Resum

Aquest projecte recull una feina realitzada durant la temporada 2012-2013 dins de l'equip ETSEIB MOTORSPORT en el context de dissenyar i fabricar el seu sisè monoplaça, (segon elèctric) el CAT06e. Aquest pretén ser un document on s'engloba tot el procés de disseny, fabricació i assemblatge d'una transmissió per un Fórmula Student elèctric de dos motors, de manera que sigui el més fiable possible, fàcil i ràpid de manipular, i duradora per si s'escau ser reutilitzades pels següents monoplaces.

El projecte està compost primerament per una introducció al món Fórmula Student, seguit d'una ullada a l'estat de l'art de les diferents solucions possibles a l'objecte del projecte per altres equips de la competició. A continuació es fa un estudi més a fons dels diferents tipus de transmissió que podria incorporar el CAT06e, escollint-ne la millor opció . Tot seguit es detalla cadascuna de les decisions preses per a dimensionar els paràmetres, i per la creació cada peça en la fase de disseny; acompanyat de simulacions realitzades amb el programa *SolidWorks* per recolzar aquest disseny. I per concloure el projecte, s'ha realitzat un estudi de costos d'aquest, i un resum de funcionament de la transmissió del CAT06e, amb un detallat anàlisi de problemes sorgits durant les fases d'aprovisionament de peces, proves i competicions.

La aportació final d'aquest projecte a l'equip ETSEIB MOTORSPORT, ha estat una transmissió fiable per al CAT06e, tan fiable que també acabarà sent utilitzada per almenys el següent monoplaça dissenyat per l'equip, el CAT07e.

ÍNDEX

RESUM **1**

SUMARI **5**

SUMARI DE FIGURES 5

SUMARI DE TAULES 7

1. INTRODUCCIÓ: **9**

2. CONFLICTE **10**

2.1. LA COMPETICIÓ DE FÓRMULA STUDENT: 10

2.2. ETSEIB MOTORSPORT: NOU PROJECTE: CAT06E 12

2.3. SISTEMA DE TRANSMISSIÓ 13

3. ESTAT DE L'ART **14**

3.1. REDUCTOR D'ENGRANATGES 14

3.2. POLITGES I CORRETGES 16

3.3. CADENA 16

4. ANÀLISI DE LES DIFERENTS SOLUCIONS POSSIBLES **17**

4.1. REDUCTOR D'ENGRANATGES 17

4.1.1. Reductor d'engranatges d'una etapa *17*

4.1.2. Reductor d'engranatges de dues etapes *18*

4.2. CADENA 19

4.3. CORRETGES. 20

5. FASE DE DISSENY DE LA MILLOR SOLUCIÓ **22**

5.1. HERÈNCIA DEL CAT05E 22

5.2. PREREQUISITS 22

5.3. LÍNIES GENERALS DE LA NOVA TRANSMISSIÓ 25

5.4. DISSENY DELS PARÀMETRES DE FUNCIONAMENT DE LA TRANSMISSIÓ 27

5.4.1. Dades inicials i limitacions *27*

5.4.2.Càlcul de paràmetres *28*

5.5. DISSENY DE LA CORRETJA 32

5.6. POLITGES 38

5.7. SISTEMA DE TENSAT 46

5.7.1. Balancins *51*

5.7.2. Insert fons pla estructural i anelles *56*

5.7.3. Distanciadors *59*

5.8. JUNTA HOMOCINÈTICA 60

5.9. PALIERS 69

5.10. UNIÓ AMB BALANCINS 70
5.11. CÀLCUL DE RODAMENTS 71
5.12. UNIÓ AMB LA POLITJA 74
5.13. TAPA-CORRETGES 75
5.13. DIFERENCIAL ELECTRÒNIC 76

6. ESTUDI D'IMPACTE AMBIENTAL 78

6.1. MATERIALS EMPRATS: 78
6.2. PROCESSOS DE CONFORMAT: 79
6.3. CONCEPTE GLOBAL DEL PROJECTE 79

7. DESENVOLUPAMENT DEL PROJECTE EN EL TEMPS 80

8. ESTUDI DE COSTOS 82

9. FUNCIONAMENT 83

9.1. RESULTAT FINAL 83
9.2. BALANÇ TEMPORADA 2012-2013 85
9.3. PROBLEMES DETECTATS EN EL FUNCIONAMENT: 87
9.3.1. Desperfecte en un balancí 87
9.3.2. Oscil·lació dels balancins 87
9.3.3. Mala retenció axial 88
9.3.4. Problemes en el motor 91

CONCLUSIONS 92

AGRAÏMENTS 93

BIBLIOGRAFIA 94

Sumari

Sumari de figures

Figura 2. 1. Equips de formula student a la competició d'alemanya 2013 10
Figura 2. 2. Distribució de l'equip ETSEIB MOTORSPORT 12

Figura 3. 1. Reductora del motor en roda de l'equip TU DELFT 15
Figura 3. 2. Reductora d'engranatges per a 2 motors de l'equipm Dart Racing 15
Figura 3. 3. Sistema de politges i corretja 16
Figura 3. 4. Sistema de cadena 16

Figura 4. 1. Imatge renderitzada del reductor d'engranatges d'una etapa dissenyat per l'estudi 17
Figura 4. 2. Vista interior del reductor d'engranatges d'una etapa dissenyat per l'estudi. 18
Figura 4. 3. Imatge renderitzada del reductor d'engranatges de dues etapes dissenyat per l'estudi 18
Figura 4. 4. Vista interior del reductor d'engranatges de dues etapes dissenyat per l'estudi 19
Figura 4. 5. Equip TU Graz utilitzant transmissió per cadena de la caixa de canvis al diferencial 19
Figura 4. 6. Imatge renderitzada del sistema de politges dissenyat per l'estudi 20

Figura 5. 1. Transmissió del CAT05e 22
Figura 5. 2. Sistema de tensat per excèntrica del Cat05e 23
Figura 5. 3. Moviment del balancí i variació de la distancia entre centres 26
Figura 5. 4. Sistema de femelles per controlar la posició del balancí en el tensat 26
Figura 5. 5. Imatge del CAT05e en funcionament 27
Figura 5. 6. Esquema del model Matlab/Simulink 28
Figura 5. 7. Temps de la prova d'acceleració per a cada relació de transmissió 30
Figura 5. 8. Relació de transmissió escollida finalment, i tendència de les simulacions fetes 31
Figura 5. 9. Càlcul de paràmetres amb rFactor 32
Figura 5. 10. Corba de potència del motor en una volta d'endurance 33
Figura 5. 11. Representació de les dades obtingudes 34
Figura 5. 12. Gràfic de la potència transmesa per diferents corretges comparades amb les carbon 37
Figura 5. 13. Imatge renderitzada del sistema de politges del CAT06e 38
Figura 5. 14. Imatge renderitzada d'una politja conductora d'acer. 39
Figura 5. 15. Ampliació valones politja 39
Figura 5. 16. Imatge renderitzada de la politja conduïda 41
Figura 5. 17. Vista final amb les càrregues (violeta) fixacions (verd) i mallat 43
Figura 5. 18. Càrregues a la simulació (Tensió Von Mises) 43
Figura 5. 19. Desplaçaments calculats amb la simulació 44
Figura 5. 20. Politges finals 44

Figura 5. 21. Especejament de l'assemblatge de politges 45
Figura 5. 22. Politja conduïda ubicada a la seva posició 45
Figura 5. 23. Esquema del sistema de tensat 46
Figura 5. 24. Especejament de la femella tensora 47
Figura 5. 25. Esquema del sistema separador al punt de màxim tensat 47
Figura 5. 26. Esquema del sistema separador al punt de màxim destensat.....47
Figura 5. 27. Dimensions finals del sistema separador al punt de màxim destensat.....48
Figura 5. 28. Dimensions finals del sistema separador al punt de màxim destensat.....48
Figura 5. 29. Sistema separador fet amb fibra de carboni i inserts d'alumini adhesivats 49
Figura 5. 30. Especejament del sistema de tensat.....50
Figura 5. 31. Balancins amb sistema separador incorporat.....51
Figura 5. 32. Evolució del balancí intern fins al disseny final 53
Figura 5. 33. Evolució del balancí extern fins al disseny final. 53
Figura 5. 34. Mallat per a la simulació dels balancins.....54
Figura 5. 35. Resultats de Von Mises per la simulació dels balancins.....54
Figura 5. 36. Resultats de desplaçaments per la simulació dels balancins.....55
Figura 5. 37. Mà Esquerra – Mà Dreta 55
Figura 5. 38. Idea inicial de l'insert del fons pla.....56
Figura 5. 39. Disseny final de l'insert del fons pla preparat pel tall en laser 56
Figura 5. 40. Soldadura superior i soldadura inferior 57
Figura 5. 41. Imatge renderitzada del disseny fina de l'insert del fons pla, soldat. 58
Figura 5. 42. Foto de l'insert soldat amb les anelles, i l'útil utilitzat.....58
Figura 5. 43. Distanciador separador inferior dels balancins 59
Figura 5. 44. Distanciador separador superior dels balancins.....59
Figura 5. 45. Conjunt palier – Tripod.....61
Figura 5. 46. Esquema 3D de les dues peces de la carcassa de la tripod.....61
Figura 5. 47. Esquema 3D de les dues peces de la carcassa de la tripod.....62
Figura 5. 48. Centratge, cargol d'unió i forats de buidat de material 62
Figura 5. 49. Inserts d'acer a la carcassa de la tripod.....63
Figura 5. 50. Mallat de la peça per a la simulació.....66
Figura 5. 51. Resultats de tensió de Von Mises per simulació carcassa Tripod amb inserts d'acer 66
Figura 5. 52. Imatge Iso-Clipping al límit elàstic de laliatge de l'alumini 7075-T6 67
Figura 5. 53. Carcassa mecanitzada i anoditzada sense inserts d'acer.....68
Figura 5. 54. Distanciadors i tapa de fibra de carboni.....68
Figura 5. 55. Especejament dels paliers comercials.....69
Figura 5. 56. Paliers amb barres de suspensió.....69
Figura 5. 57. Esquema de muntatge sense rodaments 70
Figura 5. 58. Esquema de muntatge amb rodaments 70

Figura 5. 59. Distribució de rodaments 71
Figura 5. 60. Porta-rodaments 72
Figura 5. 61. Porta-rodaments amb els balancins 72
Figura 5. 62. Porta-rodaments un cop fabricats 73
Figura 5. 63. Unió amb la politja 74
Figura 5. 64. Imatge renderitzada del Tapa-Corretges 75
Figura 5. 65. Tapa-Corretges un cop doblat per membres de l'equip 75
Figura 5. 66. Diagrama de blocs del model Matlab/simulink pel diferencial electrònic 76
Figura 5. 67. Gràfica coeficient "r" vs velocitat angular relativa ($\omega r / \omega l$) 77

Figura 7. 1. Masterplan transmissió 81

Figura 9. 1. Imatge renderitzada del conjunt de la transmissió del CAT06e 83
Figura 9. 2. Imatge renderitzada del conjunt de la transmissió del CAT06e 83
Figura 9. 3. Imatge real de la transmissió un cop ensamblada al CAT06e 84
Figura 9. 4. Cat06e en Competició a Hockenheim 2013 84
Figura 9. 5. ETSEIB MOTORSPORT rebent el primer premi del Cost Report Germany 2013 86
Figura 9. 6. Desperfecte detectat en un balancí 87
Figura 9. 7. Conjunt carcassa de la tripod un cop muntada correctament amb el comparador 88
Figura 9. 8. Imatge renderitzada de la peça auxiliar que retenia axialment les politges conductores 89
Figura 9. 9. Dibuix de la peça auxiliar que retenia axialment les politges conductores 89
Figura 9. 10. Imatge renderitzada de la peça acoblada 90

Sumari de taules

Taula 2. 1. Equips de formula student a la competició d'alemanya 2013 11

Taula 4. 1. Resum de l'anàlisi de la millor opció 20

Taula 5. 1 . Inèrcies i masses per cada cas 29
Taula 5. 2. Resultats numèrics obtinguts de la simulació 29
Taula 5. 3. Resum de la simulació amb rFactor 33
Taula 5. 4. Potència màxima per intervals 34
Taula 5. 5. Comparació politja conductora acer - alumini 39
Taula 5. 6. Taula resum de les propietats del material seleccionat 40
Taula 5. 7. Resum de les opcions de disseny 41
Taula 5. 8. Especejament peces sistema de tensat 48
Taula 5. 9. Especejament del sistema de tensat 50
Taula 5. 10. Fixacions simulació balancins 52

Taula 5. 11. Càrregues simulació balancins 52

Taula 5. 12. Detall simulació Inserts d'acer de la carcassa de la Tripod 64

Taula 5. 13. Fixacions simulació Carcassa Tripod amb inserts d'acer 65

Taula 5. 14. Càrregues simulació Carcassa Tripod amb inserts d'acer 65

Taula 5. 15. Dades Funcionament paliers 70

Taula 6. 1. Resum de Costos de fabricació del prototip 82

Taula 9. 1. Resultats del CAT06e a les competicions del 2013 85

1. Introducció:

Formula Student, també coneguda com Formula SAE (Society of Automotive Engineers)®, és una competició entre estudiants d'universitats de tot el món que promou l'excel·lència en enginyeria mitjançant una competició on els membres de l'equip dissenyen, construeixen, desenvolupen i competeixen un petit vehicle tipus fórmula.

Un projecte integrat a l'ETSEIB amb l'objectiu de formar d'una manera diferent als alumnes amb mètodes alternatius a les classes i assignatures, com el treball en equip en un projecte real, és l'equip de Fórmula Student de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona. En aquest projecte, un equip de 35 estudiants tenen la missió de crear un vehicle real, preparat per competir, i amb les millors prestacions possibles.

En aquest cas, l'objecte d'aquest projecte és el desenvolupament del sistema de transmissió del vehicle de fórmula Student elèctric de l'equip ETSEIB MOTORSPORT de la temporada 2012-2013, anomenat CAT06e.

Tot i que ja existeixen dissenys de transmissió de vehicles dels estudiants anteriors fórmula, només n'hi ha una per a un cotxe elèctric (any anterior CAT05e), i necessita millorar per arribar al nivell dels últims cotxes de combustió.

Com que el vehicle té dos motors elèctrics independents, és obligatori comptar amb una transmissió per motor. Com a conseqüència d'això, la transmissió té doble importància, ja que significa el doble d'espai, pes i soroll. Per aquesta raó, cada millora és molt important.

No obstant això, la nova transmissió no serà només una millora dels termes esmentats, sinó que pretén ser més revolucionària i incloure alguns aspectes nous. Per exemple, un nou mètode més fàcil d'ajustar la tensió, adaptació a la frenada regenerativa.

Perquè sigui possible, s'ha fet un treball exhaustiu amb la següent estructura: A partir d'un estudi de la situació actual i propostes alternatives de possibilitats reals, seguit amb un anàlisi tècnic d'aquests; es decideix la millor solució per a la transmissió del CAT06e. Un cop decidit el tipus de transmissió, s'ha estudiat la posada en pràctica i la informació tècnica del sistema a l'apartat de la fase de disseny de la millor solució. Més endavant es fa un estudi de costs del projecte, seguit de l'apartat "funcionament" on s'analitza els resultats a les competicions, els problemes sorgits en el sistema de transmissió i com s'han arreglat aquests problemes.

2. Conflicte

2.1. La competició de fórmula Student:

El repte dels equips és desenvolupar un vehicle que pugui completar satisfactòriament tots els events de les competicions, descrits amb detall a les "FSAE Rules". A les competicions és on els equips poden demostrar als altres estudiants del món i als jutges de la competició, el potencial dels seus vehicles i les solucions enginyerils que han implementat.

Per donar als equips participants la màxima flexibilitat de disseny per expressar la seva creativitat, hi ha poques restriccions generals de disseny del vehicle, i la gran majoria són les que afecten a la seguretat dels monoplaces, com ara restriccions de potència, interruptors de desconnexió en cas de curtcircuit...

Figura 2. 1. Equips de formula student a la competició d'alemanya 2013

El vehicle ha de ser d'altes prestacions en termes d'acceleració, frenada, ha de ser segur, i ha de ser suficient resistent com per a completar tots els "Dynamics events" de les diferents competicions que organitza Formula Student SAE, on els equips són lliures de participar o no.

Un cop el vehicle hagi estat acabat i provat, s'han d'elaborar uns plans de màrqueting, estudis de mercat, costos... per intentar vendre el disseny a una corporació fictícia per fabricar el cotxe en sèrie i vendre'l a la vida real. Aquests estudis totalment ficticis són també evaluats pels jutges de les competicions, per tenir en compte altres aspectes enginyerils que no poden ser avaluats en proves dinàmiques. Aquestes proves són les anomenades "static events" i tenen en compte el disseny del vehicle, el cost del vehicle, proposta d'industrialització i comercialització... aquestes

La següent taula mostra la puntuació dels diferents events, que seran jutjats per professionals del món de l'automoció, fent el paper de jutges de les competicions, i en base a una normativa i unes directives per a cada prova. Els equips competeixen per a aconseguir un màxim de 1000 punts, distribuïts entre 325 com a events estàtics, i 675 com events dinàmics.

Events estàtics	
Presentació	75
Disseny (Design)	150
(Cost Report)	100
Events dinàmics	
Acceleració	75
Skid-Pad	50
Autocross	150
Efficiency	100
Endurance	300
Total puntuació	1000

Taula 2. 1. Equips de formula student a la competició d'alemanya 2013

.

2.2. ETSEIB MOTORSPORT: Nou projecte: CAT06e

ETSEIB MOTORSPORT és l'equip d'estudiants de la fórmula student de l'Escola Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). L'objectiu d'aquest equip és dissenyar I fabricar un cotxe de Formula Student preparat per a competir a les competicions Fórmula Student.

L'equip ha estat participant al campionat de Fórmula Student durant 5 anys, 4 d'ells amb un cotxe de combustió interna, i obtenint uns molt bons resultats amb l'últim vehicle, producte de l'evolució dels tres primers. La temporada passada l'equip va fer un pas endavant cap a l'automoció del futur: el cotxe elèctric. El següent pas és anar perfeccionant aquest primer monoplaça (CAT05e) per anar-lo fent competitiu, i mica en mica anar posant al capdamunt de la classificació mundial de fórmula Student, un cotxe creat a casa nostra, un cotxe de l'ETSEIB.

És per això que el següent pas és el del vehicle de la temporada 2012-2013, el vehicle que apareix com a evolució del CAT05e, el CAT06e. És molt important fer una transferència de coneixement dels estudiants que cada any abandonen l'equip cap als nous integrants d'aquest, per garantir l'evolució, i no tenir problemes en coses que anteriorment ja funcionaven, i així centrar-se en millorar les coses que no van donar el rendiment esperat.

L'equip consisteix en 35 estudiants de l'escola tan d'enginyeria industrial com d'enginyeria química. L'estructura interna de l'equip divideix els seus membres en 5 seccions corresponents a les seves funcions i responsabilitats sobre el cotxe a crear, com es pot observar a la figura 1.2.

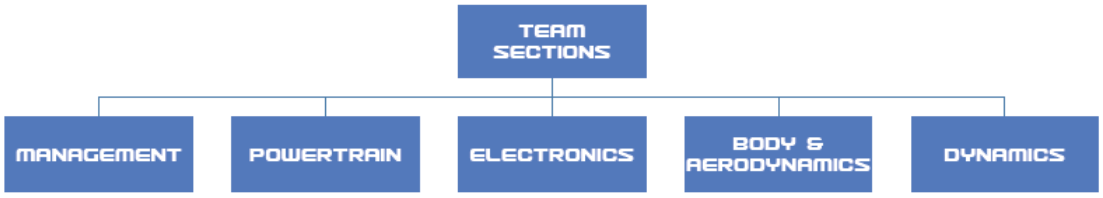


Figura 2. 2. Distribució de l'equip ETSEIB MOTORSPORT

La transmissió és un element integrat dins de la secció de *Dynamics*, però molt en relació amb la secció de *Powertrain*, que és la responsable del motor.

2.3. Sistema de transmissió

L'objectiu del projecte és desenvolupar un nou sistema de transmissió que està destinat a tenir un millor rendiment que els anteriors. Això hauria d'incloure una millora en diferents aspectes, com la seva fiabilitat, eficiència i lleugeresa

Hi ha diverses coses que s'han de tenir en compte quan s'encari aquest conflicte. El més important seria probablement el millorar el seu funcionament i eficàcia. També és molt important tenir en compte que el CAT06e portarà 2 motors elèctrics independents.

Un altre aspecte a tenir en compte en el disseny de la nova caixa de canvis ha de ser una reducció de l'impacte econòmic que el pressupost definitiu de tot el cotxe. És a dir, tractar de trobar la forma més barata de fer tots els processos de fabricació de part i sense comprometre la seva eficàcia i rendiment.

3. Estat de l'art

El primer pas lògic per a dissenyar qualsevol cosa és mirar a l'entorn I veure solucions per a diferents problemes similars al nostre. Així comença l'estudi de la transmissió; primer amb una visió global de les solucions existents, i continuant amb un estudi més a fons d'aquestes solucions adaptades al CAT06e.

Hi ha uns quants tipus de transmissions utilitzades en vehicles elèctrics de fórmula Student. S'ha de tenir en compte que no tenen res a veure amb les transmissions de vehicles de combustió interna, ja que la corba de parell que subministra un motor elèctric és molt constant i aprofitable en un ample rang de velocitats rotacionals. Els motors de combustió en canvi, només poden subministrar un parell aprofitable en un rang de revolucions molt més petit, i és per això que aquests vehicles es veuen obligats a poder variar la seva relació de transmissió i a utilitzar canvis de marxes.

Un altre aspecte que cal tenir en compte és que els cotxes propulsats per motors elèctrics poden tenir de un motor fins a quatre motors funcionant independentment, quan els vehicles de combustió només en porten un. Això significa que un sistema de transmissió independent seria necessari per cada motor funcionant al vehicle.

3.1. Reductor d'engranatges

Una de les solucions més comunes és l'ús d'un reductor d'engranatges amb la relació de transmissió desitjada. Aquesta és possiblement la solució més fiable, sempre depenent del seu bon disseny, els materials emprats. Aquesta opció també pot ser la més pesant. Bàsicament consisteix en dues o més rodes dentades formant un sistema de reducció, fent que l'eix que suporta la primera estigui connectat amb el motor, i l'eix que suporta la última acabi als paliers que acaben transmetent el moviment cap a les rodes motrius. Com a desavantatges, el reductor d'engranatges acostuma a ser una opció més cara que les altres i necessita lubricació.

Per altra banda, aquesta solució té molts avantatges interessants. Per exemple no cal tenir eixos paral·lels per poder implementar un reductor. També és una solució molt compacte i poc voluminosa, cosa que és molt interessant pels equips que treballen amb motor en roda, que arriben fins i tot a integrar el sistema de reducció dins la pròpia boixa. Aquests casos però són donats només pels millors equips de les competicions, que es poden permetre un motor per roda i caixes reductores per fosa, com podria ser *TU Delft* (veure figura 3.1) o *AMZ Zurich*.

Figura 3. 1. Reductora del motor en roda de l'equip TU DELFT

Hi ha altres casos d'equips molt punters amb tracció per dos motors que en una sola caixa reductora incorporen dins d'aquesta els 2 sistemes de reducció per a cada roda. És el cas de Dart Racing (Darmstard).

Figura 3. 2. Reductora d'engranatges per a 2 motors de l'equipm Dart Racing

3.2. Politges i corretges

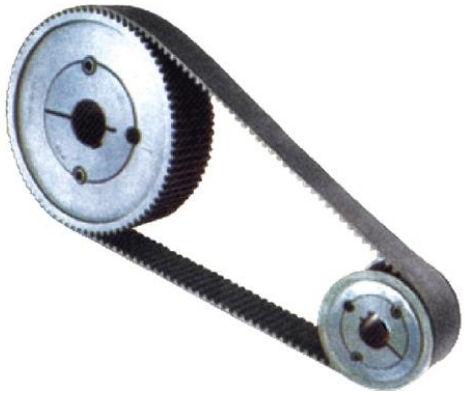


Figura 3. 3. Sistema de politges i corretja

Una altra solució que molts equips FSAE trien per al sistema de transmissió és l'ús de dos politges i una corretja. La politja petita (conductora) està connectada a l'eix del motor mentre que la politja gran (conduïda) és fixa a l'eix de les rodes de tracció. La corretja pot ser síncrona o asíncrona, però les primeres en general es prefereixen causa que permeten aplicar un control de tracció al sistema.

Un avantatge molt interessant d'aquest sistema és que no necessita lubricació, encara que la corretja necessita ser tensad.. En general, necessita més espai per aconseguir la mateixa relació de velocitat.

Aquest sistema està generalment acceptat per aquests equips que només porten un o dos motors, sempre que també és molt barat.

3.3. Cadena

Aquest sistema és molt similar a les politges de corretja però utilitza una cadena en lloc d'una corretja. Això implica que la transmissió de rotació sempre serà síncrona. En general, necessita menys espai que el sistema de politges de corretja clàssic, ja que no necessita ser tan tensada. També necessita una mica de lubricació.

Es pot considerar un sistema bastant fiable, sempre que una cadena és en general menys propensa a trencar que una corretja. És un sistema adoptat per una gran quantitat d'equips, encara que en general és més comú en els vehicles de motor de combustió interna, i és el sistema que empren els equips més bons d'aquesta categoria com vindrien a ser l'equip Rennstall Esslingen, Tu Graz o Global FS.

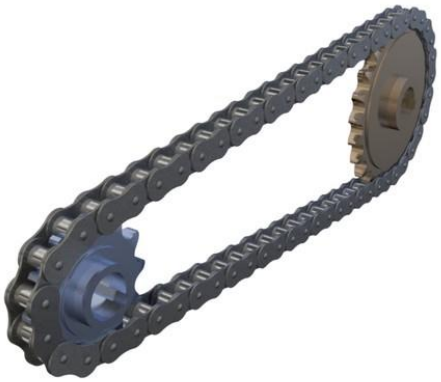


Figura 3. 4. Sistema de cadena

4. Anàlisi de les diferents solucions possibles

Per tenir la millor transmissió possible, primer cal avaluar totes les opcions viables per fer aquesta funció. Val a dir que aquestes solucions ja han estat basades en paràmetres aproximats, com per exemple una relació de transmissió i=5. Les opcions estudiades són les següents:

4.1. Reductor d'engranatges

Els engranatges són una bona solució, molt robusta i fiable, però molt cares a causa de la seva fabricació personalitzada per fosa d'alumini o mecanitzat de gran volum d'alumini, en el cas de les carcasses, i per sinteritzat en el cas dels engranatges. Els equips més punters de la competició de Fórmula Student usen aquest tipus de transmissió, però potser no és la millor opció en quant a la relació qualitat/preu.

4.1.1. Reductor d'engranatges d'una etapa

Figura 4. 1. Imatge renderitzada del reductor d'engranatges d'una etapa dissenyat per l'estudi

Figura 4. 2. Vista interior del reductor d'engranatges d'una etapa dissenyat per l'estudi.

L'inconvenient del reductor d'una etapa és que degut a la gran relació de transmissió que tenim, la roda dentada conduïda és molt gran, i en conseqüència la carcassa també ho és. Això influeix negativament en l'espai disponible que queda en el cotxe i també en que augmenta el pes i les inèrcies amb moviment angular del monoplaça.

4.1.2. Reductor d'engranatges de dues etapes

Possiblement, dels engranatges aquesta sigui la opció més viable en quant a espai ocupat i a pes de la transmissió. Com a principal inconvenient respecte el reductor d'una etapa és que augmentaria el preu, ja que són necessaris més motlles per al sinteritzat ja que tenim 3 engranatges diferents enlloc de 2.

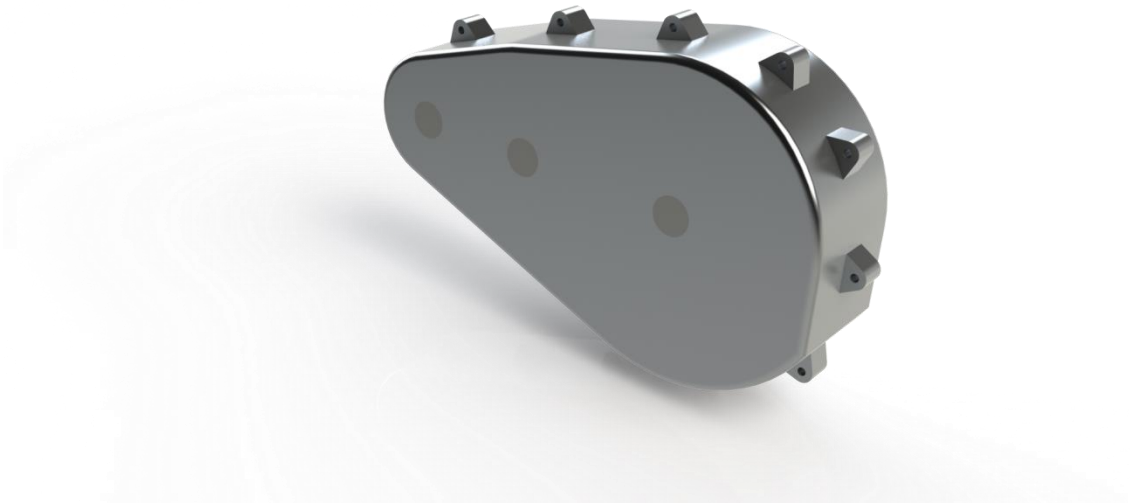


Figura 4. 3. Imatge renderitzada del reductor d'engranatges de dues etapes dissenyat per l'estudi

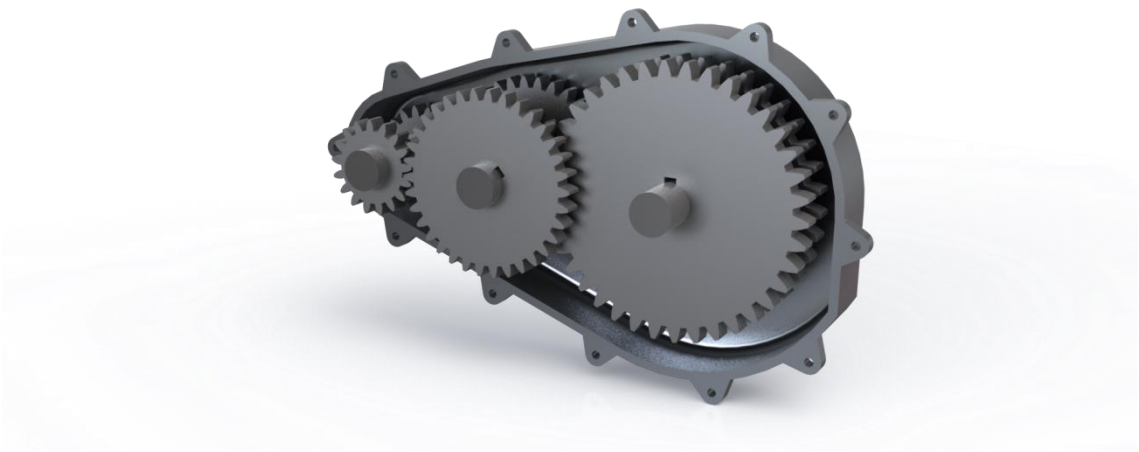


Figura 4. 4. Vista interior del reductor d'engranatges de dues etapes dissenyat per l'estudi

4.2. Cadena

La opció de les cadenes consisteix en dos pinyons de diferent nombre de dents, un solidari al motor i l'altre solidari al palier, que per mitjà d'una cadena metàl·lica transmet el moviment.

El principal inconvenient és el pes, i el soroll, que no va molt en sintonia amb la imatge de cotxe elèctric net que l'equip ETSEIB MOTORSPORT vol donar al món.

Un dels avantatges més importants davant les corretges és que no es requereixen tensats tan elevats . També permeten distàncies entre centre majors que els engranatges ocupant molt menys volum.

Figura 4. 5. Equip TU Graz utilitzant transmissió per cadena de la caixa de canvis al diferencial

4.3. Corretges.

La opció de les corretges consisteix en politges de diferent nombre de dents, una solidaria al motor i l'altra solidaria al palier, que per mitjà d'una corretja polimèrica transmet el moviment del motor als paliers.

Els principals avantatges de les transmissions per corretja són:

- Funcionament més silenciós
- Poden absorbir xocs de transmissió o pics de parell ja que són elàstiques
- Permeten transmetre potència entre eixos paral·lels a una gran distància.
- Requereix poc manteniment ja que no duen lubricació
- Més barates que cadenes i engranatges
- Velocitats de rotació més elevades que amb les cadenes

Figura 4. 6. Imatge renderitzada del sistema de politges dissenyat per l'estudi

Analisis	Corretges		Reductor d'engranatges		Cadena	
	Pros	***Contres***	***Pros***	***Contres***	***Pros***	***Contres***
Soroll	Silenciós			Sorollós		Sorollós
Manteniment		Tensar		Lubricar		Tensar i lubricar
Impacte al motor		Flexió eix	No		Mínim	
Frenada regenerativa	Si		Si			No
Housing	Protecció			Carcassa	Protecció	
Pes total (kg)	9,9			17,2		11,4
Cost (tecnologia)	Barata			Molt cara	Barata	
Eficiencia (%)	0,97		0,97			0,95
Suport d'sponsor	Si			No		No
Manera d'adquirir	Comercial			Fet especialment	Comercial	
Alineació dents		Independent	per la caixa			Independent
Refrigeració	Inecessària		Lubricació		Inecessària	
Potència màxima	Si		Si		Si	
Incertesa en els càlculs	No		No			Si
Fiabilitat		Pot patinar	Alta			Pot trencar-se
TOTAL	***11***	***4***	***8***	***7***	***6***	***9***

Taula 4. 1. Resum de l'anàlisi de la millor opció

Després d'haver estudiat amb més profunditat les opcions, i havent dissenyat amb bastanta precisió els sistemes s'ha arribat a la conclusió que la solució que més interessa a l'equip és que el CAT06e tingui transmissió per corretges.

Un dels factors més importants a favor de la transmissió per corretges ha estat el pes més baix (Estimat en 9,9 kg tot el sistema sencer), que concorda amb els l'objectiu de reduir pes del projecte.

També ha influit en la decisió que l'any anterior la transmissió també fos per corretges (CAT05e) i l'equip ja disposava d'un *know how* important d'aquesta tecnologia.

Una alta eficiència també és molt important, tan com que les corretges siguin capaces de transmetre parell de manera bidireccional, ja que està previst que el vehicle incorpori un sistema de frenada regenerativa mitjançant el fre motor. La frenada regenerativa s'ha de tenir en compte a l'hora de dissenyar com es tensen aquestes politges, ja que si el tensat es fa mitjançant un corró tensor no és convenient implementar-ho, ja que al passar d'accelerar a frenar, canvia el parell de direcció en le politges i per tan la branca carregada i la descarregada s'intervanvien.

Caldrà optar per un sistema de corretges síncrones si es vol poder implementar el control de tracció i d'estabilitat, ja que saber exactament la velocitat de les rodes en cada moment és un punt fonamental en la definició d'aquest altre projecte.

I finalment, l'objectiu de més pes que ha fet descartar el reductor d'engranatges ha estat el preu. La filosofia de l'equip ETSEIB MOTORSPORT és diferent a la dela gran majoria dels grans equips de Fórmula Student del món: l'equip de l'ETSEIB vol ser punter, però sense malgastar diners; aconseguint crear un cotxe competitiu amb un pressupost ajustat.

5. Fase de disseny de la millor solució

5.1. Herència del Cat05e

El Cat05e, va ser un projecte molt ambiciós de l'equip de fórmula Student ETSEIB Motorsport, ja que en un sol any es va aconseguir passar de fer un vehicle de combustió interna a un vehicle elèctric, sense tenir cap experiència prèvia. Val a dir que, malgrat l'èxit d'aquesta aventura tan ambiciosa, sempre hi ha coses per millorar. Aquí va començar la feina de l'equip del Cat06e, recopilant informació de l'anterior fórmula, i pensant quins punts es podien millorar:

En quant a la transmissió, el sistema que duia el Cat05e, era un sistema de corretges d'una etapa per a cada motor, amb una relació de transmissió de 5,68, i un sistema de tensat per excèntrica que tensava les dues corretges a la vegada (2 motors)

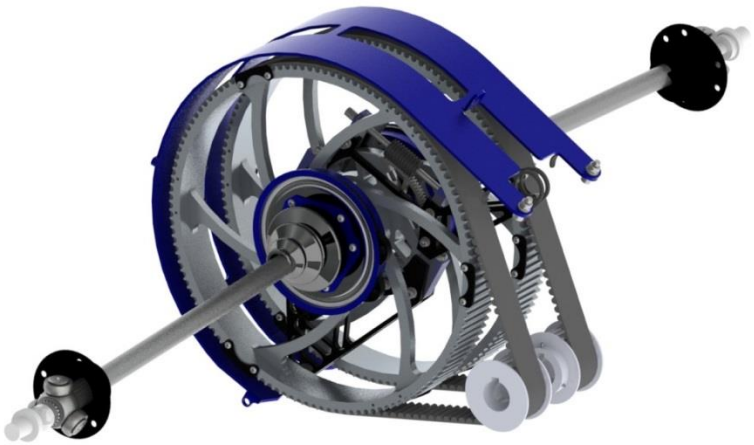


Figura 5. 1. Transmissió del CAT05e

5.2. Prerequisits

De l'experiència del cat05e, es van definir els primers objectius per a la transmissió del cat06e.

1. <u>Tensat independent:</u> un dels principals problemes que va tenir la transmissió del -Cat05e va ser el sistema de tensat. Sobre el paper, aquest sistema no havia de tenir cap problema, ja que tot i ser un sistema una mica complex pel fet d'incorporar una excèntrica i un petit vis sens fi per tensar-destensar, generava la mateixa tensió a ambdues corretges. Es pot observar el sistema d'excèntrica a la Figura 5.2.

Figura 5. 2. Sistema de tensat per excèntrica del Cat05e

A la pràctica no va funcionar. Aquest sistema es basava en que els dos eixos dels motors havien d'estar perfectament alineats, però com que aquests van ser fabricats a ma, amb soldadures dels mateixos membres de l'equip, no es va aconseguir la precisió necessària perquè aquest sistema funcionés correctament.

Al haver-hi una desalineació en els eixos dels motors, la distància entre eixos de les politges dels dos sistemes sempre era diferent, i per tan mai quedaven les corretges igual de tensades.

Per això, per facilitar les coses, es va pensar en un sistema de tensat independent per a cada motor.

2. <u>Facilitat de muntatge i desmuntatge:</u> Per molts motius diversos, sovint és necessari desmuntar la transmissió. Tan pot ser com per revisar el sistema de transmissió, com per accedir a qualsevol altre subsistema que queda tapat per la transmissió com podrien ser motors, refrigeració, cablejat elèctric...

   El sistema del Cat05e era complicat i tediós de desmuntar, sobretot perquè el sistema era complex, molts cargols i femelles estaven situats en llocs inaccessibles, i sobretot era poc pràctic pel fet d'haver de desmuntar íntegrament els dos sistemes.

   Per aquest fet, es va decidir de dissenyar el sistema pensant sobretot en el temps de muntatge i desmuntatge, ja que sovint calia desmuntar-lo ràpid per fer reparacions d'última hora abans d'una prova.

3. Tensat precís: els sistemes de corretges requereixen tensió, però no una tensió qualsevol. Els fabricants de corretges recomanen una tensió per a cada tipus de corretja, i per a cada cas de parell, velocitat... Per tant, per augmentar la fiabilitat del sistema, cal tenir controlada la tensió de les corretges en tot moment.

4. Reducció de pes: En els vehicles de competició o d'alt rendiment, sempre és bo reduir el pes dels components per tal de reduir la massa total i el moment d'inèrcia de les peces amb moviment angular. Per això, s'implementaran idees del Cat05e que no van ser dutes a terme, com per exemple canviar les politges conductores d'acer a aliatge d'alumini.

5. Millorar la fiabilitat en general: Molts dels punts anteriors ja tenen en compte el fet de millorar la fiabilitat del sistema, però sempre hi ha petits detalls que fallen puntualment. Això és el que es pretén evitar: Assegurar tots els cargols crítics amb filferros perquè no es descargolin, Utilitzar unes manxes de bona qualitat, que no deixin escapar el greix de les juntes tripod...

6. Estalviar en la fabricació de politges: Aconseguir reduir costos sempre és important en l'enginyeria. En la transmissió del Cat05e el més car van ser les politges. s'intentarà reduir costos al màxim trobant un sistema alternatiu de fabricació o un sponsor.

5.3. Línies generals de la nova transmissió

El canvi més profund a realitzar respecte el Cat05e és el sistema de tensat. Aquest canvi comporta una reestructuració de l'espai entre politges, i també de l'entorn de la transmissió. Hi ha dues maneres de tensar una corretja: variant la distancia entre els eixos de les politges que la conformen, o situar un tensor en una de les dues branques.

En aquest cas, la opció del tensor no és viable, ja que es pretén implementar frenada regenerativa en el CAT06e, i el que fa la frenada regenerativa és invertir el sentit del parell motor, i això a la tensió de la corretja es tradueix en canviar el rol de les branques, és a dir, la branca carregada passa a ser la descarregada i viceversa.

Per tan, només es podia dissenyar un sistema de tensat per separació d'eixos de les politges. això va portar a decidir quin eix es dissenyava mòbil: l'eix dels motors, l'eix que va a les rodes, o els dos. Per temes de comoditat, es va decidir moure només l'eix que va a les rodes. El fet decisiu va ser, que en la distribució final del vehicle, els motors quedaven molt inaccessibles, i pesaven més de 15 kg cada un. Un altre argument per deixar els motors fixes al xassís era el de seguretat, ja que si el sistema per moure'ls no era prou robust, es podia acabar trencant i tenir un motor lliure quan el cotxe estigués funcionant, cosa molt indesitjable.

Finalment, es va trobar un sistema senzill i pràctic per desenvolupar la tasca de tensar les corretges. El sistema és format per un balancí, que pivota sobre un punt fix del xassís del vehicle, que fixa la seva posició amb una peça molt semblant al sistema amb el que es regula la distancia dels trapezis de suspensió.

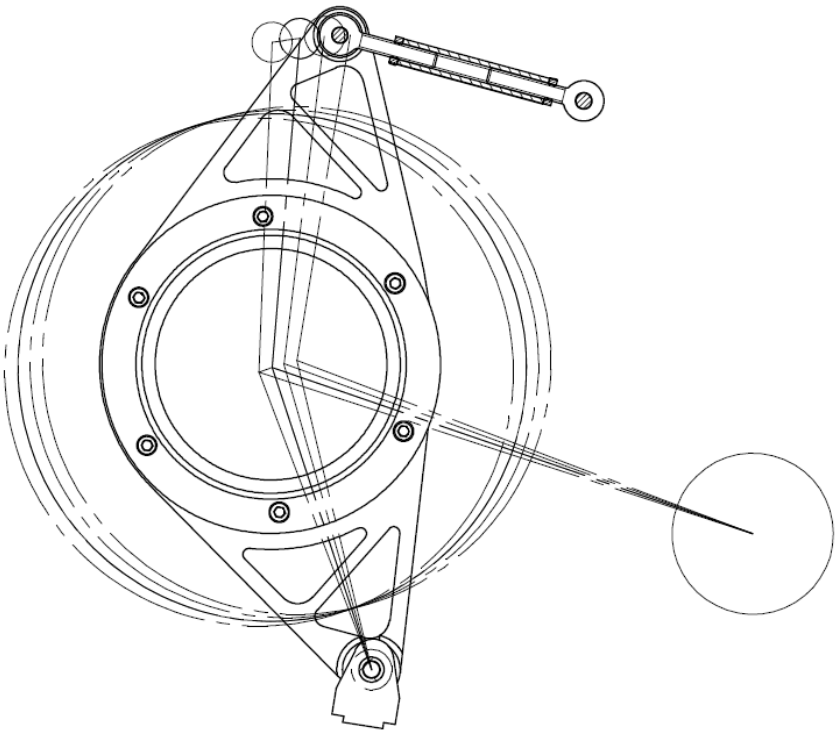


Figura 5. 3. Moviment del balancí i variació de la distancia entre centres

A la Figura 5.3 es pot observar com el balancí pivota respecte un punt fix del xassís, aquest moviment és regulat per un sistema de femelles que es pot observar amb més detall a la següent Figura 5.4.

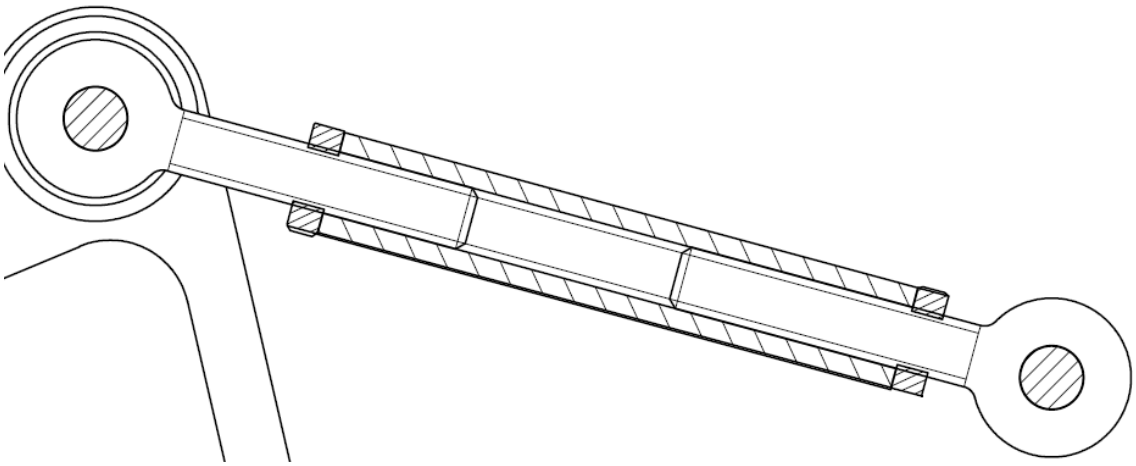


Figura 5. 4. Sistema de femelles per controlar la posició del balancí en el tensat

Aquest sistema està format per dos ròtules, fixes cadascuna al balancí i al subxassís respectivament, i una té la rosca a dretes i l'altra a esquerres. D'aquesta manera, amb una femella feta per nosaltres, també amb una rosca a dretes a una banda i una rosca a esquerres a l'altra, s'augmenta la distància entre centres al girar aquesta femella en un sentit, i es disminueix la distancia al girar-la cap a l'altre. Per fixar aquesta distancia un cop establida, s'han afegit unes femelles per fixar-ho tot amb contra-femella.

5.4. Disseny dels paràmetres de funcionament de la transmissió

5.4.1. Dades inicials i limitacions

Per al càlcul de paràmetres de funcionament de la transmissió, es parteix de les següents dades i objectius proporcionades per les altres seccions de l'equip:

- P_{mot} = 42,5 KW
- Nº motors = 2
- $\omega_{max\ motor}$ = 6000 min^{-1}
- $\Gamma_{max\ motor}$ = 120 Nm
- $\omega_{disseny}$ = 4000 min^{-1}
- Incorporarà frenada regenerativa
- V_{max} = 120 km/h. Els circuits de Fórmula Student estan dimensionats a aquesta velocitat.

Figura 5. 5. Imatge del CAT05e en funcionament

5.4.2.Càlcul de paràmetres

Relació de transmissió

Per a decidir la relació de transmissió més adequada, es va fer un estudi de les prestacions cotxe amb un model creat amb *Matlab Simulink*, on es pot estimar el temps fet en una prova d'acceleració, depenent de diferents paràmetres del cotxe, entre ells la relació de transmissió.

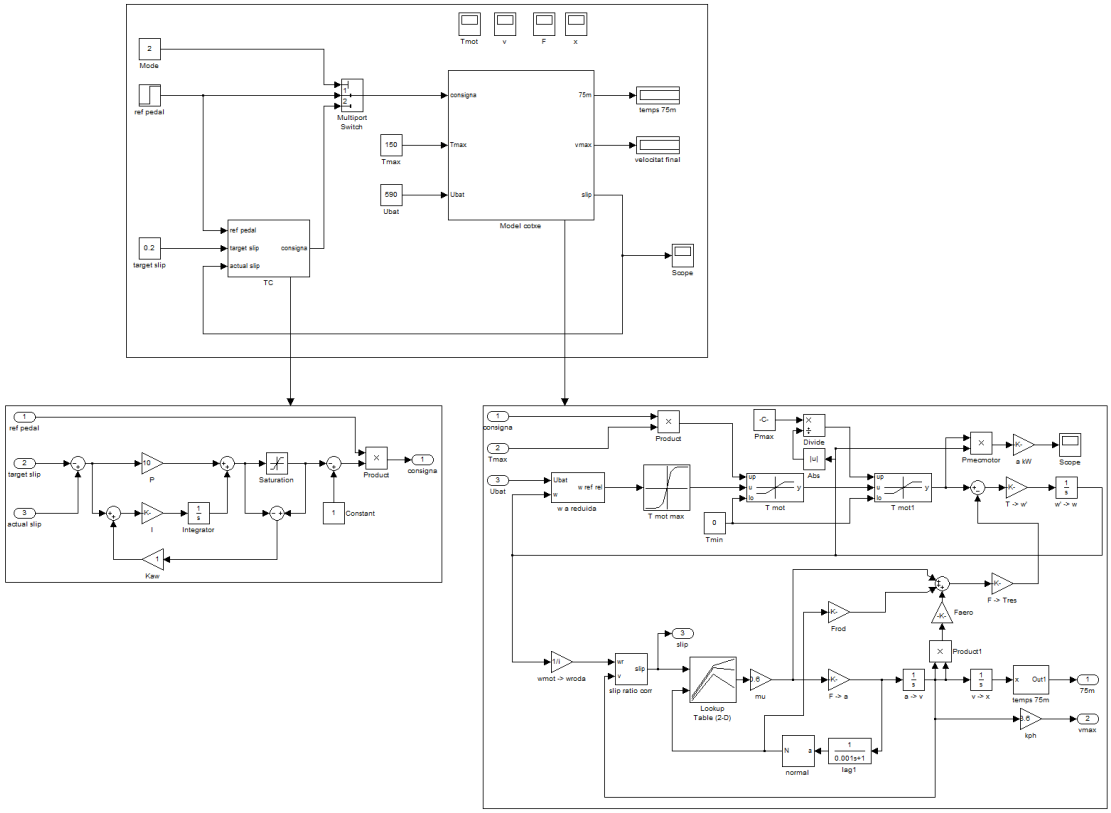


Figura 5. 6. Esquema del model Matlab/Simulink

Amb el model de *Matlab-Simulink* explicat detalladament a l'Annex A, s'han fet simulacions de les proves d'acceleració amb diferents relacions de transmissió. S'ha fet un escombrat de relacions de transmissió des de *i* = 3,2 a i = 5,5. A continuació es presenten els resultats d'aquestes simulacions. A la figura 5.6 es pot observar l'esquema molt per sobre del model creat

Determinació de la relació de transmissió

Utilitzant el model del cotxe creat en *Matlab-Simulink*, es fan iteracions de la relació de transmissió de la següent manera:

Tenint en compte que volem utilitzar el mínim pes possible i la mínima inèrcia a l'eix de les rodes, es tindrà en compte que per cada relació de transmissió es mantindrà la politja conductora (massa i inèrcia) de 22 dents, i es calcularà la massa i la inèrcia de la politja conduïda, per a cada relació de transmissió. A la Taula 5.1. es poden observar els valors d'inèrcia de cada politja emprats en les simulacions, per a cada relació de transmissió "*i*".

i	d1 [mm]	M1 [kg]	inèrcia1 [kgm2]	d2 [mm]	M2 [kg]	inèrcia2 [kgm2]
3,2	56,02	0,16	7,11E-05	179,26	0,36	2,20E-03
3,3	56,02	0,16	7,11E-05	184,87	0,40	2,56E-03
3,4	56,02	0,16	7,11E-05	190,47	0,44	2,96E-03
3,5	56,02	0,16	7,11E-05	196,07	0,47	3,40E-03
3,6	56,02	0,16	7,11E-05	201,67	0,51	3,88E-03
3,7	56,02	0,16	7,11E-05	207,27	0,55	4,41E-03
3,8	56,02	0,16	7,11E-05	212,88	0,59	4,99E-03
3,9	56,02	0,16	7,11E-05	218,48	0,63	5,61E-03
4,0	56,02	0,16	7,11E-05	224,08	0,68	6,30E-03
4,1	56,02	0,16	7,11E-05	229,68	0,72	7,04E-03
4,2	56,02	0,16	7,11E-05	235,28	0,76	7,84E-03
4,3	56,02	0,16	7,11E-05	240,89	0,81	8,70E-03
4,4	56,02	0,16	7,11E-05	246,49	0,86	9,63E-03
4,5	56,02	0,16	7,11E-05	252,09	0,90	1,06E-02
4,6	56,02	0,16	7,11E-05	257,69	0,95	1,17E-02
4,7	56,02	0,16	7,11E-05	263,29	1,00	1,29E-02
4,8	56,02	0,16	7,11E-05	268,90	1,05	1,41E-02
4,9	56,02	0,16	7,11E-05	274,50	1,11	1,54E-02
5,0	56,02	0,16	7,11E-05	280,10	1,16	1,68E-02
5,1	56,02	0,16	7,11E-05	285,70	1,21	1,83E-02
5,2	56,02	0,16	7,11E-05	291,30	1,27	1,99E-02
5,3	56,02	0,16	7,11E-05	296,91	1,33	2,16E-02
5,4	56,02	0,16	7,11E-05	302,51	1,38	2,33E-02
5,5	56,02	0,16	7,11E-05	308,11	1,44	2,52E-02

Taula 5. 1 . Inèrcies i masses per cada cas

Els resultats numèrics es mostren a la Taula 5.2, i a les Figures 5.7. i 5.8.

i	temps 75m [s]	i	temps 75m [s]
3,20	3,82	4,40	3,81
3,30	3,82	4,50	3,81
3,40	3,82	4,60	3,81
3,50	3,81	4,70	3,82
3,60	3,81	4,80	3,82
3,70	3,81	4,90	3,82
3,80	3,81	5,00	3,82
3,90	3,81	5,10	3,82
4,00	3,81	5,20	3,83
4,10	3,81	5,30	3,84
4,20	3,81	5,40	3,85
4,30	3,81	5,50	3,85

Taula 5. 2. Resultats numèrics obtinguts de la simulació

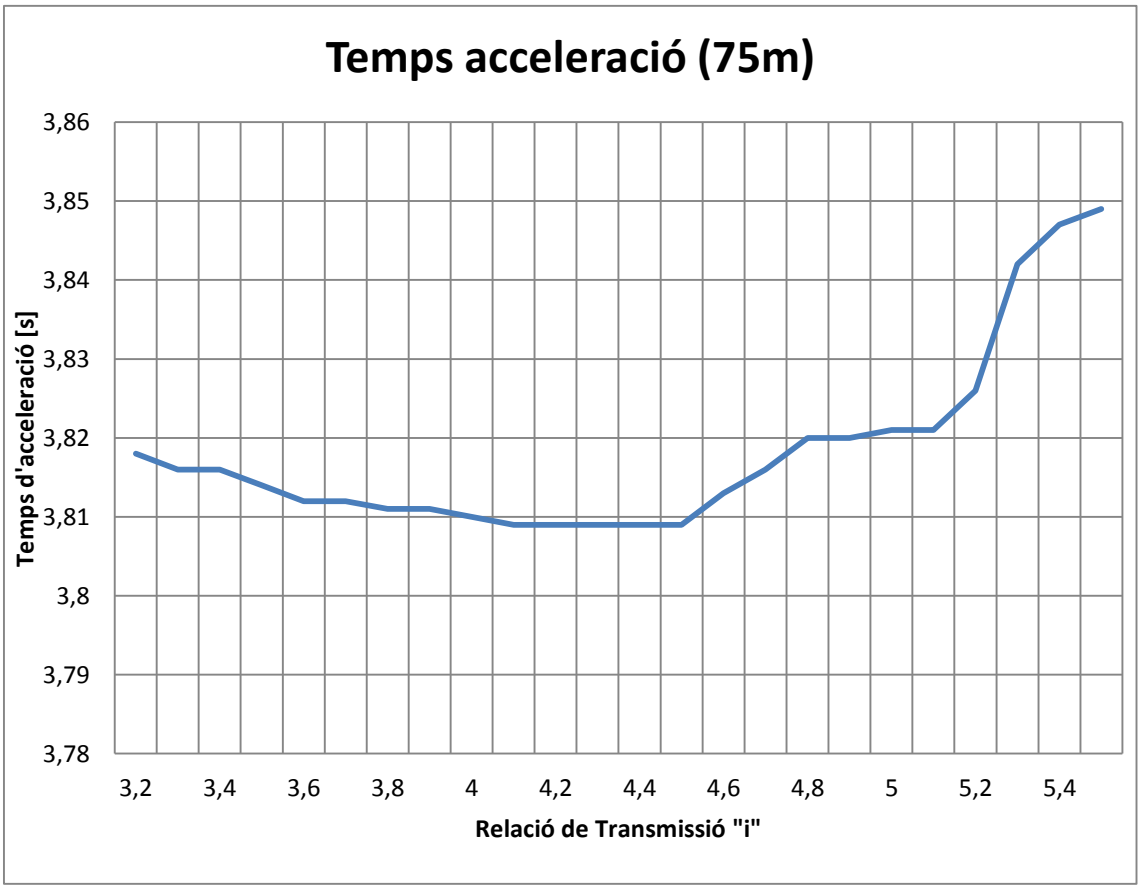


Figura 5. 7. Temps de la prova d'acceleració per a cada relació de transmissió

Si s'observen els valors obtinguts per les diferents relacions de transmissió observem que els valors compresos entre i= [4,1, 4,5] són els mateixos a efectes de la resolució que s'ha donat a les unitats , i per tan, en quant a l'acceleració respecta qualsevol d'aquestes relacions de transmissió seria bona per a un cotxe que només fes aquesta prova.

Les diferències entre els valors del gràfic poden tenir a veure amb que les masses per a cada relació de transmissió són diferents, que varia la força de resistència a l'avanç, i la força de rodolament.

D'aquestes possibles relacions de transmissió òptimes per a l'acceleració, la que més interessa per a les altres proves és la que doni un parell més elevat a baixes velocitats, ja que els circuits de fórmula Student són molt revirats, i no hi ha rectes que permetin assolir velocitats màximes gaire elevades. Per això es decideix agafar una relació de transmissió de 4,5 ja que és la que millor compleix els dos requisits.

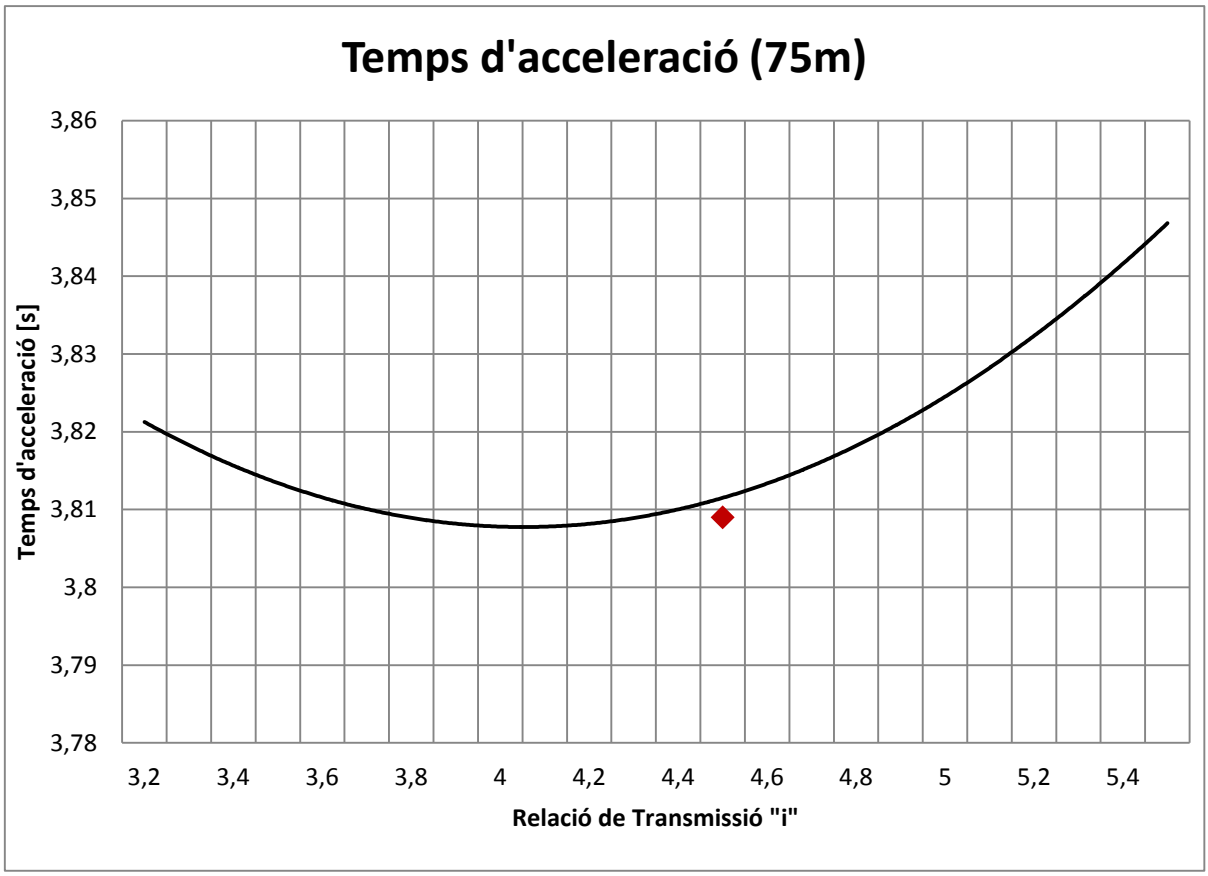


Figura 5. 8. Relació de transmissió escollida finalment, i tendència de les simulacions fetes

5.5. Disseny de la corretja

Un cop decidida la relació de transmissió, es va procedir a dimensionar el sistema de corretges per saber-ne les dimensions definitives. En aquest punt, l'equip d'ETSEIB Motorsport es va saber moure i després de molts correus i trucades, es va aconseguir un acord de patrocini amb una de les empreses de politges i corretges més importants a nivell mundial. Aquesta empresa és la nord americana *GATES*.

L'acord de patrocini va consistir en assessorament tecnològic, i en material. La mateixa empresa es va oferir a fer-nos el càlcul de la millor corretja adient per al nostre cas, i es va decidir deixar que aquest càlcul el fes *GATES*, ja que amb tota la seva experiència, i sent ells els mateixos fabricants de les corretges, podrien fer un ajust de la realitat molt major que nosaltres.

Per poder fer aquest càlcul, *GATES* va demanar dades de càrregues en el sistema, en forma de potència mitjana en intervals de velocitat de rotació del motor, i els percentatges de temps en el que es treballa en cada interval.

Per recopilar aquesta informació, es va simular un circuit d'*endurance* de fórmula Student de la temporada anterior (2011-2012). En aquest estudi es simula amb un programa anomenat *rFactor*, especialitzat en simulacions de curses. Del programa s'obtenen dades de la consigna de potència del pedal, i les revolucions del motor.

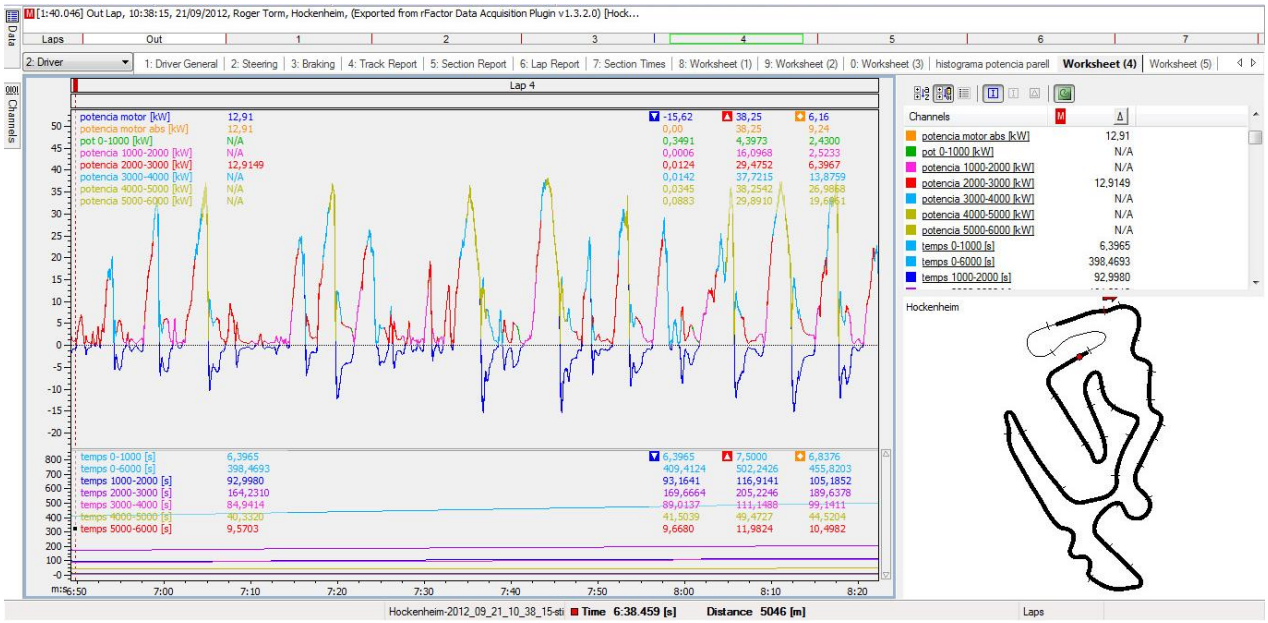


Figura 5. 9. Càlcul de paràmetres amb rFactor

A la Figura 5.9 es pot observar els resultats de la simulació d'una part del circuit (representat a la dreta de la figura) en un gràfic potència-temps. Els colors representen l'interval de potència en el que

està compresa la consigna del pedal en cada moment. Els punts que estan per sota el zero, representen punts de frenada regenerativa, que com es pot veure a la figura han estat duplicats en positiu per tal que també compti a l'hora de definir la potència en els intervals, i el percentatge de presència de cada interval respecte el total de temps.

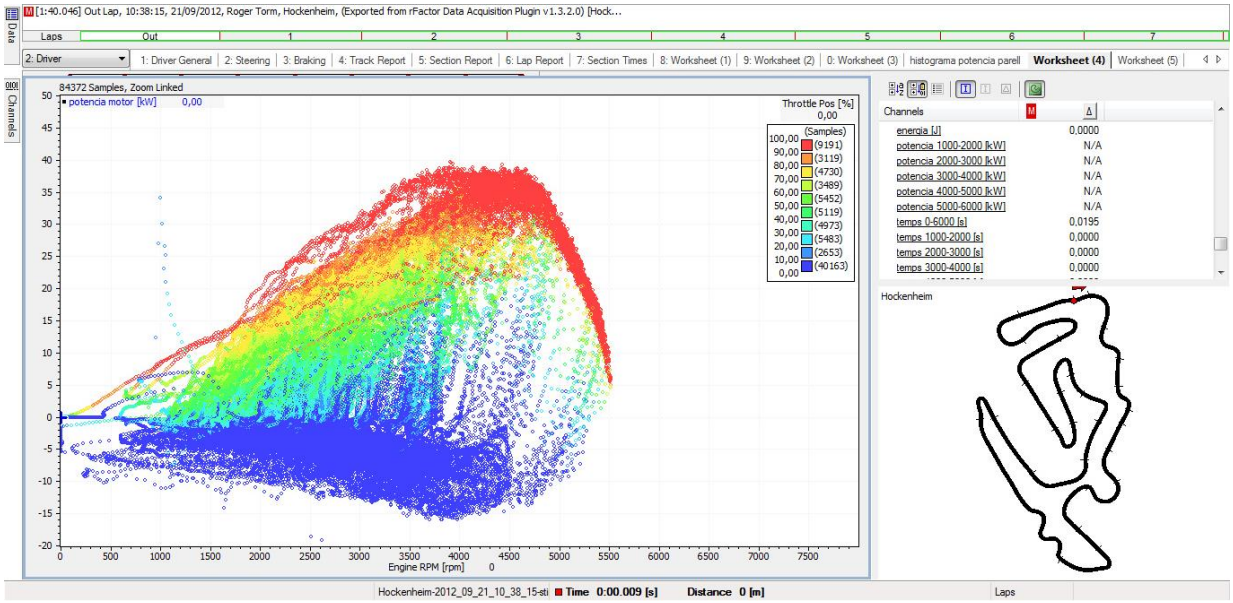


Figura 5. 10. Corba de potència del motor en una volta d'endurance

A la Figura 5.10 es pot observar la distribució de potències en tot el circuit, representat en un gràfic Potència-min^{-1} del motor. D'aquesta simulació, se'n va extreure el següent resum de dades, per a enviar a *GATES*:

Interval [min^{-1}]	Potència mitjana [kW]	Temps total[s]	Percentatge de temps [%]
[0-6000]	9,46	823,96	100
[0-1000)	2,52	13,79	1,67
[1000-2000)	2,87	179,24	21,75
[2000-3000)	5,90	343,60	41,70
[3000-4000)	14,42	185,34	22,49
[4000-5000)	26,57	79,94	9,70
[5000-6000]	19,02	22,04	2,68

Taula 5. 3. Resum de la simulació amb rFactor

Analitzant una mica les dades obtingudes observem que més d'un 63% del temps es treballa entre 2000 i 4000 min^{1}. La potència mitjana global utilitzada és de 9,4561 KW. per a fer més visuals les dades obtingudes, s'ha graficat els resultats a la Figura 5.11. Per a proveir a l'empresa *GATES* amb

més informació, també s'han extret les dades de la Taula 5.4, on per a cada interval dona la potència màxima.

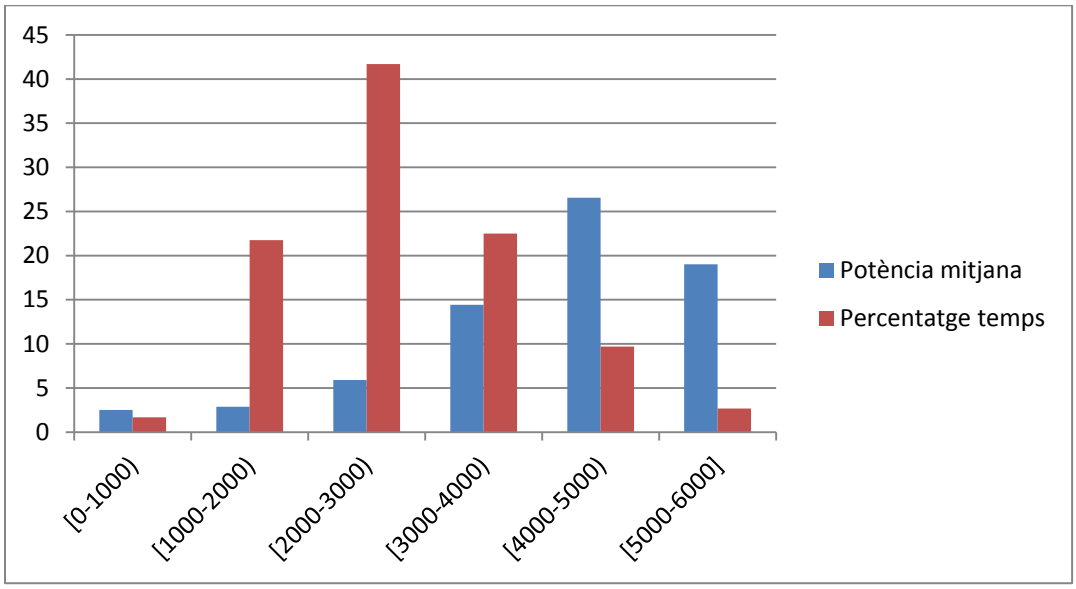


Figura 5. 11. Representació de les dades obtingudes.

Velocitat [min^{-1}]	Potència màxima [kW]	Percentatge de temps [%]
1000	12,57	1,67
2000	25,13	21,75
3000	37,70	41,70
4000	39,70	22,49
5000	31,50	9,70
6000	10,00	2,68

Taula 5. 4. Potència màxima per intervals

Finalment, *GATES* va enviar la seva resposta, proposant una solució que va agradar molt a l'equip. *GATES* va proposar utilitzar la seva última tecnologia: Corretges reforçades amb fibra de carboni al seu nucli "*Poli Chain GT carbon belt*". Aquestes corretges, permetien utilitzar un gruix mínim (21mm d'amplada) cosa que ens estalviaria espai, material de les politges reduint així el pes, i estalvi monetari en les operacions de mecanitzat de les politges conduïdes. A continuació s'adjunta la resposta de *GATES*.

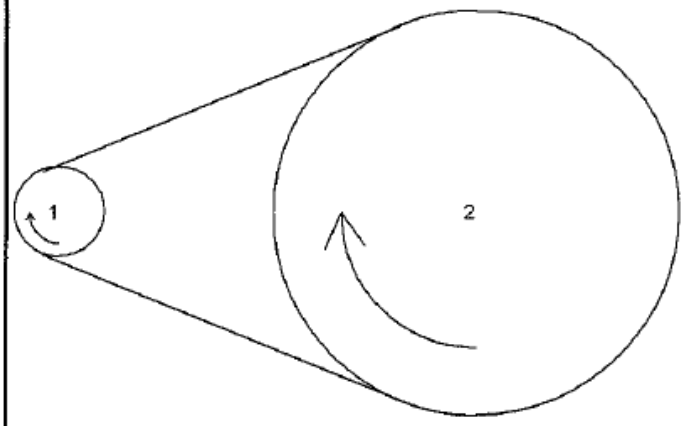
Informe detallado de la unidad

Design IQ ™ By Gates Corporation

Aplicación:

Cálculo para: ETSEIB MOTORSPORT

Diseñado por: David Manzanedo
Gates PT Spain SA
Pol ind Les Malloles
Balsareny, 08660
AD
696969



Datos Correa: (mm)

Correa seleccionada: Poly Chain GT Carbon 8MGT
Longitud Corrrea: 1040,00 mm (130 Dientes)
Correa: Longitud Efectiva: 1040,00 mm
Ancho Correa: 21,00

Geometria Unidades: (mm)

	X	Y	Diámetro	Ratio	Ang. Abrazado	Long. Arco:	Long. Ramal
1	0,00	0,00	22,00 Dientes (54,42 De)	1,0	135,56° (8,30 T.)	66,27 (8,30 T)	239,98 (30,00 T)
2	259,23	0,00	99,00 Dientes (250,50 De)	4,5	224,44° (61,70 T.)	493,78 (61,70 T)	239,98 (30,00 T)

Datos Dinámicos:

Condición 1 / 6 **2% del tiempo**
Velocidad de correa = 3 m/s

Polea	RPM	Rot.	Carga	SF	Tens. Ramal	TR (180°)	Carga Correa	R. Fat.	Ponder. RF
1 (Motr)	1000	H	2,5 kW	1	1624,2 N	2,1:1	2241,5 N@352°	1,00%	0,00%
2	222,2	H	2,5 kW	1	772,0 N	2,1:1	2241,5 N@172°	0,00%	0,00%

Condición 2 / 6 **22% del tiempo**
Velocidad de correa = 6 m/s

Polea	RPM	Rot.	Carga	SF	Tens. Ramal	TR (180°)	Carga Correa	R. Fat.	Ponder. RF
1 (Motr)	2000	H	3 kW	1	1451,9 N	1,54:1	2223,2 N@355°	1,00%	0,01%
2	444,4	H	3 kW	1	940,6 N	1,54:1	2223,2 N@175°	0,00%	0,00%

Condición 3 / 6 **42% del tiempo**
Velocidad de correa = 9 m/s

Polea	RPM	Rot.	Carga	SF	Tens. Ramal	TR (180°)	Carga Correa	R. Fat.	Ponder. RF
1 (Motr)	3000	H	6 kW	1	1534,1 N	1,8:1	2224,1 N@353°	1,00%	0,03%
2	666,7	H	6 kW	1	852,3 N	1,8:1	2224,1 N@173°	0,00%	0,00%

Fecha: 08/01/2013 14:36

Archivo: ETSEIB motorsport-normal.GIQ
3.27.4/3.27.4/0.257

Pág. 1 / 3

ETSEIB

Informe detallado de la unidad

Design IQ ™ By Gates Corporation

Aplicación:

Cálculo para: ETSEIB MOTORSPORT

Diseñado por: David Manzanedo
Gates PT Spain SA
Pol ind Les Malloles
Balsareny, 08660
AD
696969

Datos Dinámicos:

Condición 4 / 6 **22% del tiempo**
Velocidad de correa = 12 m/s

Polea	RPM	Rot.	Carga	SF	Tens. Ramal	TR (180°)	Carga Correa	R. Fat.	Ponder. RF
1 (Motr)	4000	H	14,5 kW	1	1806,8 N	3,16:1	2250,3 N@348°	1,00%	0,16%
2	888,9	H	14,5 kW	1	571,0 N	3,16:1	2250,3 N@168°	0,00%	0,00%

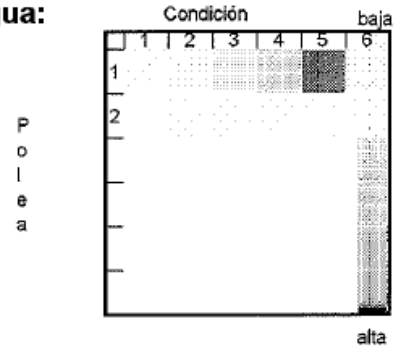
Condición 5 / 6 **10% del tiempo**
Velocidad de correa = 15 m/s

Polea	RPM	Rot.	Carga	SF	Tens. Ramal	TR (180°)	Carga Correa	R. Fat.	Ponder. RF
1 (Motr)	5000	H	27 kW	1	2103,8 N	8:1	2299,0 N@342°	1,00%	0,79%
2	1111,1	H	27 kW	1	263,0 N	8:1	2299,0 N@162°	0,00%	0,00%

Condición 6 / 6 **2% del tiempo**
Velocidad de correa = 18 m/s

Polea	RPM	Rot.	Carga	SF	Tens. Ramal	TR (180°)	Carga Correa	R. Fat.	Ponder. RF
1 (Motr)	6000	H	19 kW	1	1716,4 N	2,69:1	2216,5 N@349°	1,00%	0,01%
2	1333,3	H	19 kW	1	636,9 N	2,69:1	2216,5 N@169°	0,00%	0,00%

Influencia de Fatigua:



Información de Tensado: (Deflexión/Fuerza.)

Ramal:1 (1 - 2)

	Correa Nueva: Mínimo	Correa Nueva: Máximo	Correa usada: * Mínimo	Correa usada: * Máximo	Deflexión
Tensión de instalación para correa	1250 N	1360 N	911 N	1020 N	
Fuerza de deflexión por correa	85,5 N	92,6 N	64,2 N	71,3 N	3,75 mm

* No se recomienda retensar las correas síncronas; Para más detalles consulte con "Gates Product Applications".

Fecha: 08/01/2013 14:36

Pág. 2 / 3

Archivo: ETSEIB motorsport-normal.GIQ
3.27.4/3.27.4/0.257

ETSEIB

Informe detallado de la unidad

Design IQ ™ By Gates Corporation

Aplicación:

Cálculo para: ETSEIB MOTORSPORT

Diseñado por: David Manzanedo
Gates PT Spain SA
Pol ind Les Malloles
Balsareny, 08660
AD
696969

Información de Tensado: (Sonic Tension Meter)

Sonic Input Data: Ramal 1 (1 - 2)
Masa especifica: STM 505C/507C (305): 4,70 (0,47)
Long. Ramal:240 mm

	Correa Nueva:		Correa usada: *	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Tensión de instalación para correa	1250 N	1360 N	911 N	1020 N
Frecuencia del ramal	234 Hz	245 Hz	200 Hz	212 Hz

* No se recomienda retensar las correas síncronas; Para más detalles consulte con "Gates Product Applications".

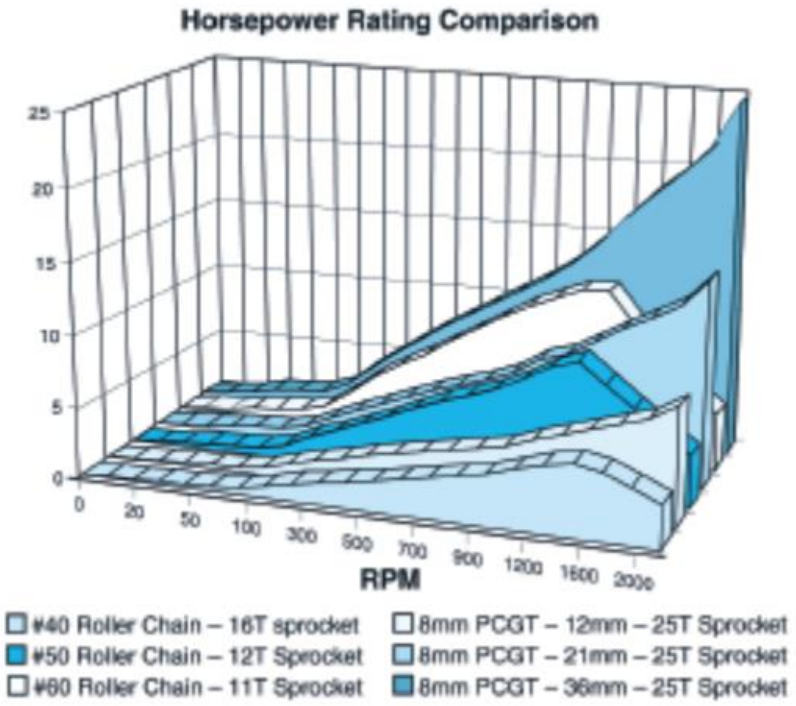


Figura 5. 12. Gràfic de la potència transmesa per diferents corretges comparades amb les carbon

5.6. Politges

És important saber que les dimensions de es dues politges està directament relacionada amb la relació de transmissió. Així que, fixada una politja, automàticament es dimensiona l'altra.

El dimensionat de les politges més extens es troba a l'Annex B. A continuació es mostren els resultats més importants:

- Nombre de dents politja petita (z_1) = 22 dents
- Nombre de dents politja gran (z_2) = 99 dents
- Diàmetre primitiu politja petita (d_{p1}) = *56,02 mm*
- Diàmetre primitiu politja gran (d_{p2}) = *251,73 mm*
- Relació de transmissió corregida (i) = 4,49
- Longitud de la corretja (l) = 1000 mm
- Nombre de dents en contacte amb la politja petita = 6,04 dents
- Tensió instal·lació corretja nova $T_{new} = 1250 \div 1360\ N$
- Tensió instal·lació corretja usada $(T_{used}) = 911\ \div 1020\ N$
- Tensió de funcionament = 6000 N

Figura 5. 13. Imatge renderitzada del sistema de politges del CAT06e

<u>Politja conduïda</u>

Les politges d'acer són més fàcils d'adquirir ja que al ser comercials i fabricades en sèrie en gran volum, són molt barates de preu. També val a dir que aquestes estan pensades per a maquinària pesant, on el pes no importa, i les màquines treballen molts anys, 8 hores al dia. De totes maneres, un vehicle de fórmula Student no està pensat per tenir una vida útil tan llarga, i en aquest cas si que el pes afecta al rendiment, tan a massa com a inèrcia rodant entre el motor i les rodes.

Aquesta és la raó per la qual es va considerar viable la opció de mecanitzar la politja conductora d'aliatge d'alumini 7075-T6.

Figura 5. 14. Imatge renderitzada d'una politja conductora d'acer.

	Politja d'acer	Politja d'alumini
Pes	0,405 kg	0,158 kg
Inèrcia	$1{,}82 \cdot 10^{-4}$ kg·m^2	$7{,}11 \cdot 10^{-5}$ kg·m^2

Taula 5. 5. Comparació politja conductora acer - alumini

Canviant les dues politges estalviem 0,494 kg. Casi mig quilogram, que equival a un 61% de reducció de pes. Amb aquest canvi, també reduïm inèrcia rodant entre el motor i la roda. Canviant les dues politges reduïm $2{,}22 \cdot 10^{-4}$ kg·m^2, que en percentatge, equival a una reducció del 61%.

Per al disseny d'aquestes noves politges s'ha utilitzat les mateixes cotes que tenien les comercials, només es va tenir en compte en la fase de disseny una manera per fixar les valones laterals a la politja. Com es pot observar a la Figura 5.15 es deixen unes petites pestanyes passants per la valona, per quan estiguin muntades, es puguin deformar plàsticament amb una premsa per ja no tornar a sortir mai més.

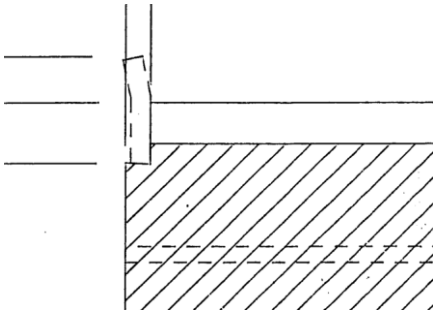


Figura 5. 15. Ampliació valones politja

Politja conduïda

Material seleccionat:

D'acord amb les càrregues aplicades a la politja conduïda, s'ha decidit que el material més adient per aquesta és l'aliatge de l'alumini 7075-T6, que té les següents propietats:

Propietats	
Nom:	**7075-T6 (SN)**
Model:	**Linear Elàstic Isotròpic**
Límit elàstic:	**5,05e+008 N/m^2**
Resistència a tracció:	**5,7e+008 N/m^2**
Mòdul d'elasticitat:	**7,2e+010 N/m^2**
Coeficient de Poisson:	**0.33**
Densitat:	**2810 kg/m^3**
Mòdul de cisalla:	**2,69e+010 N/m^2**
Coeficient dilatació tèrmica	**2,4e-005 /Kelvin**

Taula 5. 6. Taula resum de les propietats del material seleccionat

Tècnica de fabricació: la politja ha estat mecanitzada en la seva totalitat per diferents tècniques:

- Primer s'ha desbastat la forma interior mitjançant tall amb aigua
- Posteriorment, s'ha mecanitzat aquest tall per tal de refinar el tall, i per rebaixar el gruix dels radis en la direcció de la coordenada de tall amb aigua, cosa que amb la primera tecnologia no es pot aconseguir. Amb el mecanitzat també s'aconsegueixen les toleràncies adients per el separador de rodaments que incorpora la politja.
- Posteriorment, es mecanitza el perfil de les dents amb fresa mare, aconseguint així les dimensions exactes que ha dissenyat el fabricant.

A l'hora de reduir pes, s'han fet algunes simulacions amb diferents dissenys, per escollir el més adequat. A la Taula 5.7 es pot observar l'evolució de les simulacions i la comparació entre els diferents models considerats.

Model	1	2	3	4	5
Imatge					
Pes (kg)	0,947	0,878	1,004	0,927	0,875
Tensió de Von Mises (MPA)	27,9	96,5	38,2	50,7	85,7
Desplaçament màxim (mm)	0,026	0,151	0,035	0,060	0,104
Factor de seguretat	18,10	5,23	13,22	9,96	5,89

Taula 5. 7. Resum de les opcions de disseny

De tots aquests dissenys, i tenint en compte els diferents pesos i els factors de seguretat, s'ha decidit triar el disseny número 5 ja que és el més lleuger i té un factor més que acceptable de seguretat.

Val a dir que amb aquest mètode de fabricació s'ha complert un dels objectius, el de reduir costos en la fabricació de les politges del Cat06e. Amb aquest mètode, L'equip ETSEIB Motorsport va pagar 365,32 € (IVA inclòs) (Consultar Factura a l'Annex G) per les dues politges, quan la temporada anterior les politges estaven valorades en 3000€. Això vol dir que s'ha reduït el preu en un 87,82% del que costava abans.

Figura 5. 16. Imatge renderitzada de la politja conduïda

Simulacions d'elements finits

Per a dimensionar les politges conduïdes, s'han fet unes simulacions amb elements finits per a estimar la millor solució. Un resum d'aquestes simulacions està reflexat a la Taula 5.7, però a continuació, es detallarà amb més profunditat una d'aquestes simulacions; en concret, la de la solució final.

Fixacions:

Les úniques fixacions definides a la simulació han estat:

- Fixació uniaxial de la paret lateral contigua a la carcassa de la tripod.
- Fixació circular dels forats pels cargols.

Càrregues:

S'han definit dues càrregues per simular la realitat tan acuradament com sigui possible:

- S'ha simulat la càrrega estàtica de tensat amb una càrrega aplicada a les dents de la politja de 10800 N (amb un factor de seguretat aplicat de 1,8) (Veure figura 5.7).
- Un parell de 540Nm (que correspon a 120Nm·relació de transmissió)

Mallat:

S'ha mallat amb una malla gruixuda als punts de menys interès de fallida, i amb una malla més fina als punts més vulnerables de fallada mecànica, com per exemple radis petits, els forats del cargol (que acaben sent els que transmeten el parella la roda...)

Finalment, la malla va ser la observada a la Figura 5.17, i posteriorment a les figures 5.18 i 5.19 es pot observar el resultat de les simulacions.

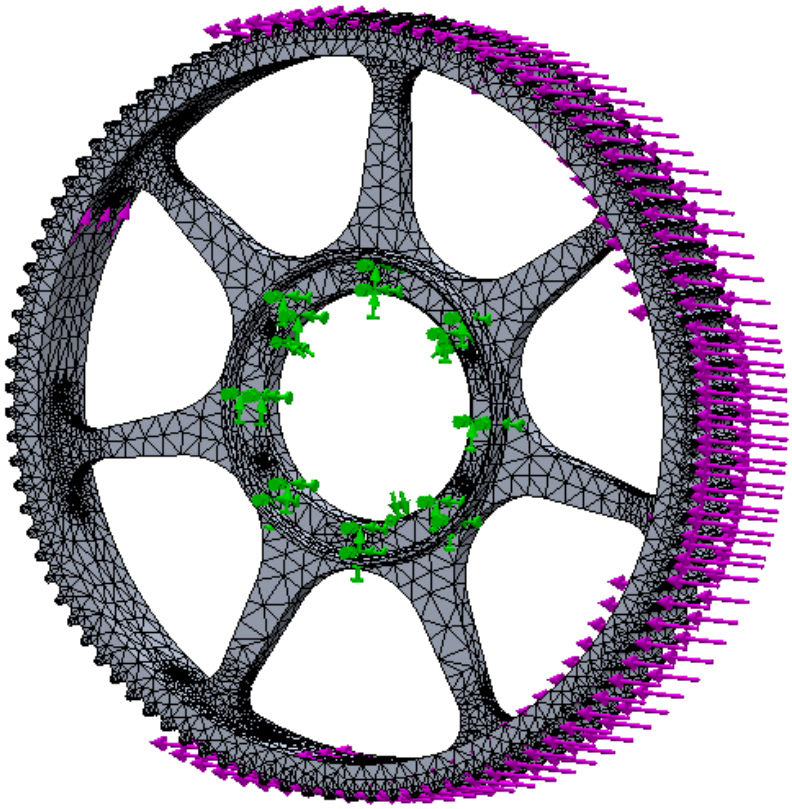


Figura 5. 17. Vista final amb les càrregues (violeta) fixacions (verd) i mallat

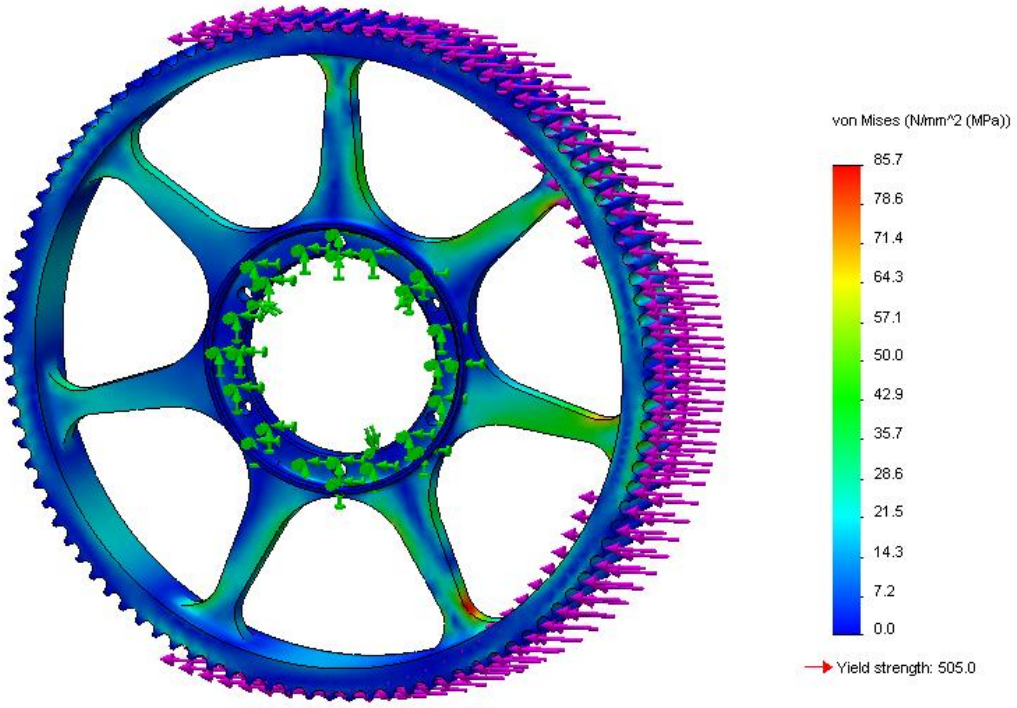


Figura 5. 18. Càrregues a la simulació (Tensió Von Mises)

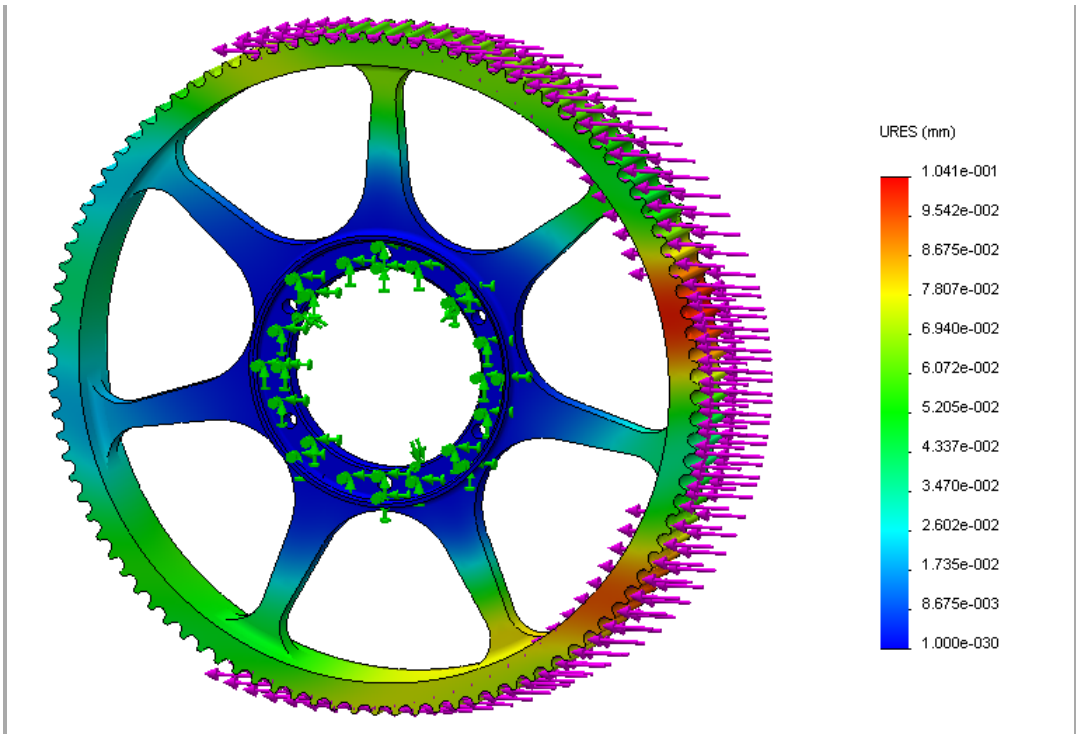


Figura 5. 19. Desplaçaments calculats amb la simulació

Figura 5. 20. Politges finals

Finalment, a la figura 5.21 es poden veure les peces que formen aquest assemblatge, les peces reals sobre els motors a la figura 5.22

Figura 5. 21. Especejament de l'assemblatge de politges

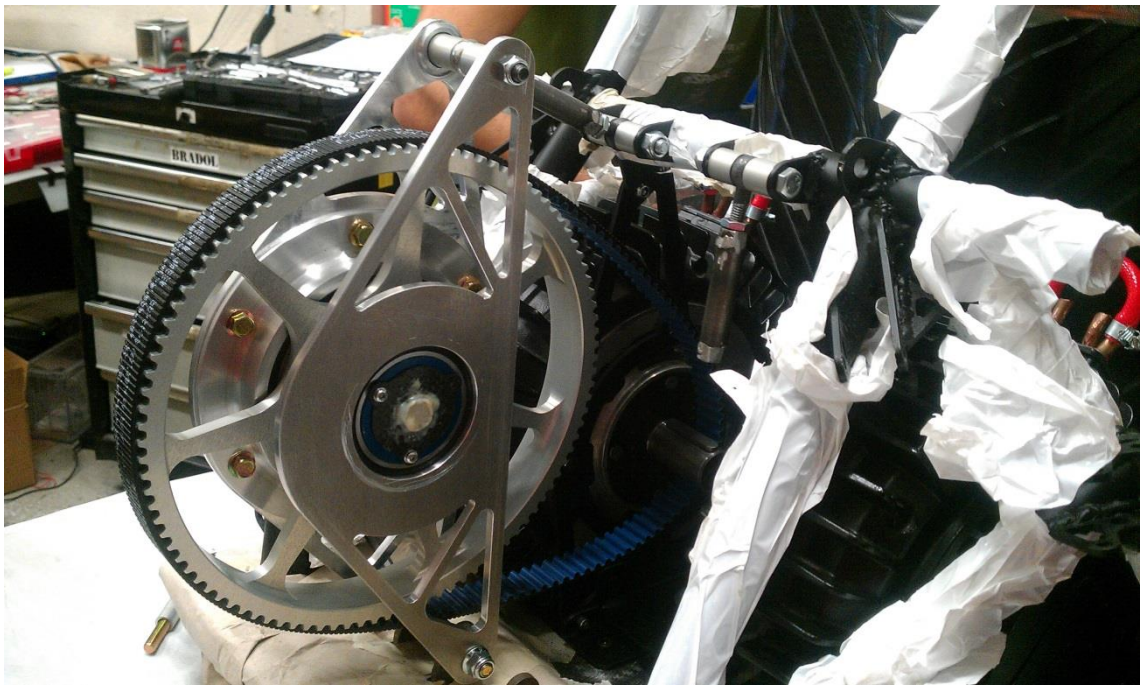


Figura 5. 22. Politja conduïda ubicada a la seva posició

5.7. Sistema de tensat

La distància entre eixos dissenyada és 237,5 mm.

S'ha decidit dissenyar un sistema de tensió independent per a cada parell de politges. De l'experiència de a temporada anterior, se'n va concloure que qualsevol petit error en la fabricació dels suports dels motors, en tenir un sol sistema de tensió d'ambdues corretges podria, significar tensions desiguals als dos sistemes. Això bàsicament vol dir que una de les cintes sempre estaria fora del rang de tensió òptima, el que podria provocar que la corretja llisqui fora de la politja, malmetre's o fins i tot trencar-se.

El sistema proposat consisteix en dos suports laterals, cadascun d'ells deixa girar a una politja conduïda respecte seu, i està fixat al bastidor del cotxe. Aquests suports poden pivotar al voltant del seu punt més baix a fi d'ajustar la distància de centre de forma independent per a cada una de la politja (veure figura 5.23). D'aquesta manera, es necessitaran dos sistemes de tensat en el Cat06e. Un altre avantatge d'aquest sistema és que permet un canvi molt ràpid de la corretja.

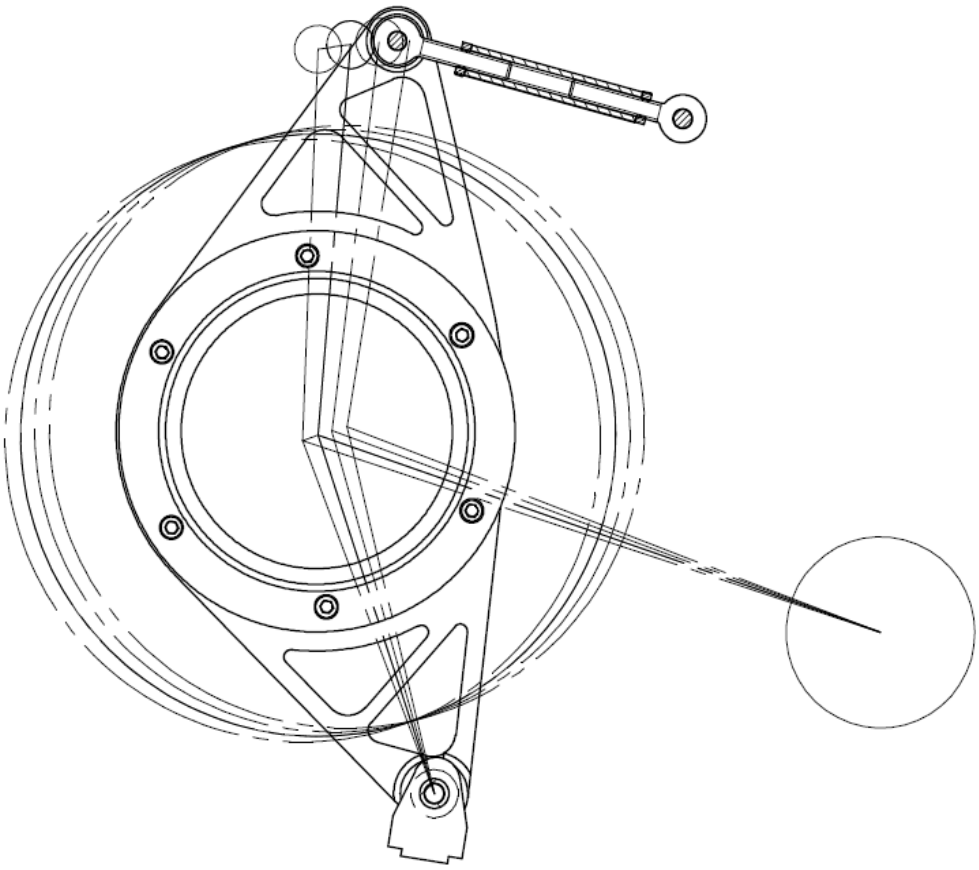


Figura 5. 23. Esquema del sistema de tensat

Com es pot observar a la Figura 5.24 la femella tensora està conformada amb un tub d'acer, amb una femella a dretes soldada a un extrem, i una femella a esquerres soldada a l'altre extrem

Figura 5. 24. Especejament de la femella tensora

El sistema ha estat dissenyat de la següent manera:

Amb càlculs gràfics de la geometria, i amb l'ajuda de *GATES*, s'ha estimat que la distància entre centres per la instal·lació de la corretja és de 220,2mm, i la distància entre centres de funcionament és de 237,5 mm. Les separacions corresponents a la part de la femella tensora corresponen a 108 mm i 150 mm respectivament. Això implica que necessitem un allargament de la distància de 42mm en total, 21mm per banda.

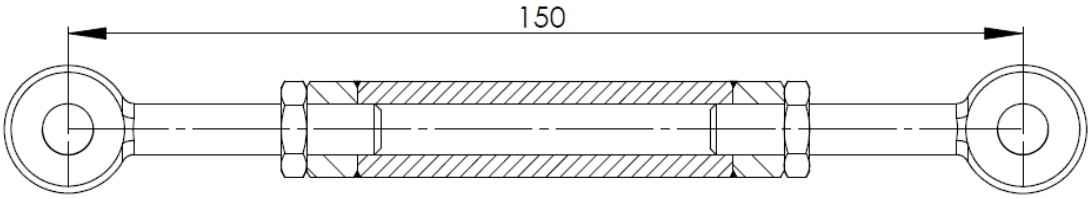


Figura 5. 25. Esquema del sistema separador al punt de màxim tensat

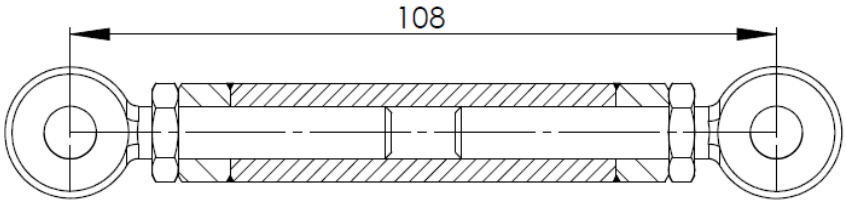


Figura 5. 26. Esquema del sistema separador al punt de màxim destensat

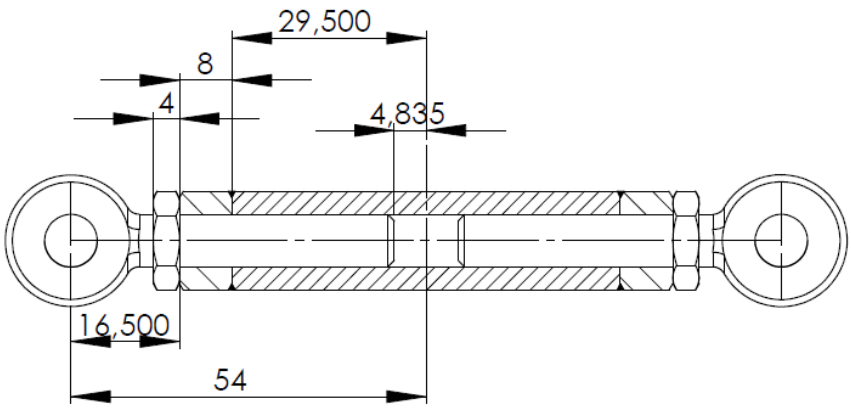


Figura 5. 27. Dimensions finals del sistema separador al punt de màxim destensat

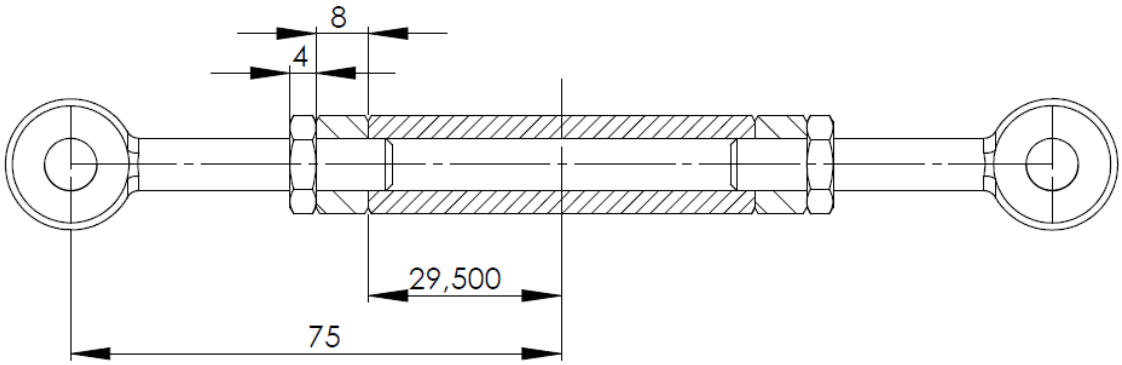


Figura 5. 28. Dimensions finals del sistema separador al punt de màxim destensat

Com es pot comprovar a les Figures 5.27 i 5.28, amb aquesta configuració es s'obtenen les distàncies desitjades deixant encara una mica de marge de rosca fora la femella, i deixant un espai entremig dels dos mascles roscats per tal que no es toquin al destensar al màxim.

D'aquesta manera, les peces que es necessiten per la part separadora són les següents:

Peça	Quantitat
Tub d'acer 15mm⌀ext i 8mm ⌀int x59mm long	2
DIN 444 M8x50 rosca a dretes	2
DIN 444 M8x50 rosca a esquerres	2
DIN 936 M8 rosca a dretes	2
DIN 936 M8 rosca a esquerres	2
DIN 982 M8 rosca a dretes	2
DIN 982 M8 rosca a esquerres	2

Taula 5. 8. Especejament peces sistema de tensat

L'accessibilitat i la facilitat de desmuntatge d'aquest sistema també és quelcom digne d'esmentar. Amb aquest sistema només cal treure un cargol i afluixar-ne un altre de cada sistema independent de tensat per aconseguir destensar el sistema, i si es vol treure la corretja només cal acabar de treure el cargol que s'ha afluixat. En definitiva, que amb aquest sistema només et cal treure 2 cargols ben accessibles per a treure la corretja per si s'hagués de canviar, o es necessités espai per accedir als motors.

Per falta de temps, per les competicions no es va poder implementar una solució millorada d'aquest sistema separador. El sistema és el mateix, l'únic que un tub buit de fibra de carboni substitueix el tub d'acer, i uns inserts d'aliatge d'alumini 7075-T6 adhesivats substitueixen les femelles i la soldadura a cada extrem del tub. El resultat final seria molt més lleuger i igual de fiable, quedant de la manera que ens mostra la Figura 5.29.

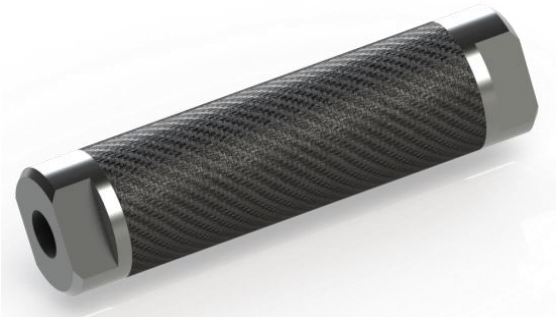


Figura 5. 29. Sistema separador fet amb fibra de carboni i inserts d'alumini adhesivats

Per mesurar la tensió de les corretges s'utilitza un sistema detallat a l'Annex F. Aquest sistema dona la precisió suficient i per a mantenir la tensió dins els marges recomanats pel fabricant.

Per començar a explicar part a part el sistema de tensat i suport de les politges, s'ha cregut necessari primer presentar la solució total, amb un especejament per fer més entenedor el sistema, i que el lector pugui veure on va cada peça

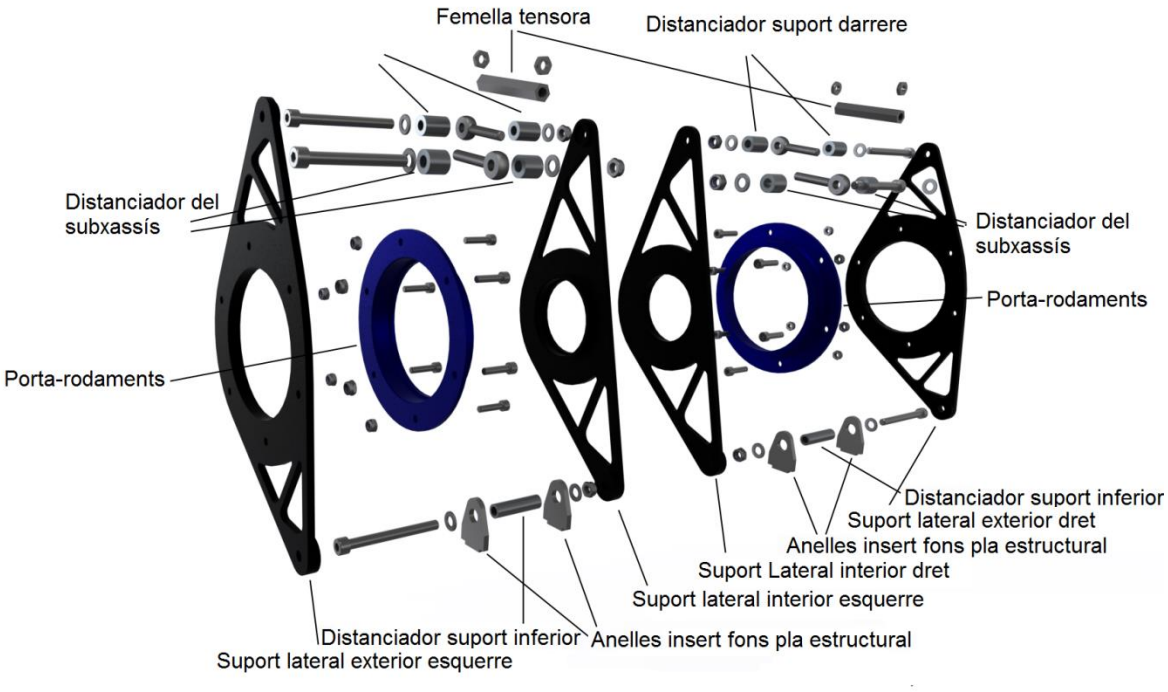


Figura 5. 30. Especejament del sistema de tensat

A l'especejament que es pot observar a la figura immediatament superior, es veu l'estructura general de tot el sistema de tensat i de suport de les politges (per duplicat). Les "Anelles insert fons pla estructural" i els "Distanciadors del subxassís" són fixes a la mateixa referència, però el balancí pot pivotar per l'articulació on hi ha el "Distanciador suport inferior".

Els balancins tenen un forat al centre per poder-hi allotjar un eix per a cada politja. Més endavant, a l'apartat "*5.11. Càlcul de rodaments"*, es detallarà l'eix de la politja amb els seus rodaments.

Peces		Cargoleria	
Nom	unitats	Nom	unitats
Distanciador del subxassís	4	DIN 912 M6X25 8.8	12
Distanciador suport de darrere	4	DIN 982 M6 8.8	12
Femella tensora	2	DIN 921 M8X70 8.8	2
Suport lateral interior dret	1	DIN 921 M8X80 8.8	4
Suport lateral interior esquerre	1	DIN 125 M8	12
Suport lateral exterior dret	1	DIN 982 M8 8.8	6
Suport lateral exterior esquerre	1	DIN 444 M8X50 8.8 ROSCA DRETES	2
Porta-Rodaments	2	DIN 444 M8X50 8.8 ROSCA ESQUERRES	2
Anelles insert fons pla estructural	4	DIN 936 M8 8.8	4
Distanciador suport inferior	2		

Taula 5. 9. Especejament del sistema de tensat

5.7.1. Balancins

Per tal de poder suportar les politges conduïdes, s'ha dissenyat uns balancins encarregats de pivotar al voltant d'un punt fix del fons pla estructural.

Per tal de aconseguir més rigidesa a l'estructura, finalment s'ha dissenyat el sistema amb dos balancins, separats en dos punts per uns distanciadors d'alumini. El disseny i la distribució dels components es detalla a continuació:

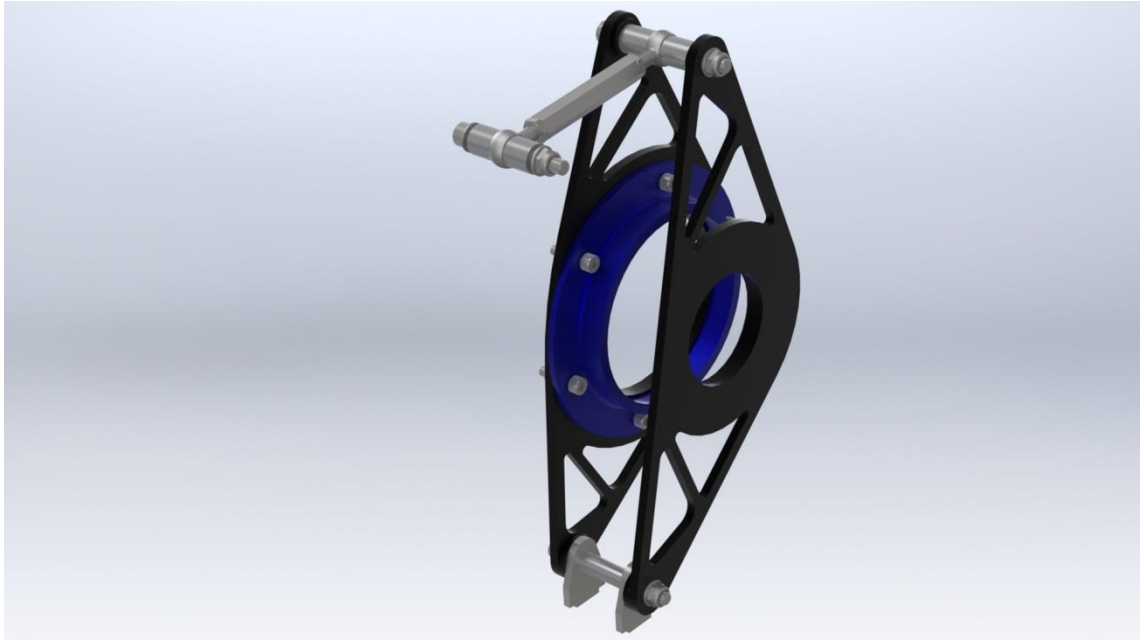


Figura 5. 31. Balancins amb sistema separador incorporat

Per fabricar aquests balancins s'han emprat dues tècniques de mecanització consecutives. Primer de tot es desbasta la forma del balancí amb la tècnica del tall amb aigua, que no dona unes molt bones toleràncies. Posteriorment s'ha portat el resultat a mecanitzar, per aconseguir la forma i les toleràncies desitjades, ja que hi ha toleràncies fines en els allotjaments dels rodaments, en les posicions dels forats pels cargols, i per allotjar-hi el porta-rodaments, cargolat amb 6 cargols amb femelles autoblocants.

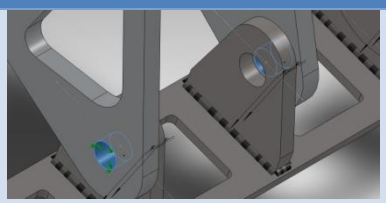
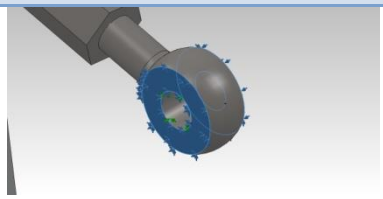
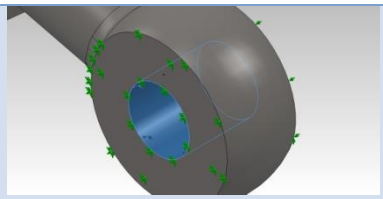
Per tal de decidir les formes dels balancins s'han tingut en compte els següents objectius:

- Menor pes possible
- Més barat possible
- Mes petits possibles, per tal d'aconseguir el sistema compacte
- Resistents als esforços del vehicle a màxim rendiment

Per a fer simulacions dels balancins i dels elements de fixació amb el fons pla estructural s'ha considerat el pitjor cas possible: Una corba a màxima velocitat i el sistema tensat al màxim.

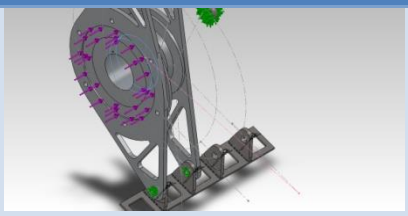
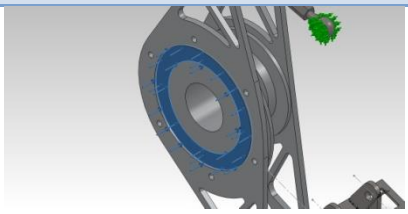
S'ha decidit fer els balancins d'aliatge d'alumini 7075-T6 per aconseguir una bona relació de propietats mecàniques - pes.

Les fixacions de les simulacions són les següents:

Nom de la Fixació	Imatge	Tipus de fixació
Fixació Anelles		2 cares Rotació permesa L'insert inferior restarà immòbil
Fixació lateral suport del subxassís		2 cares Translació impedida
Rotació Lateral suport del subxassís		1 cara Rotació permesa

Taula 5. 10. Fixacions simulació balancins

Les càrregues suposades són les següents:

Nom de la Càrrega	Imatge	Valor i tipus de càrrega
Tensió		Valor: 8000N Tipus: força aplicada com una pressió sobre la cara cilíndrica.
Força lateral		Valor: 400N Tipus: força aplicada com una pressió sobre una cara plana, on aniria situada aquesta realment.

Taula 5. 11. Càrregues simulació balancins

S'ha considerat una força de tensió de 8000N agafant la força de tensat real i aplicant-hi un coeficient de seguretat de 1,33.

La força lateral per a la simulació correspon a la força que pot fer el conjunt palier-tripods sobre el suport, al agafar una corba a gran acceleració lateral. El conjunt roda – boixa no ha estat considerat ja que les seves reaccions a les corbes es troben suportades pel sistema de suspensions, i van a parar al xassís. En una corba a 5G, pesant el conjunt paliers 4kg, correspon a una força lateral d'uns 200N. S'ha aplicat un factor de seguretat de 2 a aquesta força donant 400N per la simulació.

S'han fet unes quantes iteracions de simulacions amb diferents formes i gruixos pels balancins. A les Figures 5.32 i 5.33 es pot observar una mica l'evolució de la forma dels balancins d'esquerra a dreta, sent el de la dreta el balancí resultant.

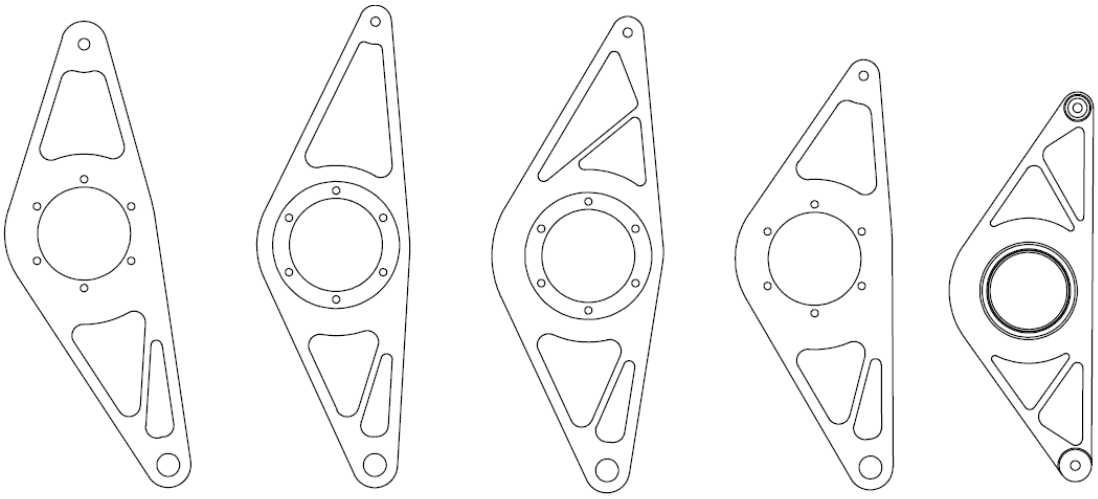


Figura 5. 32. Evolució del balancí intern fins al disseny final

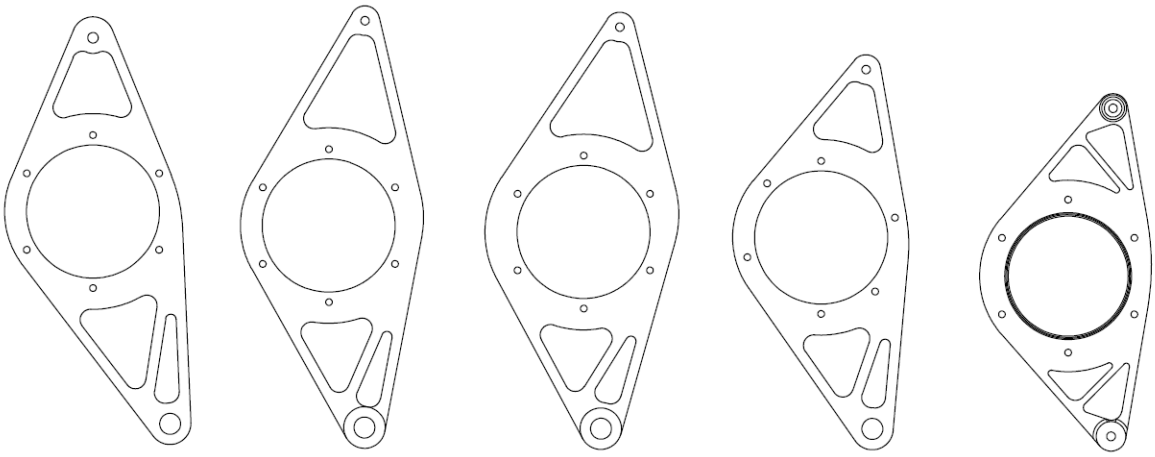


Figura 5. 33. Evolució del balancí extern fins al disseny final.

Cal comentar que aquestes simulacions es van fer com a una prioritat en el projecte, i no es va haver de mirar les càrregues de reacció que es provocaven en el subxassís i en el fons pla, sinó que a conseqüència d'aquests resultats, els responsables del xassís comprovaven que les carregues no sobrepassaven els seus límits. En el cas del fons pla, amb unes simulacions similars, es va aconseguir definir el nombre de capes de fibra de carboni amb els que havia de ser construït.

Mallat:

Figura 5. 34. Mallat per a la simulació dels balancins

Resultats:

Tensions de Von Mises:

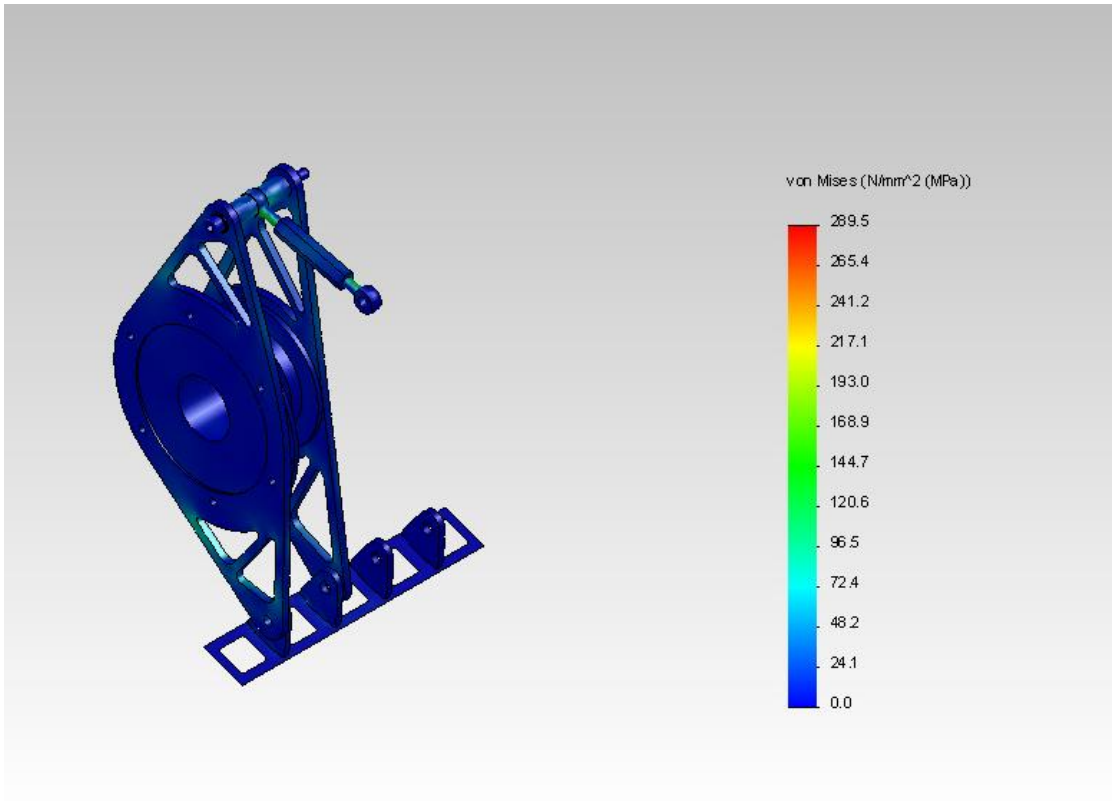


Figura 5. 35. Resultats de Von Mises per la simulació dels balancins

Desplaçaments:

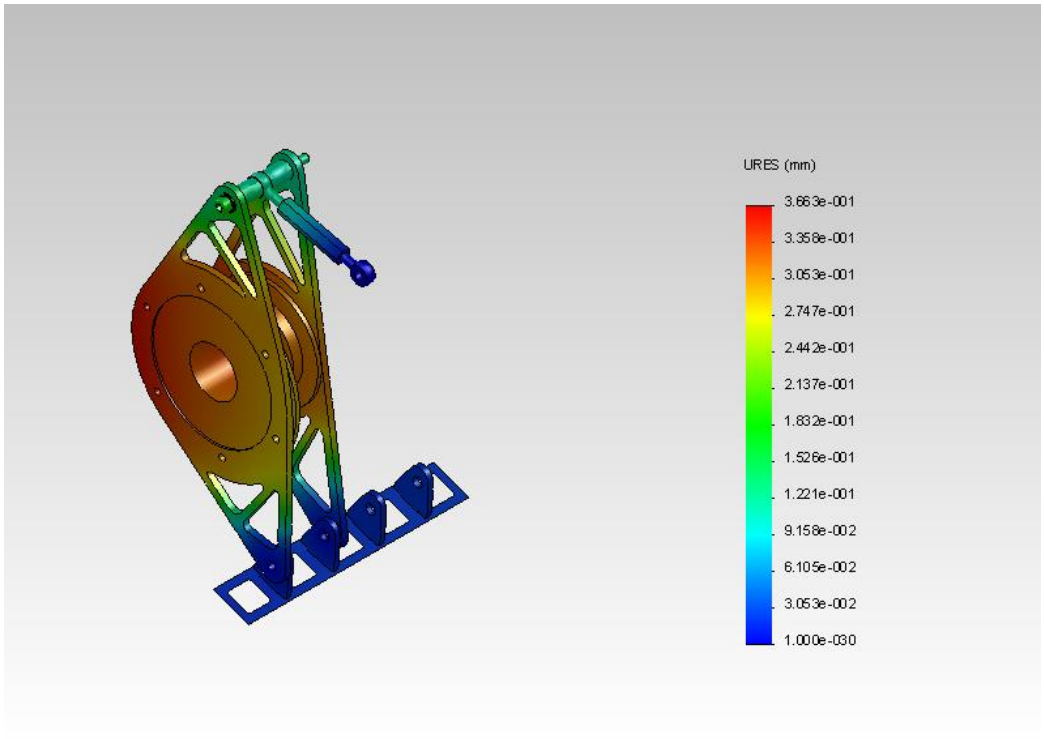


Figura 5. 36. Resultats de desplaçaments per la simulació dels balancins

Dels resultats cal que les tensions observades (289,5 MPa) no superen el límit de resistència (505 Mpa), i ens deixa amb un factor de seguretat de 1,74. Els desplaçaments són més que acceptables; 0.37 mm el més accentuat, i té sentit ja que està situat al punt entremig dels 2 recolzaments.

Cal afegir finalment que tan els 2 balancins interiors com els 2 balancins exteriors no són iguals, sinó que tenen simetries reflectives o de mirall. Les simulacions són aplicables per les dues bandes, però cal tenir-ho ne compte a l'hora de fabricar-ho. Només cal afegir una indicació oportuna com la de la Figura 5.37.

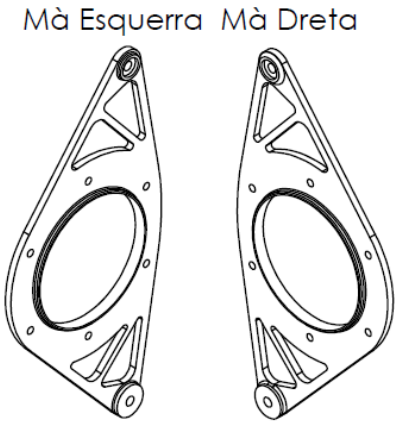


Figura 5. 37. Mà Esquerra – Mà Dreta

5.7.2. Insert fons pla estructural i anelles

l'insert al fons pla estructural i les anelles és una peça que la seva principal funció és unir el sistema de transmissió del CAT06e amb el xassís d'aquest. La idea principal és com la que es pot observar a la Figura 5.38, aquesta va ser la primera idea que l'equip va tenir per al seu disseny, una peça metàl·lica amb una part plana per recolzar-la a la superfície plana del xassís, i unes orelles que s'han anomenat anelles, que són les que interactuen amb la part de transmissió.

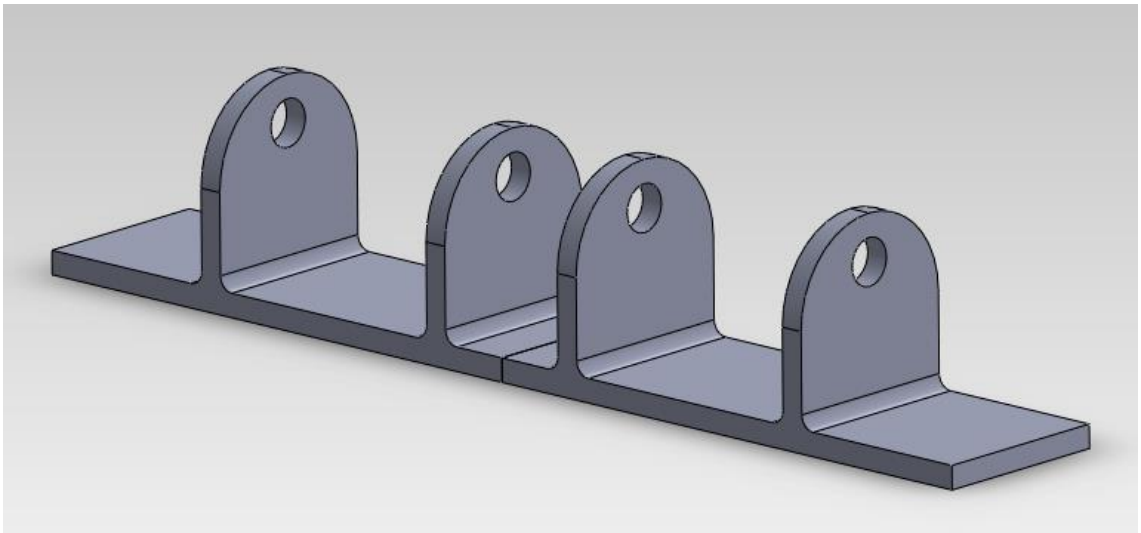


Figura 5. 38. Idea inicial de l'insert del fons pla

Per a fer real, fabricable i econòmica aquesta idea, es va arribar a la conclusió que la millor solució era utilitzar la tècnica del tall en laser, i posteriorment emprar la soldadura per acabar de obtenir la peça final.

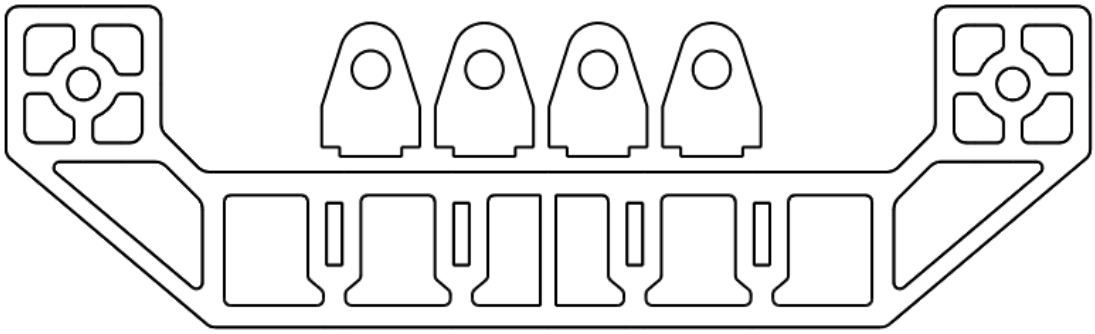


Figura 5. 39. Disseny final de l'insert del fons pla preparat pel tall en laser

La figura 5.39 mostra el disseny final de la peça, i la presentació enviada a la empresa encarregada de fer-li el tall laser. Com es pot observar s'ha optimitzat la forma, buidant els espais poc crítics de la peça per reduir el màxim el seu pes, ja que com que és d'acer no cal que sigui massissa. També s'ha afegit al disseny uns elements posicionadors (les ales de la dreta i l'esquerra) que posicionen perfectament al fons pla estructural mitjançant els cargols del subxassís, i així es te la seguretat que les cotes són fidels als càlculs.

Com es pot observar a la Figura 5.40, s'ha dissenyat la pestanya de la anella més curta que el gruix de l'insert, per poder fer més cordons de soldadura. D'aquesta manera s'aconsegueix soldar la peça per dos cordons en comptes d'un.

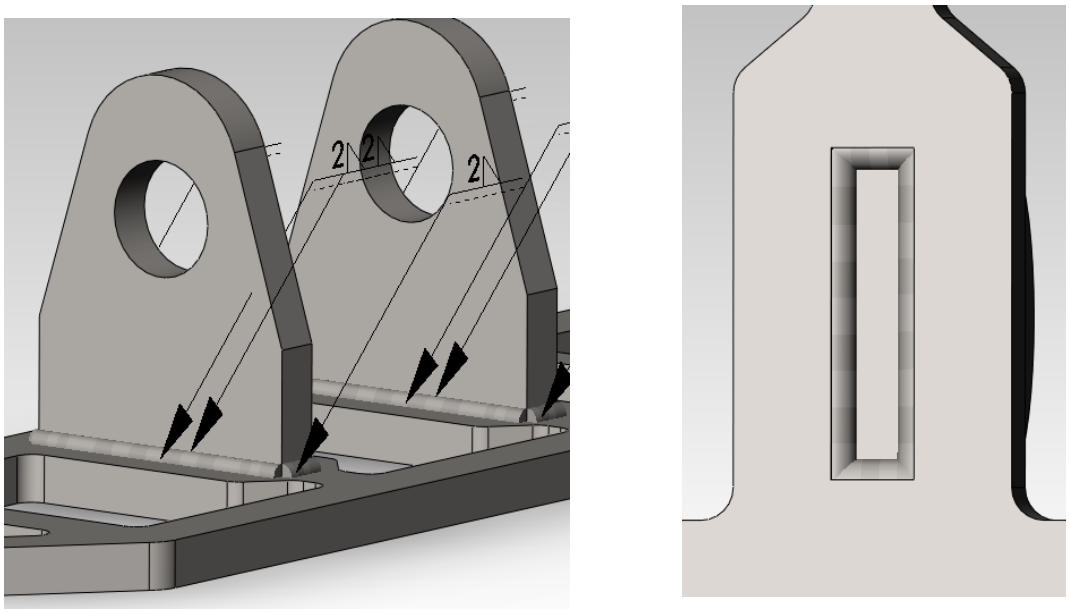


Figura 5. 40. Soldadura superior i soldadura inferior

Finalment, la tècnica que s'ha decidit emprar per unir-ho en el fons pla estructural ha estat la de sanwich-insert en el procés de conformat del material compost (fibra de carboni) en el fons pla. L'estructura en sanwich consisteix en un nucli de material, recobert per varies capes de fibra de carboni amb resina, laminades una per una sobre aquest nucli. El nucli serveix per a donar més rigidesa a la peça. Amb aquesta tècnica, es substitueix la part del nucli corresponent a l'insert per aquest, i es lamina el material compost a sobre com si fos nucli en la seva totalitat. Un cop acabat el procés de laminat, et queda la teva peça composta, però amb una peça d'acer inserida a l'interior (d'aquí el nom d'"insert" de la peça) que normalment serveix per cargolar cargols, o per resoldre problemes com el que aquí es resol.

És important remarcar que el nucli ha de tenir el mateix gruix que l'insert, i en aquest cas el té (5 mm)

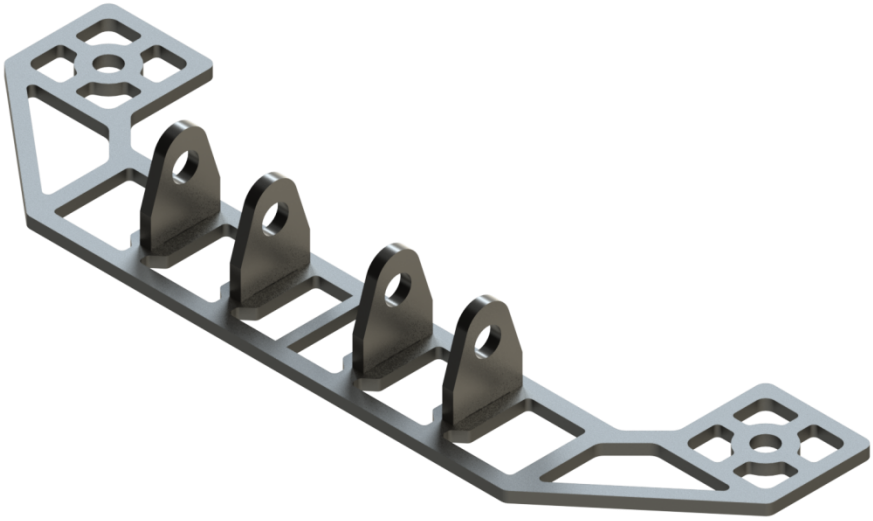


Figura 5. 41. Imatge renderitzada del disseny fina de l'insert del fons pla, soldat.

Figura 5. 42. Foto de l'insert soldat amb les anelles, i l'útil utilitzat

5.7.3. Distanciadors

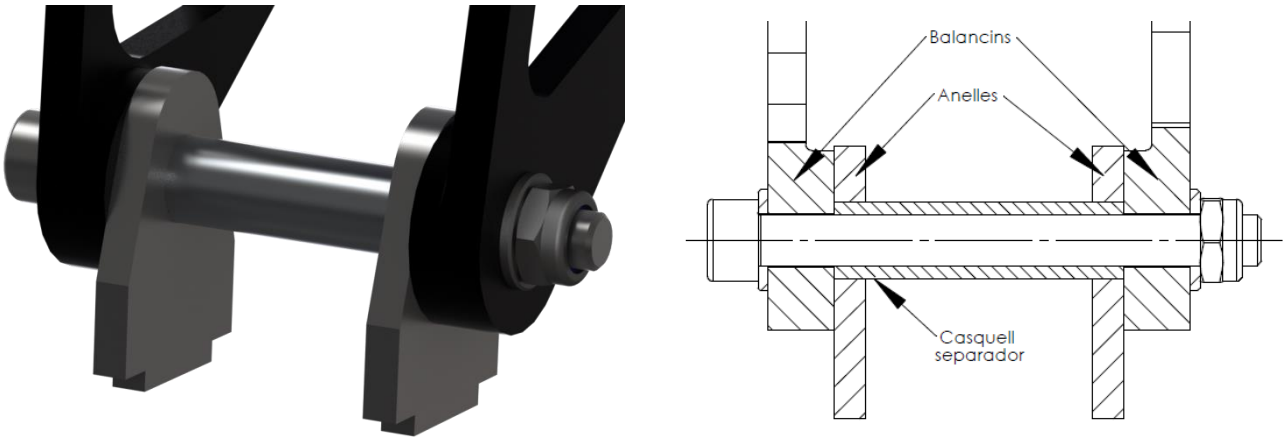


Figura 5. 43. Distanciador separador inferior dels balancins

A la part inferior, els balancins estan separats per un distanciador, i aquest, està suportat per unes anelles solidàries a l'insert del fons estructural del vehicle (Veure apartat "*5.7.2.Insert fons pla estructural*").

La decisió de fer passar el distanciador per dins les anelles va ser presa per aconseguir que els balancins només fossin separats per una sola peça, i ja que aquest és el punt de pivot dels balancins per aconseguir la distància entre centres desitjada, el cargol pivota en tota la seva superfície circular sobre el distanciador, i no sobre unes petites parts, que serien les que estarien en contacte amb les anelles .

El cargol, pressiona el trio balancí–Distanciador–balancí, generant així un sistema més robust.

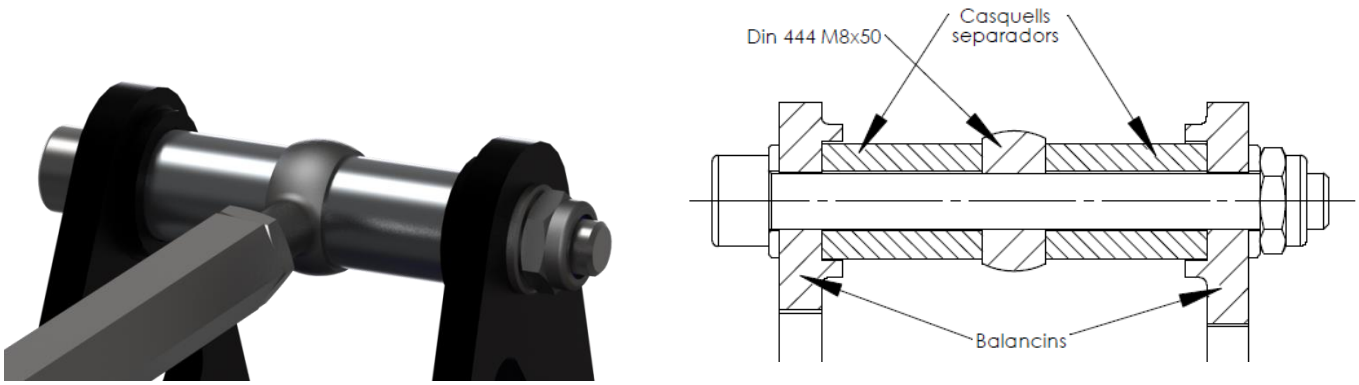


Figura 5. 44. Distanciador separador superior dels balancins

Superiorment, el millor sistema seria utilitzar un sol distanciador com a la part inferior, però com s'observa a la Figura 5.44, cal ensamblar la peça "DIN 444 M8x50" a la meitat de la separació dels balancins per poder tensar.

Aquests distanciadors van ser mecanitzats pel propi equip de l'ETSEIB MOTORSPORT al torn del que disposaven al taller H-1 de l'escola. Les operacions de tornejat són les següents: primer es fa un cilindrat exterior al diàmetre desitjat, seguit d'un taladrat interior fet amb el capçal del mateix torn, i per acabar troncar a la distancia desitjada, i rebaixar el resultat final.

El material d'ambdós distanciadors és d'aliatge d'alumini 7075-T6

Unió amb paliers:

Finalment, hi ha d'haver alguna interacció entre la politja i els paliers per tal que es pugui transmetre el moviment de la politja a les rodes. També és necessària alguna interacció dels balancins amb la politja, o amb els paliers, per tal de suportar-ho tot.

En aquest apartat es detallarà aquesta unió dels dos assemblatges, començant per la unió del conjunt paliers amb els balancins, i després com s'uneix la politja conduïda amb el conjunt paliers.

5.8. Junta Homocinètica

El sistema de suspensió dels cotxes és indispensable pel bon funcionament d'aquests, i imprescindible per un bon pas per corba. No obstant, com que la suspensió permet un lleuger moviment de les rodes respecte el motor i el sistema de transmissió, és necessari que entre aquests dos hi hagi un element que permeti transmetre moviment amb un petit recorregut axial, i que també permeti treballar amb diferents angles. Aquest és el cas de les juntes homocinètiques.

Una junta homocinètica és una peça complexa que unida al palier de transmissió, té la missió de connectar dos eixos disposats longitudinalment, no contigus, de manera que la velocitat entre ells sigui igual en tot moment. Les juntes homocinètiques són unions articulades. Com una ròtula, però més complexa, que permet els moviments sense perdre tracció ni malmetre les transmissions amb el moviment oscil·latori de les rodes que permeten les suspensions.

En el cas de l'equip ETSEIB MOTORSPORT, sempre ha treballat amb juntes Tripod, i per aquesta solució és la que s'ha decantat l'equip per a implementar el CAT06e.

Les juntes Tripod consten de dues parts:

- *Housing*: Carcassa metàl·lica adjunta a la transmissió, o a la boixa de la roda.
- Tripod: part del palier de la junta homocinètica, amb 3 cilindres metàl·lics per poder girar fàcilment per dins de la carcassa

Finalment, el conjunt palier –carcassa ha de quedar de la següent manera:

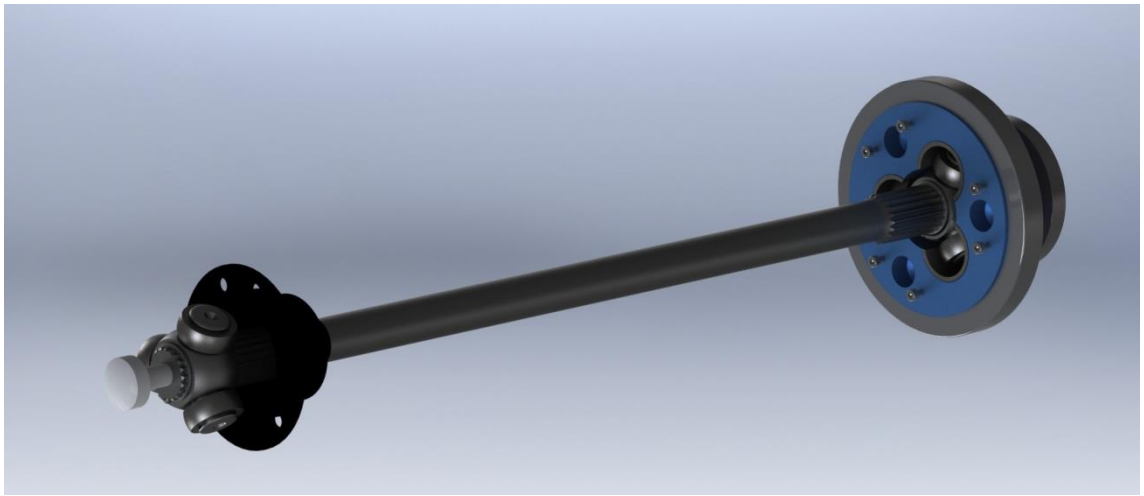


Figura 5. 45. Conjunt palier – Tripod

Per tal de ser coherents l'objectiu de reducció de pes del CAT06e, s'han dissenyat unes carcasses de la tripod d'aliatge d'alumini 7075-T6, ja que els comercials són d'acer i augmenten molt el pes, i la inèrcia del conjunt motor-roda.

Per tal de poder mecanitzar aquest element i que compleixi perfectament la seva funció, s'ha hagut de dividir la peça en dues parts, tal com es pot observar a les Figures 5.46 i 5.47.

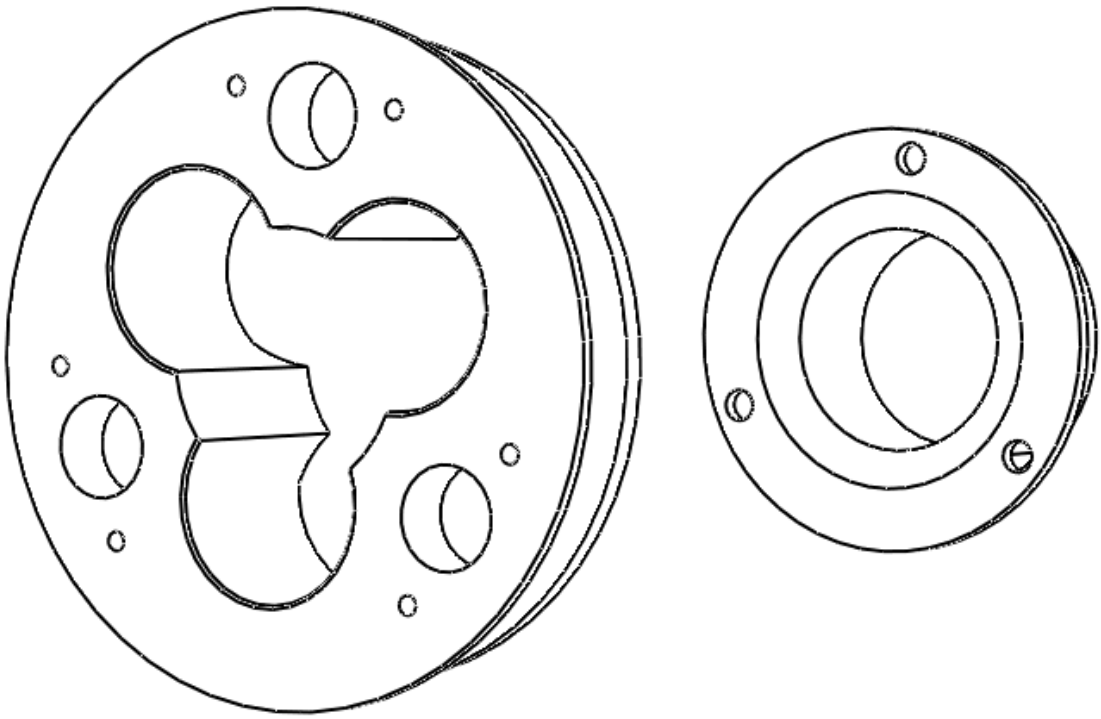


Figura 5. 46. Esquema 3D de les dues peces de la carcassa de la tripod

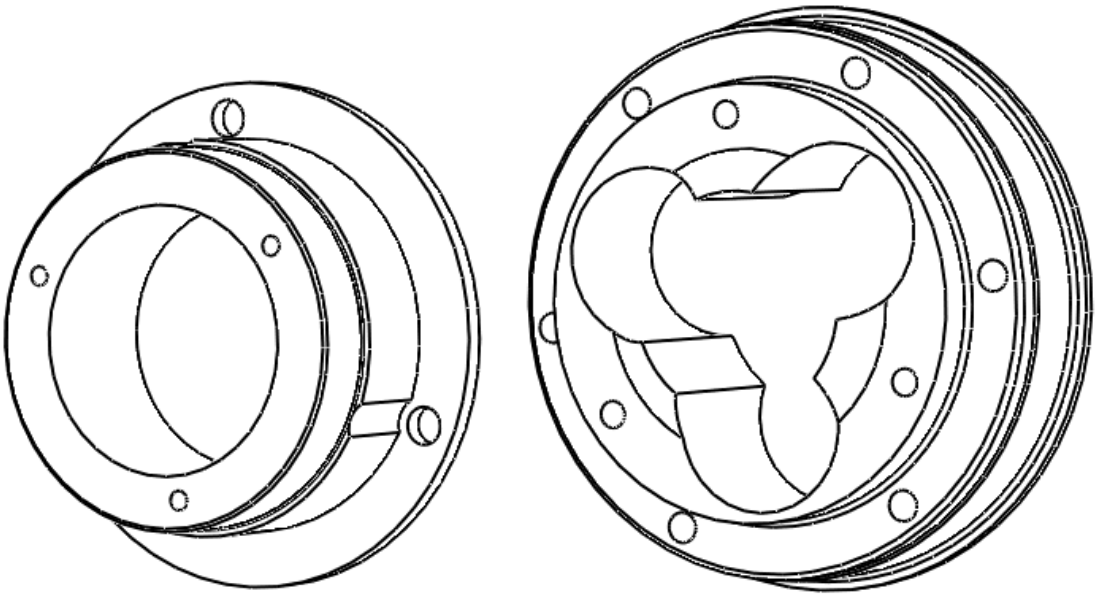


Figura 5. 47. Esquema 3D de les dues peces de la carcassa de la tripod

Aquestes dues peces van ben centrades per un con, però aquest con només hi és parcialment degut als forats necessaris per inserir la tripod. Aquest centrador es pot observar a la següent figura, amb els forats per reduir pes en zones menys crítiques, i els forats pels cargols d'unió de les dues peces.

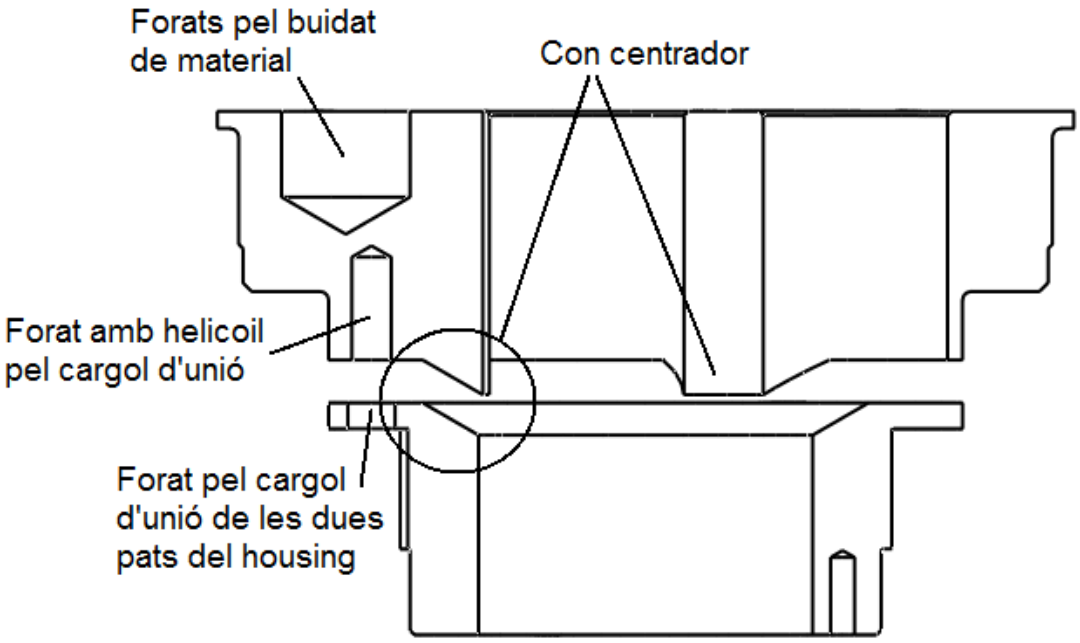


Figura 5. 48. Centratge, cargol d'unió i forats de buidat de material

Per l'experiència que l'equip ha desenvolupat durant altres anys, i seguint els consells d'altres equips, s'ha arribat a la conclusió que el contacte entre les tripods i els paliers és massa puntual, i podria fer

una pressió que l'alumini no aguantés. Per això s'ha decidit mantenir el cos de la peça d'aliatge d'alumini 7075-T6, però posar uns inserts d'acer a les zones de contacte per tal que la peça no falli per pressions de contacte massa altes.

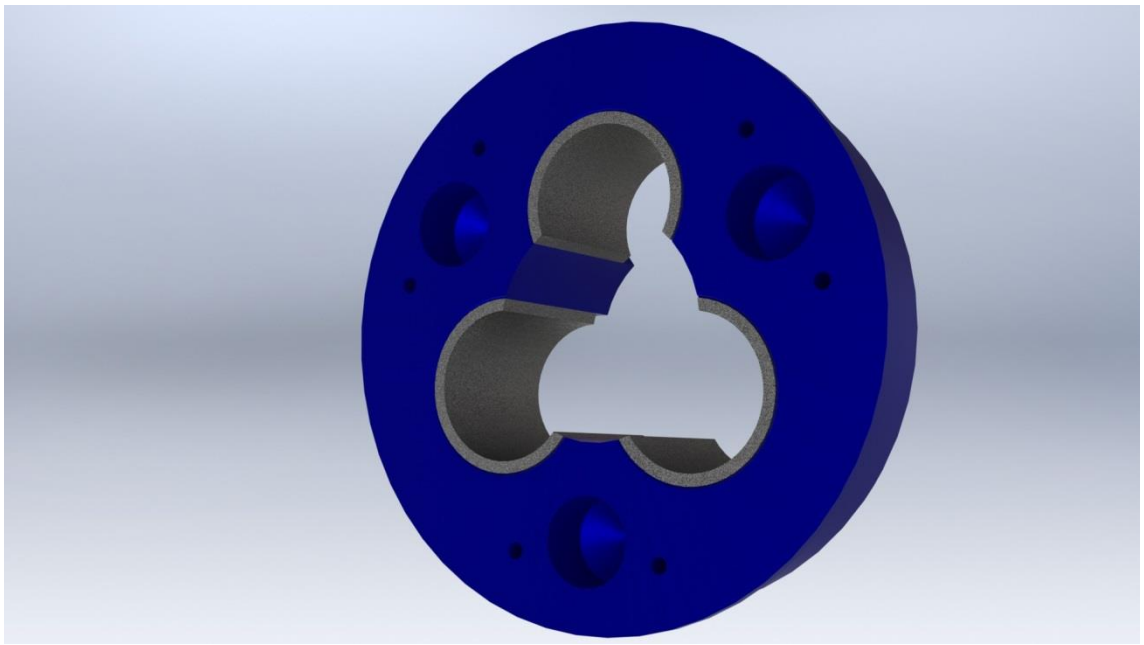


Figura 5. 49. Inserts d'acer a la carcassa de la tripod

Per tal de validar el disseny, s'ha simulat la peça de la carcassa en contacte amb la tripod. A continuació es detalla el procediment.

Primer de tot s'ha calculat el parell que ha de transmetre la carcassa de la tripod als cilindres d'aquesta:

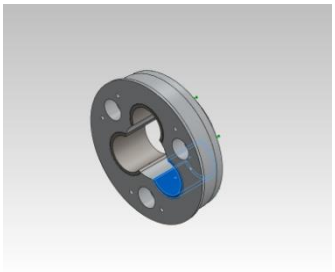
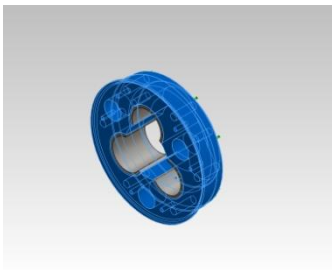
$$P_m = \Gamma_{\mathrm{m}} \cdot \omega_m \qquad \textit{(Eq. 5. 1)}$$

$$P_{tripod} = P_m \cdot \eta_{transmissió} \qquad \textit{(Eq. 5. 2)}$$

$$\left\{ \quad P_{tripod} = \Gamma_{\mathrm{tripod}} \cdot \omega_{tripod} = \Gamma_{\mathrm{m}} \cdot \omega_m \cdot \eta_{transmissió} \rightarrow \Gamma_{\mathrm{tripod}} = \eta_{transmissió} \cdot \Gamma_{\mathrm{m}} \cdot \frac{\omega_m}{\omega_{tripod}} \right.$$
$$= \eta_{transmissió} \cdot \Gamma_{\mathrm{m}} \cdot i_{trans} \rightarrow \quad \Gamma_{\mathrm{tripod}} = \eta_{transmissió} \cdot \Gamma_{\mathrm{m}} \cdot i_{trans} \simeq 120 \cdot 4{,}5$$
$$= 540\ Nm$$

S'ha simplificat que el $\eta_{transmissió}$ = 1, ja que tampoc se sap el valor exacte (entre 0,96 i 0,98) però si que se sap que aquest valor és molt pròxim a 1. Fent aquesta simplificació, no s'esta menystenint cap força sinó que s'està agafant un petit coeficient de seguretat per aquesta

Informació del model

Cossos sòlids			
Nom i referència	Tipus de cos	Propietats Volumètriques	Característiques
Inserts d'acer (x3) 	Sòlid	Cada insert: Massa:0.0253871 kg Volum:3.23402e-006 m^3 Densitat:7850 kg/m^3 Pes:0.248793 N	**DIN 1.7131 (AISI 5115)** **Límit elàstic superfície: >885MPa** **Duresa superficial (HB): < 205**
Carcassa 2 	Sòlid	Massa:0.292568 kg Volum:0.000104117 m^3 Densitat:2810 kg/m^3 Pes:2.86717 N	**Aliatge d'alumini 7075-(T6)** **Límit elàstic :505Mpa** **Duresa superficial (HB): 150**

Taula 5. 12. Detall simulació Inserts d'acer de la carcassa de la Tripod

Per a poder fer la simulació, ha calgut fer algunes simplificacions al model:

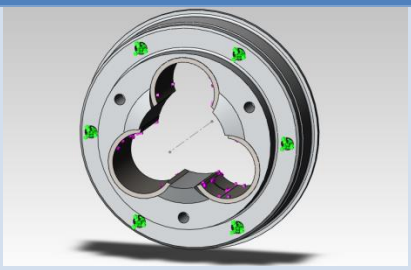
S'ha considerat el parell aplicat només en 3 punts de contacte, la qual força resultant és de:

$$\begin{cases} \Gamma_{\text{tripod}} = 540\ Nm \\ Radi\ força\ aplicada = 20{,}5mm \end{cases} \rightarrow \frac{540Nm}{20{,}50mm} \cdot \frac{1000mm}{1m} = 26341{,}46\ N$$

$$Si\ dividim\ la\ força\ en\ 3\ punts: \frac{26341{,}46\ N}{3\ punts} = 8780{,}49 \frac{N}{punt}$$

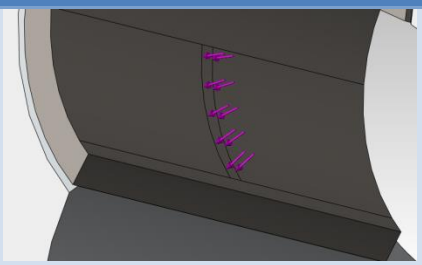
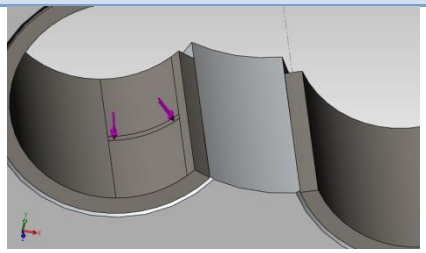
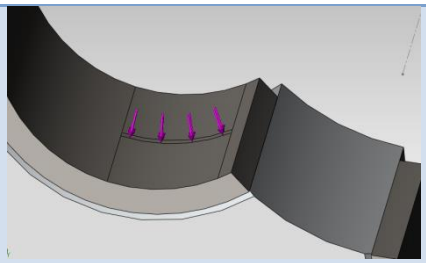
$$Amb\ un\ coeficient\ de\ seguretat\ aproximat\ d'1{,}2\ queda\ una\ força\ resultant\ de\ 10500\ N$$

Les fixacions de la simulació són les següents:

Nom de la Fixació	Imatge	Tipus de fixació
Fixació "cargols"		Fixació de tots els graus de llibertat

Taula 5. 13. Fixacions simulació Carcassa Tripod amb inserts d'acer

Les càrregues suposades són les següents:

Nom de la Càrrega	Imatge	Valor i tipus de càrrega
Força		Valor: 10500 N Tipus: força aplicada com una pressió sobre la superfície.
Força		Valor: 10500 N Tipus: força aplicada com una pressió sobre la superfície.
Força		Valor: 10500 N Tipus: força aplicada com una pressió sobre la superfície.

Taula 5. 14. Càrregues simulació Carcassa Tripod amb inserts d'acer

Resultats:

Mallat:

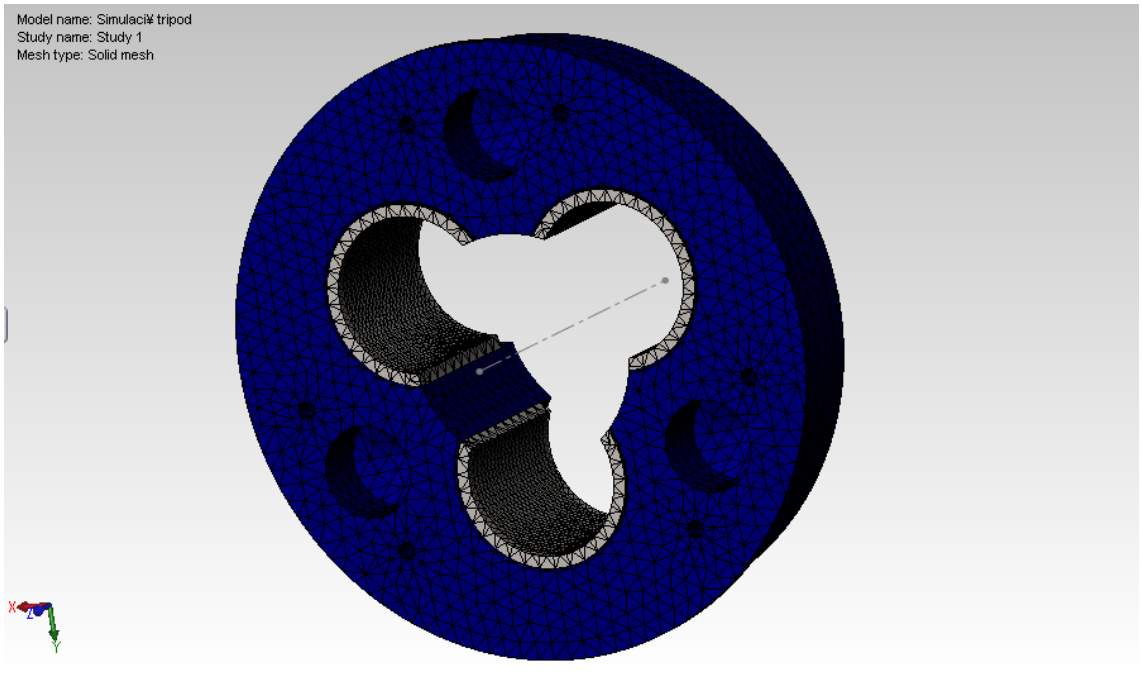


Figura 5. 50. Mallat de la peça per a la simulació

Tensió de Von Mises

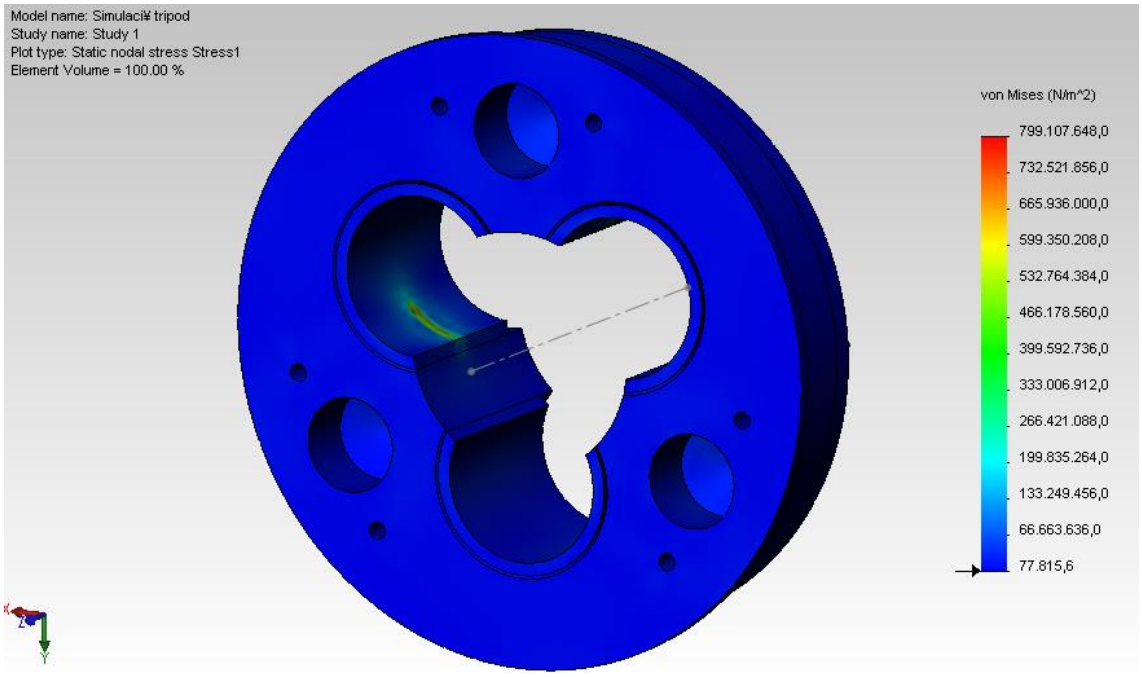


Figura 5. 51. Resultats de tensió de Von Mises per simulació carcassa Tripod amb inserts d'acer

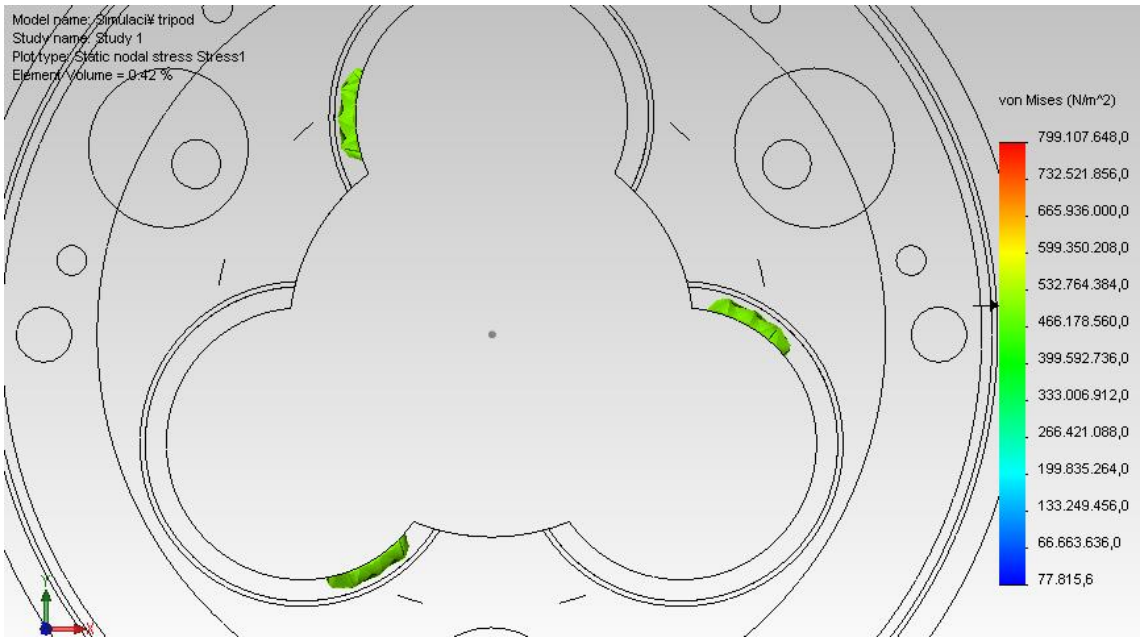


Figura 5. 52. Imatge Iso-Clipping al límit elàstic de laliatge de l'alumini 7075-T6

S'observa tan a la Figura 5.51 i 5.52 que la tensió màxima observada és de 799.107.648 N/m^2 (799,1 MPa).

Per analitzar aquestes tensions s'ha fet un estudi Iso-Clipping a la tensió de límit elàstic de l'aliatge 7075-T6 de l'alumini (505 MPa) per veure on estan aquestes tensions que apareixen, majors que aquesta tensió donada. S'observa clarament que les tensions superiors a 505 MPa només apareixen a les zones on s'han aplicat les forces puntuals, però en cap cas superen el gruix dels inserts d'acer que col·loquem. En cap cas, les tensions observades superen el valor del límit elàstic de l'acer AISI 5115, major que 885 MPa.

Amb aquesta simulació queda clar que com ja se suposava en un inici, si no s'haguessin posat els inserts d'acer la peça no hagués aguantat la pressió exercida per la tripod sobre la carcassa.

Per conformar els inserts d'acer s'han comprat uns tubs d'acer AISI 5115 amb la cota interior desitjada, s'ha rebaixat el diàmetre exterior amb el torn de la universitat, i s'ha tallat el tub a la mida desitjada.

Per inserir els inserts aa la carcassa s'ha emprat un adhesiu (locttite hysol), a part de la entrada amb interferència que ja incorpora. Periòdicament s'ha anat revisant la seva correcta col·locació però en cap moment es va detectar cap moviment dels inserts respecte la carcassa

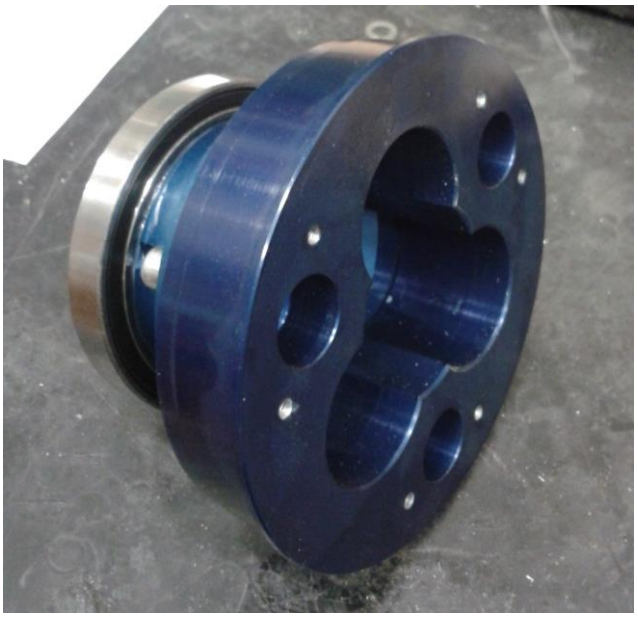


Figura 5. 53. Carcassa mecanitzada i anoditzada sense inserts d'acer

A causa de les oscil·lacions de les suspensions, la junta trípod permet un moviment angular i un moviment axial del palier respecte la tripod. Per acabar de tancar el disseny només cal ensenyar els elements emprats per limitar el moviment axial dels paliers dins de les carcasses de les tripods.

Per la banda de la corretja, el palier té limitat el seu moviment amb una peça suportada per un distanciador, aquest suportat per una tapa de fibra de carboni, cargolada a la peça petita de la carcassa de la tripod. Per la banda de la roda, la mateixa boixa limita el moviment del palier, però per la molla d'aquest encara és permès un moviment relatiu.

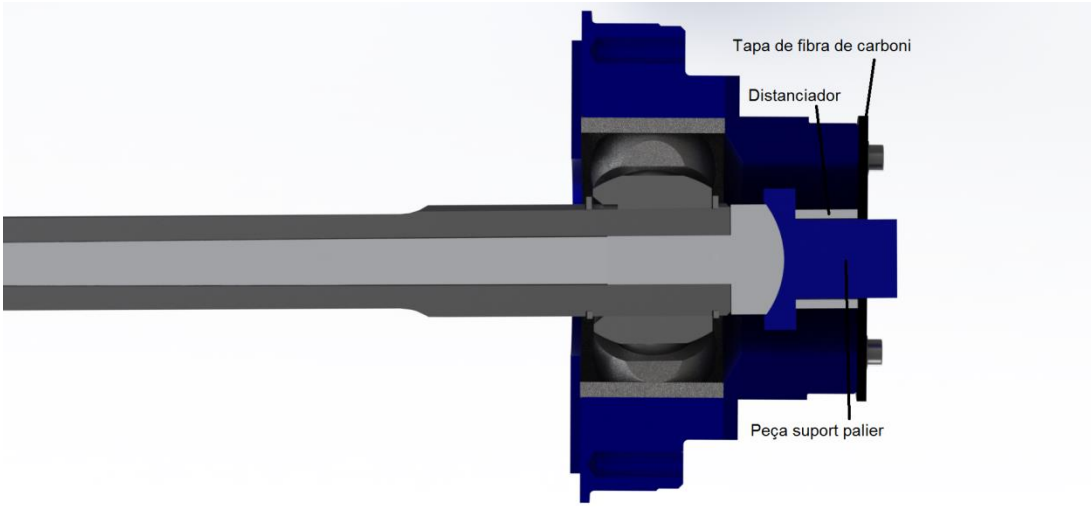


Figura 5. 54. Distanciadors i tapa de fibra de carboni

5.9. Paliers

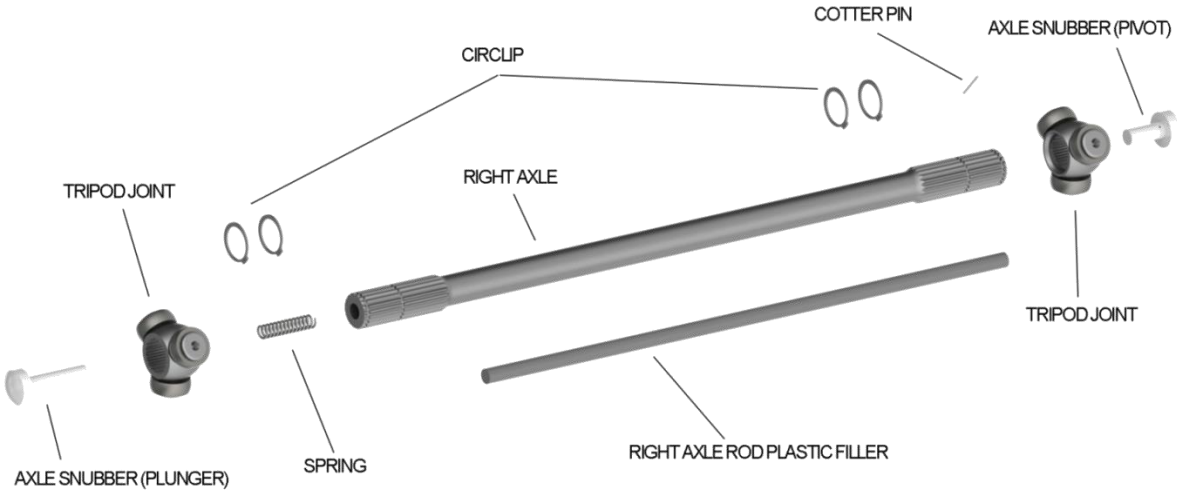


Figura 5. 55. Especejament dels paliers comercials

Figura 5. 56. Paliers amb barres de suspensió

Per absorbir el moviment de les rodes I el sistema de suspensions, cal l'ús d'aquest tipus de paliers. Les deformacions i el seu impacte al recorregut de les suspensions, i per tan, al moviment dels paliers, queda detallat a la Taula 5.15.

Compressió màxima	23,2 mm
Compressió mínima	6,74 mm
Recorregut suspensions	16 mm
Longitud del palier	478 mm
Longitud barra interior	373 mm

Taula 5. 15. Dades Funcionament paliers

5.10. Unió amb balancins

En aquest apartat es detalla com s'uneix la carcassa de la tripod amb els balancins.

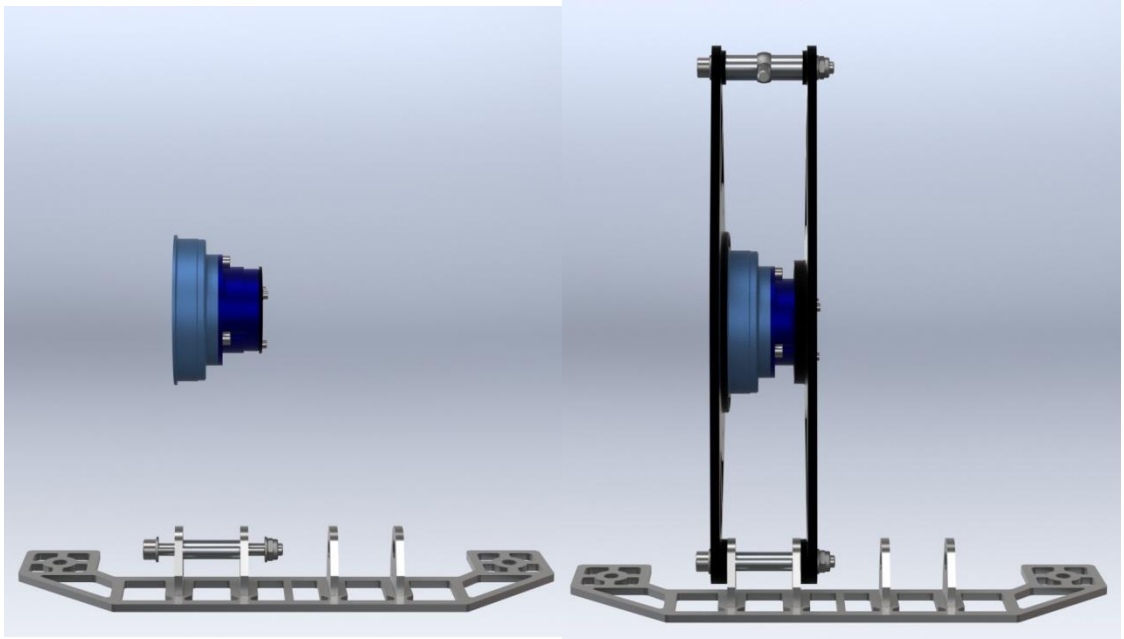


Figura 5. 57. Esquema de muntatge sense rodaments

És evident que el sistema paliers-carcassa necessita girar respecte els balancins. Per això s'ha dissenyat perquè pugui incorporar uns rodaments capaços de fer-lo rodar, suportar els esforços que es puguin crear. Els balancins i les carcasses ja van ser mecanitzats havent fet aquests càlculs amb anterioritat, només cal explicar el càlcul, i el disseny del portarodaments.

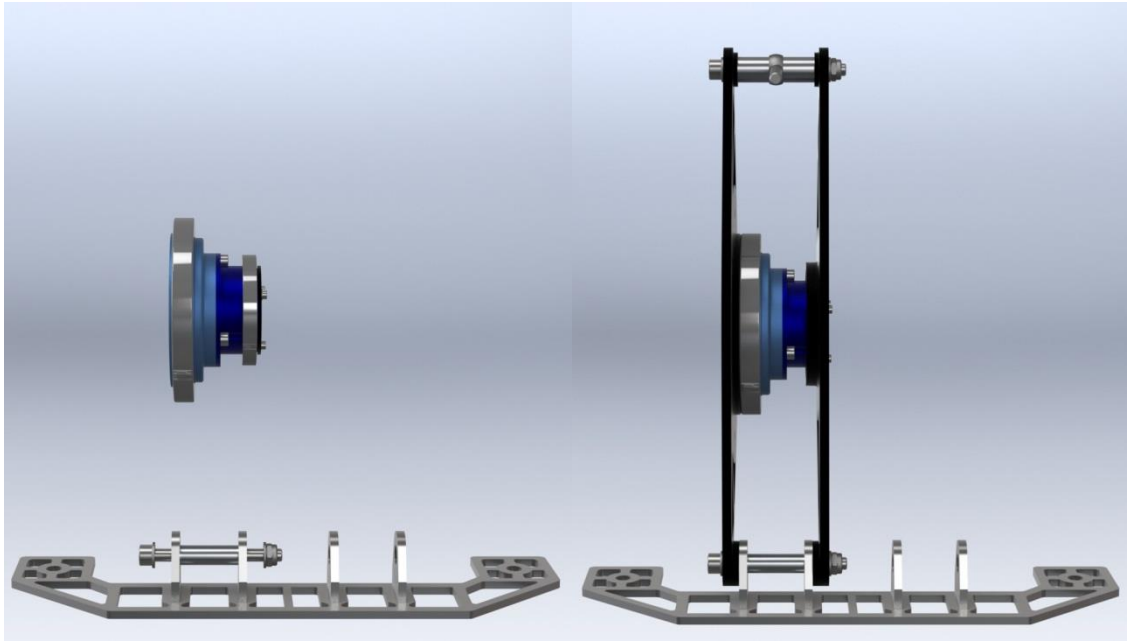


Figura 5. 58. Esquema de muntatge amb rodaments

5.11. Càlcul de rodaments

A l'hora de dissenyar els rodaments s'ha seguit el procediment après a les assignatures de la intensificació de mecànica de l'ETSEIB.

En primer pas s'ha identificat el tipus de càrrega sobre l'objecte estudiat. En aquest cas, es tracta d'una força de direcció fixa en la referencia del terra. Per tan, com que és la pista interna que des de la seva referencia veu la càrrega giratòria, la pista interna haurà de portar el rodament amb interferència, i la pista exterior el rodament haurà d'anar amb més folgança.

Així doncs, la disposició de cada parella de rodaments serà 3 pistes fixes excepte la pista externa d'un dels dos rodaments (en aquest cas el més petit).

Dimensionat de rodaments:

El dimensionat de rodaments està basat en el càlcul de l'assignatura de càlcul de màquines de l'ETSEIB. Els rodaments han estat obtinguts amb un contacte de patrocini amb l'empresa Alemanya Schaeffler (INA), que ha proporcionat a l'equip rodaments i coixinets de fricció, sobretot per a les subseccions de Dinàmica: Transmissió, Suspensions i Direcció.

S'ha inclòs el càlcul detallat dels rodaments a l'Annex C

Distribució dels rodaments:

Com s'ha explicat anteriorment, els rodaments es distribuiran de manera que un d'ells quedi amb la pista exterior lliure. Per fer la disposició de rodaments ha calgut dissenyar un porta-rodaments que es pot veure a la Figura 5.59.

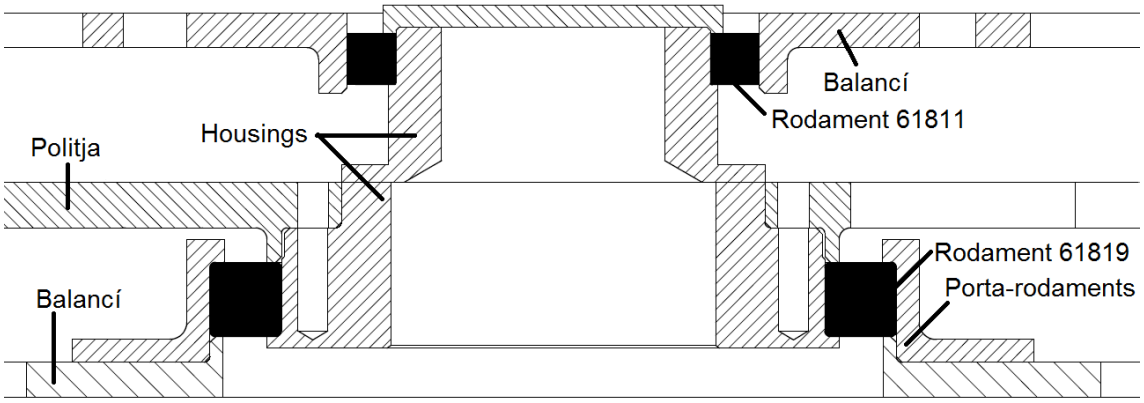


Figura 5. 59. Distribució de rodaments

El porta-rodaments ha estat dissenyat per ser fabricat amb el torn, i ha estat fet d'alumini 7075-T6 pel laboratori comú de l'ETSEIB amb un torn de control numèric. Aquest s'uneix al balancí exterior amb 6 cargols DIN 912 M6x25 classe 8.8. La seva forma és la de la figura que es troba a continuació:

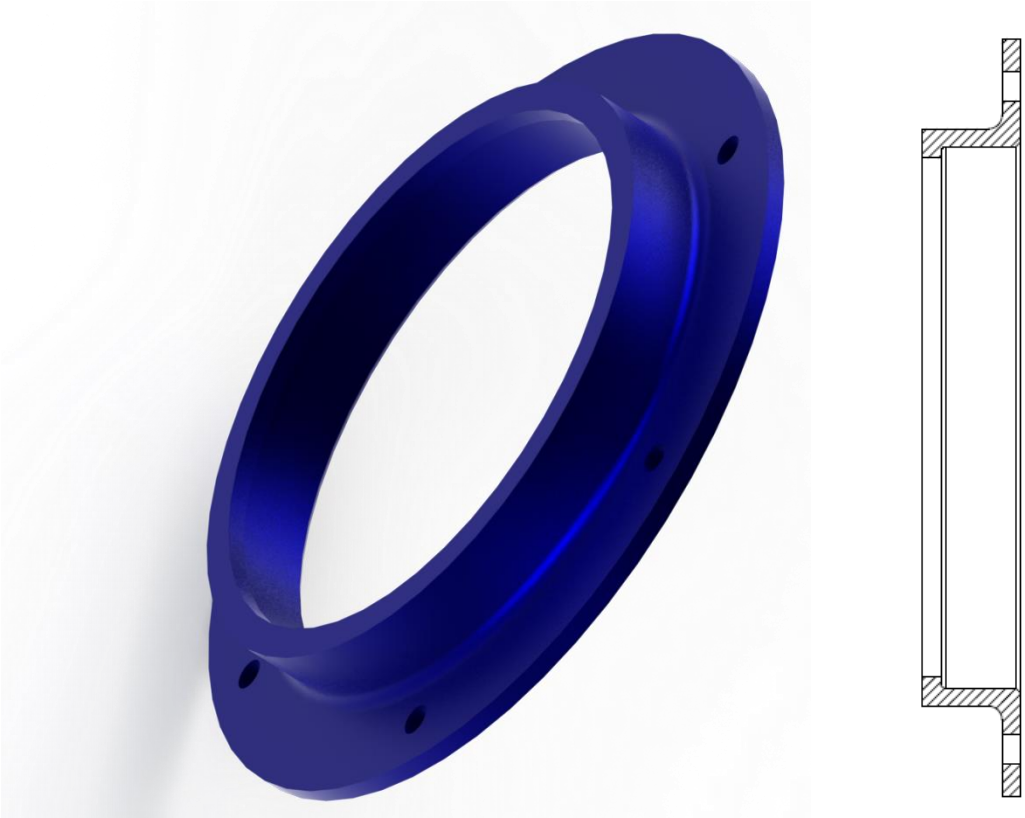


Figura 5. 60. Porta-rodaments

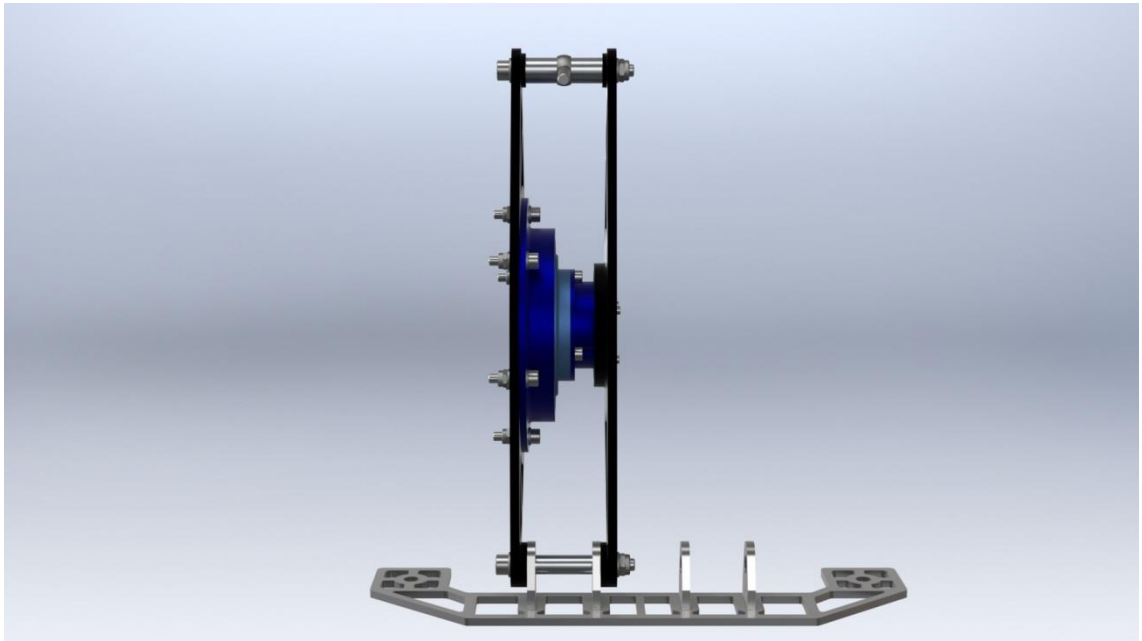


Figura 5. 61. Porta-rodaments amb els balancins

Figura 5. 62. Porta-rodaments un cop fabricats

Toleràncies:

Rodament 61819 pista externa amb folgança, això implica que la cota interior del porta-rodaments on va allotjat el rodament ha de tenir cota de 120H7 mm.

Rodament 61819 pista interna amb interferència, això implica que la cota exterior del la part gran de la carcassa de la tripod on va allotjat el rodament ha de tenir cota de 95m6 mm.

Rodament 61811 pista externa amb folgança, això implica que la cota interior del forat del balancí intern on va allotjat el rodament ha de tenir cota de 72H7 mm.

Rodament 61811 pista interna amb interferència, això implica que la cota exterior del la part gran de la carcassa de la tripod on va allotjat el rodament ha de tenir cota de 55m6 mm.

5.12. Unió amb la politja

La unió de la politja amb la carcassa de la tripod es fa mitjançant 6 cargols DIN 912 M5x12.

Figura 5. 63. Unió amb la politja

5.13. Tapa-Corretges

Per la normativa Formula Student referent a la transmissió (veure Annex D) va ser necessari incloure un Tapa-corretges envoltant la corretja. Va ser fet per tall amb làser i doblat pels integrants de la secció de transmissió. El material per normativa ha de ser d'aliatge d'alumini 6061-T6.

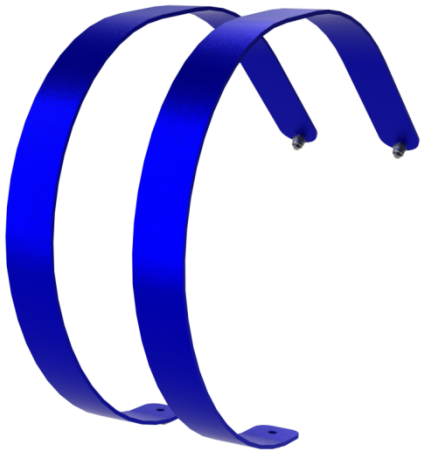


Figura 5. 64. Imatge renderitzada del Tapa-Corretges

Figura 5. 65. Tapa-Corretges un cop doblat per membres de l'equip

5.13. Diferencial electrònic

A mitjans de temporada, com que el que havia de ser el control de tracció i d'estabilitat del vehicle no estaven acabats, implementats ni provats, es va decidir dissenyar un "diferencial electrònic" capaç de corregir certs problemes de pas per corba del CAT06e.

En una corba, degut a la distribució dinàmica de càrregues, la roda interior a la corba patinava, ja que perdia normal i donant-li el mateix parell que a la exterior no aconseguia transformar-lo tot en moviment, i per tan es perdia lliscant per sobre l'asfalt. Aquest fet no es desitjable ja que a part que és un malbaratament d'energia existent a cada corba, desgasta els pneumàtics i el pilot sent ca cada corba un soroll a la part interior d'aquesta.

Per tot això, la secció de transmissió es va posar a treballar en el disseny d'un simple diferencial electrònic temporal, per corregir aquest problema. Aquest diferencial no és físic, simplement és un programa dins de la D-SPACE (Controlador dels motors del vehicle). Aquest diferencial elèctricament emula el funcionament d'un diferencial mecànic.

Fent servir Matlab/Simulink s'obté el percentatge de parell per a cada roda, i aquest és representat per un coeficient que va ser anomenat "r" de repartiment.

Com a variables d'entrada s'han utilitzat la velocitat angular dels dos motors (ω_l, ω_r) i el parell demandat pel pilot ($throtle$). També s'ha fet ús d'uns quants paràmetres per a acabar d'ajustar el resultat.

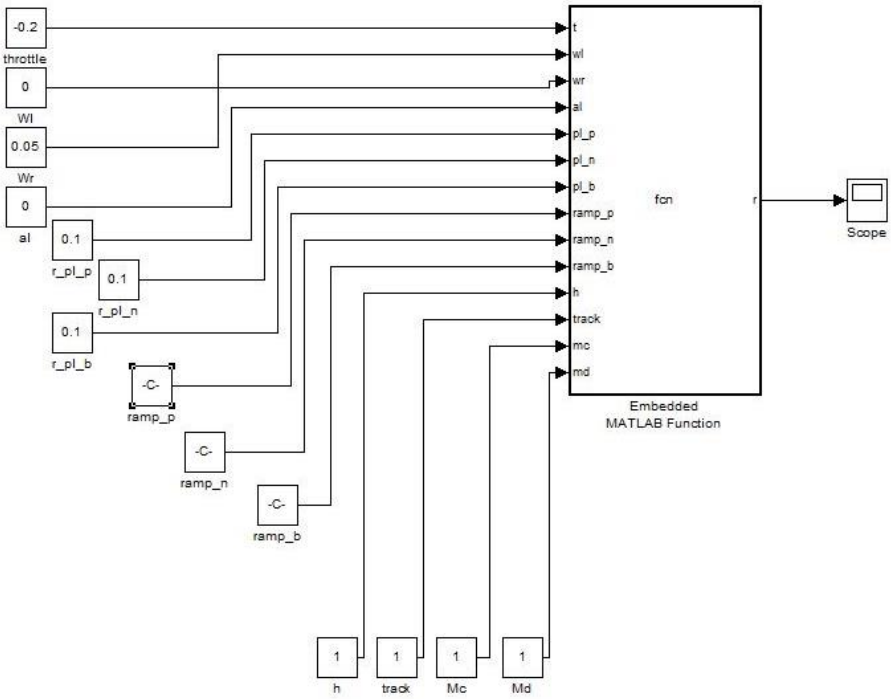


Figura 5. 66. Diagrama de blocs del model Matlab/simulink pel diferencial electrònic

Val a dir que aquest disseny és purament teòric, que en cap moment s'ha posat en pràctica ni van ser ajustats els valors teòrics per a l'òptim funcionament, ja que al final no es va disposar de temps suficient com per a provar-lo.

El programa implementat en el diferencial distingeix diferents àrees de la corba: entrant (braking) al mig (neutral) i a la acceleració de sortida (power). L'estat de la corba el distingim amb la variable throttle del gas: si aquesta és positiva vol dir que s'està accelerant, negativa que s'està frenant i zero que estem en fase neutra.

Per cada fase, s'ha definit uns paràmetres per ajudar a parametritzar-lo (*ramp_* i *r_pl_*). aquests paràmetres són per caracteritzar els pendents de les rectes de la corba diferencial que podem observar a la Figura 5.67.

el repartiment és un paràmetre que va associat a la roda esquerra: un repartiment de 1 vol dir que la roda esquerra farà el 100% del parell requerit per throttle, i la roda dreta el 0%. L'eix de les ordenades hi ha representada ω_r / ω_l ,

interpretació del gràfic: Quan $\omega_r > \omega_l$ s'ha parametritzat perquè "r" augmenti (treu parell de la dreta i en dona més a la esquerra, a la roda que no està patinant), i quan $\omega_r < \omega_l$ "r" disminueix per repartir més parell a la dreta que a la esquerra.

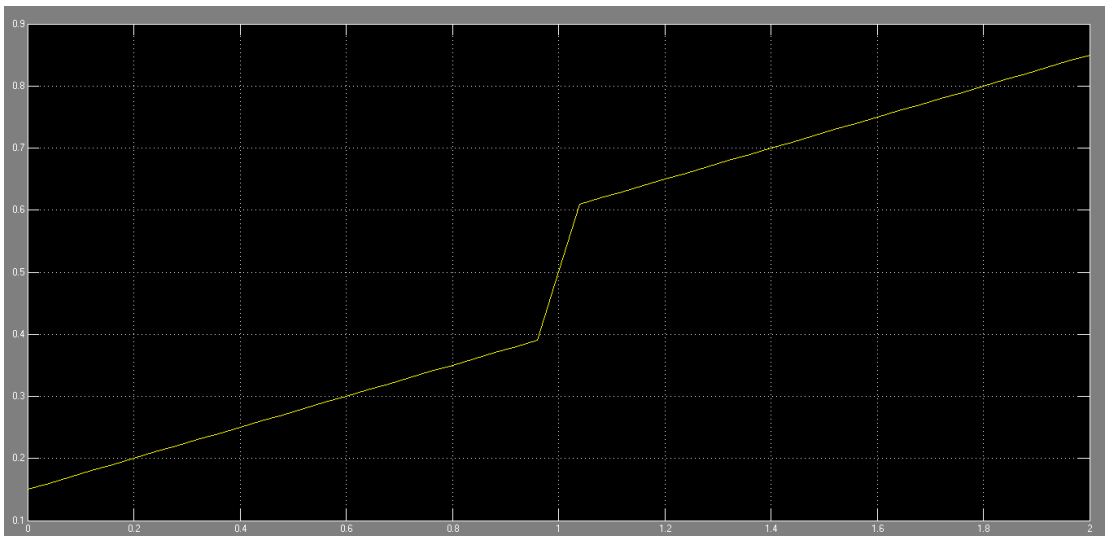


Figura 5. 67. Gràfica coeficient "r" vs velocitat angular relativa (ω_r / ω_l)

6. Estudi d'impacte ambiental

6.1. Materials emprats:

Alumini:

De tots els elements naturals de la terra, l'alumin (Al) és el tercer més abundant al nostre planeta en la seva forma natural. L'alumini s'extreu de la bauxita, una roca abundant a les regions tropicals i volcàniques. La seva extracció genera un gran impacte ambiental sobre la superfície terrestre ja que s'ha de desforestar i alterar la orografia del terreny amb excavacions a cel obert. El procés de refinat de la bauxita comporta molt consum d'energia elèctrica (generada molts cops en centrals de crema de carbó o hidrocarburs que emeten grans quantitats de CO2), i genera una gran quantitat de residus, ja que per cada tona d'alumini se'n necessiten 4 tones de bauxita; i la les restants 3 tones no són útils.

En quant al reciclatge de l'alumini, recuperar certa quantitat d'alumini consumeix només un 5% de l'energia que es necessita per crear la mateixa quantitat d'aquest a partir del mineral de bauxita. L'alumini és reciclable tantes vegades com es vulgui, ja que sempre se'n podrà obtenir material amb les mateixes propietats que els inicials. Per això es pot dir que l'alumini és un material altament reciclable.

Acer

Molt similar a l'alumini, el procés d'extracció del mineral de ferro, el carbó, i la roca calcària necessaris per fer funcionar els alts forns, causa un gran impacte en la orografia del terreny, el paisatge, els animals i les plantes de la zona on s'ha excavat. El procés de fusió del mineral de ferro es fa cremant carbó, i en tot el procés es creen CO_2 (provoca efecte hivernacle) CO (verinós per als éssers vius) i SO_2 (verinós i causant de pluja àcida). Aquest procés de fabricació d'acer també genera escòria, residus no desitjats del mineral de ferro.

En temes de reciclatge de l'acer també produeix molt menys impacte ambiental al ser reciclat que al ser conformat per primera vegada, ja que per cada tona que es recicla, s'estalvia cremar 500 kg de carbó i l'energia emprada es redueix un 70%.

6.2. Processos de conformat:

Mecanitzat, tall en làser i tall en aigua.

El procés de mecanitzat comporta uns certs riscs pel medi ambient. El fluid de tall esgotat es genera quan la naturalesa física i química d'aquest fluid es degrada, de manera que es creen partícules, que en contacte amb l'aigua es poden solubilitzar i contaminar-la. El mateix fluid de tall pot tenir una fuita i acabar inesperadament al medi ambient.

Al mecanitzar o tallar metalls es genera ferritja, que pot ser reciclada per poder ser aprofitada un cop tornat a conformar el material de partida. Cal tenir en compte que aquesta ferritja ve impregnada del fluid de tall

Les comunament conegudes com "boires d'oli" són unes de les problemàtiques amb més impacte per la salut laboral. La gran velocitat de l'eina de tall i la pressió del fluid de tall, propicia la formació de gotes microscòpiques del fluid de tall que es dispersen a l'ambient laboral.

6.3. Concepte global del projecte

Un altre aspecte relacionat amb el medi ambient és el soroll . A l'estudi de la millor opció, el soroll ha estat un factor tingut en compte . Els sistemes de politges tenen els nivells de soroll més baixos , en comparació amb altres alternatives (Reductors d'engranatges, cadenes) , i el resultat amb el disseny escollit provoca un impacte mínim en termes acústics

Pel que fa l'afectació del medi ambient del projecte en general , és important recordar la transmissió com una part integrada d'un sistema més gran: un cotxe elèctric. Un dels rerefons del projecte mundial Fórmula Student elèctric és avançar en la recerca i el desenvolupament d'un cotxe net i eficient.

7. Desenvolupament del projecte en el temps

El desenvolupament d'aquest projecte està dividit en diferents fases:

- **Anàlisi:** És el primer pas d'un enginyer projectista que consisteix en recopilar tota la informació possible abans de començar. En aquest cas, l'Anàlisi es basava principalment en el CAT05e, i definir els objectius pel CAT06e.
- **Decisió Transmissió:** Període de revisió de l'estat de l'art, Estudi d'alternatives i decisió de la millor solució.
- **Patrocinadors:** Un cop escollit el tipus de transmissió, es pot mirar al mercat a veure si hi ha empreses especialitzades en la tecnologia que es vol utilitzar, per veure si poden aconsellar a l'equip, o ajudar econòmicament i aportant material. Cal comentar que aquests períodes acostumen a allargar-se amb els patrocinadors nous, ja que és complicat trobar el contacte o obtenir resposta de les empreses contactades.
- **Disseny:** Fase de definició completa del projecte obtenint el seu disseny definitiu. Aquesta fase està prevista que acabi a finals de 2012 per la planificació dels Planning de la direcció de l'equip ETSEIB MOTORSPORT.
- **Aprovisionament:** En aquesta fase es reuneix el material necessari per a l'elaboració del prototip. Aquest període varia segons l'empresa proveïdora. En aquest cas, la majoria d'empreses cedeixen el material a l'equip en forma de col·laboració, i per això no es pot exigir un temps d'aprovisionament tan curt com es voldria, ja que cal adaptar-se al volum de feina que l'empresa tingui en aquest moment.
- **Assemblatge**: Fase de muntatge del prototip de la transmissió per primera vegada.
- **Proves:** Fase de tests del vehicle en general, on es prova el vehicle augmentant cada cop el nivell d'exigència de les proves.
- **Validació:** Fase realitzada paral·lelament a la fase de proves que consisteix a comprovar en tot moment que el sistema funciona correctament, que no hi ha cap part excessivament gastada o a punt de trencar-se, i que no hi ha hagut cap errada de disseny.
- **Competicions:** Fase final del projecte on s'ha de posar en pràctica tot el potencial d'aquest, fent-lo funcionar al màxim rendiment. Les competicions a les que ha participat el CAT06e han estat *Germany* 2013, *Spain* 2013 i *Italy* 2013.

A continuació es mostra el *Masterplan* final per a la transmissió del CAT06e (Taula 7.1), que té la particularitat que no hi surt el Gener, que és un més reservat per a l'estudi d'exàmens dels estudiants de l'equip.

Figura 7. 1. Masterplan transmissió

8. Estudi de costos

A l'Annex E hi ha adjuntat un detallat document calculant el preu de cada peça i cada procés i operació a l'hora de fabricar la transmissió del CAT06e. Aquests costos corresponen al cost de les peces del prototip de la transmissió del CAT06e, resumits a la següent taula.

Per calcular el cost del prototip s'ha utilitzat una plantilla de la normativa Fórmula Student que ajuda als estudiants a calcular els costos dels seus vehicles amb un gran rigor i precisió. La plantilla està en anglès. En aquesta plantilla hi surten representats els costos de materials (*MID*) els costos dels processos d'assemblatge (*PID*) els costos d'eines especials (*TID*) i el cost de la cargoleria (*FID*). En definitiva, aquesta plantilla ha estat usada per calcular el cost dels materials i la fabricació del prototip de la transmissió del CAT06e, i ha estat resumit a la Taula 6.1.

Assemblatge	Cost (€)
Politges	182,25
Sistema de tensat	112,04
Assemblatge paliers	440,46
Assemblatge Joint	270,62
Tapa-corretges	11,39
Inserts	8,11
TOTAL	**1.024,87**

Taula 6. 1. Resum de Costos de fabricació del prototip

Per acabar de determinar el cost final del projecte s'afegeix el cost d'enginyeria, el cost del temps de fer plànols i el cost del temps de mecanografiat de la memòria:

Activitat	Preu hora [€/h]	Hores [h]	Cost total activitat [€]
Disseny i proves	50	500	25.000
Mecanografiat de la memòria	10	50	500
Confecció de plànols	20	20	400

Sumant tots els costos ens surt que el cost total del projecte és de 26.924.87 €

9. Funcionament

Aquest apartat és per revisar la trajectòria del CAT06e durant les proves i les competicions de la temporada 2012-2013. Primerament es farà un breu resum dels resultats obtinguts per l'equip a les competicions, i posteriorment es detallaran imprevistos en el funcionament de la transmissió, i com es va n solucionar per sortir endavant i seguir amb la competició.

9.1. Resultat final

Aquest és el resultat final de la transmissió del CAT06e:

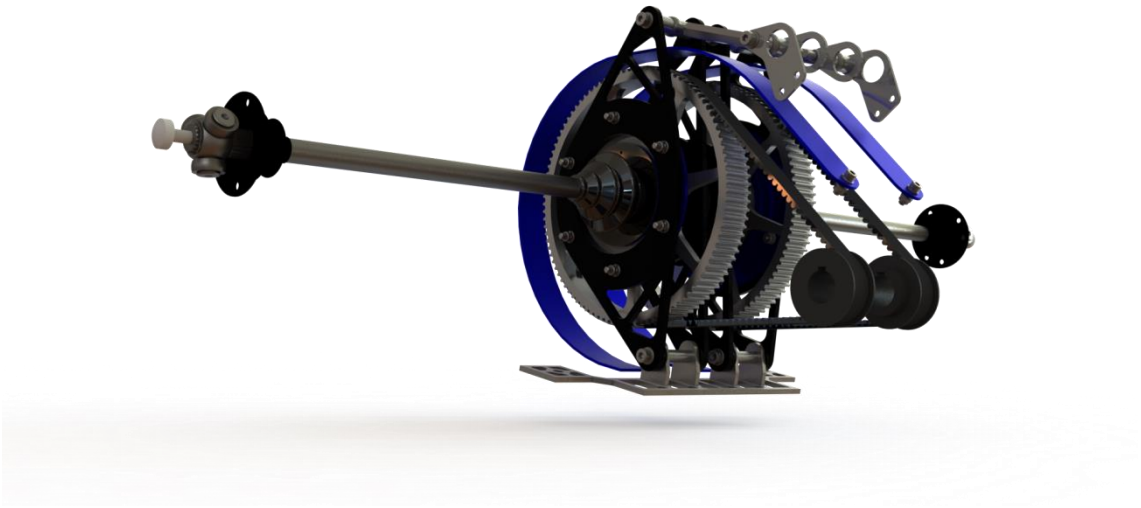


Figura 9. 1. Imatge renderitzada del conjunt de la transmissió del CAT06e

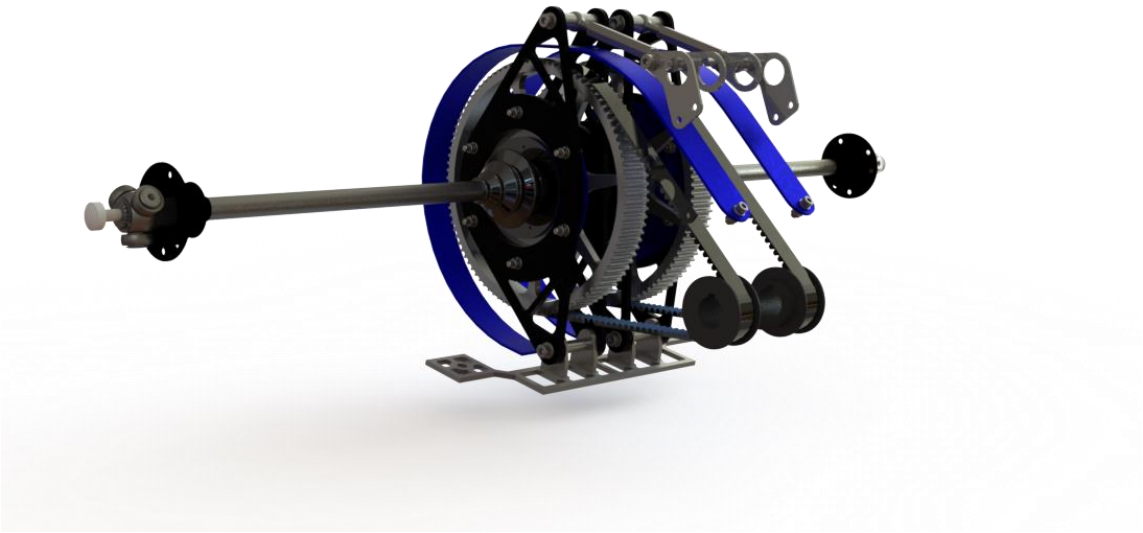


Figura 9. 2. Imatge renderitzada del conjunt de la transmissió del CAT06e

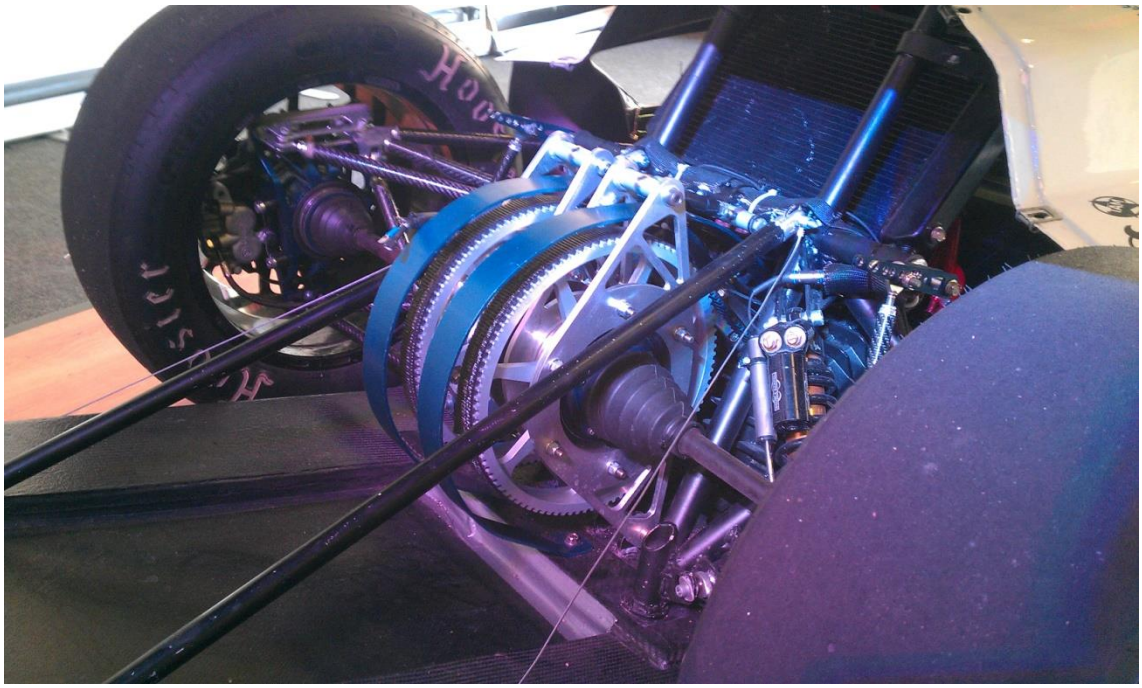


Figura 9. 3. Imatge real de la transmissió un cop ensamblada al CAT06e

Figura 9. 4. Cat06e en Competició a Hockenheim 2013

9.2. Balanç temporada 2012-2013

La temporada 2012-2013 ha estat una temporada de millores de resultats respecte el CAT05e. a continuació es presenta una taula resum de resultats en les competicions.

Prova		Alemanya		Catalunya		Italia	
		Puntuació	posició	Puntuació	posició	Puntuació	posició
Scrutineering Electric		Ok	-	Ok	-	Ok	-
Scrutineering Mecànic		Ok	-	Ok	-	Ok	-
Proves estàtiques	Business Plan	58,41	11	71	5	67,188	5
	Cost Report	84,06	1	86,41	3	71,286	6
	Design Report	100,00	18	109,00	6	122,000	9
Proves dinàmiques	Acceleration	-	23	3,50	14	7,810	15
	Skidpad	-	23	59,63	5	13,469	11
	Auto X	4,50	21	26,71	13	-	17
	Endurance	-	13	-	8	1,000	16
	Efficiency	-	16	100,00	1	-	13
TOTAL		246,97	24	456,25	9	282,752	15

Taula 9. 1. Resultats del CAT06e a les competicions del 2013

Alemanya Hockenheim (Formula Student Germany):

Analitzant els resultats es pot veure que a les proves dinàmiques pràcticament no es va puntuar. Això és degut a que mentre s'estaven celebrant les proves d'acceleració i de skidpad encara s'estava passant l'scrutineering, i no es va poder competir. El cas de l'Endurance és diferent. Aquest no es va poder acabar ni la meitat de les voltes, només es van poder completar 6 voltes abans que el cotxe es parés. Per tan no es va puntuar ni a l'endurance ni a l'eficiency

Catalunya Montmeló (Formula Student Spain)

La competició de Montmeló va ser amb diferència la més exitosa de l'equip durant la temporada 2013. En aquest cas, gràcies a que ja es tenia l'experiència de Hockenheim, es va passar l'Scrutineering a la primera i es va poder puntuar a totes les proves dinàmiques excepte l'endurance, ja que tot i completar 18 voltes i puntuar a l'efficiency, no es va acabar i per tan no va puntuar

Itàlia Varano (circuït Ricardo Paletti)

El cas d'Itàlia va ser una mica especial. S'arribava amb bones sensacions, i havent millorat molt els resultats en la segona competició. Però es va tenir la mala sort del factor climàtic, es va poder completar un skidpad, però la acceleració es va haver de celebrar sota una forja pluja. El cotxe no va resistir tanta aigua i va espatllar components elèctrics, fent que no es pogués competir cap més prova dinàmica de la competició.

En general, l'equip ha obtingut bons resultats a les proves estàtiques en cada competició, i fins i tot arribant a guanyar la prova de cost a alemanya. El que falta rectificar per millorar substancialment els

resultats són les proves dinàmiques, que estan directament relacionades amb la fiabilitat del vehicle. En aquest aspecte ajudaria molt acabar el fórmula temps abans de les competicions, per fer un llarg període de proves i així anar corregint problemes de funcionament, fiabilitat, i anar posant el cotxe apunt per la primera competició, i que no torni a passar el cas de Hockenheim, que l'equip perdi dues proves dinàmiques per no portar l'Scrutineering prou preparat.

Figura 9. 5. ETSEIB MOTORSPORT rebent el primer premi del Cost Report Germany 2013

En referència al cas que ens ocupa, la transmissió, si que es van detectar alguns problemes que es detallaran a continuació, cap d'aquests però va ser crític per fallar una prova ja que tots van aparèixer durant la fase de proves. Durant les competicions únicament es va haver de comprovar l'estat de la transmissió (tensió de la corretja, greix de la tripod, estat de les politges...).

9.3. Problemes detectats en el funcionament:

Durant el funcionament del cotxe de fórmula Student a les competicions, i a les sessions de proves al pàrquing Movistar, i a l'heliport del Circuit de Catalunya, van succeir certs esdeveniments inesperats, que s'han anat solucionant a mida que anaven apareixent. A continuació s'aniran exposant els problemes sorgits per ordre cronològic, i les solucions a curt i a llarg termini adoptades per a solventar-los.

9.3.1. Desperfecte en un balancí

Durant la inspecció en l'aprovisionament de peces, es va detectar una esquerda en un balancí acabat de mecanitzar. Immediatament es va retornar la peça al mecanitzador, que ens va solucionar el problema aplicant una soldadura a l'esquerda.

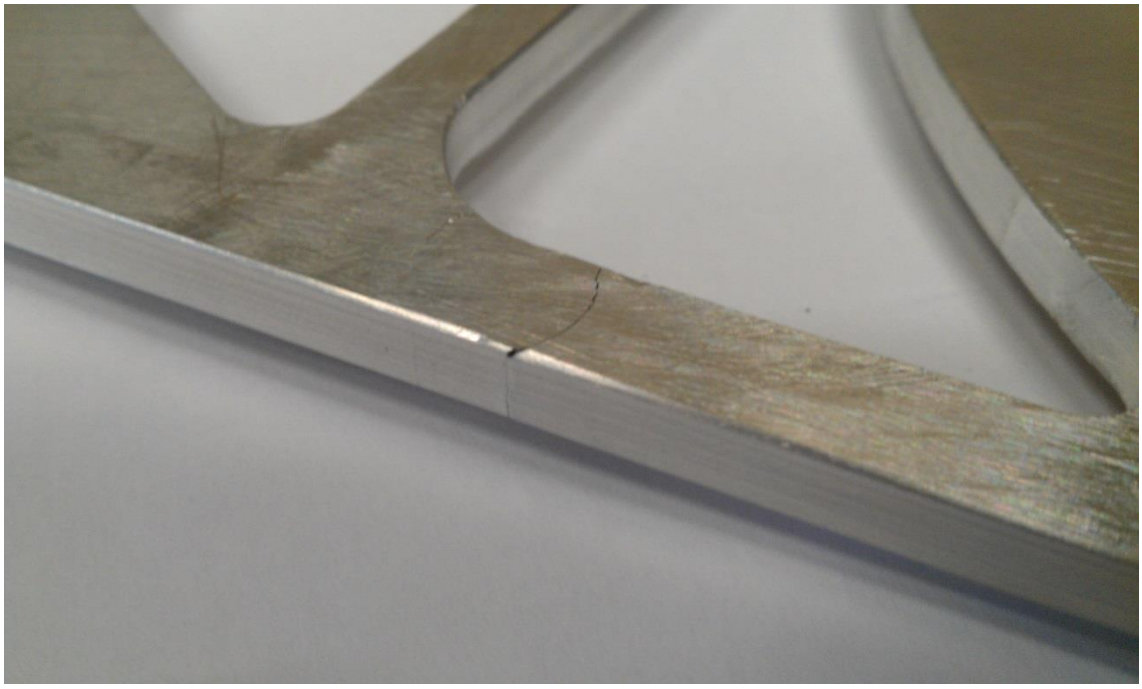


Figura 9. 6. Desperfecte detectat en un balancí

9.3.2. Oscil·lació dels balancins

El primer problema que va sorgir va ser abans de posar el cotxe a terra, quan encara es feien proves dels motors del cotxe en buit (sense rodes). Aquestes proves consistien a veure si els motors giraven adequadament, abans de posar el cotxe a terra i amb les mínimes resistències passives.

Un cop els motors funcionaven adequadament, i es va poder donar més velocitat, visualment es va observar el problema de la transmissió: Els balancins oscil·laven lateralment entre 5 i 10 mm.

Ja que no volíem introduir danys per fatiga als balancins, es va desmuntar el sistema i es va estudiar a fons quina en podia ser la causa. Una observació molt profitosa, va ser que les oscil·lacions dels balancins estaven sincronitzades amb la rotació de les politges conduides, cosa que va fer descartar que el problema provingués ni del motor ni de la politja conductora.

Finalment, es va arribar a la conclusió que el problema era de muntatge. I revisant totes les peces es va trobar que per un problema de fabricació, un centrador no feia la seva funció. Per arreglar-ho es van desmuntar els dos subsistemes i es van tornar a muntar amb un comparador i molta precisió. Un cop es va tornar a provar la transmissió amb els motors, les oscil·lacions dels balancins havien desaparegut a simple vista, i amb el comparador eren pràcticament inapreciables

Figura 9. 7. Conjunt carcassa de la tripod un cop muntada correctament amb el comparador

9.3.3. Mala retenció axial

Durant bona part de les competicions es va arrossegar un problema de retenció axial de la politja conductora a l'eix del motor. Degut al funcionament normal del vehicle, les corretges aplicaven unes petites forces axials a la politja conductora, segurament degudes a un petit desalineament en l'eix del motor respecte a l'eix de les politges conduïdes i a unes toleràncies més grans del que s'havien dissenyat, conseqüència d'un error de fabricació, per a l'ajust de l'eix del motor i la politja petita.

La primera solució va ser mecanitzar més forats per presoners a la politja conductora, per posar-ne més, però aquesta solució no va ser definitiva ja que el problema persistia.

Més endavant es va dissenyar una peça auxiliar que definitivament va solucionar el problema temporalment. Aquesta peça va ser tornejada per un membre de l'equip, al torn al que l'equip del fórmula Student de l'ETSEIB té accés a l'escola. Consistia en un distancial que gràcies a un cargol a la posició del passador, aguantava exactament la politja a la posició desitjada.

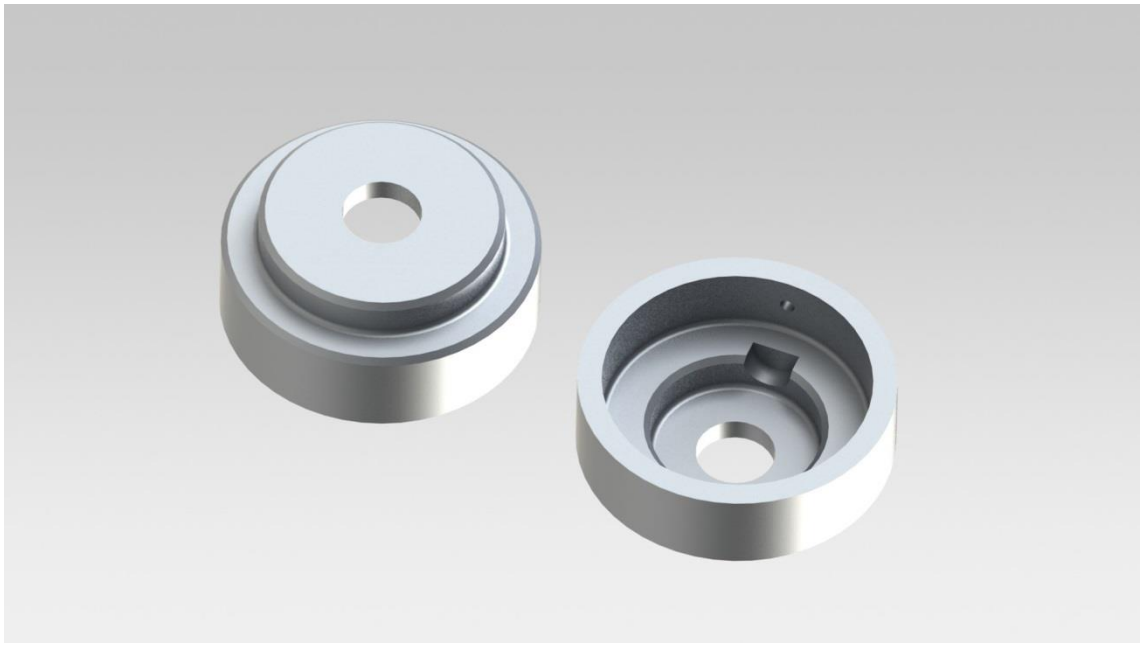


Figura 9. 8. Imatge renderitzada de la peça auxiliar que retenia axialment les politges conductores

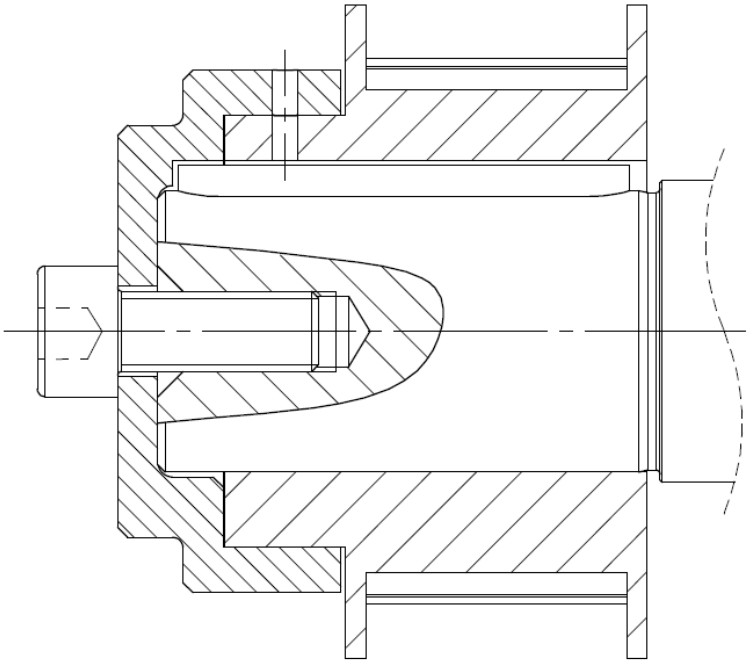


Figura 9. 9. Dibuix de la peça auxiliar que retenia axialment les politges conductores

Figura 9. 10. Imatge renderitzada de la peça acoblada

Més endavant, quan les politges d'alumini van arribar del mecanitzador, es va prescindir d'aquesta peça, ja que la retenció axial ja no va tornar a ser un problema perquè aquestes noves politges si que tenien les toleràncies dissenyades.

Possibles alternatives a sistema de retenció axial

- Femella KM: es tracta d'una femella per a l'eix, amb una volandera autoblocant, que impedeix el moviment axial dels elements que fixa respecte a l'eix
- Passador: Col·locant un passador a traves de l'eix s'aconseguiria retenir axialment la politja perquè no sortís dels limits desitjables pel seu bon funcionament.

Cap d'aquestes solucions és aconsellable en aquest cas. Es tracta dels eixos dels motors que han de durar molts anys a l'equip ETSEIB MOTORSPORT i les dues propostes comporten mecanitzar-lo, creant així un problema o una limitació en els futurs vehicles, ja que supedites el disseny i l'elecció de les seves transmissions.

Per tan, la millor solució és mecanitzar correctament l'interior de les politges, calculant-les perquè entrin amb interferència.

9.3.4. Problemes en el motor

Cap al final de la competició, un dels dos motors va començar a girar amb una certa resistència, que es va anar incrementant a mida que el cotxe anava fent quilòmetres. Quan es van dur els motors a l'empresa fabricant per a verificar-los, es van adonar que aquell motor tenia l'eix lleugerament desviat, cosa que ens va portar a estudiar-ne les causes.

Que va passar:

- Flexió en un eix
- Aïllant rotor tocava amb el semi-estator

Possibles causes:

- Muntatge a cops cat05e: sembla ser que la politja conductora que duia el motor en el CAT05e tenia molta interferència, i els membres de l'equip no van disposar de cap altre mitjà que recórrer a la maça de nylon per a entrar les politges a l'eix a cops.
- Tensió exagerada cat05e: Sembla ser que en el CAT05e no es coneixia la tensió de la corretja en cada moment perquè no es disposava de cap mètode ni aparell de mesura de les tensions que patia l'eix. Per això es tensava a tacte. També hauria pogut influir que com que pel problema del tensat únic i el problema del desalineament dels motors, perquè les dues corretges quedessin mínimament tensades, una havia de tenir una tensió molt elevada a causa d'aquest desalineament dels eixos del motor.
- Tensió exagerada cat06e: Tot i sabent la tensió de les corretges en cada moment, i la tensió que això implicava a l'eix del motor, podria ser que aquesta fos superior a l'admissible. Per això es van enviar les dades de càrregues a l'eix per confirmar que no eren massa elevades.

Conclusions de *MAVILOR*:

L'empresa *MAVILOR*, fabricant dels motors, ens va fer un diagnòstic dels problemes sorgits mentre reparava els motors. Sembla ser que la culpa dels problemes sorgits va ser el muntatge a cops de les politges en el CAT05e, i que mica en mica es va anar desgastant l'aïllant del rotor al contactar amb el semi-estator, fins a frenar-se. L'equip però també va decidir destensar sempre les corretges quan el cotxe no estés en funcionament de cara al futur per si de cas.

Conclusions

Tot i aquests problemes de funcionament mencionats a l'apartat anterior, cal comentar que el sistema de transmissió objecte d'aquest projecte, ha complert la seva funció al 100% sense donar problemes en els moments importants, com serien, durant les proves dinàmiques en les que el CAT06e ha participat durant la temporada 2012-2013.

S'ha obtingut resultats satisfactoris de la transmissió del CAT06e, i sobretot s'han complert la majoria d'objectius que es van fixar al inici de la temporada.

- S'ha aconseguit fer un nou sistema de tensat independent per a cada politja, fiable i amb un mètode de mesura de la tensió prou precís.
- S'ha estalviat molts diners a l'equip trobant un mètode de confecció de les politges molt més barat, podent així invertir els diners que haguessin costat aquestes en altres aspectes del CAT06e.
- L'únic objectiu que no s'ha pogut satisfer ha estat el de la reducció de pes. Al fer dos sistemes de tensat s'ha acabat augmentant el pes total en uns 500g, tot i alleugerir pes en les politges conductores i conduïdes.
- L'equip ha notat molt la facilitat de muntatge i desmuntatge que s'ha introduït enguany, ja que fins i tot altres membres que no formaven part de la secció de dinàmica manipulaven la transmissió amb facilitat, gràcies a la augmentada accessibilitat que li ha donat el sistema de tensar.
- Finalment, l'objectiu més important de tots també s'ha complert, aquest és el de la fiabilitat. Només ha calgut estar atent a la tensió de les corretges en moments com abans de cada prova, i desmuntar puntualment la transmissió, per tal que altres membres accedissin amb més facilitats a les respectives parts les quals eren responsables.

En resum però, el projecte del CAT06e, del qual és part aquest projecte de transmissió, podria haver funcionat millor. Possiblement per la poca experiència en la part elèctrica de l'equip no es va poder acabar el cotxe amb suficient antelació com per fer una bona fase de proves, i guanyar fiabilitat de cara a les competicions. Tot i així l'equip ETSEIB MOTORSPORT va adquirint coneixements, i el CAT06e ajudarà a que el següent vehicle sigui encara més competitiu. De fet, la transmissió dissenyada per aquest projecte va funcionar tan bé que els responsables de transmissió del CAT07e no han fet pràcticament canvis en la transmissió que els varem deixar com a llegat.

Agraïments

Vull agrair principalment als meus pares, Pere i Queralt, i a les meves germanes Irene i Núria el suport que m'han donat durant aquest any de dura feina, sobretot en èpoques de passar poc per casa per haver d'acabar el monoplaça a temps i així optar a aconseguir millors resultats a les diferents competicions.

M'agradaria també agrair a tots i cada un dels membres de l'equip ETSEIB MOTORSPORT participants en el projecte del CAT06e, per motivar-me en el món Fórmula Student i per fer un grup de companys tan estimat per mi. En especial però m'agradaria agrair l'excel·lent feina dels companys de secció John Parent, i Ana Pastor, i el acompanyament que del nostre cap de secció en Roger Torm, ja que sempre ens aconsellava en decisions difícils.

Un especial agraïment també per a Rafael Boronat, Emili Hernández, Tània de los Santos i Francesc Roure, professors de l'ETSEIB que han fet possible el projecte, fent de nexe amb la universitat.

A el meu tutor de projecte en Lluís Roger Casals, que m'ha guiat i aconsellat en tot moment.

I per acabar a tots els patrocinadors que any rere any recolzen l'equip, tan amb ajudes monetàries com fent-nos peces o ajudant-nos amb el disseny. En especial Voldria agrair a l'empresa *GATES*, i en concret a en David Manzanedo, el nostre contacte dins l'empresa, per la dedicació i l'ajuda en el disseny i la fabricació de la transmissió del CAT06e, ja que sense, aquest projecte no hagués estat possible

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

1. MARTÍNEZ, J. VECIANA, J.M. *Quadern CM4 Transmissions per corretja*. Barcelona, Serveis gràfics Copisteria Imatge, S.L. 2011. p.1-31.
2. MARTÍNEZ, J. VECIANA, J.M. *Quadern CM3 Engranatges*. Barcelona, Serveis gràfics Copisteria Imatge, S.L. 2011. P.1-45.
3. FENOLLOSA.J, MARTÍNEZ, J. VECIANA, J.M. *Quadern CM2 Rodaments*. Barcelona, Serveis gràfics Copisteria Imatge, S.L. 2011. P.1-48.
4. CARDONA, S., CLOS, D. *Teoria de màquines.* Barcelona Edicions UPC, 2000. p. 119-167.
5. CLOS, D. *Quadern D3 Preprojectes*. Barcelona, Serveis gràfics Copisteria Imatge, S.L. 2012. P.1-122.
6. LIESA, F. Vehicles I. Barcelona, Serveis gràfics Copisteria Imatge, S.L. 2011
7. CHEVALIER, A. Dibujo industrial. París , Noriega Editores, 2005
8. FORMULA STUDENT GERMANY. *FSC, Fórmula Student Combustion*. 2013
9. FSAE, *Formula Society of Automotive Engineerings*. FSAE Rules. 2013
10. RIBA, C. *Selecció de materials 1*. Barcelona, Edicions UPC 1998. p. 91-111
11. RIBA, C. *Selecció de materials 2*. Barcelona, Edicions UPC 1998. p. 7-21

Bilbiografia complementaria

GATES [http://www.gates.com/, 25 de setembre de 2013]

Power Transmission Product Catalog. *GATES CORPOTATION.*Denver. 2012

Power Grip GT3 Belt drives. *GATES CORPOTATION.*Denver. 2014

Poly Chain GT Carbon Belt Drive Systems. *GATES CORPOTATION.*Denver. 2014

CONTINENTAL CONTITECH [http://www.contibelts.com/ , 20 de setembre de 2013]