicional. De tal manera que es redueix el temps d'implantació de la geometria i el temps guanyat es pot dedicar a modificar la geometria.

En l'Annex B (simulació de fluids computacional) es descriu exhaustivament el CFD i el mètode de Lattice-Boltzmann.

En aquest projecte s'utilitza el programa Palabos per estudiar una geometria. El programa Palabos és de software lliure i s'avalua i se'n descriu el seu funcionament de manera exhaustiva. Seria interessant realitzar totes les simulacions amb el programa de codi lliure però per falta de recursos informàtics s'utilitza, per a la resta de simulacions, un programa basat en Lattice-Boltzmann comercial.

3. PROCEDIMENT

3.1 General

Tal com s'ha descrit en el plantejament s'utilitza un software CFD basat en Lattice-Boltzmann. El procediment a seguir per a la simulació mitjançant software CFD consta de tres etapes.

Durant la primera etapa es genera la geometria mitjançant el programa informàtic Rhinoceros 5 i l'aplicació de t-splines que simplifica notablement la generació i la seva modificació. La geometria es guarda en format ".stl" per tal d'incorporar-la al software de simulació.

En la segona etapa s'incorpora la geometria al programa i es trien les condicions de simulació. Les condicions de simulació són tant la mida del túnel de vent o posició de la geometria com unitats físiques del fluid o unitats de Lattice. Les condicions de simulació ja es descriuran en capítols posteriors. Un cop finalitzada la segona etapa s'executa el programa.

La tercera és l'etapa de recollida de dades. A partir de la simulació tridimensional se'n poden extreure els coeficients aerodinàmics a cada eix, diagrames de velocitat i pressió, línies de corrent i isosuperfícies.

Com s'ha descrit en anterioritat s'utilitzen dos programes de simulació CFD basats en Lattice-Boltzmann per a l'elaboració del projecte. Aquests dos programes s'utilitzen per a les dues últimes etapes. Els dos programes informàtics són el programa de codi lliure Palabos i un programa comercial basat en software lliure. Depenent del programa utilitzat el procediment és diferent. No s'ha utilitzat per a l'elaboració del programa únicament el programa Palabos per manca de recursos informàtics, fet que s'explicarà més endavant. D'altra banda s'estudia la seva fiabilitat i es descriu el procediment per a executar-lo adequadament per tal de poder realitzar totes les simulacions fetes amb el programa comercial si es disposa d'un super ordinador capaç d'executar-lo.

En el cas de Palabos, un cop obtinguda la geometria s'incorpora dins del programa. La implementació del model al programa es realitza mitjançant una subrutina de l'arxiu de codi del programa. Es canvien els paràmetres en l'arxiu .xml i s'executa el programa. Un cop obtinguts els resultats, s'analitzen mitjançant el programa de codi lliure Paraview.

D'altra banda, el programa comercial disposa de totes les eines dins d'una interfície des d'on

es pot importar la geometria, triar les condicions de simulació, executar-lo i obtenir les dades.

3.2 Palabos i Paraview

Palabos és un software informàtic de codi lliure basat en el mètode Lattice Boltzmann. L'última actualització del software realitzada el 16 de maig de 2013 permet implementar geometries en tres dimensions en format .stl. De tal manera que es pot implementar qualsevol geometria generada per Rhinoceros.

Palabos treballa sobre el sistema operatiu Linux. Encara que també es pot executar en Windows i Mac, el programa obté millors resultats sobre el sistema operatiu Linux. El programa no disposa d'una interfície gràfica, sinó que disposa de diferents arxius que s'executen a partir del terminal.

L'annex C està dedicat a explicar el funcionament del programa i com fer-lo servir per fer una simulació en un túnel de vent virtual. També es dedica l'annex E a explicar com treure'n el màxim rendiment executant el programa en paral·lel i executar-lo des d'un servidor.

En ser un programa no comercial i en constant desenvolupament es vol comprovar que els resultats són fiables. La validació de resultats s'inclou dins l'annex D. En aquest annex s'analitzen els paràmetres que influeixen més per obtenir bons resultats i se simula una esfera en diferents valors de Reynolds per comparar-los amb resultats teòrics.

Com s'ha explicat en anterioritat no es fan totes les simulacions utilitzant el programa Palabos. Per falta de recursos informàtics només es fa el càlcul de la carrosseria per comprovar l'eficiència del programa. Aquesta simulació de la carrosseria està inclosa dins l'annex F.

Paraview és un programa de representació de resultats. Aquest programa és també de codi lliure i treballa en el sistema operatiu Linux però té interfície gràfica. A partir d'aquest programa es poden obtenir diagrames de velocitat, pressió, isosuperfícies i línies de corrent per a cada instant temporal guardat.

3.3 Programa comercial basat en Lattice-Boltzmann

El programa comercial té un funcionament més senzill que Palabos i presenta una velocitat de càlcul superior. Aquest és el fet pel qual s'ha triat aquest programa per a realitzar la majoria de simulacions referents a la geometria del monoplaça. Introduint les mateixes condicions de contorn el temps de càlcul és de l'ordre de 3 vegades més ràpid. Aquest fet implica que es pot tenir una resolució més acurada i per tant s'eviten els errors del programa Palabos i s'obtenen resultats més acurats.

En el cas del programa comercial són menys les variables que es poden introduir de manera senzilla. A l'igual que amb Palabos es pot triar les mides del túnel de vent i la posició de la geometria. Al tindre interfície és més senzilla la implementació de la geometria dins del programa. Quant a condicions de simulació es pot implementar la velocitat, acceleració, direcció i propietats del fluid. També es pot introduir el terra del túnel amb la seva velocitat i acceleració. A més, es pot incorporar la resolució en l'eix Y de la simulació (que és un paràmetre Lattice) i la freqüència en la qual es volen obtenir els resultats.

El programa comercial paral·lelitzava de manera adequada i senzilla. Dins la interfície es pot triar el nombre de cores, i en aquest cas, un major nombre de cores equival a una major velocitat de simulació.

Per a l'obtenció de resultats es poden obtenir diagrames de velocitat, pressió, vorticitat etc. en qualsevol pla de l'espai per als diferents instants temporals determinats a partir de la freqüència en la qual es volen obtenir resultats. Es pot obtenir també isosuperfícies, línies de corrent i la pressió exacta de cada punt de l'espai mitjançant la utilització de sensors.

4. DISSENY DEL MONOPLAÇA DE FÒRMULA STUDENT

4.1 Conjunt final

D'acord amb la petició de l'equip UdG Racing Team s'ha determinat la geometria de la carrosseria i del difusor. Les dues parts s'han acoblat sense cap tipus de fixació, ja que aquesta tasca correspon a un altre projecte. A més, s'ha acoblat una aproximació de la suspensió, el xassis i les rodes que s'utilitzaran per a la competició. El resultat final obtingut es pot observar en la figura 4.1.



Figura 4.1: Perspectiva conjunt final 1

La geometria del conjunt final compleix amb la reglamentació de la competició i els acords dimensionals establerts a l'equip.

4.1.1 Característiques

En aquest projecte s'ha analitzat únicament la geometria i aerodinàmica del conjunt final. Les característiques geomètriques d'aquest són les següents:

- Longitud total: 3360 mm
- Alçada total: 1050 mm
- Amplada total: 1600 mm
- Batalla: 1600 mm

La geometria final s'ha simulat en el software comercial i s'han obtingut els següents resultats, inclosos en la taula 4.1.

Taula 4.1 : Resultats aerodinàmics del conjunt final

Velocitat	20 m/s (72km/h)	25 m/s (90km/h)	30 m/s (108km/h)
C_d	1.075		
C_l	-0.319		
Àrea frontal	1.008 m ²		
Resistència a l'avanç	265.48 N	414.81 N	597.33 N
Càrrega aerodinàmica	-78.78 N	-123.94 N	-177.25 N

Els resultats es visualitzen i s'analitzen amb més deteniment a l'annex H.

4.1.2 Disseny gràfic

En aquest projecte també s'inclou una proposta de disseny gràfic final. Es tracta d'un disseny minimalista acord amb el logotip i els colors de la universitat tal com es pot apreciar en la figura 4.2.



Figura 4.2: Perspectiva conjunt final 2

4.2 Carrosseria

La carrosseria d'un automòbil de carreres és, aerodinàmicament, la part més important del vehicle. La carrosseria és la part que marcarà amb més transcendència els coeficients de càrrega aerodinàmica i de resistència a l'avanç, ja que és la part del monoplaça que té una major àrea frontal.

La carrosseria és la part aerodinàmica amb més restriccions geomètriques. D'una banda hi ha les restriccions donades pel xassís. La geometria de xassís que utilitza l'equip "UDG Racing Team" la proporciona el servei tècnic de la competició i és inicialment l'única part finalitzada del monoplaça. La geometria generada de la carrosseria ha de respectar el xassís, de tal manera que no hi hagi interferències entre les dues parts. En la figura 4.3 es pot observar el xassís del monoplaça.

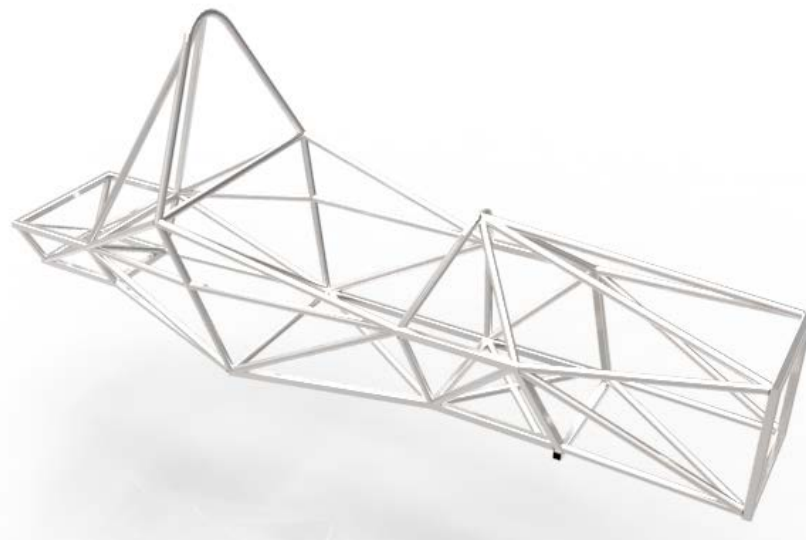


Figura 4.3: Xassís de l'equip "Udg Racing Team"

D'altra banda hi ha les restriccions imposades pel reglament de la competició. Aquestes restriccions imposen uns marges dels quals la geometria no pot sobrepassar i altres condicions de contorn descrites en l'annex A (normativa).

La carrosseria, a més, serà la part d'unió entre el xassís i els apèndixs aerodinàmics, alerons, fons pla i difusor. A partir de la geometria generada s'haurà de fer un projecte posterior de com van acoblades les diferents parts.

4.2.1 Anàlisi de la competència

En aquest apartat es descriu l'anàlisi de la competència per tindre uns valors de referència respecte al coeficient de resistència a l'avanç i coeficient de càrrega aerodinàmica.

Val a dir que la major part dels equips capdavanters utilitzen xassís fabricats per ells mateixos. Modifiquen el xassís per poder obtenir una geometria més aerodinàmica i, per tant, amb millors coeficients aerodinàmics. En aquesta anàlisi s'estudia el model de fórmula Student Zwickau 2013 i UAS Graz 2013. Aquests cotxes han estat triats per ser capdavanters en la competició durant l'any 2013 i perquè es disposava de la suficient informació per generar la geometria [12].

Per generar les geometries s'utilitza el programa Rhinoceros. Es parteix de les imatges en alçat, perfil i planta i s'escalen segons la mesura proporcionada de la batalla (distància entre eixos). Un cop introduïdes les imatges correctament, es genera la geometria intentant ser el més fidel possible a les imatges de partida. En les figures 4.4 i 4.5 s'observa el model Zwickau 2013 i el model UAS Graz 2013, generat mitjançant el programa Rhinoceros.

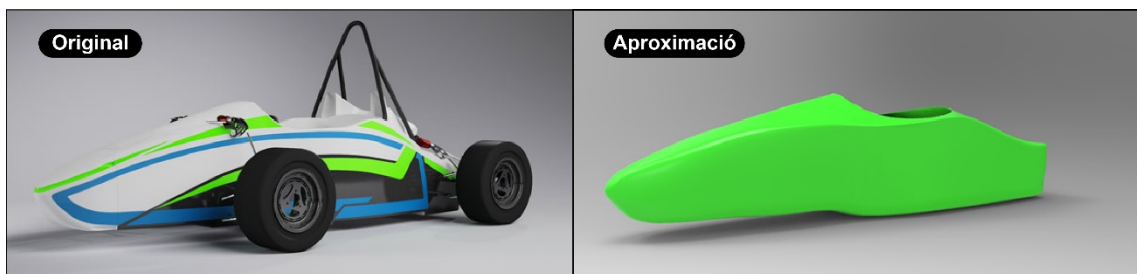


Figura 4.2: Aproximació del cos de Formula Student Zwickau 2013



Figura 4.3: Aproximació del cos de Formula Student UAS Graz 2013

Un cop obtingudes les geometries se simulen mitjançant el programa comercial en un túnel de vent virtual i se n'extreuen els coeficients aerodinàmics. Les simulacions aerodinàmiques de les dues carrosseries estan incloses en l'annex F. Per no generar diferències entre geometries, aquestes se situen a 50 mil·límetres respecte a terra, ja que és l'alçada que s'utilitza per al nostre monoplaça tal com es veurà en capítols posteriors.

Els resultats obtinguts es poden observar en la taula 1. En la taula 4.2 també hi ha els valors de coeficients aerodinàmics del cotxe BCN-001 proporcionats per l'equip de Formula Student Esquadra BCN [11].

Taula 4.2: Coeficients aerodinàmics carrosseria competència

Fórmula Student	Coeficient resistència a l'avanç (C_d)	Coeficient càrrega aerodinàmica (C_l)
Zwickau 2013	0,191	- 0,056
UAS Graz 2013	0,349	- 0,327
UPC BCN-001	0,475	0,604

Tal com es pot veure, el monoplaça Zwickau 2013 és el que té el coeficient de resistència a l'avanç més petit mentre el que obté millors resultats en el coeficient de càrrega aerodinàmica és el UAS Graz 2013. Com s'ha descrit en el plantejament, interessa més un monoplaça amb més càrrega aerodinàmica encara que el coeficient de resistència a l'avanç se'n vegi perjudicat. Seguint aquest criteri el UAS Graz 2013 utilitza la millor carrosseria.

4.2.2 Disseny final

A partir diferents consideracions explicades en els apartats posteriors es dissenya la carrosseria final. Aquesta compleix totes les restriccions anteriorment descrites. La geometria de la carrosseria final està representada en la figura 4.6.

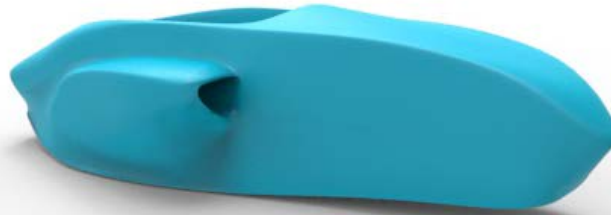


Figura 4.6: Imatge tridimensional de la geometria de la carrosseria final.

La geometria final se simula en un túnel de vent virtual i se n'extreuen els valors dels coeficients aerodinàmics i forces totals per a diferents velocitats. Els diagrames de simulació s'inclouen en l'annex F. Els valors de coeficients aerodinàmics proporcionats estan en la taula 4.3.

Taula 4.3: Coeficients aerodinàmics de la carrosseria final

Velocitat	20 m/s (72km/h)	25 m/s (90km/h)	30 m/s (108km/h)
C_d	0,261		
C_l	-0,614		
Àrea frontal	0,7527 m ²		
Resistència a l'avanç	48,13 N	75,2 N	108,29 N
Càrrega aerodinàmica	- 113,22 N	- 176,92 N	- 254,76 N

Com es pot veure en aquesta taula la geometria de la carrosseria té bons coeficients aerodinàmics. El coeficient de resistència a l'avanç és superior al del monoplaça Zwickau 2013 però inferior als altres dos. Respecte al coeficient de càrrega aerodinàmica és el millor coeficient analitzat fins ara.

4.2.2.1 Geometria de partida

A partir del xassís i les restriccions imposades per la normativa es genera una primera iteració de geometria. Aquesta no incorpora cap apèndix aerodinàmic ni pontons. La representació gràfica de la geometria de partida es pot observar en la figura 4.7.



Figura 4.7: Primera aproximació de la geometria

A partir de la primera geometria s'intenta introduir millores a la carrosseria per tal que aquesta tingui menys resistència a l'avanç i més càrrega aerodinàmica. Els aspectes modificables són l'alçada del nas i el cul del vehicle. Els laterals s'analitzaran quan es generin els pontons.

4.2.2.2 Alçada de nas

El nas és la part de la carrosseria més davantera. Variant l'alçada de nas s'aconsegueix que el fluid circuli pel voltant del vehicle de manera dispar. Aquesta diferència genera variacions en els coeficients aerodinàmics.

A l'annex F (Disseny de la carrosseria) es dedica un apartat a escollir l'alçada de nas més favorable entre tres analitzades. Aquesta alçada de nas correspon a 350 mm respecte a terra. En la figura 4.8 es representa l'alçada de nas respecte al punt més baix de la carrosseria que se situa a 5 cm respecte a terra.

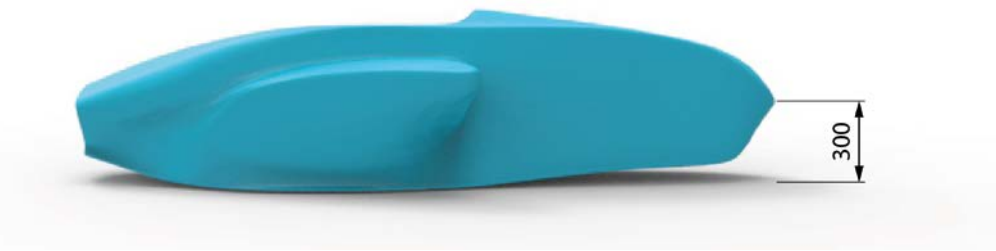


Figura 4.8: Alçada de nas de la carrosseria

S'ha comprovat que els resultats de coeficients aerodinàmics són millors que els obtinguts pels cotxes estudiats de la competència. En part pot ser degut perquè el cul s'aixeca una mica i això afavoreix l'efecte terra fent que obtingui millor càrrega aerodinàmica.

4.2.2.3 Pontons

Els pontons són la part de la carrosseria que se situa a cada costat de l'habitacle del pilot fins al final del vehicle. Els pontons es caracteritzen per ser més baixos i amples que la resta de la carrosseria. Comencen amb una amplitud que es va estrenyent al llarg de la seva longitud generant així una forma de gota. Els pontons utilitzen aquesta forma perquè es basa en la regla de disseny aeronàutic anomenada "Regla de l'àrea" [15]. Aquesta regla de disseny s'utilitza per reduir la resistència d'ona produïda en l'avanç d'un cos a través d'un fluid, sobretot en altes velocitats. La regla consisteix a reduir les variacions brusques de secció transversal de l'objecte que es desplaça.

A més, en la part frontal dels pontons se situen les preses d'aire per a la refrigeració del motor i de les bateries. Aquestes entrades d'aire es dimensionen a partir de les característiques de refrigeració del motor i de les bateries. Com més petita sigui l'entrada de refrigeració menys resistència a l'avanç tindrà el vehicle. D'altra banda, s'ha de satisfer el cabal mínim necessari per evitar que el motor i les bateries es malmetin per sobreescalfament. En la figura 4.9 es pot veure el conjunt de la carrosseria amb els pontons.



Figura 4.9: Pontons amb carrosseria

L'anàlisi del càlcul de l'obertura de la presa d'aire dels pontons s'inclou en l'annex F (disseny de la carrosseria) on a partir de lleis termodinàmiques es fa el dimensionament de l'àrea requerida per a la refrigeració correcta del motor i bateries. Aquesta àrea d'entrada ha de ser com a mínim de $282,72 \text{ cm}^2$.

A partir de la geometria de la carrosseria més favorable (alçada de nas 350 mm respecte a terra) s'hi afegeixen els pontons i es calculen els seus coeficients aerodinàmics. L'entrada d'aire és una mica més gran que la requerida mitjançant càlculs teòrics i fa $283,45 \text{ cm}^2$ de superfície. Aquesta es pot veure en la figura 4.10.

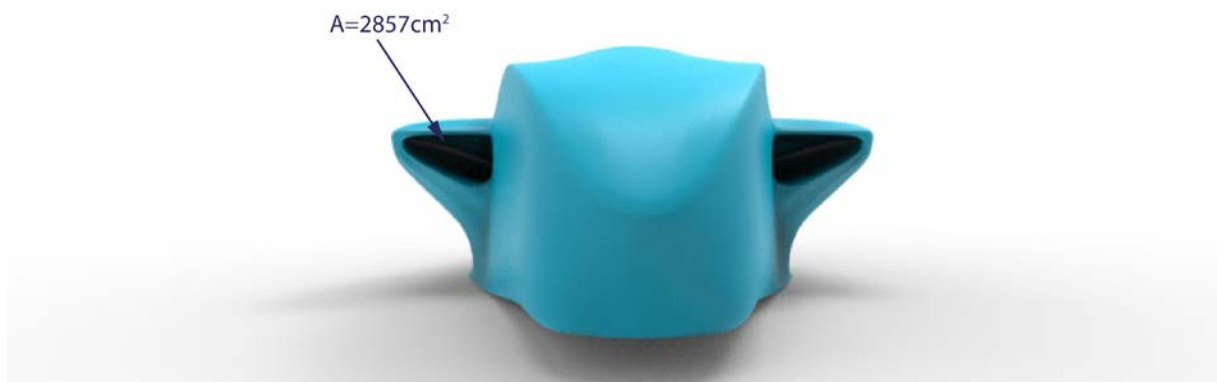


Figura 4.10: Àrea entrada d'aire pontons

4.2.2.4 Cul del vehicle

El cul del vehicle és obert per tal que evacui el flux d'aire que circula per l'interior a causa de a les entrades de refrigeració del motor i bateries. A més proporciona una millor accessibilitat als motors i bateries en cas d'averies. El cul de la carrosseria està representat en la figura 4.11.

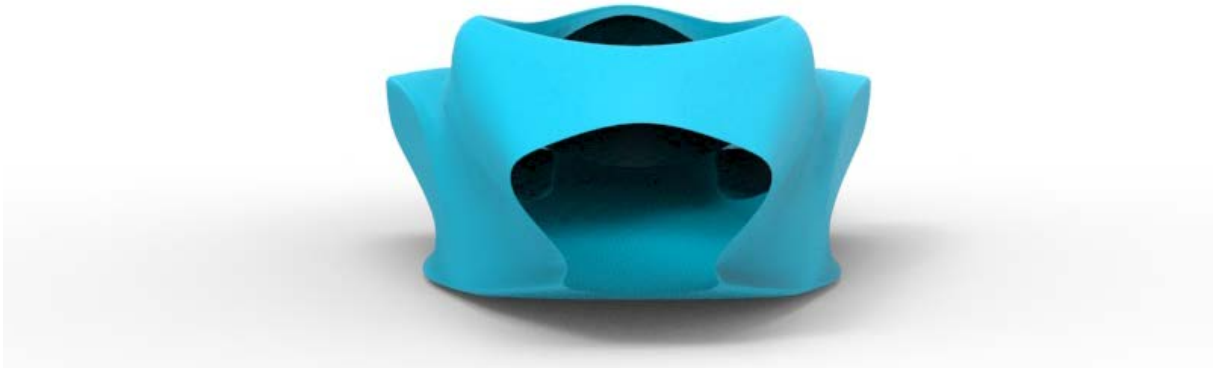


Figura 4.11: Imatge posterior del vehicle

L'obertura del cul únicament s'utilitza per a la simulació de la carrosseria final. Aquesta és la raó per la qual el coeficient de resistència a l'avanç disminueixi un cop se simula la geometria final.

4.3 Difusor i fons pla

4.3.1 Introducció

El difusor és un dispositiu aerodinàmic situat a l'extrem posterior del vehicle, tal com s'observa a la Figura 4.12.

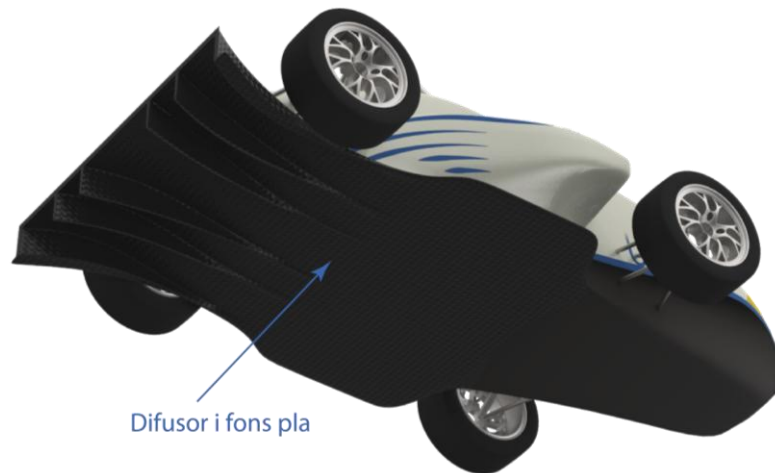


Figura 4.12: Posició del difusor en vehicle complet

Aquest dispositiu sol suposar entre un 30 i un 40% de la càrrega aerodinàmica total que genera un vehicle de competició. A més de crear una gran força de càrrega aerodinàmica, el difusor no aporta alts coeficients de resistència a l'avanç, fet que comporta que sigui un dispositiu aerodinàmic de vital importància.

L'objectiu del difusor d'un cotxe de carreres és accelerar el flux d'aire que circula per sota el vehicle. Aquest augment de velocitat del flux redueix la pressió de sota el vehicle creant una diferència major de pressions entre la part superior i inferior. Això implica una major càrrega aerodinàmica i una major adherència permetent que es pugui agafar les corbes més ràpid.

En la normativa establerta per la competició es prohibeixen dispositius de potència que moguin o evacuin l'aire de sota el vehicle. Aquest article de la normativa implica que s'ha d'utilitzar un fons pla sense introduir faldons laterals que provoquin l'efecte túnel. Aquests dispositius de potència poden ser altament perillosos quan el cotxe se separa de l'asfalt, ja que la càrrega aerodinàmica es perd instantàniament.

4.3.1.1 Funcionament

El difusor és una cambra d'expansió situada a la part inferior i posterior del vehicle. Augmenta el seu volum al llarg de la seva longitud creant un buit que ha de ser omplert per l'aire que circula per sota el cotxe. Aquest fet, acord amb l'efecte Venturi, comporta un augment de la velocitat d'aquest aire. Utilitzant l'equació de la conservació de l'energia i el principi de Bernouilli, en augmentar la velocitat de l'aire en disminuïm la seva pressió. Aquesta baixada de pressió no es genera en el difusor sinó que es genera al llarg de tot el fons pla del vehicle, i per tant, la força resultant de la càrrega aerodinàmica del difusor no estarà situada a la part posterior. En la Figura 4.13 s'observa la distribució de pressions i de velocitats al llarg del fons pla i difusor.

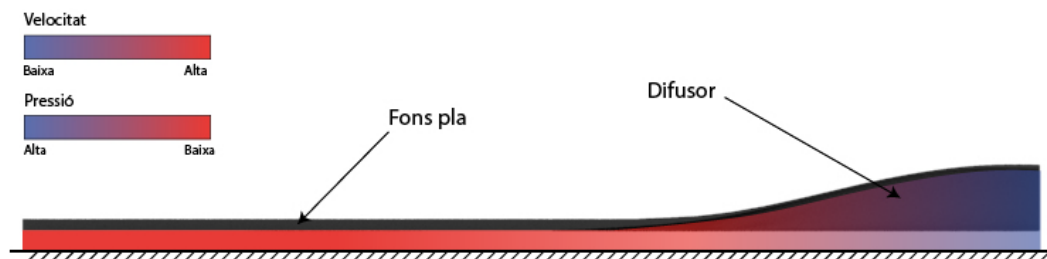


Figura 4.13: Distribució velocitats i pressions de un fons pla i difusor

4.3.1.2 Criteris de disseny

Hi ha diferents criteris bàsics a seguir per a la creació d'un difusor i fons pla. Aquests criteris són determinants en l'eficiència del difusor. En aquest subapartat es descriuen i analitzen els diferents criteris bàsics.

a) Forma del difusor

Existeixen tres formes bàsiques de difusor, la plana, la concau i la convexa, tal com s'il·lustra en la figura 4.14.



Figura4.14: Formes bàsiques difusor

Les diferències entre les tres formes poden variar l'efectivitat del difusor.

La forma convexa, per un mateix angle d'obertura, és la que presenta un volum més gran. Aquest fet comporta un major volum de baixa pressió i un augment de velocitat de l'aire per sota el vehicle.

La forma còncava presenta un increment de volum al llarg de la seva longitud més constant. Aquest increment lineal fa que s'evitin turbulències en l'interior del difusor fent que aquest treballi correctament.

La forma plana és la forma més simple. Presenta l'avantatge que és la forma de més fàcil fabricació. Utilitzant una forma plana poden aparèixer turbulències i té menys volum de cambra que la forma convexa.

b) Angle d'inclinació del difusor (θ)

L'angle d'inclinació del difusor també interfereix en els coeficients de resistència a l'avanç i càrrega aerodinàmica. Tal com s'observa en la figura 4.15 com més s'augmenta l'angle d'inclinació major és el volum de cambra i per tant major és la càrrega aerodinàmica que proporciona. D'altra banda, si s'augmenta molt l'angle d'inclinació es poden produir turbulències dins el difusor i fer-ne baixar l'eficiència.

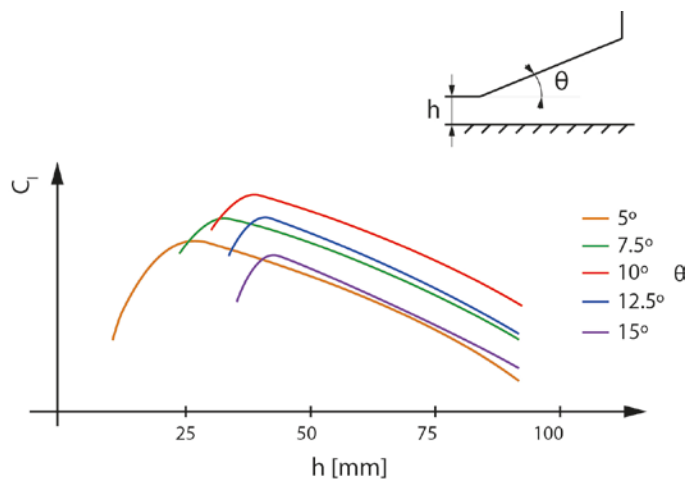


Figura 4.15: Coeficient de càrrega aerodinàmica en front distància amb el terra per diferents angles de difusor [14].

Estudis aerodinàmics estimen que l'angle òptim de treball és de 10 graus.

c) Separació del terra

Tal com s'ha pogut veure en la figura 4.15, la distància entre el fons pla i el terra afecta de manera significativa en el coeficient de càrrega aerodinàmica.

El reglament de la competició imposa una mínima distància entre el fons pla i el terra d'1 polzada (24,56 mm). L'alçada dependrà de la suspensió del vehicle. Els estudis aerodinàmics estan fets amb una distància de 50 mm per tal de comparar resultats amb altres difusors de la competència.

Inclinant el fons pla es pot aconseguir que tota la part inferior del monoplaça actuï com a difusor. Els angles òptims d'inclinació respecte terra són d'entre 2 i 3 graus. En inclinar el fons pla es provoca que la càrrega aerodinàmica augmenti i que la seva força resultant s'apropi més a la part frontal del vehicle.

4.3.2 Anàlisi de la competència

L'equip d'aerodinàmica de la Fórmula Student de la UPC ens ha proporcionat els valors de coeficients aerodinàmics i àrea frontal. L'objectiu del difusor del cotxe de l'equip UDG Racing Team és aproximar-se als coeficients aerodinàmics del BCN-001 i intentar-los superar.

Els valors de coeficients aerodinàmics proporcionats estan en la taula 4.4 .

Taula 4.4: Coeficients aerodinàmics del Fórmula Student BCN-001

Velocitat	20 m/s (72km/h)	25 m/s (90km/h)	30 m/s (108km/h)
C_d	0.698		
C_i	-7.352		
Àrea frontal	0.078 m ²		
Resistència a l'avanç	13.5 N	21.03N	29.25N
Càrrega aerodinàmica	-143 N	-224.41 N	-329.21 N

4.3.3 Disseny final

A partir de simulacions aerodinàmiques prèvies explicades posteriorment s'arriba a la solució final corresponent al Kit de millora B. El disseny del difusor final està representat en la figura 4.16.

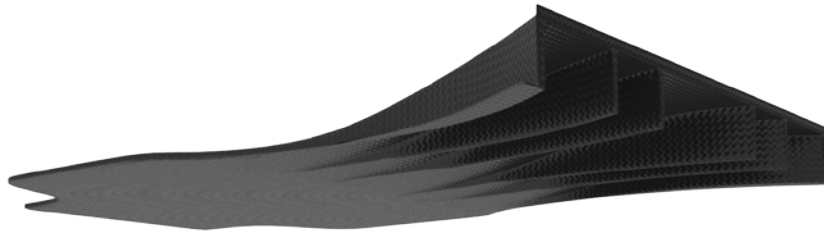


Figura 4.16: Difusor i fons pla perspectiva superior

Els seus coeficients aerodinàmics són els representats en la taula 4.5.

Taula 4.5 : Resultats aerodinàmics del difusor final.

Velocitat	20 m/s (72km/h)	25 m/s (90km/h)	30 m/s (108km/h)
C_d	1.288		
C_l	-7.518		
Àrea frontal	0.215 m ²		
Resistència a l'avanç	71.44 N	111.63 N	160.75 N
Càrrega aerodinàmica	-417.02 N	-651.6 N	-938.3 N

Aquests valors de coeficients aerodinàmics estan extrets de l'annex G (disseny del difusor) on es recopilen tots els resultats tant gràfics com numèrics de les diferents simulacions referents al difusor. També en aquest annex s'analitzen les simulacions per tal de fer les millores.

4.3.3.1 Primera aproximació

Partint dels paràmetres de disseny analitzats anteriorment s'ha creat la primera aproximació de geometria del fons pla i difusor. La geometria es mostra en les Figures 4.17 i 4.18

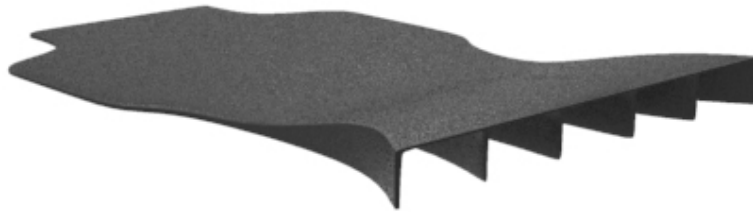


Figura 4.17: Primera aproximació difusor i fons pla perspectiva superior

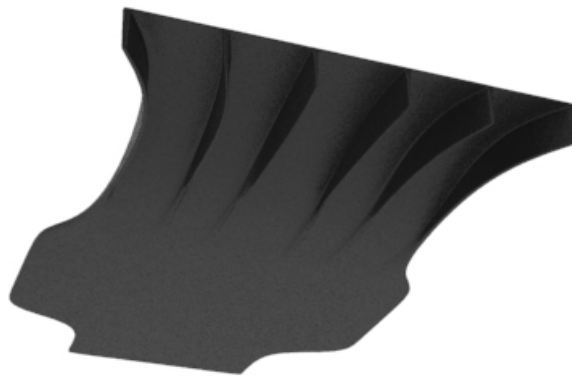


Figura 4.18: Primera aproximació difusor i fons pla perspectiva inferior

A partir d'aquesta, avaluant els resultats obtinguts per la simulació CFD, es realitzaran millores per tal d'augmentar la seva efectivitat.

Partint de l'anàlisi de formes bàsiques de difusor és generar la primera geometria. Aquesta inclou dues formes bàsiques consecutives. La forma cònca a l'inici d'aquest i la forma convexa al final. S'utilitza primer una petita zona convexa per tal de reduir les turbulències que es generen dins del difusor. Seguidament passa a ser cònca per obtenir un major volum de cambra. La transició d'una forma a l'altra es genera de forma tangencial per evitar turbulències. D'aquesta manera s'aprofiten els avantatges d'ambdues formes.

L'angle d'obertura del difusor és de 10 graus per tal que treballi a màxim rendiment. A més, ja

que el reglament no imposa cap restricció més enllà de no superar l'amplada de les rodes posteriors, s'incrementa també el volum de cambra augmentant l'amplada del difusor. D'aquesta manera s'augmenta considerablement el volum de cambra sense modificar l'angle d'obertura del difusor.

Per tal d'evitar turbulències a causa de l'augment d'amplitud del difusor s'utilitzen parets separadores, anomenades "strakes". Aquestes augmenten notablement l'eficiència del difusor tal com es veu en el kit de modificació C. Els "strakes" formen 5 canals diferents i ocupen la màxima alçada possible. Els "strakes" en la primera aproximació intenten repartir l'increment d'amplada entre les diferents canals.

El fons pla del vehicle tracta d'ocupar la màxima àrea possible permesa pel reglament per tal d'aconseguir que circuli més fluid per sota el cotxe. D'aquesta manera s'augmenta el coeficient de càrrega aerodinàmica. Es tenen en compte les limitacions generades per les rodes que són les que afecten el disseny de difusor.

4.3.3.2 Modificacions

Per tal d'augmentar l'eficiència del difusor i fons pla del vehicle s'inclouen modificacions al difusor. Aquestes modificacions es realitzen en quatre iteracions. Cada iteració de modificació s'anomena "Kit" de modificació, per diferenciar els diferents Kits de modificació s'acompanyen amb una lletra.

a) Kit A

En el primer Kit de modificació s'augmenta el volum de cambra i s'aconsegueix que el flux d'aire no entri a la canal exterior del difusor. En la figura 4.19 està representat el primer Kit de millora amb un nombre de referència per a cada una de les variacions.



Figura 4.19: Kit de modificació A

La primera variació del primer Kit és una franja horitzontal situada a la part superior del difusor. Aquesta franja té una alçada de 18 mm i té com a finalitat augmentar el volum de cambra sense augmentar la longitud ni alçada del difusor. Tal com es representa en la figura 4.20 la franja altera el flux de l'aire que circula per sobre el difusor.

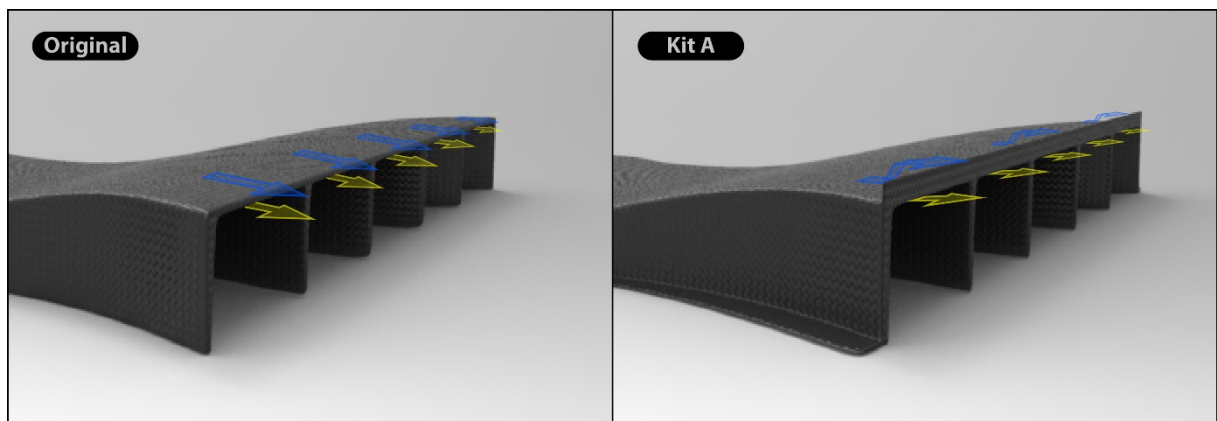


Figura 4.20: Diferències flux entre diferents difusors per la modificació 1

Aquesta variació del flux superior del difusor genera un major volum de succió per darrere del difusor provocant un major volum de cambra sense augmentar la seva longitud. Per contra, la incorporació de la franja horitzontal genera turbulències que provoquen un petit augment del coeficient de resistència a l'avanç. Al ser més important el coeficient de càrrega aerodinàmica que el coeficient de resistència a l'avanç és una millora molt rentable.

La segona variació del primer Kit és un augment de l'amplada a la part inferior del difusor. Aquest augment, tal com es mostra en la figura 4.21, evita que el flux d'aire que circula pel difusor s'escapi pels extrems laterals.

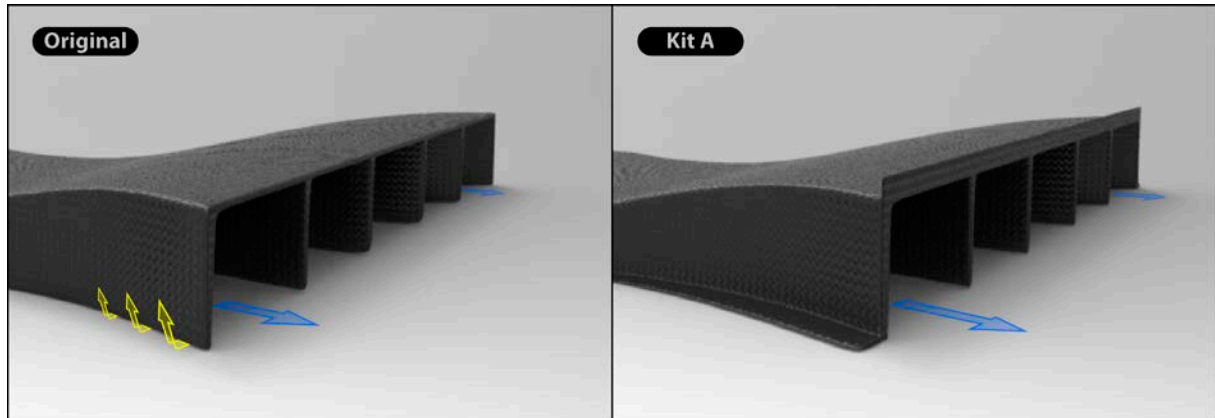


Figura 4.21: Diferències flux entre diferents difusors per la modificació 2

Aquest fenomen es dona pel fet que la pressió de l'interior del difusor és més gran que no pas la de l'exterior. En el model original la resistència del flux a anar del lloc amb més pressió al de menys pressió és molt baixa.

L'augment d'amplada es crea de manera incremental, ja que la diferència entre pressions entre l'interior i exterior de difusor augmenta al llarg de la longitud del difusor. Per tant, l'amplada ha de ser incrementada al llarg del difusor per contrarestar el fenomen anteriorment descrit.

Incorporant aquesta millora no s'augmenta el coeficient de resistència a l'avanç però sí que s'augmenta la del coeficient de sustentació negativa del difusor.

b) Kit B

En el segon Kit de modificació s'augmenta l'eficiència del difusor modificant la posició dels "strakes". En la figura 4.22 està representat aquest Kit de modificació en comparació amb el primer.

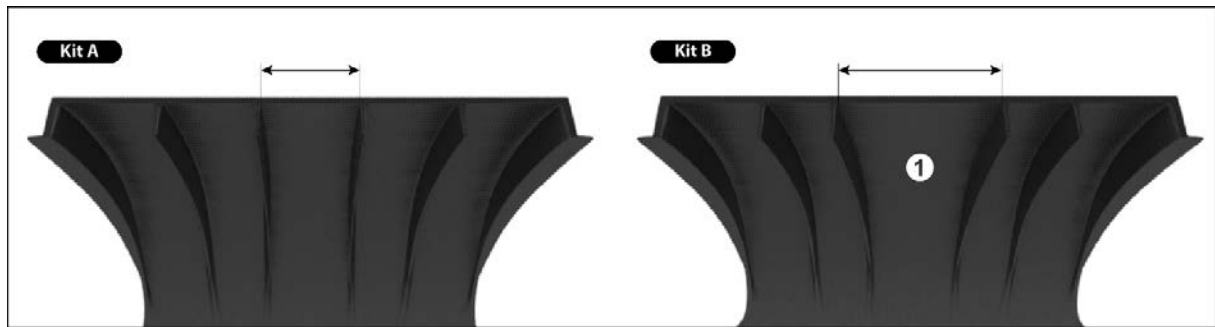


Figura 4.22: Kit de modificació B

Tal com es pot veure en la figura 22 els "strakes" augmenten l'amplada de la canal central amb major mesura de com es feia anteriorment. Aquesta modificació es realitza en analitzar els resultats del Kit de millora A, ja que s'observa que la pressió de les canals més externes és més gran que la de la canal central. D'aquesta manera s'homogeneïtza el treball de les diferents canals i s'augmenta l'eficiència del difusor.

c) Kit C

En el Kit de modificació C també es modifiquen les canals del difusor. En aquest cas es modifica l'alçada dels "strakes" exteriors, tal com es mostra en la figura 4.23.

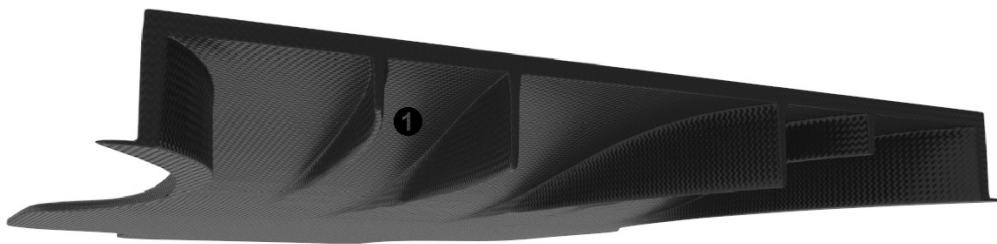


Figura 4.23: Kit de modificació C

Amb aquesta modificació s'intenta disminuir la fricció del fluid amb els "strakes". Amb aquesta modificació no s'aconsegueix millorar cap dels dos coeficients. Encara que es disminueix la fricció es creen turbulències interiors i fa que el coeficient de resistència a l'avanç també es vegi augmentat. S'ha incorporat dins la memòria per si en edicions futures de la competició es vol incrementar l'eficiència del difusor, es tingui en compte que la utilització dels strakes és necessària.

d) Kit D

Es parteix del Kit B, ja que el Kit C no ha aconseguit millorar els resultats. En aquest Kit es realitzen dues modificacions per tal d'augmentar el volum de cambra un cop acabat el difusor. La primera d'elles és afegir una franja addicional a la part superior central del difusor tal com es fa en el Kit A. Únicament s'afegeix a la part central, ja que és on el flux circula a més velocitat. La segona d'elles és afegir una franja en els laterals del difusor per augmentar el volum de cambra en l'altra direcció. Finalment s'afegeix un "strake" central per observar si es millora el comportament del flux a la canal central. Aquestes modificacions es poden observar en la figura 4.24.

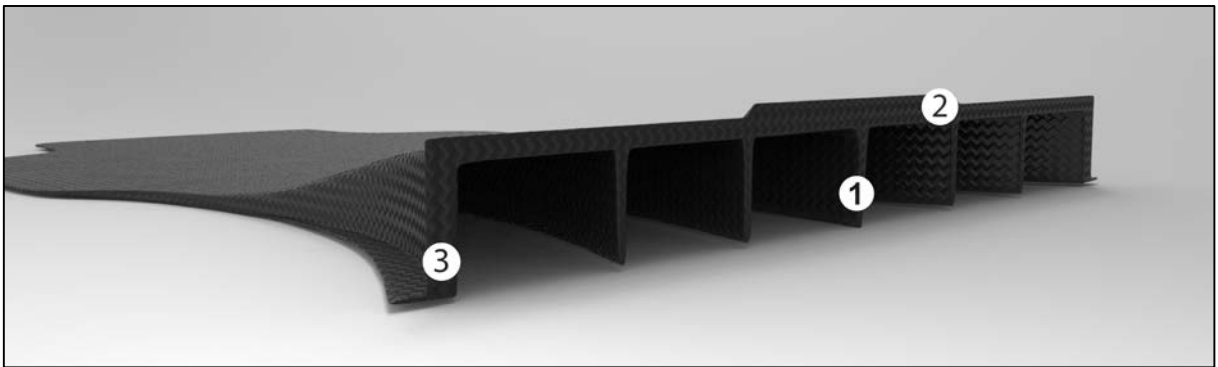


Figura 4.22: Kit de modificació D

En aquest Kit tampoc s'aconsegueixen millores en cap dels dos coeficients per la qual cosa també es descarten totes les modificacions.

5. RESUM DE PRESSUPOST

Tres mil tres-cents trenta-nou euros, IVA inclòs. Dels quals set-cents dinou euros són el preu total dels materials de fabricació.

6. CONCLUSIONS

El resultat d'aquest treball fi de grau ha estat crear la carrosseria i el difusor d'un monoplaça de Fórmula Student per l'equip UDG Racing Team. L'objectiu principal era que aquestes parts del monoplaça tinguessin uns bons coeficients aerodinàmics. Per aconseguir aquest objectiu s'han utilitzat simulacions basades en el mètode de Lattice-Boltzmann. S'hauria volgut que totes les simulacions s'haguessin realitzat utilitzant un programa de codi lliure, perquè no requereix llicència, però això no ha estat possible per falta de recursos informàtics. Per tant, la majoria del treball realitzat s'ha dut a terme amb el programa comercial. Ara bé, els resultats obtinguts utilitzant el programa comercial són més precisos, ja que es pot introduir el terra en moviment a la simulació. El confort que dona el programa comercial és molt alt i és recomanable utilitzar-lo en treballs posteriors. La carrosseria obtinguda té millors resultats que la resta de carrosseries analitzades, encara que el nostre equip utilitza un xassís facilitat per l'organització mentre que la resta de carrosseries utilitzen els seus propis xassís. Per a la seva determinació es fan tres simulacions amb alçades de nas diferents, l'alçada de nas que obté més bons resultats és la de 350 mm respecte a terra. També es fa un càlcul de l'entrada d'aire necessària per a la refrigeració del motor i les bateries per el dimensionament dels pontons. Aquesta entrada d'aire es considera d'una àrea adequada. Quan al difusor, també s'obtenen bons resultats, ja que són millors que els obtinguts en el BCN-001, l'únic difusor del qual en tenim resultats. Per a la determinació del difusor es crea un de partida del qual es realitzen fins a quatre conjunts de modificacions, de les quals dos presenten millores.

Aquests dos elements creats juntament amb els elements ja establerts (rodes, una aproximació de la suspensió i xassís) creen un conjunt amb una bona aerodinàmica. Aquests resultats són un èxit tenint en compte que és el primer any que la universitat de Girona participa en la competició i no es partia de cap disseny previ. No obstant això, el coeficient de càrrega aerodinàmica es pot millorar incloent-hi un aleró davanter, un aleró posterior i apèndixs aerodinàmics. Pel posterior treball de disseny d'alerons, és important aconseguir enviar aire dins de les entrades dels pontons mitjançant l'aleró davanter. També és important que l'aleró davanter envii aire sota el monoplaça per tal d'assegurar un bon funcionament del difusor. Mitjançant els apèndixs aerodinàmics també es pot millorar el coeficient de resistència a l'avanç, ja que canalitzen la circulació del fluid. L'aleró posterior no afecta tant a la circulació del flux al llarg del vehicle però aporta gran part de càrrega aerodinàmica.

El pressupost calculat per a la construcció dels diferents elements és molt menor al pressupost total dedicat a la part d'aerodinàmica si únicament es té en compte el preu del material.

Concretament el cost final de producció és un 2.270 € més barat. Afegint-hi despeses en eines el preu total no superarà la xifra màxima imposada. Aquesta diferència es pot destinar a la fabricació tant d'alerons com d'apèndixs.

Per donar un aspecte més atractiu al resultat s'ha treballat el disseny gràfic del monoplaça. El disseny representa un 15% de la puntuació final de la competició fent que sigui un aspecte a tenir en compte. S'ha volgut respectar els colors de la universitat i donar-li un efecte de velocitat utilitzant el símbol de la universitat, l'àguila.

7. RELACIÓ DE DOCUMENTS

Document 1: Memòria

- Annex A: Normativa
- Annex B: Simulació de fluids computacional
- Annex C: Funcionament de Palabos
- Annex D: Validació de resultats de Palabos
- Annex E: Paral·lelització de Palabos
- Annex F: Disseny de la carrosseria
- Annex G: Disseny del difusor
- Annex H: Simulació conjunt final
- Annex I: Fabricació dels elements aerodinàmics

Document 2: Plànols

Document 3: Plec de condicions

Document 4: Estat d'amidaments

Document 5: Pressupost

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] KATZ, J. Race car aerodynamics: Designing for speed. Bentley Publishers. 1995.
- [2] MCBEATH, S. Aerodinámica del automóvil de competición. Ediciones caec. Barcelona. 2005.
- [3] MA, SHENGWEI. Navier-Stokes vs lattice Boltzmann: will it change the landscape of CFD. (<http://caewatch.com/navier-stokes-vs-lattice-boltzmann-will-it-change-the-landscape-of-cfd/>, 13 abril 2014).
- [4] Palabos. (<http://www.palabos.org/> , 13 abril 2014).
- [5] ORSZAG, S. Lattice Boltzmann Methods for Fluid Dynamics. Department of Mathematics Yale University (<http://physics.wustl.edu/nd/event/qmcd09/Presentations/qmcd09Talks/orszag.pdf>, 16 abril 2014).
- [6] LATT, J. Choice of units in lattice Boltzmann simulation. (http://wiki.palabos.org/_media/howtos:lbunits.pdf, 21 abril 2014).
- [7] PANG, M., WEI, J. Effect of particle clusters on turbulence modulations in liquid flow laden with fine solid particles. (http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-66322011000300009&lng=es&nrm=iso&tlng=es#tab1, 25 abril 2014).
- [8] SUN, J. Car Battery Efficiencies . (<http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/sun1/>, 5 juny 2014).
- [9] Battery University. Charging at high and low temperatures. (http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_at_high_and_low_temperatures, 5 juny 2014).
- [10] ERMAX 228 motors/generators. (<http://www.enstroj.si/Electric-products/emrax-228-motorsgen.html>, 5 juny 2014).

- [11] PAGANETTO, J. Aerodinàmica del fórmula Student BCN-001. Febrer 2008.

- [12] Racecar Engineering. (<http://www.racecar-engineering.com/formulastudent/>, 29 agost 2014).

- [13] 2014 Formula Student Rules. Part T - General Technical Requirements. 2014.

- [14] Young, K.CFD-Bluff body-Ride height. (<http://consultkeithyoung.com/content/cfd-bluff-body-ride-height>, 24 juny 2014).

- [15] Area rule. (http://en.wikipedia.org/wiki/Area_rule, 15 juny 2014).

ANNEX A : NORMATIVA

En aquest apartat s'inclouen els articles de la normativa establerta per la Fórmula Student que fan referència a la aerodinàmica i al disseny del monoplaça. [13]

ARTICLE 2: DISPOSITIUS AERODINÀMICS

T2.1 Configuració del vehicle

El vehicle ha de ser de rodes obertes i cabina-oberta (un cos estil fórmula) , amb quatre rodes que no estan en una línia recta.

Definició de rodes obertes. Els vehicles de rodes obertes han de complir els següents criteris:

- Els primers 180 graus de les rodes/pneumàtics no poden tenir cap obstrucció quan es mira des de 68,6mm (2,7polzades) per sobre del pla format per les copes dels pneumàtics davanters i posteriors. Tal i com es pot veure en la figura A.1

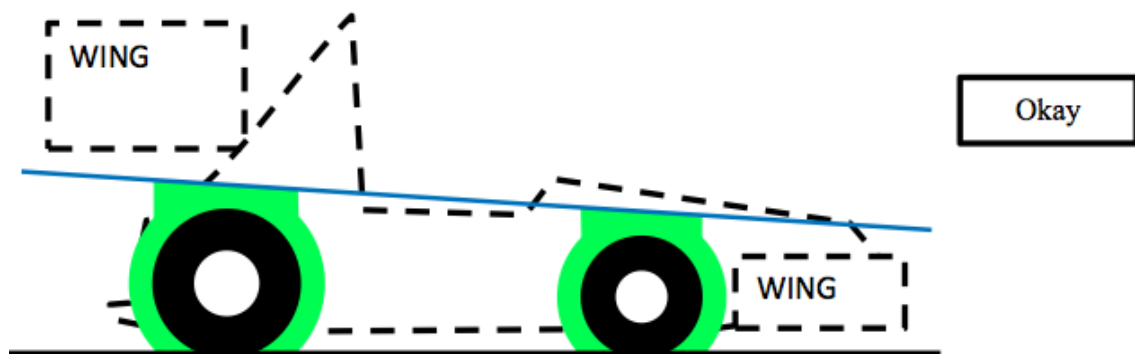


Figura A.1: Il·lustració primer criteri de roda oberta

- Les rodes/pneumàtics no han de tenir cap obstrucció mirant des del costat.
- Cap part del vehicle pot entrar en una zona formada per un cercle de 68,6 mm (2,7 polzades) més gran radialment que el diàmetre exterior del pneumàtic, amb les rodes de direcció dirigides cap a davant i amb un conductor de 77kg (170 lliures) assegut en posició de conducció normal. La part lateral interna del pneumàtic

(costat del vehicle) no s'inclou en aquesta avaluació. Consulteu la figura A.2.

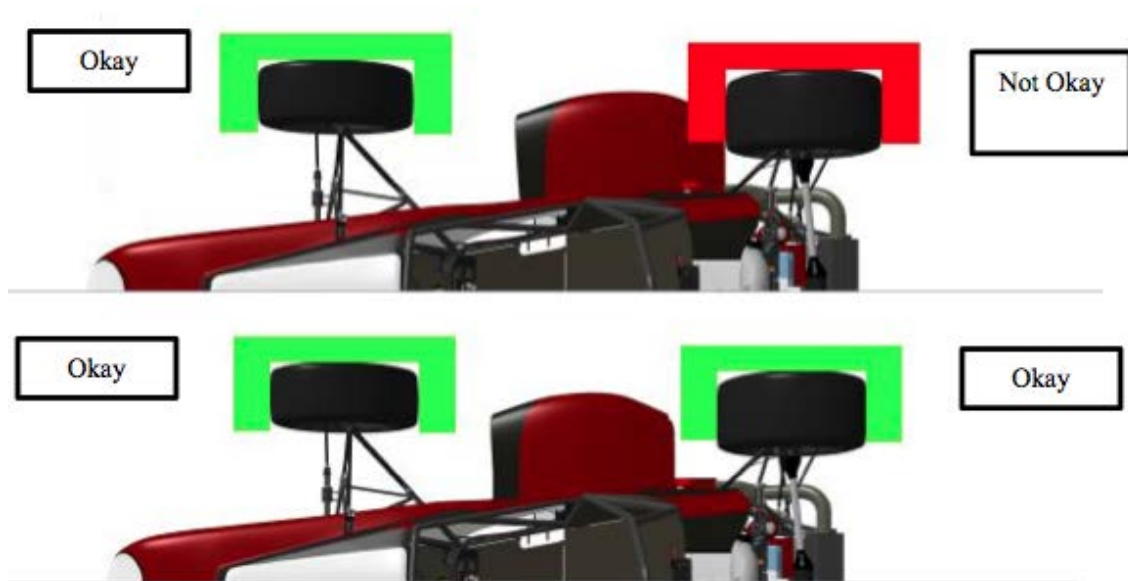


Figura A.2: Il·lustració tercer criteri de roda oberta

T2.2 Cos del vehicle

No ha d'haver obertures a través del cos del vehicle fins al compartiment del pilot, des de la part frontal fins la barra estabilitzadora o la placa tèrmica. Únicament s'autoritza la obertura requerida per entrar el pilot. Es permeten obertures mínimes al voltant dels components de la suspensió davantera.

T2.3 Distància entre eixos

El cotxe ha de tenir una distància mínima entre eixos de 1525 mm. La distància entre eixos es mesurada des de el punt de contacte amb el terra de les rodes davantera i posteriors dirigides rectes.

T3.24 Part davantera de la carrosseria

T3.24.1 Es prohibeixen les vores esmolades en la part davantera de la carrosseria o altres components que sobresurten.

T3.24.2 Totes les vores orientades cap endavant en la carrosseria que podrien afectar

a les persones, per exemple, el nas, ha de tenir orientat cap endavant "radis" d'almenys 38 mm (1,5 polzades). Aquests mínims "radis" s'han d'estendre a almenys quaranta-cinc graus (45 °) respecte a la direcció d'avanç, al llarg de la part superior, els costats i la part inferior de totes les vores afectades.

T4.1 Obertura de la cabina

T4.1.1 Per tal d'assegurar que l'entrada de la cabina és d'una mida adequada, la plantilla que es mostra a la figura A.3 serà inserida en l'obertura de l'habitacle. Es farà amb posició horitzontal i s'inserirà verticalment fins que hagi passat per sota la barra superior d'impacte lateral (o fins que estigui a 350mm per sobre del terra per als cotxes monocascos). No es permetrà la translació horitzontal de la plantilla durant la inserció.

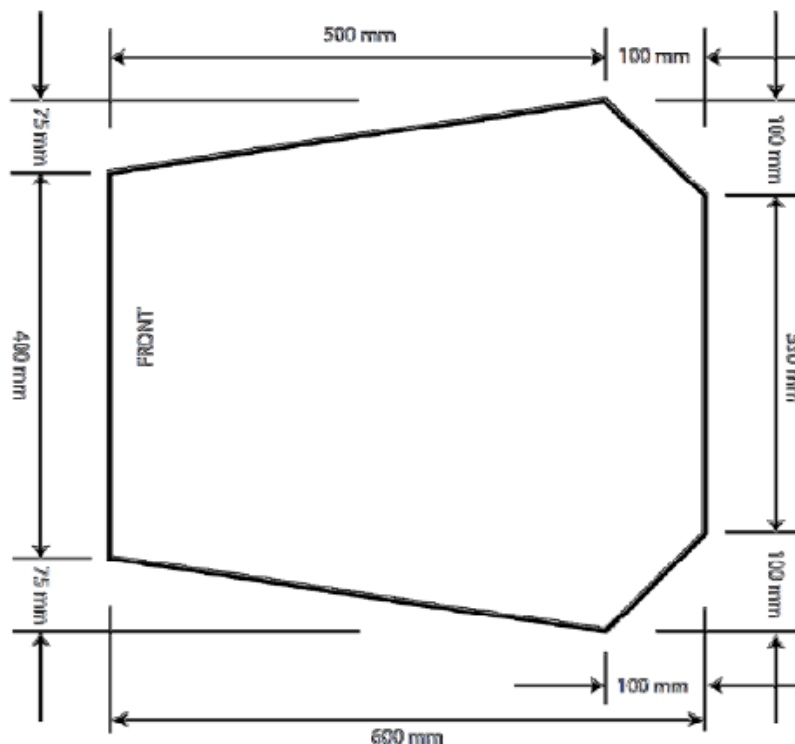


Figura A.3: Plantilla de l'obertura de la cabina del pilot.

ARTICLE 9: DISPOSITIUS AERODINÀMICS

T9.1 Aerodinàmica i efecte sòl – General

Tots els dispositius aerodinàmics han de satisfer els requeriments següents:

T9.2 Localització

T9.2.1 A la vista, cap part d'algun dispositiu aerodinàmic pot estar:

- a. Més avant de 762 mm que davant del pneumàtic frontal
- b. Més enrere de 305 mm que darrere del pneumàtic posterior.
- c. Més ample que les rodes de davant o les de darrere mesurat a l'altura de l'eix, la que sigui més ample

T9.3 Radi mínim de les arestes dels dispositius aerodinàmics

T9.3.1 Totes les arestes dels alerons, placa final, flap, flaps de Gurney o fons plà que podrien impactar un vianant han de tenir un radi mínim de 1,5 mm.

T9.4 Dispositius d'efecte sòl

No es poden utilitzar dispositius de potència per moure o retirar aire de sota del vehicle excepte ventiladors dissenyats exclusivament per refrigerar. Els efectes de sòl de potència estan prohibits.

T9.5 Requeriments de la sortida del conductor

T9.5.1 La sortida del vehicle en el temps establert a la regla T4.8 "Sortida del conductor", no pot requerir cap moviment de l'aleta o aletes o els seus muntatges.

T9.5.2 L'aleta o aletes han d'estar muntades en tal posició i suficientment robustes de manera que davant qualsevol accident sigui poc probable una deformació dels alerons o els seus muntatges de tal manera que bloquegi la sortida del conductor.

ANNEX B: SIMULACIÓ DE FLUIDS COMPUTACIONAL

B.1 Introducció al CDF

Per realitzar la simulació de l'estudi aerodinàmic s'utilitza el mètode de computació de fluids comunament anomenat CFD (Computacional Fluid Dynamics).

El CFD és una potent eina que permet una aproximació numèrica per a la simulació aerodinàmica. S'utilitza per fer una primera avaluació abans de fabricar el model i extreure'n resultats en un túnel de vent real.

Utilitzar el CFD redueix dràsticament els costos del model, ja que no requereix model físic per tal d'avaluar l'aerodinàmica. Per tant, les modificacions es realitzen sobre models virtuals. Només es procedeix a fabricar el vehicle, un cop els resultats aerodinàmics obtinguts a partir del CFD són els desitjables.

El CFD permet una ràpida modificació sobre el model, de tal manera que es poden realitzar una gran quantitat de simulacions abans de donar el model per correcte. Aquesta eina permet treballar als dissenyadors i aerodinamistes amb major facilitat durant l'elaboració d'un vehicle.

Tot estudi aerodinàmic CFD està compost per tres etapes: el pre-procés, la resolució i el post-procés. Durant l'etapa de pre-procés es genera la geometria, es determinen els paràmetres de simulació i si es requereix, es crea el mallat. Durant l'etapa de resolució es resolen numèricament les equacions fonamentals. Finalment, a l'etapa de post-procés es visualitzen i s'analitzen els resultats.

B.2 Lattice-Boltzmann

B.2.1 Introducció

Existeixen dos tipus diferents de software CFD. Aquests es diferencien per les equacions que fan servir per obtenir la solució. El mètode convencional i més conegut, utilitza les equacions de Navier-Stokes. Mentre que el mètode alternatiu, cada cop més utilitzat, fa servir les equacions de Lattice Boltzmann [3,4,5].

A afectes pràctics, la diferència entre els dos mètodes és que el mètode de Lattice Boltzmann utilitza micropartícules fictícies, al contrari del mallat que utilitza el software convencional.

Els avantatges que presenta el mètode Lattice Boltzmann respecte al mètode convencional són:

- La complexitat geomètrica no és un problema, ja que no cal generar el mallat.
- El temps dedicat al pre-procés és menor per la mateixa raó (figura B.1).
- Pot simular sòlids en moviment o deformacions.

Per contra, presenta els següents desavantatges:

- Requereix més recursos informàtics per a la solució i per tant més temps d'execució (figura B.1).
- El software és especialment car.

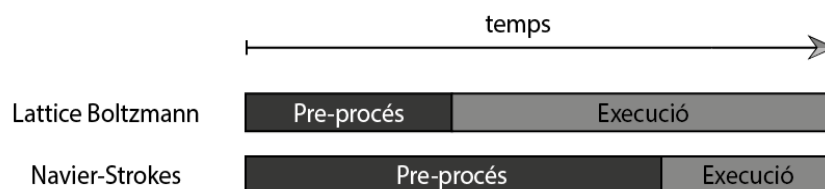


Figura B.1: Comparativa de temps Lattice Boltzman respecte Navier Stokes

En conclusió, com es pot veure en la figura B.1, el mètode Lattice-Boltzmann requereix de menys temps d'enginyer que es dedica al pre-procés mentre que el mètode convencional utilitza menys temps de la màquina.

El grup Volkswagen, fins fa poc utilitzava el mètode Lattice Boltzmann però a causa del gran import de llicències, va desenvolupar un software de mètode convencional lliure. El canvi de software no es va fer per falta de precisió, sinó per tal que les universitats poguessin investigar amb ells i estalviar recursos econòmics.

Actualment existeixen diferents softwares de CFD basats en el mètode Lattice Boltzmann, els més coneguts són: els de llicència Exa PowerFlow i Xflow i el de software de codi lliure Palabos (que s'utilitza per a l'elaboració del treball).

B.2.2 Unitats de Lattice Boltzmann

El mètode de Lattice Boltzmann utilitza unitats Lattice. Aquestes unitats són adimensionals i provenen d'unitats físiques. Per passar d'unes unitats a les altres es requereix d'un canvi d'unitats. [6]

El canvi d'unitats està format per dues etapes. A la primera etapa un sistema físic (F) es converteix en un sistema adimensional (A), el qual és independent de les escales del sistema físic original i també independent dels paràmetres de simulació. A la segona, el sistema adimensional (A) es converteix a un sistema discret (LB). La correspondència entre els tres sistemes passa pel nombre de Reynolds, que és un paràmetre adimensional, i tots tres sistemes en tenen el mateix valor numèric.

La transició del primer sistema al segon es fa mitjançant la tria dels valors d'escala de longitud l_0 i d'escala de temps t_0 . La transició del segon sistema al sistema discret, es fa a partir de la tria de valors de "discret space step" δ_x i de "time step" δ_t .

$$\text{Sistema físic (F)} \xleftrightarrow{Re, l_0, t_0} \text{Sistema adimensional (AD)} \xleftrightarrow{Re, \delta_x, \delta_t} \text{Sistema discret (LB)}$$

Els valors de longitud l_0 i temps t_0 depenen de la configuració de la simulació. La longitud l_0 és la longitud de l'obstacle submergit en el fluid, mentre que el temps t_0 , és el temps que tarda el fluid a transcórrer la longitud l_0 . Les variables físiques com el temps t_f i el

vector posició r_f són reemplaçades pels valors adimensionals:

$$t_{ad} = \frac{t_f}{t_0} \quad i \quad r_{ad} = \frac{r_f}{l_0}. \quad (\text{B.1})$$

El valor de Reynolds es defineix com

$$Re = \frac{l_0^2}{t_0 \cdot \nu}, \quad (\text{B.2})$$

on ν és la viscositat cinemàtica de fluid. Aquest valor es manté per a tots els sistemes.

B.3 Conclusions

El mètode triat per a la resolució del treball, tal com s'ha comentat anteriorment, és el de Lattice Boltzmann. S'ha triat aquest mètode, ja que destina menys recursos al pre-procés. Com que es desitja una primera aproximació de la geometria és el mètode més adient pel seu estalvi de temps.

A més, en ser un software relativament nou i que cada cop s'utilitza més, és interessant aprendre a fer-lo servir.

D'altra banda es disposa d'un portàtil amb 8 CPU (mentre que SEAT actualment treballa amb 500 CPU) per a la solució. Aquest fet implica gran temps en l'obtenció de resultats. En ser la primera aproximació, es pot disminuir la precisió dels resultats, fent així que el temps d'obtenció de resultats es redueixi. Malgrat la manca precisió es poden observar les tendències que serviran per determinar quina és la geometria més adient.

ANNEX C: FUNCIONAMENT DE PALABOS

En aquest annex es descriu el funcionament del programa Palabos amb detall. Es descriu tant l'execució del programa com els paràmetres modificables per a fer la simulació. El programa Palabos és de codi lliure i s'ha baixat de la pagina oficial [4].

C.1 Funcionament

El software treballa amb tres tipus d'arxius: els arxius de codi ".cpp" on es criden les diferents rutines i subrutines que s'utilitzen durant el programa. L'arxiu "make" que crea a partir de l'arxiu de codi ".cpp" un executable. I l'arxiu de codi guardat en ".xml" que permet canviar els paràmetres del programa. Aquest és una drecera per canviar els valors dels paràmetres sense haver d'entrar en l'arxiu de codi ".cpp". S'utilitza quan l'arxiu ".cpp" és molt extens, bàsicament quan es vol estudiar una geometria en tres dimensions. A més, s'ha d'incloure dins la carpeta on es troben els altres arxius la geometria amb format ".stl".

Per tal de simplificar la feina als usuaris, Palabos disposa d'un ampli ventall d'exemples. Aquests exemples incorporen en el codi línies de comanda on expliquen cada acció realitzada. Cada exemple té un propòsit diferent i generen simulacions de diferents tipus. Com per exemple, la simulació d'un cilindre en un túnel de vent 2D (Cylinder2D) o la simulació d'un fluid circulant per una neurona (Aneurysm).

Per realitzar el codi, es parteix del codi d'exemple més semblant al que es vol realitzar i se'l modifica. En el cas que ens ocupa, l'exemple més semblant és "FlowExternalAroundObject" en el qual es crida una esfera en format ".stl" i se'n fa un estudi en un túnel de vent en tres dimensions.

C.2 Execució

L'execució del programa és senzilla. En primer lloc des del terminal s'ha d'anar a la carpeta en la qual tenim els diferents arxius. Un cop dins la carpeta s'ha de crear l'arxiu executable. Aquest es crea utilitzant la comanda

```
$ make (1)
```

Un cop creat l'arxiu executable ja es pot executar. El programa es pot executar amb un core o amb varis. Per executar-lo amb només un core s'utilitza la comanda

```
$/nom_arxiu nom_arxiu.xml (2)
```

Per executar-lo en paral·lel s'utilitza la comanda

```
$ mpirun -np X ./nom_arxiu nom_arxiu.xml (3)
```

on X és el nombre de cores que es volen fer servir. En l'annex E s'explica la paral·lelització del programa Palabos i quin és el nombre de cores òptim per a la simulació.

Un cop executat el programa crea imatges amb les velocitats representades des de tres vistes principals en format "ppm", arxius interpretables amb Paraview amb format "vtk" per a l'anàlisi tridimensional i en el terminal apareixen les forces resultant als eixos principals, l'energia total i el temps de simulació. Les dades que apareixen al terminal no queden enregistrades, per registrar-les s'afegeix >nom_arxiu_enregistrament.dat a la comanda d'execució. Com per exemple

```
$ mpirun -np X ./nom_arxiu nom_arxiu.xml >output.dat . (4)
```

Utilitzant aquesta comanda totes les dades s'enregistren dins l'arxiu creat.

Els intervals de temps en què es vol que es creïn els diferents arxius i s'enregistren les dades són escollits per l'usuari i s'implementen dins l'arxiu "xml" tal com es veu en l'apartat de paràmetres d'aquest annex.

C.3 Paràmetres

Els paràmetres explicats en aquest apartat s'implementen en l'arxiu ".xml". Tal com s'ha explicat amb anterioritat aquest arxiu només té la funció d'implementar els paràmetres que es criden des de l'arxiu de codi de programa.

Els paràmetres modificables importants són:

- Arxiu ".stl": des d'aquí es crida el arxiu de geometria. És important que corresponguin els noms.
- Les mides del túnel de vent: mesures amb metres dels tres eixos principals.
- La posició de la geometria: mesures en tres eixos que situen el centre de gravetat de la geometria respecte al túnel de vent.
- Viscositat cinemàtica del fluid: viscositat cinemàtica de l'aire en unitats del sistema internacional a 20 °C, equivalent a $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- Velocitat d'entrada: velocitat d'entrada de l'aire del túnel de vent en unitats del sistema internacional. En aquest projecte s'utilitza una velocitat de 22m/s equivalent a aprox. 80 km/h que equival a una velocitat que s'aproxima a la mitjana de la velocitat del cotxe durant les proves de la competició.
- Resolució: Determina el nombre de punts d'emmagatzematge de dades. La resolució equival al nombre de segments que es creen per a la longitud en Y del túnel de vent. A partir de la mesura del segment es crea una quadrícula tridimensional cúbica. En l'apartat de validació de resultats s'explica amb més profunditat aquest paràmetre.
- Velocitat en unitats de Lattice: Indiquen l'espai temporal entre iteracions. Un valor transcendental per a la simulació. També s'explica en l'apartat de validació de resultats.
- Model Smagorinsky LES: Crea un model no basat en lattice-Boltzman per zones properes a la superfície de l'objecte. Es pot implementar aquest model per obtenir més precisió en els resultats.
- Temps màxim de simulació: Temps amb el qual el programa deixarà d'executar-se. Aquest valor és el temps de simulació en segons, no equival al temps real que tarda a realitzar la simulació.
- Freqüència en la qual s'enregistren els resultats numèrics.
- Freqüència en la qual crea una imatge en format ".ppm": Temps de simulació en el qual el programa crea una imatge dels plans principals del túnel amb de resultats

de velocitat absoluta.

- Freqüència en la qual crea l'arxiu VTK: Aquest arxiu emmagatzema els valors de pressió i velocitat del fluid en tot l'espai del túnel de vent en un instant determinat. Aquest arxiu s'obre el programa Paraview juntament amb els altres arxius VTK d'altres instants temporals.

ANNEX D VALIDACIÓ RESULTATS DE PALABOS

D.1 Paràmetres crítics per a la simulació

Com s'ha comentat amb anterioritat, Palabos utilitza un software Lattice-Boltzmann. Abans de realitzar els càlculs del cotxe de Formula Student, s'ha de comprovar que el programa funciona correctament i dona uns resultats fiables.

Dos són els paràmetres de simulació que es poden modificar amb l'arxiu .xml. Aquests valors són la resolució espacial i la velocitat discreta de Lattice. Un valor massa baix de resolució o un valor massa alt de velocitat de Lattice poden fer que no s'analitzi correctament el fluid. Per tant, aquests dos valors són crucials per a la simulació. Ja que si no es trien uns valors adequats, la diferència entre el valor real i el valor obtingut mitjançant Palabos pot ser molt gran.

En primer lloc, s'ha d'avaluar el valor d'aquests dos paràmetres i buscar un equilibri entre precisió i temps de càlcul. Ja que si augmentem la precisió també augmentarà de manera molt important el temps de càlcul i pot ser que no sigui convenient. En ser una primera aproximació interessa més obtenir uns valors no tan precisos i disminuir considerablement el temps de càlcul per invertir-lo en la recerca de la solució geomètrica més adient.

Per tal de validar el software, s'analitza el coeficient de resistència a l'avanç d'una esfera per a diferents valors de Reynolds. Aquests valors obtinguts es comparen amb els valors obtinguts amb altres estudis.

D.1.1 Paràmetres

Com s'ha esmentat amb anterioritat, els paràmetres determinats per a la simulació són el valor de la resolució i el valor de la velocitat de Lattice.

Cal destacar que factor temps de càlcul és un factor molt important del projecte, ja que no es disposa d'un ordinador apropiat per a realitzar simulacions. Els temps de simulació són de varies hores.

D.1.2 Resolució

La resolució és un paràmetre que determina el nombre de cel·les d'anàlisi de resultats. És important tindre un valor de resolució adient, ja que és poden no calcular valors crucials per a la solució. Com més s'augmenta aquest paràmetre més precisos són els resultats. Per contra, en ser una anàlisi tridimensional, en augmentar el valor de la resolució espacial s'eleva al cub el nombre de cel·les a analitzar. I per tant, el temps de càlcul també augmentarà considerablement en augmentar aquest valor.

La resolució en Palabos és dependent de la longitud den l'eix Y del túnel de vent segueix la formula

$$N = \frac{1}{l_Y} . \quad (D.2)$$

D.1.3 Velocitat de Lattice

En especificar un valor de resolució, el paràmetre de velocitat de Lattice modifica el valor del temps d'iteració δ_t . Ja que la velocitat de Lattice és inversament proporcional al temps d'iteració.

Disminuir la velocitat de Lattice comporta un augment d'iteracions i per tant de temps de càlcul. Reduir la velocitat de Lattice pot produir errors en el programa. Aquests errors són deguts al fet que les partícules no arriben a colisionar de la manera correcta. També influeix directament en la precisió de les dades.

A vegades el programa Palabos s'atura d'executar a causa d'un problema intern. Un cop s'ha aturat el programa no es pot reprendre la simulació, de tal manera que no podem generar resultats a partir del temps d'aturada. És un error que val més evitar, ja que pot fer que molt de temps de càlcul sigui envà.

Aquest error prové d'utilitzar velocitats de Lattice massa grans. Per tant, fixarem a un valor petit la velocitat de Lattice encara que comporti més temps de càlcul.

D.1.4 Altres paràmetres

En el programa .xml es poden implementar altres paràmetres. Alguns d'ells tenen influència en la precisió dels resultats.

Un valor important és el de posició de l'objecte i mida del túnel de vent. Amb la mateixa resolució un túnel més petit comporta una mida de les cel·les d'estudi més petit. De tal manera que la precisió augmenta. Si s'utilitza un túnel molt petit les parets d'aquest poden influir també en els resultats fent que no siguin correctes.

Un altre paràmetre a analitzar és si es vol implementar el de model Smagorinsky LES. El model Smagorinsky LES és un altre model de resolució que no utilitza Lattice. Aquest és menys precís alhora de calcular que el Lattice i s'utilitzarà per valors de Reynolds molt elevats. En el programa es pot modificar la mida de la zona Smagorinsky. Aquesta es defineix a 1 centímetre de l'objecte per poder captar la capa límit en valors elevats de Reynolds (superiors a 1000).

D.2 Validació de la esfera

D.2.1 Introducció

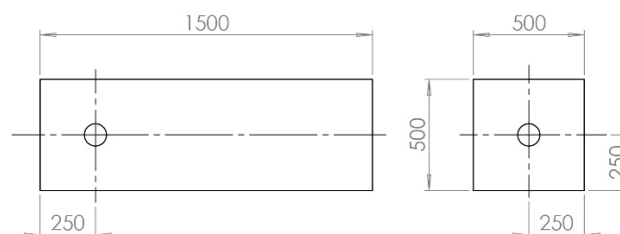
En aquest annex es comparen valors teòrics extrets d'una esfera sota diferents valors de Reynolds amb valors obtinguts mitjançant el programa Palabos. També es comparen Aquests resultats s'obtenen a partir de la fórmula

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} & Re < 1 \\ \frac{24}{Re} \cdot (1 + 0.15 \cdot Re^{0.68}) & 1 < Re < 1000 \\ 0.45 & 1000 < Re < 350000 \end{cases}, \quad (D.1)$$

extreta de l'article “*Effect of particle clusters on turbulence modulations in liquid flow laden with fine solid particles*” que aproxima els de coeficient de resistència a l'avanç per a valors de Reynolds inferiors a 350000.

També s'observen les imatges generades durant les diferents simulacions per tal de comprovar que el comportament de l'aire és el correcte.

S'utilitza el codi de l'exemple “ExternalFlowAroundObject” el qual ja implementa una esfera en format .stl. Aquesta esfera té un diàmetre de 0,1 metres. Les mides del túnel de vent i la posició de l'objecte respecte aquest s'agafen una mica més grans que segons (l'annex), ja que no es vol de cap manera que la mida del túnel de vent influeixi en els resultats. Els valors geomètrics escollits estan representats en la figura D.1.



Unitats en mm

Figura D.1: Mides de túnel de vent validació esfera

El nombre de Reynolds es calcula mitjançant la fórmula

$$Re = \frac{v \cdot L}{\nu}, \quad (D.2)$$

on Re és el nombre de Reynolds, L és la longitud de l'obstacle en la direcció del fluid i ν és la viscositat cinemàtica de fluid.

La longitud d'aquest cas equival al diàmetre. El valor d'aquest es manté constant durant totes les simulacions realitzades per a la validació de la esfera. Per contra el valor de la viscositat i velocitat es varien per tal d'obtenir valors de Reynolds diferents.

Els valors de sortida del programa Palabos són de força resultant a cada eix, expressats en Newtons. Per obtenir valors de coeficient de resistència a cada eix s'utilitza la fórmula

$$C_{x,y,z} = \frac{F_{x,y,z}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A}, \quad (D.3)$$

on $F_{x,y,z}$ és la força resultat a l'eix, v és la velocitat del fluid a infinit, ρ és la densitat del fluid i A és l'àrea projectada. En aquest cas l'àrea projectada equival a la superfície de la secció més gran de l'esfera, és a dir, $A = \pi \cdot (d/2)$ on d és el diàmetre de l'esfera.

S'utilitza el valor de resistència a l'avanç C_d , per a la comparació de resultats. Aquest valor en aquest cas equival a C_x .

El valor de la densitat és desconegut i variarà segons el valor en que estigui fet l'estudi teòric. Per tal de determinar el valor de la densitat es calcula a partir del primer valor obtingut per Palabos. S'igualen el coeficient teòric i l'obtingut i se'n calcula la densitat.

Utilitzant aquesta tècnica obtenim un valor aproximat del valor de la densitat però ens és útil per comparar la resta de resultats. S'agafa el primer valor obtingut per que és el més precís, ja que és el estudi que necessita menys potència de càlcul.

D.2.2 Resultats

En aquest subapartat s'inclouen els resultats obtinguts mitjançant Palabos i es grafiquen.

En la taula D.1 s'indiquen els paràmetres utilitzats per a les diferents simulacions i els resultats de força i de coeficients aerodinàmics obtinguts.

Taula D.1: Resultats de les diferents simulacions de validació de resultats

Simulació	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5	
Viscositat	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	m ² /s
Velocitat	0,1	0,5	1	5	10	m/s
Resolució	80	80	80	80	80	
u_lattice	0,01	0,01	0,075	0,01	0,01	
Reynolds	10	50	100	500	1000	
Densitat	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	kg/m ³
Força x	0,0001937	0,00172181	0,00466072	0,053599	0,19776	N
Força y	-8,89E-019	-2,22E-017	8,89E-017	-5,44E-013	0,0276156	N
Força z	6,67E-019	-5,00E-017	-1,33E-016	-4,41E-013	0,0130305	N
Cx	4,252	1,512	1,023	0,471	0,434	
Cy	0,000	0,000	0,000	0,000	0,061	
Cz	0,000	0,000	0,000	0,000	0,029	
T estabilització	15,6	4,6	2,3	1,5	0,6	s
T dades	0,02	0,02	0,02	0,005	0,001	s
T _r dades	14	25	33	85	35	s
T _r execució	3,03	1,60	1,05	7,08	5,83	s

Simulació	Cas 6	Cas 7	Cas 8	
Viscositat	0,0001	0,0001	0,00001	m ² /s
Velocitat	5	10	50	m/s
Resolució	80	80	80	
u_lattice	0,01	0,01	0,01	
Reynolds	5000	10000	500000	
Densitat	0,58	0,58	0,58	kg/m ³
Força x	0,0463	0,183322	4,534	N
Força y	-1,07E-010	-5,47E-012	-8,75E-014	N

Força z	5,46E-010	-1,74E-012	-4,13E-014	N
Cx	0,407	0,402	0,398	
Cy	0,000	0,000	0,000	
Cz	0,000	0,000	0,000	
T estabilització	0,6	0,63	0,06	s
T dades	0,0005	0,0001	0,00003	s
T _r dades	17	4	8	s
T _r execució	5,67	7,00	4,44	s

Els resultats obtinguts de coeficient de resistència a l'avanç estan representats en la figura D.2. En aquesta figura també es representa la corba de resistència a l'avanç utilitzant l'equació D.1.

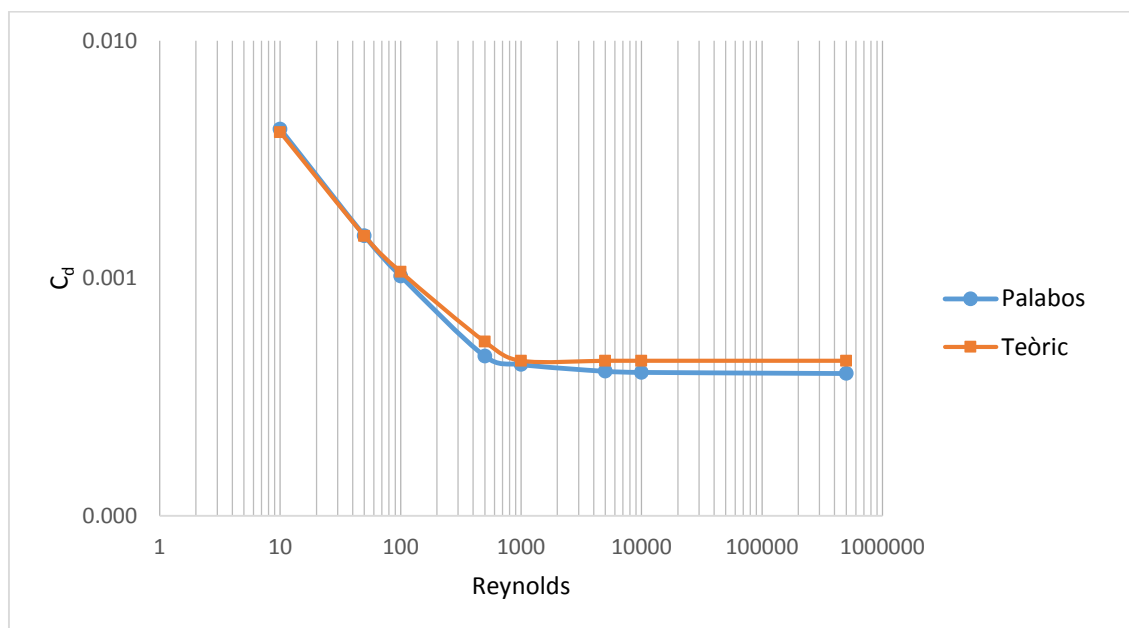


Figura D.2: Gràfic corba de resistència avanç d'una esfera per diferents valors de Reynolds

Mitjançant el software Paraview es poden visualitzar els resultats. Hi ha diverses eines de visualització: tall, isosuperfície i línies de corrent. També es pot triar si es vol representar els valors obtinguts de velocitat o de pressió. En les figures posteriors es representen resultats obtinguts per a les diferents simulacions per observar si el flux es comporta de manera correcta i genera bé la estela.

En la figura D.3 es representa un tall centrat al mig de la esfera on hi ha representat el diagrama de velocitats quan el flux s'ha ja estabilitzat per al cas 1.

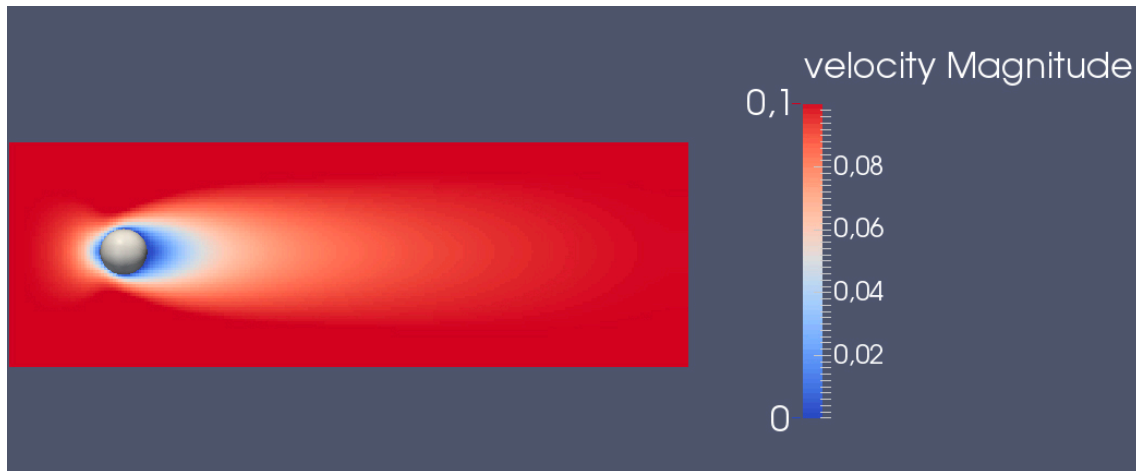


Figura D.3: Representació velocitat del cas 1 quan el flux ja s'ha estabilitzat per un plà vertical centrat.

En la figura D.4 es representa un tall centrat al mig de la esfera on hi ha representat el diagrama de velocitats quan el flux s'ha ja estabilitzat per al cas 5.

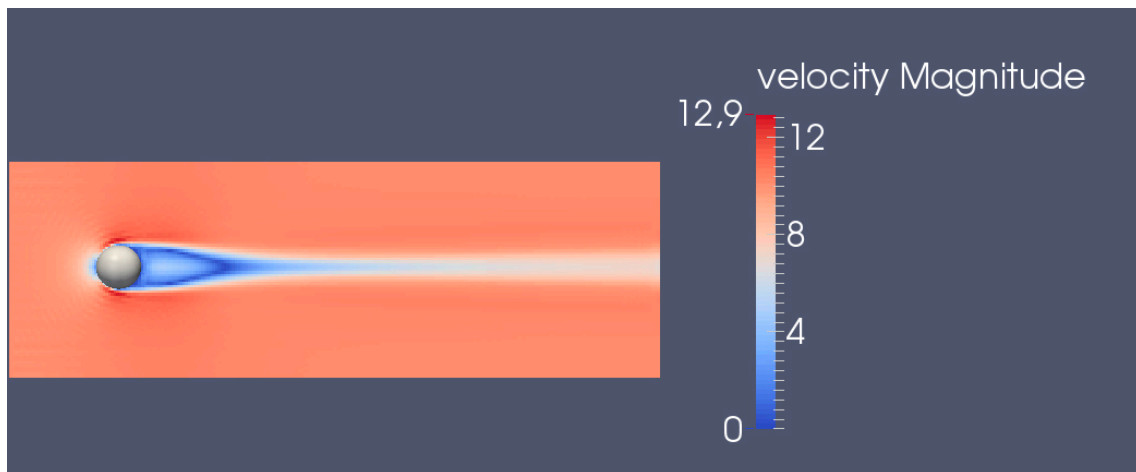


Figura D.4: Representació velocitat del cas 5 quan el flux ja s'ha estabilitzat per un plà vertical centrat.

En la figura D.5 es representa un tall centrat al mig de la esfera on hi ha representat el diagrama de velocitats quan el flux s'ha ja estabilitzat per al cas 5.

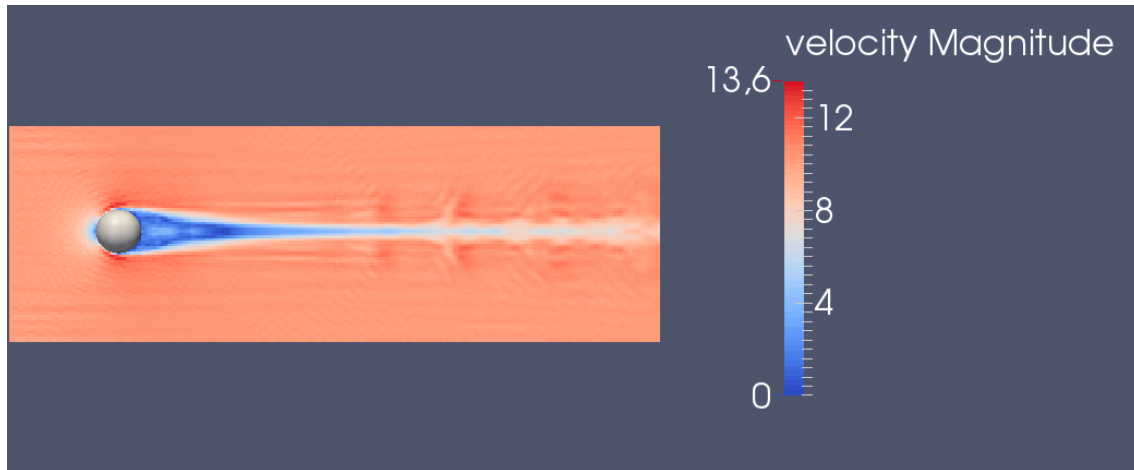


Figura D.5: Representació velocitat del cas 7 quan el flux ja s'ha estabilitzat per un pla vertical centrat.

D.2.3 Conclusions

L'error relatiu entre els resultats teòrics i els resultats obtinguts mitjançant Palabos són inferiors al 13%, tal i com es pot veure en la taula D.2.

Taula D.2: Resultats de les diferents simulacions de validació de resultats

Simulació	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5	Cas 6	Cas 7	Cas 8
Error relatiu	3,13	0,16	3,90	12,96	3,53	9,65	10,57	11,53

Aquesta diferència de resultats pot ser deguda a dos factors. En primer lloc la fórmula del coeficient de residència a l'avanç, equació 1, és aproximada. Per tant, els resultats calculats mitjançant la equació no són del tot precisos. En segon lloc, al utilitzar Palabos s'ha definit una resolució i velocitat de Lattice determinada. Aquests dos valors no són molt precisos. Si s'augmenta el valor de la resolució i el valor de la velocitat de Lattice, els resultats serien més acurats i per tant una disminució de l'error.

Com es pot apreciar en les figures D.3, D.4 i D.5 el flux és genera de manera satisfactòria.

Al ser un error petit es pot aprovar el programa Palabos per a la simulació amb túnel de vent virtual. I afirmar que els resultats obtinguts són correctes.

ANNEX E : PARAL·LELITZACIÓ DE PALABOS

E.1 Introducció

La paral·lelització consisteix a utilitzar més d'un core simultàniament per a l'execució d'un programa. Els ordenadors actuals tenen integrats processadors multi-core. Un processador multi-core és un sol component de computació amb dues o més unitats independents de processament central (anomenades "cores"), que són les unitats de llegir i executar les instruccions del programa. Els processadors de múltiples cores poden executar diverses instruccions al mateix temps i augmentar la velocitat global de programes de computació paral·lela.

En aquest apartat s'explica la paral·lelització del programa Palabos. S'explica la comanda que s'utilitza per executar el programa en paral·lel i també s'identifica el nombre de cores òptim per executar el programa. Aquest annex resulta de gran utilitat per tal de reduir els temps de simulació.

E.2 Paral·lelització mitjançant la comanda Unix

Per executar el programa, tal com s'ha descrit en anterioritat, Palabos utilitza el terminal Unix. Per executar el programa amb només un core s'utilitza la comanda habitual d'execució en el terminal (./nom_arxiu). Per indicar que volem més d'un core s'utilitza la comanda

```
$ mpirun -np X ./nom_arxiu nom_arxiu.xml (1)
```

on X és el nombre de cores que es volen utilitzar.

En la figura E.1 es pot observar com s'executa el programa per a diferents nombres de cores en el Cluster. Es pot observar el correcte funcionament de la comanda, ja que s'executa des d'1 core fins a 72 cores amb diferents execucions.

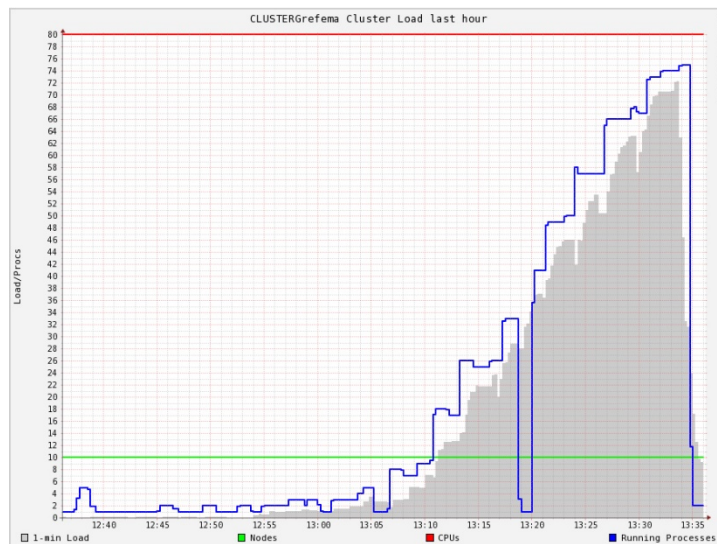


Figura E.1 : Execucions de programa Palabos amb diferent nombres de cores

E.3 Nombre de Cores Òptim

En aquest apartat s'identifica el nombre de Cores òptim per tal de realitzar la simulació amb el menor temps possible utilitzant el programa Palabos. Per a realitzar aquesta tasca s'observa la corba de temps de simulació del programa en funció del nombre de cores. Aquesta anàlisi es fa tant per al Cluster com per al portàtil del qual es disposa.

El Cluster és un superordenador de propietat del grup GRFFFMA d' EMCi de la Universitat de Girona, del qual es té el permís d'utilització a partir de connexió al servidor, Fram. Les especificacions tècniques del Cluster són de 4GB de RAM i 72 cores de 1.8 GHz, equipant un Intel Xeon. Mentre que el portàtil disposa de 8GB de RAM i una CPU de 8 cores de 2,5GHz equipant un i7. On el nombre de cores equival al nombre de cores disponibles.

Per tal de realitzar la corba de temps en funció del nombre de cores se simula una mateixa esfera sota les mateixes condicions per a nombre de cores diferents. De la simulació se n'extreu el temps real entre iteracions.

Seguint el procediment descrit en anterioritat, utilitzant el Cluster, s'obtenen els següents resultats representats en la taula E.1.

Taula B.1: Resultats de temps entre iteracions en el Cluster.

Nombre de Cores	1	2	4	6	8	16	24	32	40	48	56	64	72
Temps entre iteracions (s)	9,28	6,62	5,97	5,77	7,78	8,9	9,78	11,86	11,85	12,78	13,7	15,8	16,13
	9,35	6,7	5,85	5,95	7,78	8,9	9,85	11,99	11,72	12,99	13,77	15,84	16,15
	9,29	6,71	5,93	5,94	7,81	8,84	9,89	11,94	11,72	13,01	13,73	15,86	16,05
Mitjana de temps (s)	9,31	6,68	5,92	5,89	7,79	8,88	9,84	11,93	11,76	12,93	13,73	15,83	16,11

Per contra, utilitzant el portàtil s'obtenen els resultats representats en la taula B.2 .

Taula B.2: Resultats de temps entre iteracions en el portàtil.

Nombre de Cores	1	2	4	6	8
Temps entre iteracions	1,96	1,68	2,4	3,18	4,07
	1,94	1,45	2,88	3,32	4,08
	1,86	1,51	2,78	3,23	4,09
Mitjana de temps	1,92	1,55	2,69	3,24	4,08

Per tal d'obtenir una major comprensió dels resultats obtinguts es grafiquen les dades obtingudes del Cluster i del portàtil, tal i com es pot observar en la figura B.3 .

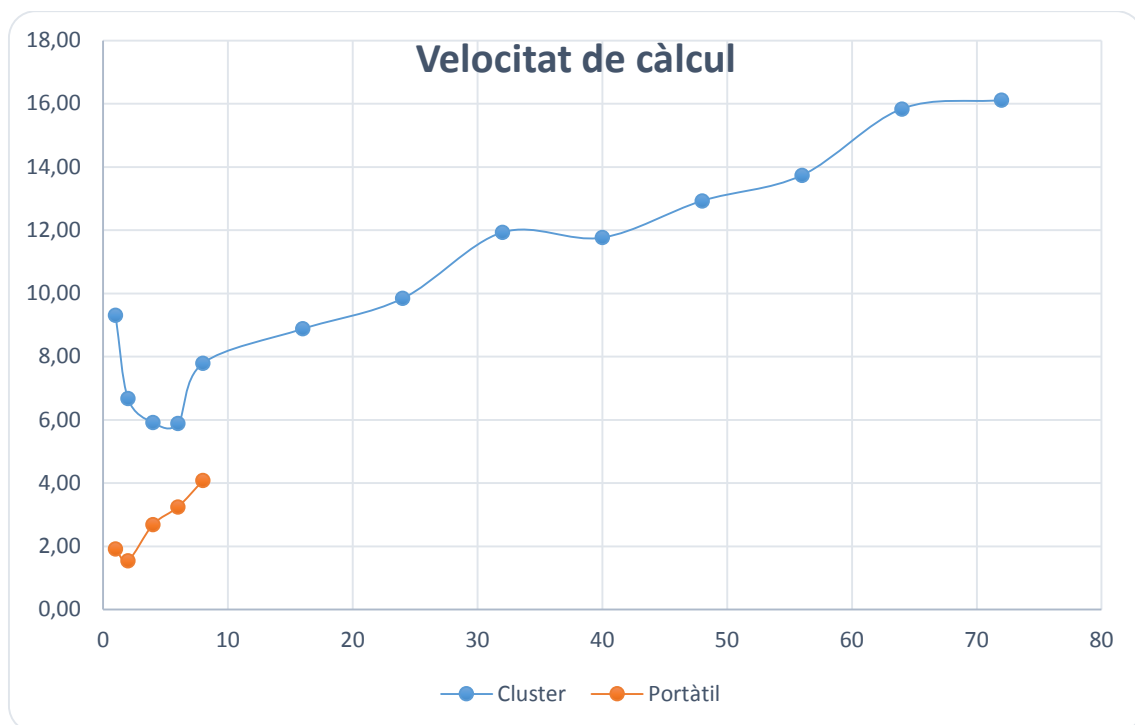


Figura B.3: Gràfic de temps entre iteracions variant el nombre de cores per a el portàtil i el Cluster.

Com es pot observar en la figura B.3 existeix una diferència significativa entre els temps de simulació del Cluster i del portàtil. El portàtil és bastant més ràpid que el Cluster. Aquest fet succeeix per la diferència de velocitat de la CPU, com s'ha descrit anteriorment el portàtil és superior en aquest aspecte. També és degut a la latència de connexions entre els diferents cores del Cluster fetes amb cable de xarxa. Malgrat la baixa velocitat que presenta el Cluster respecte del portàtil, aquest té l'avantatge que pot executar diverses simulacions en paral·lel per tal d'augmentar el seu rendiment.

També es pot apreciar que el nombre de cores òptim de simulació no és el màxim de cores disponibles, com es podria esperar. Aquest fet és degut a la interferència d'informació entre els diferents cores i que la paralització del programa no està del tot ben desenvolupada.

En conclusió, el nombre de cores òptim en el cas del Cluster és de 4 cores mentre que del portàtil és de 2 cores.

ANNEX F : DISSENY DE LA CARROSSERIA**F.1 Anàlisi de la competència**

A partir de les vistes d'alçat, plata, perfil i la mesura de la batalla es generen les carrosseries dels monoplaques de fórmula Student Zwikau 2013 i UAS Graz 2013 [12]. En aquest apartat es visualitzen els resultats de les simulacions aerodinàmiques i els valors numèrics obtinguts a partir aquestes.

Les simulacions es realitzen amb un programa comercial basat amb el mètode de Lattice-Boltzmann. En aquest es tria una resolució de $N=0,025\text{cm}$, al ser geometries simples és una mida de resolució adequada. Les mides de túnel de vent, per ambdós casos, són de $10 \times 1 \times 1,5\text{m}$. Aquestes mesures no influeixen de manera massa significativa el resultat final i permeten que la resolució pugui ser alta. La velocitat del fluid i la velocitat del terra és de 22 m/s i el fluid és aire, amb una densitat d' $1,225\text{ kg/m}^3$.

A partir de la simulació del monoplaça de fórmula Student Zwikau 2013 s'obtenen els següents resultats un cop el flux s'ha estabilitzat. Aquests resultats s'inclouen en la taula F.1.

Taula F.1: Coeficients aerodinàmics de la carrosseria del Zwikau 2013

Velocitat	20 m/s (72km/h)	25 m/s (90km/h)	30 m/s (108km/h)
C_d	0,191		
C_i	-0,056		
Àrea frontal	0,3708 m^2		
Força resistent	17,35 N	27,11 N	39,04 N
Càrrega aerodinàmica	- 5,08 N	-7,95 N	-11,44 N

A partir d'aquesta taula es pot observar que és una carrosseria pensada a tenir un coeficient de resistència a l'avanç molt baix. En aquest cotxe no se li dóna massa importància a la càrrega aerodinàmica. Per augmentar-la s'utilitza un difusor. L'any 2013 aquesta universitat no va utilitzar alerons per millorar la càrrega aerodinàmica.

En les figures F.1, F.2 i F.3 es representen els valors dels resultats de velocitat, pressió total i turbulència en el pla més representatiu un cop el flux ja s'ha estabilitzat.

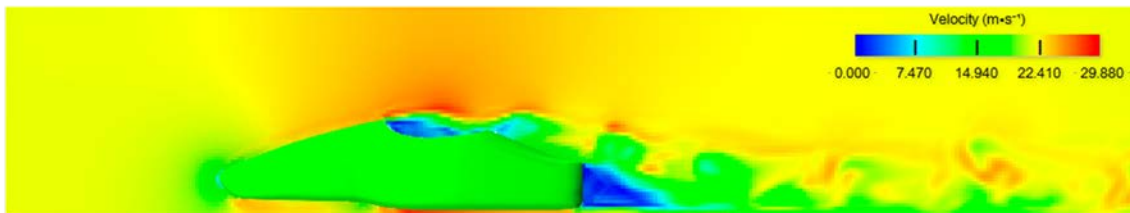


Figura F.1: Diagrama de velocitats per al pla central frontal de la carrosseria del Zwikau 2013.

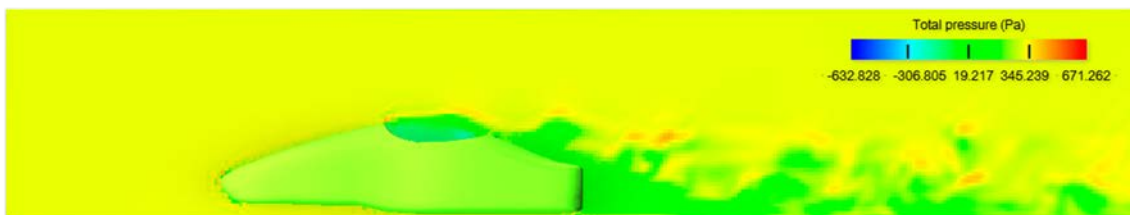


Figura F.2: Diagrama de pressió total per al pla central frontal de la carrosseria del Zwikau 2013.

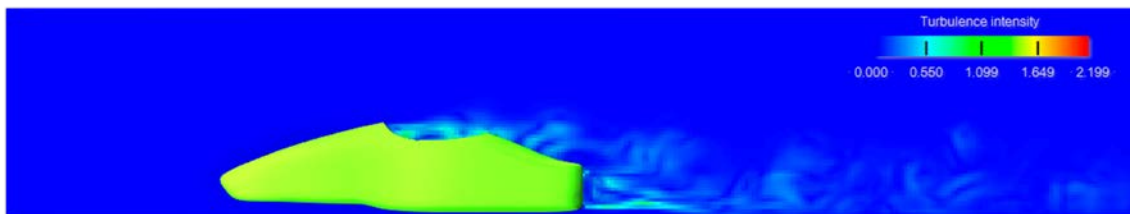


Figura F.3: Diagrama de intensitat de turbulència per al pla central frontal de la carrosseria del Zwikau 2013.

En les figures anteriors es pot veure que l'estela que genera el monoplaça és molt baixa i genera poques turbulències. També es pot veure com la part davantera fa que la part posterior del monoplaça tingui baixa pressió. Així aconseguixen poca fricció del flux amb la carrosseria a la part del darrere del cotxe. Aquestes característiques són claus per la baixa resistència a l'avanç que presenta aquest monoplaça. També es pot veure com la velocitat s'incrementa per sota el vehicle. Aquesta velocitat alta crea la diferència de pressió i la càrrega aerodinàmica. Aquesta geometria no té molt bona càrrega aerodinàmica, ja que el morro és molt baix i molt flux circula per sobre el vehicle.

A partir de la simulació del monoplaça de fórmula Student UAS Graz 2013 s'obtenen els següents resultats un cop el flux s'ha estabilitzat. Aquests resultats s'inclouen en la taula F.2.

Taula F.2: Coeficients aerodinàmics de la carrosseria del Zwikau 2013

Velocitat	20 m/s (72km/h)	25 m/s (90km/h)	30 m/s (108km/h)
C_d	0,349		
C_l	-0,327		
Àrea frontal	0,3433 m ²		
Força resistent	29,35 N	45,86 N	66,04 N
Càrrega aerodinàmica	-27,5 N	- 42,97 N	61,31 N

El monoplaça analitzat es tracta d'un cotxe amb coeficients equilibrats. No té un coeficient de resistència a l'avanç excessivament alt i aconsegueix un coeficient de càrrega aerodinàmica bastant alt sense la incorporació de difusor.

En les figures F.4, F.5 i F.6 es representen els valors dels resultats de velocitat, pressió total i turbulència en el pla més representatiu un cop el flux ja s'ha estabilitzat.

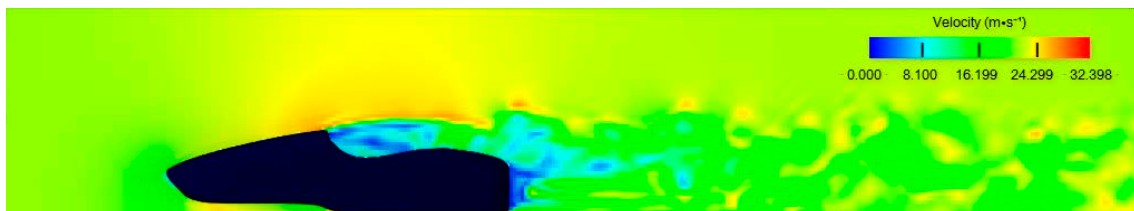


Figura F.4: Diagrama de velocitats per al pla central frontal de la carrosseria del UAS Graz 2013.

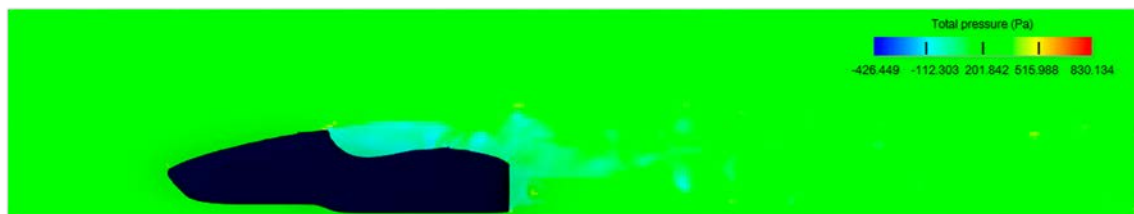


Figura F.5: Diagrama de pressió total per al pla central frontal de la carrosseria del UAS Graz 2013.



Figura F.6: Diagrama de turbulència per al pla central frontal de la carrosseria del UAS Graz 2013.

El monoplaça genera una estela d'alçada mitjana, més gran que la del monoplaça Zwickau 2013. Aquest fet empitjora el coeficient de residència a l'avanç significativament. Té el morro més alçat que el Zwickau 2013 fet que comporta que passi més aire per la part inferior. Això millora el coeficient de càrrega aerodinàmica.

Tots dos monoplaces es caracteritzen per ser molt estilitzats. El morro comença amb poca alçada i augmenta en forma de corba al llarg de la seva longitud. El xassís fabricat per les respectives universitats els hi permet poder crear aquesta forma. Per la part inferior tots dos creen dos nivells. Al començar la cabina del pilot la distància amb el terra és inferior. La part posterior queda per sota de la part més alta del morro per evitar fricció del fluid amb la part posterior del vehicle.

F.2 Alçada de nas

En aquest subapartat s'analitzen diferents valors de coeficients aerodinàmics per diferents alçades de nas. Concretament s'analitzen tres posicions de nas, una baixa, una mitja i una alta. A 300, 350 i 450 mil·límetres respecte terra (o 250, 300, 400 respecte al punt més baix de la carrosseria), tal com es pot veure en la figura F.7.

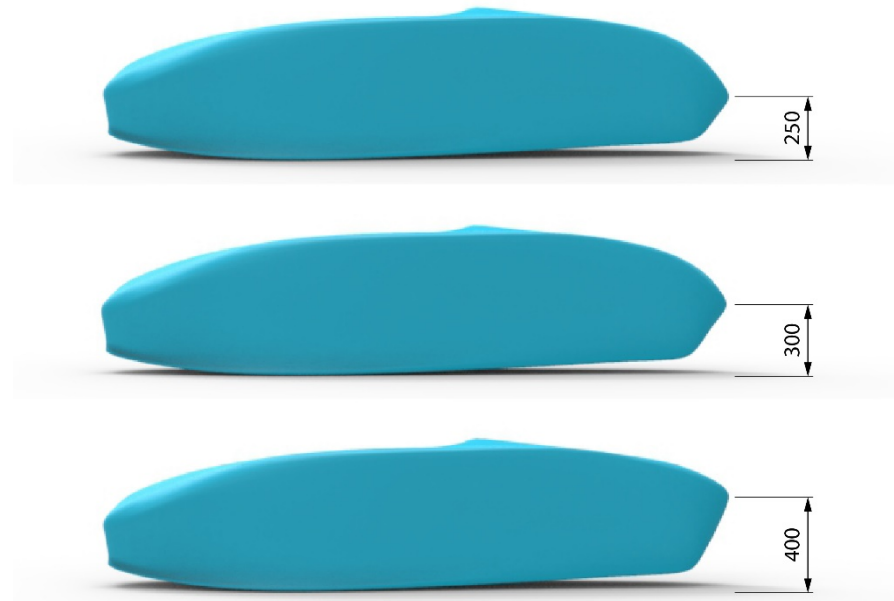


Figura F.7: Alçades morro respecte punt més baix.

Les tres variacions de la carrosseria se simulen sota les mateixes condicions. Amb una mida de túnel de 10x2x2, a una posició de 5 cm des del punt més baix de la carrosseria a terra i a 150 cm des del nas a l'entrada del túnel, amb una velocitat de vent i de terra de 22 m/s i una resolució de 0,025.

En aquest apartat la carrosseria no té pontons i té el cul tapat per tal de poder comparar amb els resultats obtinguts dels monoplaques de l'apartat 1 d'aquest annex.

En les figures posteriors F.8, F.9 i F.10 es representen els valors dels resultats de velocitat, en el pla més representatiu un cop el flux ja s'ha estabilitzat. Cada una de les figures correspon a una alçada de nas diferent per tal de comparar el comportament del flux.

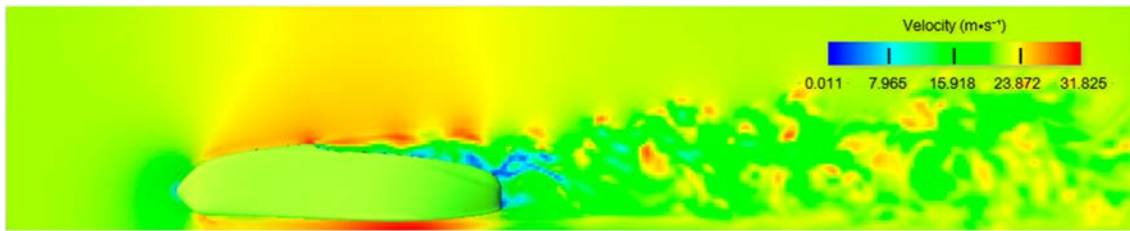


Figura F.8: Diagrama de velocitats per al pla central frontal de la carrosseria amb alçada de morro de 300mm respecte el terra.

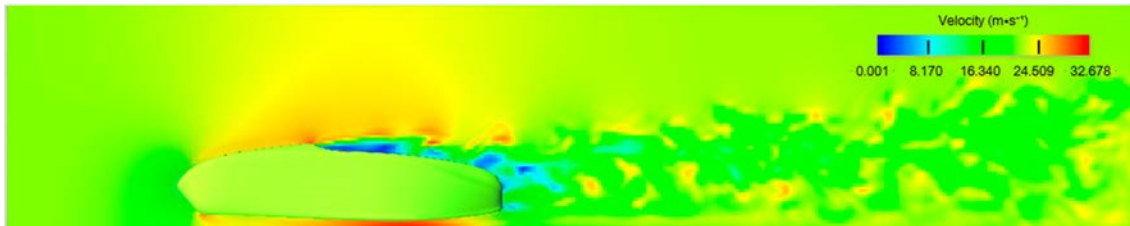


Figura F.9: Diagrama de velocitats per al pla central frontal de la carrosseria amb alçada de morro de 350mm respecte el terra.

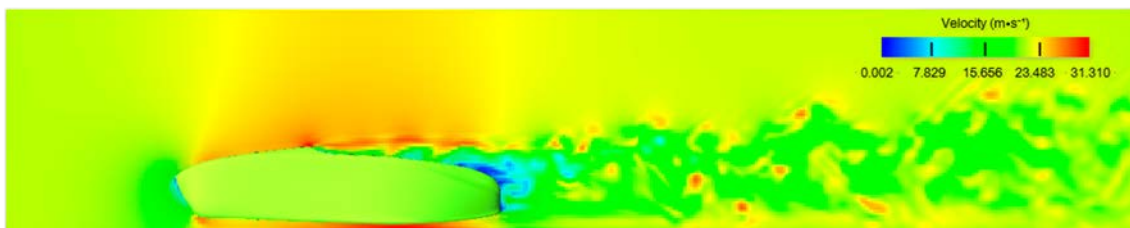


Figura F.10: Diagrama de velocitats per al pla central frontal de la carrosseria amb alçada de morro de 450mm respecte el terra

Les tres geometries gairebé no s'aprecien diferències significatives. Aquest fet comporta que tinguin coeficients aerodinàmics similars. La diferència més important la trobem al nas. Tant en el cas d'alçada de 300 mm com en el de 450 mm apareix una zona de baixa velocitat. Aquesta zona indica que el fluid rep un canvi de velocitat més gran i que el monoplaça necessita més força per desplaçar-se. En el cas entremig aquesta zona quasi no és apreciable. Aquest fet implica un major coeficient de resistència a l'avanç.

L'àrea frontal no varia en cap dels tres casos. Per tant els coeficients aerodinàmics són comparables entre si. Els resultats finals dels coeficients aerodinàmics obtinguts estan inclosos en la taula F.3.

Taula F.3: Coeficients aerodinàmics en funció de l'alçada de nas

Alçada respecte el terra (h) [mil·límetres]	Coeficient resistència a l'avanç (Cd)	Coeficient càrrega aerodinàmica (Cl)
300	0,301	-0.505
350	0,256	-0,496
450	0,271	-0,502

Com es pot observar en la taula anterior les tres alçades de nas presenten coeficients aerodinàmics molt similars. El coeficient de càrrega aerodinàmica només varia un 1,8% mentre que el coeficient de resistència l'avanç varia un 17%.

S'escull l'alçada de nas de 350 mm respecte terra, ja que és la que presenta un millor coeficient de resistència a l'avanç i el coeficient de càrrega aerodinàmica la diferencia amb el de 450 mm és molt baixa i és poc apreciable en el vehicle. A més presenta un millor disseny que la resta.

Aquesta alçada de nas és la definitiva i és la que s'utilitza per a la resta de simulacions on s'inclogui la carrosseria.

F.3 Dimensionament entrada d'aire pontons

Per a calcular l'entrada d'aire necessària per no sobreescalfar el motor i les bateries s'utilitza un càlcul termodinàmic.

Es considera que les pèrdues de potència del motor i de les bateries es transformen en calor. Per tant, a partir dels rendiments i potències del motor i bateries se n'extreu el calor total.

Es considera que l'aire que s'utilitza per a la refrigeració és només l'aire que entra pels pontons. El cabal d'entrada és el mateix que el de sortida. A partir de l'equació de conservació de l'energia s'arriba a la següent expressió,

$$\dot{m} \cdot h_1 + Q = \dot{m} \cdot h_2 , \quad (\text{F.1})$$

On \dot{m} equival al cabal màssic, h_1 i h_2 a l'entalpia del flux a l'entrada i a la sortida respectivament i Q és el calor alliberat per les pèrdues de potència. L'anterior expressió s'il·lustra en la figura F.11.

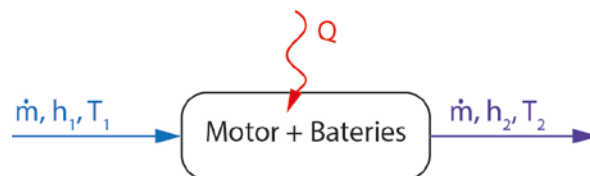


Figura F.11: Diagrama del procés de refrigeració

El cabal és el producte d'àrea per velocitat i el cabal màssic és el producte del cabal per la densitat. A partir de les anteriors consideracions s'arriba a la nova expressió

$$v \cdot A \cdot \rho \cdot h_1 + Q = v \cdot A \cdot \rho \cdot h_2 , \quad (\text{F.2})$$

on A és l'àrea d'entrada de fluid, v és velocitat d'entrada del fluid i ρ és la densitat d'entrada del fluid. Aïllant l'àrea d'entrada obtenim l'expressió final

$$A = \frac{Q}{v \cdot \rho \cdot (h_2 - h_1)}, \quad (\text{F.3})$$

El monoplàça té dos pontons simètrics amb dues entrades simètriques, també té dos motors i dos blocs de bateries. Cada entrada d'aire refrigera un bloc de bateries i un motor per tant els càlculs es realitzen per al dimensionament d'una entrada d'aire.

El monoplàça utilitza dos motors ERMAX 228 hv, un per a cada roda. Amb una potència màxima de 40 kW. Les gràfiques de les corbes de rendiment i potència obtingudes a partir del seu catàleg són les figures F.12 i F.13.

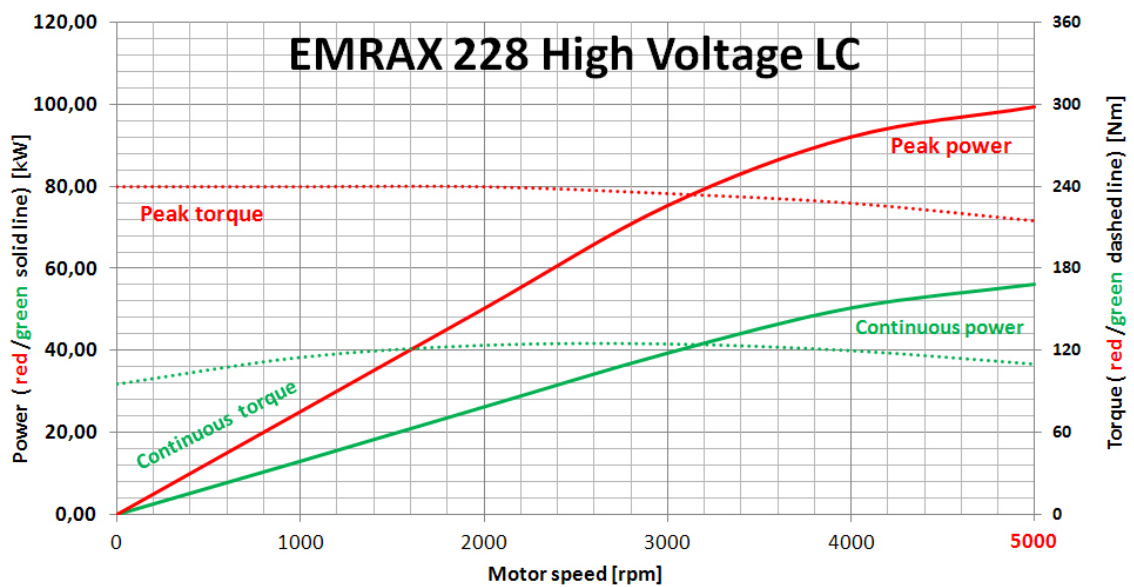


Figura F.12: Gràfic parell motor i potència en funció de les revolucions del motor ERMAX 228 hv [10]

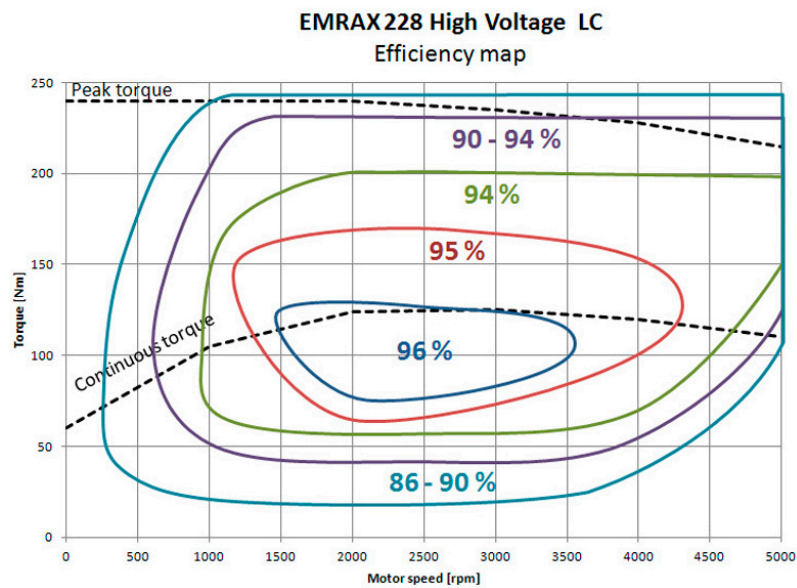


Figura F.13: Gràfic de rendiment en funció de les revolucions del motor ERMAX 228 hv
[10]

Es considera que el vehicle a 5000 rpm assoleix la velocitat màxima del monoplaça. Valors de resultats de competicions anteriors els monoplaçes de Formula Student arriben a 110 km/h aproximadament. De tal manera que es considera que a 5000rpm el cotxe va a 110 km/h. El parell assoleix el seu màxim a 2000rpm que equival a 45 km/h. La velocitat de 45 km/h (12,5 m/s) serà l'escollida per al dimensionament de l'entrada d'aire als pontons. S'escull aquesta velocitat, ja que és la mínima velocitat en que el motor treballa al màxim de potència. Per aquesta velocitat del monoplaça el rendiment és del 96%.

Quant a les bateries encara no s'ha escollit el model. Se sap que seran bateries de liti. Segons estudis el rang de temperatures de treball d'aquestes bateries és de 0 a 45 °C [8] i [9]. Si se supera aquest valor de temperatura les bateries funcionen igual però se n'escurça el seu cicle de vida. Es pren un a temperatura de 40 °C per al càlcul, ja que es té 5 °C de marge i es considera adequat per tal de no superar el valor de 45 °C. El rendiment de les bateries de liti sol ser d'un 86%, es considera aquest valor per al càlcul del dimensionament.

La competició se celebra la primera setmana de juliol de cada any. Es pren com a temperatura d'entrada el valor de temperatura mitjana a Oxford (prop de Silverstone) durant la primera setmana de juliol de l'any 2013. La temperatura és de 23 °C i a pressió atmosfèrica, sota aquestes condicions la densitat de l'aire és d'1,19226 kg/m³.

El procés de refrigeració es considera un procés isobàric, les entalpies es busquen en taules a pressió atmosfèrica en la temperatura corresponent.

Les dades prèviament explicades estan incloses en la taula F.4

Taula F.4: Dades dimensionament entrada d'aire

Potència motor	P_m	40000	W
Rendiment motor	η_m	96	%
Calor motor	Q_m	1600	W
Potència bateries	P_b	40000	W
Rendiment bateries	η_b	86	%
Calor bateries	Q_b	5600	W
Calor total	Q	7200	W
Velocitat d'entrada	v	22	m/s
Densitat d'entrada	ρ	1,19226	kg/m ³
Temperatura d'entrada	T_1	23	°C
Temperatura de sortida	T_2	40	°C
Entalpia d'entrada	h_1 (23°)	296,17	kJ/kg
Entalpia de sortida	h_2 (40°)	313.258	kJ/kg

Substituint el l'equació F.3 i s'obté que cada entrada d'aire ha de tenir un mínim de

$$A = 0,028272 \text{ m}^2 .$$

F.4 Simulació de la carrosseria amb pontons

En aquest apartat s'ajunten els resultats tant numèrics com gràfics de la carrosseria final (amb pontons, alçada de morro optima i cul obert).

Per a la simulació s'utilitza el programa comercial. En aquest cas es tria una resolució de $N=0,025$. Les mides de túnel de vent són de $10 \times 2 \times 2,5$ m. La carrosseria se situa a 5 cm respecte a terra i a 150 cm respecte a l'entrada del túnel. La velocitat del fluid i del terra és de 22 m/s.

Els resultats numèrics de la simulació s'inclouen en la taula F.5.

Taula F.5: Coeficients aerodinàmics de la carrosseria final.

Velocitat	20 m/s (72km/h)	25 m/s (90km/h)	30 m/s (108km/h)
C_d	0,261		
C_i	-0,614		
Àrea frontal	0,7527 m ²		
Força resistent	48,13 N	75,2 N	108,29 N
Càrrega aerodinàmica	-113,22 N	-176,92 N	-254,76 N

Es pot observar que els coeficients aerodinàmics són molt bons comparats amb els dels altres monoplaques analitzats en l'apartat 1 d'aquest annex. S'ha de dir però que les carrosseries tenen el cul tapat, per manca d'informació i no s'ha generat la geometria dels pontons.

En la figura F.14 es pot veure la carrosseria tridimensional dins del túnel de vent. En aquesta s'hi representa el flux en forma de issosuperfície de velocitat.

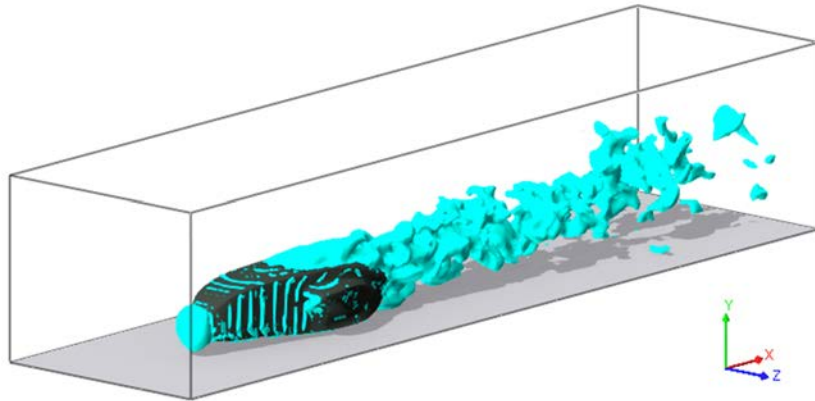


Figura F.14: Representació de la estela mitjançant una isosuperfície de velocitat.

Les figures F.15, F.16 i F.17 es representen els valors dels resultats de velocitat, pressió total i turbulència en el pla central frontal un cop el flux ja s'ha estabilitzat.

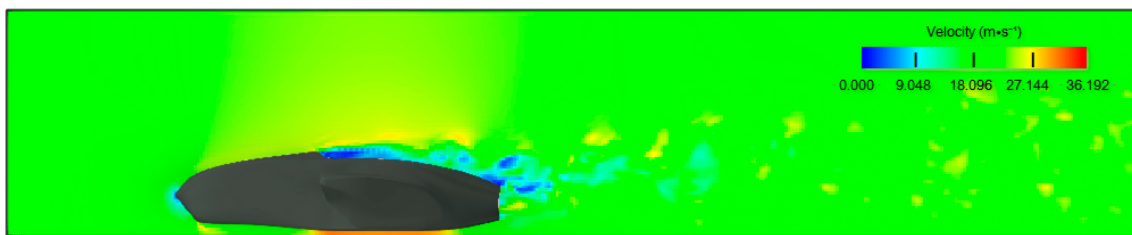


Figura F.15: Diagrama de velocitats per al pla central frontal de la carrosseria final.



Figura F.16: Diagrama de pressions total per al pla central frontal de la carrosseria final.

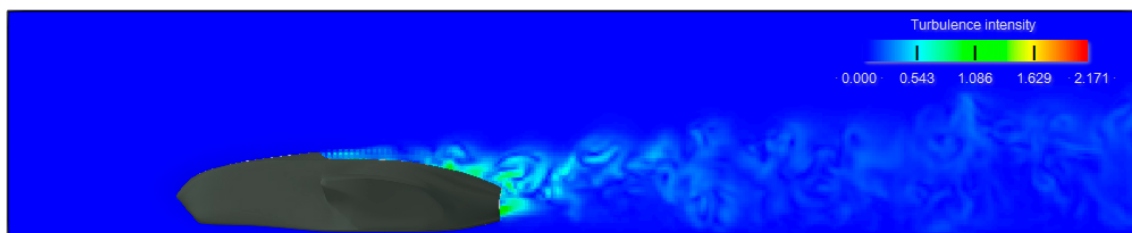


Figura F.17: Diagrama de turbulències per al pla central frontal de la carrosseria final.

En les figures anteriors es pot veure l'estela generada pel monoplaça. Es pot veure també quina és la zona amb més turbulències. Aquesta és a la part posterior del vehicle, on surt l'aire de l'interior dels conductes de refrigeració i l'aire que entra per la cabina. També es pot veure com l'estela en primera instància puja per l'efecte que el cul està aixecat.

Les figures F.18, F19 i F20 es representen els valors dels resultats de velocitat per observar el funcionament dels canals de refrigeració pels pontons i l'efecte dels pontons.

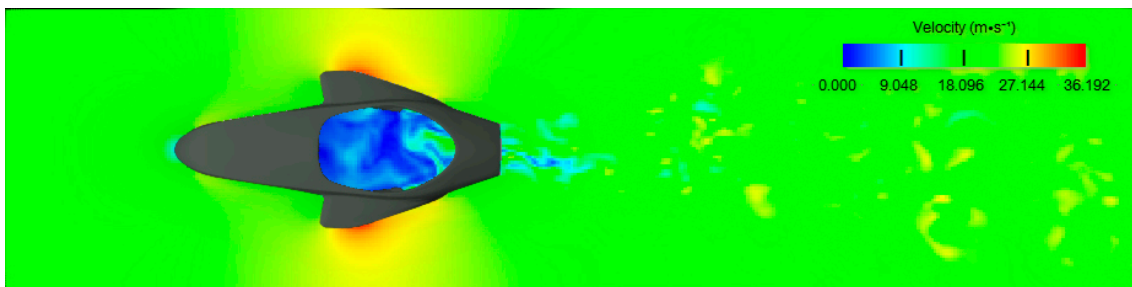


Figura F.18: Diagrama de velocitats per al pla central frontal de la carrosseria final.

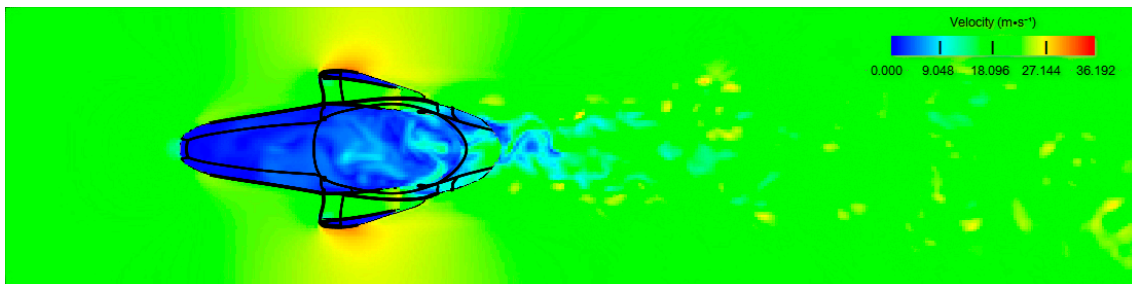


Figura F.19: Diagrama de velocitats per al pla central frontal de la carrosseria final.

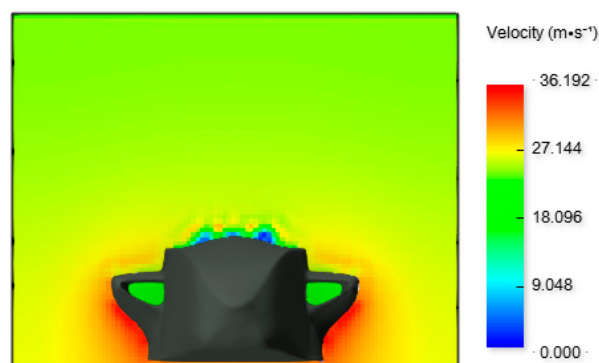


Figura F.20: Diagrama de velocitats per al pla central frontal de la carrosseria final.

En les figures anteriors es pot analitzar el comportament de l'entrada d'aire dins dels canals de refrigeració. En la figura F.20 es pot veure com l'aire entra dins dels conductes

de refrigeració amb una velocitat bastant similar a la velocitat del flux a l'entrada del túnel de vent. Aquest fet és positiu, ja que la geometria de les entrades no penalitza l'entrada del fluid dins els canals de refrigeració. Això fa i fa que l'àrea calculada sigui correcta que l'àrea d'entrada geomètrica sigui també l'entrada real. En la figura F.19 es pot veure també com el flux circula pels canals de forma correcta.

També es pot observar com afecta la geometria exterior dels pontons a l'aerodinàmica del monoplaça. En la figura F.18 s'observa que el fluid segueix a la geometria. La incorporació de pontons no genera una estela més ample de l'habitual o una anticipació de l'estela. Aquest fet fa que no augmenti el coeficient de resistència a l'avanç de manera exagerada. En la figura F.20 es pot observar com el fluid circula molt més ràpid per sota els pontons que per la seva part superior. Aquest fet millora la càrrega aerodinàmica de la carrosseria ja la diferència de pressió entre la part superior i inferior genera una força total vertical negativa.

En la figura F.18 es pot observar que el cul obert no deixa circular l'aire lliurement per l'interior del monoplaça. Aquest fet no és del tot correcte, ja que dins del vehicle hi haurà components mecànics i elèctrics. Tindre el cul obert millora de manera molt significativa el coeficient de resistència a l'avanç i és l'explicació que el coeficient de resistència a l'avanç no es vegi gaire afectat respecte a l'anàlisi de l'alçada de nas.

F.5 Simulació de la carrosseria sense pontons amb Palabos

En aquest apartat se simula una geometria mitjançant Palabos. S'analitza els resultats obtinguts i se'ls compara amb la mateixa geometria simulada amb el programa comercial.

F.5.1 Simulació Palabos

La geometria analitzada és la carrosseria d'aquest annex utilitzada per analitzar l'alçada del nas. La utilitzada és la de 350 mm respecte a terra, la millor valorada. En aquest cas però també es tanca la cabina del pilot, fent que sigui un sòlid tancat, per evitar errors de simulació.

Ja que en el programa Palabos no es pot implementar terra per a la simulació de túnel virtual se simula la carrosseria en una posició centrada. Els valors de simulació són els següents inclosos en la taula F.6

Taula F.6: Paràmetres de simulació de la carrosseria utilitzant Palabos

Mides túnel de vent	12 x 2,5 x 2,5	m
Posició del objecte	3 x 1,25 x 1,25	m
Viscositat	0,0000151	Pa s
Velocitat real	22	m/s
Velocitat de lattice	0,006	
Resolució	120	

A partir dels paràmetres de simulació anteriors es simula la carrosseria i s'obtenen els següents resultats, taula F.7.

Taula F.7: Resultats obtinguts de la carrosseria utilitzant Palabos

F_x (Força resistent)	54,86 N
F_y	-8,42 N
F_z (Càrrega aerodinàmica)	16,66 N

A partir de la densitat de l'aire 1,225 kg/m³ i de l'àrea frontal del monoplaça 0,5991 m² s'obté els valors de coeficients aerodinàmics, taula F.8.

Taula F.8: Coeficients aerodinàmics de la carrosseria utilitzant Palabos

Velocitat	20 m/s (72km/h)	25 m/s (90km/h)	30 m/s (108km/h)
C_d	0,308		
C_i	0,094		
C_y	-0,021		
Àrea frontal	0,5991 m ²		
Força resistent	45,34 N	70,85 N	102,04 N
Càrrega aerodinàmica	13,77 N	21,51 N	30,98 N

Els resultats gràfics obtinguts mitjançant Paraview un cop el flux s'ha estabilitzat es representen en les figures F.21, F.22, F.23 i F.24 .

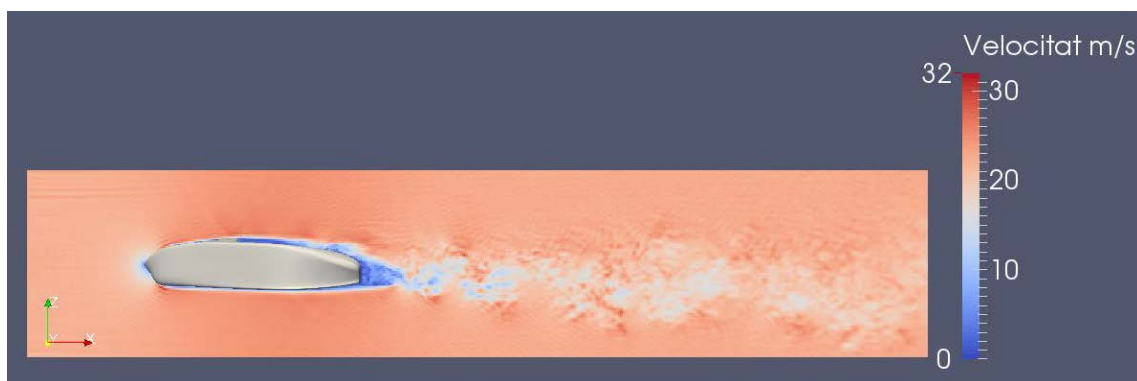


Figura F.15: Diagrama de velocitats per al pla central frontal de la carrosseria simulada amb Palabos.



Figura F.15: Diagrama de pressions per al pla central frontal de la carrosseria simulada amb Palabos.

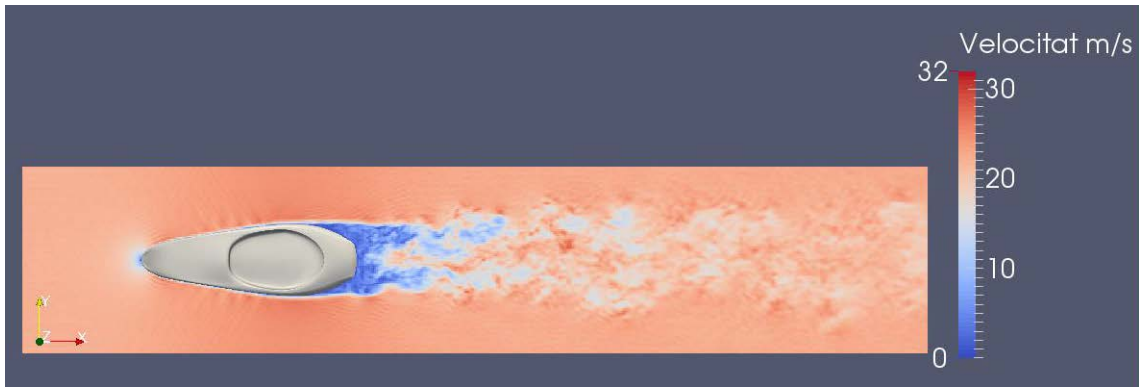


Figura F.15: Diagrama de velocitats per al pla central horitzontal de la carrosseria simulada amb Palabos.

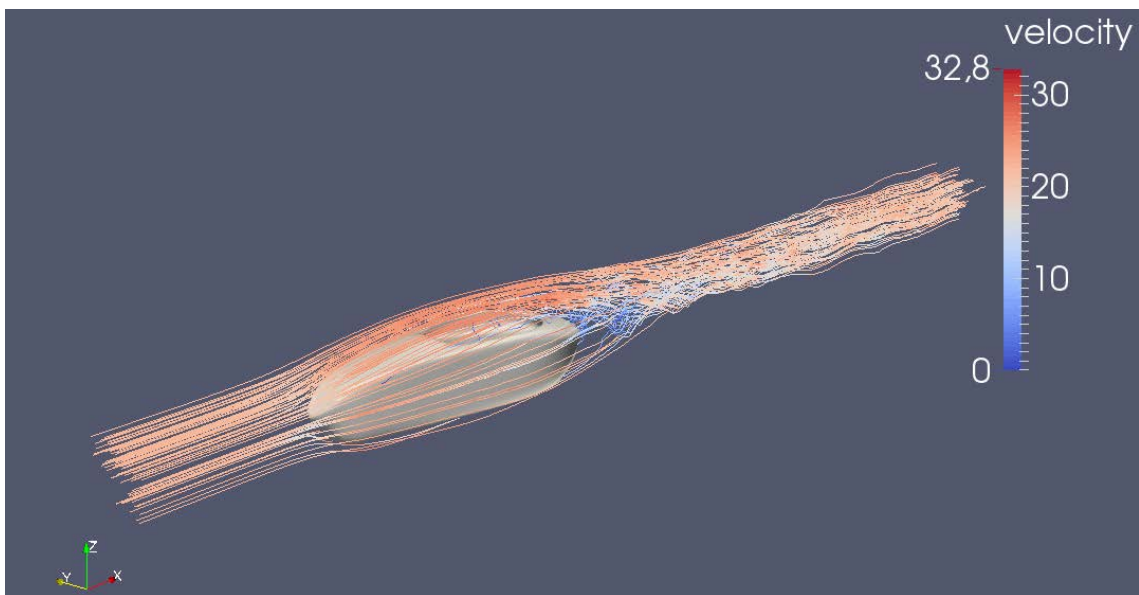


Figura F.23: Línies de corrent amb la magnitud de velocitat en m/s pintada.



Figura F.24: Isosuperfície de 18m/s amb pressió en Pa pintada.

F.5.2 Simulació programa comercial

Amb les mateixes condicions de túnel de vent i de fluid se simula la mateixa geometria en la mateixa posició utilitzant el programa comercial.

En el programa comercial s'utilitza una resolució de 0,2 m que també equival a la resolució de 120 utilitzada mitjançant Palabos. La resolució amb unitats de Palabos és la longitud en l'eix Y (2,5 m) dividit per la resolució.

Els resultats obtinguts de la simulació estan inclosos en la taula F.9 on també s'inclouen les forces totals degudes als coeficients calculades.

Taula F.8: Coeficients aerodinàmics de la carrosseria utilitzant software comercial

Velocitat	20 m/s (72km/h)	25 m/s (90km/h)	30 m/s (108km/h)
C_d	0.213		
C_l	-0.021		
C_y	-0.0042		
Àrea frontal	0,5991 m ²		
Força resistent	31.264 N	48.85 N	70.34 N
Càrrega aerodinàmica	-3.08 N	- 4.81 N	- 6.93 N

Els resultats gràfics obtinguts mitjançant Paraview un cop el flux s'ha estabilitzat es representen en les figures F.21, F.22, F.23 i F.24 .

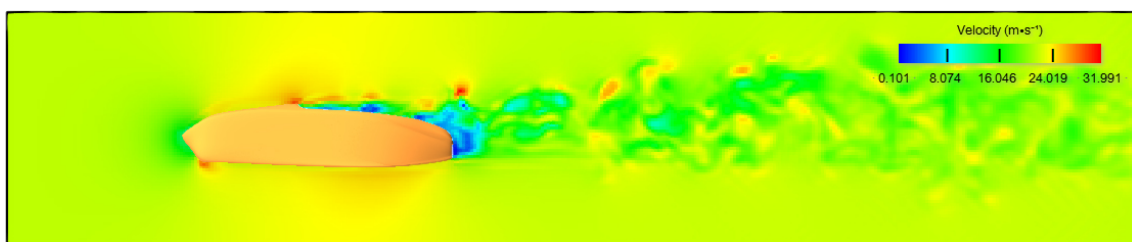


Figura F.15: Diagrama de velocitats per al pla central frontal de la carrosseria simulada amb Palabos.

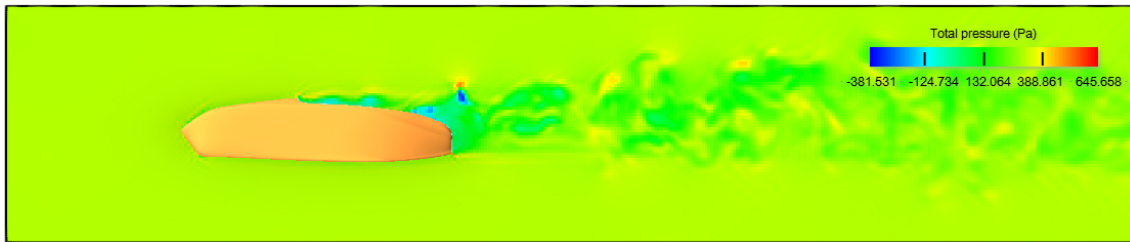


Figura F.15: Diagrama de pressions per al pla central frontal de la carrosseria simulada amb Palabos.

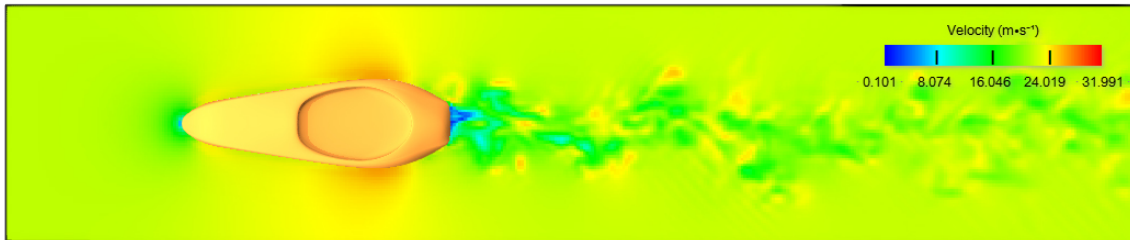


Figura F.15: Diagrama de velocitats per al pla central horitzontal de la carrosseria simulada amb Palabos.

F.5.1 Conclusions

En segon lloc es pot veure com els resultats obtinguts mitjançant Palabos o el programa comercial no són molt dispars. La diferència màxima entre les forces resultants a cada eix no superen els 38 N. Hi ha una bona coincidència entre els camps de velocitat (de 0 a 31 m/s).

En segon lloc es pot veure que els resultats obtinguts a partir de les simulacions d'aquest apartat són molt dispars dels obtinguts en l'apartat F.2 on s'estudiava l'alçada de nas. Aquest canvi en els coeficients aerodinàmics és degut al fet que per a l'anàlisi que es realitza no s'utilitza terra en el túnel de vent. Al no utilitzar terra l'efecte sòl desapareix i com a conseqüència el valor de resistència a l'avanç disminueix una mica i el valor de càrrega aerodinàmica es veu bruscament reduït.

ANNEX G : DISSENY DEL DIFUSOR

A partir dels criteris de disseny analitzats a la memòria es crea una geometria inicial. A partir d'aquesta s'hi fan modificacions per tal de millorar els seus coeficients aerodinàmics. En aquest apartat s'observaran els resultats gràfics representatius i els resultats numèrics de cada una de les simulacions per ordre cronològic. A partir dels resultats s'analitzarà que es pot fer per millorar-ne els coeficients aerodinàmics. Les millores es faran en parts anomenades KITS, ja que entre iteració i iteració s'intentarà millorar el màxim de coses modificant més d'una part alhora.

G.1 Primera aproximació

En aquest subapartat s'analitza la primera geometria generada de difusor mitjançant simulació. S'inclouen tant els resultats numèrics com els diagrames més representatius.

En les figures posteriors figura G.1, G.2 i G.3 s'analitza el comportament del fluid utilitzant un diagrama de velocitats. A partir d'aquestes anàlisis s'intenta millorar difusor.

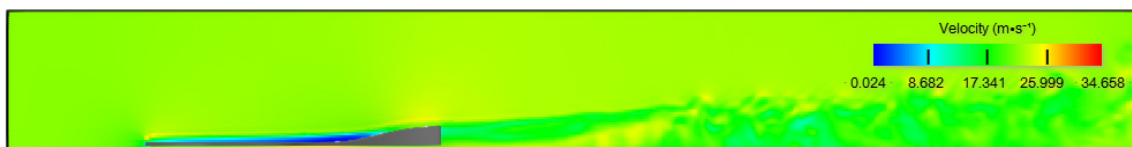


Figura G.1: Diagrama de velocitats per al pla frontal central de la primera aproximació.

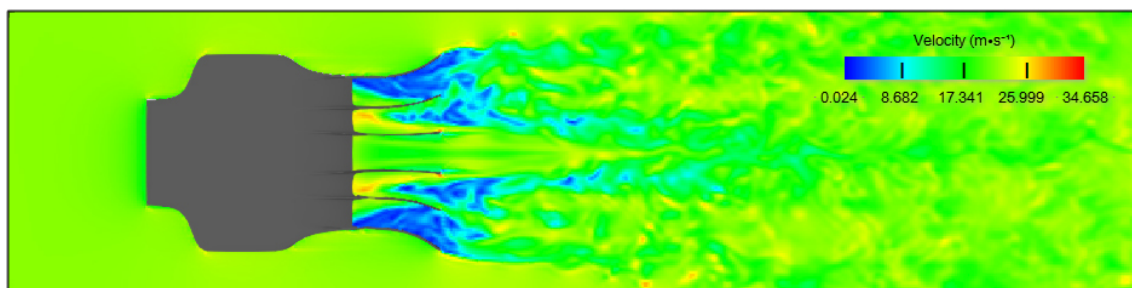


Figura G.2: Diagrama de velocitats per un pla horitzontal de la primera aproximació.

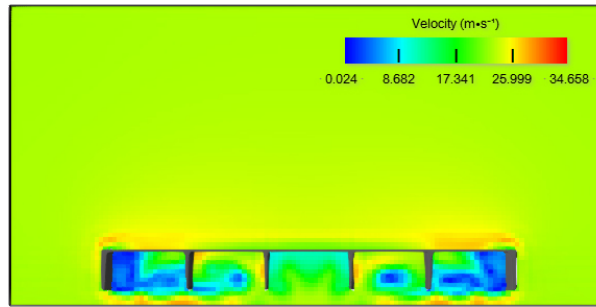


Figura G.3: Diagrama de velocitats per un pla de perfil de la primera aproximació.

En la figura G.1 es pot veure el comportament general del difusor. En aquesta figura s'aprecien les principals característiques del difusor descrites en la memòria. L'aire que circula per sota del flux ho fa a gran velocitat mentre que l'aire que passa per sobre ho fa amb baixa velocitat. A la sortida del difusor es pot veure com la velocitat és més baixa que la velocitat d'entrada al túnel de vent i es pot veure com aquest crea una petita estela.

En la figura G.2 es pot veure el funcionament de les diferents canals. El pla de representació està just al límit inferior del difusor. En aquesta figura es pot veure l'aire que circula per les diferents canals ho fa a una velocitat inferior a la de l'entrada del túnel de vent. Aquesta diferència de velocitat és diferent per a les diferents canals. En la canal d'entrada la diferència és poca mentre que en la canal exterior l'aire circula a velocitats molt baixes.

En la figura G.3 es pot veure com surt el fluid del difusor. El pla de representació està situat gairebé l'extrem posterior del difusor. En aquest diagrama també es pot veure el funcionament de les diferents canals. Com s'observava en la figura G.2 per la canal central l'aire circula a més velocitat que a la resta. Sota cada canal la velocitat del fluid és més alta però es pot apreciar que la velocitat és més alta sota les canals amb velocitat més baixa. També es pot apreciar que a l'exterior del difusor l'aire circula a més velocitats, fins i tot en els laterals.

En la taula G.1 s'inclouen els resultats obtinguts mitjançant el programa de simulació (C_d , C_i , i àrea frontal) i les forces resultants calculades posteriorment.

Taula G.1 : Resultats aerodinàmics de la primera aproximació del difusor

Velocitat	20 m/s (72km/h)	25 m/s (90km/h)	30 m/s (108km/h)
C_d	0.464		
C_i	-4.209		
Àrea frontal	0.189 m ²		
Resistència a l'avanç	21.48 N	33.57 N	48.34 N
Càrrega aerodinàmica	-194.89 N	-304.52 N	-438.52 N

G.2 Modificacions del difusor

G.2.1 KIT A

Tal com s'explica en la memòria en el primer Kit de modificació s'afegeix una franja en la part superior del difusor i una franja lateral. Aquestes millores s'incorporen per tal d'augmentar el volum de cambra del difusor un cop aquest s'ha acabat i perquè el flux que circula per dins de les canals no s'escapi per la part inferior de les parets laterals.

En les figures posteriors figura G.4, G.5 i G.6 s'analitza el comportament del fluid utilitzant un diagrama de velocitats. A partir d'aquestes anàlisis s'intenta millorar difusor.

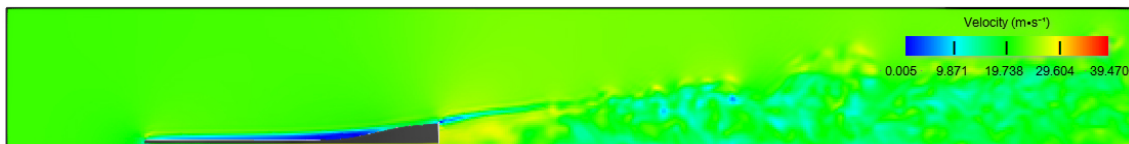


Figura G.4: Diagrama de velocitats per al pla frontal central de la primera aproximació.

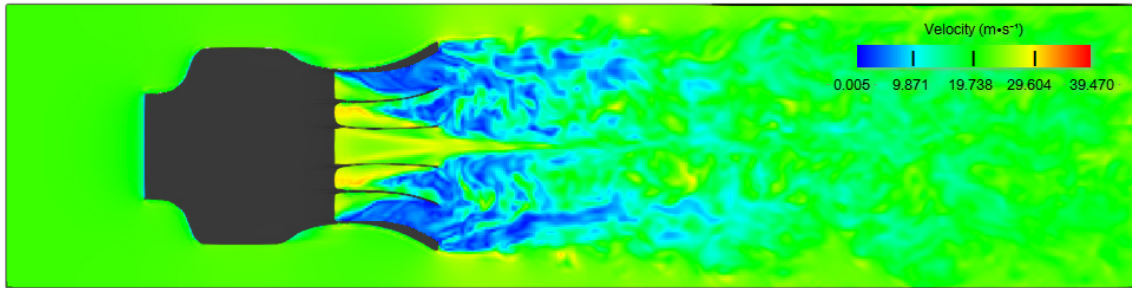


Figura G.5: Diagrama de velocitats per un pla horitzontal de la primera aproximació.

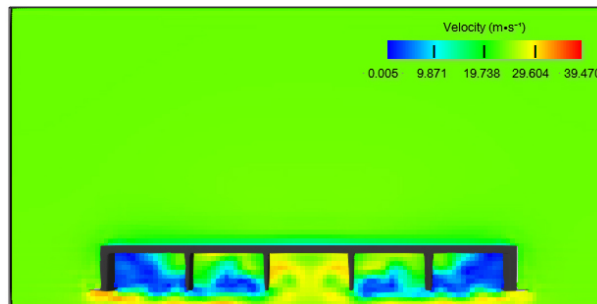


Figura G.6: Diagrama de velocitats per un pla de perfil de la primera aproximació.

Observant les anteriors figures es pot veure com l'objectiu que es volia assolir es compleix. En la figura G.4 es pot veure com l'estela és més alta que no pas la que es tenia en anterioritat (figura G.1). En la figura G.6 es pot veure que en incorporar una franja en la part inferior exterior del difusor

En la taula G.2 s'inclouen els resultats obtinguts mitjançant el programa de simulació (C_d , C_l , i àrea frontal) i les forces resultants calculades posteriorment.

Taula G.2 : Resultats aerodinàmics del KIT de millora A

Velocitat	20 m/s (72km/h)	25 m/s (90km/h)	30 m/s (108km/h)
C_d	1.210		
C_l	-7.493		
Àrea frontal	0.215 m ²		
Resistència a l'avanç	63.73 N	99.58 N	143.40 N
Càrrega aerodinàmica	-394.69 N	-616.70 N	-888.061 N

G.2.2 KIT B

L'objectiu d'aquest Kit de millora és augmentar la velocitat que circula per la canal central del difusor per tal de centrar la càrrega aerodinàmica i no tenir-la en els extrems. Per tal d'aconseguir aquest fenomen s'apila el volum de cambra de la canal central.

En les figures posteriors figura G.7, G.8 i G.9 s'analiza el comportament del fluid utilitzant un diagrama de velocitats. A partir d'aquestes anàlisis s'intenta millorar difusor.

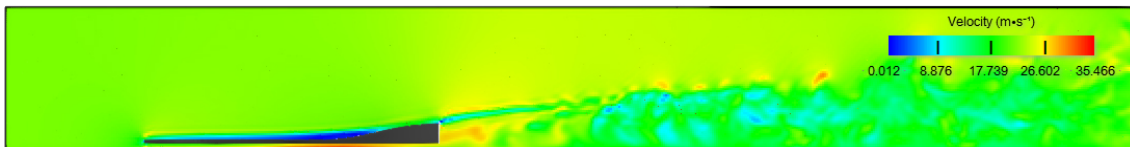


Figura G.7: Diagrama de velocitats per al pla frontal central de la primera aproximació.

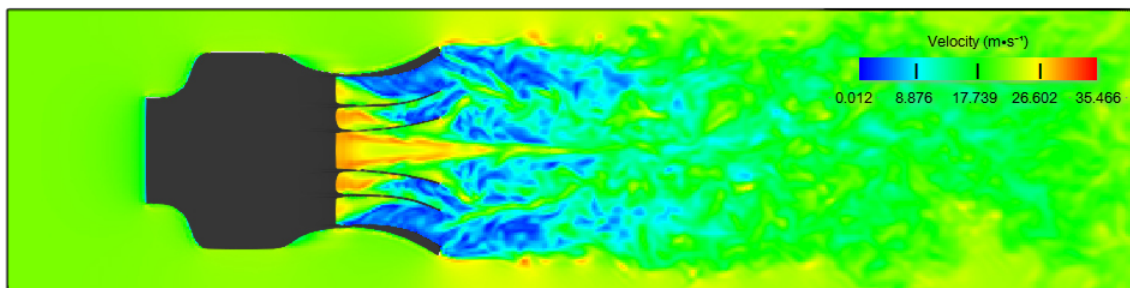


Figura G.8: Diagrama de velocitats per un pla horitzontal de la primera aproximació.

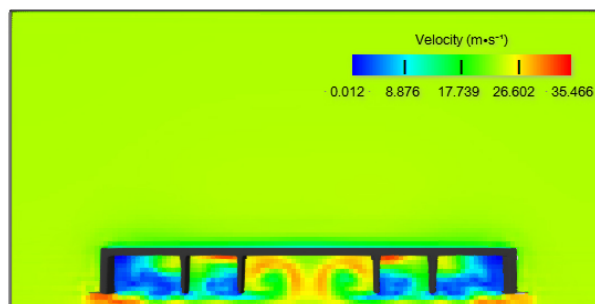


Figura G.9: Diagrama de velocitats per un pla de perfil de la primera aproximació.

En les figures anteriors es pot veure com el flux tant en la canal central com en els altres que la velocitat d'entrada és superior. Aquest fet comportarà un augment de la càrrega aerodinàmica.

En la taula G.2 s'inclouen els resultats obtinguts mitjançant el programa de simulació (C_d , C_l , i àrea frontal) i les forces resultants calculades posteriorment.

Taula G.2 : Resultats aerodinàmics del KIT de millora B

Velocitat	20 m/s (72km/h)	25 m/s (90km/h)	30 m/s (108km/h)
C_d	1.218		
C_l	-7.583		
Àrea frontal	0.215 m ²		
Resistència a l'avanç	64.16 N	100.24 N	144.35 N
Càrrega aerodinàmica	-399.43 N	-624.12 N	-898.728 N

S'obté un augment del coeficient de càrrega aerodinàmica amb molt poc augment del coeficient de resistència a l'avanç.

G.2.3 KIT C

En aquest cas s'intenta disminuir la superfície de contacte entre el flux i els "strakes". Per aconseguir-ho es disminueix l'alçada dels "strakes" exteriors.

En les figures posteriors figura G.4, G.5 i G.6 s'analiza el comportament del fluid utilitzant un diagrama de velocitats. A partir d'aquestes anàlisis s'intenta millorar difusor.

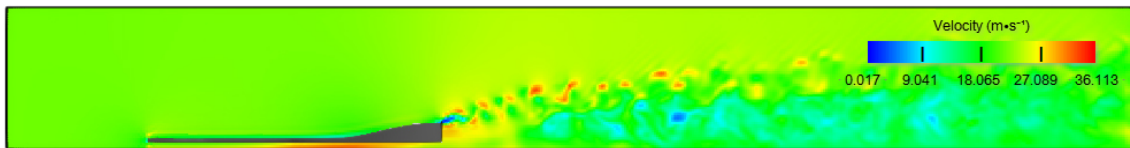


Figura G.4: Diagrama de velocitats per al pla frontal central de la primera aproximació.

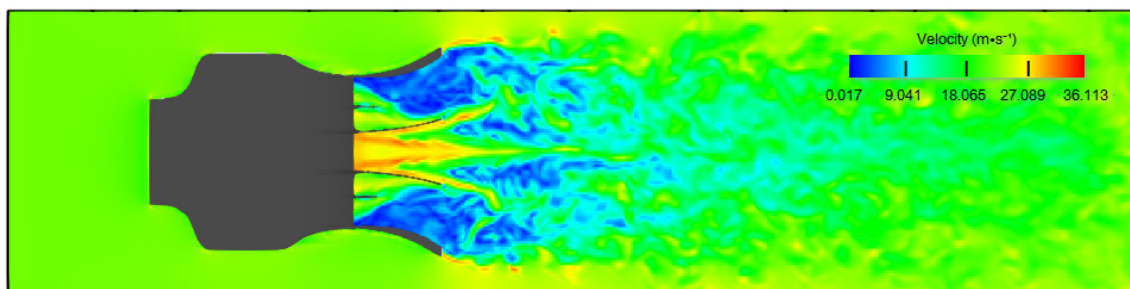


Figura G.5: Diagrama de velocitats per un pla horitzontal de la primera aproximació.

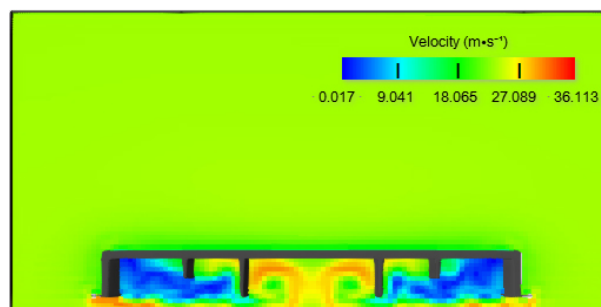


Figura G.6: Diagrama de velocitats per un pla de perfil de la primera aproximació.

Observant les anteriors figures es pot veure com amb una disminució de l'alçada dels "strakes" les canals 1, 2 i 4 i 5 actuen gairebé com una única canal. L'aire no circula correctament per la canal més exterior, ja que l'aire circula a velocitat massa baixa.

En la taula G.2 s'inclouen els resultats obtinguts mitjançant el programa de simulació (C_d , C_l , i àrea frontal) i les forces resultants calculades posteriorment.

Taula G.2 : Resultats aerodinàmics del KIT de millora A

Velocitat	20 m/s (72km/h)	25 m/s (90km/h)	30 m/s (108km/h)
C_d	1.245		
C_l	-7.155		
Àrea frontal	0.215 m ²		
Resistència a l'avanç	65.58 N	102.46 N	147.55 N
Càrrega aerodinàmica	-376.89 N	-588.89 N	-848 N

Es pot veure com les modificacions del KIT C no són efectives ja que s'empitjora tant el coeficient de resistència a l'avanç com el coeficient de càrrega aerodinàmica.

En aquesta simulació es pot veure l'efecte positiu dels "strakes", que fan que el flux circuli de manera laminar impedit turbulències dins de les diferents canals.

G.2.4 KIT D

Tal i com s'explica en la memòria en el primer Kit de modificació té com a objectiu ampliar la el volum de cambra després del difusor. En aquest cas s'amplia la franja horitzontal situada a la part superior del difusor i s'afegeix una franja en els laterals del difusor. A més, s'incorpora un "strakes" just al centre del difusor per estudiar si ajuda a que les turbulències de la canal central es vegi reduïda.

En les figures posteriors figura G.4, G.5 i G.6 s'analiza el comportament del fluid utilitzant un diagrama de velocitats. A partir d'aquests anàlisi s'intenta millorar difusor.

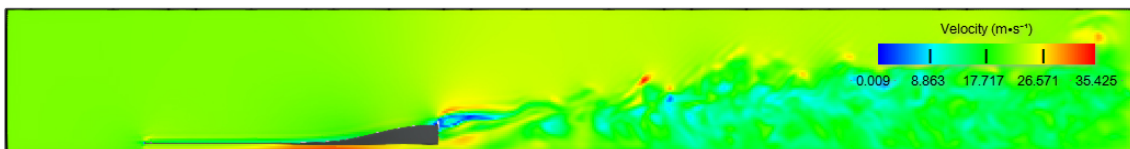


Figura G.4: Diagrama de velocitats per al pla frontal central de la primera aproximació.

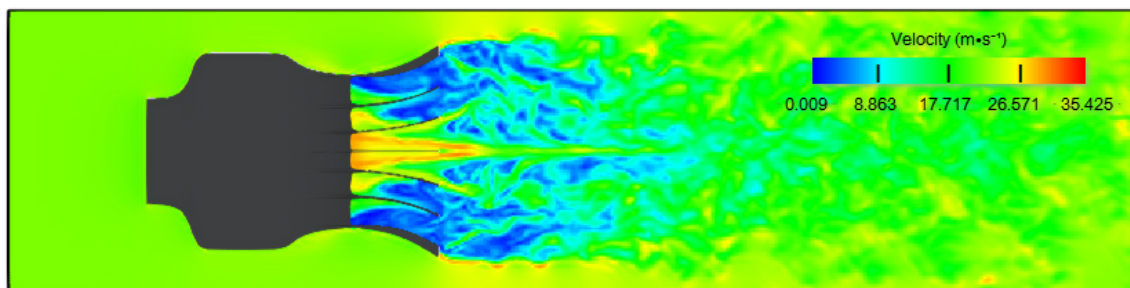


Figura G.5: Diagrama de velocitats per un pla horitzontal de la primera aproximació.

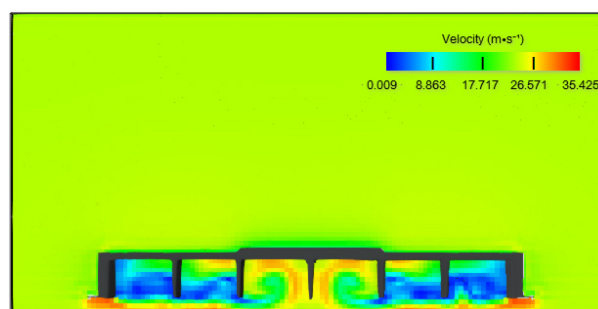


Figura G.6: Diagrama de velocitats per un pla de perfil de la primera aproximació.

En la taula G.2 s'inclouen els resultats obtinguts mitjançant el programa de simulació (C_d , C_l , i àrea frontal) i les forces resultats calculades posteriorment.

Taula G.2 : Resultats aerodinàmics del KIT de millora A

Velocitat	20 m/s (72km/h)	25 m/s (90km/h)	30 m/s (108km/h)
C_d	1.110		
C_l	-6.630		
Àrea frontal	0.227 m ²		
Resistència a l'avanç	61.73 N	96.45 N	138.89 N
Càrrega aerodinàmica	-368.72 N	-576.13 N	-829.63 N

Per comparar aquests valors amb els anteriors s'ha d'utilitzar la força total ja que l'àrea frontal varia. En aquest cas es pot veure com es disminueix la resistència l'avanç però també disminueix la càrrega aerodinàmica. Com el coeficient de càrrega aerodinàmica es veu empitjorat es descarta aquest kit de modificacions.

ANNEX H : SIMULACIÓ CONJUNT FINAL

En aquest apartat s'inclouen els resultats tant gràfics com numèrics de la simulació de la carrosseria amb difusor, xassís i rodes.

Per a la simulació del conjunt final s'utilitza un túnel de vent major que l'utilitzat per a la simulació de la carrosseria. En aquest cas les mides del túnel són de 12 x 2 x 2.8 m. Aquestes mides de túnel són les òptimes per no influenciar gaire en la solució final i obtenir resultat en poc temps (tres dies) amb una resolució de 0,02 m. Al túnel de vent s'incorpora terra en moviment a la mateixa velocitat del fluid, 22 m/s.

Els resultats gràfics obtinguts s'observen en les figures H.1, H.2, H.3, H.4, H.5 i H.6.



Figura H.1: Diagrama de velocitats per el pla frontal central del conjunt final.

En aquesta imatge es pot veure la estela generada pel monoplaça. La velocitat màxima és de 111.67 m/s. Aquesta velocitat alta influencia el diagrama de velocitats fent que la diferència entre colors del diagrama sigui poc apreciable.



Figura H.2: Diagrama de velocitats per el pla frontal central del conjunt final.

Aquesta figura representa el mateix pla que la anterior però la geometria del monoplaça està amagada per veure que succeeix en el seu interior. Malgrat aquest problema de representació es pot veure com el flux circula a velocitat alta per sota el difusor.

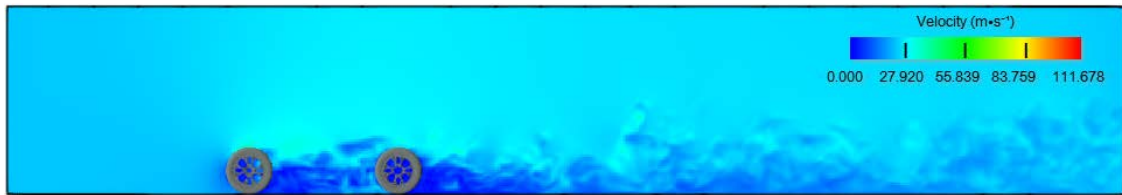


Figura H.3: Diagrama de velocitats per el pla frontal que passa pel centre de les rodes del conjunt final..

En la figura anterior es pot veure l'efecte que generen les rodes del monoplaça. Aquesta simulació no serà el real ja que les rodes estan en moviment i en aquest cas estan fixes. D'altra banda es pot veure l'efecte negatiu que provoquen en quant a resistència a l'avanç.

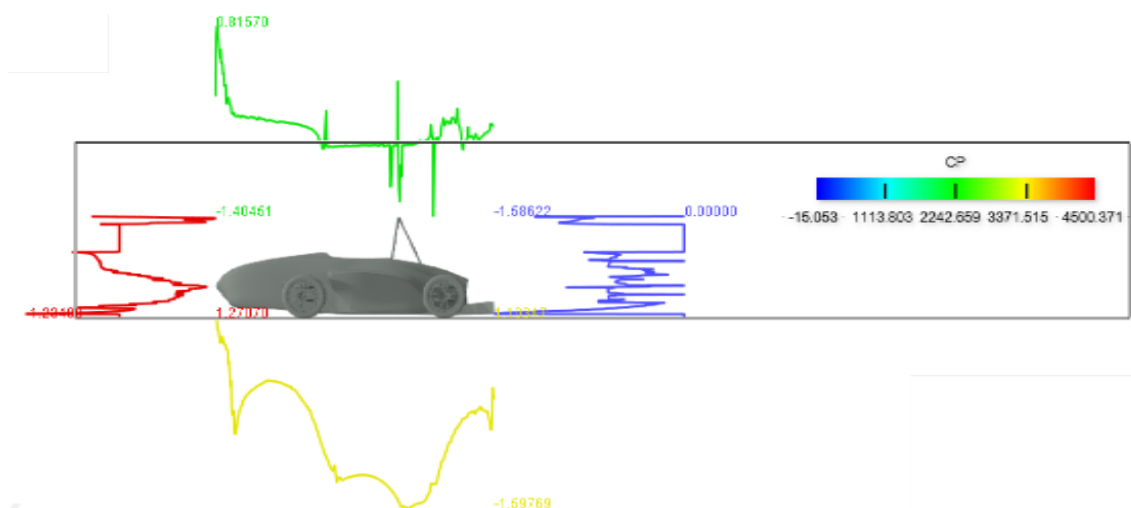


Figura H.4: Diagrama de coeficient de pressió del pla frontal central del conjunt final

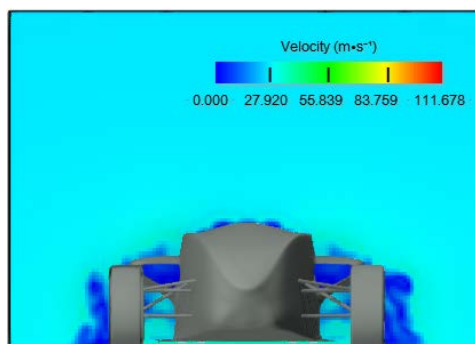


Figura H.5: Diagrama de velocitats per un pla de perfil situat a la entrada dels pontons.

En la figura anterior es pot veure com l'aire que entra dins els pontons no ho fa a la velocitat esperada. En la figura F.20 de l'annex F es podia veure com l'aire entrava a una velocitat pròxima als 22 m/s. En aquest cas la velocitat d'entrada de mitjana ronda als 15 m/s. Aquesta disminució de la velocitat d'entrada és deguda a l'efecte de la suspensió i les rodes davanteres en el fluid. Es pot augmentar la velocitat d'entrada als pontons utilitzant l'aleró davanter, fent que aquest envii aire a les entrades.

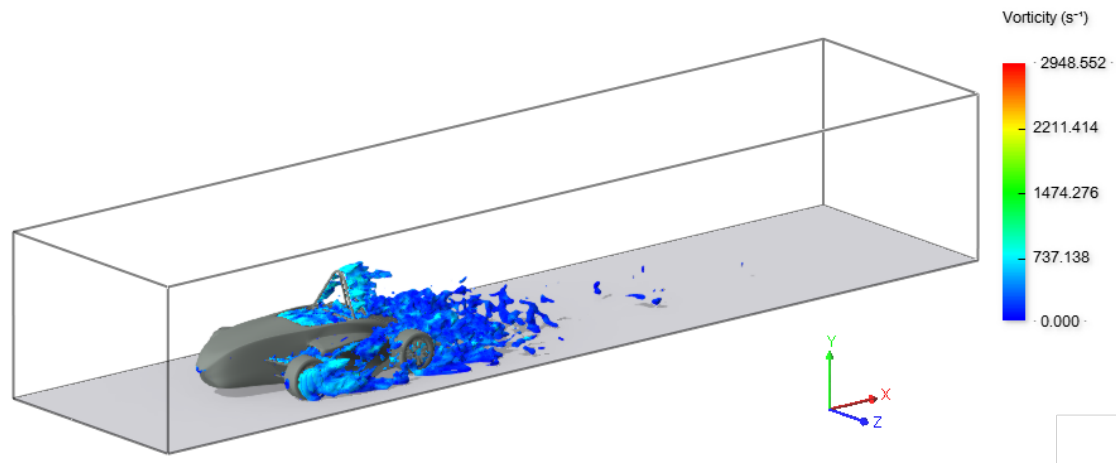


Figura H.6: Isosuperfície de velocitats amb la vorticitat representada.

En la figura H.6 s'observa de manera tridimensional la estela del monoplaça.

Els resultats numèrics obtinguts a partir de la simulació són els següents inclosos en la taula H.1.

Taula H.1 : Resultats monoplaça complet amb difusor

Velocitat	20 m/s (72km/h)	25 m/s (90km/h)	30 m/s (108km/h)
C_d	1.075		
C_l	-0.319		
Àrea frontal	1.008 m ²		
Resistència a l'avanç	265.48 N	414.81 N	597.33 N
Càrrega aerodinàmica	78.78 N	123.94 N	177.25 N

Els resultats dels coeficients aerodinàmics obtinguts són pitjors als obtinguts per a les dues parts independents. Aquest fet és causa de les parts acoblades que no són aerodinàmiques (la suspensió, el xassís i les rodes).

ANNEX I : FABRICACIÓ DELS ELEMENTS AERODINÀMICS

En aquest annex s'explica el procés de fabricació dels diferents elements aerodinàmics fets de fibra de vidre. D'aquest annex se n'extreuen els materials per a l'elaboració del pressupost.

Cal recordar que en aquest projecte no s'inclou el procés de fabricació i d'ancoratge entre les diferents peces. Aquest annex només és de caràcter informatiu per tal de poder realitzar un pressupost aproximat.

I.1 Fabricació del model original

Per crear els diferents elements aerodinàmics s'ha de crear un model a mida natural. El model original es fabrica de poliestirè expandit pel seu baix cost i la fàcil extracció de material. Aquesta és la manera més econòmica de poder-ho realitzar.

Per a realitzar aquest model es parteix de la geometria tridimensional feta per ordinador proporcionada en aquest projecte. A partir de la geometria tridimensional se n'extreuen les coordenades de punts de la superfície. Aquestes coordenades es reproduiran al model real utilitzant un puntòmetre (màquina de treure punts).

El procediment a seguir és el següent:

En primer lloc es crea un prisma de poliestirè expandit. Aquest prisma ha de tindre les dimissions dels eixos principals del model original.

Després busca els plans generals de les superfícies més grans. Per extreure el màxim material possible d'un sol tall. Utilitzant el puntòmetre es busquen tres punts de l'espai que formen un pla. Aquests plans cada cop seran més petits fins a arribar a trobar la forma final.

Per extreure material de manera basta s'utilitza una serra manual. Per fer superfícies corbes s'utilitza una lima de fuster. Per polir la superfície s'utilitzen diferents graus de paper de vidre. Si hi ha algun cop o imperfecció a la superfície es repara amb la plastilina sense sulfur.

I.2 Fabricació del motlle

Per a la fabricació dels diferents elements aerodinàmics es fa mitjançant un motlle d'escaiola (Sulfat de calci). Aquest tindrà el negatiu del model original anteriorment fabricat. Es tria utilitzar un motlle de escaiola, ja que és el tipus de motlle més econòmic (molt més econòmic que utilitzant motlle de silicona o motlle de "AcrílicOne") i perquè es vol fer una tirada curta.

El procediment a seguir és el següent:

En primer lloc s'han de crear les separacions, "partages", per tal de poder extreure el model final de fibra de vidre un cop s'ha solidificat. Aquestes separacions crearan diferents parts del motlle. S'ha de pensar de manera detinguda on crear les separacions per tal que es pugui de desemmotllar. Si és impossible poder desemmotllar el motlle de guix serà d'un sol ús i s'haurà de trencar amb l'ajuda d'un martell per poder-ne extreure l'element aerodinàmic. Aquestes separacions es faran amb xapa d'acer o algun altre element laminar dur. Les xapes que formaran el "partage", es col·locaran en el lloc marcat del model original.

En segon lloc s'ha d'untar tot el model original i les xapes separadores amb vaselina. La vaselina assegura que el motlle no s'adhereixi al model.

Un cop acabada aquesta etapa s'ha de recobrir una de les parts del model amb una barreja d'escaiola i aigua (proporció 1:1 a 1:1,5). S'ha de deixar un gruix mínim de 5 cm, suficient perquè el motlle no es trenqui. Per tal d'aportar resistència al motlle es pot utilitzar canyes i estopa barrejades amb barreja que es col·locaran a la part exterior del motlle.

Un cop acabada i presa aquesta part del motlle, es retiren les planxes que formaven el "partage", llavors es pinta de sabó líquid tota la superfície d'escaiola que formava el "partage". Ara ja es pot recobrir l'altra part del model amb els 5 cm d'escaiola i aigua.

Quan el motlle ja estigui pres, se separarà del model original. En cas que no tingui sortida, es retirarà el polietilè expandit i el model no es podrà reutilitzar.

I.3 Fabricació del model final

Per a la fabricació del model final s'ha optat per utilitzar fibra de vidre. Per a elaboració d'aquesta s'utilitzen dos tipus de fibra de vidre (Mat 30g i Mat450g) i resina "Epoxi".

El procediment a seguir és el següent:

En primer lloc fabricarem el desemmotllant (es fa la mescla al bany Maria de cera d'abelles, aiguarràs i betum de Judea). Un cop fet el desemmotllant s'unta la part interior del motlle. El desemmotllant serveix perquè no s'adhereixin l'escaiola amb la resina.

Després es crea el model final amb fibra de vidre. Primer, es dona una capa de resina. Un cop feta aquesta capa es dona una altra capa de resina amb fibra de vidre Mat superficial de 30g. Sense esperar que s'assequi es fan tres capes més utilitzant la fibra de vidre Mat de 450g. Si la geometria no permetés donar una capa de fibra de vidre s'emplenaria el motlle amb una barreja de pols de fibra de vidre i resina.

Finalment, un cop sec, s'extreu el model de fibra de vidre del motlle.