ÍNDEX

1 INTRODUCCIÓ 1

1.1 Antecedents 1

1.2 Objecte 1

1.3 Especificacions i abast 2

2 LA FORMULA STUDENT 3

2.1 Història de la Formula Student 3

2.2 Objectius en el disseny del vehicle 4

2.3 Puntuacions de la competició 5

3 TRANSFERÈNCIA DE CALOR 7

3.1 Pèrdues que provoquen l'escalfament 7

3.2 Definició transferència de calor 8

3.3 Conducció 8

3.4 Convecció 9

3.5 Radiació tèrmica 10

3.6 Aletes de refrigeració 11

4 FONAMENTS D'AERODINÀMICA 12

4.1 Les forces aerodinàmiques 12

4.2 La resistència aerodinàmica 13

4.3 Els coeficients aerodinàmics 13

4.4 Principi de Bernoulli 15

4.5 Tipus de flux 18

4.6 La capa límit 18

5 ÚS DEL CFD EN LA MILLORA AERODINÀMICA DE VEHICLES 20

5.1 El túnel del vent 20

5.2 Definició de CFD 21

5.3 Metodologia utilitzada 21

6 ETAPES DEL PROJECTE 24

6.1 Limitacions per normativa 24
6.2 Prova de la competició crítica per a la refrigeració 24
6.3 Disseny dels elements 25
6.4 Mallat 28
6.5 Condicions de contorn i tèrmiques 29
6.6 Càlcul de la computadora 31
6.7 Visualització i interpretació de resultats 31
7 ANÀLISI DELS RESULTATS 33
7.1 Anàlisi tèrmic 33
7.1.1 Comportament del conjunt 33
7.1.2 Efecte de les aletes de refrigeració 34
7.1.3 Orientació del motor 36
7.1.4 Diferents configuracions de la carcassa del motor 37
7.1.5 Ajuda amb ventilació forçada 40
7.1.6 Refrigeració de les bateries 41
7.2 Anàlisi aerodinàmic 43
7.2.1 Estudi del coeficient de resistència 43
7.2.2 Estudi de les diferents variables a 60 km/h 44
8 CONCLUSIONS 47
9 BIBLIOGRAFIA 49
A. CARACTERÍSTIQUES DEL MOTOR 51
B. CÀLCULS 55
B.1. Càlcul flux de calor del motor 55
B.2. Càlcul de l'àrea frontal 57
B.3. Càlcul coeficient de resistència 58
C. CREACIÓ I SIMULACIÓ DEL MODEL 60
D. MALLAT DE LA GEOMETRIA 67
E. PRESSUPOST 72

1 INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

Per primera vegada a l'Escola Politècnica Superior de Girona, un grup d'estudiants té previst participar a la Formula Student Spain amb un vehicle totalment dissenyat pels propis estudiants.

La Formula Student, coneguda amb el nom de Formula SAE als Estats Units, es va començar a celebrar l'any 1981 a Austin organitzada per la Universitat de Texas. L'any 1998 la competició va arribar a Europa a través del Regne Unit. A partir d'aquí la competició ha anat creixent, i actualment, la podem trobar a una gran diversitat de països com Japó, Brasil, Alemanya i Espanya.

La Formula Student, com a competició basada en l'enginyeria, es va adaptant als diferents canvis tecnològics. Des de fa uns anys, a la competició també hi podem trobar vehicles elèctrics. La UdG Racing Team té previst participar en la modalitat de propulsió elèctrica.

Els vehicles elèctrics, igual que els de combustió interna, tenen la necessitat de refrigerar algun dels seus elements. Els motors tenen potències elevades i és per aquest motiu que generen molta calor, ja sigui per pèrdues elèctriques, electromagnètiques o de fregament. Els motors refrigerats per aire que trobem en el mercat, disposen d'aletes de refrigeració, que fan augmentar la superfície de contacte amb l'aire i això fa que millori la dissipació de calor. Però ens trobem amb la necessitat de forçar aire cap al motor, per millorar la dissipació de calor.

1.2 Objecte

Optimitzar la circulació de l'aire per tal d'aconseguir la màxima dissipació de calor del motor elèctric i de les bateries. Qualsevol de les alternatives estudiades haurà de buscar un equilibri entre eficiència tèrmica i mínima repercussió aerodinàmica sobre el model final, buscant la menor repercussió en el coeficient de resistència.

1.3 Especificacions i abast

Es generarà la geometria externa del vehicle tenint en compte les restriccions de la normativa marcada per la organització de la competició utilitzant un programari informàtic de CAD. La simulació de moviment de fluids i la transferència de calor s'analitzarà fent servir el programa ANSYS CFX.

De la mateixa forma, la divisió elèctrica de l'equip UdG Racing Team, segons criteris de màxima potència i acceleració, han optat per instal·lar dos motors elèctrics.

No s'inclou la construcció física de la geometria.

2 LA FORMULA STUDENT

La Formula Student és una competició entre equips d'àmbit universitari, on el seu objectiu és concebre, dissenyar, fabricar, desenvolupar i competir amb petits vehicles, estil fórmula. Fins fa pocs anys enrere només participaven vehicles amb motors de combustió, ara ja existeix la competició on hi participen vehicles elèctrics, aquesta és on participarà l'equip UdG Racing Team.

A la Formula Student es busca donar als equips de la màxima flexibilitat de disseny i la llibertat d'expressar la seva creativitat i imaginació, hi ha molt poques restriccions en el disseny general del vehicle. El repte per als equips és desenvolupar un vehicle que pugui competir amb èxit en tots els esdeveniments descrits en les Regles FSAE. Les competició lliure als equips l'oportunitat de demostrar i provar tant la seva creativitat i les seves habilitats d'enginyeria en comparació amb equips d'altres universitats d'arreu del món.

2.1 Història de la Formula Student

La competició de la Formula Student, o també coneguda com Formula SAE, va començar a formar-se en 1978 de la mà de la Societat d'Enginyers d'Automobilisme, i va anar evolucionant fins que el 1981, a Texas (EUA), on es va organitzar per primera vegada la que es coneixeria com SAE Mini Indy, on participarien 6 universitats.

Al llarg dels anys, aquesta competició entre estudiants ha anat creixent exponencialment i des de 1998, a Anglaterra, es formalitza el que avui coneixem com Formula Student, on es competeix a nivell mundial en circuits de tot Europa com Silverstone, Hockenheim o Montmeló.

Universitats com les d'Oxford, Stuttgart, Washington, Monash o la de Barcelona, participen en aquest certamen automobilístic amb el propòsit d'atorgar als seus futurs enginyers una formació al més alt nivell i una experiència única en el món del esport de motor.

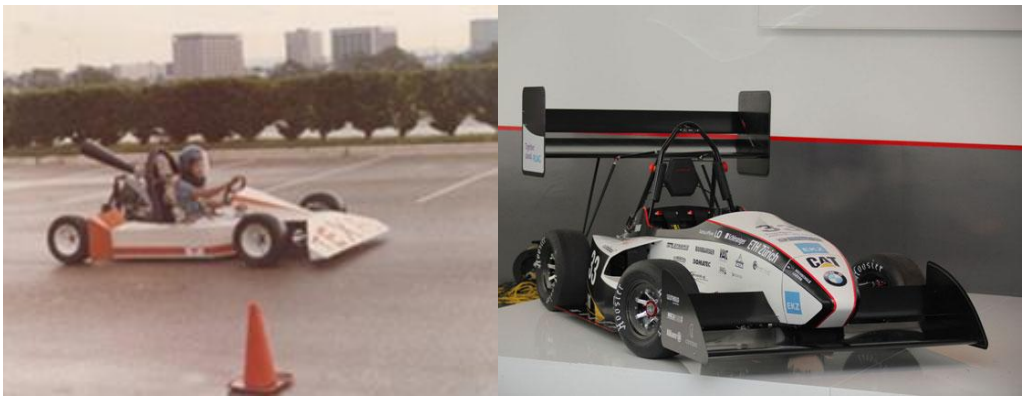


Figura 2.1: Evolució de la Formula Student

2.2 Objectius en el disseny del vehicle

Els equips han d'assumir que treballen per una empresa de disseny que està dissenyant, fabricant, assajant i demostrant un prototip de vehicle, tot realitzat per a persones no professionals.

El vehicle ha de tenir un rendiment molt alt en termes d'acceleració, frenada i maneig i ser prou resistent per completar amb èxit tots els esdeveniments descrits en les normes de Formula SAE.

Els factors de disseny addicionals que s'han de considerar són: l'estètica, el cost, l'ergonomia, el manteniment, la fabricació i la fiabilitat.

Una vegada que el vehicle ha estat completat i provat, la seva empresa de disseny intentarà "vendre" el disseny d'una "empresa" que està considerant la producció d'un vehicle de competició. El repte per a l'equip de disseny és el desenvolupament d'un prototip de cotxe que millor s'adapti als objectius de disseny de vehicles FSAE i que poden ser comercialitzats de forma rendible.

Cada disseny serà jutjat i avaluat contra altres dissenys de la competència per determinar el millor cotxe en general.

2.3 Puntuacions de la competició

Els cotxes són jutjats en una sèrie d'esdeveniments estàtics i dinàmics.

1. Esdeveniments estàtics
    - Inspecció tècnica: L'objectiu de la inspecció tècnica és determinar si el vehicle compleix els requisits i restriccions Regles FSAE, i si considerada que en el seu conjunt satisfà la intenció de les regles. Es comproven algunes coses com el vehicle, els pneumàtics per sec i humit, la vestimenta dels pilots, els extintors d'incendis, etc.
    - Cost i fabricació: L'equip presenta la totalitat del cost del projecte (segons unes pautes i uns valors preestablerts per l'organització per tal que els costos de tots els equips siguin equiparables). Un jurat avalua que totes les peces i processos de fabricació estiguin reflexats en aquest document, així com es discuteixen i es justifiquen els mateixos.
    - Presentació: L'objectiu és avaluar la capacitat de l'equip per desenvolupar i oferir un model de negoci que pugui convèncer els executius d'una corporació que el disseny de l'equip és el que millor s'adapta a les exigències dels aficionats, i que pot ser fabricat i comercialitzat de manera rendible.
    - Disseny: L'objectiu és avaluar l'esforç d'enginyeria que va entrar en el disseny del cotxe. Guanyarà el cotxe que tingui un millor ús d'enginyeria i disseny.

    Les màximes puntuacions possibles d'aquest apartat són les següents:

Inspecció tècnica	No puntua
Cost i fabricació	100 punts
Presentació	75 punts
Disseny	150 punts
Total	325 punts

Taula 2.1: Puntuacions esdeveniments estàtics

2. Esdeveniments dinàmics
    - Acceleració: L'esdeveniment d'acceleració avalua l'acceleració del cotxe en una línia recta en paviment pla. La distància de la prova d'acceleració és de 75 metres.

- Pista de patinatge: L'objectiu és mesurar la capacitat en les corbes del vehicle sobre una superfície plana mentre es realitza un gir de radi constant.
- Maniobrabilitat: L'objectiu és avaluar la maniobrabilitat del cotxe i la manejabilitat en un circuit amb obstacles sense la nosa d'altres cotxes de la competència.
- Eficiència: Es determina el consum d'energia del vehicle, es realitza durant la prova de resistència, el vehicle ha de realitzar una determinada autonomia.
- Resistència: S'avalua el rendiment general del cotxe provant la durabilitat i la fiabilitat del cotxe.

Les màximes puntuacions possibles d'aquest apartat són les següents:

Acceleració	75 punts
Pista de patinatge	50 punts
Maniobrabilitat	150 punts
Eficiència	100 punts
Resistència	300 punts
Total	675 punts

Taula 2.2: Puntuació esdeveniments dinàmics

Per tant, durant la prova hi ha en joc 1000 punts, el que més s'acosti a aquesta xifra en serà el vencedor.

3 TRANSFERÈNCIA DE CALOR

El monoplaça el qual l'UdG Racing Team participarà a la Formula Student serà elèctric, per tant, constarà de dos motors elèctrics i les bateries. Aquests elements s'escalfaran i necessitarem refrigerar-los, la refrigeració serà a través d'aire forçat, la carrosseria tindrà unes entrades d'aire, les quals aniran dirigides cap als elements a refrigerar. Coexistiran dos formes de transferència de calor: la conducció i la convecció.

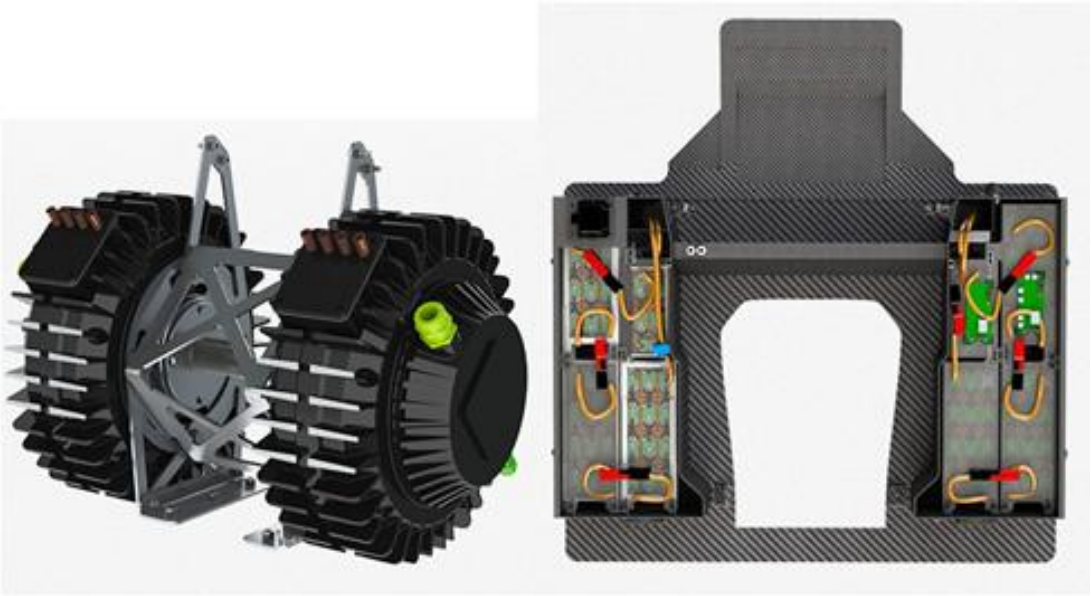


Figura 3.1: Motors i bateries d'un Formula Student

3.1 Pèrdues que provoquen l'escalfament

Les bateries i els motors s'escalfen, això és degut perquè aquests tenen pèrdues a l'hora de transformar l'energia. Les bateries transformen energia química en elèctrica, llavors aquesta energia és transportada fins al motor, i finalment, aquesta energia elèctrica és transformada en energia mecànica pel motor.

Les bateries que utilitzarem seran bateries de liti / fosfat de ferro (LiFePO4), a través d'una reacció obtindrem energia elèctrica, aquesta és una reacció exotèrmica, per tant allibera calor que haurà de ser evacuada.

En els motors arriba la potència elèctrica procedent de les bateries. Part d'aquesta potència elèctrica es consumeix (dissipa) en el debanat de l'estator ocasionant

pèrdues elèctriques, així com una pèrdua magnètica en el camp de l'estator. Part d'aquesta potència es dissipa en cobrir les pèrdues elèctriques del rotor, en el seu debanat. Finalment, també hi hem de sumar les pèrdues a l'hora de vèncer la inèrcia del motor i altres pèrdues addicionals. Ara ja tindríem la potència eficaç a l'eix.

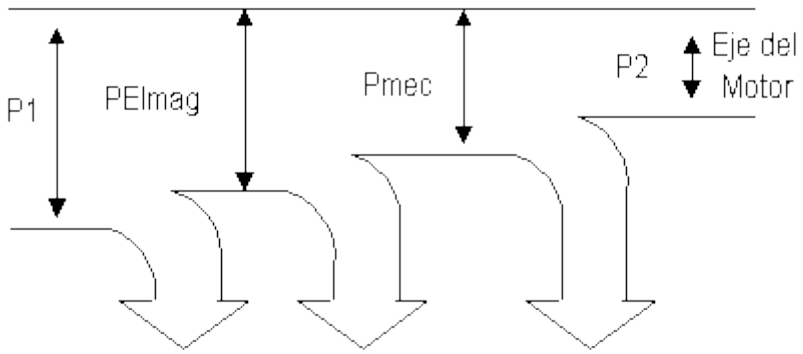


Figura 3.2: Pèrdues d'un motor elèctric

3.2 Definició transferència de calor

La transmissió de calor és el pas d'energia tèrmica des d'un cos de major temperatura a un altre de menor temperatura. Quan un cos, per exemple un objecte sòlid o un fluid, està a una temperatura diferent de la del seu entorn o un altre cos, la transferència d'energia tèrmica, també coneguda com a transferència de calor o intercanvi de calor, es produeix de tal manera que el cos i el seu entorn assoleixin l'equilibri tèrmic. La transferència de calor es produeix des d'un cos més calent a un de més fred, com a resultat de la segona llei de la termodinàmica. Quan existeix una diferència de temperatura entre dos objectes en proximitat un de l'altre, la transferència de calor no es pot aturar; només pot fer-se més lenta.

3.3 Conducció

Es propaga la calor o l'energia interna pel contacte directe entre les micro-partícules que constitueixen el cos. En els cossos sòlids és el mecanisme fonamental de propagació de calor. La conductivitat tèrmica dels sòlids és major que la dels líquids, i la dels líquids és major que la dels gasos. La conducció en el aire és casi nul·la.

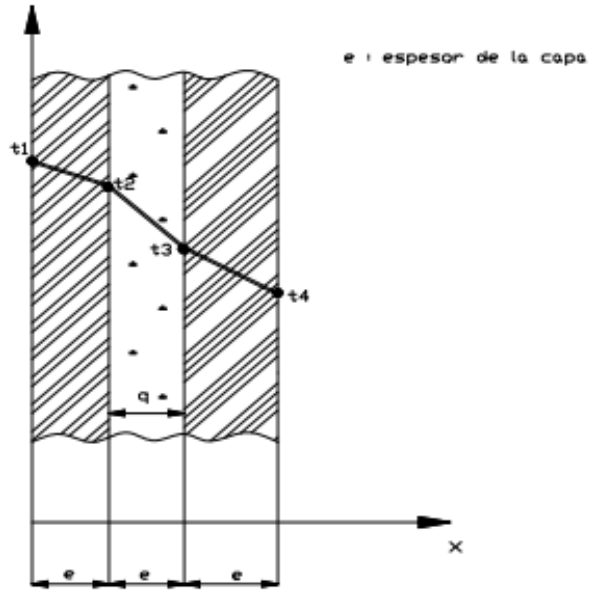


Figura 3.3: Conducció a través de diferents materials

Per exemple en el nostre motor, els debanats de l'estator s'escalfaran, aquests a través de la conducció transferirà calor cap als elements que estan en contacte amb l'estator, llavors aquests transferiran la calor cap a la carcassa, després aquesta anirà dirigida de la carcassa cap a les aletes, on entre la carcassa i les aletes ha d'haver-hi una cola de contacte, per tal d'evitar petits volums d'aire que actuarien com aïllants. On cadascun d'aquests elements tindrà el seu coeficient de conductivitat tèrmica, degut a que cada material té el seu propi.

3.4 Convecció

La convecció es produeix a través del desplaçament de matèria entre regions amb diferents temperatures. La convecció es produeix únicament en materials fluids. Quan s'escalfen disminueix la seva densitat i ascendeixen al ser desplaçats per les porcions a menor temperatura que, al mateix temps, descendeixen i s'escalfen repetint el cicle. La transferència de calor implica el transport de calor en un volum i la barreja d'elements macroscòpics de porcions calentes i fredes d'un gas o un líquid. Existeixen dos tipus de convecció.

- Convecció natural: On un fluid és més calent o més fred i en contacte amb una superfície sòlida causa una circulació a causa de les diferències de densitat que resulten del gradient de temperatures en el fluid.

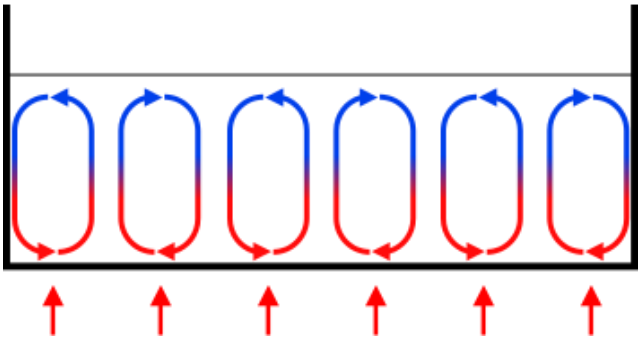


Figura 3.4: Convecció natural

- Convecció forçada: es provoca el flux d'un fluid sobre una superfície sòlida per mitjà d'una força externa com per exemple una bomba, un ventilador o altre dispositiu mecànic.

Per exemple en el nostre motor, una vegada ha arribat la calor a les aletes, aquestes transmeten la calor cap a l'aire. La convecció que ens trobarem serà forçada ja que amb les entrades d'aire forçarem calor cap al motor. Encara que per convecció natural segurament també dissiparem calor, però amb menys quantitat.

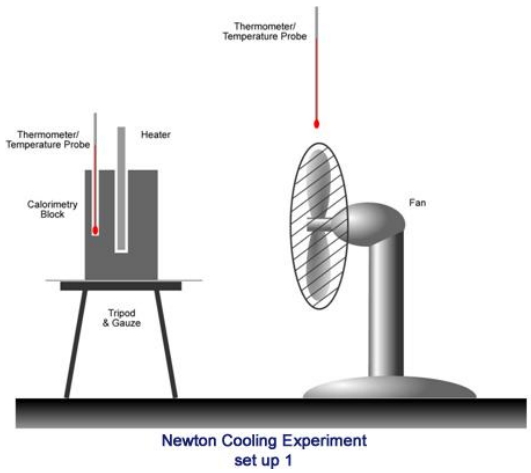


Figura 3.5: Convecció forçada

3.5 Radiació tèrmica

La radiació tèrmica és l'emissió continua d'energia de la superfície de tots els cossos. Els portadors d'aquesta energia són les ones electromagnètiques produïdes per les vibracions de les partícules carregades que formen part dels àtoms i molècules de la

matèria. Tots els cossos emeten radiació electromagnètica, sent la seva intensitat depenent de la temperatura i la longitud d'ona.

Aquest tipus de radiació no es tindrà en compte en el present projecte, degut a que és difícil de determinar i que la seva rellevància no és important.

3.6 Aletes de refrigeració

Les aletes de refrigeració són un element molt utilitzat en la refrigeració de motors elèctrics refrigerats per aire. Aquestes fan augmentar considerablement l'àrea de contacte entre un sòlid i un fluid, que és un element directe que afecta a la transferència de calor. Les aletes han de tenir la màxima conductivitat tèrmica, per tant, els materials amb les qual estan fabricades, solen ser, alumini, coure, etc. Però materials com el coure, no s'utilitzen malgrat tenir una conductivitat més elevada, degut a la seva densitat.

Figura 3.6: Motor amb aletes de refrigeració

4 FONAMENTS D'AERODINÀMICA

L'aerodinàmica és la branca de la mecànica de fluids que estudia les accions que apareixen sobre els cossos sòlids quan existeix un moviment relatiu entre aquests i el fluid que els banya, sent aquest últim un gas i no un líquid.

L'aerodinàmica és un factor molt important quan parlem d'automobilisme, una bona aerodinàmica ens permetrà obtenir consums més baixos, majors velocitats i acceleracions, i permetrà que el vehicle tingui una bona adherència. En el món de la competició, aquesta serà la que marcarà la diferència, tal com s'ha pogut observar en la Formula 1,on dos monoplaces que tenen el mateix motor, però en canvi tenen diferents paràmetres aerodinàmics, el que gaudeix de millor aerodinàmica n'ha sortit vencedor.

4.1 Les forces aerodinàmiques

Quan en un procés mecànic interactuen dos sòlids, les forces s'apliquen i es transmeten en el punt de contacte. Però quan un sòlid interactua amb l'aire, les molècules pròximes a l'aire es distorsionen, començant a moure's al voltant del sòlid. L'aire canvia de forma, fluint al voltant del sòlid i mantenint un contacte físic en tots els seus punts. Per això, el punt de contacte de les forces aerodinàmiques generades són tots i cada un dels punts de la superfície del cos.

La magnitud d'aquestes forces dependran tant de l'aire com del sòlid, en el nostre cas l'automòbil. Hi ha dos propietats fonamentals de l'aire a tenir en compte: la viscositat i la densitat, on aquests ens marquen la compressibilitat de l'aire.

En el cas de l'automòbil s'ha de considerar la seva forma, rugositat superficial, l'àrea de contacte amb l'aire i sobre tot la velocitat relativa entre aquest i l'aire.

Tot això es tradueix en que sobre cada punt de la superfície de l'automòbil hi actuïn dos forces:

- Força de pressió: normal a la superfície del cos. Es deguda a la velocitat relativa entre el cos i l'aire.

- Força de fregament: tangent a la superfície del cos. Es deguda a la viscositat de l'aire.

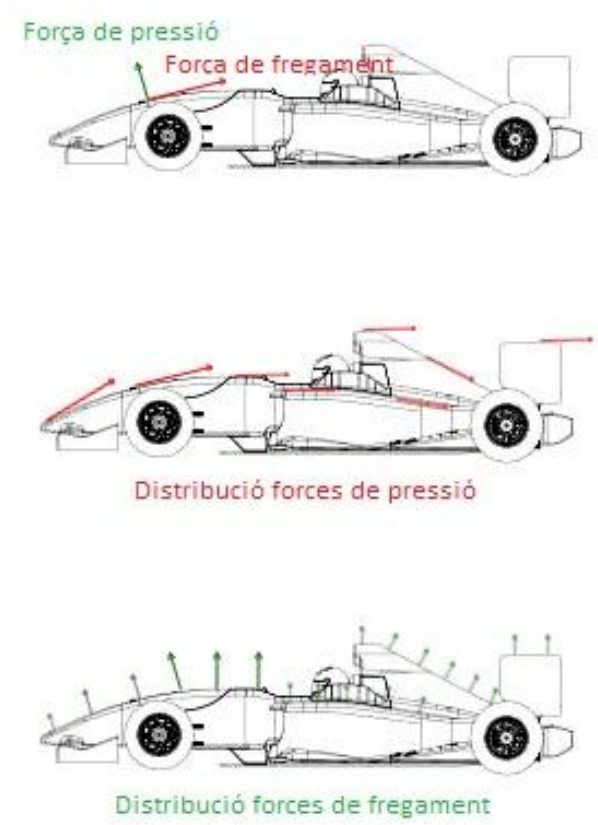


Figura 4.1: Distribució de forces en un monoplaça

4.2 La resistència aerodinàmica

Es denomina resistència aerodinàmica a la component de força que pateix un cos al moure's a través de l'aire en la direcció de la velocitat relativa entre l'aire i el cos. La resistència és sempre de sentit oposat a la velocitat, pel que habitualment es diu que és la força que s'oposa al avanç d'un cos a través de l'aire.

4.3 Els coeficients aerodinàmics

Els coeficients aerodinàmics són números adimensionals que s'utilitzen per l'estudi aerodinàmic de les forces i moments que pateix un cos qualsevol en moviment a través de l'aire.

Els tres coeficients més utilitzats són:

1. Coeficient de sustentació:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \qquad (Eq.1)$$

- C_L: coeficient de sustentació
- L: força de sustentació (N)
- ρ: densitat del fluid (kg/m^3)
- V: velocitat (m/s)
- A: àrea de referència del cos, acostuma a ser la superfície frontal projectada del vehicle (m^2)

2. Coeficient de resistència:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \qquad (Eq.2)$$

- C_D: coeficient aerodinàmic de resistència
- D: resistència (N)

3. Coeficient de força lateral:

$$C_Y = \frac{Y}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \qquad (Eq.3)$$

- C_Y: coeficient de força lateral
- Y: força lateral (N)

Podem observar com varia el coeficient de resistència (C_D) d'un mateix vehicle, modificant el sostre i les posicions de les finestres i les llums.

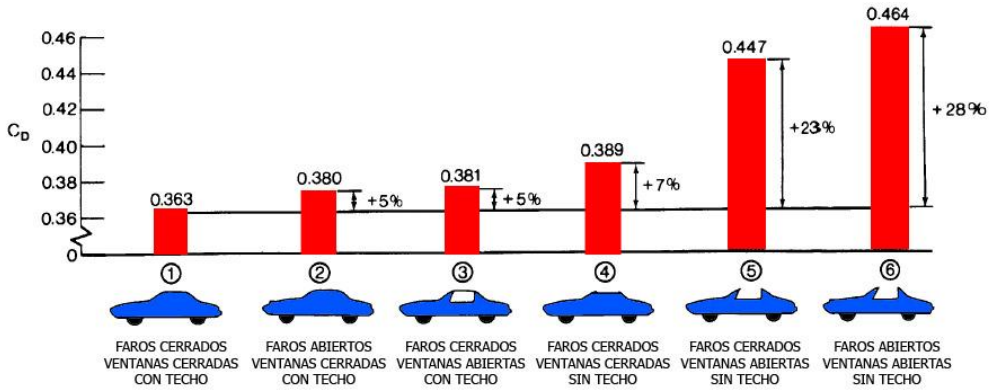


Figura 4.2: Efecte en el coeficient de resistència

El fet de que aquestes forces aerodinàmiques es trobin aplicades al centre de pressions, punt imaginari que no coincideix amb el centre de gravetat del vehicle, fa que es produeixin uns moments aerodinàmics: de gir, balanceig i capcineig.

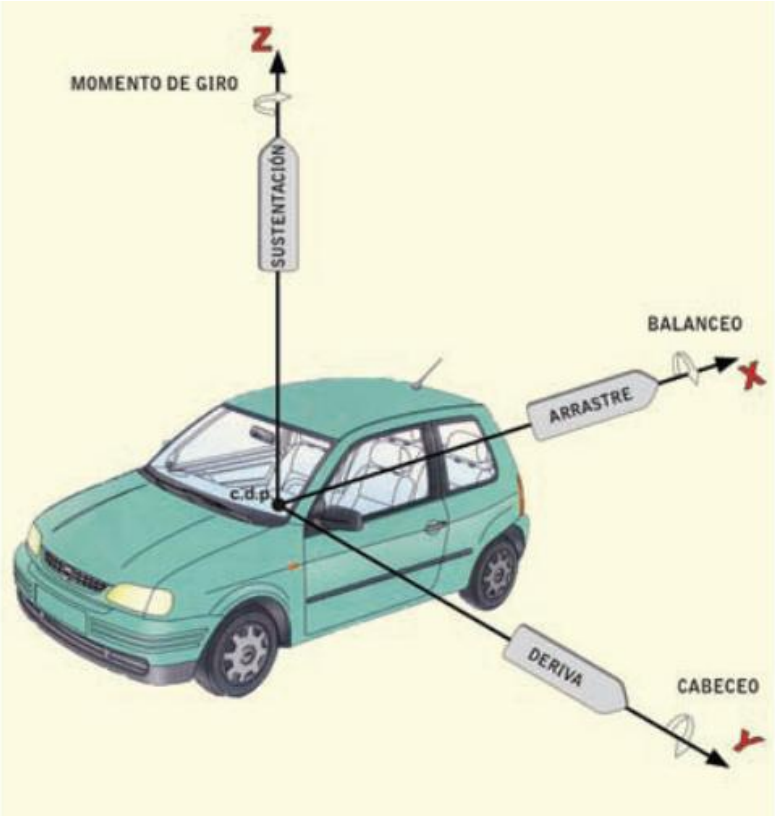


Figura 4.3: Forces i moments aplicades a un vehicle

4.4 Principi de Bernoulli

En l'automobilisme es busca crear una zona d'alta pressió per sobre el vehicle i una de baixa pressió per sota. La diferència de pressions provoca una succió que empeny el vehicle contra el terra, millorant l'adherència, on això es pot entendre gràcies al principi de Bernoulli. Aquest fenomen és conegut com efecte terra.

El principi de Bernoulli, postula que, per un fluid no viscós, un increment en la velocitat del fluid implica una disminució de la seva pressió o energia potencial; la seva energia es manté constant al llarg del recorregut.

$$\frac{v^2}{2} + gz + \frac{p}{\rho} = ctt. \qquad (Eq.4)$$

- v: velocitat (m/s)
- g: gravetat (m/s^2)
- z: alçada (m)
- p: pressió (Pa)
- ρ: densitat (Kg/m^3)

Ens trobem que l'aire que es troba sota el cotxe adquireix més velocitat, per tant, la pressió disminueix i això produeix la succió del cotxe cap al terra.

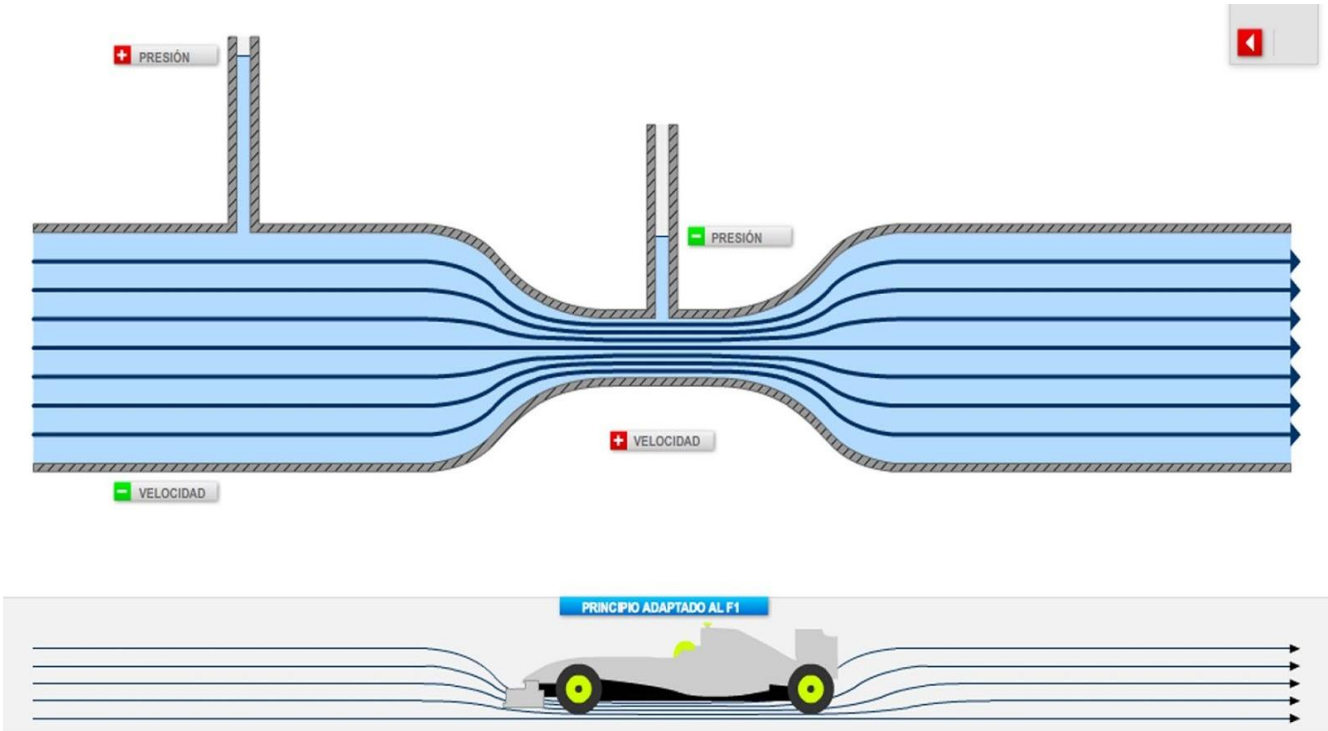


Figura 4.4: Principi de Bernoulli aplicat al fons pla d'un Formula 1

En els perfils alars també s'observa el principi de Bernoulli. Aquest cas seria aplicat a l'ala d'un avió.

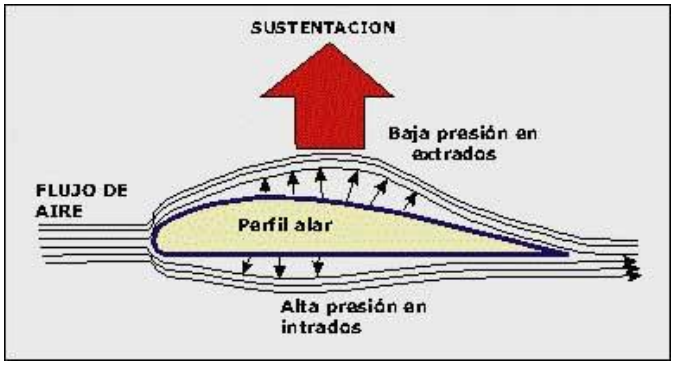


Figura 4.5: Principi de Bernoulli aplicat a l'ala d'un avió

Primer de tot hem de saber que si una partícula d'aire entra al perfil, si aquesta es divideix en dos, d'aquestes dos una passa per la zona superior i l'altra per la zona inferior, les dos tardaran el mateix en arribar al final del perfil. Per tant, si el temps és el mateix, significa que les velocitats seran diferents, ja que una ha de recórrer més espai que l'altra. La que passa per la zona superior, haurà de fer més recorregut, per tant tindrà una velocitat major. I al contrari amb la que passa per la zona inferior, ja que haurà de fer menys recorregut i per tant la velocitat serà menor. Tal com ens indica el principi de Bernoulli, si la velocitat és major, la pressió serà menor, això comportarà que en la zona superior tinguem una força de sustentació que farà que el perfil vagi cap amunt. I en la zona inferior tindrem una zona d'altes pressions que també farà que la força vulgui aixecar el nostre perfil.

Tot el contrari passaria al perfil d'una ala aplicat a l'automobilisme.

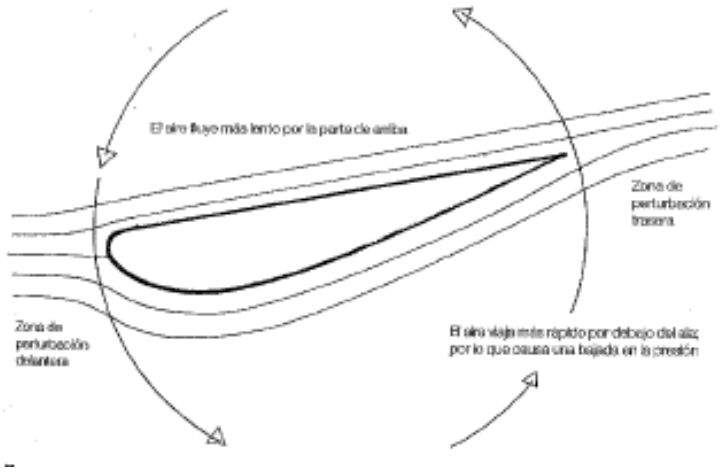


Figura 4.6: Perfil d'ala d'automobilisme

4.5 Tipus de flux

Poden existir dos tipus de flux, laminar o turbulent. Si totes les partícules dins del flux es mouen en la mateixa direcció que la velocitat de l'aire i que les línies de flux, llavors el flux es considera laminar. Si, per altra banda, les partícules d'aire viatgen de forma erràtica, en camins no paral·lels a la velocitat mitja de l'aire, llavors el flux és turbulent.

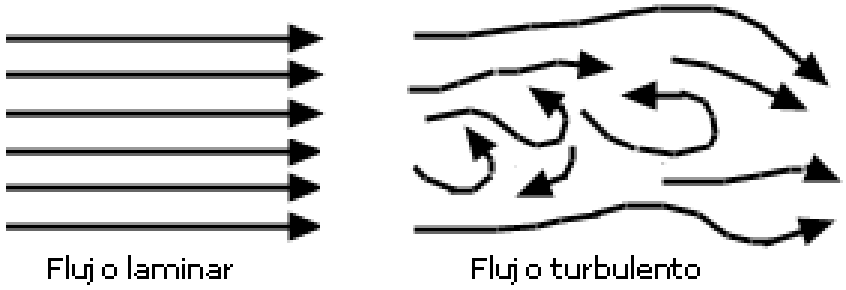


Figura 4.7: Tipus de flux

4.6 La capa límit

Fins ara, hem assumit alguns fets sobre la manera en el que el flux es mou al llarg del cos. Si l'aire fos un gas ideal, sense viscositat, llavors els nostres raonaments serien vàlids, però en realitat, l'aire es un flux viscos, i per això, quan un cos es mou a través d'ell, l'aire en les seves proximitats genera un fregament intern. Les partícules d'aire que estan en contacte amb la superfície també són frenades pel fregament, i la capa d'aire adjacent a la superfície del cos s'enganxa a aquesta superfície. Les capes d'aire més allunyades a la superfície també son frenades per aquest fregament viscos, però segons augmenta la distància respecte a la superfície, aquest efecte es torna menys intens, fins que, a una certa distància, l'aire no es veu afectat i es coneix com a velocitat de l'aire del flux principal. Així, existeix una capa d'aire al voltant del cos en la que hi ha un gradient de velocitat, de zero en la superfície, fins al flux principal del marge exterior. Aquesta capa és coneguda com la capa límit.

Si les diferencies de velocitat entre les subcapes de la capa límit són petites, lliscaran les unes sobre les altres amb poca interacció entre elles, creant així una capa límit laminar. Si, en cas contrari, alguna cosa molesta a la capa límit, com pot ser una curvatura en la superfície del cos, llavors la capa límit es converteix en turbulenta. Una capa límit laminar crea menys superfície de fregament que una turbulenta, i per això la resistència és menor, mentre la capa es mantingui laminar. Però una capa límit turbulenta també pot retardar l'envestida de la separació del flux en algunes circumstàncies, o inclús causar la unió d'un flux separat.

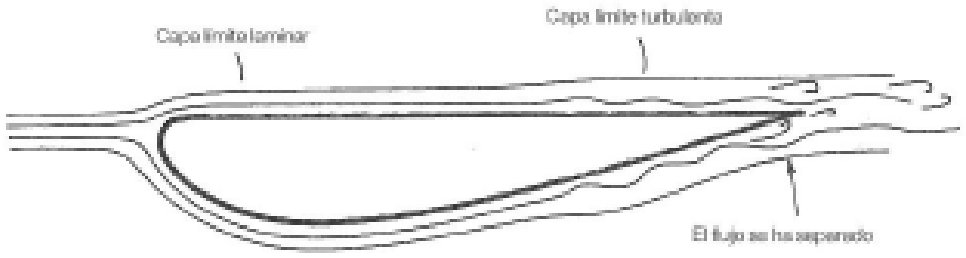


Figura 4.8: Transició d'una capa límit laminar a turbulent al llarg d'una ala

5 ÚS DEL CFD EN LA MILLORA AERODINÀMICA DE VEHICLES

La intenció és recrear com es comportaria el nostre model en un túnel del vent. La simulació amb CFD només en seria la primera part en el disseny del vehicle, ja que encara que la simulació doni bons resultats, aquests no es poden donar com a verídics, ja que el CFD es basa amb aproximacions. Sinó que llavors procediríem a construir el model i després el simularíem a un túnel del vent. Finalment, necessitaríem provar el comportament del vehicle en circuit, ja que els túnels del vent també donen errors.

5.1 El túnel del vent

Els túnels del vent van ser originàriament desenvolupats principalment per a ús aeronàutic, encara que en els últims anys, els túnels especialitzats destinats exclusivament per al treball de l'automoció han evolucionat, i aquests tenen una sèrie de característiques que els distingeixen dels túnels aeronàutics.

Existeixen dues configuracions generals diferents del túnel del vent. El tancat, l'aire circula al voltant d'un circuit tancat continu. L'obert, consisteix essencialment en un tub obert en ambdós extrems. L'aire és aspirat i retornat als voltants.

L'avantatge del tipus obert és que és relativament compacte. Un altre avantatge és que pel fet que l'aire s'extreu i es descarrega en un espai relativament gran, no tendeix a escalfar-se. En el cas d'un túnel tancat, la calor cinètica produïda per la fricció en les parets pot causar un augment de temperatura gran, el que afectarà negativament l'estabilitat de la instrumentació de mesura. El túnel obert té dos desavantatges; en primer lloc, ja que l'aire no és més que una fuita cap a l'entorn, la seva energia cinètica es perd, i per tant es requereix més potència que per a una configuració de retenció tancada. Un segon problema és que, donat que l'aire parteix del repòs a l'habitació circumdant a pressió atmosfèrica, la pressió a la secció de treball ha de ser inferior a l'atmosfèrica (seguint la relació de Bernoulli). La secció interior de treball, per tant ha d'estar ben segellada dels voltants.

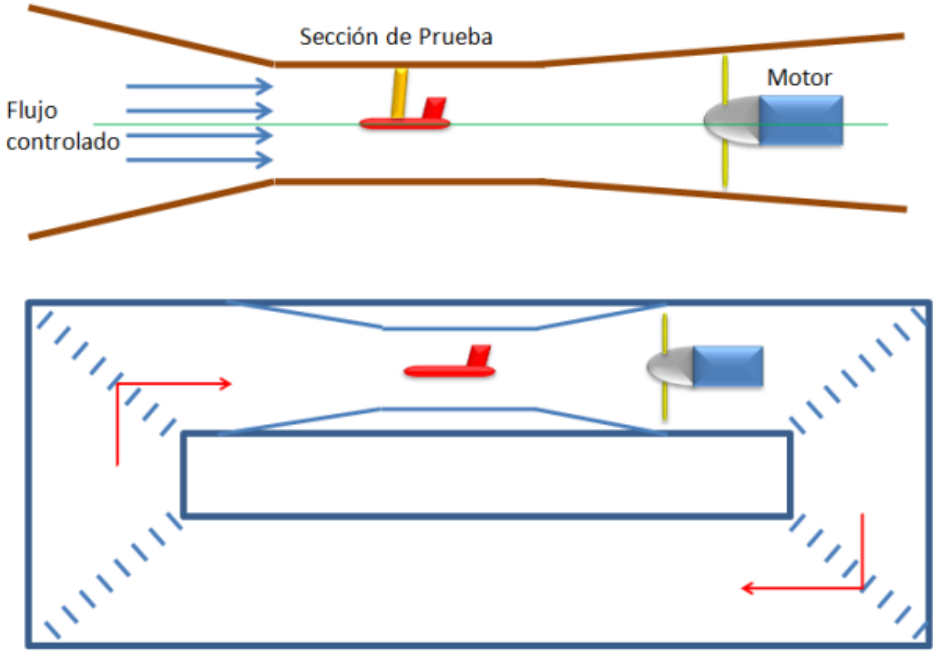


Figura 5.1: Túnel del vent obert i túnel del vent tancat

Els dos tipus de túnel són capaços de donar resultats igualment bons, però per raons pràctiques, si els diners no és la limitació, el tipus de túnel del vent tancat és generalment preferit, i gairebé tots els grans fabricants s'han instal·lat aquest tipus en els últims anys. A part del circuit de retorn, hi ha grans diferències en la forma de la secció de treball utilitzat.

5.2 Definició de CFD

La dinàmica de fluids computacional o també anomenada CFD, és una de les branques de la mecànica de fluids que fa servir mètodes numèrics i algoritmes per resoldre i analitzar problemes de fluxos de fluids utilitzant una discretització de l'espai. Aquesta discretització es fa per resoldre numèricament les equacions dinàmiques del fluid en una sèrie de punts separats unes distàncies prou petites per obtenir una solució acceptable.

5.3 Metodologia utilitzada

Hi ha diverses estratègies de discretització. En el nostre cas utilitzarem el mètode dels volums finits. En aquest mètode, les equacions d'evolució de les variables s'expressen en termes d'equacions de balanç a partir dels fluxos que travessen les parets d'aquests elements de volum i les seves fonts i embornals. D'aquesta forma s'obtenen,

per a cada volum, les expressions per a les equacions de conservació de la massa, moment i energia.

L'estudi d'un problema de CFD pel mètode dels volums finits segueix el següent procés:

- Etapa de pre-procés:

Construcció de la geometria: Primer de tot, a través d'un programari de CAD en 3D, en el nostre cas, el Solidworks, es crea la geometria del prototip, on també s'hi afegiran els elements els quals hem d'estudiar les seves temperatures, com és el cas de les bateries i els motors. Com que el vehicle és simètric, només s'estudiarà la meitat del vehicle, ja que així simplificarem els càlculs. Llavors amb aquest mateix programari es dibuixarà el túnel del vent. Una vegada creat el model i el túnel del vent, importarem aquests elements al programari de CFD, en el nostre cas, l'Ansys Workbench, amb el que podrem realitzar tot el procés restant. A la geometria del túnel del vent li restarem la geometria de la carrosseria, ja que la carrosseria és un element sòlid.

Generació del mallat: La generació del mallat és necessària per a la solució numèrica del problema ja que equival a discretitzar el domini. En aquest procés es creen un nombre finit d'elements en què es determinaran les variables del flux. Segons les necessitats de cada treball es poden generar mallats estructurats o no estructurats.

Definició de zones: S'han de definir les zones, com és el cas de la simetria, les parets del túnel, el terra del túnel i les entrades i sortides d'aquest. Aquí també definirem la dissipació de calor de les bateries i el motor, per després poder estudiar l'evolució de les temperatures.

- Resolució numèrica

Aquesta etapa es un procés computacional iteratiu, on l'ordinador intenta resoldre el nostre problema a partir de les nostres especificacions. On haurem d'obtenir la informació de cada volum que hem definit anteriorment en el mallat.

- Etapa de post-procés

Finalment un cop realitzada la resolució numèrica obtenim els resultats. On podrem extreure tota la informació que ens sigui d'interès, com per exemple, les càrregues aerodinàmiques, les velocitats i les temperatures.

6 ETAPES DEL PROJECTE

6.1 Limitacions per normativa

La Formula Student és una competició que dona molta llibertat a l'hora de dissenyar el monoplaça, però aquesta consta d'algunes normatives. Les normes que ens afecten en el disseny de la carrosseria i la configuració dels motors són les següents:

a) Només es permeten motors elèctrics. Es permet qualsevol tipus de motor elèctric. El nombre de motors no es limita.
b) La potència màxima provinent de la bateria no ha d'excedir 85 kW. Això es verificarà mitjançant l'avaluació de les dades del mesurador d'energia.
c) No es pot utilitzar cap dispositiu d'alimentació per moure o eliminar l'aire de sota del vehicle, excepte ventiladors dissenyats exclusivament per a la refrigeració. Està prohibida a efectes de produir efecte terra.
d) El cotxe ha de tenir una distància entre eixos d'almenys 1525 mm. La distància entre eixos es mesura des del centre de contacte amb el terra de les rodes davanteres i posteriors.
e) La pista més petita del vehicle (frontal o posterior) ha de ser no menys de 75% de la pista més gran.
f) A la vista, enlloc de qualsevol dispositiu aerodinàmic, ala, sota la safata o un divisor pot ser:
    - Més endavant de 762 mm des de el punt de contacte de les rodes davanteres.
    - Més enrere de 305 mm des de el punt de contacte de les rodes posteriors.
    - No més ampla que la part exterior dels pneumàtics davanters o posteriors, pneumàtics mesurats a l'altura dels centres, el que sigui major.

6.2 Prova de la competició crítica per a la refrigeració

Tenim la necessitat de conèixer les màximes temperatures que assoliran els motors i les bateries, ja que una temperatura excessiva els podria danyar i ens podria fer abandonar la competició. Per això, haurem de determinar quina serà la prova que ens portarà a temperatures més elevades dels motors i bateries.

La prova d'acceleració requerirà una potència elevada, però el recorregut és només de 75 metres i el caudal d'aire que arribarà a les bateries anirà augmentant a mesura que el vehicle vagi adquirint velocitat.

La prova de la pista de patinatge, consisteix en fer dos voltes en un petit circuit en forma de vuit, on es requerirà major adherència que potència.

La prova de maniobrabilitat, que està marcada per un circuit amb cons, les velocitats mitjanes estaran al voltant d'entre 40 i 48 km/h. On la llargada de la volta serà aproximadament de 0,8 km. En aquesta prova es requerirà força potència del motor ja que estarem constantment frenant i accelerant, però la durada de la prova no serà molt llarga.

La prova de resistència i eficiència que es realitzen simultàniament, es realitzaran al llarg d'un circuit, on la velocitat mitjana estarà entre 48 i 57 km/h i s'assoliran puntes d'aproximadament 105 km/h. La prova tindrà uns 22 km de llargada.

Si observem les característiques de totes les proves, la prova que ens pot portar més problemes en termes de temperatura és la prova de resistència i eficiència, degut a la llargada de la prova, i el recorregut, que ens exigirà una elevada potència després de cada corba. Per tant, basarem les simulacions a partir de les característiques de la prova de resistència i eficiència.

Com aquest projecte s'avança en els càlculs mecànics i elèctrics, encara no coneixem la relació de transmissió. Per determinar el règim de gir del motor considerarem que el motor treballa en la zona de màxim rendiment, per tant, en totes les simulacions es tindrà en compte que el motor funciona a un règim de 2000 rpm. Coneixent el règim de gir, podem saber les pèrdues del motor, on la majoria d'aquestes pèrdues es transformaran en energia calorífica, la qual haurà de ser dissipada. A 2000 rpm les pèrdues del motor són d'aproximadament 500 Watts. Aquesta potència ens marca la calor que hem de dissipar.

6.3 Disseny dels elements

En CFD, és molt important buscar maneres per intentar reduir els càlculs. Per això en totes les simulacions aplicarem la simetria. Això es tradueix en que a l'hora de dibuixar

els elements en el programari de CAD, només en dibuixarem la meitat simètrica. Llavors, a les condicions de contorn, ja definirem la simetria.

Primer de tot, partint del xassís, dibuixarem la nostra geometria externa del vehicle. On, també hi col·locarem els elements que volem estudiar com és el cas de del motor i les bateries. Per tal, de fer arribar suficient aire al motor incorporarem entrades d'aire que es dirigiran cap al motor, i per refredar les bateries farem uns petits orificis a la carrosseria, ja que aquestes aniran als laterals. Comprovarem com afecten aquestes entrades d'aire comparant el coeficient de resistència.

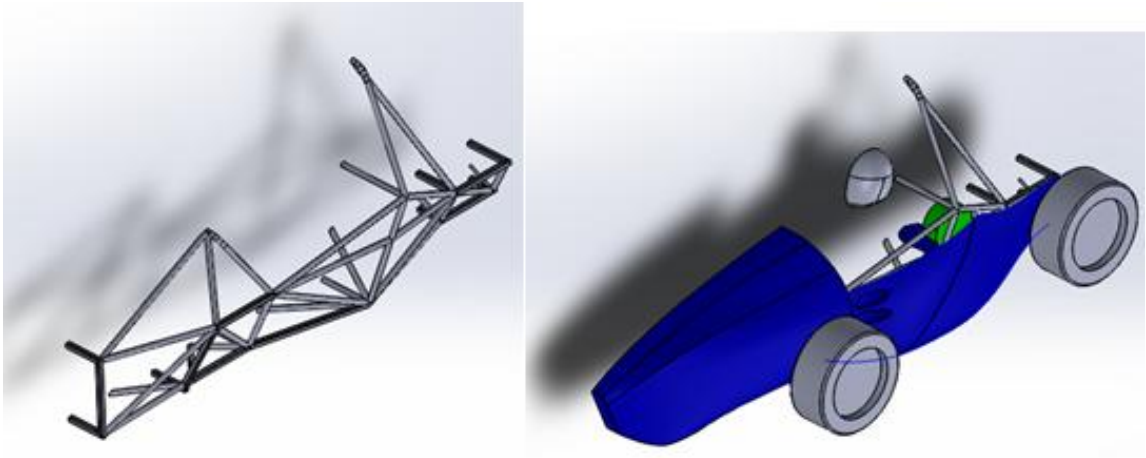


Figura 6.1: A l'esquerra el xassís i a la dreta el xassís amb la geometria desenvolupada

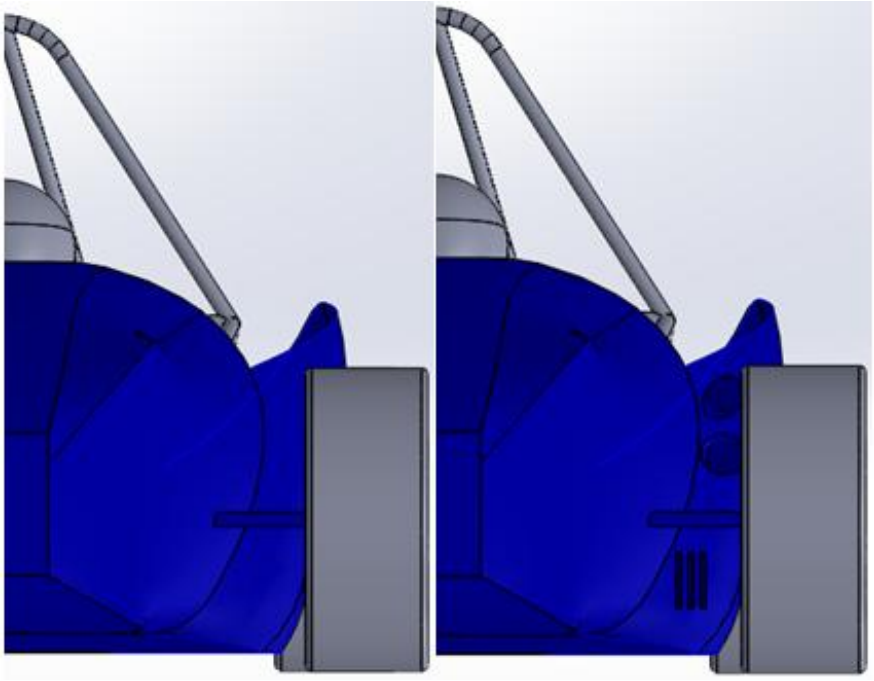


Figura 6.2: A l'esquerra el vehicle sense entrades d'aire i a la dreta amb entrades d'aire

Necessitarem un prisma que realitzi la funció de túnel del vent, les mides d'aquest prisma no són arbitràries sinó que ens basarem amb el cos Ahmed, que és un cos que s'utilitza com a referència en l'automobilisme. Aquest ens marcarà les mides del túnel del vent i les distàncies on ha d'anar situat el vehicle a partir de la mida d'aquest.

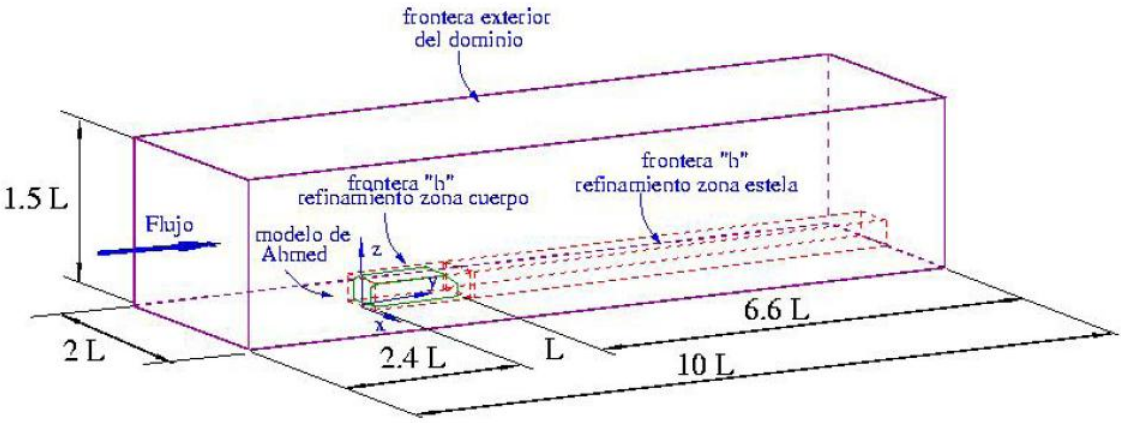
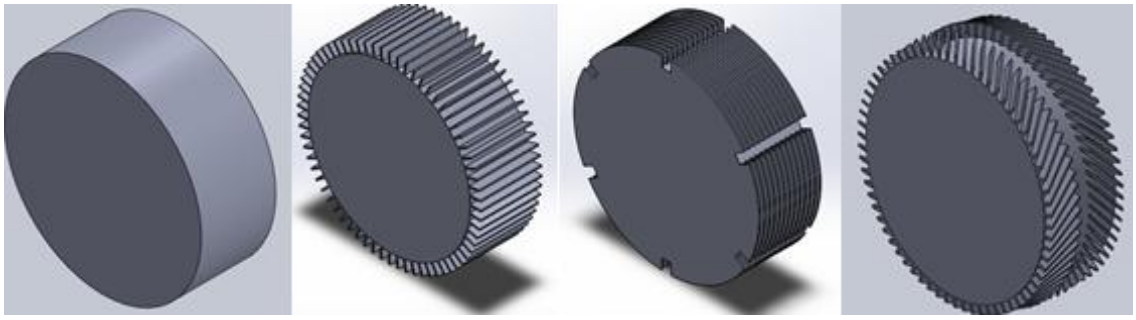


Figura 6.3: Dimensions del túnel del vent

El nostre vehicle mesura 2750 mm de llarg. Per tant, el nostre túnel tindrà una llargada de 27,5 metres i una amplada de 5,5 metres.

A part de les simulacions del monoplaça, on tindrem en compte les temperatures de les bateries i els motors, com que el motor és l'element que més refrigeració necessitarà, farem simulacions amb diferents configuracions d'aquest. Per això, modificarem les aletes i el lloc per on incideix el vent. Aquestes simulacions es faran independentment del vehicle.



Taula 6.1: Diferents configuracions del motor

Una vegada obtingudes les geometries, situarem l'element a estudiar, l'haurem de col·locar en la posició correcte en el túnel del vent. Llavors haurem de fer una sostracció booleana de l'element en el túnel del vent, per així obtenir un únic sòlid, on la part que no hi ha material, és el vehicle o motor, i la part on hi ha material és on es troba l'aire.

6.4 Mallat

El mallat és el procés més important, ja que repercuteix directament en la solució. Hem de buscar que a les zones de més interès hi hagi un mallat més intens i en canvi a les zones de menys interès, el mallat pot ser més simple. Per aquest motiu, en el mallat del vehicle en el túnel del vent, s'ha fet un prisma més petit que envolta el vehicle, on a aquesta zona la mida del mallat serà més petita.

El mallat està marcat pel nombre de nodes i d'elements. No podem excedir el límit que té la llicència de la universitat. Com ja s'ha esmentat anteriorment, les simulacions es realitzaran només per la meitat simètrica, per tal de simplificar el nombre de nodes i elements, això ens ajudarà a que la part de càlcul sigui més ràpida.

A l'hora de realitzar el mallat s'ha fet una simplificació eliminant el xassís, considerant que és un element que gairebé no ens afectarà en la simulació de l'evolució de les

temperatures. En els càlculs aerodinàmics, aquesta simplificació tindrà més efecte, però com totes les simulacions estaran fetes seguint el mateix criteri, no tindrà gran repercussió en les comparacions.

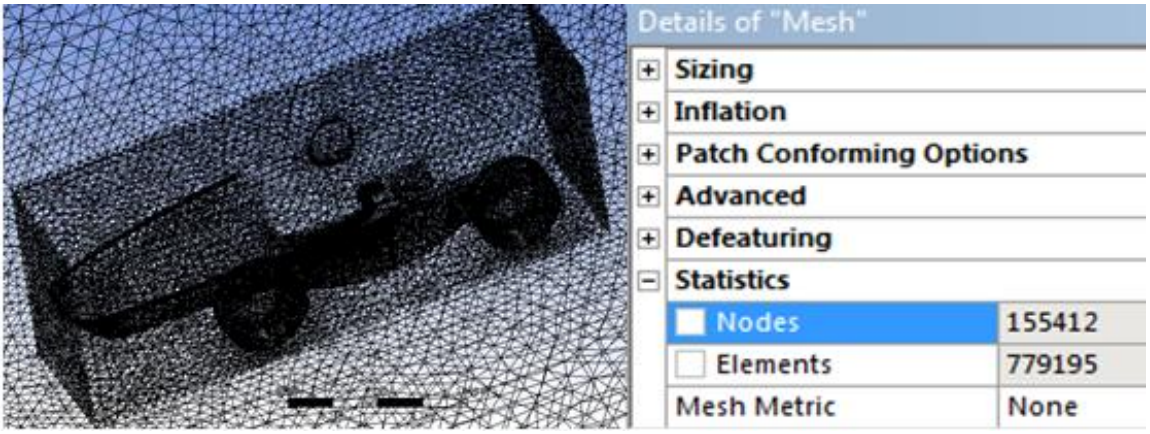


Figura 6.4: Mallat del vehicle i nombre d'elements i nodes del mallat

Es segueix el mateix criteri de mallat amb les simulacions independents del motor. La zona més propera del motor, els elements tindran una mida menor, i a mesura que ens anem allunyant de la zona d'interès, la mida dels elements anirà augmentant.

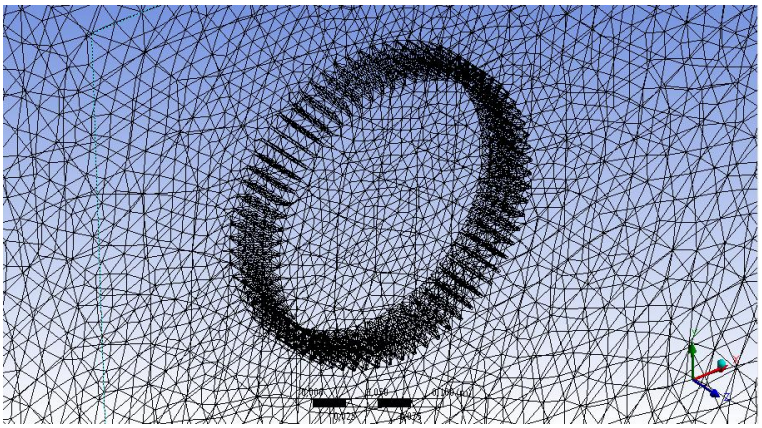


Figura 6.5: Mallat del motor

6.5 Condicions de contorn i tèrmiques

Com a objectiu de realitzar la simulació, abans hem de definir quines són les zones de contorn i les seves característiques.

- Entrada: Es defineix per quina zona entrarà l'aire i la seva temperatura i velocitat. La temperatura s'ha considerat en tots els casos de 25ºC. I la velocitat s'ha variat segons la simulació.
- Sortida: Es defineix el lloc de sortida de l'aire i la pressió en la sortida. La pressió en la sortida s'ha considerat en tots els casos atmosfèrica.
- Simetria: Es defineix la cara de simetria.
- Paret i sostre: Es defineixen quines són les parets on l'aire llisca lliurament, per tant, la velocitat de l'aire en contacte amb elles, no serà zero.
- Terra: Es defineix el terra, on aquest no és lliscant, per tant, la velocitat de l'aire en contacte amb ell és zero.

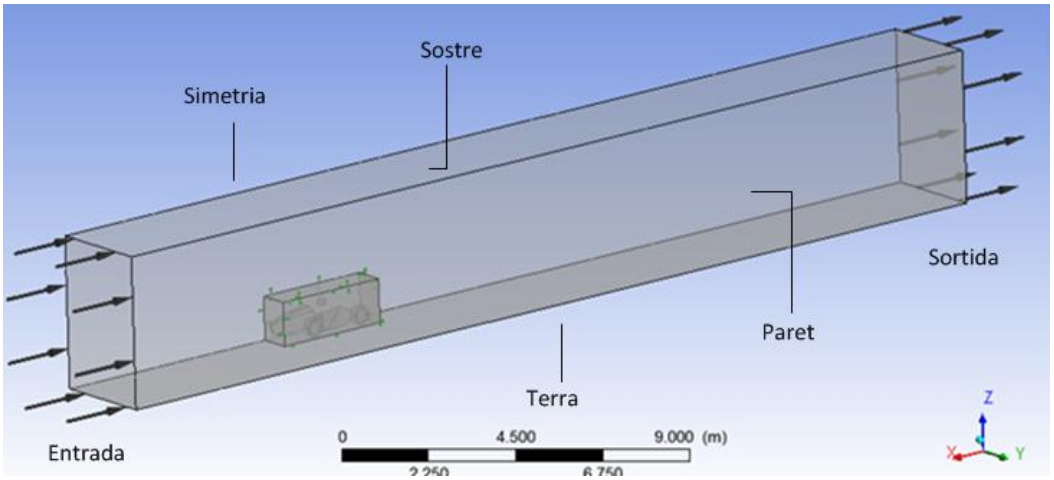


Figura 6.6: Cares de contorn

Per l'anàlisi de temperatura també és necessari marcar quins són els elements que dissipen calor. On serà necessari marcar quines són les cares, i quin és el flux de calor que emeten.

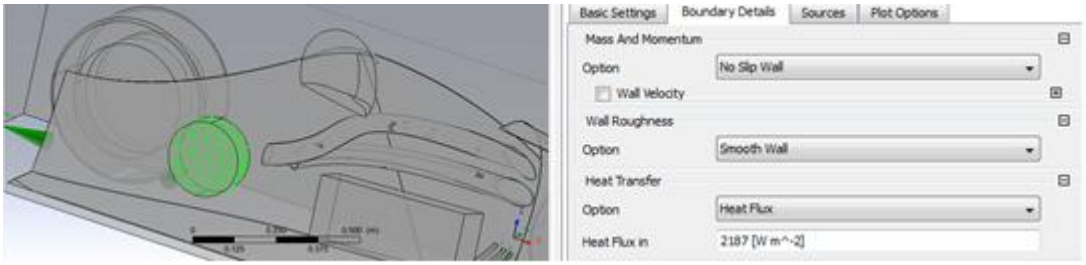


Figura 6.7: Assignació de flux de calor al motor

6.6 Càlcul de la computadora

Per realitzar els càlculs per obtenir la solució primer de tot hem d'establir les especificacions de parada. Aquestes les definirem amb el nombre mínim i màxim d'iteracions i l'error residual. El nombre màxim d'iteracions que s'ha realitzat durant les simulacions és entre 3000 i 5000 iteracions, però hi ha alguna iteració que s'ha aturat abans ja que l'error residual era menor que l'establert. En totes les iteracions s'ha establert com a límit de parada si l'error residual era menor de l'ordre de 10^{-7}.

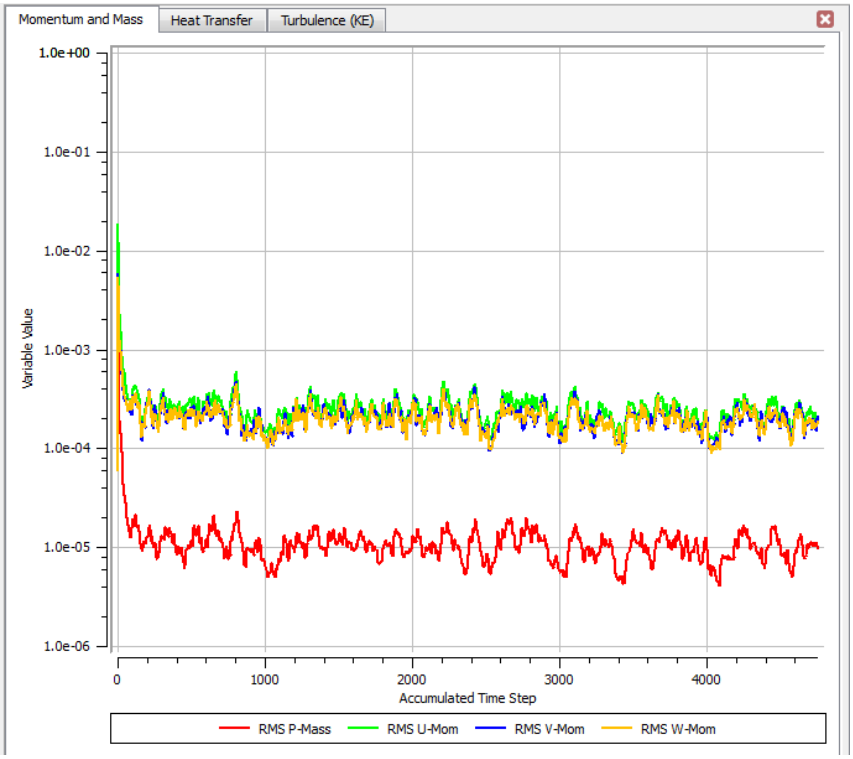


Figura 6.8: Gràfic del nombre d'iteracions contra els errors residuals

S'observa que la simulació ha convergit, els errors residuals gairebé ja no varien, segurament amb menys iteracions haguéssim obtingut els mateixos resultats. En aquest cas hem realitzat fins a més de 4500 iteracions.

6.7 Visualització i interpretació de resultats

Una vegada acabat el càlcul iteratiu, ja podem estudiar els diferents paràmetres que ens interessen.

Hi ha múltiples opcions per poder observar els resultats gràficament. Primer de tot, hem d'escollir si ens interessa una visualització tridimensional o bidimensional. Si

aquesta és tridimensional haurem d'expressar el domini, i si és bidimensional, s'expressarà a través d'un pla.

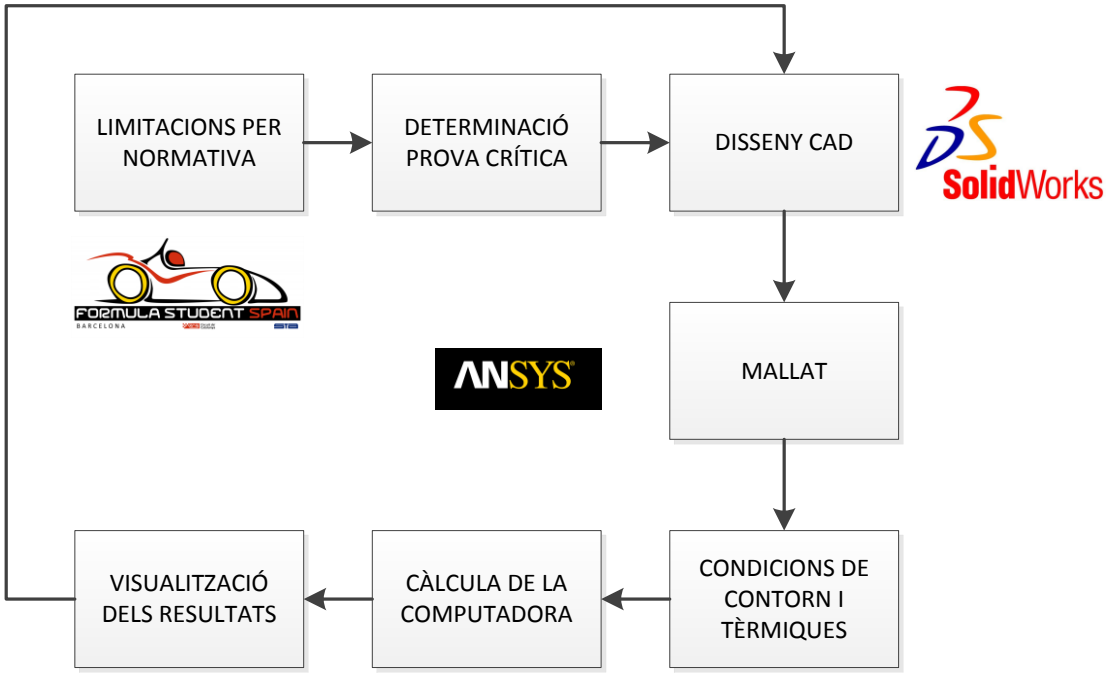


Figura 6.9: Esquema etapes del projecte

7 ANÀLISI DELS RESULTATS

7.1 Anàlisi tèrmic

7.1.1 Comportament del conjunt

En totes les configuracions la potència que dissipa el motor és de 500 Watts. Per tant, depenent de la carcassa del motor, segons tingui més o menys superfície en contacte amb l'aire, la potència que haurà de dissipar per metre quadrat (W/m^2) variarà.

Primer de tot analitzarem quina rellevància tenen les entrades d'aire que es dirigeixen cap al motor en termes de temperatura. La temperatura d'entrada en el túnel del vent serà sempre de 25ºC. La part de darrera del vehicle s'ha deixat oberta perquè ajudi en la dissipació de calor, això ens afectarà negativament en l'aerodinàmica, però ens ajudarà molt en la refrigeració.

Per simplificar els càlculs, en el conjunt del vehicle el motor és sense aletes de refrigeració, on per tant, les temperatures seran més elevades que si en tingués. Però així ja podem valorar la importància de les entrades d'aire del vehicle.

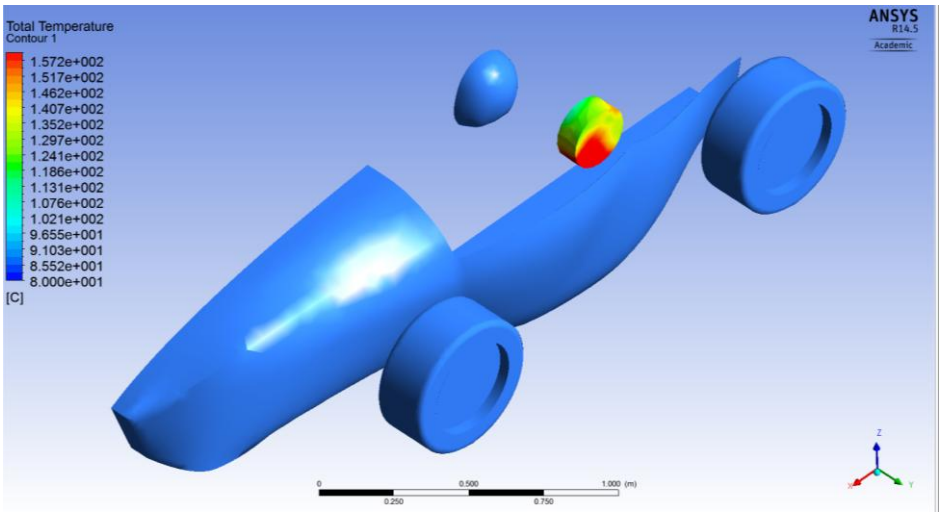


Figura 7.1: Prototip sense entrades d'aire

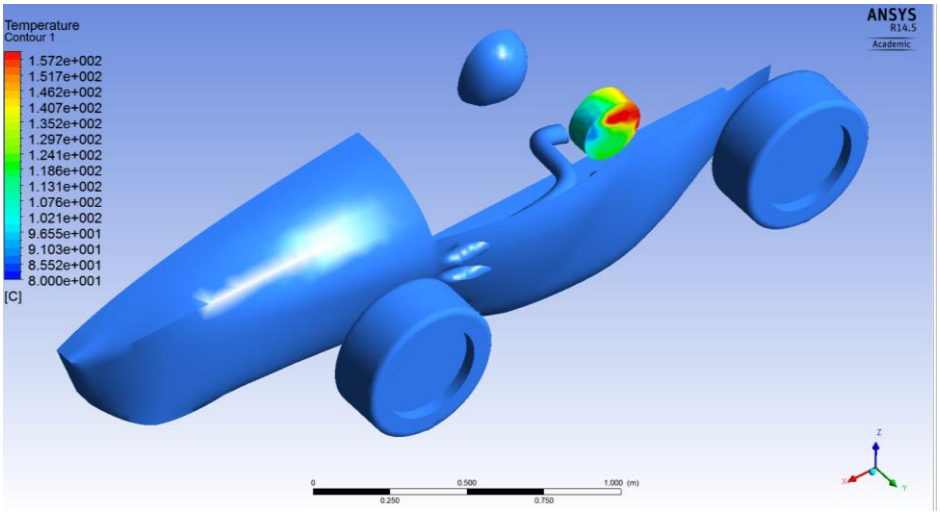


Figura 7.2: Prototip amb entrades d'aire

Es pot observar la importància de les entrades d'aire, la simulació en la que el vehicle té entrades d'aire es pot veure com en les zones on impacte l'aire que circula a través de les tuberes estan considerablement més fredes. En canvi, la part posterior ha adquirit més temperatura.

7.1.2 Efecte de les aletes de refrigeració

Ara passarem a estudiar només el comportament del motor. És a dir, tindrem el motor situat en el túnel del vent, i estudiarem com evolucionen les temperatures. Les condicions d'entrada del túnel del vent seran que la velocitat de l'aire és de 50 km/h i la temperatura de 25ºC. El fabricant ens proporciona el motor amb unes aletes de refrigeració determinades, però si es donés el cas, modificaríem la carcassa del motor.

Figura 7.3: Motor amb carcassa original

Primer de tot observarem la importància de les aletes de refrigeració. Per tant, es compararan les temperatures en la carcassa del motor amb aletes i el motor sense aletes. La superfície de la carcassa en contacte amb l'aire en el motor amb aletes és 2,3 vegades superior.

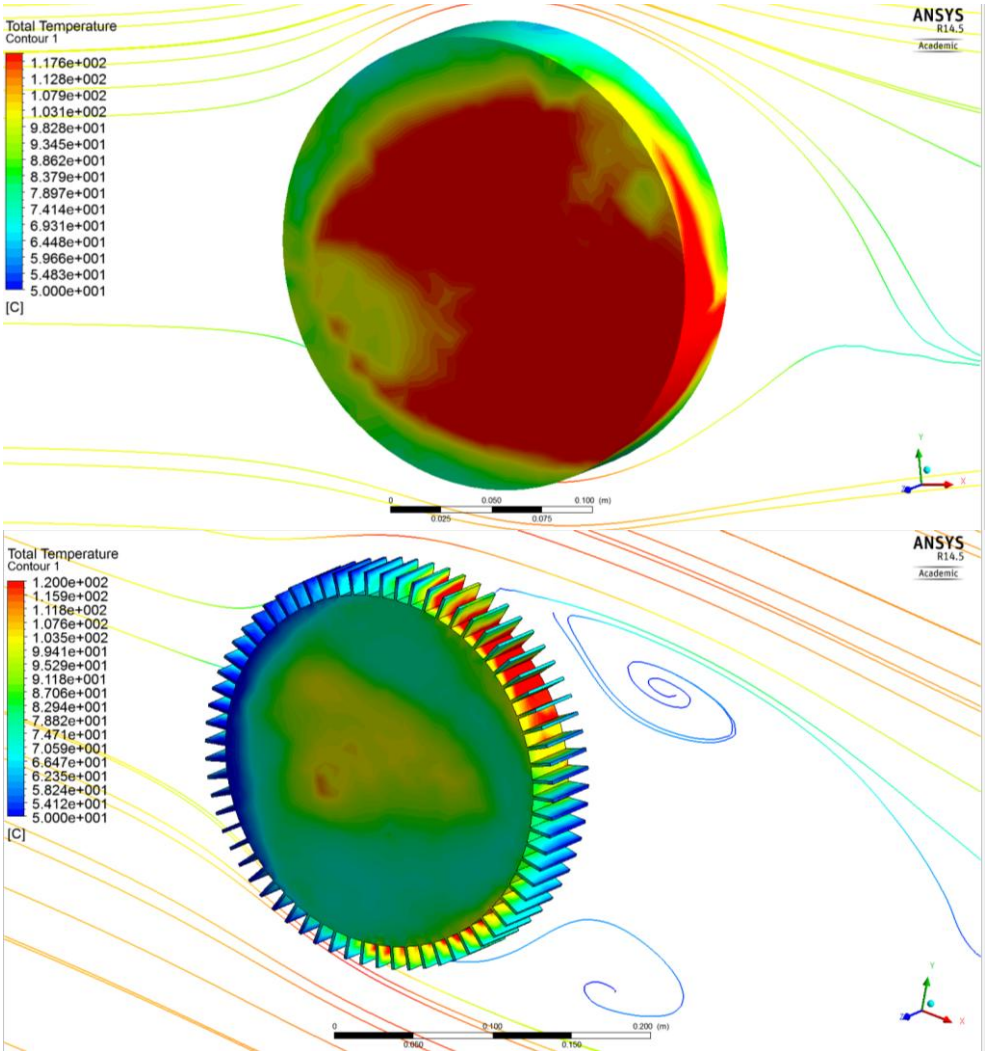


Figura 7.4: A dalt, motor sense aletes, i a baix, motor amb aletes

Es poden observar grans diferències entre el motor que té aletes de refrigeració i el que no. Primer de tot esmentar, que la geometria de les aletes fa que hi hagi un flux turbulent, on aquest fa que ens millori la convecció. En el motor sense aletes, hi ha moltes zones on la temperatura supera els 120ºC, en canvi, en el motor amb aletes només és en zones puntuals. La zona on impacte l'aire amb el motor amb aletes la temperatura és inferior de 50ºC, en canvi, en el motor sense aletes hi ha poques zones on la temperatura sigui menor dels 50ºC. En el motor amb aletes existeix una succió a

darrera que fa que les aletes que estan amb menys contacte amb el flux d'aire, estiguin a una temperatura bastant baixa.

Les aletes de refrigeració no estan orientades en la millor situació, segurament seria millor que l'aire entres axialment al motor.

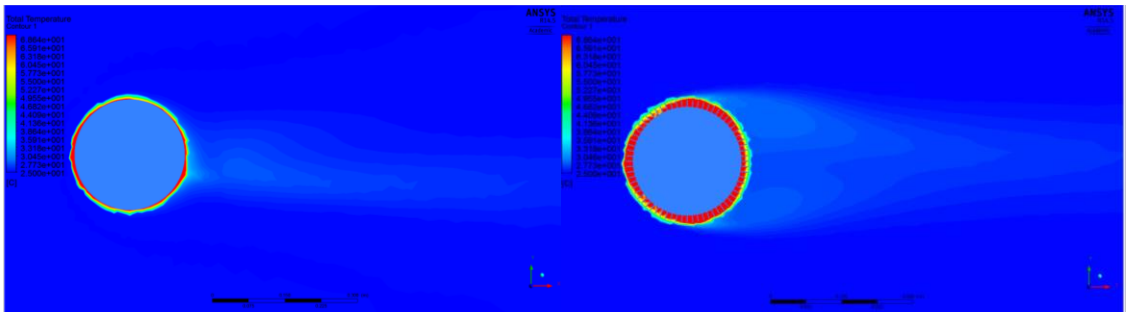


Figura 7.5: Convecció forçada del motor amb aletes i sense

Es pot apreciar com el motor amb aletes dissipa més calor, la zona pròxima del motor està a més temperatura, en canvi, com hem vist abans, la carcassa està a menys temperatura, per tant, aquesta es calor evacuada.

7.1.3 Orientació del motor

Comprovarem quins afectes té si canviem la incidència del flux d'aire amb el motor amb aletes, és a dir l'original, ja que de la manera anterior, hi havia aletes on la seva temperatura era molt elevada, degut a la mala circulació de l'aire.

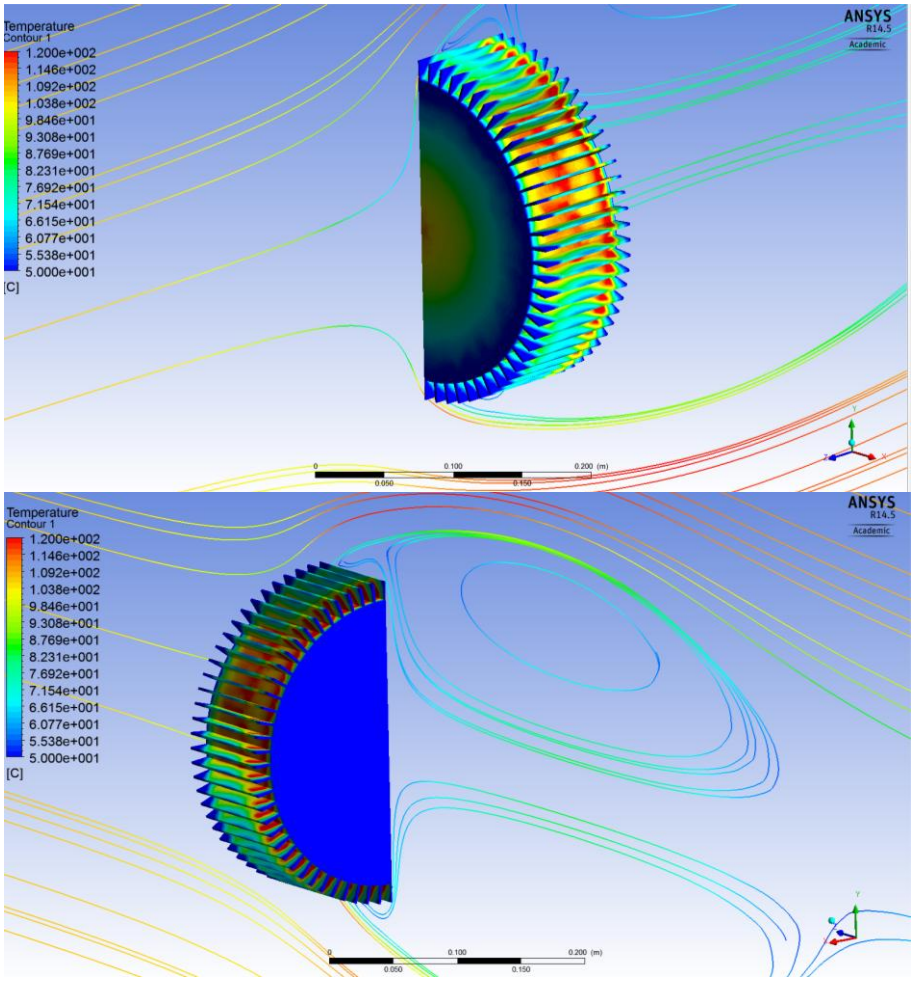


Figura 7.6: A dalt, zona davantera del motor, a baix zona posterior del motor

S'observa que la temperatura està repartida més homogèniament. Ara l'aire circula per les aletes en la direcció natural. La part més enrederida de les aletes, com és lògic, té una major temperatura, ja que l'aire que hi arriba està reescalfat. La part de la carcassa situada en la part posterior del motor, no arriba als 50ºC, això és degut a que es crea una zona de flux turbulent, la qual ajuda molt en la dissipació de calor.

Encara que per la part mecànica seria difícil col·locar el motor d'aquesta manera, es pot veure que la refrigeració és més homogènia.

7.1.4 Diferents configuracions de la carcassa del motor

La situació anterior era bona des de un punt de vista tèrmic, però difícil des de un punt de vista mecànic. Per això, provarem de modificar la posició de les aletes del motor, per veure com afecta a la refrigeració. De moment, es descartarà la opció de que el flux entri axialment al motor degut als problemes esmentats.

1. Motor amb aletes radials: S'ha dissenyat aquesta carcassa amb aletes radials perquè el recorregut de l'aire no es trobi amb tants d'obstacles i pugui arribar més fàcilment a totes les parts del motor. La superfície de la carcassa que està en contacte amb l'aire és 1,3 vegades major que la carcassa que ens proporciona el fabricant.

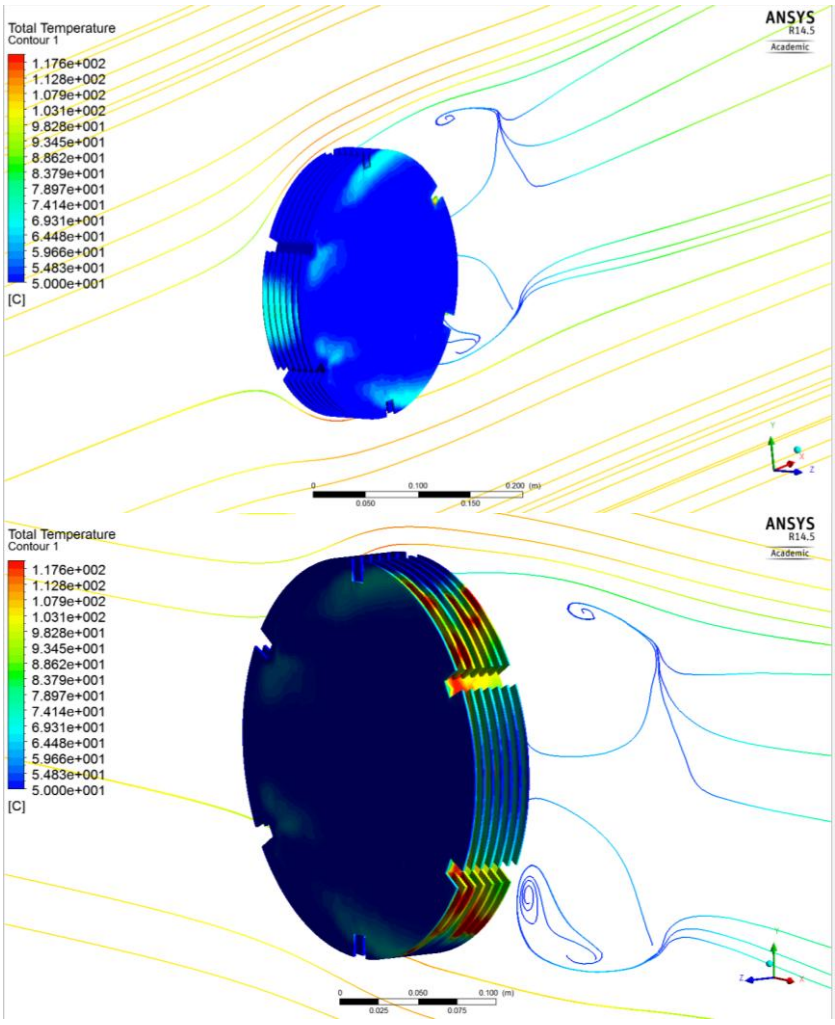


Figura 7.7: A dalt, zona davantera del motor, a baix zona posterior del motor amb aletes radials

La part per on incideix l'aire i el lateral del motor estan ben refrigerats. Però si ens fixem en la zona de darrera, hi ha dos zones on la temperatura és major de 120ºC. Per el moment és la configuració que ens ha donat millors resultats.

2. Motor amb doble aletejat: S'ha dissenyat aquesta carcassa amb doble aletejat, deixant una franja al mig sense aletejar, perquè quan l'aire impacti amb la carcassa dirigeixi l'aire cap a l'exterior de la carcassa. La superfície de la

carcassa que està en contacte amb l'aire gairebé és la mateixa que la carcassa que ens proporciona el fabricant.

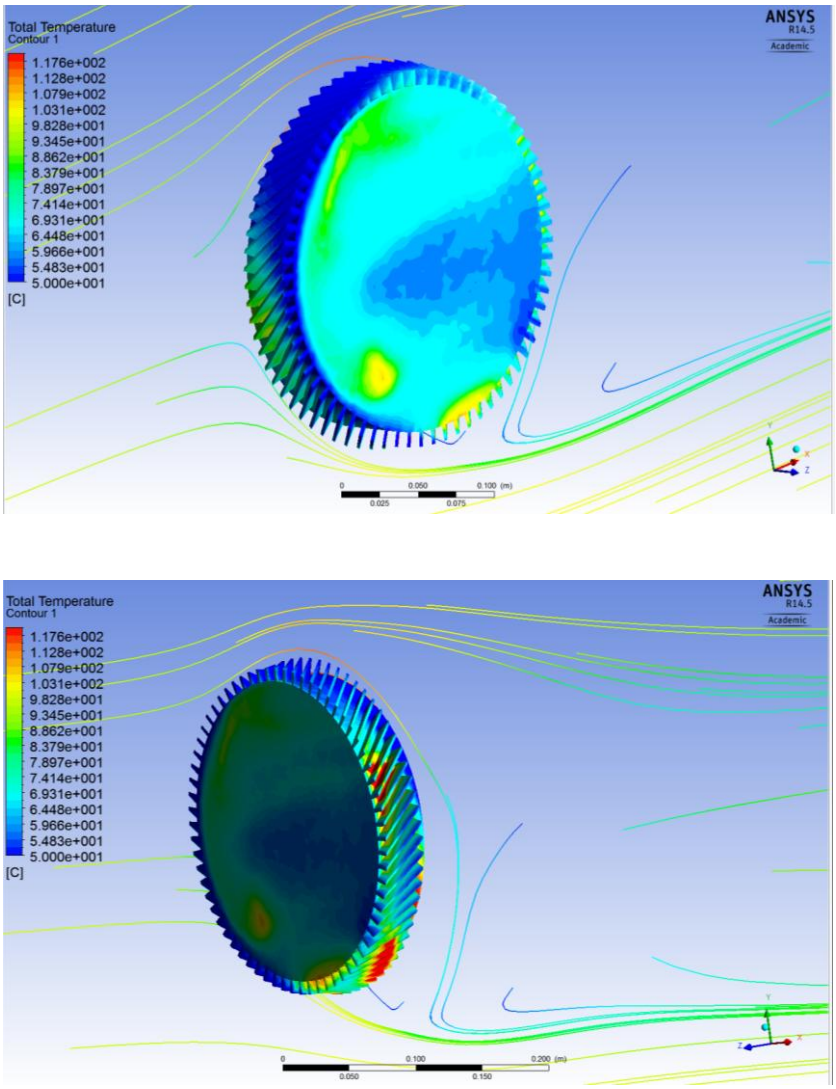


Figura 7.8: A dalt, zona davantera del motor, a baix zona posterior del motor amb doble aletejat

Es pot observar que la zona per on incideix l'aire està ben refrigerada, igual que en la resta de configuracions. Aquesta carcassa té poques zones on la temperatura superi els 120ºC.

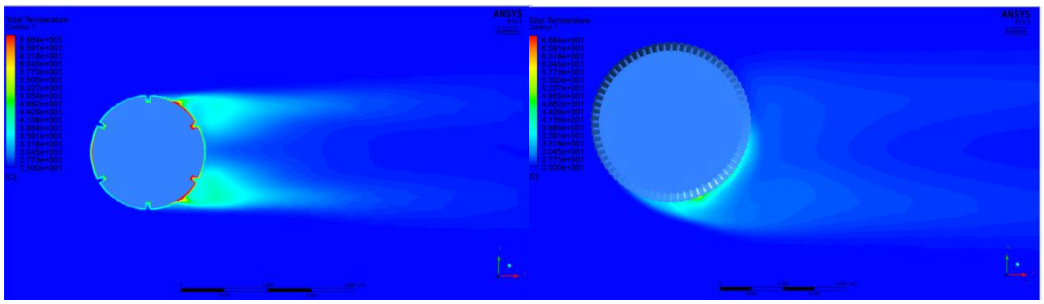


Figura 7.9: Convecció forçada del motor amb aletes radials i amb doble aletejat

7.1.5 Ajuda amb ventilació forçada

En tots els casos, els problemes de temperatura s'han donat a la part posterior del motor, és a dir, en zones on no hi ha contacte directe amb l'aire. És per això, que es provarà quin efecte tindrà un ventilador en la part posterior del motor, on el ventilador tindrà un diàmetre de 100 mm i un caudal de 100 m^3/h.

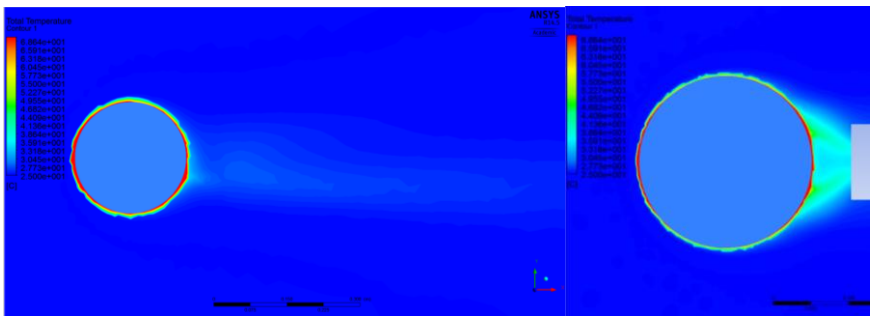


Figura 7.10: Efecte del ventilador en la convecció

Es pot observar com el ventilador està absorbint aire calent. Encara que no sigui un ventilador molt potent és capaç d'augmentar la refrigeració.

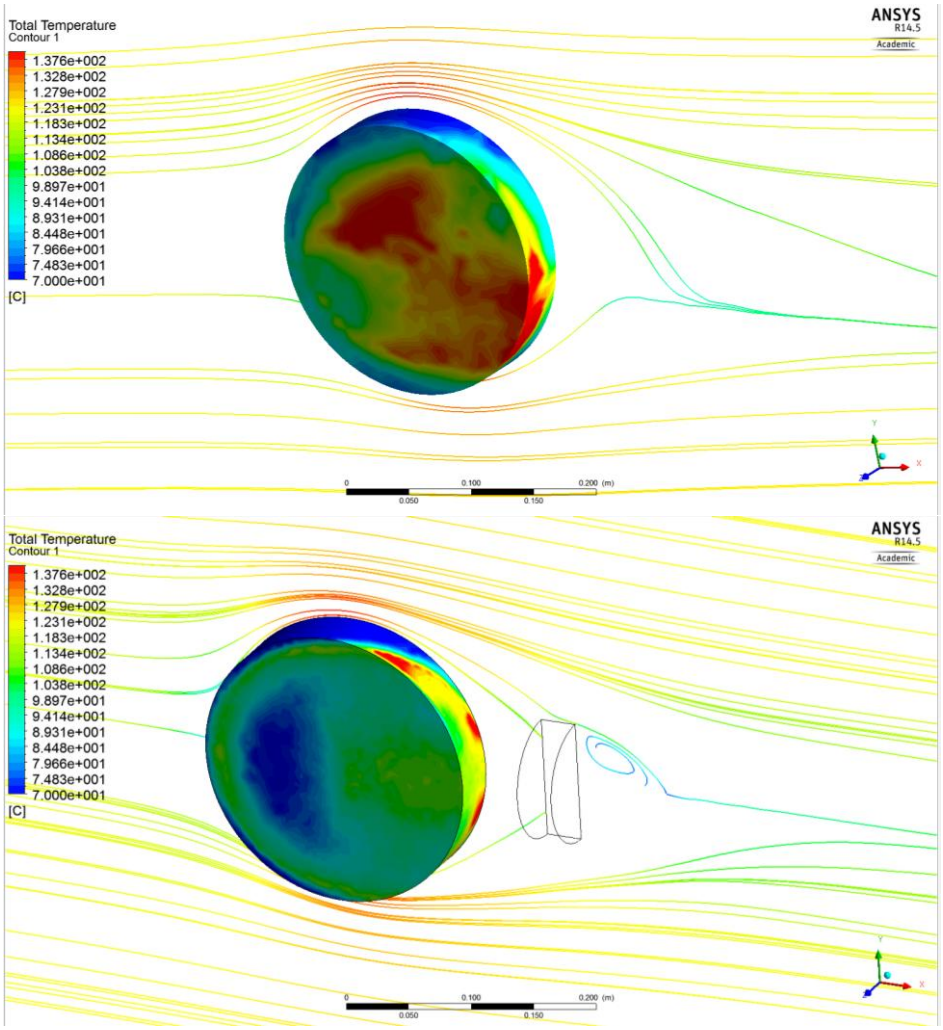


Figura 7.11: A dalt, motor sense ventilador, i a baix, motor amb ventilador

La temperatura ha baixat de forma notable. Per tant, una bona configuració d'un ventilador podria millorar molt la refrigeració del motor. Amb una sonda de temperatura es podria agafar la temperatura en un lloc concret del motor i si la temperatura superés el limit establert, s'encendria el ventilador.

7.1.6 Refrigeració de les bateries

No s'ha pogut determinar, les pèrdues calorífiques de les bateries, ja que encara es desconeix el nombre de cel·les que tindrà el conjunt que formarà les bateries. Però, aquest tipus de bateries, treballen amb un rendiment òptim a temperatures elevades, aproximadament 55ºC, degut a la major conductivitat iònica del liti.

Es per això, que a les bateries s'ha hagut de suposar un valor d'emissió de flux de calor (200 W/m^2), per tal de poder comparar l'efecte que tenen les entrades d'aire. Les bateries van situades dins d'una caixa, en els dos laterals del vehicle.

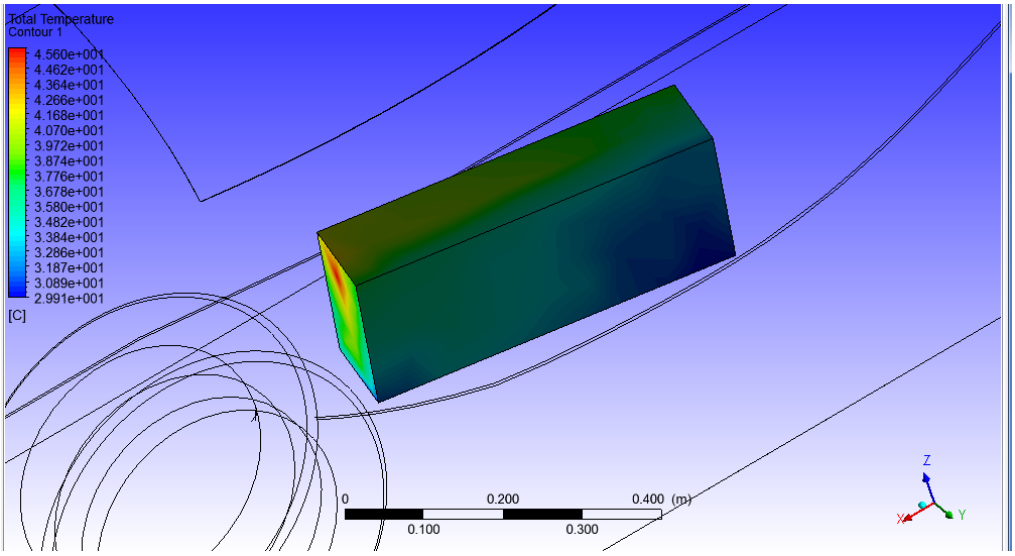


Figura 7.12: Temperatures de les bateries sense entrades d'aire

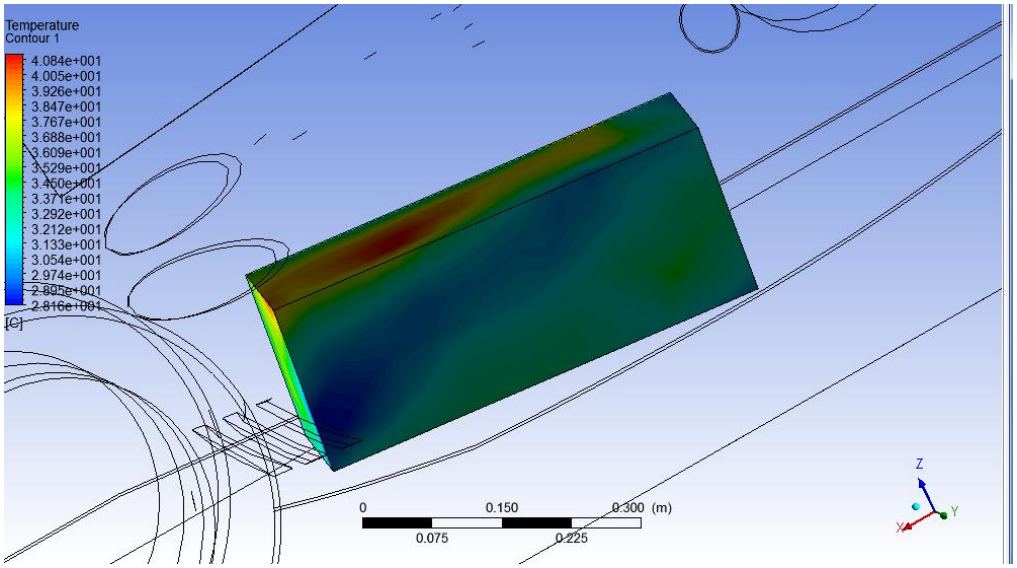


Figura 7.13: Temperatura de les bateries amb entrades d'aire

Si es compara la temperatura màxima amb entrades d'aire o sense, es pot observar com el prototip que consta d'entrades d'aire, les bateries assoleixen una temperatura de fins 40ºC, en canvi, el que no té entrades d'aire, la temperatura màxima és 5ºC superior. Per tant, aquestes petites entrades d'aire amb forma de brànquies han tingut efecte en al refrigeració de les bateries.

7.2 Anàlisi aerodinàmic

7.2.1 Estudi del coeficient de resistència

Un coeficient molt utilitzat per conèixer la resistència que oposa l'aire en el pas del vehicle és el coeficient de resistència. Com més baix és el coeficient, més fàcil és l'avanç del vehicle enfront de l'aire.

Entrades d'aire	Força (N)	CD
Sí	79,21	0,57
No	76,32	0,55

Taula 7.1: Coeficient de resistència a 80 km/h en funció de les entrades d'aire

Es pot observar que les entrades d'aire gairebé no afecten al coeficient de resistència. El coeficient de resistència és més elevat a la configuració amb entrades d'aire, degut a que quan es canalitza l'aire per les entrades d'aire, fa que augmenti la pressió i per tant la força en aquesta direcció.

Amb aquest gràfic es pot observar com varia el coeficient de resistència a diferents velocitats, en tots els casos, el prototip consta d'entrades d'aire.

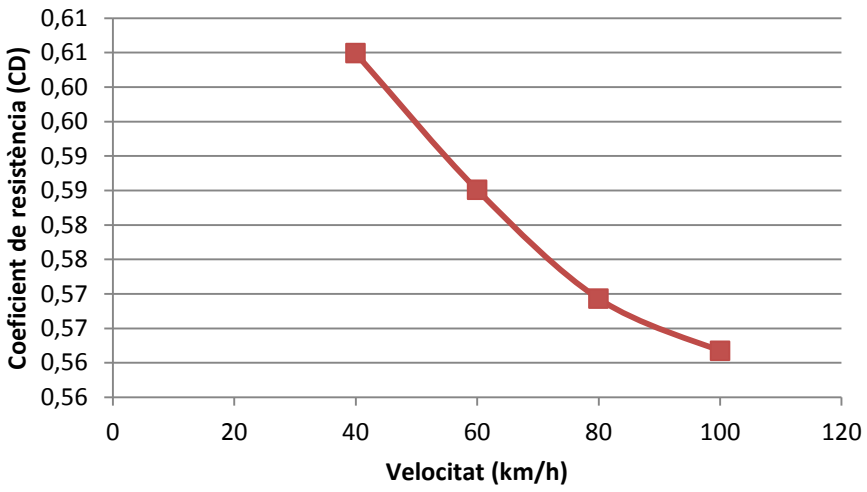


Figura 7.14: Coeficient de resistència segons la velocitat

Es pot veure que com més alta és la velocitat del vehicle, menor és el coeficient de resistència, encara que és poc significatiu. Per tant, a les velocitats que són pròpies d'un Formula Student, gairebé no ens varia el coeficient de resistència.

7.2.2 Estudi de les diferents variables a 60 km/h

Estudiarem les velocitats i pressions a la velocitat de 60 km/h. A la següent imatge es pot veure el perfil de velocitats en forma de vectors per el pla de la simetria. Observem que les zones més properes al vehicle, les velocitats són més pròximes a zero i a mesura que ens anem allunyant del vehicle, les velocitats van augmentant. Això és degut a l'efecte de la capa límit.

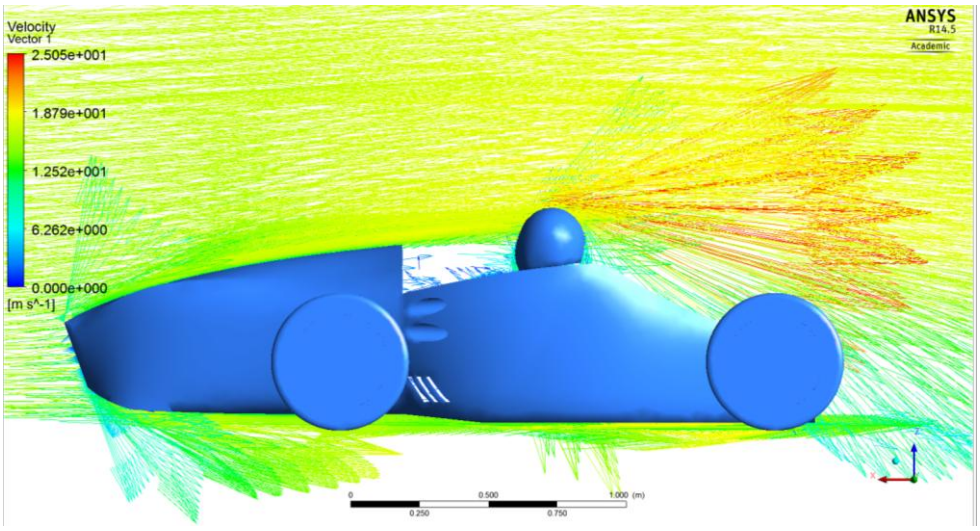


Figura 7.15: Vector de velocitats

Si ara ens fixem en un pla de velocitats, situat en el lloc de la simetria, si observem les velocitats al llarg del túnel del vent, es veu com incideix l'aire amb el vehicle. Per radera del vehicle es pot observar l'estela, on hi ha velocitats de l'aire més baixes.

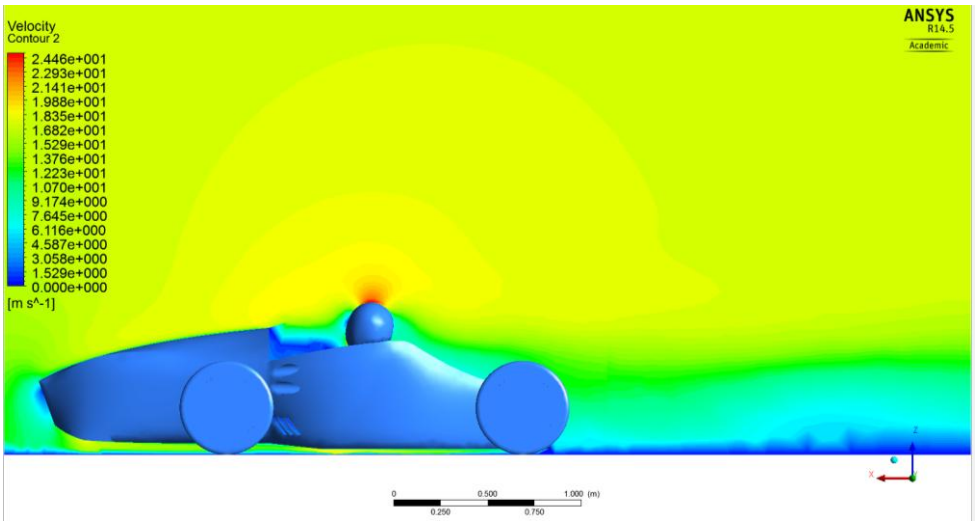


Figura 7.16: Velocitats de l'aire, on es pot visualitzar l'estela del vehicle

S'observa que les velocitats més altes es troben a la zona de sobre el casc del conductor, això esta creant una sustentació positiva, ja que aquesta és una zona de pressions negatives. Això és degut a que una partícula que circula per la zona superior del vehicle, ha de circular a més velocitat ja que té més espai per recòrrer.

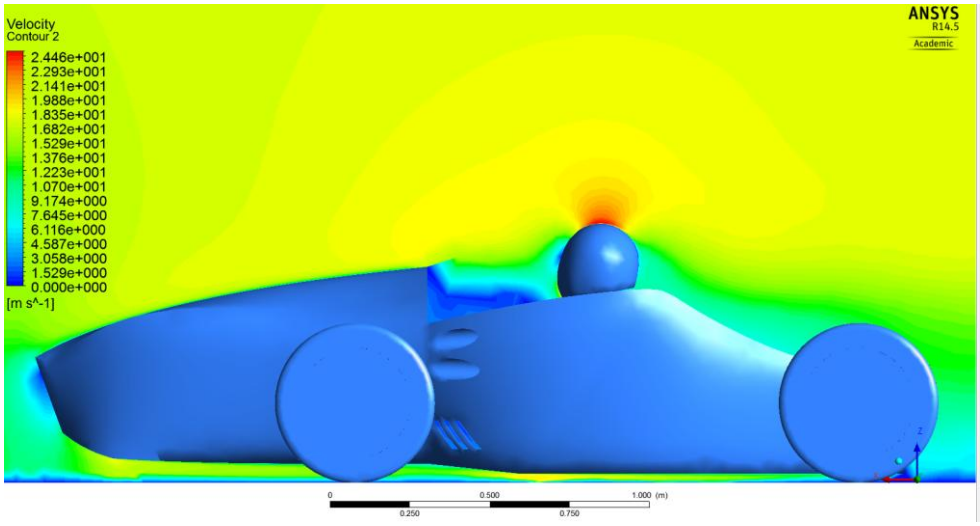


Figura 7.17: Velocitats de l'aire en la zona pròxima del vehicle

Si ara ens fixem amb les pressions, la zona de pressions més elevades, és la zona on incideix l'aire amb el vehicle, on tenim pressions de fins 168 Pa. En termes de sustentació tal com s'ha esmentat abans a la zona de sobre el vehicle hi a algun lloc on hi ha pressions negatives que ens genera una sustentació positiva, en canvi, a la zona de sota el vehicle, també hi ha zones de pressió negativa, on aquesta ens generarà una sustentació negativa, per tant, millorarà l'adherència del vehicle. A la zona del fons pla hi ha pressions relatives de fins -265 Pa.

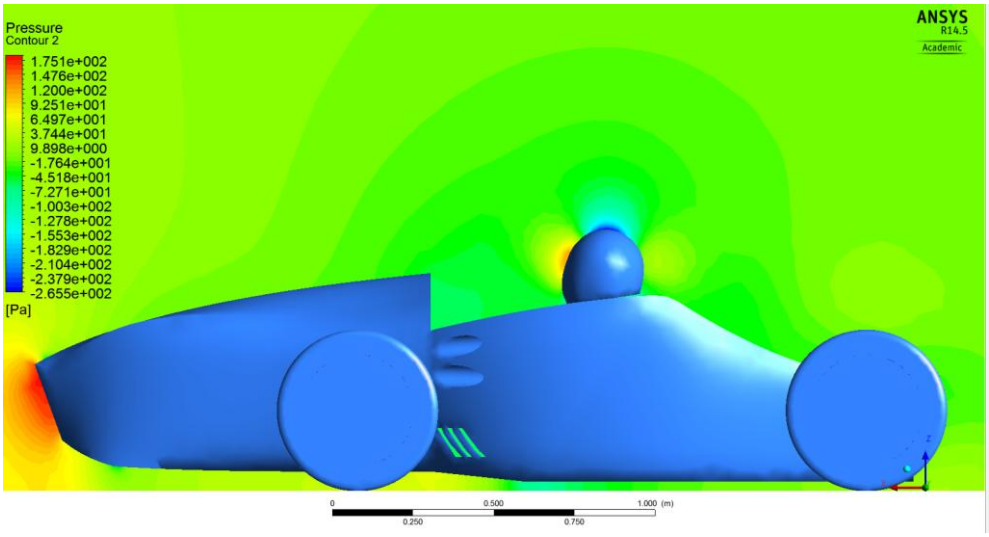


Figura 7.18: Pressions pròximes al vehicle

Si ara ens fixem en una gràfica de pressions sobre tot el vehicle, es pot veure que les zones amb més pressions són el frontal, tal com ja haviem vist anteriorment amb el pla bidimensional i la zona d'incidència de les rodes i el casc.

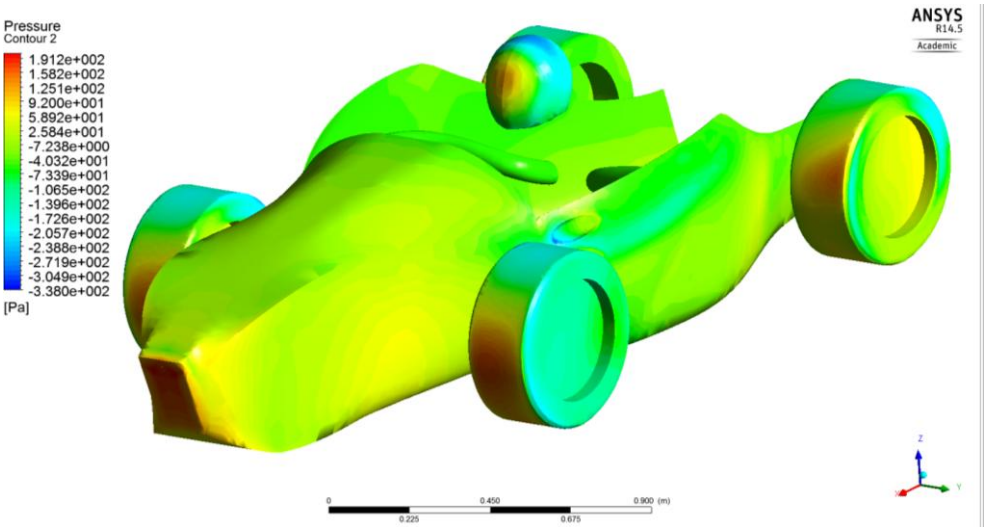


Figura 7.19: Gràfica de pressions del vehicle

8 CONCLUSIONS

Primer de tot, cal esmentar que els resultats extrets de les simulacions amb CFD són molt útils, però aquest és un càlcul aproximatiu que es realitza a través d'iteracions i d'un nombre d'elements finits. Abans d'obtenir el model definitiu no ens podem estalviar les etapes de provar el model en un túnel del vent real i llavors en un circuit. On segurament, el prototip no funcionarà bé en la següent etapa i caldrà recular a l'etapa anterior.

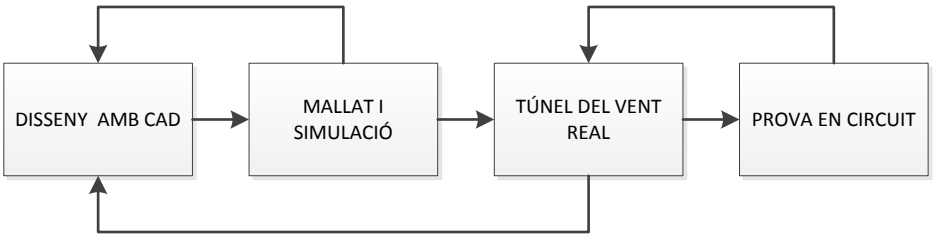


Figura 8.1: Esquema per al disseny de la refrigeració d'un vehicle

En totes les simulacions s'ha fet una idealització del motor, basada en que la emissió de calor era constant al llarg de tota la carcassa del motor. On, en la realitat, hi ha zones on el flux de calor és major o menor, ja sigui per proximitat d'elements com el bobinat de l'estator.

S'ha arribat a la conclusió que la modificació de la carcassa del motor podria ser una bona opció en termes de refrigeració, degut a la direcció de la circulació de l'aire a través de les entrades d'aire i la posició del motor. Les dues modificacions, la carcassa amb doble aletejat i la carcassa amb aletejat radial, han donat bons resultats, en comparació de la carcassa que ens proporciona el fabricant.

En totes les configuracions de la carcassa del motor, la zona de darrera del motor, està a una temperatura força elevada, degut a la mala circulació de l'aire. Però, s'ha pogut observar que amb l'ajuda d'un ventilador que extreu l'aire de darrera el motor cap a fora, les temperatures en aquesta zona han disminuït.

No s'observen grans canvis en el coeficient aerodinàmic de resistència. El prototip amb entrades d'aire té un coeficient de resistència lleugerament més gran que el

prototip sense entrades d'aire. També es pot concloure, que a més velocitat, el coeficient de resistència disminueix. El coeficient de resistència del vehicle és bastant elevat, l'encarregat d'aerodinàmica de l'equip UdG Racing Team, hauria de revisar la geometria del prototip per tal d'obtenir un millor coeficient de resistència.

Una vegada, s'hagin determinat la majoria d'elements del vehicle, seria interessant revisar el present projecte, per tal de corregir les diferents modificacions, i determinar exactament les posicions de cada element. Ja que aquest estudi s'ha avançat a algunes etapes posteriors.

En el present projecte, s'han deixat obertes moltes línies de millora. S'ha pogut observar que la ventilació forçada seria interessant per tal d'evacuar millor la calor, és per això que seria interessant, estudiar els diferents ventiladors amb els seus caudals respectius i posicions, per tal d'optimitzar la refrigeració.

La incorporació d'un possible difusor al final de les tuberes de les entrades d'aire, seria interessant, degut a que l'aire es distribueix a través de la carcassa de manera molt heterogènia, deixant així, zones amb temperatures molt elevades.

9 BIBLIOGRAFIA

Llibres

Barnard R. H.. Road Vehicle Aerodynamic Design. Mechaero Publishing. 2001

McBeath S.. Aerodinámica del automóvil de competición. Ediciones Cead. 2005

Articles

Franck G.. Simulacion numerica del flujo alrededor del modelo de ahmed para un angulo de inclinacion critico. Mecánica Computacional: Vol. XXIII. Novembre 2004.

Lanfrit M.. Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT. Fluent Deutschland GmbH. Febrer 2005.

Khondge A.. Scaling New Heights in Aerodynamics Optimization: The 50:50:50 Method. 2012.

Sae International. 2014 Formula SAE Rules. 2013

Adreces web

http://www.enstroj.si/Electric-products/emrax-228-motorsgen.html, web del motor escollit. Febrer 2014.

http://www.etseib-motorsport.upc.edu/, web de l'equip de Formula Student de la UPC. Febrer 2014.

http://www.manualvuelo.com/PBV/PBV18.html, web amb informació sobre aerodinàmica. Abril 2014.

http://es.wikipedia.org/wiki/T%C3%BAnel_de_viento, web amb informació sobre el túnel del vent. Abril 2014.

http://formulaupv.com/index.php/formula-student-es, web de l'equip de Formula Student de la UPV. Febrer 2014.

http://ca.wikipedia.org/wiki/Convecci%C3%B3, web amb informació sobre la convecció. Abril 2014.

http://www.sapiensman.com/electrotecnia/motor_electrico2.htm, web amb informació relacionada amb motors elèctrics. Març 2014.

http://events.imeche.org/formula-student/, web oficial de la Formula Student. Febrer 2014.

http://www.fisica.uh.cu/bibvirtual/fisica_aplicada/fisicaIII/tekct/radi.htm, web amb informació sobre la radiació. Abril 2014.

http://www.vecco.es/index.php/todo-sobre-vecco/baterias-lifepo4, web amb informació sobre les bateries de ions de liti. Maig 2014.

A. CARACTERÍSTIQUES DEL MOTOR

Les simulacions s'han realitzat seguint les característiques d'un motor Enstroj Emrax 228 HV, el qual esta refrigerat per aire.

Figura A.1: Motor Enstroj Emrax 228 HV

Technical data / Type	EMRAX 228 High Voltage		EMRAX 228 Medium Voltage		EMRAX 228 Low Voltage	
Cooling (AC – Air Cooled; LC – Liquid Cooled)	LC	AC	LC	AC	LC	AC
Cooling medium spec.	water flow speed 0,2 l/s; 20 °C	air flow speed 25 m/s; 20 °C	water flow speed 0,2 l/s; 20 °C	air flow speed 25 m/s; 20 °C	water flow speed 0,2 l/s; 20 °C	air flow speed 25 m/s; 20 °C
Weight [kg]	12,3	12,0	12,3	12,0	12,3	12,0
Diameter ø / width [mm]	228 / 86					
Battery voltage range [Vdc]	50 – 400 (*600)		50 – 350 (*450)		24 – 100 (*140)	
Peak motor power (few min at cold start / few seconds at hot start) [kW]	100					
Continuous motor power (depends on the motor RPM) [kW]	30 - 50	25 - 40	30 - 50	25 - 40	30 - 50	25 – 40
Maximal rotation speed [RPM]	4000 (*5000) (**6000)					
Maximal motor current (for 2 min if cooled as described in Manual for EMRAX) [Arms]	240		320		900	
Continuous motor current [Arms]	115		160		450	
Maximal motor torque (for a few seconds) [Nm]	240					
Continuous motor torque [Nm]	125					
Torque / motor current [Nm/1Aph rms]	1,1		0,75		0,27	
Maximal temperature of the copper windings in the stator and also max. temp. of the magnets [°C]	120					
Nominal motor efficiency [%]	93 - 96					
Internal phase resistance at 25 °C [mΩ]	18		8,0		1,12	
Input phase wire cross-section [mm²]	10,2		15,2		38	
Induction in d/q axis [µH]	Ld=175 Lq=180		Ld=75 Lq=80		Ld=10,6 Lq=11,2	
Controller / motor signal	sine wave					
Specific idle speed (no load RPM) [RPM/1Vdc]	9,8		14		40	
Specific load speed (depends on the controller settings) [RPM/1Vdc]	8 – 9,8		11 – 14		34 – 40	
Magnetic field weakening (for higher RPM at low torque) [%]	up to 20					
Magnetic flux – axial [Vs]	0,0542		0,0355		0,0131	
Temperature sensor in the motor	kty 81/210					
Number of pole pairs	10					
Rotor inertia (mass dia=175mm, m=5,5kg) [kg*cm²]	421					
Bearings SKF _ FAG	R/R 6206/6206 or R/AR 6206/7206 or AR/AR 7206/7206 (»O« orientation)					
Ingress protection	IP21 / IP54***	IP21	IP21 / IP54***	IP21	IP21 / IP54***	IP21

*Tested in Enstroj for a few minutes.
**Tested in Enstroj for a few seconds.
*** We can also make IP54, but load time is shorter and continuous power is approximately 20 to 30% lower compared to IP21. Peak power is the same.

Figura A.2: Fitxa tècnica del motor

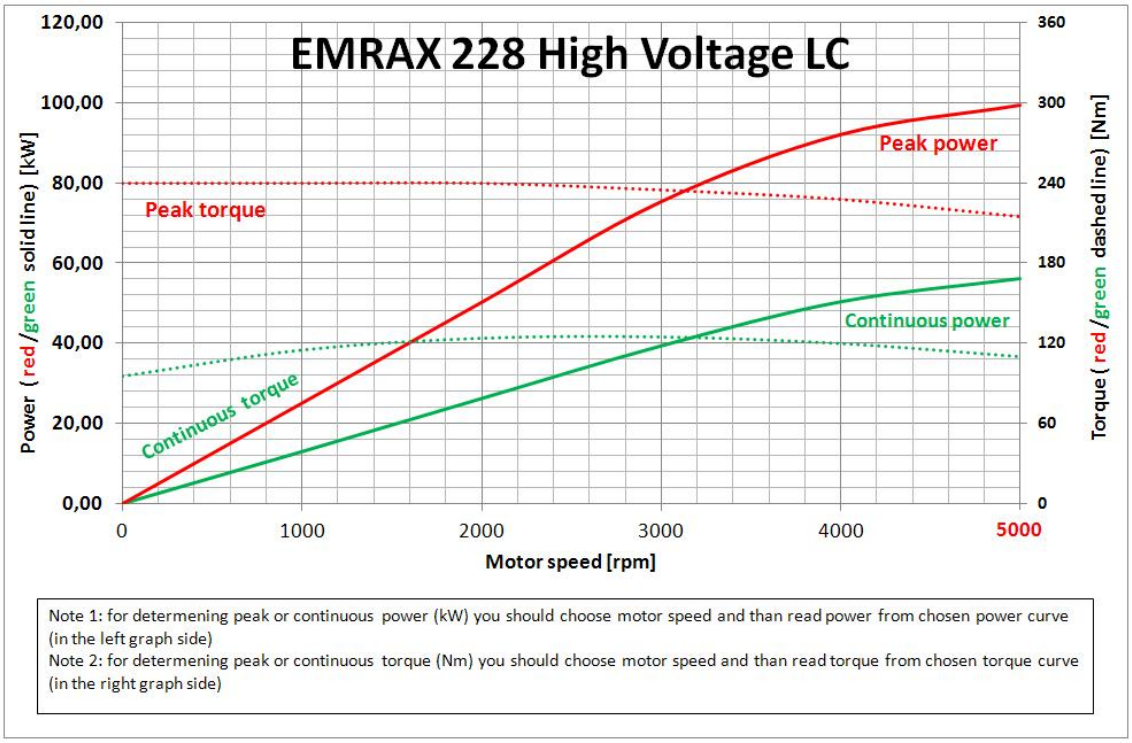


Figura A.3: Gràfic potència - velocitat del motor

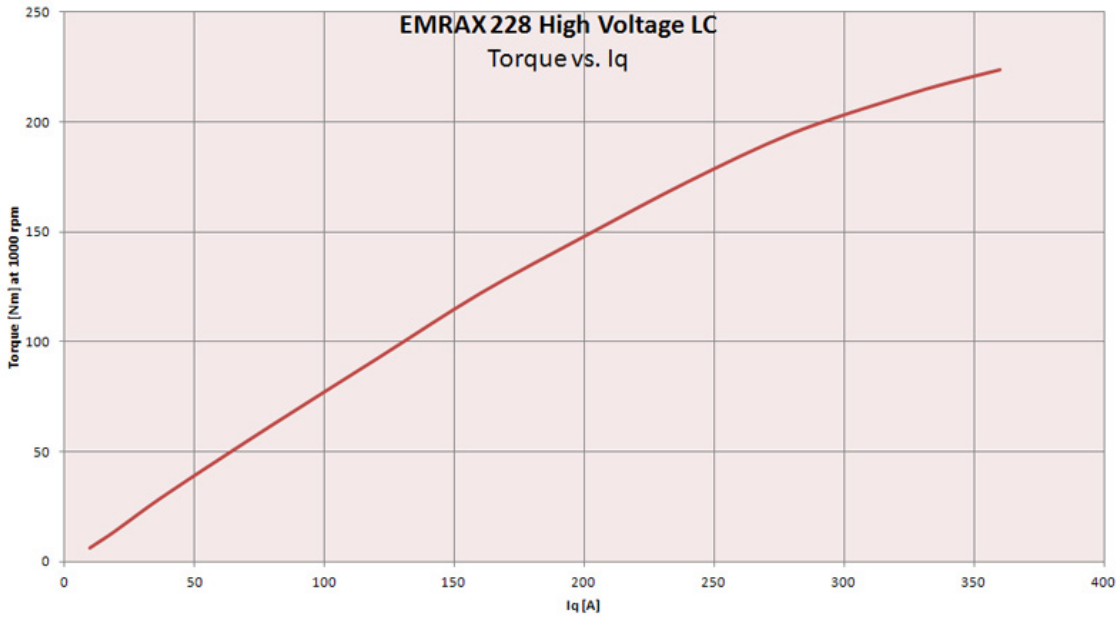


Figura A.4: Gràfic parell - intensitat del motor

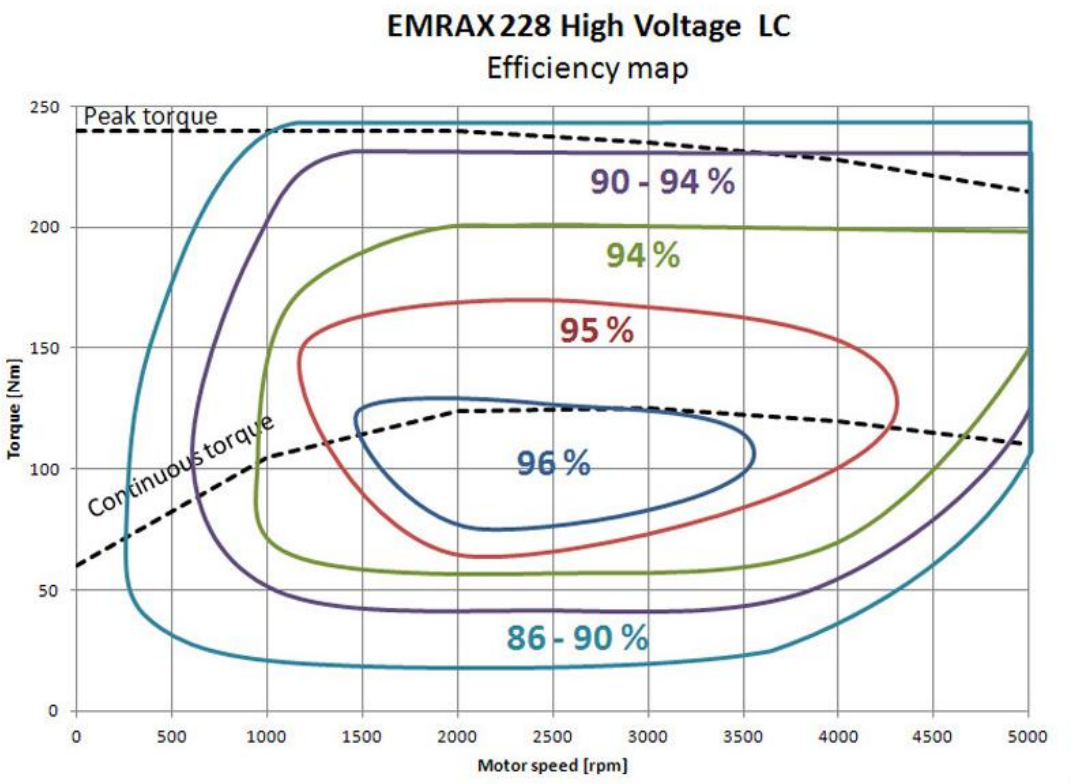


Figura A.5: Gràfica del rendiment del motor

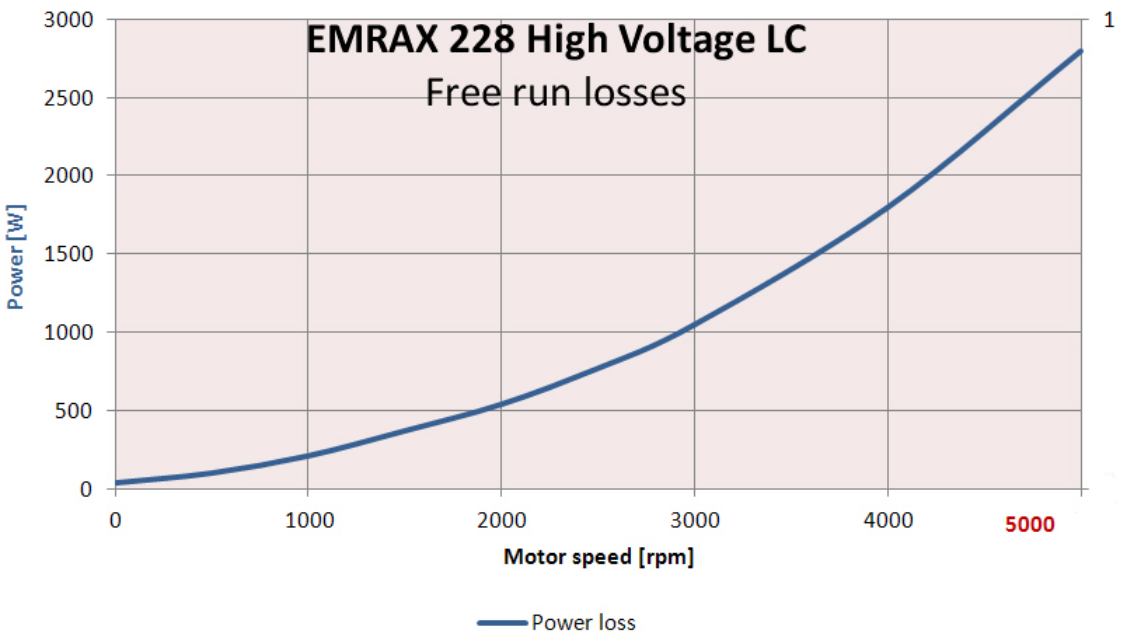


Figura A.6: Gràfica de les pèrdues del motor

B. CÀLCULS

B.1. Càlcul flux de calor del motor

No disposem de les mides de les aletes de refrigeració per poder determinar la seva àrea, però disposem d'imatges del motor amb aletes, per tant, aproximarem les mides de les aletes per tal que s'acostin el màxim a la realitat.

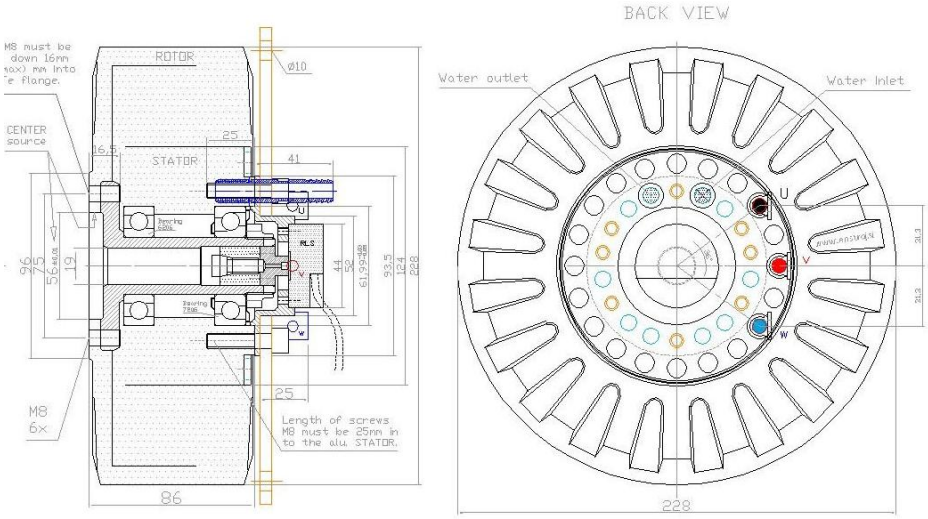


Figura B.1: Plànols de motor

Per tant, el motor refrigerat per aigua té un diàmetre de 228 mm i una amplada de 86mm. Si el motor refrigerat per aire tingués la mateixa carcassa exterior la seva dissipació de calor seria molt deficient.

A partir de l'annex característiques del motor, obtindrem les pèrdues del motor. Per això abans haurem de fer unes suposicions. Entenem que la prova que requerirà més refrigeració és la prova de resistència i eficiència, en aquesta prova no es necessitaran pics de potència molt elevats, per tant tindrà un comportament bastant estacionari. Com que el present projecte s'avança als estudis mecànics i elèctrics del vehicle, no coneixem el règim de gir del motor. Per tant, considerarem un règim de gir on el rendiment és màxim. Totes les simulacions es realitzaran tenint en compte que el règim de gir del motor és de 2000 rpm. Ara, si anem al gràfic de pèrdues, hi entrem amb aquesta velocitat angular obtenim que les pèrdues són aproximadament 500 Watts. Entenem que gairebé totes les pèrdues és transformen en pèrdues calorífiques.

En el programari necessitem entrar el flux de calor que emet el motor (W/m^2), pel que necessitarem conèixer l'àrea de cada una de les configuracions del motor. La potència que emetrà serà independent de la geometria de la carcassa del motor, aquesta serà sempre de 500 Watts.

- Configuració 1

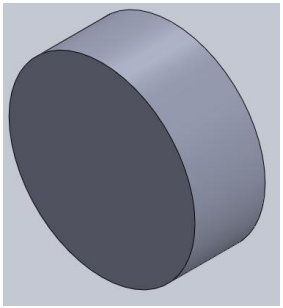


Figura B.2: Motor sense aletes

Àrea = 0,14 m^2

Flux de calor = 3571 W/m^2

- Configuració 2

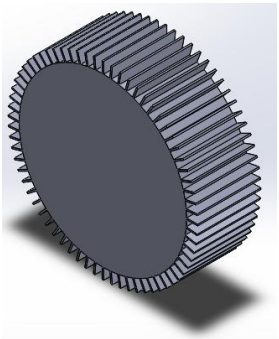


Figura B.3: Motor amb aletes

Àrea = 0,32 m^2

Flux de calor = 1562 W/m^2

- Configuració 3

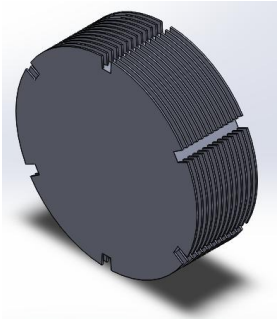


Figura B.4: Motor amb aletes radials

Àrea = 0,41 m^2

Flux de calor = 1195 W/m^2

- Configuració 4

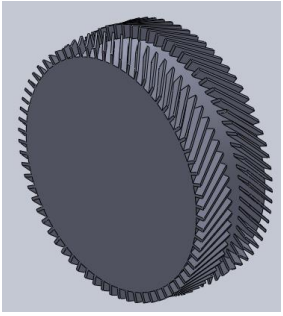


Figura B.5: Motor amb doble aletejat inclinat

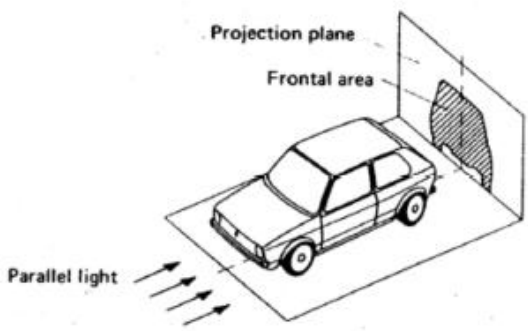
Àrea = 0,29 m^2

Flux de calor = 1705 W/m^2

B.2. Càlcul de l'àrea frontal

Per tal de fer el càlcul de l'àrea frontal, es poden utilitzar diverses eines o vies per tal de trobar-la. La utilitzada per el present projecte ha sigut una extrusió de la secció perpendicular del cotxe i el posterior càlcul de superfície.

L'àrea resultant de la projecció és de 0,45 m^2.



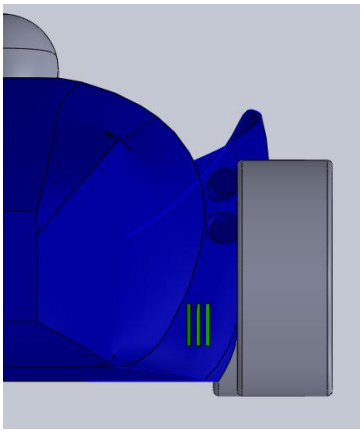


Figura B.6: Projecció frontal de l'àrea

B.3. Càlcul coeficient de resistència

Un cop realitzat l'estudi aerodinàmic, la computadora ens dona els resultats, a banda dels resultats gràfics, com per exemple, les gràfiques de pressions, velocitats o línies, també ens dona un resultat numèric de la força exercida en els diferents eixos.

Nosaltres estudiarem com ens afecta el coeficient de resistència, depenent de si tenim o no entrades d'aire, i de la velocitat. El podem determinar amb la següent equació:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \qquad (Eq.1)$$

- C_D: coeficient de sustentació
- D: força de sustentació (N)
- ρ: densitat del fluid (kg/m^3) = 1,225 kg/m^3 (densitat a 0 metros segons ISA)
- V: velocitat (m/s)
- A: àrea de referència del cos, acostuma a ser la superfície frontal projectada del vehicle (m^2) = 0,45 m^2

Velocitat (Km/h)	Força (N)	CD
40	21,04	0,60
60	45,79	0,59
80	79,21	0,57
100	122,12	0,56

Taula B.1: Càlcul coeficient de resistència en funció de la velocitat

Entrades d'aire	Velocitat (km/h)	Força (N)	CD
Sí	80,00	79,21	0,57
No	80,00	76,32	0,55

Taula B.2: Càlcul coeficient de resistència en funció de les entrades d'aire

C. CREACIÓ I SIMULACIÓ DEL MODEL

Tot model parteix del xassís que ens ha estat donat per la competició. Hi ha universitats que es creen el seu propi xassís, però en el nostre cas com que és el primer any, hem decidit escollir el xassís per defecte. Aquest ens marcarà aproximadament les mides del vehicle.

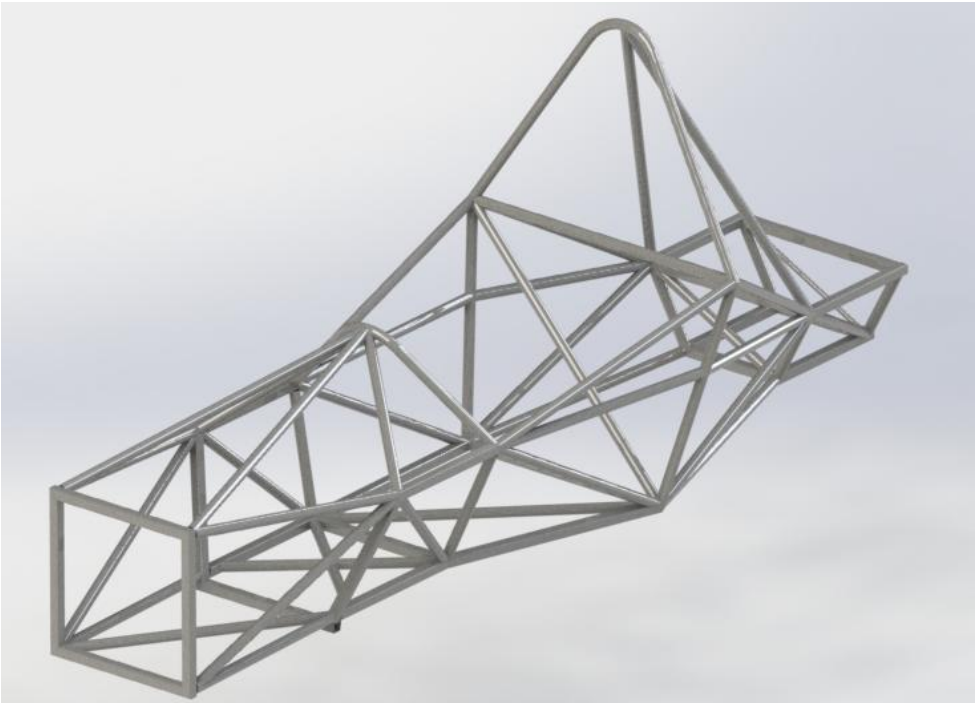


Figura C.1: Xassís del monoplaça

En la Formula Student hi ha molt poques limitacions per tal de donar la màxima llibertat als participants, per tant, hi ha molt poques limitacions que afectin la mida del vehicle.

Primer de tot creem un assemblatge en el Solidworks, seguidament hi afegim el xassís, llavors creem una peça nova en el assemblatge i podem començar a dibuixar la nostra carrosseria. A través de perfils i corbes projectades obtindrem el nostre model.

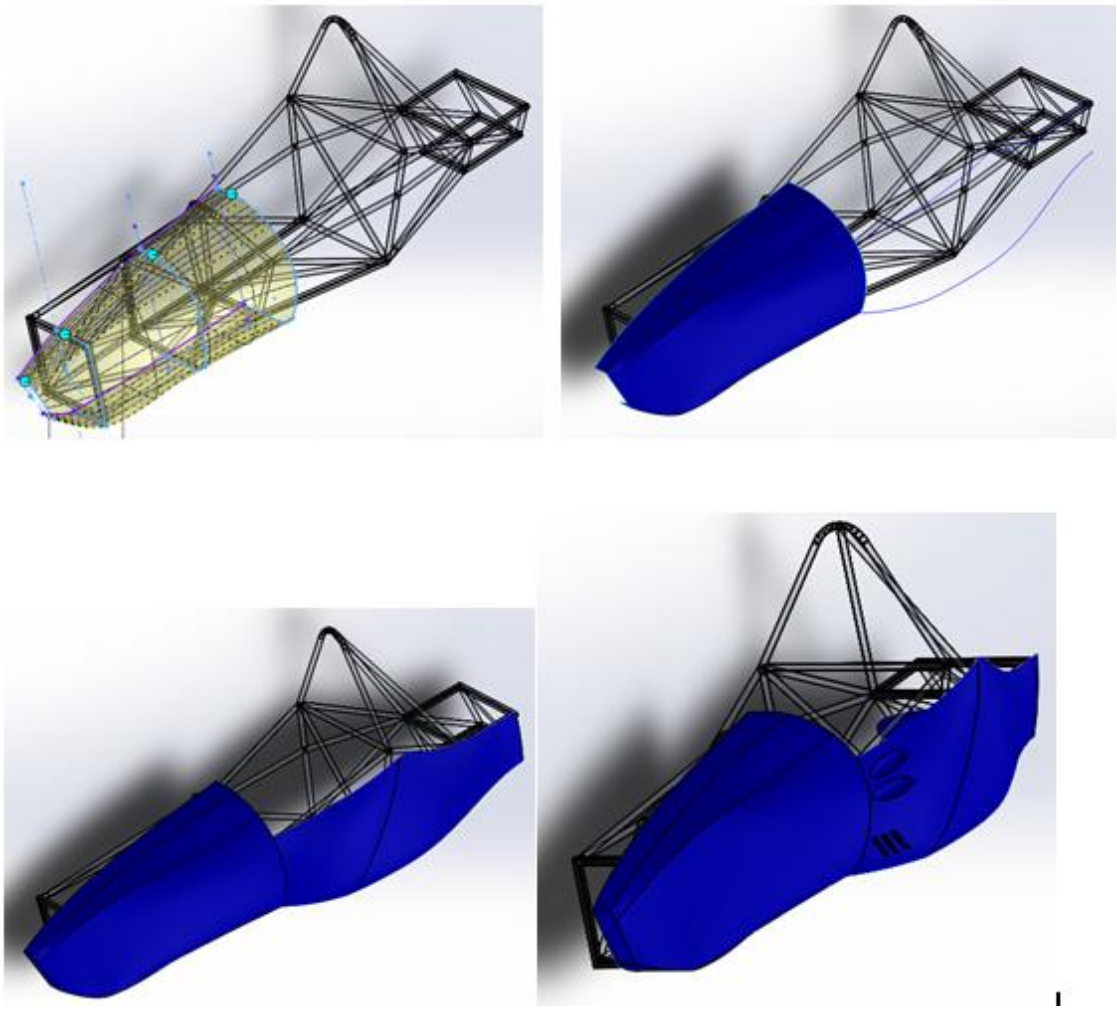


Figura C.2: Procés de construcció de la carrosseria

Una vegada ja tenim la nostra carrosseria dissenyada, hi afegim tots els elements que seran importants quan realitzem la simulació, tant elements que afectaran a l'aerodinàmica com poden ser el casc i les rodes, i els elements que haurem de refrigerar, com és el cas del motor i les bateries.

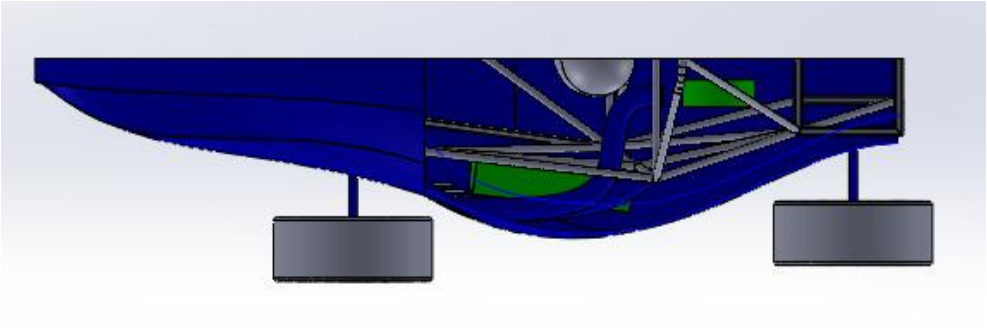


Figura C.3: Carrosseria amb rodes, casc, motor i bateries

Ara aquest prototip ja estaria llest per passar-lo al programari CFD que utilitzarem, l'Ansys Workbench, però per comoditat el túnel del vent també el dibuixarem amb el Solidworks. El túnel del vent no és més que un prisma amb les mides corresponents.

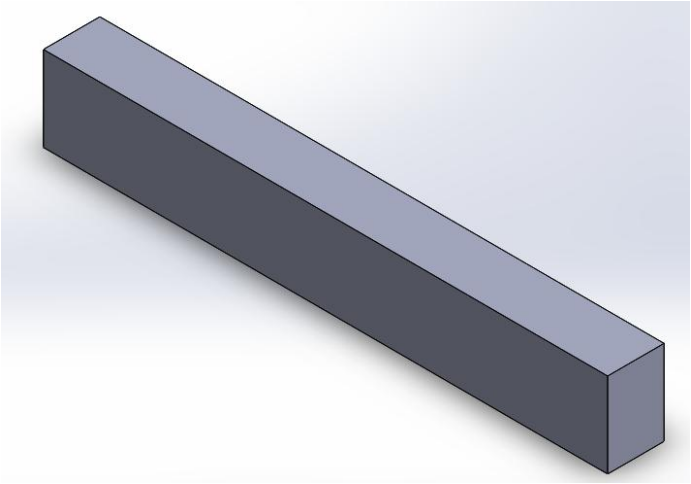


Figura C.4: Túnel del vent

Ara ja podem passar a utilitzar l'Ansys Workbench. Primer de tot col·locarem el prototip a la zona adequada del túnel del vent. Després col·locarem un altre prisma amb dimensions més reduïdes al voltant del prototip, ja que en aquesta zona ens interessarà un mallat complet. Del nostre model, en fem la sostracció d'ell, per obtenir només les zones on hi haurà aire.

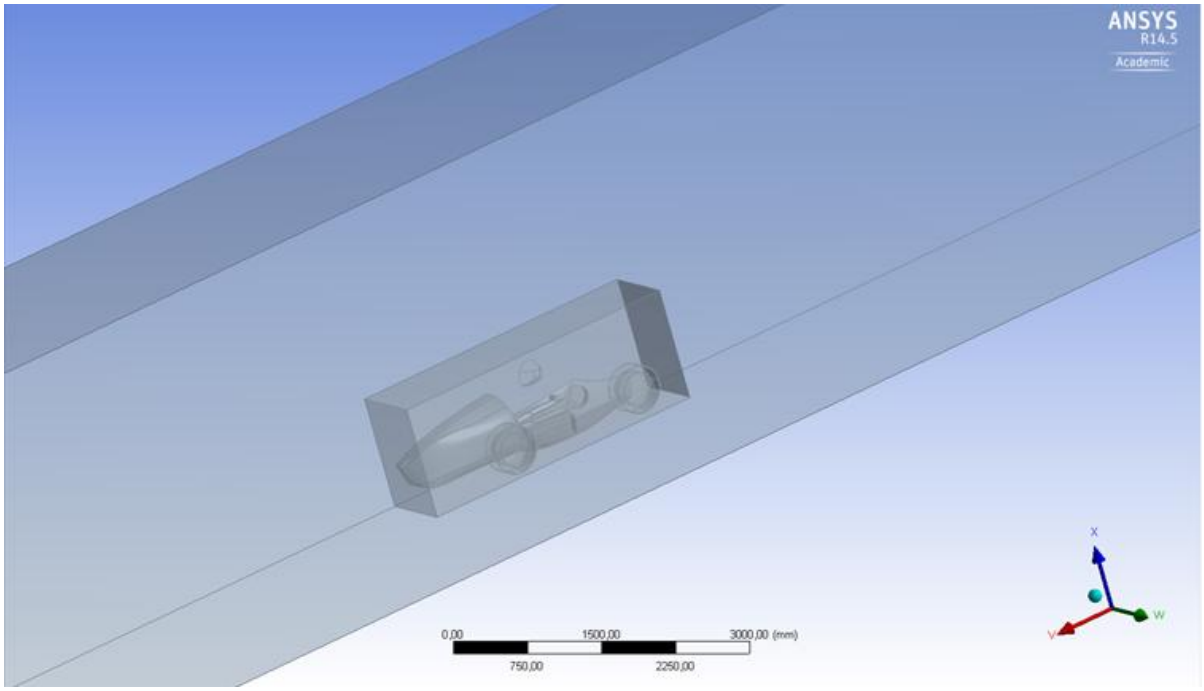


Figura C.5: Sostracció de la carrosseria en el túnel del vent

Passem a mallar, tal com hem comentat tindrem dos zones de mallat, la primera que serà la més intensiva ja que serà la zona més propera del vehicle i la segona que serà la resta, on a mesura que es vagi allunyat del prototip el mallat serà menys intensiu. Tots aquests paràmetres els podem configurar.

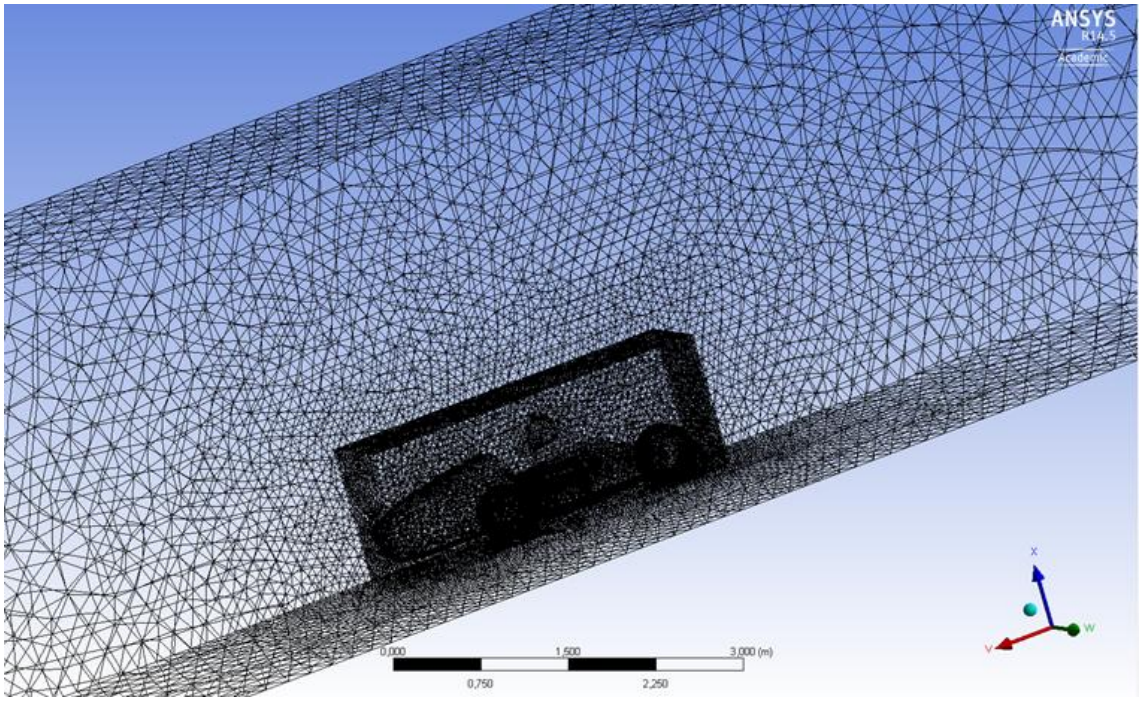


Figura C.6: Mallat del prototip

Una vegada ja hem obtingut el mallat, hem de definir les condicions de contorn, és a dir, les parets, sostre, terra, simetria, entrada i sortida.

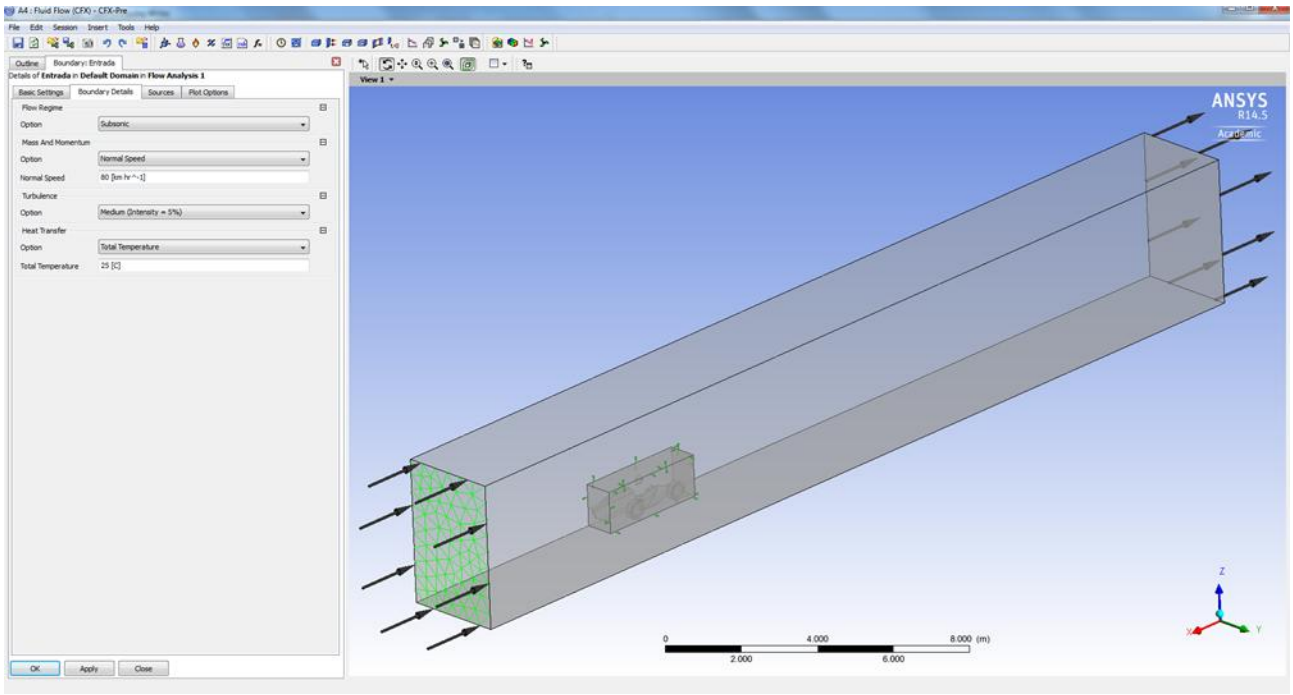


Figura C.7: Definició de l'entrada d'aire

Ja només ens queda definir els paràmetres que volem que tingui la nostra solució, és a dir l'error i el nombre d'iteracions.

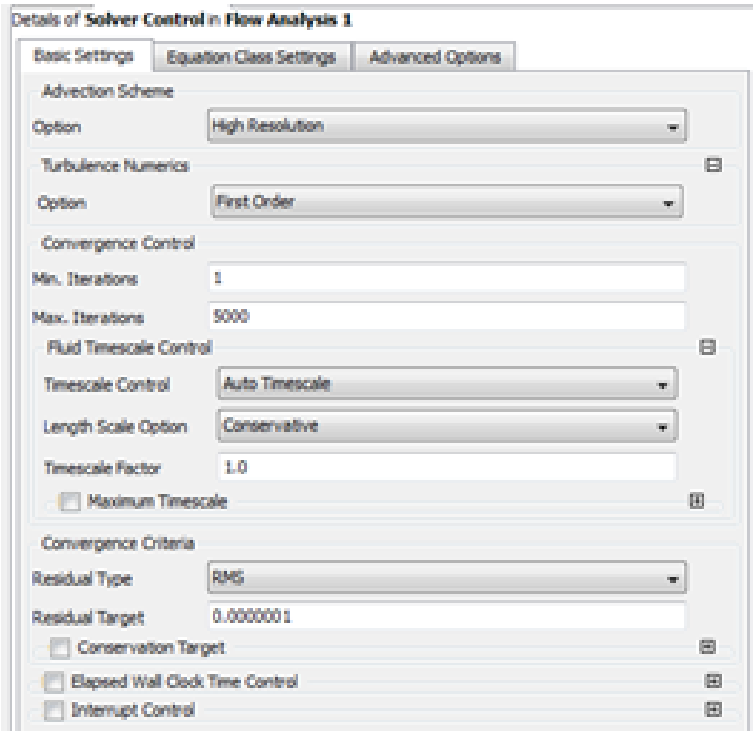


Figura C.8: Nombre d'iteracions i error

Finalment obtenim els resultats, que gràcies a interpretacions gràfiques aquests són més entenedors. Podem obtenir informacions sobre: velocitats, pressions, temperatures, forces, etc.

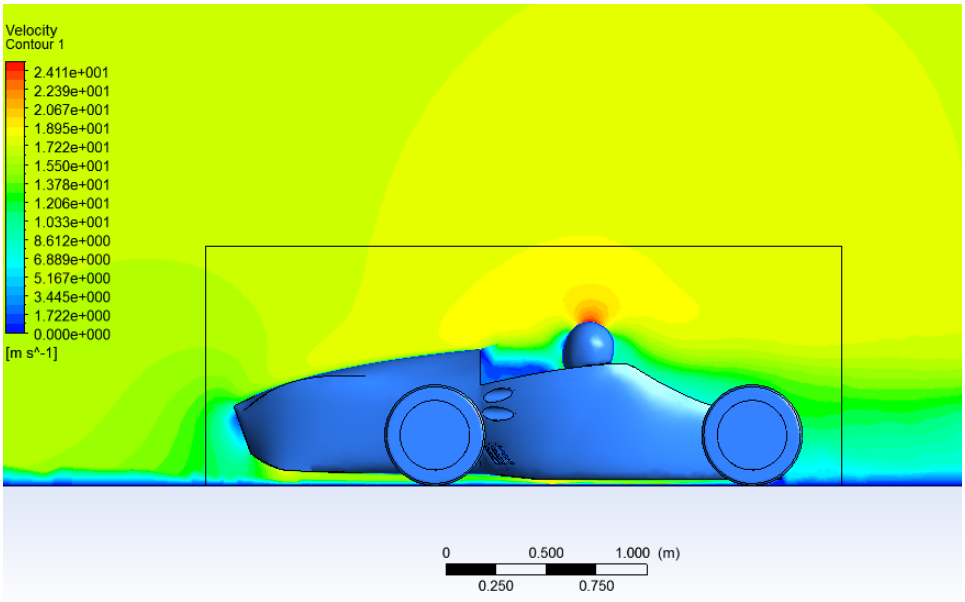


Figura C.9: Imatge sobre els resultats de velocitats

D. MALLAT DE LA GEOMETRIA

Una vegada tenim la nostra geometria creada amb un programa de CAD amb 3D, procedim a realitzar el mallat d'aquesta. El mallat és el procés més important, per obtenir uns bons resultats a l'hora de realitzar la simulació, ja que amb un mallat dolent, podríem perdre molta informació o obtenir massa informació d'una zona sense gaire importància.

El mallat es realitza a través del programa Ansys Workbench. El mateix programa, sinó li donem cap consigna, realitza un mallat per defecte.

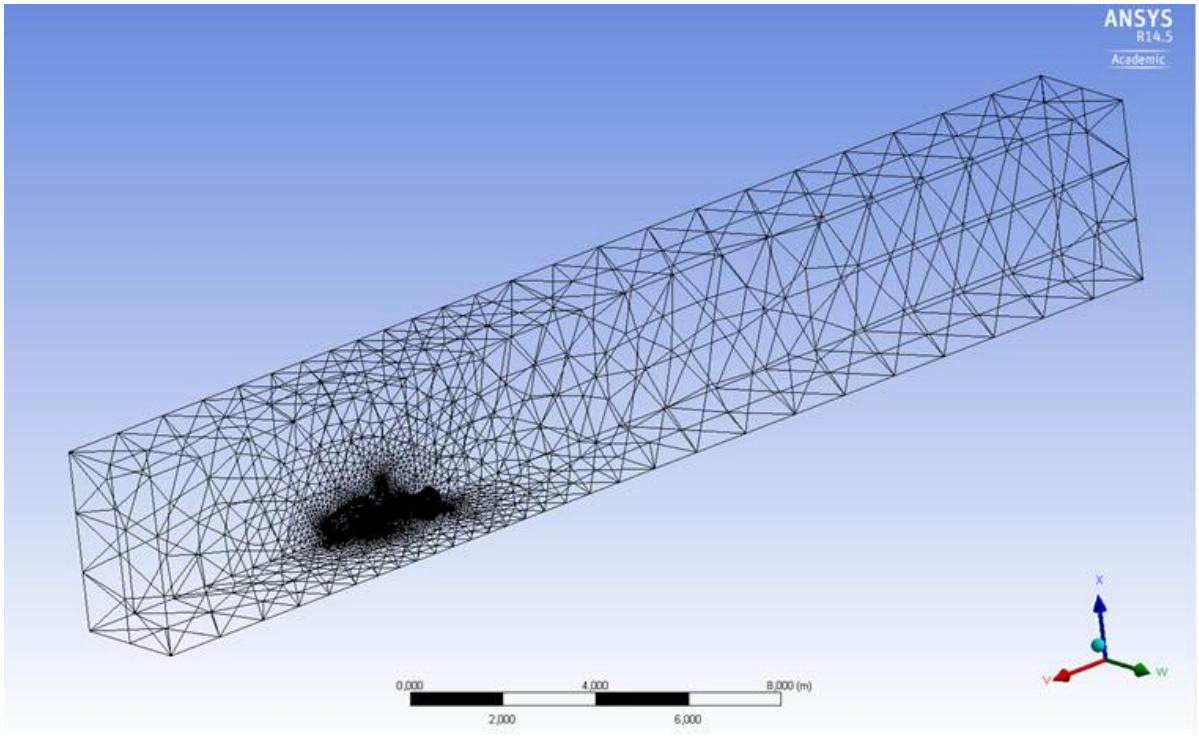


Figura D.1: Mallat per defecte

Observem que a la zona on es troba el vehicle el mallat és més intens, però tant, la zona anterior i posterior al vehicle, els volums, són massa grans, i perdríem informació.

Ara construirem una caixa al voltant del vehicle, per tal de fer un mallat més intens a la zona del vehicle.

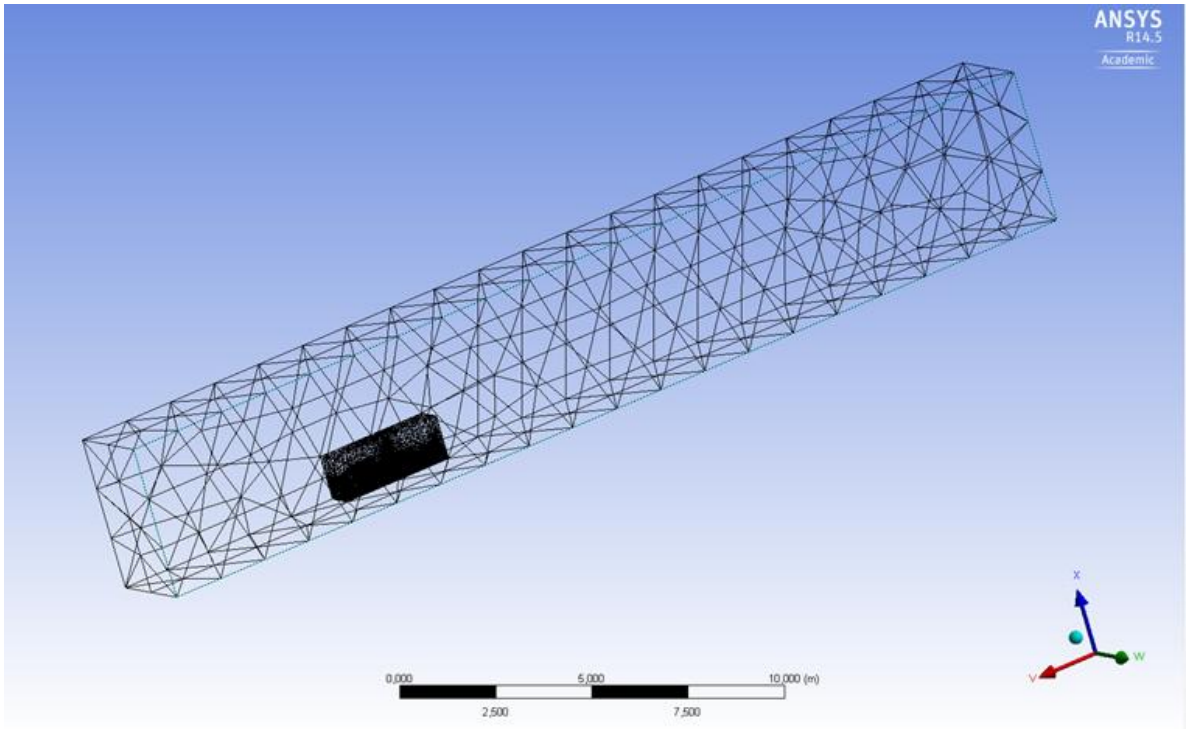


Figura D.2: Mallat per defecte amb dos zones

Ara la zona propera del vehicle té un mallat força correcte, però la zona externa d'aquesta caixa el mallat és molt gran, i a més, el canvi d'un mallat a l'altre no és progressiu. Anem a definir les mides del mallat de la caixa on es troba el prototip.

Details of "Face Sizing" - Sizing

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	103 Faces
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
Element Size	6,e-002 m
Behavior	Soft
Curvature Normal Angle	Default
Growth Rate	Default

Figura D.3: Paràmetres del mallat de la zona del vehicle

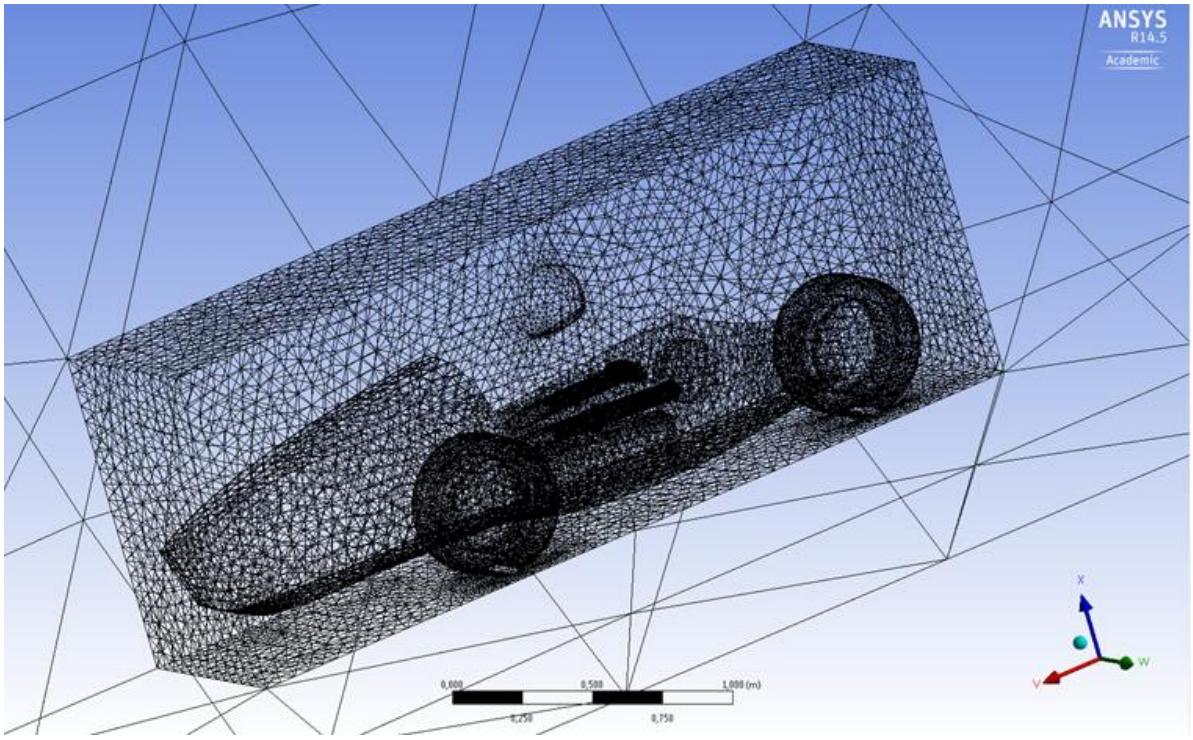


Figura D.4: Mallat amb les mides corresponents de la zona del vehicle

Ja definida la mida del mallat dins de la caixa, hem d'aconseguir un mallat més progressiu a la zona exterior d'aquesta. Per això farem que a partir de les cares que tenen en comú les dos zones, que la zona de fora la caixa comenci amb una mida igual que la zona de dins de la caixa, però que el mallat vagi augmentant a mesura que es vagi allunyant.

Details of "Face Sizing 2" - Sizing

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	4 Faces
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
Element Size	6,e-002 m
Behavior	Soft
Curvature Normal Angle	Default
Growth Rate	1,050

Figura D.5: Paràmetres del mallat de la zona exterior

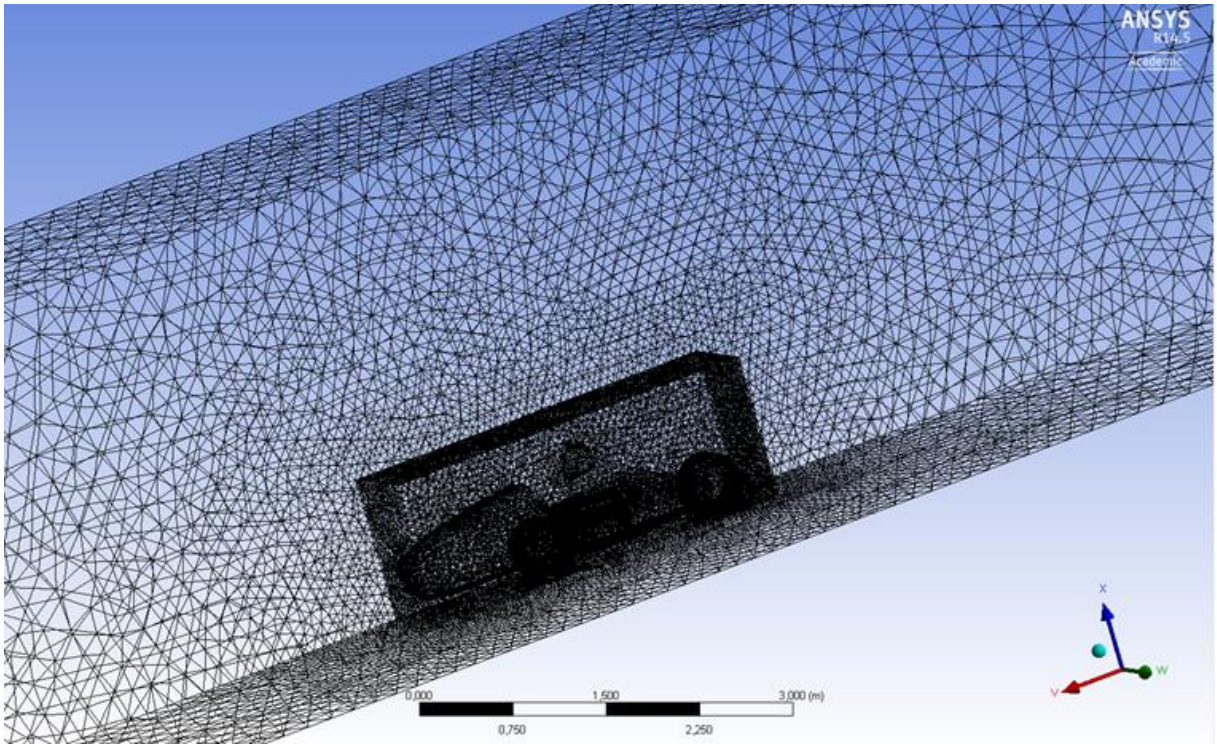


Figura D.6: Mallat progressiu amb les mides corresponents

Observem un mallat intens a la zona on es troba situada al vehicle i llavors, a mesura que ens anem allunyat del vehicle, els volums van augmentant progressivament. Aquest mallat ja ens donaria una bona informació a l'hora d'obtenir els resultats.

Però hi ha una zona que ens interessa estudiar amb deteniment, la geometria externa del vehicle. Per tant, pel voltant de tota la geometria realitzarem un mallat amb diferents capes. Aquest ens interessa per poder veure les diferents velocitats i pressions, com per exemple, les del fons pla.

Details of "Inflation" - Inflation

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Boundary Scoping Method	Named Selections
Boundary	Multiple Entities
Inflation Option	First Layer Thickness
First Layer Height	1,e-003 m
Maximum Layers	12
Growth Rate	1,2

Figura D.7: Paràmetres de les capes que envolta la carrosseria

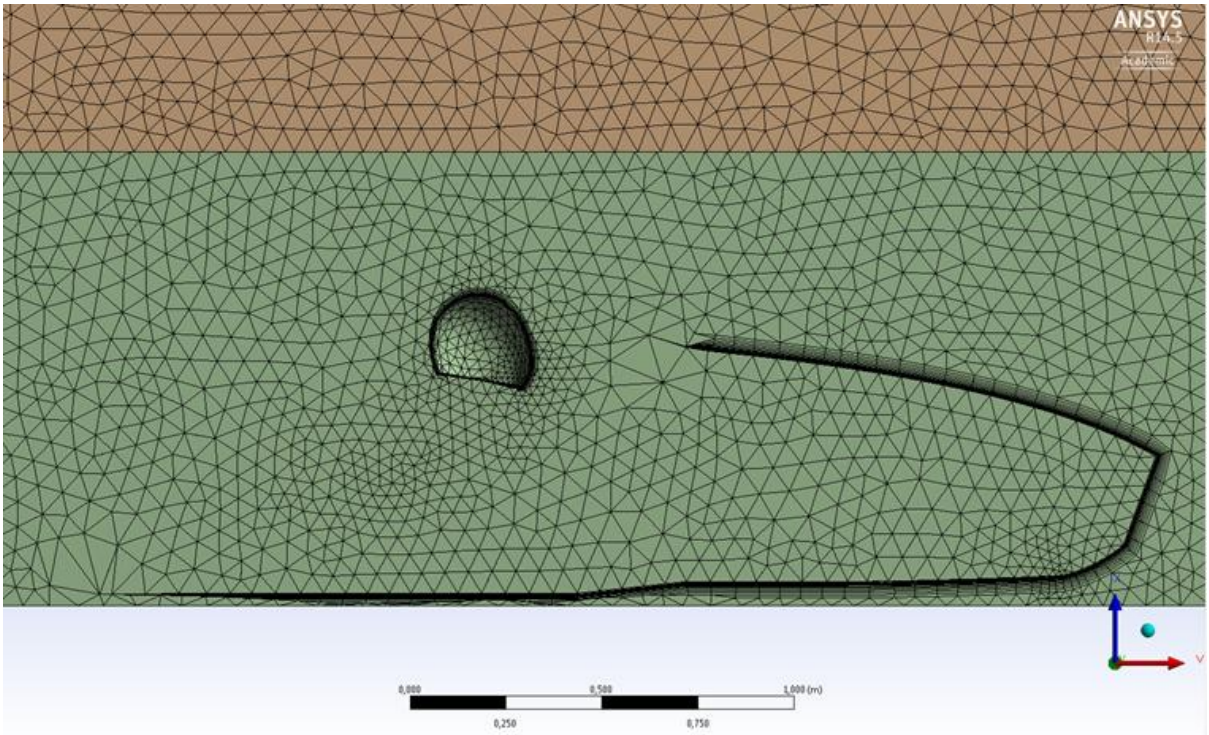


Figura D.8: Mallat amb capes al voltant de la carrosseria

Es pot observar com unes capes recobreixen la carrosseria del cotxe.

E. PRESSUPOST

Com que el present treball és purament virtual, alhora de realitzar l'estudi econòmic es tindran en compte els costos de recerca i desenvolupament, els d'amortització de l'equip utilitzat i el cost de l'elaboració de la pròpia documentació del projecte. Tot seguit explicarem més detalladament els costos del present projecte.

- Costos de recerca i desenvolupament:

Aquí es té en compte el treball realitzar per l'enginyer. Aquest consisteix en l'elaboració dels càlculs realitzats en els aspectes de mallat, simulació numèrica, anàlisi dels resultats obtinguts i el treball de recerca de la informació.

- Costos d'amortització:

Aquest és la suma de varis factors d'amortització on tenim: l'amortització dels programes utilitzats per l'execució de la simulació i els equips utilitzats. Els programes utilitzats en el present projecte han estat el Solidworks i l'Ansys Workbench.

- Cost d'elaboració:

Aquí es té en compte la totalitat de la redacció del projecte.

DESCRIPCIÓ	DURADA (h)	PREU UNITARI (€/H)	COST (€)
Desenvolupament i recerca			
Anàlisi i recerca	80,00	15,00	1.200,00 €
Programació per l'execució	150,00	15,00	2.250,00 €
Amortització			
Programes informàtics	650,00	2,00	1.300,00 €
Equipament informàtic	650,00	0,21	136,50 €
Redactat i entrega			
Redacció del treball	150,00	15,00	2.250,00 €
		Subtotal	7.136,50 €
		Benefici 9%	7.778,79 €
		21% IVA	1.633,54 €
		TOTAL	9.412,33 €

Finalment el cost total de l'elaboració del present projecte ascendeix a nou mil quatre-cents dotze euros amb trenta-tres cèntims IVA inclòs.