

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria mecànica.

Títol: Disseny, simulació i fabricació d'un sistema d'escapament per a un vehicle Mitsubishi Lancer Evolution VI destinat a la competició.

Document: Memòria i Annexos

Alumne: Pau-Enric Gudayol Teixidó

Tutor: Dr. Martí Comamala Laguna

Departament: Enginyeria mecànica i de la construcció industrial

Àrea: Màquines i motors tèrmics

Convocatòria (mes/any): Juny 2020

ÍNDEX

1.	Introducció.....	2
1.1	Antecedents.....	2
1.2	Objecte.....	2
1.3	Abast.....	2
2.	Motivació de l'autor.....	3
3.	Marc teòric.....	4
3.1	Paràmetres bàsics del motor.....	4
3.2	Sistema d'escapament.....	5
3.2.1	Col·lectors d'escapament	7
3.2.2	Turbocompressor.....	12
3.2.3	Wastegate.....	13
3.2.4	Downpipe	15
3.2.5	Tub d'escapament	15
4.	Procés de disseny del sistema d'escapament	16
4.1	Entrada de dades i validació.....	17
4.1.1	Dades dels col·lectors d'escapament.....	18
4.1.2	Dades del downpipe	25
4.1.3	Validació de les dades	29
4.2	Disseny del sistema d'escapament.....	34
4.2.1	Comparació prèvia al disseny.....	34
4.2.2	Requeriments de fabricació i instal·lació previs al disseny	38
4.2.3	Punt de partida.....	43
4.2.4	Optimització del sistema d'escapament	44
4.2.5	Disseny en CAD.....	56
4.2.6	Simulació del model dissenyat en CAD.....	67
5.	Comparació de prestacions.....	69
6.	Fabricació	74
7.	Resum del Pressupost	79
8.	Conclusions	80
9.	Relació de documents	82
9.1	Compatibilitat de documents.....	82

10. Bibliografia.....	83
-----------------------	----

ÍNDEX D'ANNEXOS

ANNEX A. TEORIA	88
A.1 Cicle de funcionament teòric d'un motor de quatre temps	88
A.2 Parell motor i potència	90
A.3 Rendiment volumètric	94
A.4 Sistema d'admissió	96
A.4.1 Entrada d'aire i filtre	96
A.4.2 Papallona	98
A.4.3 Col·lectors d'admissió.....	99
A.4.4 Sistema d'injecció de combustible i ECU	101
A.4.5 Sistemes d'admissió amb aspiració forçada	104
A.5 Turbocompressor.....	108
A.5.1 Turbina.....	110
A.5.2 Compressor	113
ANNEX B. SIMULACIÓ.....	116
B.1 Lotus Engine Simulation	116
B.1.1 Mòdul de dades	116
B.1.2 Mòdul resolutiu	117
B.1.3 Mòdul de resultats	119
B.1.4 Extres del Lotus engine simulation	120
B.2 Introducció de dades del motor	122
B.2.1 Dades del cilindre	122
B.2.2 Dades de les lleves.....	123
B.2.3 Dades de les vàlvules i conductes de la culata	125
B.2.4 Dades del turbocompressor	127
B.2.5 Dades de la wastegate i pressió de sobrealimentació	131
B.2.6 Dades de l'admissió.....	137
B.2.7 Dades de l'escapament	141
B.3 Resum de Dades del motor	143
B.4 Obtenció de dades de flux de la culata.....	154

ÍNDIX DE FIGURES

Figura 1: Corba parell i potència del Mitsubishi EVO VI de sèrie	5
Figura 2: Diagrama de blocs d'escapament d'un motor atmosfèric	6
Figura 3: Diagrama de blocs de l'escapament d'un motor amb turbocompressor	7
Figura 4: Col·lectors d'escapament de Renault GT Turbo	8
Figura 5: Diagrama de flux de massa d'aire en un cicle. Conducte principal del col·lector d'escapament de sèrie de Renault GT Turbo	10
Figura 6: Col·lectors d'escapament de competició per Renault GT Turbo (Ruanovaperformance. 2020.)	11
Figura 7: Diagrama de flux de massa d'aire en un cicle. Conducte del cilindre 1 del col·lector d'escapament de competició de Renault GT Turbo	12
Figura 8: Diagrama de flux de massa d'aire en un cicle. Unió dels cilindres del col·lector d'escapament de competició de Renault GT Turbo	12
Figura 9: Esquema de funcionament de la vàlvula wastegate (Turbotec. 2020).....	14
Figura 10: Sortida de la turbina i wastegate	14
Figura 11: Downpipe de competició (maperformance. 2019)	15
Figura 12: Diagrama de flux del disseny del sistema d'escapament	16
Figura 13: Model del motor a estudiar en el Lotus	18
Figura 14: Col·lectors d'escapament del motor a estudiar	19
Figura 15: Esquema dels conductes i seccions del col·lector d'escapament.....	19
Figura 16: Esquema per modelar en blocs els col·lectors d'escapament	20
Figura 17: Secció d'entrada del col·lector d'escapament (Fia Historic Database. 1998)	21
Figura 18: Secció de sortida del col·lector d'escapament (Fia Historic Database. 1998).....	21
Figura 19: Calca dins un conducte del col·lector d'escapament.....	22
Figura 20: Resseguit de les calques de les seccions internes del col·lector d'escapament.....	22
Figura 21: Blocs d'unió de conductes en el Lotus	23
Figura 22: Unió 1-4 en el Lotus.....	24
Figura 23: Unió 2-3 en el Lotus.....	25
Figura 24: Downpipe del motor a estudiar.....	25
Figura 25: Esquema dels conductes i seccions del downpipe (I)	26
Figura 26: Esquema dels conductes i seccions del downpipe (II)	26
Figura 27: Esquema per modelar en blocs el downpipe.....	27
Figura 28: Unió de conductes dins el downpipe	29
Figura 29: Corbes de potència i parell del motor del Mitsubishi EVO VI.....	30
Figura 30: Comparació del model de sèrie ideal amb el motor real.....	31
Figura 31: Comparació del model de sèrie amb el motor real	33

Figura 32: Col·lectors d'escapament de competició per Misubishi EVO VI (Sheepeyrace. 2020)	35
Figura 33: Downpipe de competició per Mitsubishi EVO VI (J-Spec Performance. 2020)	35
Figura 34: Gràfic d'augment de potència dels models a comparar.....	36
Figura 35: Gràfic d'augment de parell dels models a comparar	37
Figura 36: Gràfic de temperatura de gasos durant un cicle en els col·lectors d'escapament	38
Figura 37: Catàleg de colzes Schedule 10S (Alacermas. 2018).....	39
Figura 38: Catàleg de colzes mil·limètrics DIN (Alacermas. 2018).....	40
Figura 39: Catàleg de reduccions mil·limètriques DIN (Alacermas. 2018).....	40
Figura 40: Croquis dels diferents tubs Schedule 10S en la placa unida a la culata	41
Figura 41: Diagrama de la relació de canvi de Mitsubishi EVO VI (ZePerfs. 2020)	45
Figura 42: Interfície d'objectius de la parametrització en el Lotus	46
Figura 43: Corbes de potència segons el diàmetre dels conductes dels col·lectors d'escapament	47
Figura 44: Corbes de potència segons la longitud dels conductes dels col·lectors d'escapament	48
Figura 45: Angle d'unió dels col·lectors en la optimització	49
Figura 46: Corbes de potència segons l'angle d'unió dels col·lectors d'escapament	50
Figura 47: Croquis de la disposició 1 del conducte de la sortida de la turbina.....	51
Figura 48: Croquis de la disposició 2 del conducte de la sortida de la turbina.....	52
Figura 49: Croquis del conducte de la sortida del downpipe	53
Figura 50: Mètode de mesura de les plaques d'unió	56
Figura 51: Comprovació de les mesures de la placa d'unió	57
Figura 52: Procés dels dissenys a comprovar fins arribar a la placa fabricada.....	58
Figura 53: Modificació a la placa d'unió entre el turbocompressor i el downpipe	59
Figura 54: vistes del canvi de secció a la placa d'unió de la culata i els col·lectors.....	59
Figura 55: vista de la secció horitzontal de la placa d'unió entre la culata i els col·lectors	60
Figura 56: Posició relativa de les plaques dels col·lectors (I)	61
Figura 57: Posició relativa de les plaques dels col·lectors (II)	61
Figura 58: Posició de la placa del downpipe	62
Figura 59: Unió dels col·lectors (I)	63
Figura 60: Unió dels col·lectors (II)	63
Figura 61: Tram de colze de 90° Schedule 10S.....	64
Figura 62: Disseny en CAD dels col·lectors d'escapament	65
Figura 63: Disseny CAD del downpipe.....	66
Figura 64: Comparació entre el model optimitzat i el dissenyat en CAD	68
Figura 65: Comparació de potència dels models de sèrie i millorat.....	70
Figura 66: Comparació de parell dels models de sèrie i millorat	70
Figura 67: Comparació de pressions amb la millora del sistema d'escapament.....	72

Figura 68: Comparació de la temperatura en la millora del sistema d'escapament	73
Figura 69: Codi per mecanitzar els rebaixos a la placa d'unió amb la culata.....	74
Figura 70: Croquis de posició de la placa en el centre de mecanitzat	75
Figura 71: Unió dels conductes per la part inferior	76
Figura 72: Plaques de l'estructura guia col·locades en els col·lectors de sèrie	77
Figura 73: Cicle de motors de 4 temps (Jim Andrew. 2014)	89
Figura 74: Cicle Otto (Veleztecno. 2017)	90
Figura 75: Mecanisme biela-manovella del motor d'explosió. (Hermenejildo Rodríguez. 2020)	91
Figura 76: Parell d'un motor monocilíndric durant un cicle (Jack Kane. 2020).....	92
Figura 77: Parell d'un motor de quatre cilindres durant mig cicle (Jack Kane. 2020).....	93
Figura 78: Corba parell i potència del Mitsubishi EVO VI de sèrie	94
Figura 79: Diagrama de blocs d'admissió d'aspiració atmosfèrica	96
Figura 80: Caixa d'aire de Mitsubishi EVO VI	97
Figura 81: Especejament caixa d'aire Mitsubishi EVO VI.....	98
Figura 82: Vàlvula de papallona de Renault clio sport	99
Figura 83: Colector d'admissió de Peugeot 106 Rallie i papallona.....	100
Figura 84: Parts de l'injector de combustible (Joaquín Vilanova. 2020)	102
Figura 85: Injector muntat al motor	103
Figura 86: ECU de Mitsubishi EVO VI.....	104
Figura 87: Diagrama de blocs d'admissió amb turbocompressor.....	105
Figura 88: Esquema de gasos i funcionament d'un motor amb turbocompressor (Turbomekanics. 2019)	106
Figura 89: Intercooler aire-aire (Ostar motorsports. 2019)	107
Figura 90: Vàlvula de descàrrega (forgemotorsport. 2020)	108
Figura 91: Turbocompressor (Garrettmotion. 2020)	109
Figura 92: Secció d'un turbocompressor (Turbomekanics. 2019)	110
Figura 93: Eix d'un turbocompressor (BJAB. 2020)	110
Figura 94: Voluta d'escapament (Summitracing. 2020).....	111
Figura 95: Esquema de funcionament de la voluta d'escapament (Enginebasics. 2010)	111
Figura 96: Gràfic de flux d'escapament d'un turbocompressor (Garrettmotion. 2020).....	112
Figura 97: Esquema de funcionament del compressor (Carmen Pilar Acera. 2018)	113
Figura 98: Mapa d'un compressor de turbocompressor (Garrettmotion. 2020)	114
Figura 99: Interfície de construcció del Lotus engine simulation	117
Figura 100: Interfície de resolució del Lotus engine simulation	119
Figura 101: Visualitzador dinàmic de resultats del Lotus engine simulation	120
Figura 102: Dades del cilindre en el Lotus	122

Figura 103: Dades de les lleves en el Lotus.....	124
Figura 104: Diagrama de posta a temps de les lleves.....	125
Figura 105: Dades dels conductes de culata en el Lotus	126
Figura 106: Dades de flux de culata en el Lotus	127
Figura 107: Dades del turbocompressor en el Lotus.....	128
Figura 108: Dades del Compressor en el Lotus	129
Figura 109: Mapa del compressor en el Lotus	129
Figura 110: Dades de la turbina en el Lotus.....	130
Figura 111: Mapa de la turbina en el Lotus.....	131
Figura 112: Dades de la wastegate en el Lotus	132
Figura 113: Interfície de l'accionador de la vàlvula wastegate en el Lotus	133
Figura 114: Interfície de l'element Funció amb les dades de l'accionador.....	135
Figura 115: Dades de modificació de la pressió de sobrealimentació de la ECU	137
Figura 116: Elements d'admissió a la interfície de construcció del Lotus	138
Figura 117: Dades de l'intercooler en el Lotus	139
Figura 118: Dades del plènum d'admissió en el Lotus	139
Figura 119: Dades dels conductes del col·lector d'admissió en el Lotus.....	140
Figura 120: Interfície d'entrada de la geometria d'un conducte en el Lotus.....	141
Figura 121: Interfície de visualització d'un conducte en el Lotus.....	141
Figura 122: Elements d'escapament a la interfície de construcció del Lotus.....	142
Figura 123: Dades del catalitzador en el Lotus	142
Figura 124: Diagrama temporal de totes les vàlvules del motor al Lotus.....	144
Figura 125: Dades del flux d'admissió de la culata en el Lotus	145
Figura 126: Dades del flux d'escapament de la culata en el Lotus.....	145
Figura 127: Mapa de funcionament del compressor (tech-racingcars. 2019)	147
Figura 128: Mapa de funcionament de la turbina (tech-racingcars. 2019).....	148
Figura 129: Dades de l'intercooler	150
Figura 130: Dades dels col·lectors d'escapament (III)	151
Figura 131: Dades dels col·lectors d'escapament (IV)	152
Figura 132: Dades del downpipe (III)	153
Figura 133: Culata muntada en el banc de flux.....	154
Figura 134: Interfície del Port flow analysis tool (I).....	156
Figura 135: Interfície del Port flow analysis tool (II).....	156

ÍNDIX DE TAULES

Taula 1: Dades dels col·lectors d'escapament (I).....	20
Taula 2: Dades dels col·lectors d'escapament (II).....	23
Taula 3: Dades del downpipe (I)	28
Taula 4: Dades del downpipe (II)	28
Taula 5: Potència i parell del model de sèrie ideal	31
Taula 6: Potència i parell del model de sèrie.....	32
Taula 7: Potències i parells dels models a comparar	35
Taula 8: Augment de potència i parell dels models a comparar	36
Taula 9: Resultats de la parametrització del diàmetre dels col·lectors	47
Taula 10: Resultats de la parametrització de la longitud dels col·lectors.....	48
Taula 11: Resultats de la parametrització de l'angle d'unió dels col·lectors	50
Taula 12: Resultats de les diferents disposicions del conducte de la turbina en el downpipe.....	52
Taula 13: Resultats de la parametrització del diàmetre del conducte de sortida de la wastegate.....	54
Taula 14: Resultats de la parametrització de l'angle d'unió de conductes en el downpipe	55
Taula 15: Trams que componen els conductes dels col·lectors d'escapament	65
Taula 16: Potència del model amb sistema d'escapament millorat	67
Taula 17: Comparació de prestacions segons el sistema d'escapament	69
Taula 18: Comparació de pressions amb la millora del sistema d'escapament.....	71
Taula 19: Comparació de la temperatura en la millora del sistema d'escapament	72
Taula 20: Trams que componen els conductes dels col·lectors d'escapament	77
Taula 21: Dades dels cilindres o bloc motor.....	143
Taula 22: Dades de les lleves	143
Taula 23: Dades de les vàlvules i la culata	144
Taula 24: Dades del turbocompressor i la vàlvula wastegate.....	146
Taula 25: Dades de pressió de sobrealimentació.....	148
Taula 26: Dades dels elements de l'admissió	149
Taula 27: Dades dels col·lectors d'escapament (I).....	150
Taula 28: Dades dels col·lectors d'escapament (II).....	151
Taula 29: Dades del downpipe (I)	152
Taula 30: Dades del downpipe (II)	153
Taula 31: Valors obtinguts del banc de flux.....	155
Taula 32: Valors de coeficient de flux en funció del rati L/D	157

ÍNDEX D'EQUACIONS

Equació 1: Formula del parell (Joseph W. Kane, Morton M. Sternheim. 2000)	90
Equació 2: Formula de la potència (Joseph W. Kane, Morton M. Sternheim. 2000).....	93
Equació 3: Rendiment volumètric	94
Equació 4: Llei dels gasos ideals (Thomas Engel, Philip J. Reid. 2007).....	97
Equació 5: Llei dels gasos ideals (Thomas Engel, Philip J. Reid. 2007).....	108
Equació 6: Relació A/R (Garrettmotion. 2020)	112
Equació 7: Funció de l'accionador de la wastegate (Lotus engine simulation. 2001)	134
Equació 8: Elecció de la pretensió de la molla (Lotus engine simulation. 2001).....	134
Equació 9: Equació per determinar la constant elàstica de la molla (Lotus engine simulation. 2001).....	134

MEMÒRIA

1. INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

En els motors de combustió interna alternatius, el sistema d'escapament és un element a tenir en compte alhora de buscar el màxim rendiment d'aquests motors. Això és degut a que els sistemes d'escapament que porten els motors de sèrie solen ser molt simples i poc eficients per temes econòmics i de procés de fabricació. Els escapaments de vehicles clàssics com el Mitsubishi Lancer Evolution VI, donada la seva antiguitat, quasi mai han passat per un procés de disseny i optimització emprant la tecnologia digital actual.

1.2 Objecte

El procés de disseny, construcció i proves d'un sistema d'escapament per a un vehicle Mitsubishi Lancer Evolution VI destinat a competicions de circuit, tenint present les dimensions i localitzacions concretes dels elements que en formen part actualment. Buscar una solució que doni el resultat més eficient possible.

1.3 Abast

Dades de les prestacions del vehicle original obtingudes experimentalment en banc de potència i banc de flux, obtenció de paràmetres geomètrics del motor, introducció de les dades experimentals i geomètriques en un software especialitzat de simulació de motors, obtenció de resultats i procés d'optimització paramètric, plànols del sistema d'escapament dissenyat i la fabricació i muntatge d'aquest en el cotxe de competició.

2. MOTIVACIÓ DE L'AUTOR

De ben petit que m'agrada molt el món del motor, el disseny i la fabricació, sobretot mirat des del punt de vista de l'enginyeria. He treballat com a mecànic en el taller de cotxes familiar on he obtingut coneixements sobre motors tant de cotxes convencionals com en cotxes de competició. En el taller també he modificat alguns cotxes per augmentar-los el rendiment i des de fa poc tinc un vehicle Mitsubishi Lancer EVO VI el qual vull potenciar el motor i modificar per la competició.

La motivació principal d'aquest treball és voler canviar el sistema d'escapament d'aquest vehicle Mitsubishi EVO VI destinat a la competició per tal d'augmentar-li la potència i el rendiment. El sistema d'escapament de sèrie d'aquest vehicle, igual que en la majoria de vehicles, està dissenyat per abaratir costos de fabricació i suposa una pèrdua d'eficiència en el motor. Els components del sistema d'escapament que es poden trobar en el mercat estan dissenyats segons coneixements teòrics generals però no han estat calculats per un motor en concret. Per tant si es volen obtenir els components del sistema d'escapament fets a mida i calculats expressament pel vehicle en concret, s'ha de fer mitjançant un programa de simulació de motors i a partir del model creat optimitzar el sistema d'escapament.

3. MARC TEÒRIC

Degut a l'apartat de simulació, cal tenir una base teòrica sobre els motors de combustió en especial el motor a estudiar. Amb aquesta base teòrica es podran entendre les dades del motor entrades al programa de simulació, els resultats, les interpretacions i conclusions. En aquest apartat s'explicaran els paràmetres bàsics del motor a estudiar i els coneixements teòrics sobre sistemes d'escapament, ja que aquesta és la part a optimitzar en el treball. Els coneixements teòrics sobre el funcionament dels motors de combustió alternatius de quatre temps i els altres components que els formen estan a l'Annex A – Teoria.

3.1 Paràmetres bàsics del motor

El motor utilitzat en aquest treball funciona amb el cicle de quatre temps, està turboalimentat i refrigerat per aigua. Té quatre cilindres en línia i una cilindrada total de 2.000cc (centímetres cúbics). Els pistons tenen un diàmetre de 85mm i una carrera de 88mm. Cada cilindre disposa de dues vàlvules d'admissió i dues d'escapament accionades per un sistema de distribució DOHC. L'alimentació de combustible es porta a terme mitjançant injecció electrònica governada per la ECU (Electronic Control Unit) que és la unitat de control de motor. La mateixa ECU controla l'encesa de la guspira dins la cambra de combustió i la relació de compressió dels cilindres és de 9,0:1. A la gràfica de la Figura 1 es poden veure les corbes de parell i potència del motor, on desenvolupa un parell màxim de 364Nm a 3.000rpm i una potència màxima de 206KW a 6.000rpm.

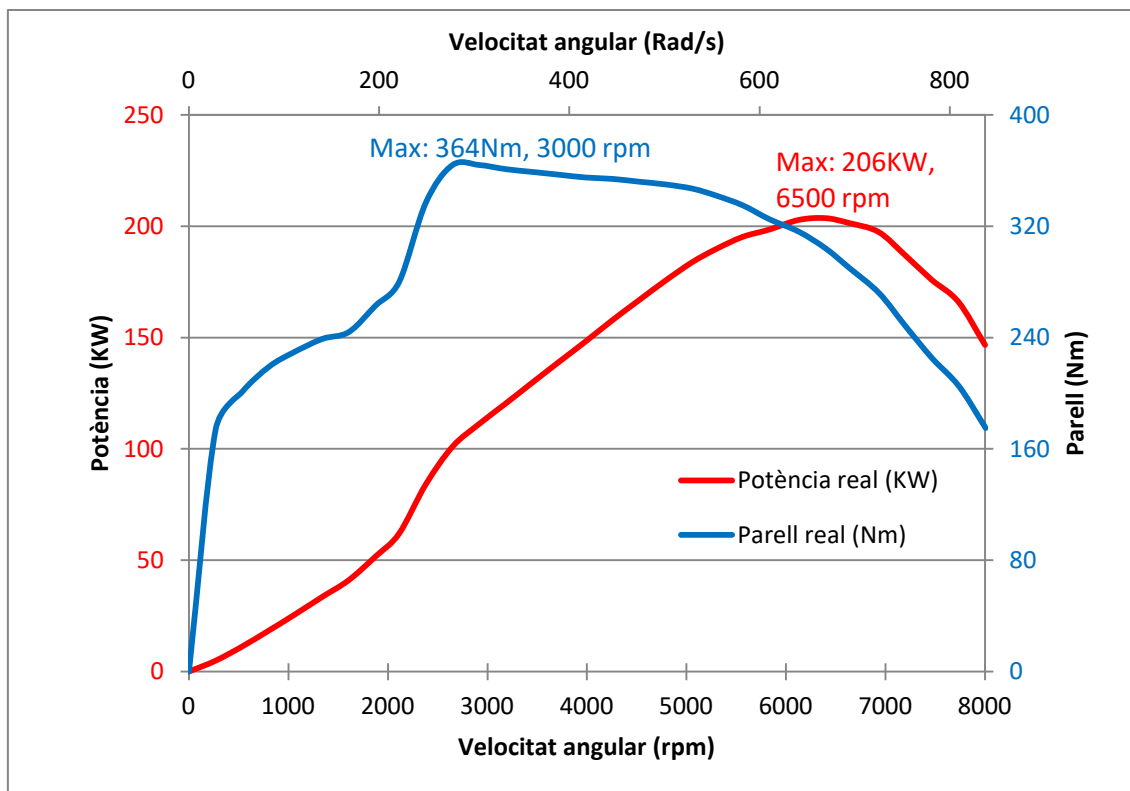


Figura 1: Corba parell i potència del Mitsubishi EVO VI de sèrie

3.2 Sistema d'escapament

El sistema d'escapament és l'encarregat d'evacuar els gasos del motor resultants de la combustió a l'exterior. Encara que formi part de l'evacuació de gasos, el sistema d'escapament es una part important en el funcionament del motor. D'aquest també en depèn el rendiment i la potència.

En els motors d'aspiració atmosfèrica, el sistema d'escapament té com a finalitat principal evacuar els gasos de la manera més eficient possible. La Figura 2 mostra un diagrama de blocs amb els diferents elements que componen un sistema d'escapament d'un motor atmosfèric. El sentit de les fletxes del diagrama és el mateix sentit que els gasos d'escapament del motor.

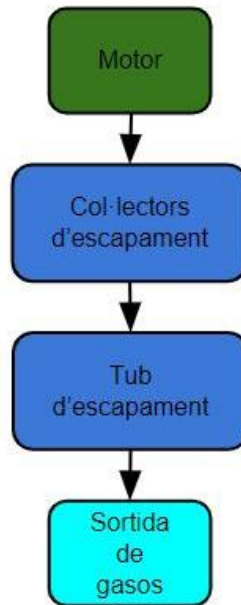


Figura 2: Diagrama de blocs d'escapament d'un motor atmosfèric

En els motors amb turbocompressor, els gasos d'escapament són els encarregats d'accionar la turbina solidària al compressor que permetrà comprimir els gasos d'admissió. Aquests elements del sistema d'escapament també han d'oferir la mínima restricció o contrapressió als gasos d'escapament del motor. Per tant en els motors amb turbocompressor els gasos d'escapament tenen una funció principal en el funcionament del motor. La Figura 3 mostra un diagrama de blocs amb els diferents elements que componen un sistema d'escapament amb turbocompressor. El sentit de les fletxes en el diagrama és el mateix sentit que els gasos d'escapament en el motor. Encara que s'explicaran els dos sistemes d'escapament, el motor a estudiar funciona amb turbocompressor per tant l'explicació es centrarà en aquesta part.

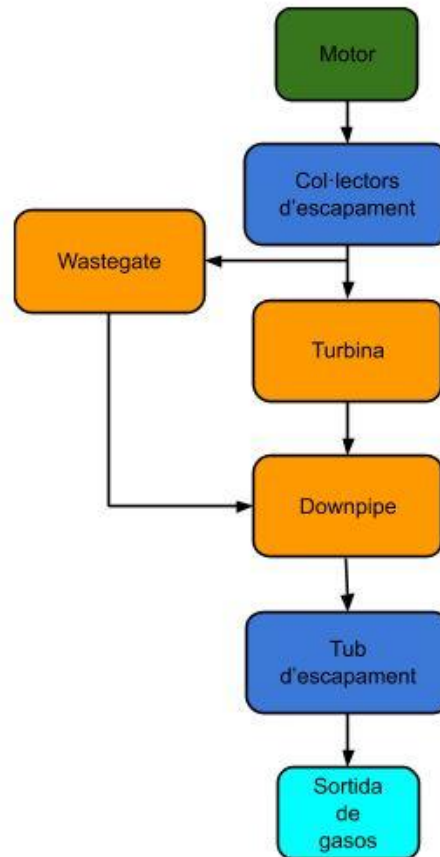


Figura 3: Diagrama de blocs de l'escapament d'un motor amb turbocompressor

3.2.1 Col·lectors d'escapament

Els col·lectors d'escapament uneixen els diferents conductes d'escapament provinents de cada cilindre habitualment en un de sol, on la longitud i secció d'aquests conductes són valors que fan variar el comportament del motor. La disposició i geometria de les unions entre aquests conductes també són importants per la bona evacuació de gasos del sistema d'escapament i del motor en general, ja que a les unions es creen restriccions de flux que s'han d'intentar minimitzar per així augmentar l'eficiència d'escapament de gasos del motor.

La fase d'escapament de cada cilindre només dura aproximadament un 25% del temps de cicle o 180° de rotació del cigonyal, pel que en els conductes dels col·lectors no hi flueix un flux constant de gasos d'escapament, sinó un flux polsant. Aquest flux polsant és un fenomen natural ja que la vàlvula s'obre de forma alterna. El comportament d'aquest gas d'escapament enfront un canvi de secció provoca la generació d'ones de pressió que viatgen més ràpid que el propi gas, i poden ser de caràcter positiu o negatiu segons com sigui aquesta secció. Degut a aquestes variacions de pressió

provocades pels canvis de secció i el flux polsant, en col·lectors mal dissenyats es pot donar el cas que la pressió que genera l'escapament de gasos d'un cilindre interfereixi negativament als gasos d'un altre, o fins i tot que hi hagi reflux de gasos. En el cas d'uns col·lectors d'escapament ben dissenyats i adaptats a la perfecció amb el motor, el fenomen de les ones de pressió s'utilitza a favor segons convé. Quan es vol impedir que surti mescla fresca del cilindre, per exemple en el creuament de vàlvules, es necessita una ona de pressió positiva per tal que ho impedeixi. Si es vol buidar correctament el cilindre afavorint la fase inicial de l'admissió, es necessita que arribi una ona de pressió negativa just abans del tancament de la vàlvula d'escapament. En el cas dels motors de quatre temps, això s'aconsegueix jugant amb la longitud del conducte d'escapament. Els canvis de secció dins el sistema d'escapament es troben a la pròpia vàlvula, a les unions dels conductes i a la unió amb el turbocompressor encara que aquest últim té poc efecte.

La Figura 4 mostra un col·lector d'escapament de sèrie de Renault GT Turbo. Aquest col·lector està dissenyat per ser compacte i barat de construir. Com es pot veure a la imatge està fet de fosa de ferro, això li dona una rugositat interna que fa augmentar les pèrdues de càrrega en el flux de gasos. Però el gran problema d'aquest col·lector és la seva geometria. Les longituds dels diferents conductes no són iguals i el disseny de les unions no és homogeni per tots els cilindres. Si el conducte d'un cilindre té una longitud més curta que els altres, les ones de pressió no viatjaran igual de ràpid, i això pot provocar un desfasament en aquestes. Aquest desfasament pot arribar a impedir el flux degut a pujades de pressió o fins i tot crear fluxos en sentit invers.



Figura 4: Col·lectors d'escapament de Renault GT Turbo

El conducte del cilindre 4 és el més perjudicial pels altres tres. És el conducte més curt per tan els polsos arriben més directes a la unió amb el conducte principal, i aquesta unió no està encarada a la sortida sinó perpendicular amb el conducte principal. Aquesta alineació de conductes fa que tot el conducte principal estigui sotmès a un reflux quan el cilindre 4 fa l'escapament. El comportament d'aquestes ones de pressió depèn de molts paràmetres com són la temperatura, les dimensions dels conductes, els canvis de secció, les unions, el cabal de gasos, les revolucions del motor, etc. Degut a que hi ha tants de paràmetres en joc, és imprescindible l'ús de la simulació per tal de calcular aquestes ones de pressió i el flux de gasos. El programa de simulació escollit per aquest treball és el *Lotus Engine Simulation*® el qual ha sigut facilitat gràcies al Dr. Martí Comamala. L'obtenció de la llicència és gràcies a la Universitat de Girona, encara que existeix una versió més senzilla del programa de lliure accés.

La Figura 5 mostra el diagrama de flux de massa d'aire en funció dels graus de cigonyal durant un cicle de motor en el conducte principal (Figura 4) del col·lector d'escapament de sèrie. Aquest diagrama de flux ha sigut obtingut amb el programa de simulació *Lotus Engine Simulation*, en el qual s'ha simulat el motor de Renault GT Turbo amb el respectiu col·lector d'escapament de la Figura 4. Encerclats en verd es poden veure els tres pics de flux de gasos de combustió que corresponen als escapaments dels cilindres 1, 2 i 3. Però quan el cilindre 4 fa escapament es genera un flux invers de 0'05kg/s en el conducte principal. Aquests gasos que han quedat dins el conducte principal degut al reflux de l'escapament del cilindre 4, han de ser evacuats durant les fases d'escapament dels altres tres cilindres. Això genera un augment de flux de gasos i de pressió dins els col·lectors d'escapament que fan baixar el rendiment i potència del motor. Aquesta reducció de rendiment i potència del motor és deguda a que pel reflux de gasos d'escapament, apart de no poder evacuar correctament tots els gasos del cilindre, una part d'ells romanguí a l'interior durant la fase d'admissió amb efectes adversos. Per una banda impedeix l'entrada de part de mescla fresca, incrementa la temperatura total dels gasos abans de la compressió i després de la compressió, afavorint en gran mesura que aparegui el fenomen de detonació. El fenomen de detonació succeeix quan per excés de temperatura o de compressió de la mescla aire-combustible, part de la mescla (normalment la que es troba tocant les parets del cilindre) fa combustió per ella mateixa abans que s'encengui la guspira controlada per la ECU. La detonació pot comportar conseqüències molt greus pel motor i sempre s'ha d'evitar.

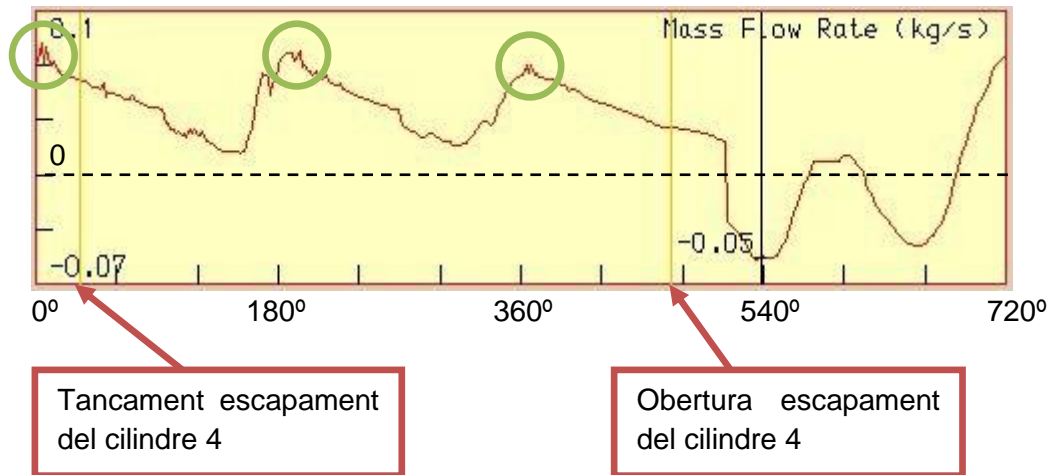


Figura 5: Diagrama de flux de massa d'aire en un cicle. Conducte principal del col·lector d'escapament de sèrie de Renault GT Turbo

La Figura 6 mostra uns col·lectors d'escapament de competició pel mateix motor de Renault GT Turbo. Aquests col·lectors són construïts en acer inoxidable, pel que ofereixen una menor fricció als gasos generant menors pèrdues de càrrega. Els quatre conductes tenen igual longitud i s'uneixen en un únic punt. La unió de fluxos també és igual per tots els conductes i aquests estan encarats cap a la sortida del col·lector. Tots quatre tenen iguals condicions pel que no n'hi ha cap que pugui suposar un impediment pels altres tres. Aquestes són les característiques d'uns bons col·lectors d'escapament.

La longitud i altres aspectes dels conductes dels col·lectors d'escapament de la Figura 6 no han sigut calculats per obtenir el màxim rendiment i potència del motor ja que aquests estan completament determinats per temes físics d'espai. Malgrat això, pel fet de tenir les quatre longituds dels conductes iguals i una bona unió de fluxos de gasos, aquests ja són uns bons col·lectors que milloraran el rendiment i potència del motor.

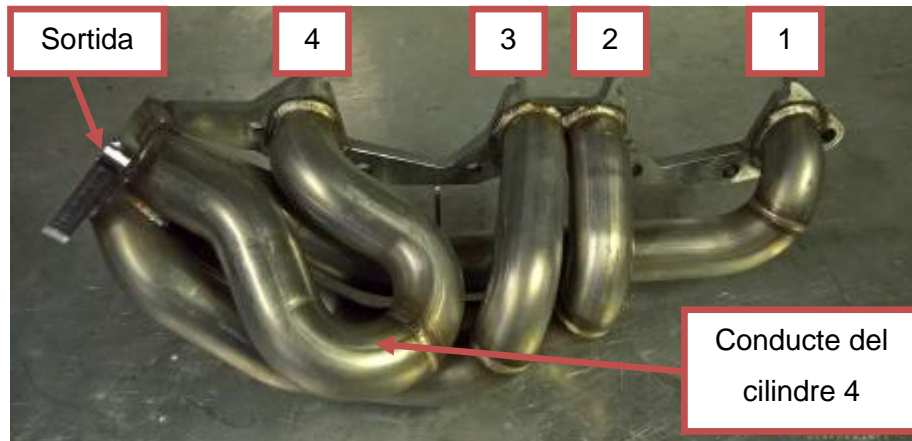


Figura 6: Col·lectors d'escapament de competició per Renault GT Turbo (Ruanovaperformance. 2020.)

La Figura 7 mostra el diagrama de flux de massa de gasos d'escapament en funció dels graus de cigonyal durant un cicle de motor en el conducte del cilindre 1 del col·lector d'escapament de competició (Figura 6). Aquest diagrama de flux també ha sigut obtingut amb el programa *Lotus Engine Simulation*, simulant el mateix motor de Renault GT Turbo però amb el col·lector d'escapament de competició de la Figura 6. Es mostra el diagrama de flux del conducte del cilindre 1 encara que els altres tres són molt similars o amb una diferència menyspreable, amb un desfasament de 180 graus de rotació del motor (o un quart de cicle).

Com es pot observar en el diagrama de la Figura 7 hi ha un flux màssic de gasos durant la fase d'escapament del cilindre 1, i fora de la fase d'escapament del cilindre 1 els refluxos de gasos d'altres cilindres són mínims i menyspreables. A diferència dels col·lectors d'escapament de sèrie, on s'arriba a un reflux de gasos de 0'05kg/s els quals s'han d'evacuar durant les fases d'escapament dels altres cilindres, en els col·lectors de competició s'observa una petita oscil·lació de fluxos de gasos deguda a les ones de pressió, però que no afecta en la bona evacuació de gasos d'escapament dels cilindres. A la Figura 8 podem veure el flux màssic de gasos d'escapament just després de la unió dels conductes en els col·lectors de competició. En aquest diagrama el flux sempre segueix el mateix sentit i es pot distingir clarament una seqüència que es repeteix quatre vegades durant el cicle. Aquesta seqüència és l'escapament dels quatre cilindres els quals no s'interfereixen negativament entre ells.

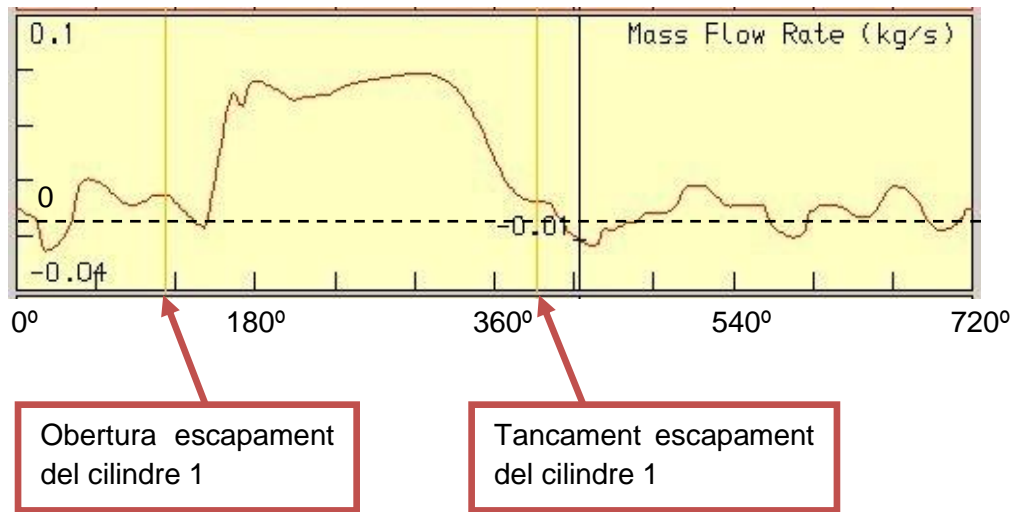


Figura 7: Diagrama de flux de massa d'aire en un cycle. Conducte del cilindre 1 del col·lector d'escapament de competició de Renault GT Turbo

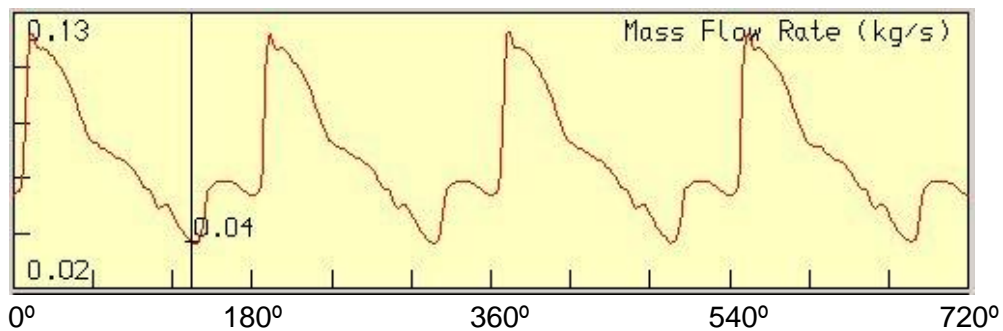


Figura 8: Diagrama de flux de massa d'aire en un cycle. Unió dels cilindres del col·lector d'escapament de competició de Renault GT Turbo

3.2.2 Turbocompressor

El turbocompressor és una màquina tèrmica que mitjançant l'energia dels gasos d'escapament fa girar una turbina centrífuga solidària a un compressor de rodet. Aquest compressor de rodet és el que sobrealimenta l'admissió del motor. La sobrealimentació es basa en que l'aire que entra al motor està a una pressió superior a l'atmosfèrica. L'explicació del turbocompressor i les seves parts que el componen estan a l'apartat A.5 Turbocompressor dins l'Annex A – Teoria.

Seguint el flux de gasos d'escapament, la turbina del turbocompressor va just després dels col·lectors d'escapament del motor. Gran part dels gasos provinents dels col·lectors entren dins la turbina, i la resta passen per la vàlvula wastegate. Aquests

gasos d'escapament es tornaran a unir en el downpipe un cop hagin sortit de la turbina i la vàlvula wastegate.

3.2.3 Wastegate

La vàlvula wastegate és un element regulador pels motors amb turbocompressor. Aquesta vàlvula s'utilitza per regular la pressió d'admissió, i ho fa variant el cabal de gasos d'escapament que entren dins el turbocompressor. Variant aquest cabal de gasos, el turbocompressor varia el seu règim de treball, i d'aquesta manera es regula la pressió de gasos d'admissió que oferirà el compressor.

La Figura 9 mostra un esquema de com funciona la vàlvula wastegate. Aquesta vàlvula està ubicada abans de la turbina del turbocompressor seguint el flux de gasos d'escapament. Hi ha turbocompressors que incorporen la vàlvula wastegate dins la pròpia carcassa de la turbina, i d'altres que no la incorporen i aquesta es troba ubicada en els col·lectors d'escapament. Independentment de si està ubicada al turbocompressor o als col·lectors d'escapament, la vàlvula wastegate funciona exactament igual i compleix el mateix propòsit.

La vàlvula wastegate és una vàlvula normalment tancada, i aquest estat de normalment tancat el fa mitjançant una molla. Per obrir-se utilitza un pulmó que treballa a pressió. Aquesta pressió que li arriba és la que hi ha a l'admissió del motor. La pressió hi arriba mitjançant un tub connectat a un punt de l'admissió del motor com pot ser el col·lector d'admissió o la sortida del compressor del turbo. No sempre es vol la mateixa pressió d'admissió en el motor, pel que la ECU regula aquesta pressió que arriba al pulmó mitjançant una electrovàlvula. L'equilibri entre la força elàstica de la molla i la força de pressió del pulmó determina l'obertura de la vàlvula wastegate, essent aquesta obertura progressiva i podent regular amb exactitud la pressió d'admissió del motor.

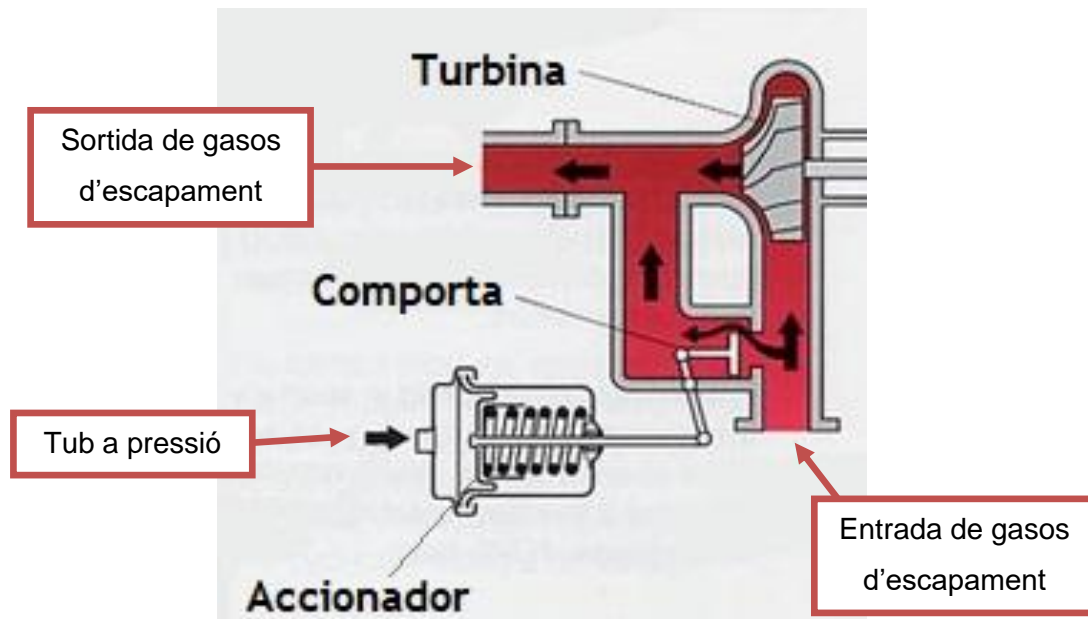


Figura 9: Esquema de funcionament de la vàlvula wastegate (Turbotec. 2020)

A la Figura 10 es veu la sortida de gasos d'escapament d'un turbocompressor. Aquest turbocompressor porta incorporada la vàlvula wastegate dins la seva voluta d'escapament. Les dues sortides de gasos d'escapament estan en compartiments separats, i aquests s'ajuntaran el en "downpipe" que s'explicarà en el següent apartat.

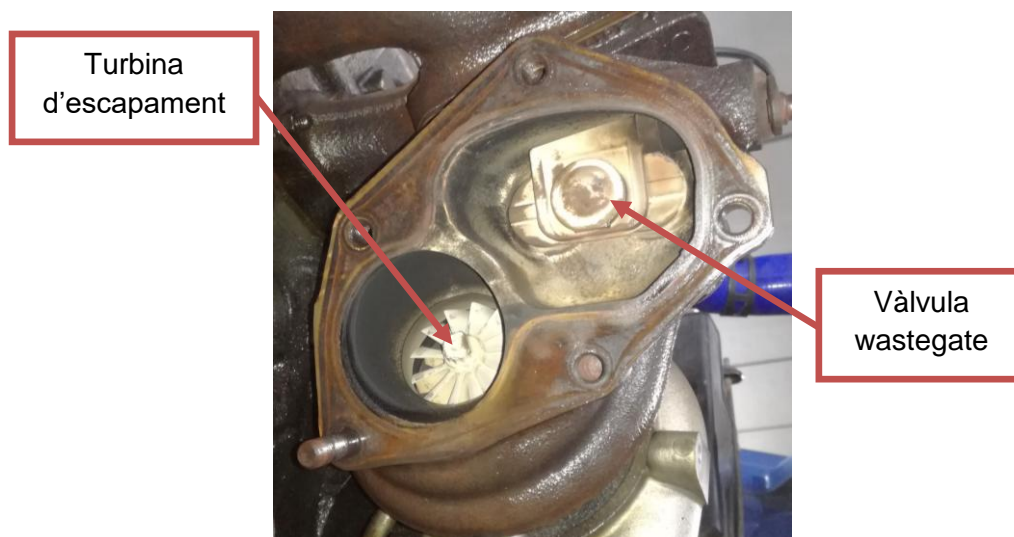


Figura 10: Sortida de la turbina i wastegate

3.2.4 Downpipe

El downpipe és el conducte pel qual els gasos d'escapament són evacuats de la turbina del turbocompressor. En aquest també s'hi uneixen els gasos provinents de la sortida de la vàlvula wastegate. El propòsit del downpipe és evacuar de la manera més eficient possible i generant la mínima restricció els gasos que surten de la turbina. La unió amb els gasos provinents de la wastegate també ha de ser el més eficient possible. La Figura 11 mostra un downpipe de competició. A aquesta figura es pot veure com el conducte de la wastegate s'uneix al conducte de la turbina de manera que no li interfereixi ni al sentit ni la direcció del flux. Això s'aconsegueix fent l'angle més petit possible entre els dos conductes a la unió.

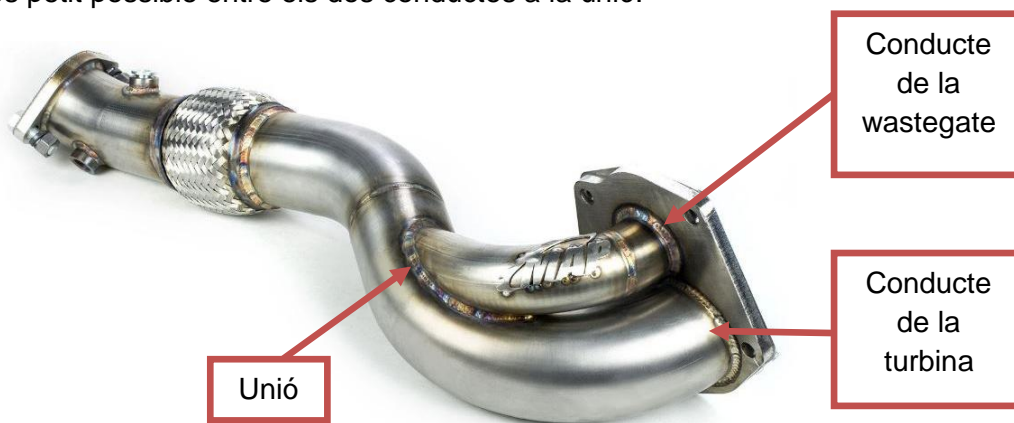


Figura 11: Downpipe de competició (mapformance. 2019)

3.2.5 Tub d'escapament

El tub d'escapament és el conducte pel qual els gasos d'escapament són evacuats del vehicle. En els motors sense turbocompressor el tub d'escapament està ubicat just després dels col·lectors d'escapament, en canvi en els motors amb turbocompressor el tub d'escapament està ubicat després del downpipe.

En els vehicles de circulació, el tub d'escapament també té altres funcions com reduir el soroll provocat per la combustió del motor i reduir les emissions tòxiques i contaminants provocades també per la combustió del motor. El soroll es redueix mitjançant silenciadors acústics, i les emissions tòxiques es redueixen mitjançant un catalitzador de gasos d'escapament. A efectes de rendiment i potència d'un motor aquests dos elements representen una restricció al flux de gasos d'escapament, cosa que genera una pèrdua de càrrega que fa empitjorar el rendiment i la potència del motor. Els vehicles de competició no tenen aquests elements per tant la restricció en el tub d'escapament es pot considerar menyspreable.

4. PROCÉS DE DISSENY DEL SISTEMA D'ESCAPAMENT

En aquest apartat s'explicarà mitjançant un diagrama de flux la metodologia i procediment portat a terme per poder arribar a les solucions òptimes obtingudes amb la simulació. Aquest diagrama de flux també engloba el procediment de disseny en programa CAD fins arribar a un disseny de sistema d'escapament apte per la fabricació i instal·lació en el vehicle.

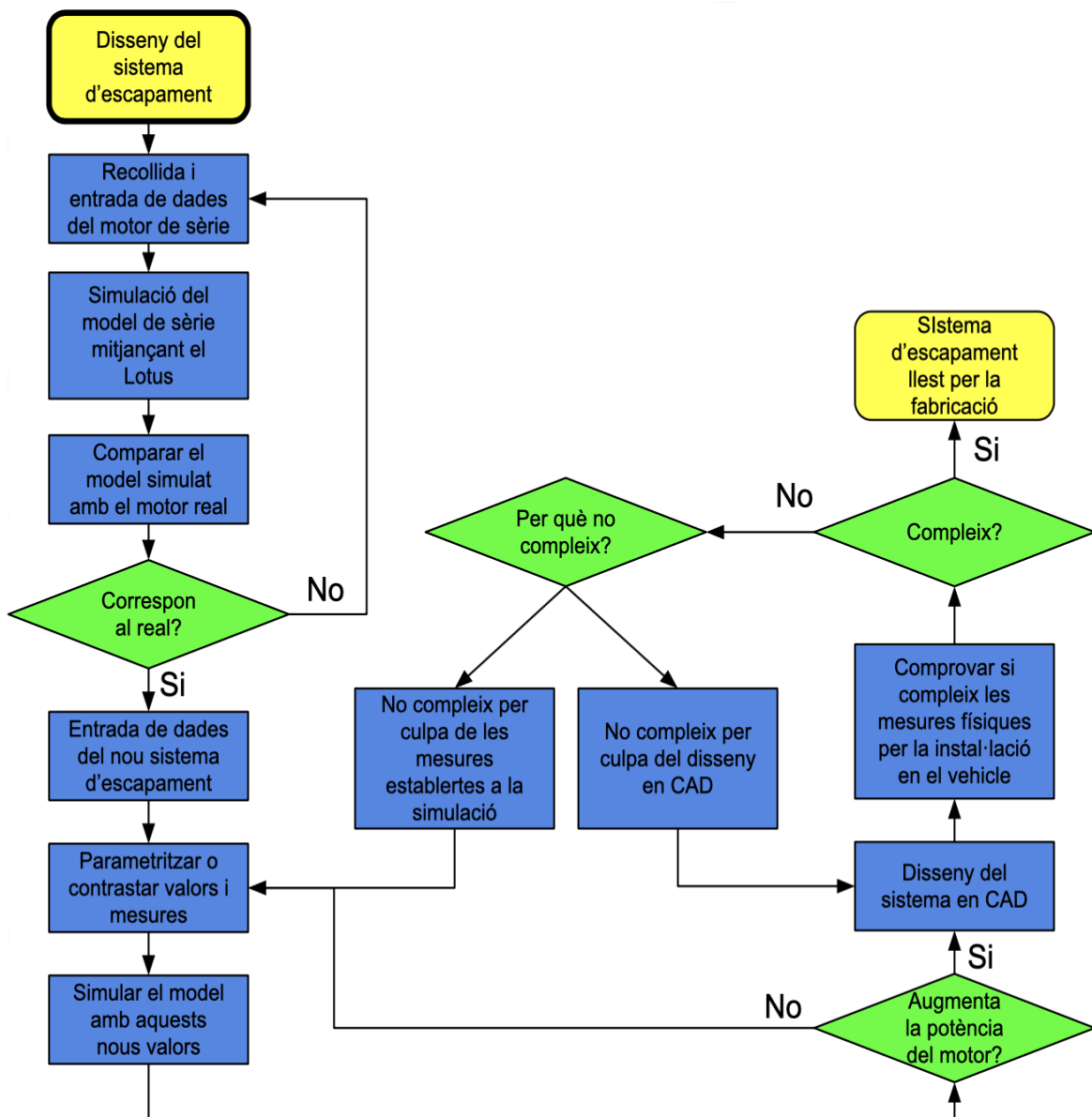


Figura 12: Diagrama de flux del disseny del sistema d'escapament

Com es pot veure en el diagrama de flux el primer objectiu és el de recrear el motor a estudiar en el programa de simulació. Aquest primer pas és molt important per poder obtenir posteriorment uns resultats fiables. Un cop s'ha recreat un model en el programa que s'ajusta al motor a estudiar, el següent pas és canviar el sistema d'escapament d'aquest model. El sistema d'escapament estarà dissenyat primerament segons coneixements extrets de l'estudi de la memòria i s'anirà ajustant amb l'ajuda del programa. Aquest ajust de mesures i formes, escollides i calculades amb l'ajuda del programa, estaran limitades segons requeriments dimensionals i de fabricació. Un cop s'han escollit les millors mides i formes possibles pel sistema d'escapament, es dissenyarà aquest sistema d'escapament en programari CAD. Aquest disseny també es farà en funció dels requeriments dimensionals i de fabricació. Si el disseny no compleix els requeriments es modificarà o es tornarà a desenvolupar amb el programa de simulació amb diferents límits de mesura i forma per tal que el disseny pugui ser vàlid. Un cop el disseny estigui acabat i complint amb els objectius establerts, el sistema d'escapament estarà llest per la fabricació.

4.1 Entrada de dades i validació

Per tal de poder simular el motor en el programa *Lotus engine simulation* cal entrar totes les dades necessàries del motor a estudiar. Un cop entrades aquestes dades s'ha de simular el model i comparar les prestacions obtingudes amb les del motor real. Si aquestes prestacions obtingudes no s'ajusten amb el model real, s'ha de trobar on està l'error i corregir-lo, o tenir-lo en compte pels futurs càlculs. L'explicació del funcionament del programa *Lotus engine simulation* està a l'apartat B.1 Lotus Engine Simulation dins l'Annex B – Simulació.

Les dades entrades en el programa s'han extret de diverses fonts i maneres com pot ser la fitxa tècnica del vehicle, la fitxa d'homologació per cotxe de ral-li, dades de flux mesurades amb un banc de fluxos, buscant informació per Internet, mesurant els diversos elements del motor, etc. En els següents apartats s'explica com s'han entrat les dades dels col·lectors d'escapament i el downpipe de sèrie del vehicle. Les altres dades del motor necessàries per formar el model en el *Lotus* estan a l'apartat B.2 Introducció de dades dins l'Annex B – Simulació. També s'han recopilat totes les dades del motor a l'apartat B.3 Resum de Dades del motor dins aquest mateix annex.

La Figura 13 mostra la interfície de construcció de models en el programa *Lotus*, on hi ha entrat el model de sèrie del motor a estudiar.

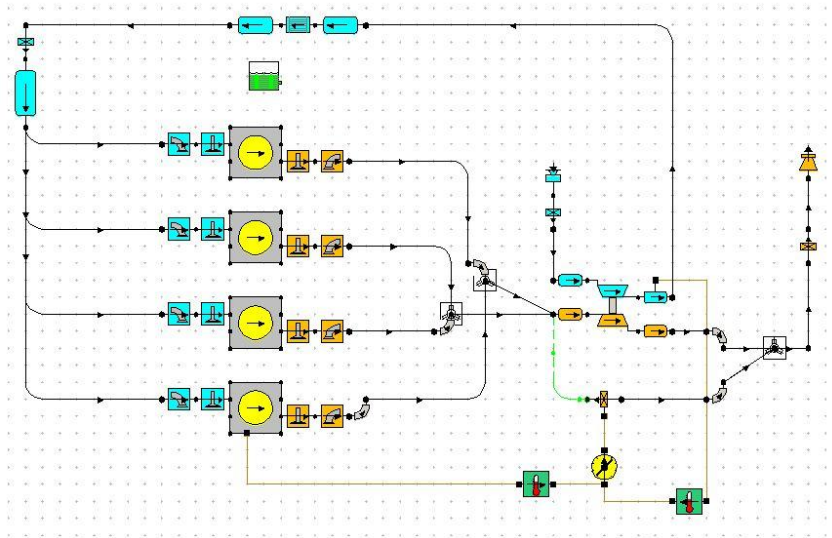


Figura 13: Model del motor a estudiar en el Lotus

La introducció de dades s'ha fet de forma més exhaustiva i precisa en els components del sistema d'escapament que s'han d'optimitzar. Aquests components són els col·lectors d'escapament i el downpipe, i degut a que s'hauran de comparar amb els models optimitzats i dissenyats en el treball, s'han de modelar exactament com són a la realitat.

4.1.1 Dades dels col·lectors d'escapament

La Figura 14 mostra els col·lectors d'escapament del vehicle. El mètode de fabricació d'aquests col·lectors és de fosa de ferro en motllo de sorra. Es poden diferenciar a la part superior les quatre entrades de gasos provinents dels cilindres i a la part inferior la sortida d'aquests del col·lector per entrar dins la turbina. Per calcular el gruix dels conductes s'ha utilitzat un peu de rei amb el que s'ha mesurat l'interior i exterior del conducte a les entrades i sortides de gasos. La diferència entre aquestes dues mesures dividida entre dos és el gruix de la paret. Aquest gruix de paret és de 3mm.

En els col·lectors d'escapament del vehicle, la connexió d'aquests col·lectors amb la turbina del turbocompressor es fa mitjançant dos conductes separats. Aquesta disposició s'anomena "twin scroll". Un cop dins la turbina del turbocompressor, aquests dos conductes s'uneixen just a l'entrada de gasos dins el rotor. El sistema "twin scroll" té com avantatges augmentar la potència del motor, proporcionar un règim de treball

més ampli en quan a cabal de gasos d'escapament a la turbina i ajudar a no obstaculitzar els gasos d'escapament d'un cilindre a un altre. Aquest sistema "twin scroll" manté separats els gasos provinents dels cilindres 1 i 4, i els provinents dels cilindres 2 i 3. Gràcies a aquesta disposició hi ha una menor obstaculització de gasos d'escapament.



Figura 14: Col·lectors d'escapament del motor a estudiar

Per mesurar les dades del col·lector d'escapament, primerament s'ha mirat la disposició dels conductes que el formen i les seccions principals d'aquests. La Figura 15 mostra aquesta disposició i seccions en un esquema fet en els propis col·lectors.

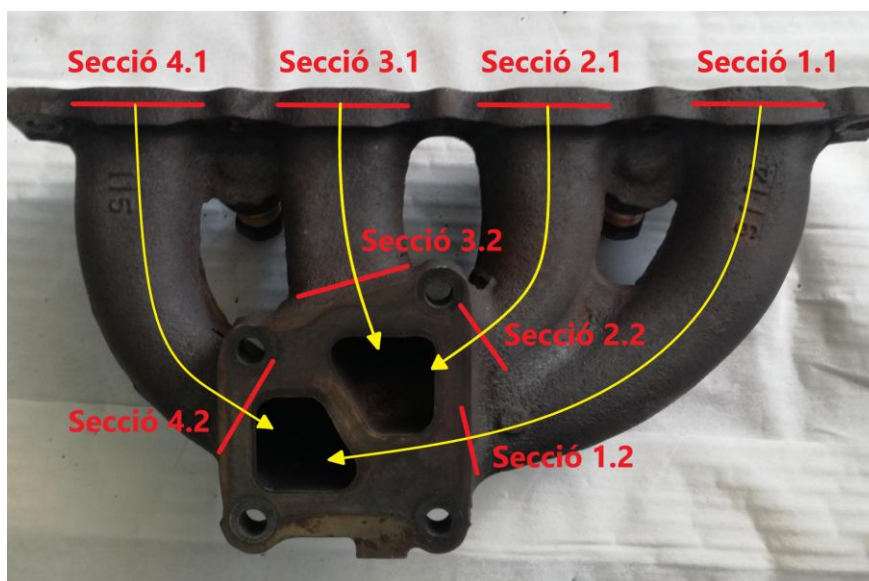


Figura 15: Esquema dels conductes i seccions del col·lector d'escapament

Per poder modelar els col·lectors d'escapament en el programa s'ha fet un esquema (Figura 16) de com es dividirà aquest en els diferents blocs de la interfície de construcció. Com es pot veure a la imatge, els conductes 1 i 4 s'uneixen a la *Unió 1-4*, i els conductes 2 i 3 a la *Unió 2-3*. El cilindre 1 estarà compost per un colze (*Cond. 1.1*) i una recta (*Cond. 1.2*), el cilindre 2 estarà compost d'una recta (*Cond. 2.1*) i un colze (*Cond. 2.2*), el cilindre 3 estarà compost per una recta (*Cond. 3.1*) i el cilindre 4 estarà compost per una recta (*Cond. 4.1*) i un colze (*Cond. 4.2*). Les dades mesurades d'aquests conductes són les de la Taula 1.

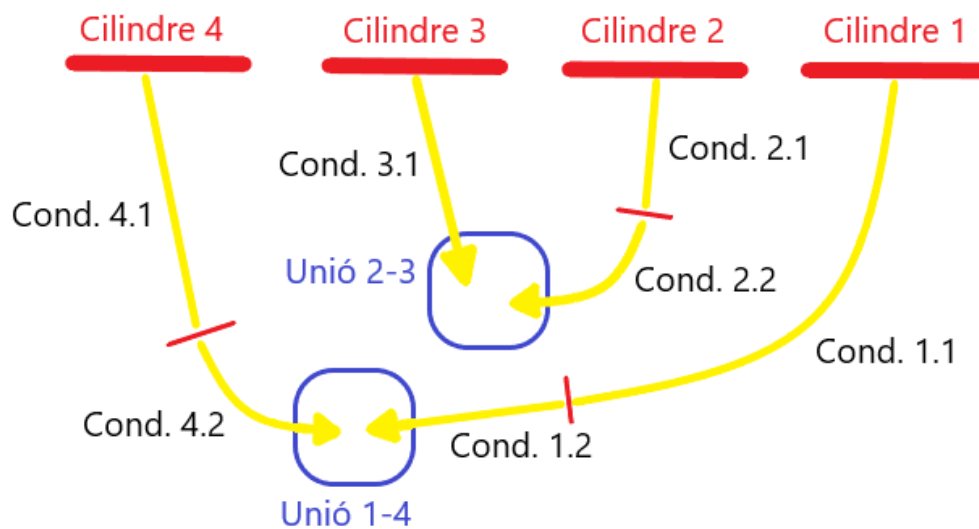


Figura 16: Esquema per modelar en blocs els col·lectors d'escapament

Taula 1: Dades dels col·lectors d'escapament (I)

Dades dels col·lectors d'escapament (I)			
Conducte	Longitud (mm)	Radi (mm)	Angle de curvatura (graus)
1.1	168	120	80
1.2	90	Conducte recte	
2.1	70	Conducte recte	
2.2	42	40	60
3.1	100	Conducte recte	
4.1	50	Conducte recte	
4.2	86	70	70

L'explicació de com s'entren les dades dels conductes en el *Lotus* estan a l'apartat B.2.6 Dades de l'admissió a l'Annex B – Simulació. Els conductes en forma de colze s'entren exactament igual que els rectes però afegint les dades: angle de curvatura i radi de curvatura.

Les seccions dels conductes d'entrada i sortida dels col·lectors s'han extret de la fitxa d'homologació de ral·li de la FIA Historic Database. La Figura 17 mostra la secció d'entrada de gasos provinents dels cilindres dins els col·lectors i la Figura 18 la sortida d'aquests gasos cap a la turbina del turbocompressor.

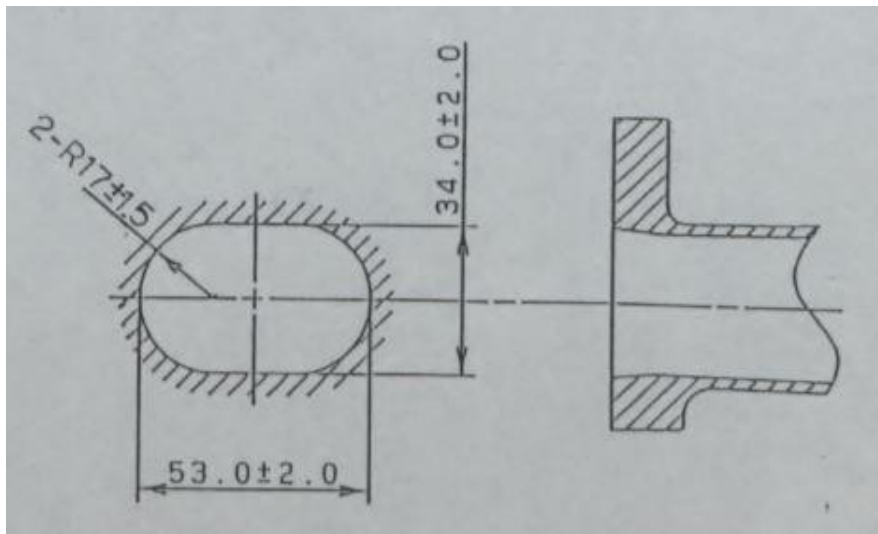


Figura 17: Secció d'entrada del col·lector d'escapament (Fia Historic Database. 1998)

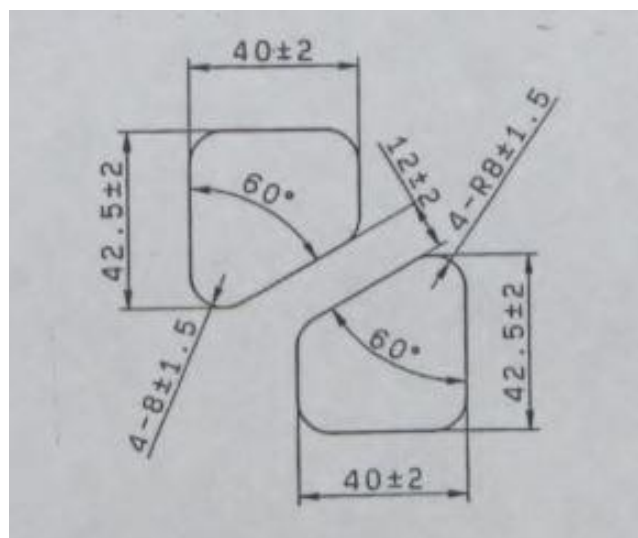


Figura 18: Secció de sortida del col·lector d'escapament (Fia Historic Database. 1998)

Per mesurar les seccions internes dels col·lectors d'escapament esquematitzades a la Figura 15, s'han utilitzat calques que s'han anat ajustant fins coincidir exactament amb la secció del conducte. La Figura 19 mostra una d'aquestes calques ja ajustada dins un conducte del col·lector d'escapament. Un cop fetes, aquestes calques es ressegueixen a un foli, s'escanegen a mida real i mitjançant el programa CAD *Solidworks* es crea una àrea d'aquesta secció. El propi *Solidworks* calcula l'àrea d'aquestes seccions i amb això se'n pot treure el diàmetre equivalent. La Figura 20 mostra el resseguit de les calques de les quatre seccions interiors dels col·lectors.



Figura 19: Calca dins un conducte del col·lector d'escapament

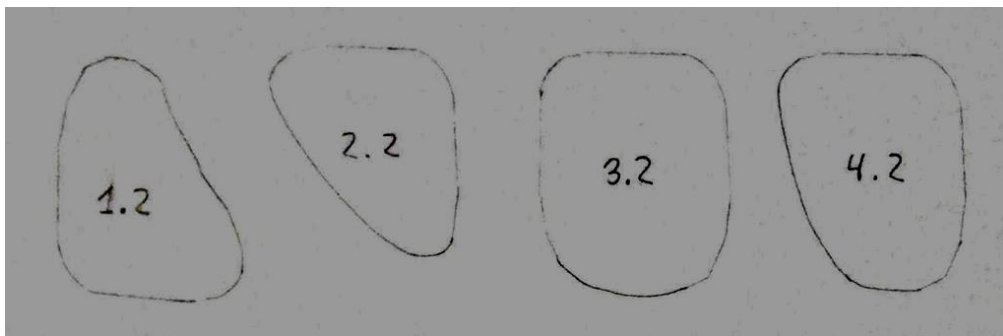


Figura 20: Resseguit de les calques de les seccions internes del col·lector d'escapament

Un cop es sap l'àrea d'aquestes seccions, es calcula el diàmetre equivalent suposant que són seccions circulars per tal de poder introduir aquestes dades al programa *Lotus*. No s'ha aplicat cap factor de reducció d'àrea alhora de convertir aquestes seccions a circulars degut a que no hi ha arestes vives en les seccions i són amb

formes arrodonides. Les dades d'aquestes seccions estan a la Taula 2. Aquests diàmetres equivalents dels conductes han estat introduïts al programa *Lotus* de la mateixa manera que a l'apartat B.2.6 Dades de l'admissió dins l'Annex B – Simulació.

Taula 2: Dades dels col·lectors d'escapament (II)

Dades dels col·lectors d'escapament (II)		
Secció	Àrea (mm ²)	Diàmetre equivalent (mm)
Entrada als col·lectors (x4)	1560	44,5
Sortida dels col·lectors (x2)	1400	42,2
1.2	830	32,5
2.2	790	31,8
3.2	1080	37
4.2	910	34

Els dos conductes pels quals surten els gasos dels col·lectors i entren dins la turbina (Figura 18), tenen un diàmetre equivalent de 42,2mm i una longitud de 10mm.

Les unions dels conductes es modelen al programa *Lotus* mitjançant el bloc “unió de conductes”. La Figura 21 mostra aquests blocs d'unió a la interfície de construcció del *Lotus*.

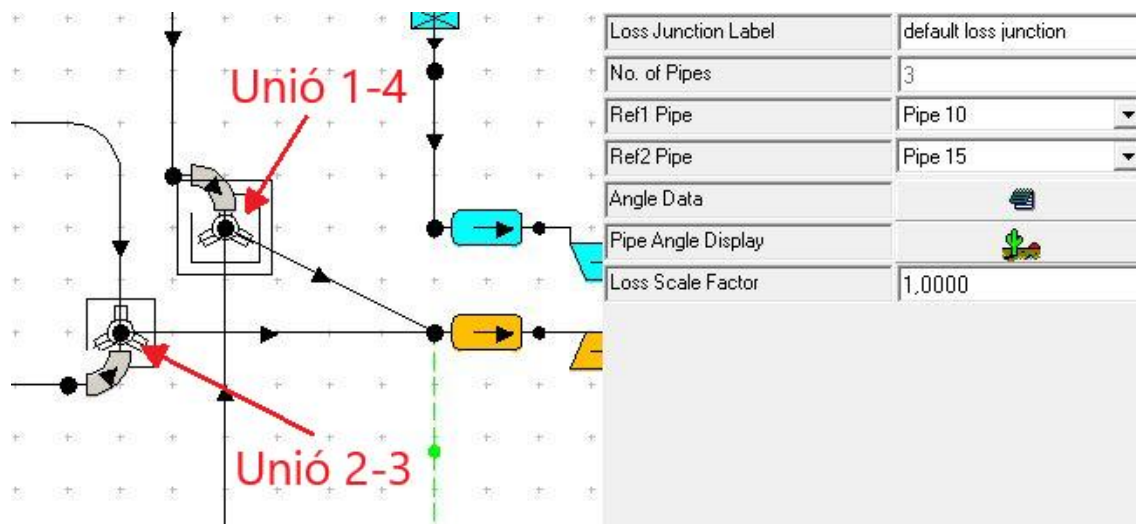


Figura 21: Blocs d'unió de conductes en el Lotus

La geometria d'una unió en el *Lotus* es defineix mitjançant angles entre els conductes que la conformen. S'ha de designar un conducte com el de primera referència i un altre com a segona referència amb un angle respecte el primer. Aquests dos creen els eixos amb que es definiran els angles entre tots els conductes, d'aquesta manera només amb dos angles per cada conducte es poden definir les geometries de les unions.

La Figura 22 mostra la interfície "Pipe Angle Display" en la unió dels conductes 1 i 4. Dins aquesta interfície s'entren aquests angles que defineixen les unions, mentre es pot visualitzar en tres dimensions la disposició d'aquests conductes. En aquest cas el conducte 4 (Color vermell) és la primera referència. El conducte 1 (Color blau) és la segona referència i està posicionat a un angle de 150° respecte el 4. Per últim, el conducte de sortida del col·lector d'escapament (Color gris), forma un angle de 90° amb el conducte 4 i també un angle de 90° amb el pla que formen els dos conductes de referència.

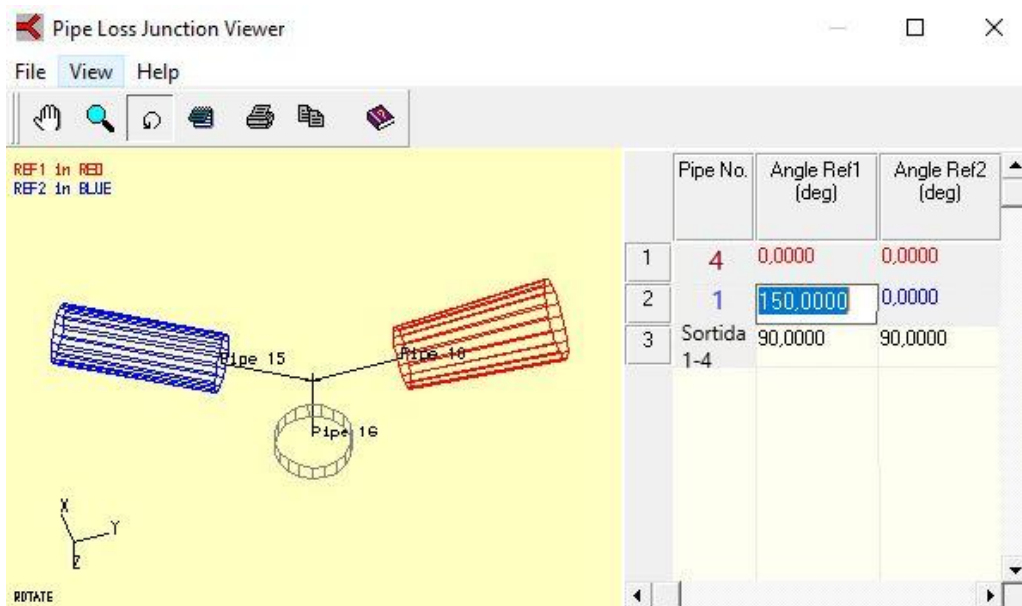


Figura 22: Unió 1-4 en el Lotus

De la mateixa forma s'ha entrat la unió dels conductes 2 i 3. La Figura 23 mostra la disposició de la unió dins la interfície del programa *Lotus*. El conducte 3 (Color vermell) és la primera referència. El conducte 2 (Color blau) és la segona referència i està posicionat 70° respecte el 3. Per últim el conducte de sortida del col·lector d'escapament (Color gris), forma un angle de 90° respecte el conducte 3 i també un angle de 90° respecte el pla que formen els dos conductes de referència.

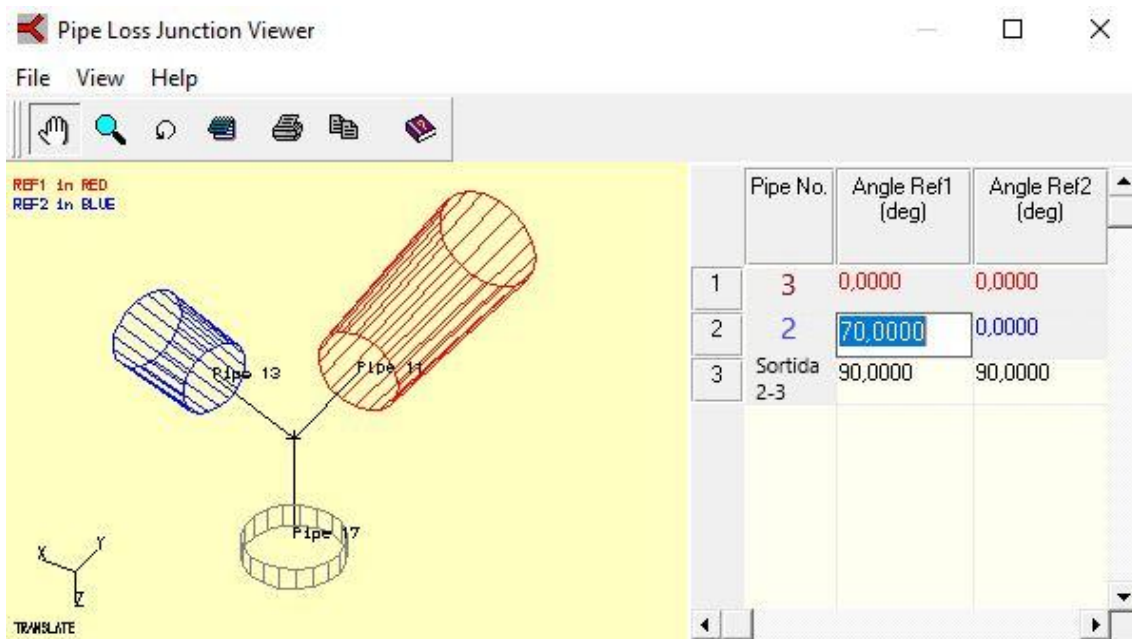


Figura 23: Unió 2-3 en el Lotus

4.1.2 Dades del downpipe

El downpipe igual que els col·lectors d'escapament, ha estat fabricat de fosa de ferro en un motlle de sorra i té un gruix de paret de 3mm. La Figura 24 mostra aquest downpipe. A la part superior es veuen les entrades de gasos provinents de la sortida de la turbina i la sortida de la vàlvula wastegate. A la part inferior, el downpipe es connecta amb el tub d'escapament.



Figura 24: Downpipe del motor a estudiar

Per poder entendre bé la disposició de les entrades de gasos en el downpipe, s'ha de veure com és la part de la turbina a on va col·locat aquest downpipe. La Figura 10 de l'apartat 3.2.3 Wastegate, mostra la sortida de la turbina i la sortida de la vàlvula wastegate.

El model del downpipe s'ha entrat en el programa *Lotus* igual que els col·lectors d'escapament. La Figura 25 i la Figura 26 mostren un esquema de com són els conductes per dins i les seves seccions principals.

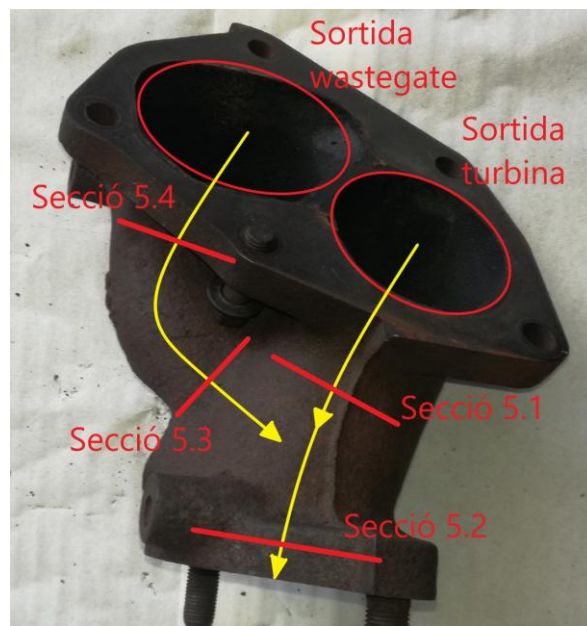


Figura 25: Esquema dels conductes i seccions del downpipe (I)

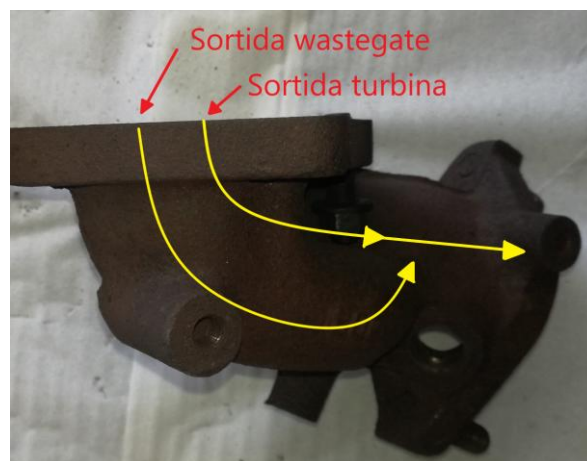


Figura 26: Esquema dels conductes i seccions del downpipe (II)

A la Figura 26 es pot observar que els gasos de la sortida de la turbina han de passar per un colze de casi 90° amb un radi de gir molt petit. És molt important entrar bé les dades d'aquest colze ja que pot ser crucial per simular bé el comportament del downpipe. La unió de gasos entre els dos conductes també és molt important.

S'ha separat la geometria del downpipe en conductes rectes, colzes i unions per tal de poder entrar aquestes dades en els blocs del programa *Lotus*. La Figura 27 mostra un esquema d'aquests blocs. Com es pot veure a la figura, el conducte 5.1 forma part de la carcassa de la turbina per tant aquest serà sempre fixe en els futurs dissenys del downpipe.

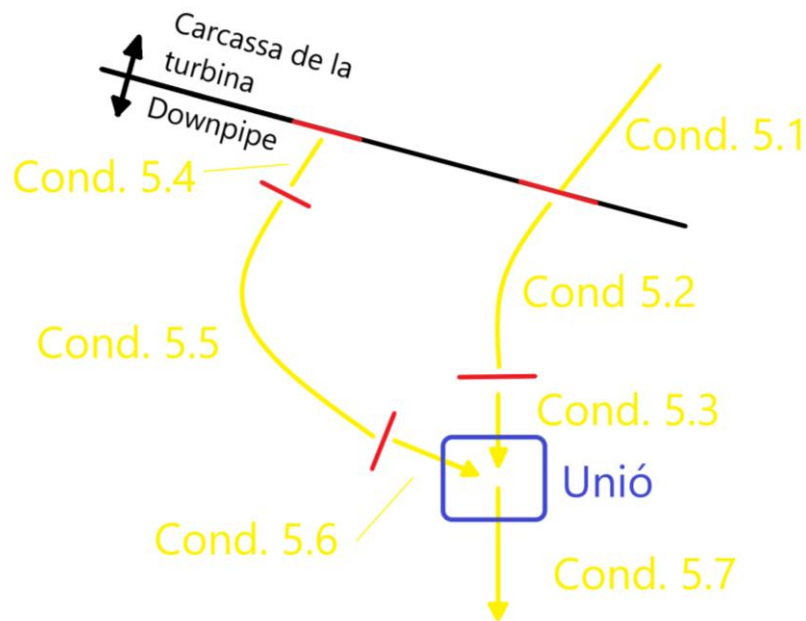


Figura 27: Esquema per modelar en blocs el downpipe

La Taula 3 mostra les mesures dels diferents conductes que conformen el downpipe.

Taula 3: Dades del downpipe (I)

Dades del downpipe (I)			
Conducte	Longitud (mm)	Radi (mm)	Angle de curvatura (graus)
5.1	30	Conducte recte	
5.2	56	38	85
5.3	10	Conducte recte	
5.4	30	Conducte recte	
5.5	71	45	90
5.6	30	Conducte recte	
5.7	50	Conducte recte	

Les seccions de la Figura 25 s'han calculat igual que les dels col·lectors d'escapament. Moltes d'aquestes seccions són circulars per tant no ha calgut calcular l'àrea de la secció sinó directament el diàmetre. La Taula 4 mostra aquestes mesures de les seccions.

Taula 4: Dades del downpipe (II)

Dades del downpipe (II)		
Secció	Àrea (mm²)	Diàmetre equivalent (mm)
Sortida de la turbina	Secció Circular	62
Sortida de la wastegate	15400	70
5.1	Secció Circular	56
5.2	Secció Circular	70
5.3	Secció Circular	35
5.4	Secció Circular	40

La unió entre els dos conductes és la de la Figura 28. És la mateixa interfície del *Lotus* utilitzada a l'apartat dels col·lectors d'escapament. El conducte de la sortida de la turbina és la primera referència (Color vermell), la sortida de la vàlvula wastegate (Color blau) és la segona referència i està a 70° del primer. Per últim la sortida del downpipe (Color gris), està ubicat a 180° respecte el conducte de la sortida de la turbina i dins el pla que conformen els dos conductes de referència.

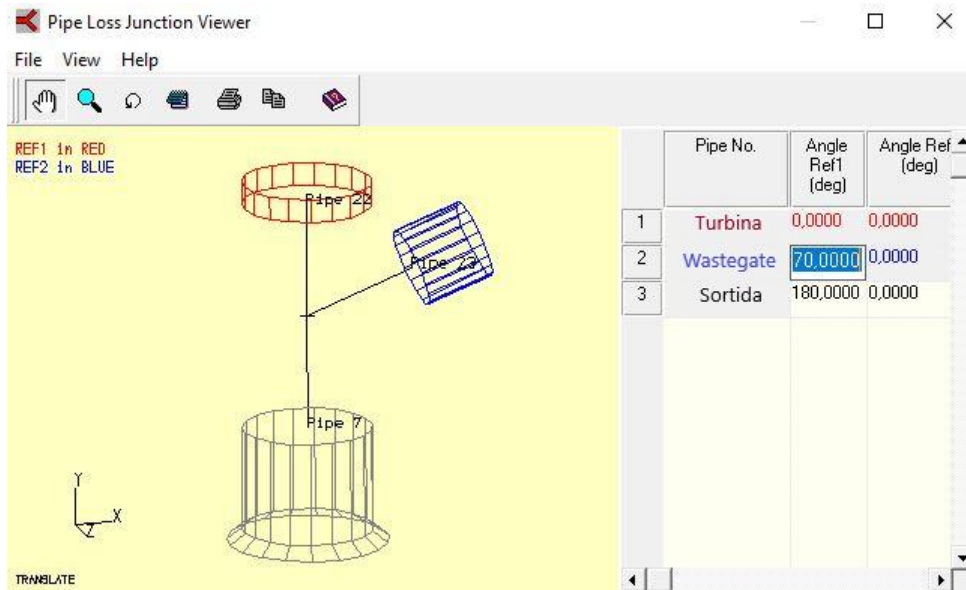


Figura 28: Unió de conductes dins el downpipe

4.1.3 Validació de les dades

Per poder validar el model del motor de sèrie, cal comparar les corbes de potència i parell obtingudes amb les del motor real del vehicle. Aquestes corbes del motor real són les de la Figura 29 i s'han obtingut mitjançant un banc de potència on s'ha mesurat el vehicle Mitsubishi EVO VI. Aquest banc de potència mesura la potència i velocitat que ofereix el vehicle a les seves rodes. El mateix programa del banc de potència fa el càlcul de pèrdues en la transmissió del vehicle mitjançant proves a desacceleració. Gràcies a aquest càlcul de pèrdues en la transmissió, el banc de potència et dona com a resultat les corbes de potència i parell a l'eix del cigonyal del motor, que són els mateixos valors que s'obtidran del model del motor en el *Lotus*.

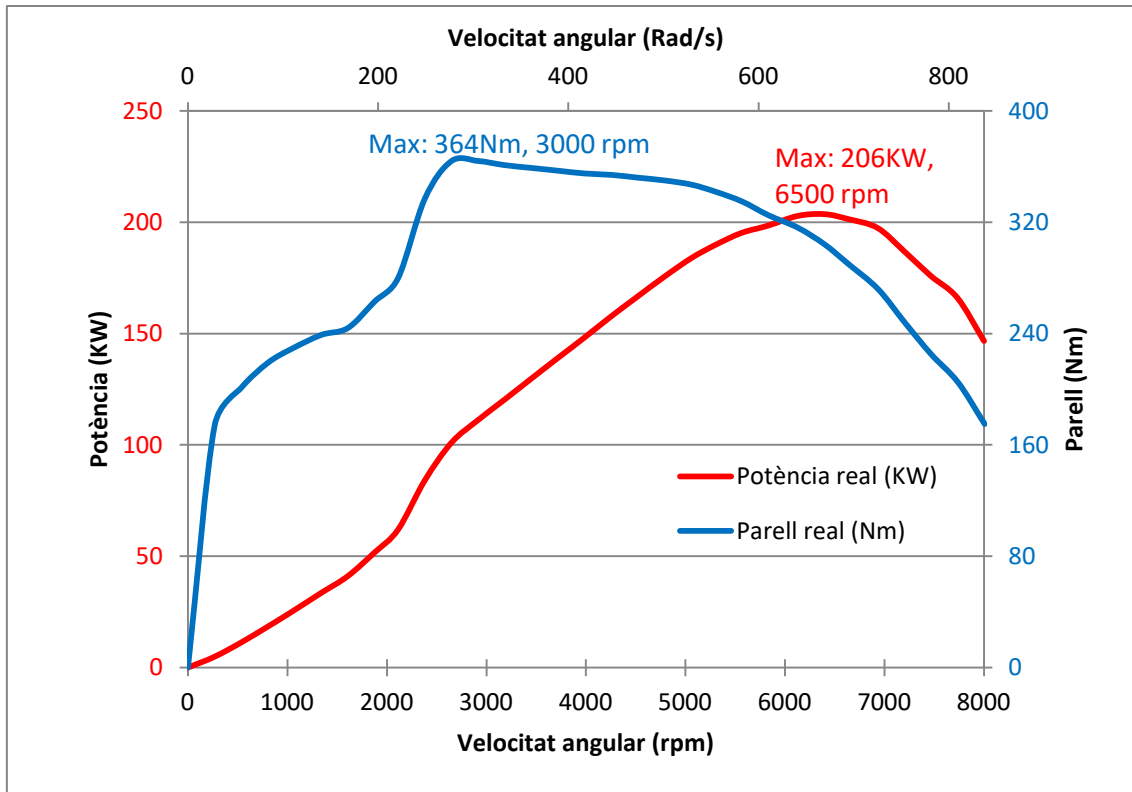


Figura 29: Corbes de potència i parell del motor del Mitsubishi EVO VI

Quan les dades han estat entrades en el programa, s'ha fet una revisió de tots els elements per evitar errors durant la simulació o obtenir resultats erronis. Un cop s'han verificat aquestes dades ja es pot procedir a la simulació del motor. Després de la simulació, es compararan les corbes de potència i parell obtingudes amb les corbes reals del motor del vehicle per tal de poder validar el model. Com que les simulacions porten molt de temps de càlcul, s'ha simulat el motor en condicions estàtiques en les següents velocitats angulars: 1.000rpm, 2.000rpm, 3.000rpm, 4.000rpm, 5.000rpm, 6.000rpm, 7.000rpm i 8.000rpm.

En la primera simulació del model en el *Lotus*, s'han obtingut els següents resultats (Taula 5). La Figura 30 mostra en un mateix gràfic la comparació de les corbes del model de sèrie ideal amb el motor real.

Taula 5: Potència i parell del model de sèrie ideal

Model de sèrie ideal		
RPM	Potència (KW)	Parell (Nm)
1000	18	172
2000	50	240
3000	119	379
4000	156	373
5000	185	354
6000	209	333
7000	206	281
8000	167	199

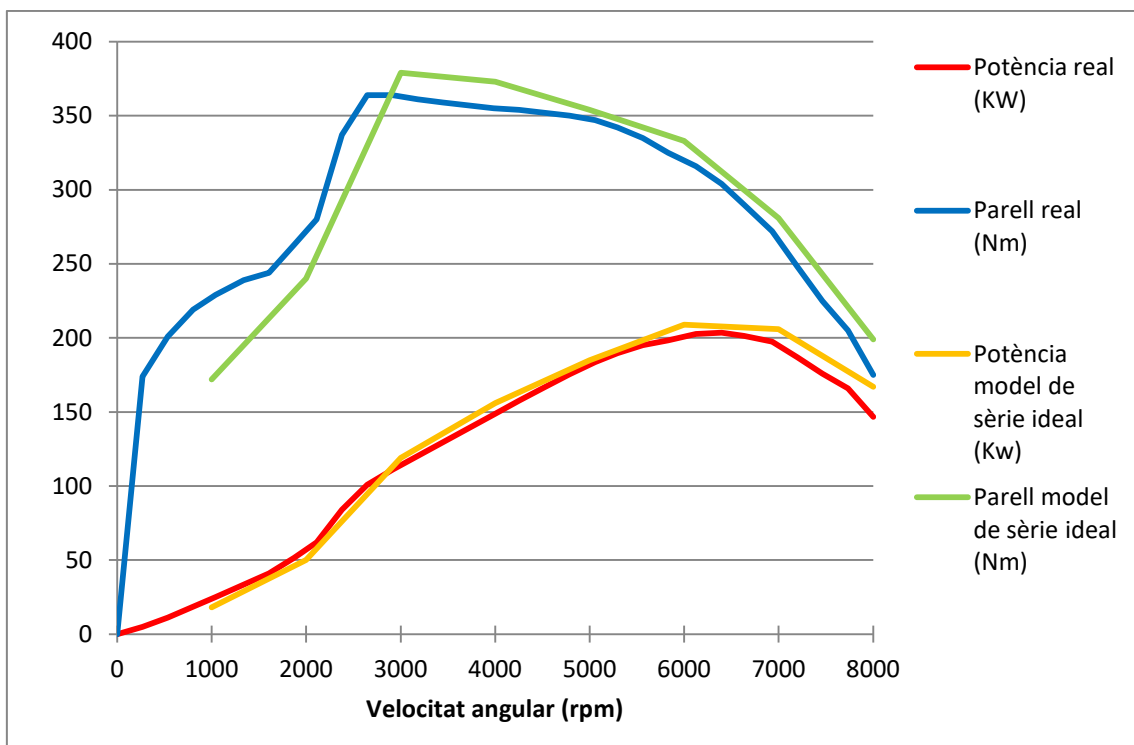


Figura 30: Comparació del model de sèrie ideal amb el motor real

Com es pot veure a la Figura 30, per sota les 3.000 rpm les corbes del model simulat són inferiors a les del motor real. Aquesta diferència no té importància per l'elaboració del treball perquè l'àmbit de revolucions que es vol millorar és de 4.000 a 8.000 rpm, que són les revolucions en que treballa el motor durant l'acceleració del vehicle. Apart dels valors de 1.000 i 2.000rpm, la corba del model simulat és lleugerament superior a la del motor real. Com està explicat a l'apartat B.2.1 Dades del cilindre dins l'Annex B – Simulació, la cambra de combustió simulada segueix un model ideal de combustió, per tant ja té sentit que el model ideal doni més potència i parell que el motor real. Per

ajustar l'eficiència de combustió en el programa, hi ha la dada "combustion efficiency", la qual pot anar de 0 a 1. Per defecte aquest valor és 1 ja que representa una combustió ideal, i s'ha anat modificant per tal que la corba del model s'ajusti el màxim possible a la del motor real. El valor de "combustion efficiency" pel qual s'han ajustat més els valors ha sigut 0'98. Les dades obtingudes del model amb aquest valor són les de la Taula 6. També s'han comparat les corbes d'aquest model amb les del motor real a la gràfica de la Figura 31.

Les corbes d'aquest model s'ajusten molt a les del motor real, per tant serà aquest el que es prendrà com a referència pel treball. Aquest model és el "Model de sèrie". Els sistemes d'escapament s'elaboraran a partir d'aquest model, d'aquesta manera es pot aproximar que els valors que s'obtidran un cop es modifiqui el sistema d'escapament en el programa seran els valors que s'obtidrien realment al modificar el motor del vehicle.

Taula 6: Potència i parell del model de sèrie

Model de sèrie		
RPM	Potència (KW)	Parell (Nm)
1000	18	168
2000	48	232
3000	116	371
4000	153	364
5000	181	346
6000	204	324
7000	200	274
8000	162	194

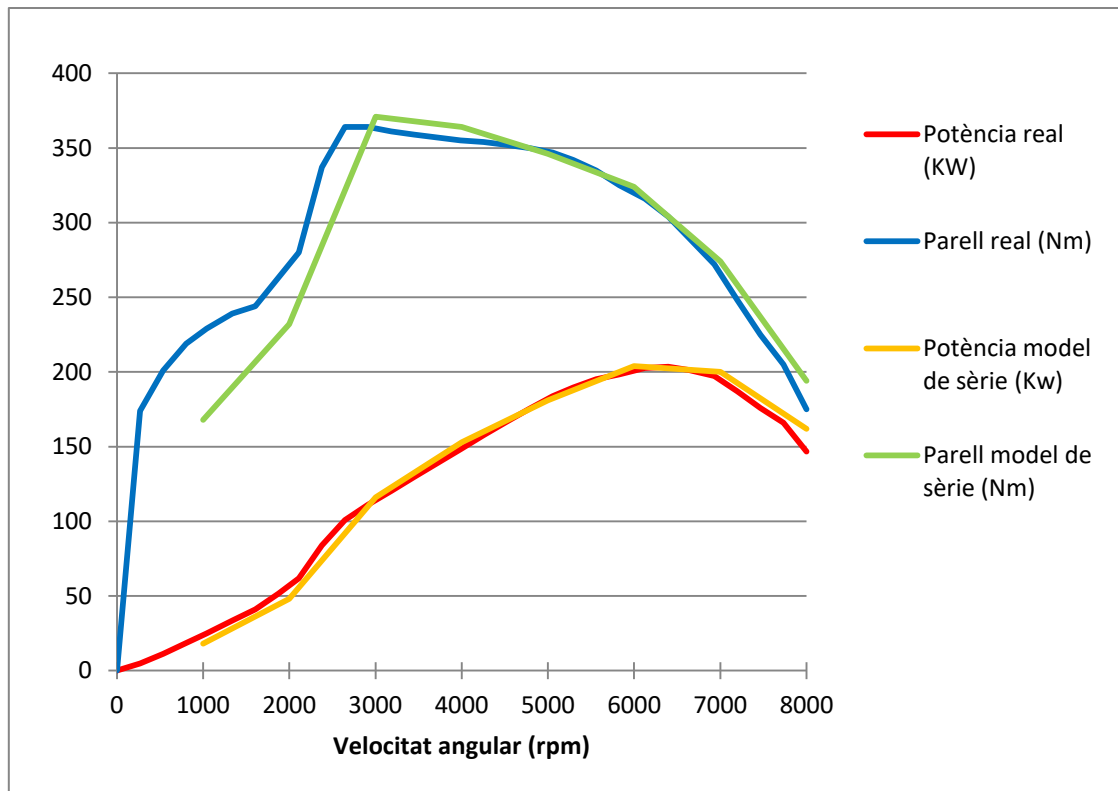


Figura 31: Comparació del model de sèrie amb el motor real

4.2 Disseny del sistema d'escapament

4.2.1 Comparació prèvia al disseny

El sistema d'escapament consta de dues parts a millorar: els col·lectors d'escapament i el downpipe. Abans de començar el procés per millorar el màxim possible aquests dos components de l'escapament, es faran unes comparacions per determinar com s'influeixen mútuament. Per portar a terme aquestes comparacions, s'agafaran dades aproximades de col·lectors d'escapament i downpipe de competició per aquest motor. L'objectiu d'aquest apartat no és determinar uns valors exactes d'augment de potència ja que s'utilitzaran dades aproximades, sinó veure la influència que es tenen mútuament els col·lectors d'escapament i el downpipe. Es farà simulant el model del motor amb tres disposicions diferents: amb els col·lectors canviats (Configuració A), amb el downpipe canviat (Configuració B) i amb els dos canviats a la vegada (Configuració C).

Per obtenir les dades s'han buscat aquests dos elements fets especialment per la competició. Els col·lectors d'escapament són els de la Figura 32. Els quatre conductes tenen una longitud de 350mm, un diàmetre intern de 42'76mm amb un gruix de paret de 2'77mm d'acer inoxidable (Són tubs Schedule 10S que s'explicaran més endavant) i les unions de conductes són a un angle de 40°. S'han aproximat com a conductes rectes degut a que no es sap exactament la geometria d'aquests i no es vol obtenir el rendiment sinó fer una comparació amb diferents disposicions del sistema d'escapament.

El downpipe és el de la Figura 33. Aquest també és d'acer inoxidable però amb un gruix de paret de 1'5mm. L'angle per encarar els conductes cap a la part inferior del motor és igual que el de sèrie i són 85° i 90°, però el que varia és el radi de curvatura que és de 110mm. La secció dels conductes és de 70mm a la sortida de la turbina i 50mm a la sortida de la vàlvula wastegate. La unió del conducte de la wastegate amb el conducte de la turbina és a 40°.



Figura 32: Col·lectors d'escapament de competició per Mitsubishi EVO VI (Sheeprace. 2020)



Figura 33: Downpipe de competició per Mitsubishi EVO VI (J-Spec Performance. 2020)

Els tres models a simular són:

- Model de sèrie + col·lectors (Configuració A)
- Model de sèrie + downpipe (Configuració B)
- Model de sèrie + col·lectors + downpipe (Configuració C)

Un cop modelats a la interfície de construcció, s'han simulat aquests tres models per separat i s'han obtingut els resultats de la Taula 7.

Taula 7: Potències i parells dels models a comparar

RPM	Configuració A		Configuració B		Configuració C	
	Potència (KW)	Parell (Nm)	Potència (KW)	Parell (Nm)	Potència (KW)	Parell (Nm)
4000	155	371	159	380	162	387
5000	182	347	188	359	191	365
6000	214	340	212	337	225	359
7000	211	288	209	284	220	300
8000	174	207	170	203	184	220

Per poder comparar aquests valors de la Taula 7 i extreure'n informació útil pels futurs dissenys del sistema d'escapament, se'ls hi ha restat els valors de potència i parell del model de sèrie (Taula 6). D'aquesta manera s'ha obtingut l'augment de potència i parell per cada configuració (Taula 8). Aquests augments de potència i parell estan representats als gràfics de la Figura 34 i la Figura 35 respectivament. La configuració A + B, és la suma de la configuració A més la configuració B.

Taula 8: Augment de potència i parell dels models a comparar

RPM	Augment configuració A		Augment configuració B		Augment configuració A + B		Augment configuració C	
	Potència (KW)	Parell (Nm)	Potència (KW)	Parell (Nm)	Potència (KW)	Parell (Nm)	Potència (KW)	Parell (Nm)
4000	2	7	6	16	8	23	9	23
5000	1	1	7	13	8	14	10	19
6000	10	16	8	13	18	29	21	35
7000	11	14	9	10	20	24	20	26
8000	12	13	8	9	20	22	22	26

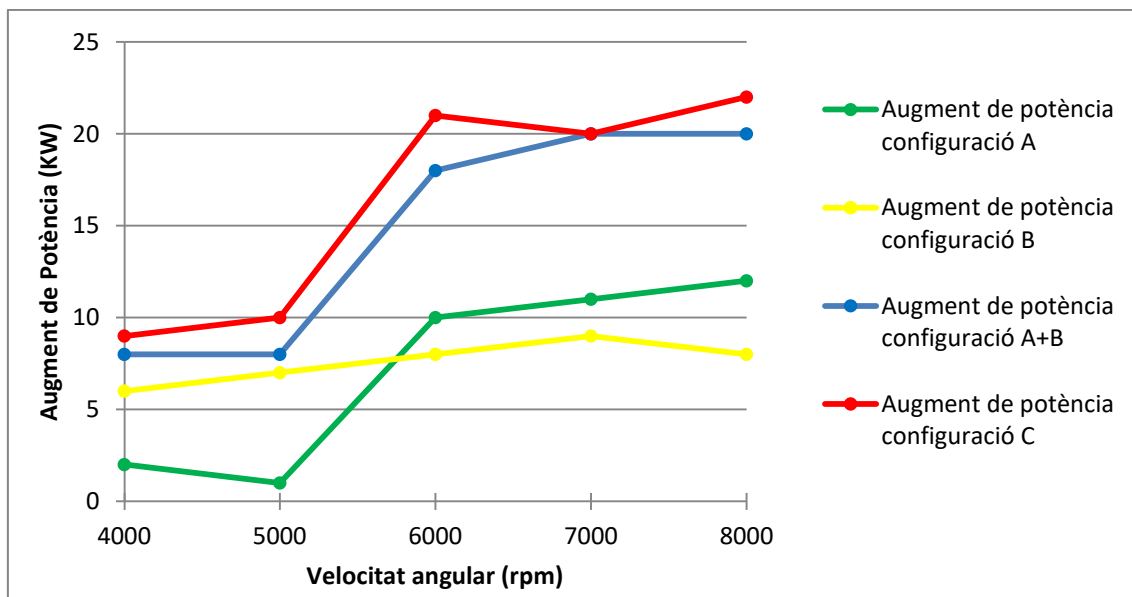


Figura 34: Gràfic d'augment de potència dels models a comparar

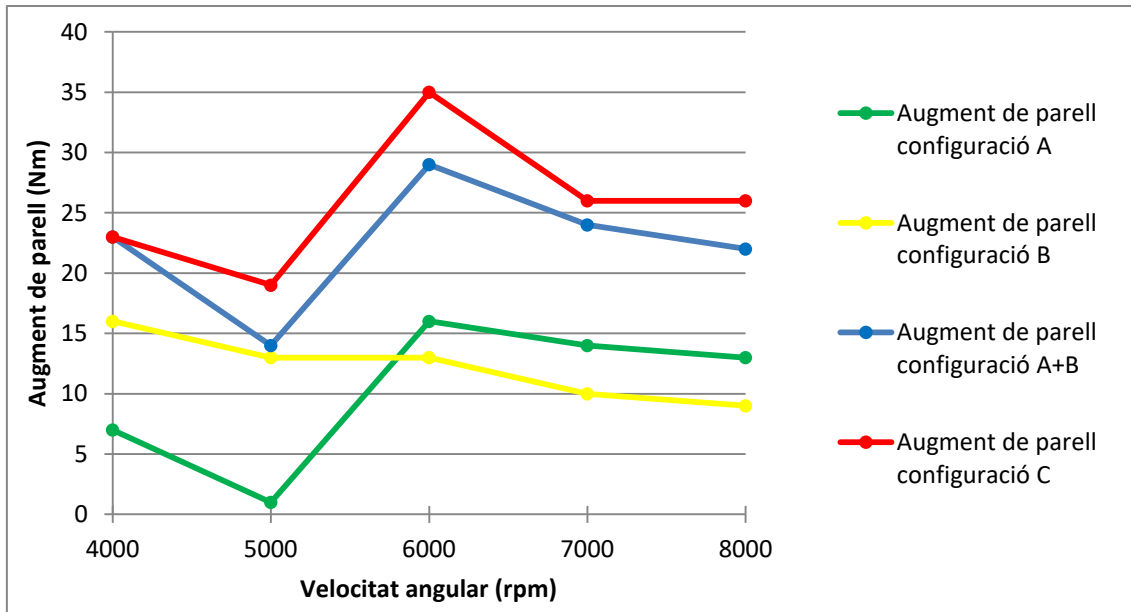


Figura 35: Gràfic d'augment de parell dels models a comparar

En un principi es podria pensar que la suma de l'augment de potència i parell de les configuracions A i B (Configuració A+B) àuria de ser igual a l'augment de potència i parell de la configuració C. En realitat no ha sigut així, els dos elements treballant conjuntament han donat un augment de rendiment del motor major que la suma treballant per separat. Es pot dir que entre els col·lectors d'escapament i el downpipe hi ha una influència mútua.

En els motors tots els elements es tenen una influència mútua entre ells. Depèn de quins elements es tracti, aquesta influència és major o menor. El cas estudiat en aquest apartat, que és la influència entre els col·lectors d'escapament i el downpipe, es basa en que els dos són el "coll d'ampolla" del flux de gasos d'escapament. Si només canvies un dels dos elements, l'altre segueix essent una restricció molt gran la qual no permet aprofitar el màxim potencial de l'element canviat. Per això mateix, tal i com es veurà a l'apartat 4.2.3 Punt de partida, es començaran a optimitzar dades després de canviar els dos elements per tal que cap sigui el "coll d'ampolla" del sistema d'escapament.

4.2.2 Requeriments de fabricació i instal·lació previs al disseny

Per evitar fer simulacions i dissenys que des de bon principi ja no són aptes per ser fabricats o instal·lats en el vehicle, s'imposaran unes restriccions dimensionals, de fabricació i d'instal·lació.

4.2.2.1 Materials i elements de fabricació

El material amb la millor capacitat d'aguantar les temperatures elevades del sistema d'escapament és l'acer inoxidable 304-L. Per aquesta raó tot el sistema d'escapament del vehicle serà d'aquest material. Els gasos d'escapament del motor poden arribar a superar els 1.100°C de temperatura. La Figura 36 mostra el gràfic de temperatura de gasos en els col·lectors d'escapament del motor a estudiar quan aquest està treballant a plena càrrega a 6.000rpm. Aquest gràfic s'ha obtingut amb el programa *Lotus* en la simulació del model de sèrie.

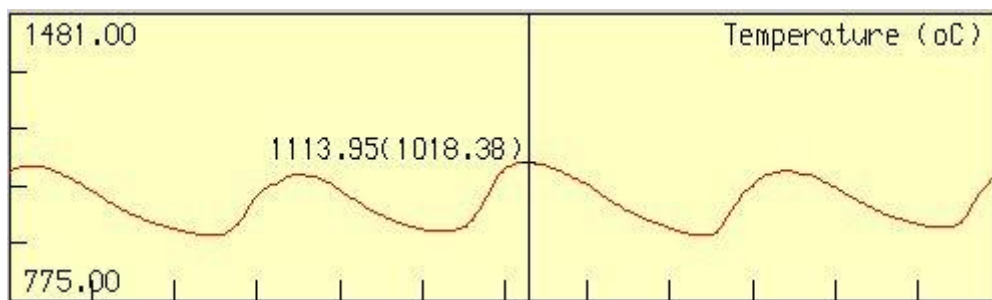


Figura 36: Gràfic de temperatura de gasos durant un cicle en els col·lectors d'escapament

Un cop escollit el material, s'han de buscar elements en el mercat els quals puguin servir per la fabricació del sistema d'escapament. Abans de buscar aquests elements, s'ha fet una recerca de com estan fabricats els sistemes d'escapament amb turbocompressor de motors de competició. La majoria estan construïts amb acer inoxidable 304-L, i apart de les diferents geometries i formes, el que tots tenen en comú és que els conductes dels col·lectors d'escapament estan fabricats amb tubs Schedule ASTM de model 10S, i els conductes del downpipe en tubs mil·limètrics de 1'5mm de gruix.

Els tubs Schedule segueixen la norma internacional ASTM (American Society for Testing and Materials). Aquests tubs són fabricats per ser soldats, estan disponibles en acer inoxidable 304-L i 306-L, i les seves principals aplicacions són en entorns

industrials amb temperatures extremes i ambients corrosius. Per cada diàmetre de tub (en polzades), cada model de Schedule representa un gruix diferent de paret.

Els tubs Schedule 10S que poden ser utilitzats en els dissenys del treball són els de la Figura 37. El valor és "R" és el radi de curvatura des del centre de la secció en els tubs en forma de colze i "D" és el diàmetre exterior del tub. Els tubs rectes són iguals però sense el radi de curvatura. El gruix de paret és 2,77mm és suficient per aguantar la pressió i temperatura dels gasos d'escapament dins els col·lectors, apart d'això els col·lectors d'escapament també han d'aguantar el pes del turbocompressor, per aquest motiu no s'utilitzen gruixos de paret més prims. El motiu pel que no s'utilitzen espessors més grossos és perquè augmentarien el pes del component, i en el món de la competició sempre es busquen els components el més lleugers possibles.

DN Pulgadas	Dimensiones				
	Schedule	Ø D	Espesor	R	Peso
1"	10S	33.4	2.77	38.1	0.14
1 1/4"	10S	42.2	2.77	47.6	0.23
1 1/2"	10S	48.3	2.77	57.2	0.31
2"	10S	60.3	2.77	76.2	0.51

Figura 37: Catàleg de colzes Schedule 10S (Alacermas. 2018)

Els tubs del downpipe no estan sotmesos a tanta pressió ni temperatura com els col·lectors d'escapament. Per exemple, a les mateixes condicions que els col·lectors d'escapament de la Figura 36 (El model de sèrie en plena càrrega a 6.000rpm), els gasos del downpipe tenen una mitjana de temperatura de 900°C. Apart d'això, el downpipe no ha d'aguantar el pes de cap altre component. Degut a això els tubs del downpipe no són Schedule 10S, sinó mil·limètrics de 1,5mm de gruix de paret.

Aquests tubs utilitzats pel downpipe són tubs mil·limètrics que segueixen la norma DIN (Institut Alemany de Normalització). El catàleg de la Figura 38 mostra els diversos colzes de 1,5mm que segueixen aquesta norma DIN. El valor és "R" és el radi de curvatura des del centre de la secció en els tubs en forma de colze, "D" és el diàmetre exterior del tub, i "E" és el gruix de la paret. A partir d'un cert diàmetre de conducte són de 2mm de gruix ja que no es fabriquen en 1,5mm.

DN	Dimensiones			
	D	E	R	Peso kgs
25	33	1.5	50	0.08
32	38	1.5	57	0.11
40	43	1.5	65	0.15
50	50.8	1.5	75	0.22
50	53	1.5	80	0.26
50	63.5	1.5	95	0.34
65	73	1.5	110	0.46
65	76	1.5	114	0.5
80	84	2	126	0.75
100	104	2	156	1.2

Figura 38: Catàleg de colzes mil·limètrics DIN (Alacermas. 2018)

Per si s'ha de dur a terme una reducció o augment de secció en els conductes del downpipe, també s'utilitzaran tubs mil·limètrics que segueixen la norma DIN. Dins l'àmplia gama de reduccions de secció, s'han escollit les que corresponen als diàmetres útils per poder dissenyar el downpipe (Figura 39). El valor "D" representa el diàmetre exterior de la secció gran, "d" representa el diàmetre exterior de la secció petita, "e" és el gruix de la paret i "L" la longitud del tub.

Dimensiones				
D	d	e	L	Peso kgs
50.8	43	1.5	75	0.08
53		1.5	75	0.09
63.5		1.5	80	0.11
73		1.5	90	0.14
63.5	53	1.5	80	0.11
73		1.5	90	0.14
76		1.5	90	0.15
73	63.5	1.5	90	
76		2	90	0.22
84		2	90	0.22
104		2	110	0.23

Figura 39: Catàleg de reduccions mil·limètriques DIN (Alacermas. 2018)

4.2.2.2 Requeriments dimensionals i d'instal·lació

Per poder collar la placa que va unida a la culata, s'utilitzaran els mateixos cargols i forats que amb els col·lectors de sèrie. A la Figura 40 s'ha fet un croquis dels diàmetres exteriors dels tubs Schedule 10S explicats a l'apartat anterior a sobre del contorn de la placa que va unida a la culata. El tub Schedule 10S que sigui escollit per la fabricació haurà d'anar soldat a aquesta placa d'unió. Per tant abans de fer el model amb qualsevol tub, s'ha de comprovar que aquest tub sigui apte per la fabricació i instal·lació en el vehicle.

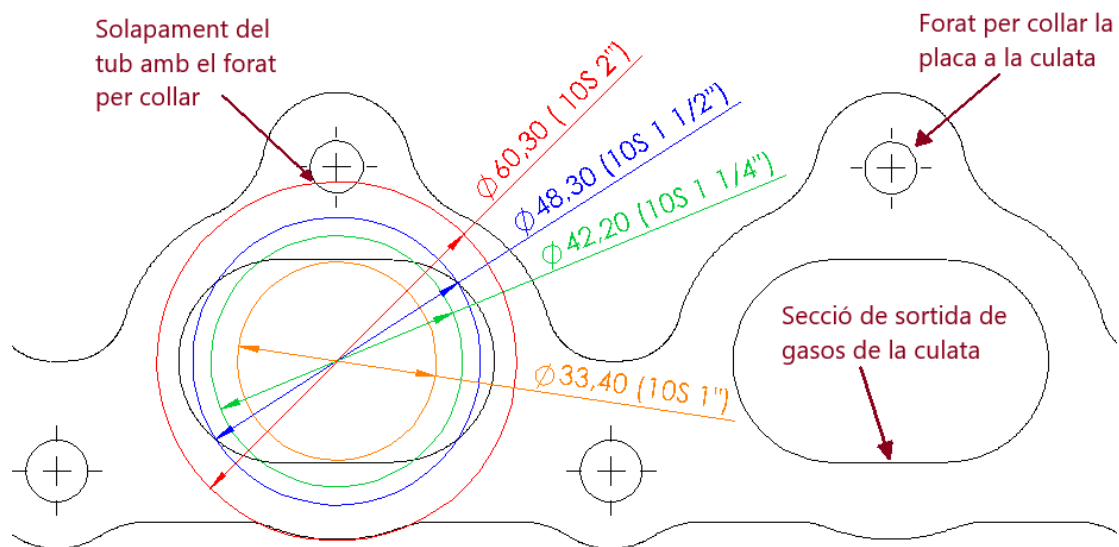


Figura 40: Croquis dels diferents tubs Schedule 10S en la placa unida a la culata

Com es pot veure a la Figura 40, els diàmetres exteriors dels tubs Schedule 10S estan col·locats concèntrics amb la secció de sortida de gasos de la culata. Tots aquests tubs proposats a l'apartat anterior són aptes per ser soldats en aquesta placa excepte el tub Schedule 10S de 2" ($\text{Ø}60,3\text{mm}$). Aquest tub es solapa amb el forat utilitzat per collar la placa d'unió amb la culata (Per la part superior del tub), per tant no es podria instal·lar en el motor del vehicle. Això fa que es descarti el tub Schedule 10S de 2" abans de la simulació.

Els requeriments dimensionals que afecten al downpipe són: El o els tubs han de tenir un angle d'entre 85° i 90° en sentit descendent per tal de poder connectar amb el tub d'escapament que passa per sota del motor, que els dos conductes procedents de la turbina i de la vàlvula wastegate es connectin formant un de sol en algun punt del downpipe, que el diàmetre de sortida del downpipe sigui de 70mm per tal de connectar

correctament amb el tub d'escapament, i que la secció del conducte de la vàlvula wastegate no sigui inferior a la secció de màxima obertura de la pròpia vàlvula wastegate (750mm^2).

Les unions dels conductes tant en els col·lectors com en el downpipe tenen un angle mínim d'unió per tal que aquests es pugin fabricar. Aquest angle mínim és de 40° , i és degut a que en el procés de soldadura es pugui arribar a soldar la part interior de la unió entre els conductes.

4.2.3 Punt de partida

El disseny base per la optimització es farà a partir dels coneixements teòrics explicats als apartats 3.2.1 Col·lectors d'escapament i 3.2.4 Downpipe, dins el marc teòric. Per part dels col·lectors d'escapament, aquests han de tenir la mateixa longitud en els seus quatre conductes, i les dos unions entre els conductes 1-4 i 2-3 (Sistema "twin scroll") també han de ser iguals. La característica que ha de complir el downpipe és unir els dos conductes provinents de la turbina i la vàlvula wastegate, a la vegada que fa un gir d'entre 85° i 90° per poder encarar-se amb el tub d'escapament.

Com s'ha comprovat a l'apartat 4.2.1 Comparació prèvia al disseny, els dos elements es tenen influència mútua. Aquesta influència mútua comporta que abans de començar a optimitzar la geometria dels elements, aquests han de ser canviats per tal que cap dels dos sigui "el coll d'ampolla" del sistema d'escapament i no permeti la bona optimització de les dades de l'altre. Per complir amb aquest requeriment es partirà del model de sèrie però amb els col·lectors d'escapament i el downpipe canviats (La configuració C de l'apartat 4.2.1 Comparació prèvia al disseny). Aquests dos elements tenen característiques semblants a les buscades i també han estat dissenyats per augmentar el rendiment del motor.

Partint d'aquest disseny base, s'anirà optimitzant el sistema d'escapament mitjançant la parametrització de variables. Les variables que s'optimitzaran mitjançant la parametrització són:

- En els col·lectors d'escapament:
 - o Secció dels conductes dels col·lectors
 - o Longitud dels conductes dels col·lectors
 - o Angle d'unió entre els conductes

- En el downpipe:
 - o Secció del conducte de sortida de la turbina
 - o Secció del conducte de sortida de la wastegate
 - o Angle d'unió en el downpipe

4.2.4 Optimització del sistema d'escapament

Per dur a terme la millor optimització possible del sistema d'escapament, s'haurien de parametritzar totes les variables a la vegada, però degut al límit computacional de l'eina de càlcul això no es possible. Les parametritzacions es faran d'una sola variable a la vegada. El programa *Lotus* pot fer parametritzacions de més d'una variable, cosa que és una eina molt útil per tal de fer optimitzacions. El fet de parametritzar més d'una variable a la vegada comporta que els resultats siguin el més optimitzats possibles en quan als paràmetres que es tenen influència mútua entre ells.

Com s'ha dit a l'apartat anterior, es partirà del model de sèrie però amb els col·lectors d'escapament i el downpipe canviats (La configuració C de l'apartat 4.2.1 Comparació prèvia al disseny). Aquests dos elements tenen característiques semblants a les buscades i també han estat dissenyats per augmentar el rendiment del motor. Partint d'aquest model com a base, el procés d'optimització del sistema d'escapament es farà de la següent forma: Es parametritzarà una variable del sistema d'escapament i segons uns criteris de puntuació s'escollirà el millor valor per aquesta variable. Un cop s'ha escollit aquesta variable, s'implementa en el model i es parametriza la següent, així fins obtenir el valor de totes les variables.

L'objectiu de les parametritzacions és millorar la corba de potència del motor. En aquesta corba no tots els valors de potència tenen el mateix pes. Aquest pes o ponderació varia en funció de les revolucions del motor, ja que durant l'acceleració del vehicle el motor treballa més en unes revolucions que d'altres.

Per poder determinar el pes o ponderació de la potència en cada velocitat del motor es necessita saber com treballa aquest motor durant l'acceleració del vehicle. La Figura 41 mostra la gràfica de la relació de canvi de marxes de Mitsubishi Lancer EVO VI, on relaciona la velocitat del vehicle amb les revolucions del motor. En aquest gràfic cada línia representa una marxa i es pot veure com varien les revolucions del motor i les marxes en funció de la velocitat del vehicle.

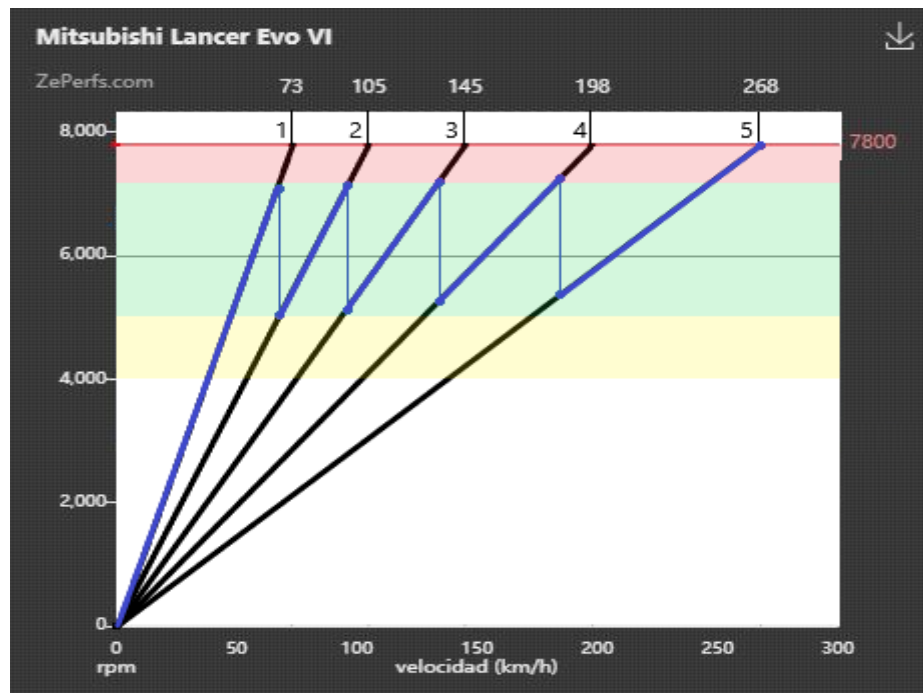


Figura 41: Diagrama de la relació de canvi de Mitsubishi EVO VI (ZePerfs. 2020)

Com es pot veure a la imatge, idealment el motor treballa entre 5.000 i 7.000rpm. No obstant, el motor es fa treballar en un àmbit més ampli de revolucions degut a les circumstàncies de la carretera, així treballant en un àmbit entre 4.000 i 8.000rpm.

Aquests valors de revolucions amb que el motor treballa s'utilitzaran en el programa Lotus com a valors multiplicadors per dur a terme la parametrització. Aquests valors multiplicadors marquen el pes que té cada potència obtinguda en les diferents revolucions del motor de cares a calcular una puntuació. La Figura 42 mostra la interfície d'objectius de la parametrització. El valor a optimitzar és la potència i mitjançant el diagrama de relació de canvi de marxes de la Figura 41, s'han establert els següents valors multiplicadors per cada velocitat angular del motor:

- 4.000rpm: 100
- 5.000rpm: 120
- 6.000rpm: 140
- 7.000rpm: 120
- 8.000rpm: 110

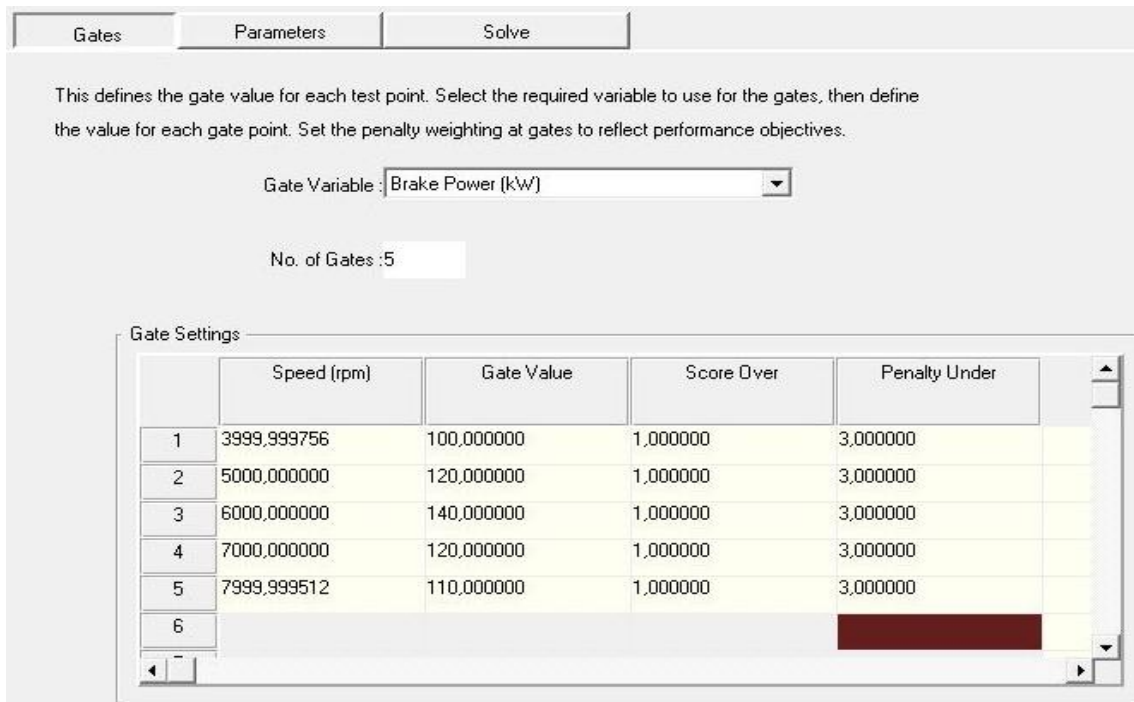


Figura 42: Interfície d'objectius de la parametrització en el Lotus

L'objectiu de la simulació serà augmentar el màxim possible la puntuació obtinguda de les parametritzacions. També s'analitzaran algunes corbes de potència obtingudes d'aquestes parametritzacions per veure com varia la corba de potència en funció de la variable parametritzada.

4.2.4.1 Secció dels conductes dels col·lectors

La secció dels conductes dels col·lectors ve determinada per les dimensions dels tubs Schedule 10S. Els tubs disponibles per i aptes per la fabricació i instal·lació dels col·lectors són els següents:

- Schedule 10S 1" ($\varnothing_{ext}= 33'4\text{mm}$ i $\varnothing_{int}= 27'86$)
- Schedule 10S 1 ¼" ($\varnothing_{ext}= 42'2\text{mm}$ i $\varnothing_{int}= 36'66$)
- Schedule 10S 1 ½" ($\varnothing_{ext}= 48'3$ i $\varnothing_{int}= 42'76$)

Els diàmetres interiors d'aquests tubs s'han introduït com a variables en la parametrització, i el programa ha donat els resultats de la Taula 9. La Figura 43 mostra les corbes de potència amb els diferents diàmetres de secció de conducte.

Taula 9: Resultats de la parametrització del diàmetre dels col·lectors

Paràmetre: diàmetre dels col·lectors		Potència (KW) segons velocitat del motor (Rpm)				
Diàmetre intern (mm)	Puntuació	4000	5000	6000	7000	8000
27'86 (10S 1")	379,08	163,2	199,1	222,9	212,9	171,1
36'66 (10S 1 1/4")	397,49	158,0	195,6	227,1	220,4	186,4
42'76 (10S 1 1/2")	390,94	162,1	190,4	224,9	219,8	183,7

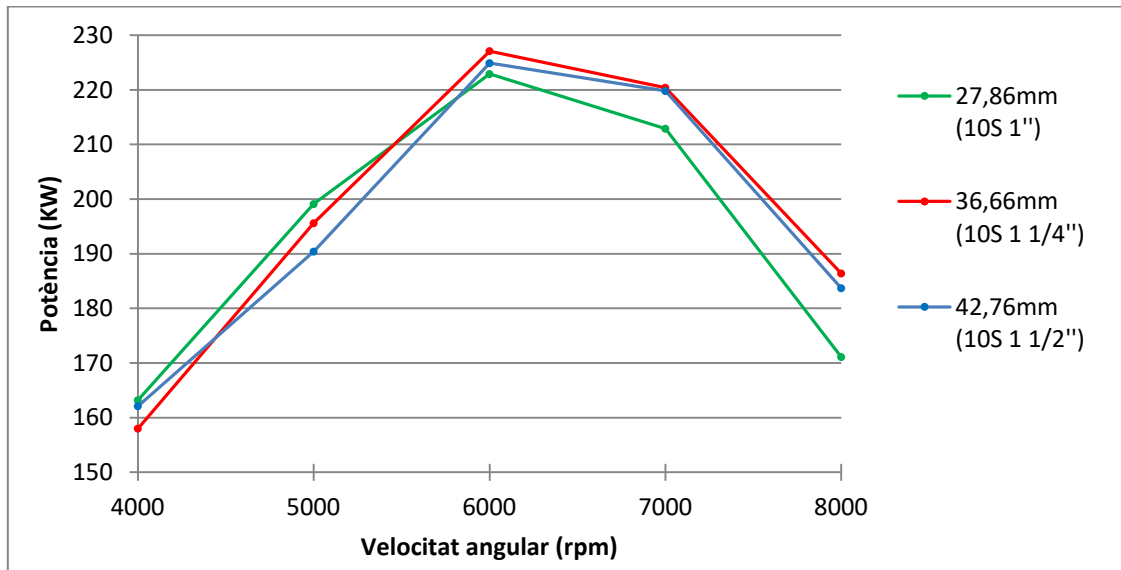


Figura 43: Corbes de potència segons el diàmetre dels conductes dels col·lectors d'escapament

Com es pot observar a les corbes de potència de la Figura 43, la corba del conducte amb diàmetre 27'86mm perd potència respecte les altres dues a mesura que augmenta la velocitat del motor. Això és degut a que ha de passar un gran cabal de gasos d'escapament per una secció petita, i fa que es creï una pèrdua de càrrega significativa.

La puntuació més alta ha sigut obtinguda amb el tub Schedule 10S de 1" 1/4", el qual té un diàmetre de conducte de 36'66mm. Seguint la pauta marcada pel procés de parametrització, es posarà el valor de 36'66mm als diàmetres dels conductes dels col·lectors d'escapament i es procedirà amb la parametrització del següent valor.

4.2.4.2 Longitud dels col·lectors

Per poder dur a terme la parametrització de la longitud dels conductes dels col·lectors d'escapament, aquests s'han simulat com a conductes rectes. Dins el paràmetre de longitud de col·lectors en el programa *Lotus* s'han introduït valors entre 250mm i 650mm amb un interval de 50mm. Els resultats de la parametrització són els de la Taula 10 i les corbes de potència estan representades a la gràfica de la Figura 44.

Taula 10: Resultats de la parametrització de la longitud dels col·lectors

Paràmetre: longitud dels col·lectors		Potència (KW) segons velocitat del motor (Rpm)				
Longitud (mm)	Puntuació	4000	5000	6000	7000	8000
250	383,41	158,7	188,4	218,9	220,9	186,5
300	393,2	162,8	188,3	225,3	221,1	185,7
350	397,49	150	195,6	227,1	220,4	186,4
400	398,85	155,9	203,5	223,1	219,9	186,5
450	405,35	160,4	206,3	221,1	219,9	186,6
500	407,29	165,3	204,9	221,1	220	186,1
550	410,94	169,2	202,9	221,3	219,4	188,1
600	407,21	169,5	201,3	220,6	219,3	186,4
650	403,65	168,5	201,1	220	218,9	185,1

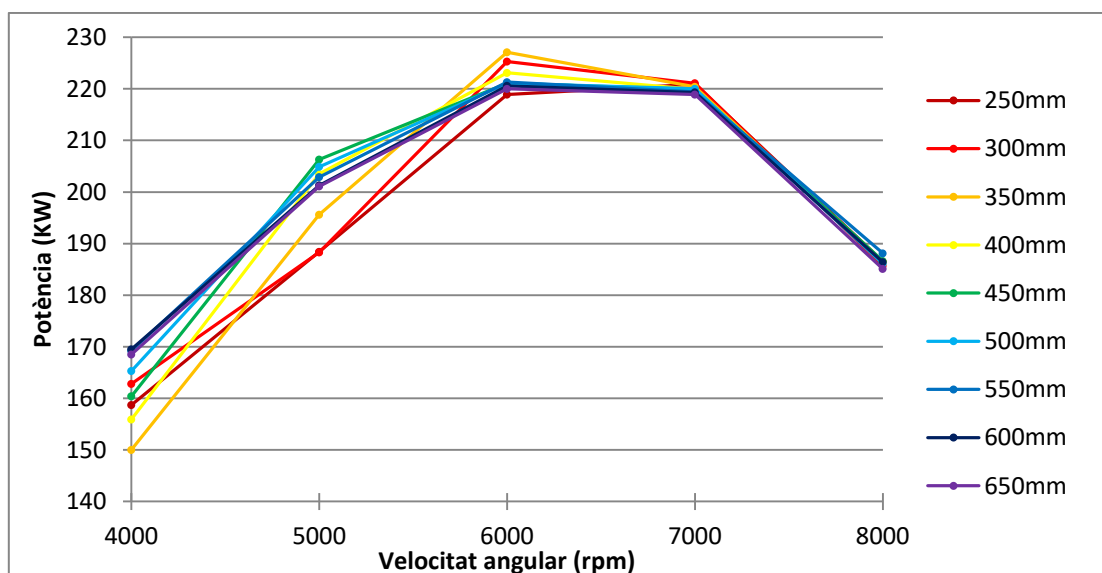


Figura 44: Corbes de potència segons la longitud dels conductes dels col·lectors d'escapament

La longitud amb més puntuació és la de 550mm. Com es pot observar a la gràfica de la Figura 44, la corba de longitud 550mm no té el pic més alt de potència, però segons els criteris de puntuació prèviament imposats és la millor. Això ajuda a entendre que en un motor no importa la potència màxima sinó tot el rang de potència en les revolucions útils del motor.

Degut a les limitacions de la parametrització, aquests conductes s'han simulat com conductes rectes. A la fase de disseny es determinarà la geometria exacte de cada conducte i després serà entrada al programa *Lotus* per ser simulada tal i com és realment.

4.2.4.3 Angle d'unió entre els conductes dels col·lectors

Segons els coneixements explicats al marc teòric, les dues unions en els col·lectors d'escapament han de ser iguals per tal d'oferir les mateixes prestacions a tots els cilindres, per tant els dos angles es parametritzaran a la vegada i utilitzant els mateixos valors. Com s'ha dit en els requeriments previs al disseny, per ser apte per la fabricació aquest angle no pot ser inferior a 40° . La Figura 45 mostra en el mateix programa *Lotus* la disposició de la unió entre els conductes durant la optimització. A la Taula 11 es poden veure els resultats de la parametrització i a la Figura 46 el gràfic de les corbes de potència.

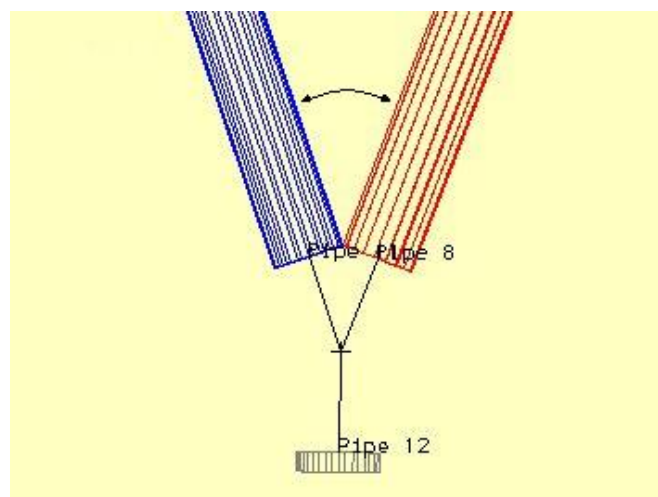


Figura 45: Angle d'unió dels col·lectors en la optimització

Taula 11: Resultats de la parametrització de l'angle d'unió dels col·lectors

Paràmetre: angle d'unió dels col·lectors		Potència (KW) segons velocitat del motor (Rpm)				
Angle (graus)	Puntuació	4000	5000	6000	7000	8000
40	410,94	169,2	202,9	221,3	219,4	188,1
50	410,13	169,2	202,9	221,2	219,1	187,2
60	408,52	169,1	202,7	221	218,4	185,9

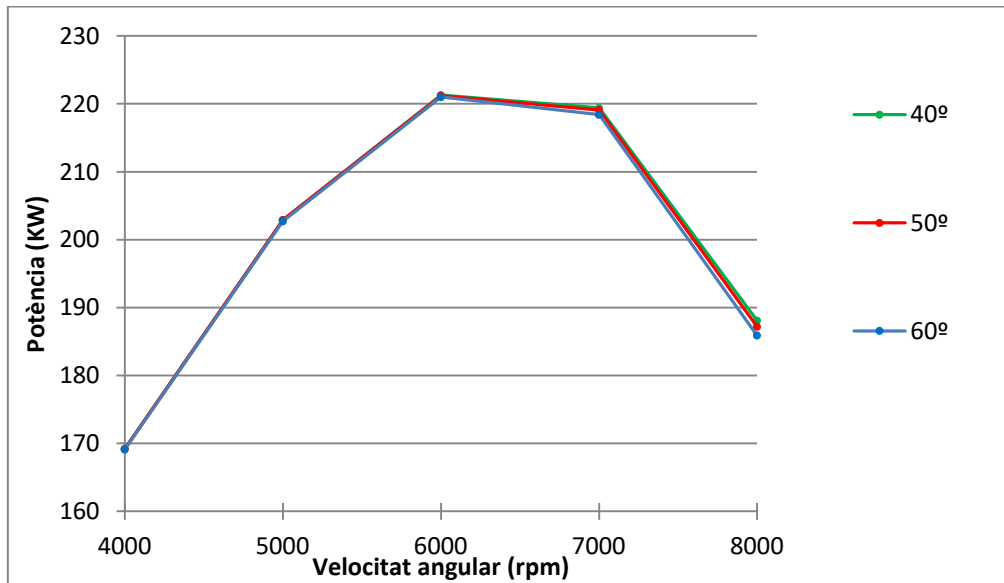


Figura 46: Corbes de potència segons l'angle d'unió dels col·lectors d'escapament

Com es pot veure les corbes de potència no varien gaire, inclòs es solapen en la major part d'elles, però com menor és l'angle d'unió major és la puntuació. L'angle de 40° ha obtingut la major puntuació, per tant aquesta és l'escollida pel disseny dels col·lectors d'escapament.

4.2.4.4 Secció del conducte de sortida de la turbina

Aquest és el conducte principal del downpipe. Això és degut a que aquest conducte és el que es connectarà al tub d'escapament un cop se li hagi unit el conducte procedent de la vàlvula wastegate. La secció d'entrada té un diàmetre de 62mm (sortida de la turbina) i la sortida és de 70mm (tub d'escapament), per tant hi ha d'haver una ampliació de secció que permeti passar de 62mm a 70mm de diàmetre. Les dues disposicions que s'han provat són les següents:

La disposició 1 manté el diàmetre de la sortida de la turbina (60'5mm degut a les mesures dels tubs mil·limètrics), fa la corba de 90° descendent, es connecta amb el conducte de la vàlvula wastagate i finalment fa l'ampliació de secció a 70mm de diàmetre. La Figura 47 mostra el croquis d'aquesta disposició.

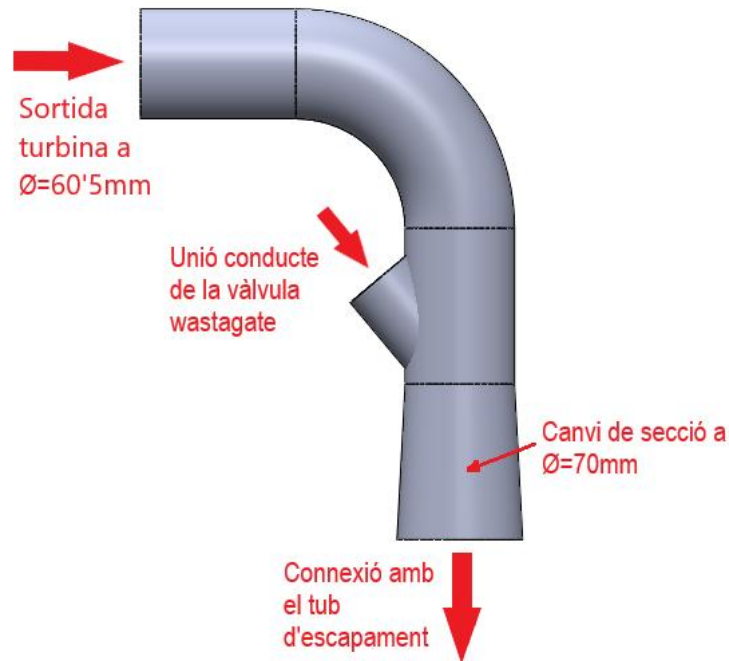


Figura 47: Croquis de la disposició 1 del conducte de la sortida de la turbina

Pel contrari, la disposició 2 fa el canvi de secció just a la sortida de la turbina. El tram de tub que fa el canvi de secció de diàmetre 62mm a 70mm es fa amb el tub mil·limètric d'ampliació de secció de diàmetre 60'5mm a 70mm però se li retalla un tros per tal d'encaixar amb els 62mm de la sortida de la turbina. La Figura 48 mostra el croquis d'aquesta disposició 2.

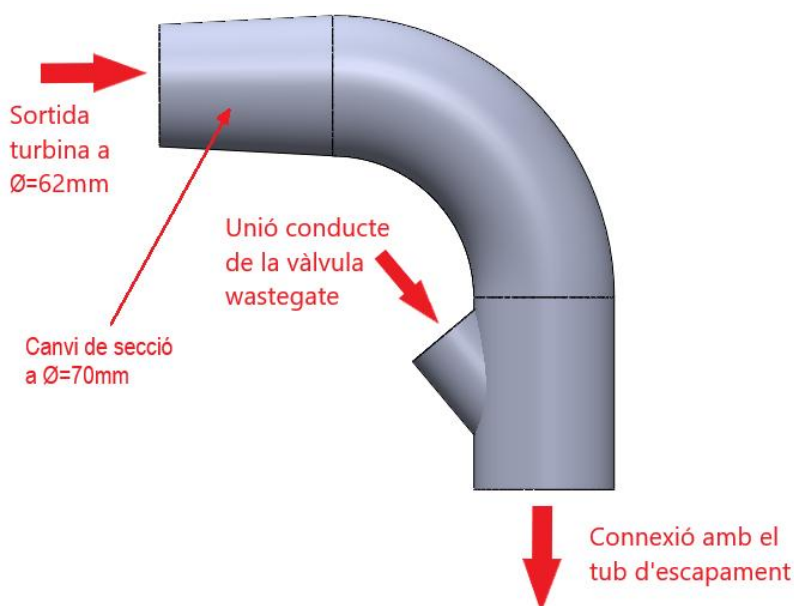


Figura 48: Croquis de la disposició 2 del conducte de la sortida de la turbina

S'han introduït aquestes dues disposicions en el programa *Lotus*. Com que són canvis de geometria on varien diversos valors, aquests no han estat parametritzats sinó entrats a la interfície de construcció. No obstant, s'ha realitzat la resolució amb el mòdul de parametrització per tal que el programa també ens doni una puntuació de la corba de potència igual que amb les parametritzacions anteriors. Els resultats són els de la Taula 12. Les dues puntuacions són similars però la puntuació de la disposició 2 és major. També són majors tots els punts de la corba de potència pel que la disposició 2 és l'escollida.

Taula 12: Resultats de les diferents disposicions del conducte de la turbina en el downpipe

Paràmetre: Conducte de la turbina o principal		Potència (KW) segons velocitat del motor (Rpm)				
Disposició	Puntuació	4000	5000	6000	7000	8000
1 (Conducte de 60'5mm)	410,36	169,1	202,8	221,3	219,3	187,8
2 (Conducte de 70mm)	411,69	169,3	203	221,7	219,5	188,2

4.2.4.5 Secció del conducte de sortida de la wastegate

L'altre conducte que conforma el downpipe és el de la sortida de la vàlvula wastegate. La geometria d'aquest conducte no té importància en el rendiment del motor ja que hi circulen els gasos residuals de la vàlvula wastegate, però sí el punt en que aquest conducte es connecta amb el de la turbina o principal del downpipe. La secció del conducte de la vàlvula wastegate determina la velocitat amb que els gasos residuals entren dins el conducte principal del downpipe.

La Figura 49 mostra el croquis de la disposició del tub de sortida de la wastegate. La secció d'aquest conducte serà el valor a parametritzar en el *Lotus*. Els valors entrats com a paràmetres de diàmetre de secció són els següents: 70mm, 60mm, 50mm i 40mm. En el cas del conducte de 70mm de diàmetre, aquest no varia la seva secció respecte la sortida de la vàlvula wastegate, per tant hi ha un tub recte en comptes de la reducció de secció.

Com que la vàlvula wastegate té una secció màxima de 750mm^2 , no es pot posar un conducte amb una secció inferior ja que impediria el correcte funcionament d'aquesta. El tub de 40mm de diàmetre té una secció de 1256mm^2 per tant és vàlid ($1256\text{mm}^2 > 750\text{mm}^2$). No s'han posat com a paràmetres conductes de diàmetre inferior perquè el següent diàmetre és de 30mm, el qual té una secció de 707mm^2 i ja és inferior al de la vàlvula wastegate.

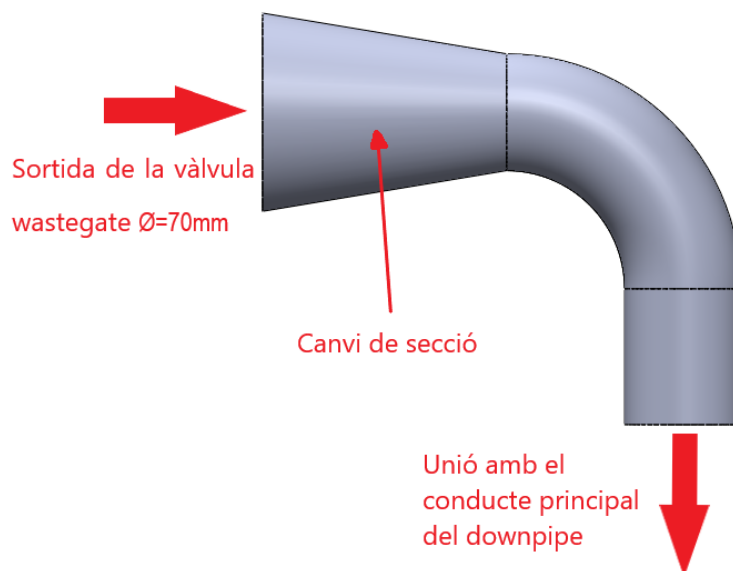


Figura 49: Croquis del conducte de la sortida del downpipe

Els resultats de la parametrització són els de la Taula 13. Es pot veure que com més petit és el diàmetre del conducte més alta és la puntuació de la corba de potència, essent 40mm el valor amb la millor puntuació. La velocitat dels gasos augmenta quan disminueix la secció del conducte, per tant el downpipe dona un millor rendiment al motor quan els gasos provinents de la wastegate s'uneixen en el conducte principal a una major velocitat.

Taula 13: Resultats de la parametrització del diàmetre del conducte de sortida de la wastegate

Paràmetre: diàmetre del conducte de la wastegate		Potència (KW) segons velocitat del motor (Rpm)				
Diàmetre (mm)	Puntuació	4000	5000	6000	7000	8000
70	410,46	169,2	203,1	221,6	219,3	187,2
60	410,52	169,1	202,9	221,7	219,4	187,5
50	411,8	169,3	203	221,7	219,4	188,4
40	415,26	169,6	203,4	221,9	219,5	190,9

Com s'ha dit anteriorment, el conducte de sortida de la wastegate no pot tenir una secció inferior que la secció d'obertura màxima de la vàlvula wastegate, ja que la vàlvula sempre ha de ser la que determina el flux de gasos. Si aquest conducte impedeix el bon funcionament de la vàlvula, pot fer que no evacui bé els gasos d'escapament i augmenti la pressió de sobrealimentació. Un augment de pressió de sobrealimentació augmentaria la potència del motor però també el podria malmetre. S'ha comprovat amb la interfície gràfica de resultats del *Lotus*, i el conducte de diàmetre 40mm no impedeix el bon funcionament de la vàlvula wastegate, conservant la mateixa pressió de sobrealimentació que la del motor de sèrie. Per tant és vàlid i s'escull aquest pel disseny del downpipe.

4.2.4.6 Angle d'unió en el downpipe

L'angle que forma el conducte provinent de la wastegate al unir-se amb el principal del downpipe, també s'ha parametritzat. Igual que l'angle que formen els conductes dels col·lectors, per tal de poder ser soldat aquest no pot ser inferior a 40°. Els angles entrats com a paràmetres són 40, 60 i 80 graus, a la Taula 14 hi ha els resultats obtinguts de la parametrització. Com menor és l'angle d'unió major és la puntuació obtinguda, per tant l'angle escollit per la unió del conducte procedent de la wastegate al conducte principal és de 40°.

Taula 14: Resultats de la parametrització de l'angle d'unió de conductes en el downpipe

Paràmetre: Angle d'unió dels conductes		Potència (KW) segons velocitat del motor (Rpm)				
Angle (graus)	Puntuació	4000	5000	6000	7000	8000
40	416,3	169,7	203,1	222,4	219,5	191,6
60	413,68	169,5	202,9	222	219,5	189,8
80	412,9	169,3	202,9	221,8	219,4	188,7

4.2.5 Disseny en CAD

El següent pas després de la simulació és donar forma al model escollit mitjançant un programa de CAD. Els dos components que s'han de dissenyar són els col·lectors d'escapament i el downpipe. Primer de tot s'han de dibuixar les plaques d'unió d'aquests components que és per on es connecten i collen als altres elements del motor, després s'han de definir les mesures de contorn d'aquests components i les mides màximes per tal de poder instal·lar-los en el vehicle. Per últim ja es pot procedir a dissenyar en CAD els elements modelats i optimitzats en la simulació.

4.2.5.1 Disseny de les plaques d'unió

Hi ha tres plaques d'unió entre els dos components a dissenyar. Per part dels col·lectors d'escapament, hi ha la placa que va unida a la culata del motor i la placa que s'uneix amb la turbina del turbocompressor. El downpipe té una placa d'unió amb la sortida del turbocompressor. Aquestes plaques dissenyades, es troben al document Plànols, i corresponen per ordre als plànols B01, B02 i C01.

Per una bona obtenció de mesures d'aquestes plaques, s'haurien de mesurar els col·lectors d'escapament i el downpipe de sèrie en una màquina de coordenades. Com que no s'ha pogut accedir a una màquina de coordenades, la mesura s'ha hagut d'efectuar manualment amb el mètode de prova-error.

Primer de tot, mitjançant un peu de rei es fan les mesures de les distàncies entre els diferents orificis de les plaques i el diàmetre d'aquests orificis. La Figura 50 mostra un croquis de com s'han efectuat aquestes mesures.

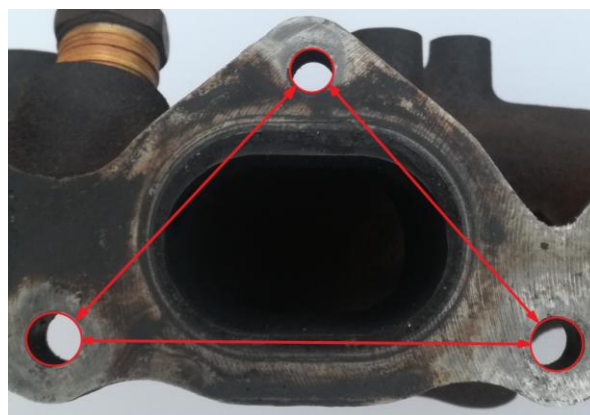


Figura 50: Mètode de mesura de les plaques d'unió

Un cop efectuades aquestes mesures, es dibuixa la vista frontal en dos dimensions d'aquesta placa en el programa CAD. Com que les mesures obtingudes amb el peu de rei no tenen la precisió que es podria obtenir amb la màquina de coordenades, s'imprimeix a escala 1:1 en paper per tal de comprovar la veracitat de les mesures i corregir l'error. La Figura 51 mostra el dibuix en CAD imprès a sobre de la placa d'unió dels col·lectors de sèrie per tal de comprovar les mesures. Per dur a terme la part de mesura i disseny de les plaques d'unió, s'ha hagut de repetir aquest procés diverses vegades. La Figura 52 mostra el seguit de dissenys impresos utilitzats per la placa d'unió entre els col·lectors d'escapament i la culata fins arribar a la placa fabricada en acer inoxidable. És molt important assegurar bé les mesures durant el disseny per tal d'evitar posteriors errors i augmentar el temps i els costos de fabricació.

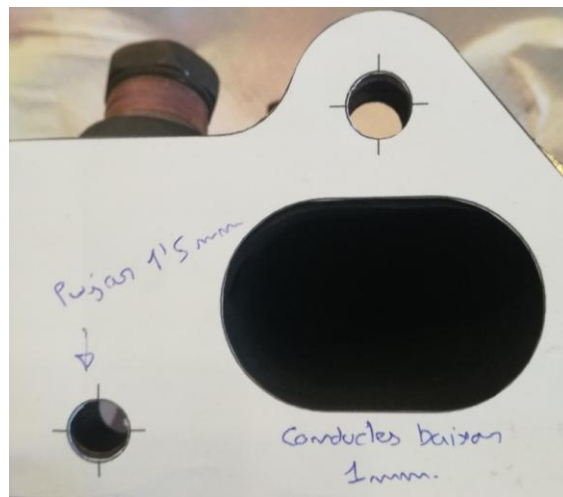


Figura 51: Comprovació de les mesures de la placa d'unió

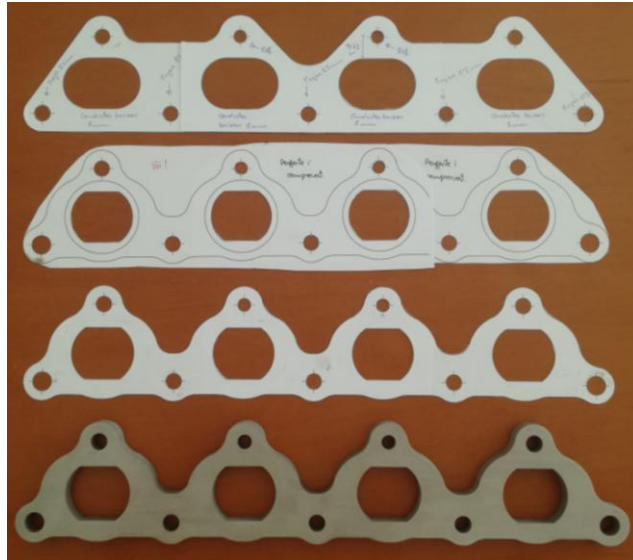


Figura 52: Procés dels dissenys a comprovar fins arribar a la placa fabricada

Les plaques d'unió han estat dissenyades també en acer inoxidable 304-L. El gruix d'aquestes plaques és de 12mm igual que les dels components de sèrie, així assegurant que es puguin aprofitar els cargols d'unió. S'han fet dues modificacions en les geometries de les plaques d'unió per tal de permetre la fabricació i un òptim disseny.

La primera modificació és a la placa d'unió entre la sortida del turbocompressor i el downpipe. S'ha modificat la secció per la qual passen els gasos provinents de la vàlvula wastegate per tal de permetre la unió amb el tub de sortida d'aquests. La Figura 53 mostra a l'esquerra com és originalment aquesta placa, i a la dreta després de la modificació. La nova secció és circular de diàmetre 70mm per tal d'encaixar perfectament amb el conducte de sortida del downpipe. Aquesta nova geometria conserva la mateixa àrea de secció de pas que la del downpipe de sèrie i també permet l'obertura de la comporta de la vàlvula.

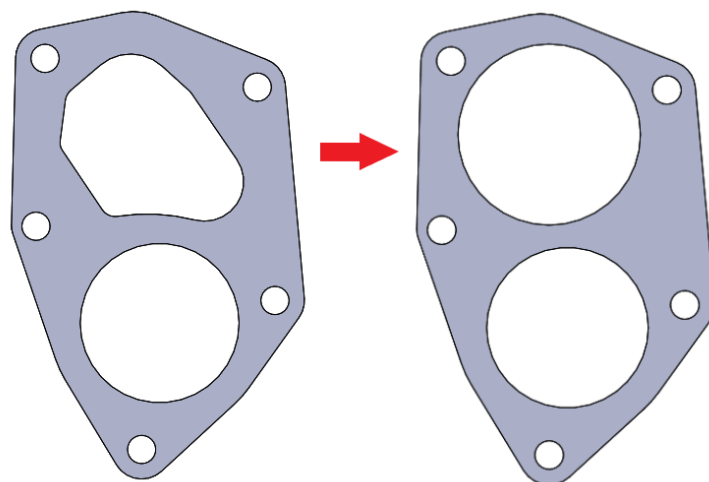


Figura 53: Modificació a la placa d'unió entre el turbocompressor i el downpipe

La segona modificació és a la placa d'unió entre la culata i els col·lectors d'escapament. En aquesta s'ha modificat la geometria dels conductes de gasos d'escapament per tal de fer el canvi de secció entre els conductes de la culata i els conductes dels tubs dels col·lectors. Apart de fer aquest canvi de secció, s'ha fet una ranura per tal de poder encaixar els tubs dels col·lectors i facilitar la fabricació i soldadura. La Figura 54 mostra les dues vistes del conducte de gasos d'escapament a la placa d'unió. A la Figura 55 es pot veure la secció vertical d'aquest conducte. La geometria d'aquestes seccions i ranures estan al plànol B01 en el document Plànols.

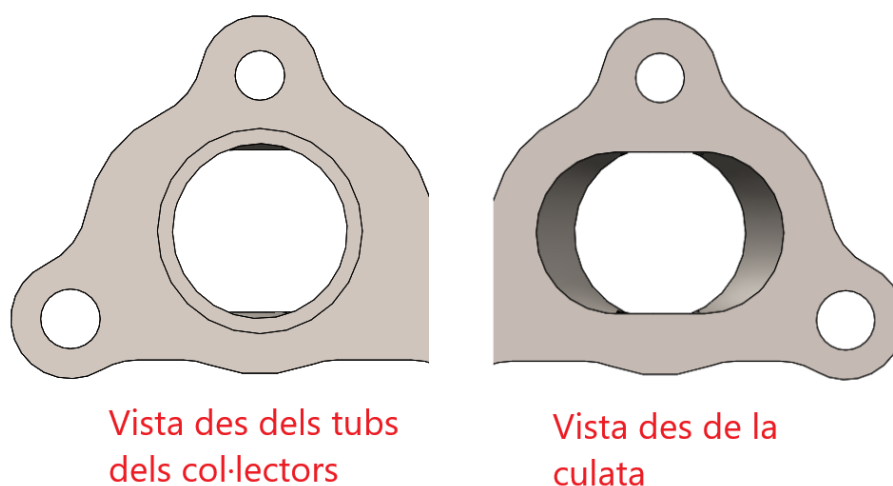


Figura 54: vistes del canvi de secció a la placa d'unió de la culata i els col·lectors

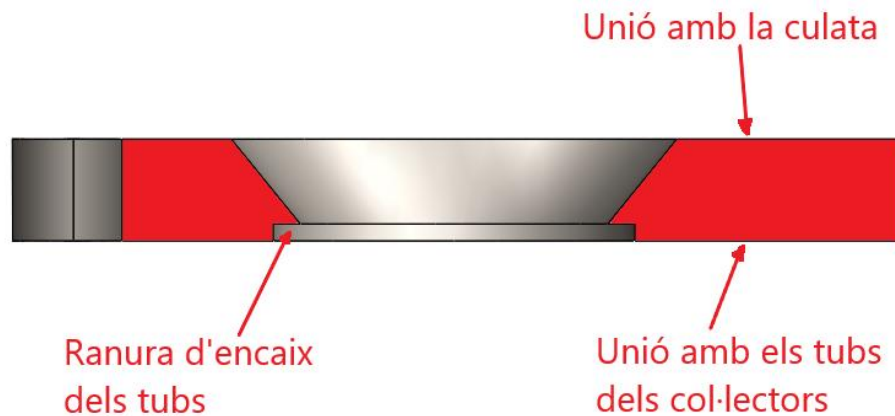


Figura 55: vista de la secció horitzontal de la placa d'unió entre la culata i els col·lectors

4.2.5.2 Mesures de contorn i mides màximes

En aquest apartat es mesurarà i ubicarà la posició les plaques d'unió en el disseny. En els col·lectors d'escapament s'ubicaran les dues plaques d'unió (la placa d'unió amb la culata i la placa d'unió amb el turbocompressor) i es determinaran els límits de posició màxims que poden ocupar els conductes dels col·lectors d'escapament per tal de poder ser instal·lats en el vehicle. En el downpipe s'ubicarà la posició de la placa que s'uneix amb la sortida del turbocompressor, l'àmbit de posició de la sortida del downpipe i els límits de posició màxims que pot ocupar per tal de poder ser instal·lat en el vehicle.

En els col·lectors d'escapament s'ha mesurat la posició relativa entre les dues plaques d'unió del col·lector de sèrie. Aquestes mesures s'han implementat en el disseny CAD per tal que la posició entre les plaques dels col·lectors d'escapament dissenyats sigui la mateixa que als de sèrie, per així no moure la ubicació del turbocompressor. La Figura 56 mostra una vista frontal a la placa d'unió amb la culata. Com es pot veure els orificis B i C de la placa del turbocompressor estan alineats al pla perpendicular a la placa de la culata que passa per l'orifici A. La Figura 57 mostra la vista de perfil d'aquestes plaques. La distància entre l'orifici A en el pla de la placa de la culata i la part inferior de l'orifici B a la placa del turbocompressor és de 95mm horitzontalment i 20mm verticalment. La placa del turbocompressor està inclinada 19° com es pot veure a la figura.

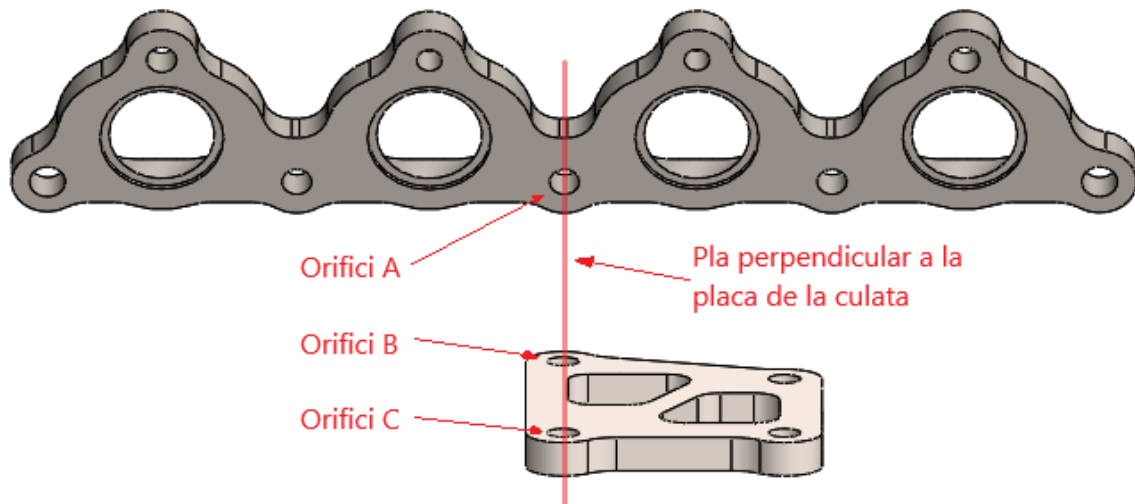


Figura 56: Posició relativa de les plaques dels col·lectors (I)

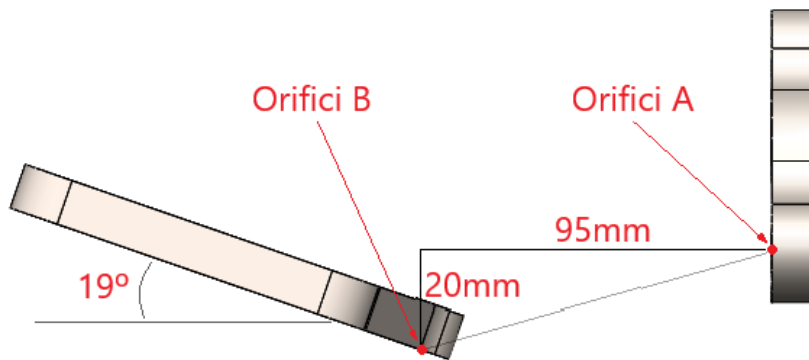


Figura 57: Posició relativa de les plaques dels col·lectors (II)

Les mides màximes de posició que poden ocupar els col·lectors s'han mesurat en el propi vehicle. Aquestes mesures són necessàries per definir l'espai disponible en el vehicle i evitar que es solapi amb altres elements del motor un cop instal·lat. Al plànol A1 en el document Plànols hi ha els contorns màxims de posició amb les seves respectives mesures i les posicions relatives entre les dues plaques explicat anteriorment.

La placa que uneix el downpipe amb la sortida del turbocompressor és paral·lela al pla vertical. La Figura 58 mostra l'alçat d'aquesta placa vista des de la part dels conductes del downpipe. Els dos orificis superiors que permeten collar la placa al turbocompressor formen un angle de 26° amb la horitzontal. La sortida del downpipe ha d'estar encarada en sentit descendent per tal de connectar-se amb el tub d'escapament. Al plànol A2 en el document Plànols hi ha els contorns màxims de

posició amb les seves respectives mesures. La sortida del downpipe ha d'estar encarada en la direcció marcada en aquest (sentit vertical descendent) i pot estar posicionada en qualsevol lloc dins els contorns màxims de posició del downpipe.

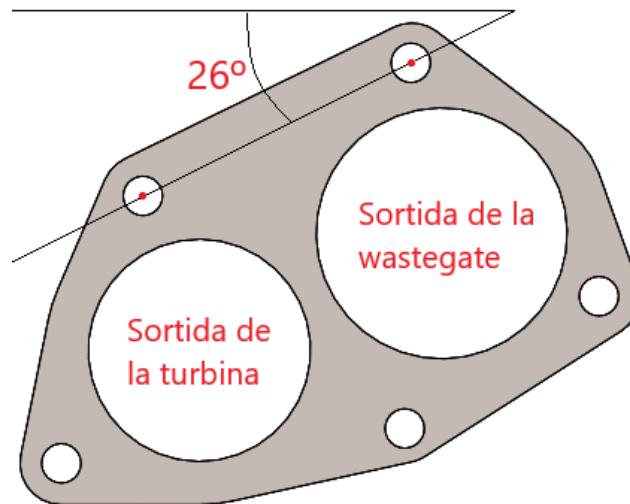


Figura 58: Posició de la placa del downpipe

4.2.5.3 Disseny dels col·lectors d'escapament

El disseny dels col·lectors d'escapament s'ha elaborat partint de les dues plaques d'unió en la posició especificada a l'apartat anterior. Aquesta posició és la mateixa que en els col·lectors de sèrie per així no canviar la ubicació del turbocompressor, i s'han tingut en compte les mides màximes que poden ocupar els col·lectors per tal de poder ser instal·lats en el vehicle. Dins aquestes restriccions, els conductes dels col·lectors s'han dissenyat amb el mínim de colzes possibles per tal de minimitzar les pèrdues de càrrega ocasionades per aquests.

Tal i com s'ha determinat en les parametrizacions del sistema d'escapament, els conductes dels col·lectors d'escapament són de tub Schedule 10S amb un diàmetre interior de 36'66mm i un gruix de paret de 2'77mm. La longitud dels conductes és de 550mm amb un marge de 10mm per fer possible el disseny, i la unió entre aquests és de 40°.

Primer de tot s'han dissenyat les unions dels conductes a la placa d'unió amb el turbocompressor. Aquestes unions s'han dissenyat exactament com en el model en el *Lotus*, amb 40° d'inclinació entre els conductes, però al estar les dues juntes a la mateixa placa és impossible la seva fabricació. La Figura 59 mostra aquestes unions

posicionades a la placa, on la separació entre aquestes dues és tant petita que fa impossible el procés de soldadura.

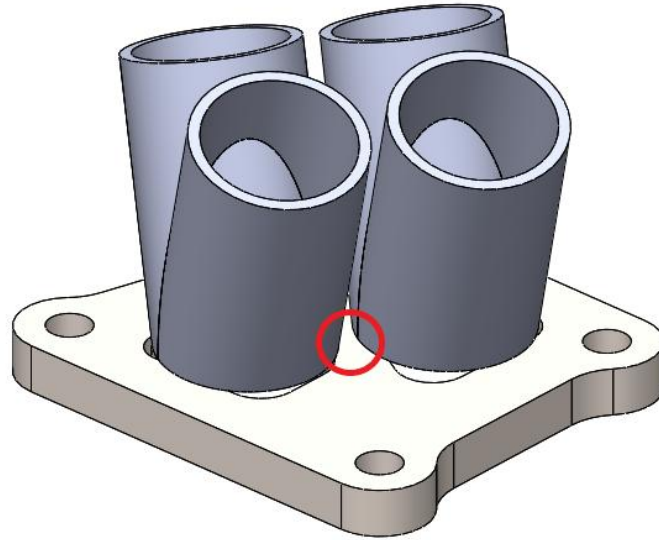


Figura 59: Unió dels col·lectors (I)

Per resoldre aquest problema s'han tornat a dissenyar les unions entre els conductes. Seguint el mateix criteri d'un angle mínim de 40° entre conductes per tal de poder ser soldats, també s'han implementat aquests 40° d'inclinació entre les dues unions. La Figura 60 mostra la placa del turbocompressor amb aquesta unió apte per ser fabricada. En el plànol B2 dins el document Plànols hi ha aquesta unió de conductes.

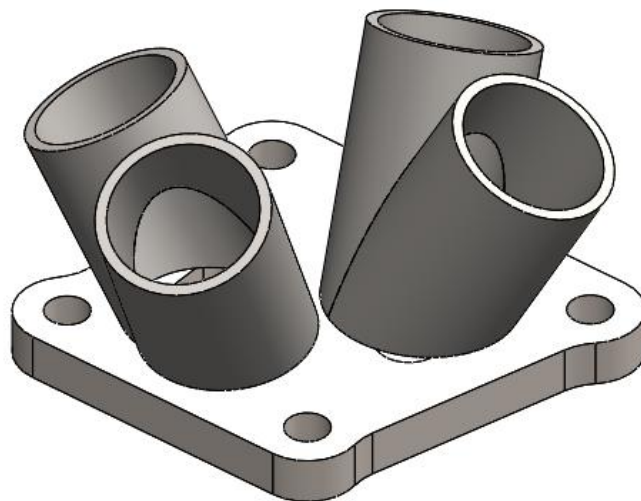


Figura 60: Unió dels col·lectors (II)

Un cop dissenyada la unió, el següent pas és dissenyar els quatre conductes dels col·lectors. Els tubs que conformen les unions tenen una longitud de 70mm, per tant els conductes han de tenir una longitud de 480mm per tal de mesurar un total de 550mm de longitud. Aquests conductes estan formats per tubs rectes i colzes Schedule 10S de 1 ¼", dels quals els colzes tenen un radi de curvatura de 47'8mm segons el catàleg de la Figura 37. Els conductes dels col·lectors han estat dissenyats mitjançant la unió de trams de conductes rectes i colzes. Pels conductes rectes s'han utilitzat trams de diferents longituds: 10mm, 30mm, 50mm, 70mm i 100mm. Els trams en forma de colze s'han dividit per graus de gir: 10°, 30°, 50°, 70° i 90°. A la Figura 61 es veu el tram de colze de 90°, el qual té una longitud lineal d'uns 75mm.



Figura 61: Tram de colze de 90° Schedule 10S

La Figura 62 mostra el disseny en CAD dels col·lectors d'escapament, i a la Taula 15 estan anotats els diferents trams per ordre que componen cada conducte dels col·lectors i la longitud total de cada un d'ells. En el plànol B1 dins el document Plànols estan dibuixats aquests col·lectors d'escapament, i en el plànol B3 els conductes d'aquest.

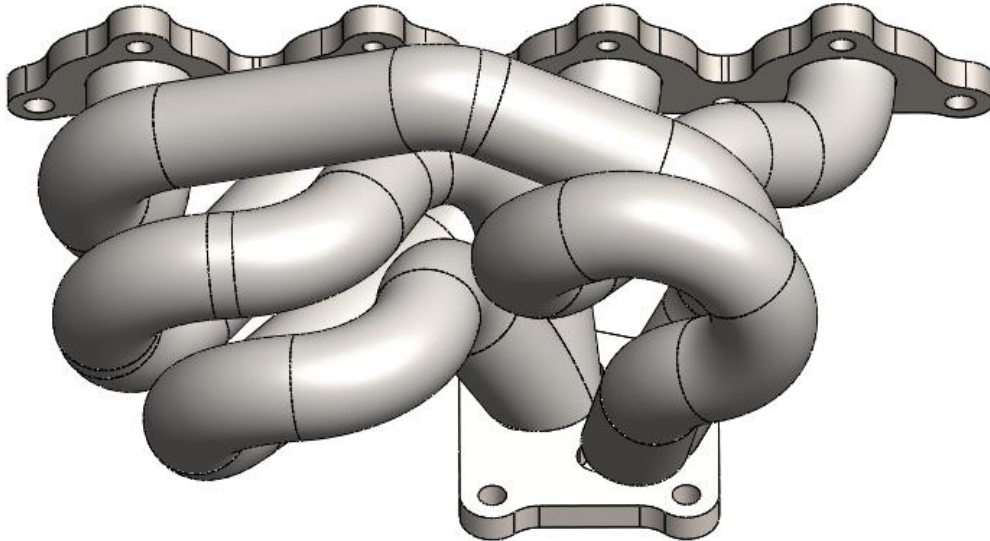


Figura 62: Disseny en CAD dels col·lectors d'escapament

Taula 15: Trams que componen els conductes dels col·lectors d'escapament

Conducte 1		Conducte 2		Conducte 3		Conducte 4	
Trams rectes (mm)	Colzes (graus)	Trams rectes (mm)	Colzes (graus)	Trams rectes (mm)	Colzes (graus)	Trams rectes (mm)	Colzes (graus)
30			30		70		70
	90		10		10	30	
	90	100			50		30
100			70	100			10
	30		10		10	70	
	10		90	10			30
70		10			50		90
	70		70		90		90
	10	30			90		90
10			30		70		50
	30		90	70 (unió)		70 (unió)	
70 (unió)		70 (unió)					
Longitud total (mm)		Longitud total (mm)		Longitud total (mm)		Longitud total (mm)	
555,3		543,7		547,1		553,8	

4.2.5.4 Disseny del downpipe

El downpipe s'ha elaborat a partir de les dades obtingudes en la optimització del sistema d'escapament. El conducte principal té un diàmetre de 70mm i el conducte provinent de la vàlvula wastegate de 40mm. Compleix les restriccions d'espai d'ocupació màxim per tal de ser instal·lat en el vehicle, i la sortida del conducte principal és perpendicular al pla horitzontal i en sentit descendent. S'ha dissenyat utilitzant trams de tub mil·limètric segons la norma DIN els quals inclouen rectes, colzes i canvis de secció. En el plànol C1 dins el document Plànols està dibuixat aquest downpipe. El disseny en CAD segueix les dades obtingudes de la simulació, però per tal de fer possible físicament la unió del conducte provinent de la vàlvula wastegate amb el conducte principal, se li ha afegit un tram recte de 50mm i un colze de 40°. La Figura 63 mostra el disseny del downpipe.

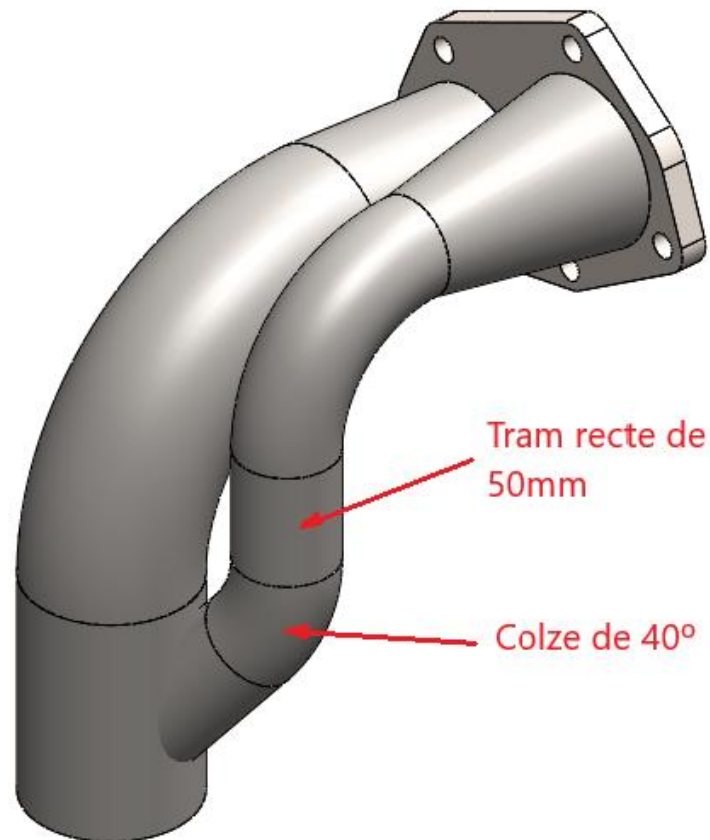


Figura 63: Disseny CAD del downpipe

4.2.6 Simulació del model dissenyat en CAD

Un cop fets els dissenys en CAD, aquests s'entren en el programa *Lotus* per tal de ser simulats. Respecte el model obtingut de l'optimització de paràmetres, el model dissenyat en CAD es diferencia en tres aspectes: els colzes en els col·lectors d'escapament, l'angle de 20° afegit en la unió de conductes dels col·lectors i els dos trams de tubs afegits en el conducte de la wastegate. Només s'han hagut de realitzar aquests canvis degut a que prèviament s'havien establert uns acotaments de paràmetres a l'apartat 4.2.2 Requeriments de fabricació i instal·lació previs al disseny. Els valors de potència obtinguts de la simulació són els de la Taula 16.

Taula 16: Potència del model amb sistema d'escapament millorat

Model amb sistema d'escapament millorat	
Rpm	Potència (KW)
4000	168
5000	202
6000	221
7000	216
8000	180

La Figura 64 mostra la comparació de les corbes de potència entre el model optimitzat i el model dissenyat en CAD. La corba del model dissenyat és inferior a la del model optimitzat. De 4.000 a 6.000rpm la disminució de potència és mínima i es pot considerar menyspreable, de 7.000 a 8.000rpm la disminució de potència és significativa. No per aquesta disminució de potència significa que el model dissenyat en CAD no sigui vàlid. Això és degut a que es compara amb el model optimitzat, el qual és un model que no és apte per ser fabricat ni instal·lat en el motor.

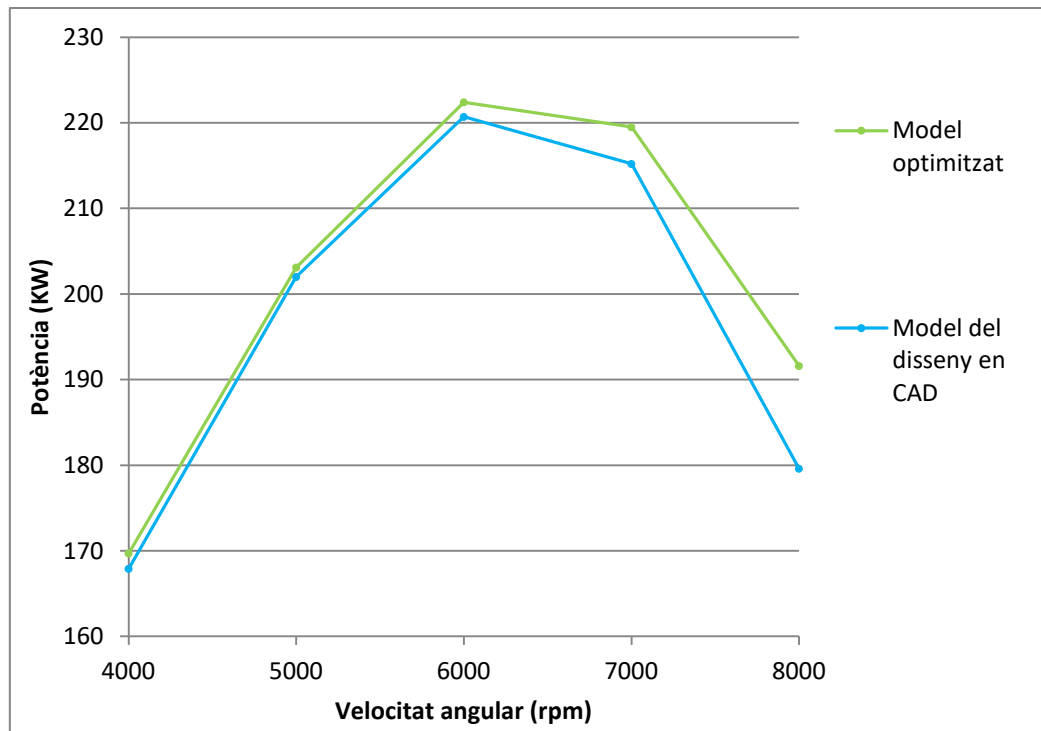


Figura 64: Comparació entre el model optimitzat i el dissenyat en CAD

La disminució de potència és en gran part per les pèrdues de càrrega ocasionades pels colzes en els conductes dels col·lectors, ja que com s'ha vist durant les optimitzacions, les petites variacions d'angles i els trams afegits en els conductes de la wastegate comporten poca variació en el rendiment del motor. Segons el programa *Lotus* les pèrdues de càrrega en les corbes dels conductes són pèrdues de pressió degudes als fluxos secundaris i les regions separades dins la corba. També per la reorganització del flux un cop ha passat la corba. És inevitable que hi hagin colzes en aquests conductes per tal que aquests puguin connectar-se complint amb els requeriments de posició del turbocompressor i les mides màximes d'ubicació dels col·lectors d'escapament. Per tant aquest model de disseny en CAD es dona per vàlid i passa a ser el model millorat obtingut de la optimització i disseny del sistema d'escapament. El següent pas es simular aquest model final per tal d'obtenir tota la informació possible i ser comparat amb el model de sèrie.

5. COMPARACIÓ DE PRESTACIONS

Un cop s'han modelat, optimitzat, dissenyat i simulat els components del sistema d'escapament, s'ha de veure la millora que ha obtingut el motor respecte el sistema d'escapament de sèrie. Per veure aquesta millora, els dos models s'han comparat en diversos aspectes els quals han sigut obtinguts de la simulació en el programa *Lotus*.

Primer de tot s'han comparat les corbes de potència i parell. La Taula 17 mostra els valors de potència i parell dels dos models, també mostra l'augment que s'ha obtingut canviant el sistema d'escapament. La Figura 65 mostra el gràfic amb les corbes de potència dels dos models i la Figura 66 el mateix però amb les corbes de parell. Es pot observar clarament el guany del sistema d'escapament millorat respecte el de sèrie. L'augment de potència màxim és de 21KW a 5.000rpm, i ha obtingut un guany important de potència entre 4.000 i 8.000rpm que són l'àmbit de revolucions en que treballa el motor durant l'acceleració. L'augment de parell és igual que el de la potència, el màxim augment és de 40Nm a 5.000rpm i té un guany important entre 4.000 i 8.000rpm.

Taula 17: Comparació de prestacions segons el sistema d'escapament

Rpm	Sistema d'escapament de sèrie		Sistema d'escapament millorat		Augment de prestacions	
	Potència (KW)	Parell (Nm)	Potència (KW)	Parell (Nm)	Potència (KW)	Parell (Nm)
1000	18	168	19	174	1	6
2000	48	232	47	227	-1	-5
3000	116	371	122	389	6	18
4000	153	364	168	401	15	37
5000	181	346	202	386	21	40
6000	204	324	221	351	17	27
7000	200	274	216	294	16	20
8000	162	194	180	215	18	21

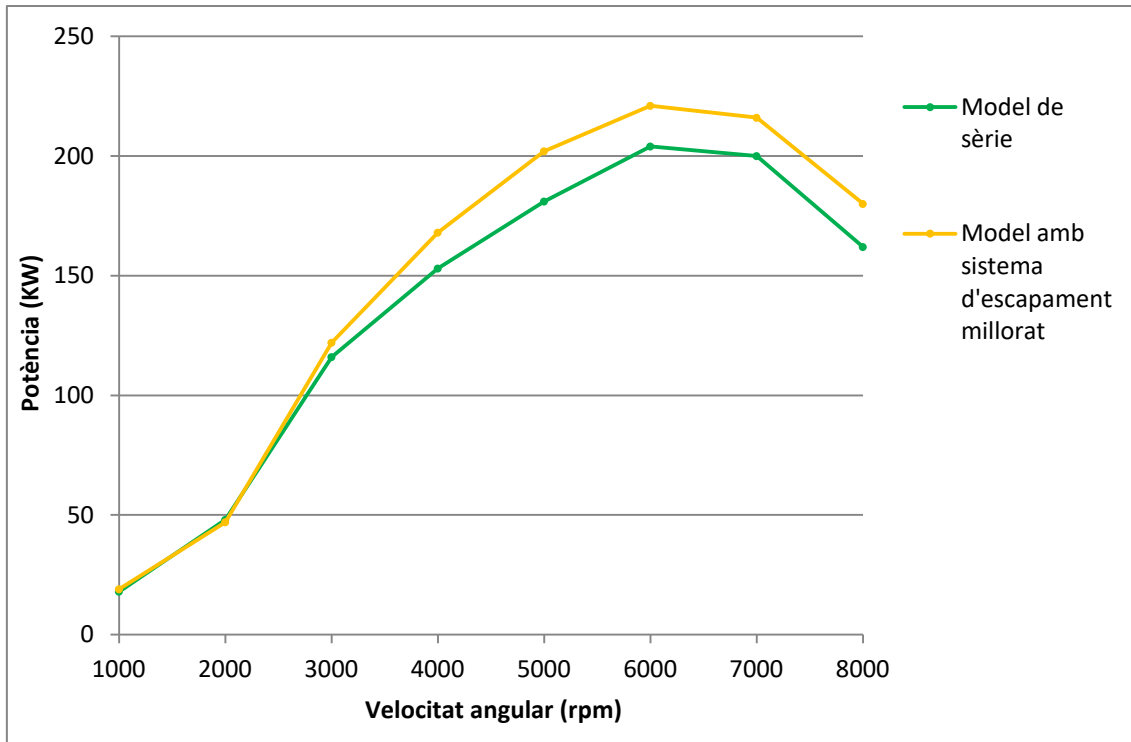


Figura 65: Comparació de potència dels models de sèrie i millorat

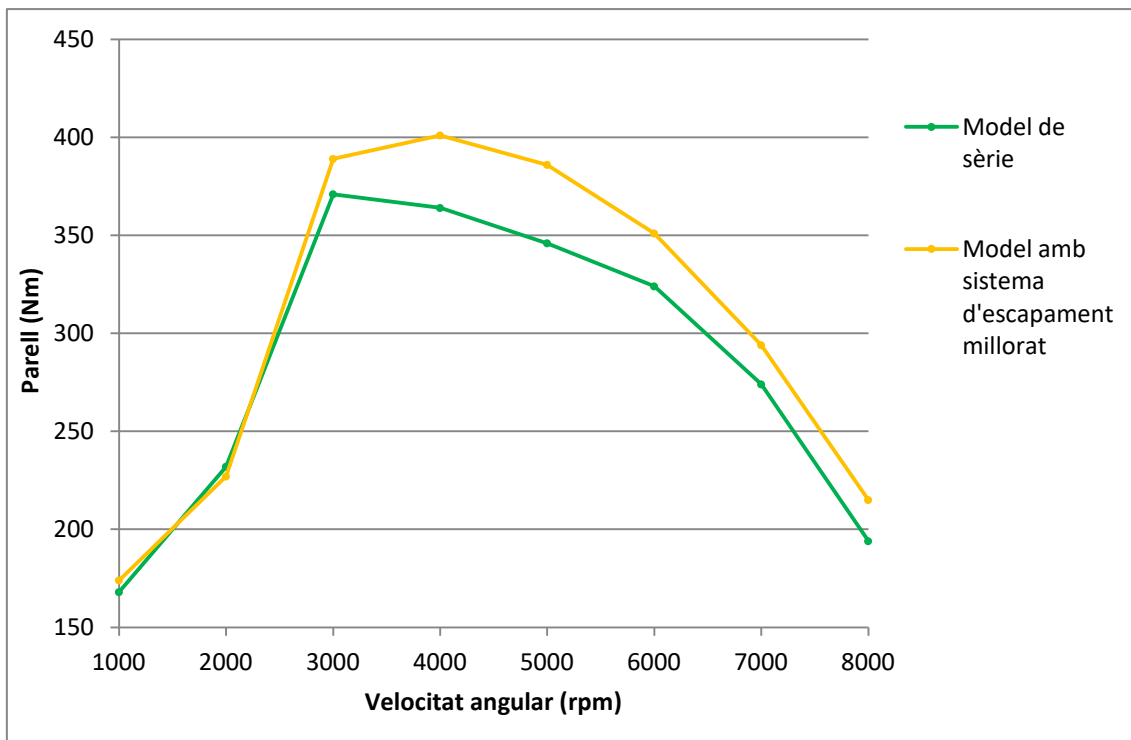


Figura 66: Comparació de parell dels models de sèrie i millorat

Per poder comparar millor els dos models s'ha utilitzat la interfície gràfica de resultats del programa *Lotus*. En aquesta s'ha pogut visualitzar el comportament dels sistemes d'escapament per tal de veure com afecta el canvi del sistema d'escapament en el motor. Un aspecte important a relacionar és el fenomen de la contrapressió, que és la pressió mitjana que hi ha a la sortida de gasos d'escapament del motor. La contrapressió ve determinada en gran part per la geometria de la turbina del turbocompressor, però també està afectada pels col·lectors d'escapament i la pressió de sortida de la turbina. La pressió de sortida de la turbina depèn de les pèrdues de càrrega ocasionades pel downpipe i el tub d'escapament. La Taula 18 mostra els valors mitjans de contrapressió i de pressió a la sortida de la turbina segons la velocitat del motor en els dos models. Aquests valors estan representats a la gràfica de la Figura 67.

Taula 18: Comparació de pressions amb la millora del sistema d'escapament

Rpm	Contrapressió		Pressió a la sortida de la turbina	
	Sistema d'escapament de sèrie (bar)	Sistema d'escapament millorat (bar)	Sistema d'escapament de sèrie (bar)	Sistema d'escapament millorat (bar)
1000	1,08	1,05	1,03	1,01
2000	1,26	1,17	1,05	1,01
3000	1,93	1,72	1,16	1,03
4000	2,2	1,99	1,23	1,05
5000	2,56	2,23	1,33	1,11
6000	2,81	2,3	1,43	1,11
7000	2,78	2,23	1,45	1,13
8000	2,36	1,81	1,38	1,03

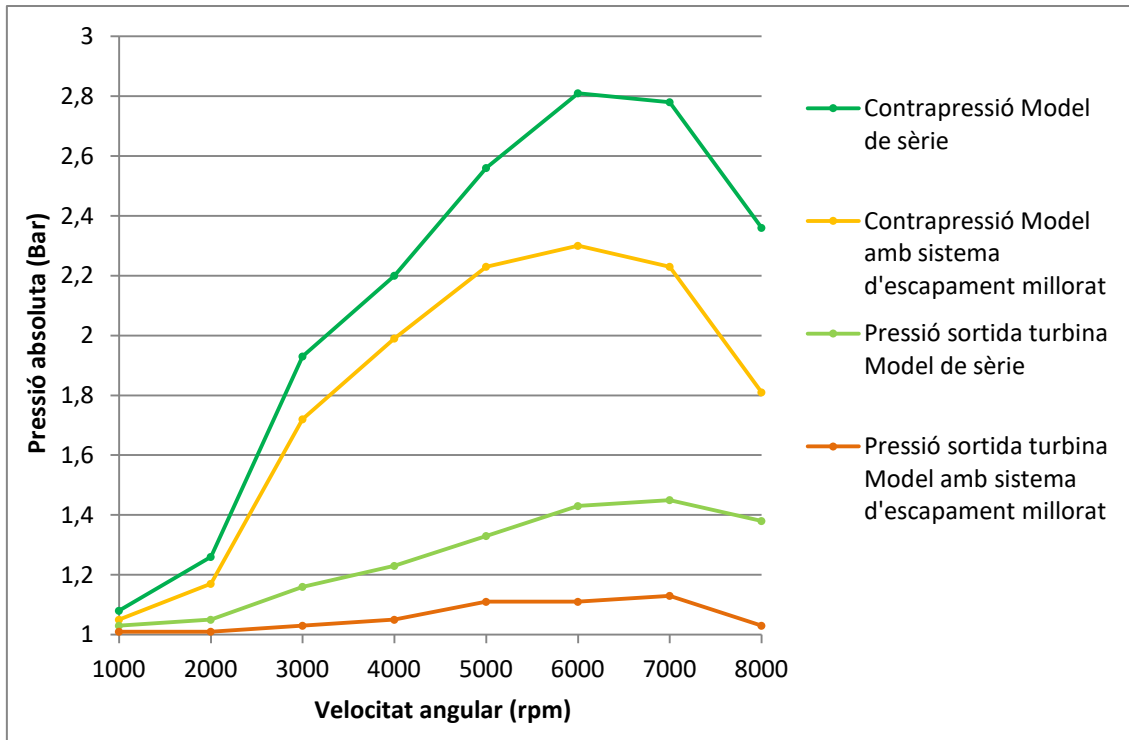


Figura 67: Comparació de pressions amb la millora del sistema d'escapament

Degut a la disminució de la contrapressió, teòricament hauria de disminuir la temperatura dels gasos d'escapament del motor. Per comprovar-ho també s'ha mirat la mitjana de temperatura de gasos d'escapament del motor just a la sortida de la culata. Els valors obtinguts en °C són els de la Taula 19 i estan representats al gràfic de la Figura 68.

Taula 19: Comparació de la temperatura en la millora del sistema d'escapament

Rpm	Temperatura dels gasos a la sortida de la culata	
	Sistema d'escapament de sèrie (°C)	Sistema d'escapament millorat (°C)
1000	658	616
2000	706	625
3000	701	551
4000	770	576
5000	839	650
6000	876	765
7000	893	828
8000	903	835

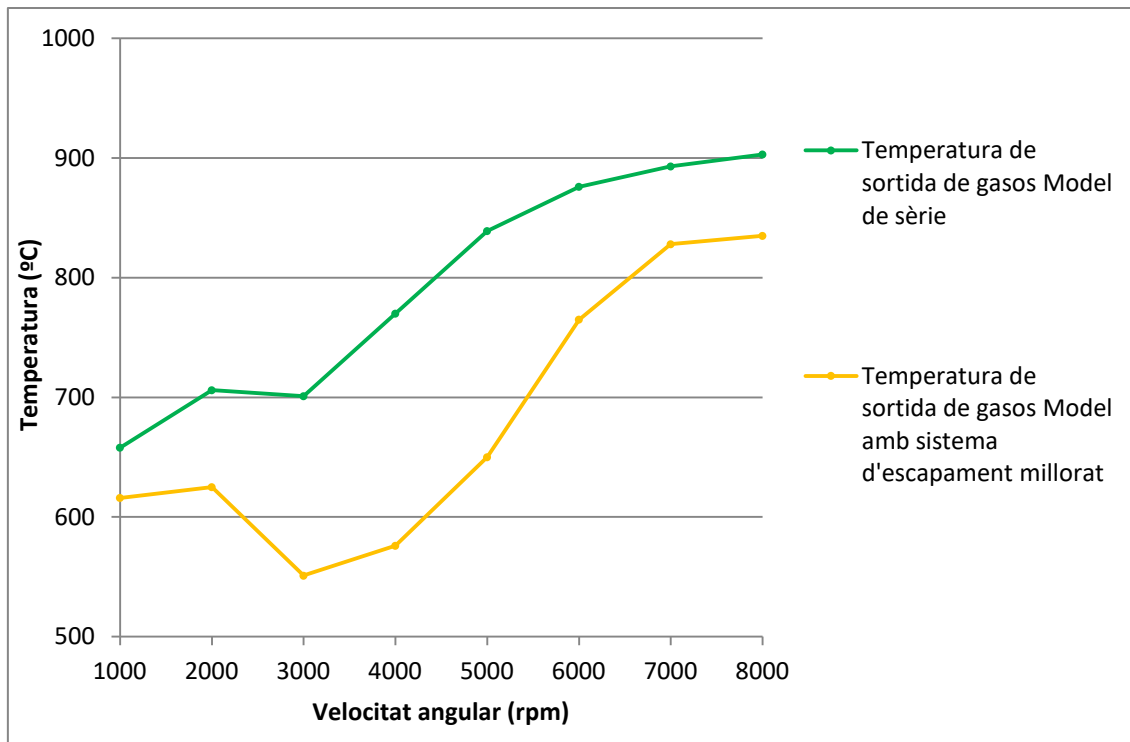


Figura 68: Comparació de la temperatura en la millora del sistema d'escapament

Tant la disminució de pressions com de la temperatura signifiquen una millora molt important en el motor. Amb el nou sistema d'escapament, apart d'augmentar la potència i parell del motor també fa augmentar la vida útil d'aquest. Al disminuir la contrapressió el motor té més facilitat per evacuar els gasos d'escapament, pel que augmenta la seva eficiència volumètrica i disminueix la seva temperatura. Com s'ha explicat a l'apartat 3.2.1 Col·lectors d'escapament, la disminució de pressió i temperatura dels gasos d'escapament ha contribuït a disminuir les probabilitats de detonació dins el cilindre, fenomen el qual sempre s'ha d'evitar. En el turbocompressor es disminueix la pressió de sortida de gasos, cosa que també fa disminuir la seva temperatura i s'allarga la vida útil. En conclusió la millora del sistema d'escapament fa que el motor i el turbocompressor treballin en condicions més favorables pels seus components, i a conseqüència s'augmenta la seva fiabilitat i vida útil.

6. FABRICACIÓ

Gran part del procés de fabricació dels col·lectors d'escapament i el downpipe serà de forma artesanal. Això és degut a que són prototips dels quals només se'n fabricarà una unitat de cada per tal de ser provats en el vehicle. Conjuntament amb aquest apartat de la memòria, per la fabricació també és necessari consultar el document Plànols i el document Estat d'amidaments.

Primer de tot es tallaran amb doll d'aigua les plaques d'unió, les quals inclouen les dues plaques d'unió dels col·lectors amb la culata i el turbocompressor, i la placa del downpipe que l'uneix amb la sortida de la turbina i la vàlvula wastegate. Aquests dissenys estan per ordre en els plànols B01, B02 i C01. També es tallaran amb doll d'aigua les dos plaques que s'utilitzaran com a suport pel muntatge dels col·lectors d'escapament, les quals estan dibuixades en els plànols A01 i A02.

A la placa d'unió entre els col·lectors d'escapament i el downpipe s'ha de fer un rebaix en forma de caixa circular de 2mm de profunditat per poder encaixar els tubs dels col·lectors i així facilitar el procés de muntatge i soldadura. Aquest rebaix està explicat a l'apartat 4.2.5.1 Disseny de les plaques d'unió i està dibuixat en el plànol B01. S'efectuarà amb un centre de mecanitzat de control numèric de 3 eixos. El codi de mecanitzat és el de la Figura 69 el qual utilitza un cicle fix de caixa circular, i es mecanitzarà amb un fresolí de 16mm de diàmetre. La placa tallada amb doll d'aigua es col·locarà dins el centre de mecanitzat segons el croquis de la Figura 70 on també s'hi mostra el zero peça. L'eix Z és l'eix vertical de la màquina.

N10	G0 G17 G90 G43
N20	G0 Z100
N30	T1 M6
N40	S6000 M03
N50	G88 G99 X0 Y0 Z0 I2 J21,5 B1 C8 D20 H150 L8 F300
N60	X93
N70	X186
N80	X279
N90	G0 G80
N100	G0 Z100
N110	G0 X0 Y0
N120	M30

Figura 69: Codi per mecanitzar els rebaixos a la placa d'unió amb la culata

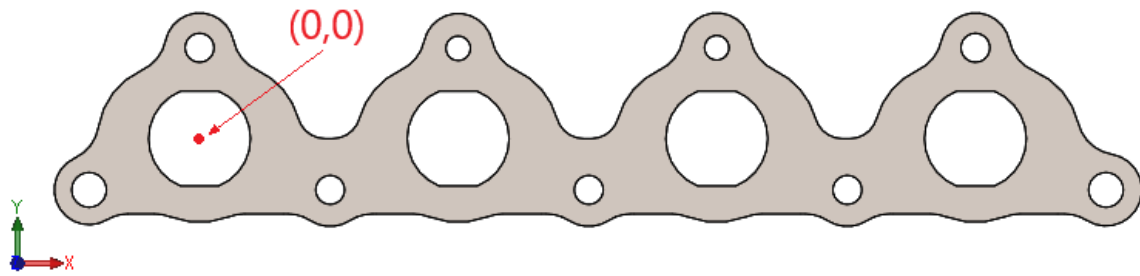


Figura 70: Croquis de posició de la placa en el centre de mecanitzat

El següent pas és preparar tots els tubs que conformaran els conductes dels col·lectors i el downpipe. Aquests s'han de tallar segons les mides establertes en els plànols. Tots els tubs es tallaran amb una serra de cinta a excepció dels dos tubs que conformen la unió de conductes en el downpipe (plànols C03 i C04), aquests dos es tallaran amb un trepant mitjançant una broca de corona circular. Després de ser tallats, es fa un xamfrà mitjançant una mola als contorns d'unió entre els tubs per tal que la soldadura penetri per tot l'espessor d'aquests. Finalment per deixar els tubs ja preparats pel muntatge i soldadura, es netegen amb acetona per tal de desengreixar i treure qualsevol resta que pugui contaminar la soldadura.

El procés de muntatge comença muntant la unió dels conductes dels col·lectors, la qual està projectada al plànol B2. Els tubs ja tallats s'uneixen entre ells i s'ajunten mitjançant punts de soldadura. Aquests es col·loquen sobre la placa d'unió amb el turbocompressor de manera que els tubs encaixin el millor possible amb els conductes de la placa, ja que degut a la geometria dels conductes de la placa aquests no poden encaixar perfectament amb els tubs. La Figura 71 mostra aquesta unió per la part inferior.

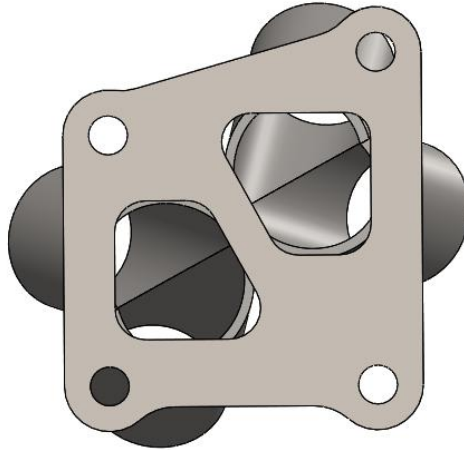


Figura 71: Unió dels conductes per la part inferior

Un cop totes les peces de l'acoblament estan unides mitjançant punts de soldadura, es passa al procés de soldadura. Gràcies a l'aportació de material soldat, s'emplenen els forats on els tubs i la placa no encaixen perfectament, després mitjançant una polidora pneumàtica es rebaixen les protuberàncies per tal de crear un canvi de secció homogeni que afavoreixi al flux de gasos. Mitjançant la mateixa polidora pneumàtica, a la placa d'unió amb la culata es faran les transicions de secció dels conductes. En aquestes transicions és on passa de la secció dels conductes de la culata a la secció circular dels tubs dels col·lectors. Aquests canvis de secció es poden veure al plànol B01.

Totes les soldadures es portaran a terme mitjançant soldadura TIG amb aportació de material. Aquest material també és acer inoxidable 304-L, igual que totes les parts que conformen els components dissenyats. Per soldar s'utilitzarà argó (Ar) com a gas inert. El gas inert s'aporta damunt la soldadura per tal de protegir-la de l'atmosfera contaminant mentre es porta a terme el procés de soldat. També s'aporta gas inert dins els tubs, degut a que també s'ha de protegir la part posterior de la soldadura. Les plaques que conformen l'estructura guia tenen uns petits orificis per introduir aquest gas inert dins els tubs.

Per tal de muntar els col·lectors d'escapament, s'ha de fer una estructura guia que agunti les dues plaques en la posició establerta en el plànol A1. Aquesta posició és la mateixa que la dels col·lectors d'escapament de sèrie del vehicle, per tant l'estructura es fabricarà mitjançant aquests com a base. Això es farà collant les dues plaques de l'estructura als col·lectors de sèrie en la posició que es pot veure a la Figura 72. Un cop collades en aquesta posició, es solden uns passamans entre les dues plaques de suport per tal de crear l'estructura amb que es muntaran els col·lectors dissenyats.



Figura 72: Plaques de l'estructura guia col·locades en els col·lectors de sèrie

Un cop feta l'estructura ja es poden muntar els col·lectors d'escapament. Les plaques d'unió dels col·lectors es collen a aquesta estructura mitjançant els mateixos forats que utilitzen per ser cargolades a la culata i al turbocompressor. Amb les plaques collades a l'estructura es van muntant els trams de tub i s'uneixen per punts de soldadura. Per muntar-los cal seguir el plànol B3 on es mostren diferents vistes dels conductes dels col·lectors i també la Taula 20 on hi ha especificats per ordre els diversos trams que componen aquests conductes.

Taula 20: Trams que componen els conductes dels col·lectors d'escapament

Conducte 1		Conducte 2		Conducte 3		Conducte 4	
Trams rectes (mm)	Colzes (graus)	Trams rectes (mm)	Colzes (graus)	Trams rectes (mm)	Colzes (graus)	Trams rectes (mm)	Colzes (graus)
30			30		70		70
	90		10		10	30	
	90	100			50		30
100			70	100			10
	30		10		10	70	
	10		90	10			30
70		10			50		90
	70		70		90		90
	10	30			90		90
10			30		70		50
	30		90				

Quan tots els trams estan units es passa al procés de soldadura tal i com s'ha explicat anteriorment. Encara que durant el procés de soldadura les plaques estiguin collades a l'estructura, aquestes pateixen petites deformacions que ocasionarien pèrdues de gasos en la unió cargolada. Per evitar aquestes pèrdues, un cop soldat es planeja les dues cares cargolades (la cara que es colla amb la culata, i la cara que es colla amb el turbocompressor) mitjançant una polidora de banda plana.

El downpipe es munta de la mateixa manera, però degut a la baixa complexitat respecte els col·lectors d'escapament, per aquest no cal fer una estructura guia. Com a referència s'agafa la placa que uneix el downpipe amb la sortida del turbocompressor, i a partir d'aquesta es van muntant els tubs mitjançant punts de soldadura seguint el plànol C1. Un cop muntats tots els elements del downpipe, aquests es solden de la mateixa manera que els col·lectors d'escapament. Quan tots els elements estan soldats entre ells, també es planeja la cara que uneix el downpipe amb la sortida del turbocompressor per evitar pèrdues de gasos.

7. RESUM DEL PRESSUPOST

El pressupost total de fabricació és de **763,90€** (Set-cents seixanta-tres Euros amb noranta Cèntims).

8. CONCLUSIONS

L'abast inicial del treball era dissenyar, fabricar i instal·lar un sistema d'escapament pel motor del vehicle a estudiar. Aquest objectiu no s'ha pogut assolir degut a la situació actual provocada pel Covid-19, la qual no ha permès obtenir els materials i portar a terme els desplaçaments per la fabricació i instal·lació dels components en el vehicle. Malgrat això, la part de disseny del sistema d'escapament s'ha pogut assolir i aprofundir més del previst. Mitjançant un programa de simulació de motors s'ha pogut crear un model que simula el comportament del motor de sèrie del vehicle, i mitjançant aquest i programari CAD, s'han dissenyat uns col·lectors d'escapament i un downpipe el més eficients possibles per aquest motor.

Aquests dos components dissenyats compleixen amb l'objectiu del treball que és augmentar la potència i el rendiment del motor complint amb els requisits per poder ser instal·lats en el vehicle. Apart d'això, aquests components també augmenten la vida útil d'altres parts del motor com a conseqüència de disminuir la seva pressió i temperatura de treball. Degut a la millora del sistema d'escapament, el motor ha guanyat un màxim de 21KW de potència a 5.000rpm, amb un guany important dins l'àmbit d'entre 4.000 i 8.000rpm que són les revolucions en què treballa el motor durant l'acceleració.

Com a aspectes principals dels components dissenyats, destacar que els col·lectors d'escapament tenen una longitud de conductes de fins a un 500% major que als de sèrie, essent 550mm de longitud total per cada conducte. La secció d'aquests és constant i l'angle d'unió entre conductes és el més petit possible determinat per la fabricació, que són 40°. El downpipe dissenyat té una secció de 70mm de diàmetre en el conducte principal i un radi de gir un 290% més gros que el de sèrie essent de 110mm. Tots aquests valors han estat obtinguts de la parametrització de dades mitjançant el programa de simulació i seguint els requeriments imposats per fer possible la posterior fabricació i instal·lació en el vehicle.

Encara que no s'hagin pogut fabricar els components dissenyats, a l'apartat de fabricació s'ha explicat el procés que s'hauria portat a terme pas per pas per fabricar-los.

L'obtenció i entrada de dades del motor per crear el model en el programa de simulació ha estat la part més laboriosa. Aquesta part era imprescindible per tal d'obtenir un model fiable amb el que portar a terme els càlculs. Aquest model serà de gran ajuda per futures modificacions i optimitzacions en el motor del vehicle, ja que

utilitzant els mateixos mètodes i passos seguits es poden dissenyar, optimitzar i modificar els altres elements del motor.

9. RELACIÓ DE DOCUMENTS

A la memòria acompanyen els següents documents:

- Annexos
 - Annex A: Teoria
 - Annex B: Simulació
- Plànols
- Plec de condicions
- Estat d'amidaments
- Pressupost

9.1 Compatibilitat de documents

L'ordre d'importància dels documents del projecte i de la seva compatibilitat, és la que s'especifica a continuació:

- Plànols
- Plec de condicions
- Memòria
- Estat d'amidaments
- Pressupost

10. BIBLIOGRAFIA

- Alacermas. 2018. [Figura]. Catàleg de colzes mil·limètrics DIN. Recuperat de file:///C:/Users/Usuari/Downloads/0ddzrttl12-05-2020_17-51-31.pdf
- Alacermas. 2018. [Figura]. Catàleg de reduccions mil·limètriques DIN. Recuperat de <https://www.alacermas.com/productos.php?categoria=1&subcategoria=249&gama=1&producto=31#>
- Alacermas. 2018. [Figura]. Catàleg de solzes Schedule 10S. Recuperat de file:///C:/Users/Usuari/Downloads/i4rhxio64_12-05-2020_16-38-33.pdf
- BJAB. 2020. [Figura]. Eix d'un turbocompressor. Recuperat de <https://p.globalsources.com/IMAGES/PDT/B1160232912/El-eje-y-el-compresor-de-la-rueda-de-turbina-de-Turbo-HY35-de-los-recambios-del-turbocompresor-ruedan-a-la-asamblea.jpg>
- CLR. 2020. [Figura]. Parts de l'injector de combustible. Recuperat de <https://clr.es/blog/wp-content/uploads/2017/06/Fuelinjector.png>
- Emaze Carmen Pilar Acera. 2018. [Figura]. Esquema de funcionament del compressor. Recuperat de https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.emaze.com%2F%40AOLQOZLWQ&psig=AOvVaw2TajXdGDtH_UrOvXuwlvUa&ust=1587656846763000&source=images&cd=vfe&ved=0CAIQjRxqFwoTCKjVyfew_OgCFQAAAAAdAA_AABAJ
- Enginebasics. 2010. [Figura]. Esquema de funcionament de la voluta d'escapament. Recuperat de <https://www.enginebasics.com/Advanced%20Engine%20Tuning/Images/AR%20turbine%20sizing%203.png>
- EPI inc. 2020. [Figura]. Parell d'un motor de quatre cilindres durant mig cicle. Recuperat de <http://www.epi-eng.com/images/Engine/ET-X-4%20Cyl.gif>
- EPI inc. 2020. [Figura]. Parell d'un motor monocilíndric durant un cicle. Recuperat de <http://www.epi-eng.com/images/Engine/ET-X-1%20Cyl.gif>
- Fia Historic database. 1998. [Figura]. Secció d'entrada del col·lector d'escapament. Recuperat de <https://historicdb.fia.com/car/mitsubishi-lancer-evolution-cp9a-1998>

- Fia Historic database. 1998. [Figura]. Secció de sortida del col·lector d'escapament. Recuperat de <https://historicdb.fia.com/car/mitsubishi-lancer-evolution-cp9a-1998>
- Fia historic database. 1998. Fitxa d'homologació de Mitsubishi EVO VI. <https://historicdb.fia.com/car/mitsubishi-lancer-evolution-cp9a-1998>
- Física. Joseph W. Kane, Morton M. Sternheim. [Equació]. Formula del parell. Recuperat de <https://books.google.es/books?id=lj5kLw2uxGIC&pg=PR16&dq=formula+momento+angular&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjbofSVyYXpAhUL9IUkHXoVDDwQ6AEIKDAA#v=onepage&q=formula%20momento%20angular&f=false>
- Física. Joseph W. Kane, Morton M. Sternheim. [Equació]. Formula de la potència. Recuperat de <https://books.google.es/books?id=lj5kLw2uxGIC&pg=PR16&dq=formula+momento+angular&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjbofSVyYXpAhUL9IUkHXoVDDwQ6AEIKDAA#v=onepage&q=formula%20momento%20angular&f=false>
- Forgemotorsport. 2020. [Figura]. Vàlvula de descàrrega. Recuperat de <https://www.forgemotorsport.com/userfiles/images/sys/products/Subaru-Impreza-V4-Piston-Ram-Dump-Valve.jpg>
- Garrettmotion. 2020. [Figura]. Gràfic de flux d'escapament d'un turbocompressor. Recuperat de <https://www.garrettmotion.com/wp-content/uploads/2018/05/Turbine-Flow-GT28.jpg>
- Garrettmotion. 2020. [Figura]. Mapa d'un compressor de turbocompressor. Recuperat de <https://www.garrettmotion.com/wp-content/uploads/2019/06/G30-900-Comp-Map.jpg>
- Garrettmotion. 2020. [Figura]. Turbocompressor. Recuperat de https://www.garrettmotion.com/wp-content/uploads/2018/05/GT2860RS_THUMBNAIL.jpg
<https://es.slideshare.net/jimpalomares/ciclo-de-motores-de-4-tiempos-33476914>
- Ingemecanica. 2020. [Figura]. Mecanisme biela-manovella del motor d'explosió. Recuperat de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/objetos/figutut63/fig1tut63.jpg>
- Introduccion a la fisicoquimica: Termodinamica. Thomas Engel, Philip J. Reid. 2007. [Equació]. Llei dels gasos ideals. Recuperat de <https://books.google.es/books?id=uGC0DiP3g30C&pg=PA149&dq=ecuaciones+gases+ideales&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjnmq684YXpAhUiAGMBHRHwDWAQ6AEIKzAA#v=onepage&q=ecuaciones%20gases%20ideales&f=false>

- J-Spec Performance. 2020. [Figura]. Downpipe de competició pel motor a estudiar. Recuperat de https://j-specperf.ch/images/ets_recirculated_evo_x_02_eliminator_downpipe.jpg
- Makinandovelez. 2017. [Figura]. Cicle Otto. Recuperat de <https://makinandovelez.wordpress.com/2017/11/12/diagrama-pv-de-un-motor-de-ciclo-teorico-otto/>
- maperformance. 2019. [Figura]. Downpipe de competició. Recuperat de <https://www.maperformance.com/products/map-o2-eliminator-downpipe-2008-2015-mitsubishi-evo-x-evox-o2e#>
- Ostar motorsports. 2019. [Figura]. Intercooler aire-aire. Recuperat de https://ostarmotorsports.com/images/Products/KLM%20Fabrication/1KhpFMICbd1_zpsw0dzwoex.jpeg
- Ruanovaperformance. 2020. [Figura]. Col·lectors d'escapament de competició per Renault GT Turbo. Recuperat de https://ruanovaperformance.com/791-large_default/colector-tubular-union-f1-r5-gt-turbo-r11.jpg
- Seepeyrace. 2020. [Figura]. Col·lectors d'escapament de competició pel motor a estudiar. Recuperat de https://cdn.shopify.com/s/files/1/0184/6316/products/Untitled-1_0002_Layer_1_6a9d9d97-ee72-43b0-9171-cc8fdf0c2570_2000x.jpg?v=1529954015
- Slideshare jimpalomares. 2014. [Figura] Cicle de motors de 4 temps. Recuperat de
- Summitracing. 2020. [Figura]. Voluta d'escapament. Recuperat de https://static.summitracing.com/global/images/prod/mediumlarge/bww-14961019007_ol_ml.jpg
- Tech-racingcars. 2019. [Figura]. Mapa de funcionament del compressor. Recuperat de <http://tech-racingcars.wdfiles.com/local--files/mitsubishi-lancer-evo-vi/td05hr-16g6-raw.gif>
- Turbomechanics. 2019. [Figura]. Secció d'un turbocompressor. Recuperat de <https://turbomechanics.com/images/partes%20de%20turbocompresor.jpg>
- Turbomechanics. 2019. [Figura]. Esquema de gasos i funcionament d'un motor amb turbocompressor. Recuperat de https://www.turbomechanics.com/images/FUNCION_TURBO.jpg
- Turbotec. 2020. [Figura]. Esquema de funcionament de la vàlvula wategate. Recuperat de <http://www.turbotec.com.py/v2/images/img-wastegate.jpg>
- Wikipedia. Jerry Herman. 2020. [Cita]. https://en.wikipedia.org/wiki/Flow_coefficient

- ZePerfs. 2020. [Figura]. Diagrama de la relació de canvi de Mitsubishi EVO VI. Recuperat de <http://www.zeperfs.com/es/fiche260-mitsubishi-lancer-evo-vi.htm#GRDB>

ANNEX A

TEORIA

ANNEX A. TEORIA

A.1 Cicle de funcionament teòric d'un motor de quatre temps

Un motor de combustió interna alternatiu de quatre temps segueix el cicle d'Otto. Com podem veure a la Figura 73, aquest cicle està compost per quatre fases que cada cilindre segueix individualment. Els quatre temps del cicle ideal d'Otto representen una aproximació teòrica del comportament d'un motor de combustió. En els motors de combustió interna alternatius, els gasos es mouen per diferència de pressions provocades per variacions de volum dins els cilindres. Les quatre fases del motor són:

1. Admissió: En aquesta fase entra dins el cilindre la mescla d'aire i combustible. Aquesta mescla pot entrar gràcies a que la vàlvula d'admissió obre i el cilindre es desplaça linealment augmentant el volum de la cambra creant una depressió. Segons el cicle ideal d'Otto es considera una expansió a pressió constant, considerant que la pressió a l'exterior serà la mateixa que a l'interior de la cambra. Com podem veure a la Figura 74 el diagrama P-V (Pressió-Volum), l'admissió representa la recta entre els punts 0 i 1, una recta on varia el volum però la pressió es manté constant.
2. Compressió: Amb cap vàlvula oberta, la cambra de combustió es torna un volum tancat. El pistó es mou linealment reduint aquest volum fent que la pressió augmenti. Aquest procés es considera adiabàtic degut a la velocitat amb que es porta a terme, podent menysprear la calor transmesa fora de la cambra. La corba del punt 1 al 2 en la Figura 74 representa aquesta etapa de compressió.
3. Combustió: Quan el pistó arriba al seu màxim superior, la mescla fa combustió gràcies a que salta una guspira dins la cambra. La combustió genera un calor que escalfa l'aire pràcticament a volum constant degut a la velocitat del procés. Aquest gran augment de temperatura provoca un augment de pressió en el pistó cosa que l'empeny perquè augmenti el volum de la cambra, i creant un treball sobre aquest. Com es pot veure a la Figura 74, es diferencia clarament entre l'explosió (recta entre punts 2 i 3 a volum constant) i l'expansió (corba entre els punts 3 i 4). Aquesta segona corba s'aproxima a un procés adiabàtic degut a la velocitat d'aquest.
4. Escapament: Aquesta fase igual que l'anterior es divideix en dos etapes. La primera és quan obre la vàlvula d'escapament i degut a la diferència de pressions surten els gasos cap a l'exterior de la cambra. És a volum constant

degut a la rapidesa de l'etapa. El pistó té un moviment ascendent reduït el volum de la cambra, aquesta és la segona etapa en que s'expulsa l'aire a pressió constant. Per ordre podem veure a la Figura 74 les etapes de 4 a 1 i seguidament de 1 a 0.

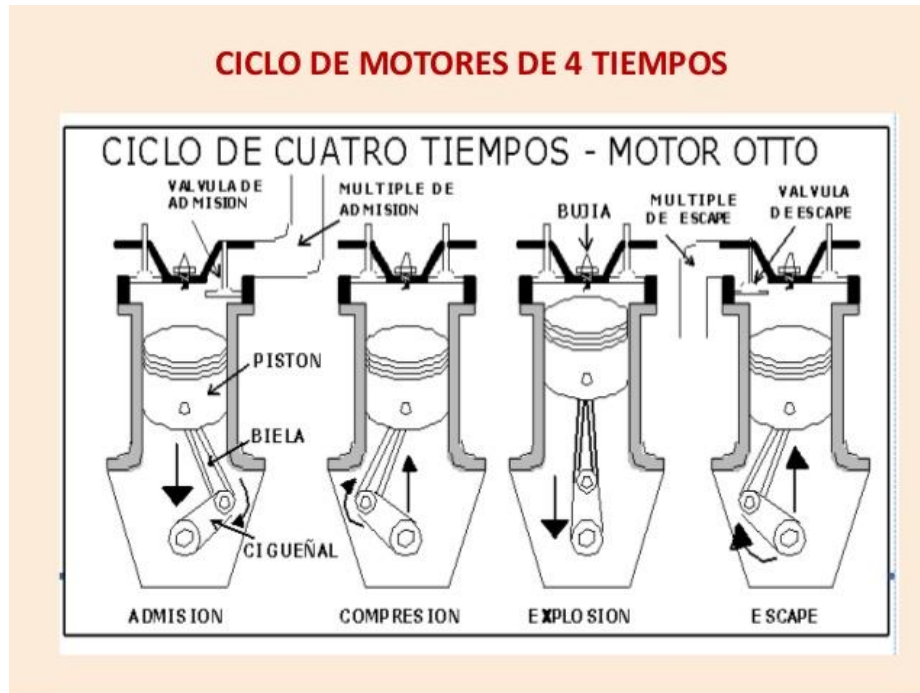


Figura 73: Cicle de motors de 4 temps (Jim Andrew. 2014)

La Figura 73 ens mostra els quatre cicles del motor que estan continguts en dos revolucions del cigonyal. Admissió i compressió en la primera revolució, i combustió i escapament a la segona. Dels quatre cicles només el de combustió genera potència al motor, pel que els motors solen tenir més d'un cilindre per equilibrar les mancances de potència de les altres fases, així doncs augmentant el rendiment i reduint vibracions.

El següent diagrama (Figura 74) és una gràfica de la Pressió en funció del volum. Representa l'estat i el procés termodinàmic del gas durant els cicles. V_{PMS} és el volum en el punt mort superior, quan el pistó està a sobre de tot i el volum és mínim. V_{PMI} és el volum en el punt mort inferior, quan el pistó està a sota de tot i el volum és màxim.

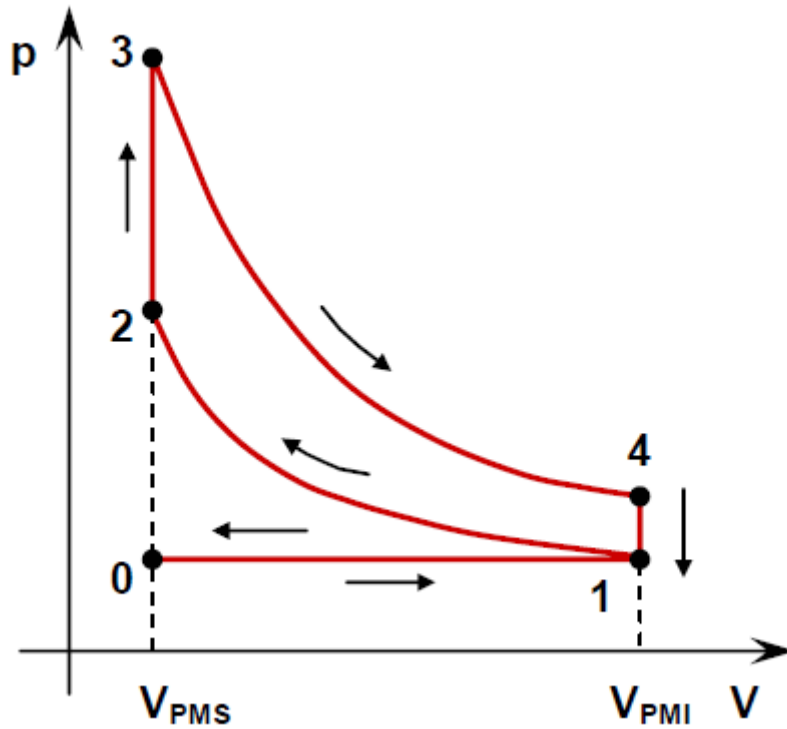


Figura 74: Cicle Otto (Veleztecno. 2017)

Gràcies a aquest diagrama també es pot calcular el treball realitzat, el calor que es transfereix i els intercanvis d'energia durant els cicles. Aquest diagrama és teòric i funcionaria només en casos ideals, però ens serveix per tenir una referència de com seria un motor ideal.

A.2 Parell motor i potència

El parell i la potència són dos dels paràmetres més importants alhora de definir el rendiment d'un motor.

El parell és el moment angular capaç de realitzar el motor i es mesura en el cigonyal. En sistema internacional té com unitats els Newtons per metre (Nm). Surt de fer el producte vectorial entre una força i una distància, com es pot veure a l'Equació 1.

Equació 1: Formula del parell (Joseph W. Kane, Morton M. Sternheim. 2000)

$$\text{Parell (Nm)} = \text{Força (N)} \times \text{Distància (m)}$$

A la fase de combustió, la pressió generada per la combustió de la mescla actua com una força sobre la superfície del pistó. Aquesta força es transmet a la biela, i aquesta la transmet al cigonyal. La distància és el braç de palanca perpendicular a la força i que va d'es d'aquesta fins el centre de rotació del cigonyal. Aquest mecanisme biela-manovella il·lustrat a la Figura 75 i esmentat anteriorment és l'encarregat de fer funcionar aquests motors de combustió, on es transforma la pressió generada a la combustió en un parell al cigonyal.

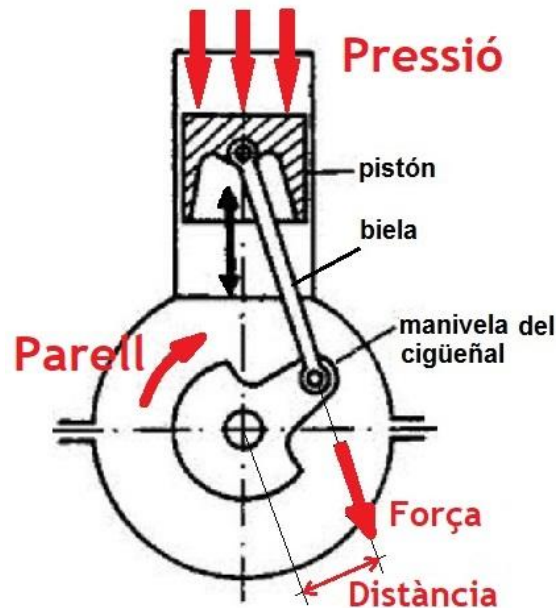


Figura 75: Mecanisme biela-manovella del motor d'explosió. (Hermenejildo Rodríguez. 2020)

Tant la força com la distància varien en funció de la posició angular del cigonyal, pel que mai és un valor constant sinó que varia a mesura que el cigonyal va rotant. S'ha de tenir en compte que aquest parell motor només el transmet durant la fase de combustió, en canvi durant les altres fases el parell motor és zero o negatiu degut al treball que ha de realitzar el motor al comprimir la mescla d'aire-combustible. La Figura 76 mostra com evoluciona el parell motor durant un cicle de funcionament en un motor mono cilíndric. Com es pot veure aquest parell no és gens constant, i comporta vibracions en el motor i pèrdues de rendiment.

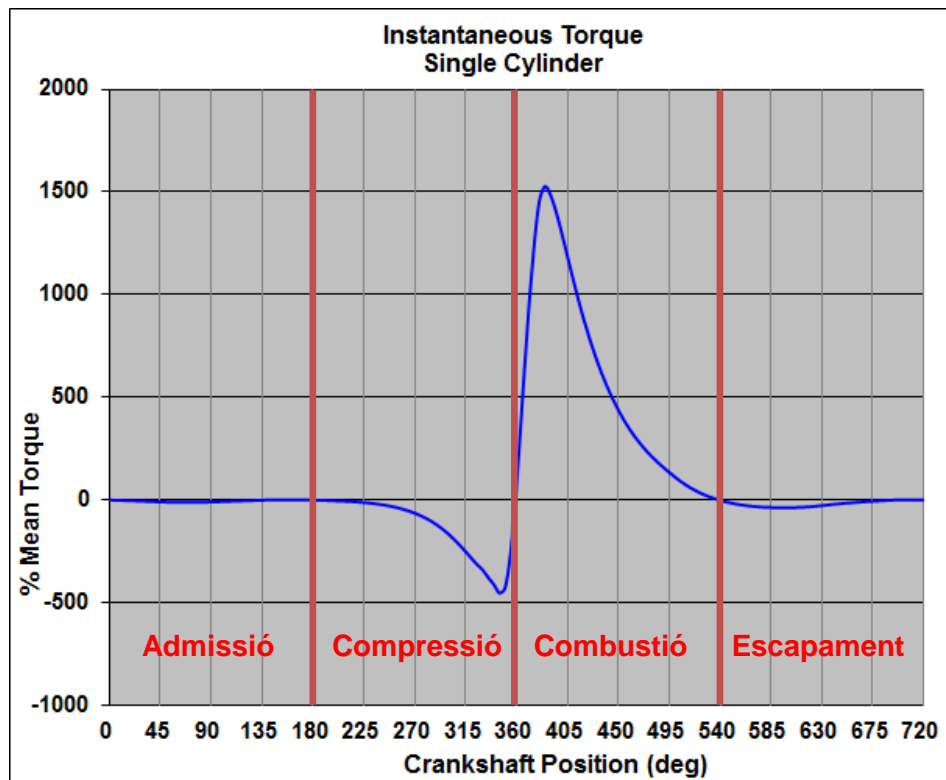


Figura 76: Parell d'un motor monocilíndric durant un cicle (Jack Kane. 2020)

La Figura 77 mostra l'evolució del parell en un motor de quatre cilindres. La gràfica només mostra mig cicle de cigonyal, és a dir 360° de rotació d'aquest. Però al ser un cicle de quatre temps amb quatre cilindres, aquests es contraresten i es repeteix la mateixa seqüència cada 180 graus de rotació de cigonyal. Aquesta és una de les principals raons pel que els motors es fan de varis cilindres a diferència de mono cilíndrics. Tot i això aquesta gràfica tampoc és constant, degut a això els motors porten plats d'inèrcia solidaris amb el cigonyal per intentar contrarestar i homogeneïtzar aquestes variacions de parell durant el cicle.

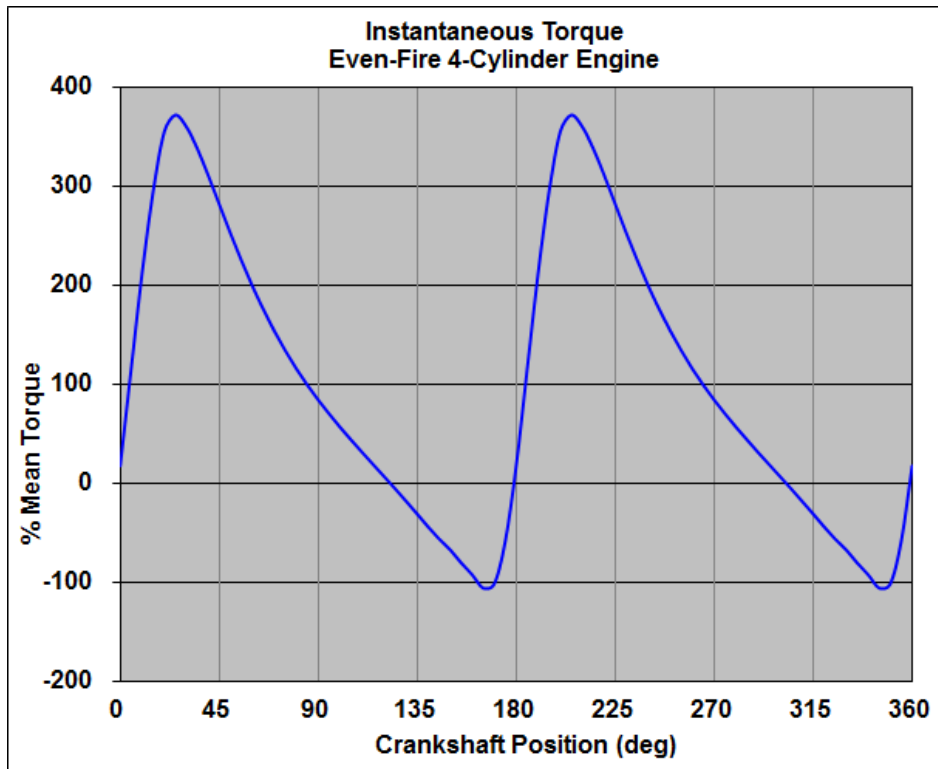


Figura 77: Parell d'un motor de quatre cilindres durant mig cicle (Jack Kane. 2020)

La potència és el treball realitzat per unitat de temps. En sistema internacional s'utilitza el Watt (W), que és igual al Joule partit per segon (J/s). En el món automobilístic s'utilitza per determinar el treball per unitat de temps que pot desenvolupar un motor en un moment determinat. Es sol utilitzar els cavalls de vapor (CV), que són directament proporcionals als KW, **1 (KW)=1'34102 (CV)**. Encara que els cavalls de vapor són la magnitud més entesa, tant legalment com científicament es treballa amb Watts o Kilowatts, per tant es treballarà amb aquests.

Com es pot veure a la Equació 2, la potència surt de multiplicar el parell motor amb la velocitat angular del cigonyal, pel que la potència es podria considerar una magnitud secundària que s'obté amb aquest càlcul. La velocitat angular és amb sistema internacional, que s'obté amb un factor de conversió a partir de les revolucions per minut, **1 (rad/s)=30/π (rpm)**.

Equació 2: Formula de la potència (Joseph W. Kane, Morton M. Sternheim. 2000)

$$\text{Potència (W)} = \text{Parell (Nm)} \times \text{Velocitat angular } \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)$$

La Figura 78 mostra en un mateix gràfic la corba de parell i potència del Mitsubishi Lancer EVO VI amb motor de sèrie. Perquè s'entengui bé, es mostra l'eix horitzontal en revolucions per minut i radians partit per segon, així fent més fàcil la comprensió.

A l'hora de poder determinar el que ofereix un motor, s'ha de tenir en compte tant la potència com el parell. Encara que les dues vagin lligades, ofereixen una visió molt més realista i entenedora del treball que podrà realitzar aquest motor en el cotxe.

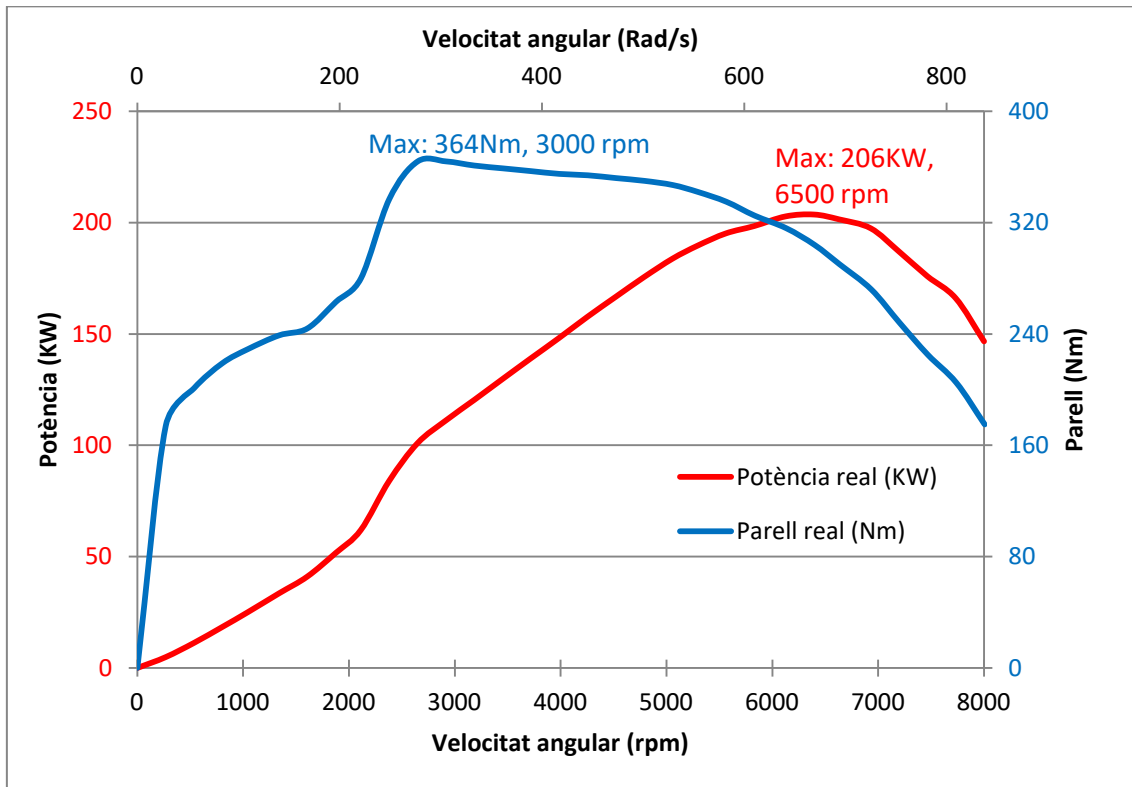


Figura 78: Corba parell i potència del Mitsubishi EVO VI de sèrie

A.3 Rendiment volumètric

El rendiment volumètric és el rati entre el volum màxim físic del cilindre i el volum d'aire que entra durant la fase d'admissió. Al ser un rati es pot expressar en absolut o en tant per cent.

Equació 3: Rendiment volumètric

$$\text{Rendiment volumètric (\%)} = \frac{V_{\text{aire}}}{V_{\text{bombeig cilindre}}} \times 100$$

L'Equació 3 mostra com és aquest rati on el Rendiment volumètric (en tant per cent) surt de la fracció entre V_{aire} , el volum d'aire a pressió ambient que entra dins el cilindre i $V_{\text{bombeig cilindre}}$, el volum de bombeig del cilindre que es pot calcular com l'àrea del pistó multiplicat per la carrera d'aquest.

El rendiment volumètric d'un motor pot variar segons molts factors. En un motor atmosfèric aquest rendiment sol trobar-se entre un 50% i un 130%. Normalment els valors volten el 80% però hi ha diferents causes que el poden variar. Quan el motor treballa a una règim molt alt, l'aire no té temps a agafar velocitat i entrar a la cambra, pel que es crea una depressió i el rendiment volumètric baixa en picat. Aquesta és la gran raó pel que els motors perden parell a altes revolucions, perquè perden rendiment volumètric i entra menys mescla d'aire-combustible dins el cilindre.

Aquest rendiment volumètric ve marcat en gran part pel pas de l'aire per la vàlvula quan entra al cilindre, també hi influeix el pas d'aquest pel conducte d'admissió. El fenomen que pot fer arribar al 130% el rendiment volumètric en motors atmosfèrics són les ones de pressió. Quan les vàlvules d'admissió tanquen, creen una ona de pressió en el conducte d'admissió que va rebotant al llarg d'aquest. Si coincideix que quan la vàlvula torna a obrir hi impacta l'ona de pressió, l'aire entrarà impulsat per aquesta ona augmentant el rendiment volumètric. Aquest fenomen varia principalment segons la geometria de la lleva, la velocitat del motor, la llargada del conducte i el volum del conducte, pel que fa que sigui difícil de calcular i només serveixi per un àmbit concret de revolucions del motor.

En motors sobrealimentats, el rendiment volumètric pot ser tant alt com pressió es doni a l'admissió del motor. Com una aproximació ràpida, el rendiment volumètric és igual al que tindria el motor si fos d'aspiració atmosfèrica multiplicat per la pressió absoluta a l'admissió en atmosferes. El rendiment volumètric és crucial en tot tipus de motos, però es sol tenir molt més en compte en motors atmosfèrics ja que augmentar aquest rendiment és la única manera d'augmentar el volum d'aire que entra dins els cilindres. En el món de la competició tan per motors atmosfèrics com sobrealimentats el rendiment volumètric és un factor primordial a l'hora de dissenyar o modificar un motor.

A.4 Sistema d'admissió

El sistema d'admissió és un conjunt d'elements amb tres principals funcions: aspirar aire net de l'atmosfera i conduir-lo dins el motor, afegir el combustible a aquest aire fent una mescla determinada i regular la càrrega del motor segons convingui. El diagrama de blocs de la Figura 79 mostra els diferents elements que componen l'admissió d'un motor d'aspiració atmosfèrica. El sentit i direcció del diagrama és el mateix que segueix l'aire dins el sistema d'admissió real.

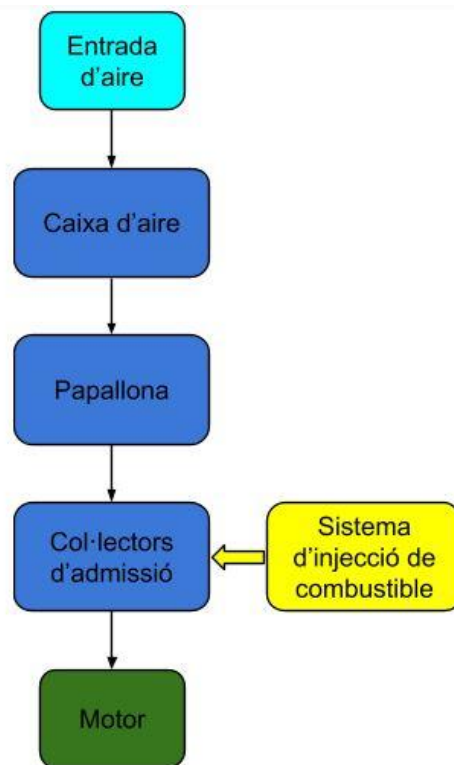


Figura 79: Diagrama de blocs d'admissió d'aspiració atmosfèrica

A.4.1 Entrada d'aire i filtre

L'entrada d'aire és la primera etapa de l'admissió. L'aire ambient és aspirat per un conducte o orifici el qual ja forma part del sistema d'admissió. Si es vol aconseguir la màxima potència i rendiment del motor, aquest aire ha de tenir una temperatura i humitat determinats. Segons l'Equació 4, si l'aire està a menys temperatura aquest és més dens. Per tant a igual aspiració entra més massa d'aire si aquest està a menor temperatura. D'aquest aire el més important és el percentatge d'oxigen que és l'encarregat de la combustió.

Equació 4: Llei dels gasos ideals (Thomas Engel, Philip J. Reid. 2007)

$$\rho = \frac{P}{T \cdot R}$$

On:

- ρ Densitat [kg m^{-3}]
- P Pressió [Pa]
- T Temperatura [K]
- R Constant [$\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$] (En aire sec $R=287$)

Perquè l'aire que entra al motor no contingui cap mena de partícula que pugui danyar-lo, es col·loca un filtre que impedeix el pas d'aquestes partícules en el flux d'aire. Normalment és de paper encara que alguns filtres de competició són d'espuma per oferir una menor restricció al pas d'aire. Els filtres d'aire dels motors es solen posar sempre dins una caixa anomenada caixa d'aire. La Figura 80 mostra la caixa d'aire de Mitsubishi EVO VI on s'hi pot veure el conducte de sortida. Dins aquest conducte de sortida s'hi ubica el cabalímetre, un sensor que mesura el cabal d'aire que entra dins el sistema d'admissió. La ECU utilitzarà aquesta mesura entre d'altres (explicades a l'apartat d'injecció de combustible), com factor en l'algorisme d'injecció de combustible.



Figura 80: Caixa d'aire de Mitsubishi EVO VI

Aquestes caixes d'aire solen estar apartades del motor per evitar la calor que aquest desprèn. Estan dissenyades per poder canviar fàcilment el filtre. A la Figura 81 es veu aquesta mateixa caixa d'aire desmuntada per poder veure les parts. El filtre és de

paper i està ubicat al centre de la caixa. L'entrada d'aire està situada a la part inferior per evitar l'entrada de pols i altres elements perjudicials pel motor o que podrien obstruir el filtre.

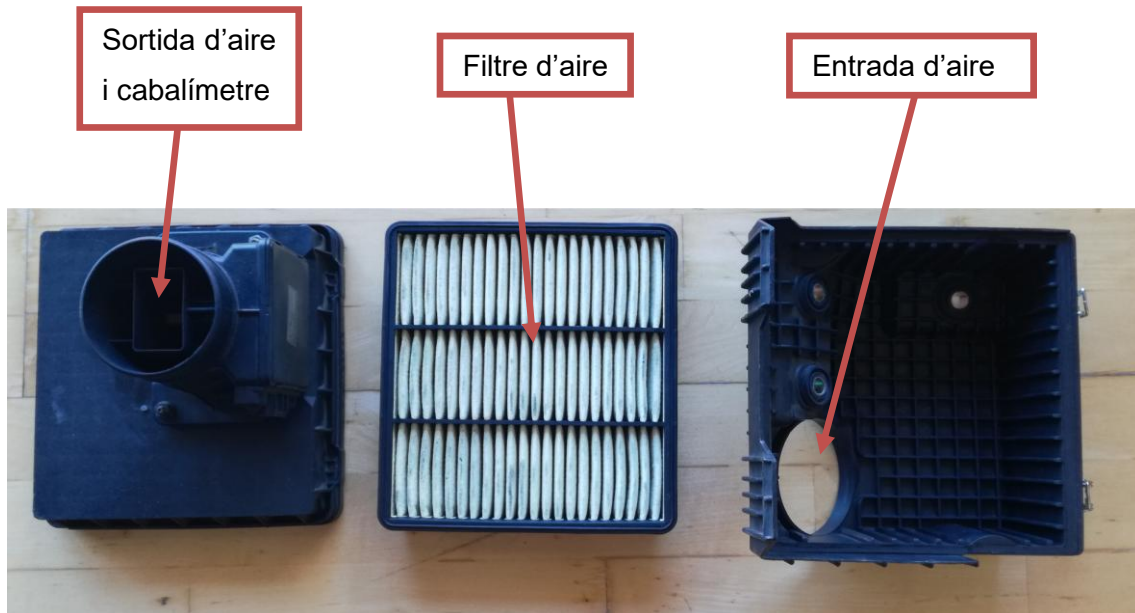


Figura 81: Especejament caixa d'aire Mitsubishi EVO VI

A.4.2 Papallona

La papallona és una vàlvula que regula el pas d'aire. Existeixen altres sistemes en l'automoció per regular el pas d'aire del motor com les guillotines o les papallones individuals per cada cilindre. Com que el motor que es tractarà porta una papallona individual s'explicarà aquesta, però el principi de funcionament és el mateix sigui com sigui la vàlvula. La papallona està ubicada després de la caixa d'aire i just a l'entrada dels col·lectors, normalment collada a aquests.

La vàlvula de papallona és l'encarregada de regular la càrrega del motor. Ho fa deixant entrar més o menys aire el qual formarà part de la combustió. Quan es vol el motor al ralenti o mínima càrrega, la papallona està gairebé tancada creant un buit dins els col·lectors d'admissió i deixant passar l'aire just perquè el motor no es pari. Si es vol el motor a plena càrrega, la papallona s'obre totalment fent l'àrea de pas igual a la del conducte, això fa que s'anul·li la diferència de pressió entre banda i banda d'aquesta deixant el màxim d'aire dins el motor. La papallona es pot posicionar en totes les posicions possibles entre la posició de ralenti i la de plena càrrega, pel que és pot regular la càrrega del motor progressivament.

La papallona pot estar accionada per un servomotor governat per la ECU o un cable directament connectat amb el pedal de gas. En ambdós casos és el conductor del vehicle el que regula la càrrega del motor utilitzant el pedal de gas. Per aquest motiu la vàlvula de papallona té tanta importància en un motor, perquè és l'encarregada de regular la potència. En el cas en que la papallona és accionada per un cable, aquesta incorpora un potenciòmetre connectat a la ECU. La lectura del potenciòmetre és una dada més que utilitza la ECU en l'algorisme d'injecció de gasolina i d'encesa de guspira dins la cambra de combustió.

A la Figura 82 es pot veure una vàlvula de papallona de Renault Clio Sport. Aquesta vàlvula està accionada pel cable de gas. En el mateix eix de la papallona hi ha l'accionador per cable de gas, on aquest cable hi va enrotllat i el fa rotar. A l'altre costat del cos de la vàlvula hi ha el potenciòmetre que mesura la posició de rotació d'aquest eix.

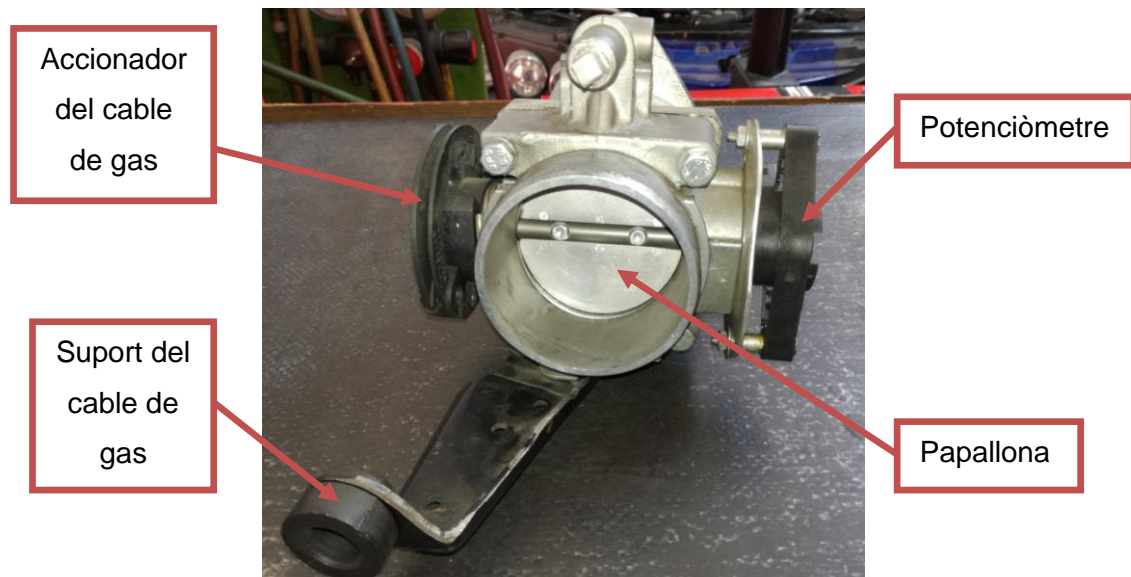


Figura 82: Vàlvula de papallona de Renault clio sport

A.4.3 Col·lectors d'admissió

El col·lector d'admissió és l'element encarregat de distribuir l'aire provinent de la papallona als diferents cilindres. Normalment és d'una sola peça de plàstic o d'alumini emmotllat. A la Figura 83 es veu un col·lector d'admissió de Peugeot 106 Rallie juntament amb la papallona de Renault Clio Sport de la Figura 82. Es poden diferenciar clarament dues parts que són el plènum d'admissió i els conductes d'admissió dels cilindres.



Figura 83: Colector d'admissió de Peugeot 106 Rallie i papallona

El plènum d'admissió té com a propòsit distribuir l'aire en els conductes d'admissió dels cilindres. Per augmentar el rendiment i bon funcionament del motor, el plènum ha de distribuir aquest aire per igual entre tots els cilindres i amb la mínima restricció possible. El volum i geometria del plènum varia per cada motor. Per dissenyar i calcular amb exactitud aquest volum i geometria del plènum s'ha d'utilitzar un banc de flux o programari de simulació de fluids. En el plènum hi ha connectats alguns tubs auxiliars. Un tub auxiliar és el que utilitza el servofrè per ajudar a frenar. La ajuda al servofrè la fa utilitzant la depressió del col·lector quan la papallona està en posició de ralenti, mitjançant un pulmó que ajuda a prémer el pedal de fre. Un altre tub auxiliar és el que va al sensor de depressió del col·lector anomenat sensor MAP. Aquest sensor és una altra dada que utilitza la ECU en l'algorisme d'injecció de combustible i d'encesa de guspira. En els cotxes amb turbocompressor, hi ha un altre tub auxiliar que s'utilitza per accionar la vàlvula de descàrrega.

Els conductes d'admissió dels cilindres condueixen l'aire des del plènum fins als orificis de cada cilindre de la culata, per això mateix la sortida d'aquests conductes van directament a la culata del motor. Sempre es busca una mateixa llargada a tots els conductes de cares a oferir les mateixes prestacions a tots els cilindres. Aquesta llargada com ja s'ha explicat a l'apartat de rendiment volumètric és molt important degut al fenomen de les ones de pressió. El diàmetre o àrea transversal del conducte també importa per les ones de pressió però es calcula principalment segons el cabal d'aire que ha d'entrar dins el motor. Si el diàmetre és massa gros, a poca càrrega de

motor l'aire entrarà lentament i empitjorarà el rendiment volumètric. Si el diàmetre és massa petit, a plena càrrega de motor no hi haurà àrea suficient de pas d'aire i el propi tub es convertirà en una obstrucció que empitjorarà el rendiment volumètric. Com a referència per un bon funcionament del motor en tots els règims, el diàmetre del conducte d'admissió és igual al diàmetre de la vàlvula d'admissió en el cas de motors amb una sola vàlvula d'admissió per cilindre.

A.4.4 Sistema d'injecció de combustible i ECU

És molt important pel bon funcionament del motor una bona mescla d'aire-combustible. La mescla ha de tenir unes proporcions determinades perquè la combustió es porti a terme adequadament. Aquesta mescla adequada és la estequiomètrica, la qual en la combustió no sobrarà ni oxigen ni combustible. La mescla estequiomètrica en la combustió de gasolina és de 14,7kg d'aire per cada 1kg de gasolina. Si hi falta gasolina la mescla serà pobre, i si en sobra la mescla serà rica, en ambdós casos el motor no funcionarà correctament. Per això és tant important un bon sistema d'injecció de combustible, pel bon funcionament, rendiment i potència del motor.

Hi ha diversos mètodes per afegir el combustible a l'aire fent la mescla, com és la carburació, la injecció indirecta i la injecció directa. L'explicació es centrarà en la injecció indirecta ja que és la que utilitza el motor a estudiar. La carburació va ser el primer mètode que utilitzaven els motors, mitjançant a l'efecte venturi es redueix la pressió de l'aire reduint la secció d'un conducte, això fa que succioni el combustible per un petit orifici i es barregi la mescla. La carburació no necessita cap sistema electrònic però té un funcionament complicat d'ajustar i adaptar-se a totes les circumstàncies i càrregues del motor. La injecció directa és similar a la injecció indirecta, que s'explicarà a continuació, però aquesta es fa dins la cambra de combustió i a una pressió d'uns 50 bars (5.000Kpa).

La injecció indirecta és el sistema més utilitzat en els motors de combustió per encesa provocada (MEP). El combustible es barreja amb l'aire gràcies a uns injectors, i aquests estan accionats per la ECU. Els injectors són actuadors de tot o res, es a dir que no són progressius. Per poder aportar el combustible just a l'aire funcionen a base de pulsacions a molta freqüència per simular un flux constant. Aquesta freqüència té una magnitud de les centèsimes de segon. Variant aquesta freqüència o la duració de les pulsacions es varia el cabal de combustible.

La Figura 84 mostra la secció d'un injector de combustible amb les seves principals parts. El combustible entra per la part superior de l'injector a través de la rampa d'injectors. Aquesta rampa és l'encarregada d'aportar el combustible per igual a tots els injectors. Entra a una pressió que ve determinada pel propi fabricant de l'injector, depènent del model pot variar entre 2 i 5 bars relatius. La pressió es regula mitjançant una vàlvula reguladora de pressió normalment ubicada dins la rampa, i el cabal està impulsat per la bomba de combustible del propi dipòsit del vehicle. Quan el combustible entra dins l'injector, passa per un filtre que elimina qualsevol partícula que el pogués malmetre. El principi de funcionament de l'injector és una vàlvula magnètica que s'obre degut al camp magnètic creat per un solenoide. En posició de repòs quan l'injector no ha d'injectar, la vàlvula està en contacte amb el seient degut a una molla que l'empeny. Quan la ECU envia un corrent pel connector elèctric, el solenoide crea un camp magnètic suficient per fer moure la vàlvula magnètica deixant pas al combustible. Aquest surt a la mateixa pressió d'entrada però per un orifici molt petit, la punta de ruixat, dissenyat per ruixar el combustible a l'aire creant una mescla homogènia.

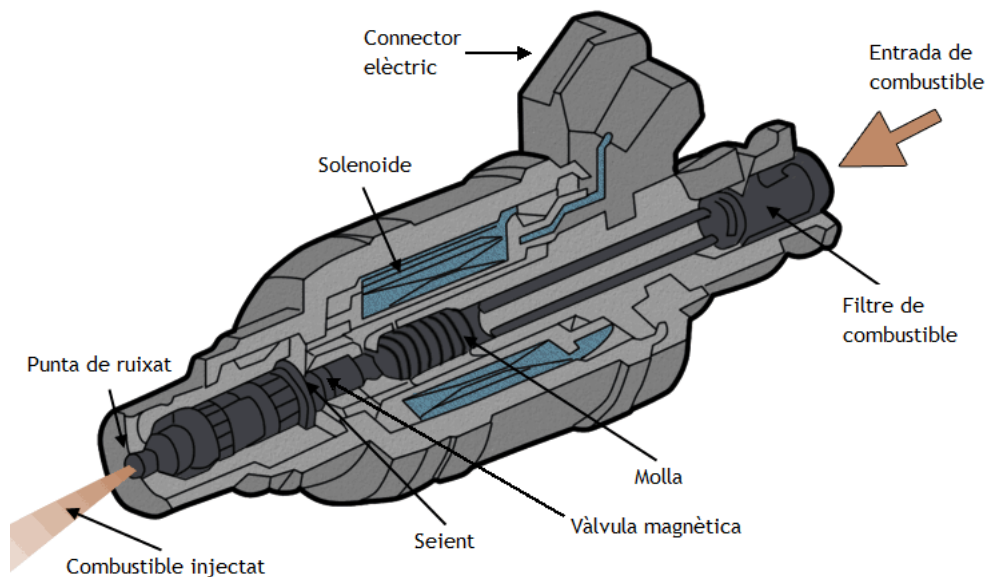


Figura 84: Parts de l'injector de combustible (Joaquín Vilanova. 2020)

L'injector injecta el combustible dins els conductes d'admissió dels cilindres i aprofita que en aquests la velocitat de l'aire és elevada per crear una mescla el més homogènia possible. La Figura 85 mostra com va col·locat un injector real, les parts contigües a ell i el flux de combustible.

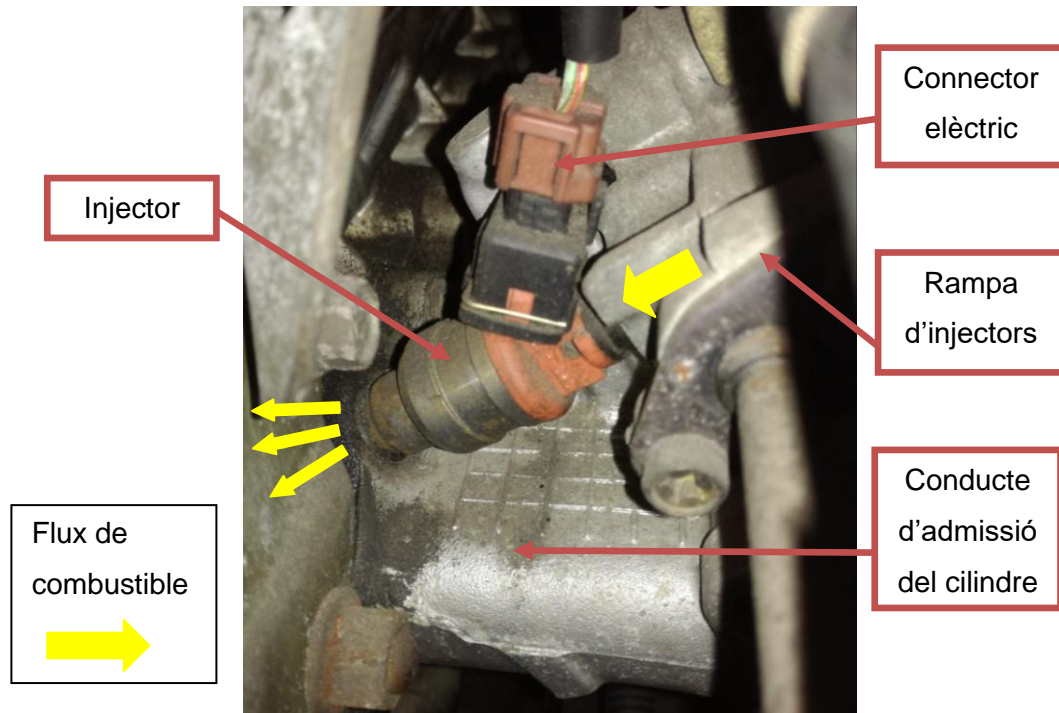


Figura 85: Injector muntat al motor

La ECU és l'encarregada de governar l'injecció de combustible i l'encesa de guspira. Utilitza sensors que mesuren diferents paràmetres del motor com és el cabal d'aire que entra i la temperatura d'aquest, la posició de la papallona, la depressió dins el col·lector, les revolucions del motor, la posició angular del cigonyal i dels arbres de lleves i la temperatura del motor. Amb aquestes dades mitjançant fórmules, mètodes matemàtics i algorismes, la ECU dona com a resultat uns temps d'injecció i uns temps d'avanç d'encesa de guspira. En els cotxes amb aspiració sobrealimentada, la ECU també regula la pressió de sobrealimentació. Apart d'això també té altres funcions de seguretat com tallar l'encesa i la injecció quan el motor sobrepasa una velocitat determinada, o detectar errors de funcionament del propi motor. La Figura 86 mostra la ECU del cotxe a estudiar. Està ubicada dins l'habitacle per evitar la alta temperatura del compartiment del motor.



Figura 86: ECU de Mitsubishi EVO VI

A.4.5 Sistemes d'admissió amb aspiració forçada

Els motors amb sobrealimentació són aquells que mitjançant una màquina tèrmica fan que l'aire d'entrada al motor no sigui aspirat per aquest sinó impulsat a una pressió superior a la atmosfèrica. Al fer entrar més massa d'aire degut a la pressió, els motors sobrealimentats augmenten el seu rendiment i potència significativament.

La màquina tèrmica que comprimeix i impulsa l'aire sempre es troba ubicada, seguint el mateix camí que un motor d'aspiració atmosfèrica, després de la caixa d'aire i abans de la vàlvula de papallona. El turbocompressor és la màquina tèrmica que utilitza el motor a estudiar, per tant serà el sistema que s'explicarà. La Figura 87 mostra un diagrama de blocs dels diferents elements que componen una admissió amb turbocompressor. Com a elements que s'afegeixen a una admissió d'aspiració atmosfèrica hi ha el compressor, l'intercooler i la vàlvula de descàrrega.

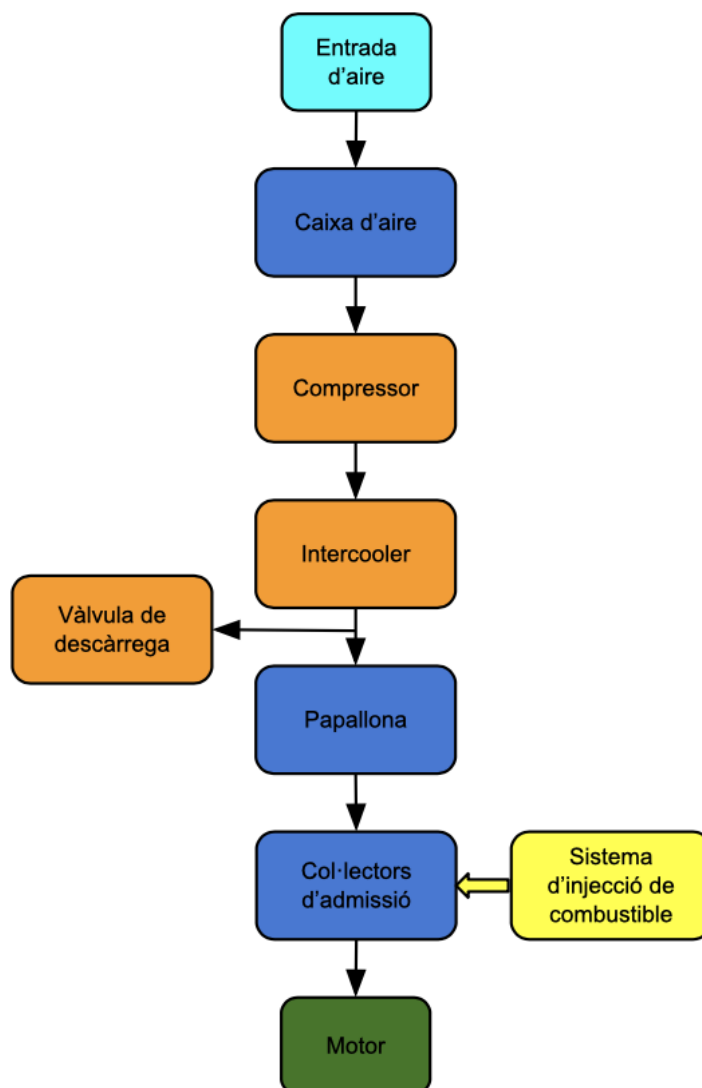


Figura 87: Diagrama de blocs d'admissió amb turbocompressor

El motor a estudiar, com la majoria de motors d'aspiració forçada, utilitza turbocompressor. El turbocompressor és una màquina tèrmica que mitjançant l'energia dels gasos d'escapament fa girar una turbina centrífuga solidària a un compressor de rodet. Aquest compressor de rodet és el que sobrealimenta l'admissió del motor. La Figura 88 mostra un esquema dels gasos i el funcionament d'un motor amb turbocompressor. Com es pot veure a l'esquema, l'admissió i l'escapament del motor estan units pel turbocompressor, i això fa que admissió i escapament treballin conjuntament.

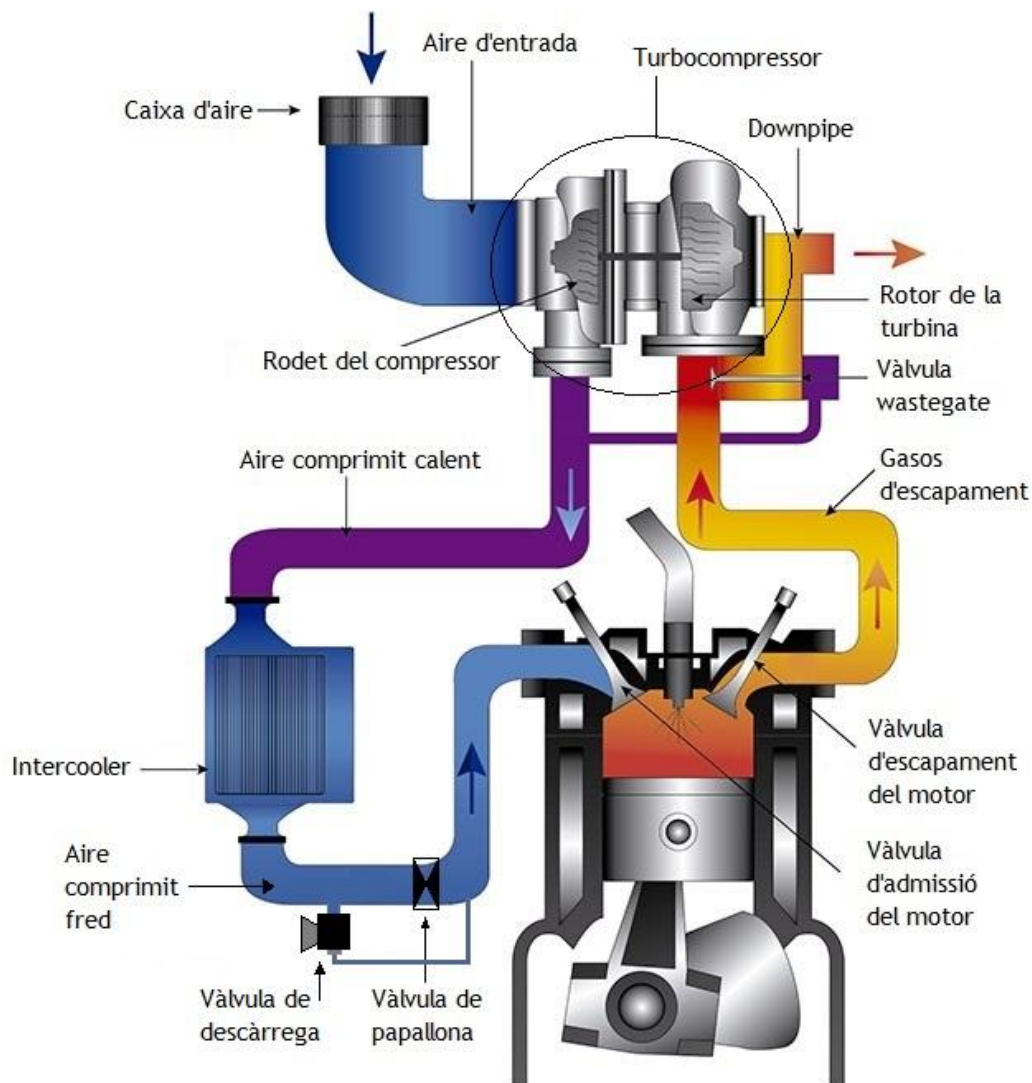


Figura 88: Esquema de gasos i funcionament d'un motor amb turbocompressor (Turbomekanics. 2019)

A.4.5.1 Intercooler

Degut a que dins el compressor l'aire es comprimeix adiabàticament, l'aire surt d'aquest a una temperatura d'entre 90° i 120°. Pel mateix motiu explicat a l'apartat d'entrada d'aire i filtre, aquesta alta temperatura faria perdre molt de rendiment al motor ja que l'aire perd densitat i la massa d'oxigen disminueix. Per no perdre aquest rendiment, en el sistema d'admissió després del compressor s'hi troba l'intercooler. L'intercooler és un intercanviador de calor que refrigera l'aire un cop està comprimit. L'intercooler utilitza aire o aigua per fer aquest intercanvi de calor. Aquesta refrigeració depèn de la temperatura i cabal de l'aire o aigua amb que fa aquest intercanvi de calor. Normalment a la sortida de l'intercooler l'aire de l'admissió està a uns 60°. La reducció

de temperatura fa que el motor tingui un augment de potència d'un 10-15% respecte un motor sobrealimentat sense intercooler. La Figura 89 és un intercooler d'alt rendiment aire-aire, es a dir que refrigera l'aire d'admissió mitjançant un flux d'aire.



Figura 89: Intercooler aire-aire (Ostar motorsports. 2019)

A.4.5.2 Vàlvula de descàrrega

La vàlvula de descàrrega és un sistema de seguretat utilitzada en els motors amb turbocompressor. Aquesta vàlvula serveix per deixar escapar la pressió del tram d'admissió ubicant entre el compressor i la papallona. La vàlvula obre quan en règim de plena càrrega l'accelerador es deixa de prémer de cop i es tanca la papallona. Quan es dona aquest cas l'energia cinètica de l'aire en moviment i la inèrcia de rotació del turbocompressor crea un excés de pressió que pot malmetre el propi compressor o altres elements d'aquest tram d'admissió com l'intercooler o la papallona. Està ubicada el més a prop de la papallona possible perquè quan descarregui els gasos del tram d'admissió, aquests segueixin el mateix sentit de flux que en el funcionament normal del motor, afavorint l'alliberació de pressió.

Aquesta és una vàlvula normalment tancada per l'acció d'una molla. Per obrir-se utilitza la depressió del col·lector d'admissió mitjançant un pulmó. La depressió al col·lector es genera quan la papallona està tancada o en posició de ralenti, i mitjançant un tub connectat a aquest la vàlvula de descàrrega, s'obre quan la papallona es tanca.

A la Figura 90 es pot veure una vàlvula de descàrrega i les seves principals parts.



Figura 90: Vàlvula de descàrrega (forgemotorsport. 2020)

A.5 Turbocompressor

El turbocompressor és una màquina tèrmica que mitjançant l'energia dels gasos d'escapament fa girar una turbina centrífuga solidària a un compressor de rodets. Aquest compressor de rodets és el que sobrealimenta l'admissió del motor. La sobrealimentació es basa en que l'aire que entra al motor està a una pressió superior a l'atmosfèrica. Segons l'Equació 5, si s'augmenta la pressió d'un gas també augmenta la densitat d'aquest. Segons la relació anterior, gràcies a la sobrealimentació l'aire entra amb més densitat cosa que comporta un augment de cabal màssic d'aire. Aquest augment de cabal màssic d'aire comporta injectar més combustible per fer la mescla, i com a final i més important, un parell motor superior en la combustió d'aquest.

Equació 5: Llei dels gasos ideals (Thomas Engel, Philip J. Reid. 2007)

$$\rho = \frac{P}{T \cdot R}$$

On:

- ρ Densitat [kg m^{-3}]
- P Pressió [Pa]
- T Temperatura [K]
- R Constant [$\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$] (En aire sec $R=287$)

La Figura 91 mostra un turbocompressor. Les seves principals parts són la turbina que forma part del sistema d'escapament, el compressor que forma part del sistema d'admissió i el cos del turbocompressor ubicat entre aquestes dues parts. També hi ha la wastegate, una vàlvula que regula el pas de gasos d'escapament per la turbina.

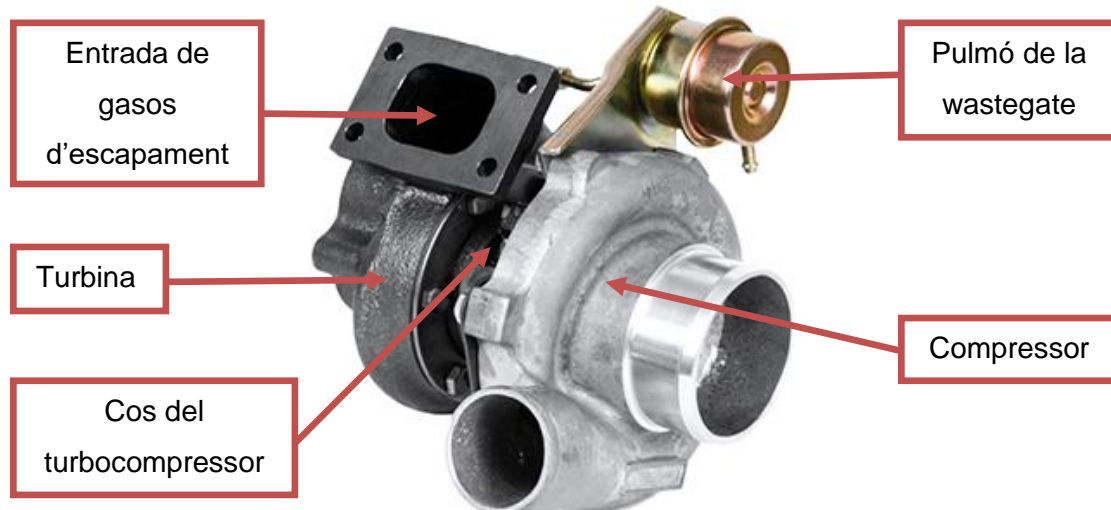


Figura 91: Turbocompressor (Garrettmotion. 2020)

A la Figura 92 es mostra la secció d'un turbocompressor. A la part del compressor, el punt 1 és l'entrada d'aire a pressió atmosfèrica dins el compressor, i el punt 2 la sortida d'aquest aire ja comprimit. A la part de la turbina, el punt 3 senyala la seva part exterior on està ubicada l'entrada de gasos d'escapament provinents del motor (a la Figura 91 es pot veure indicada aquesta entrada), i el punt 4 que senyala la sortida de gasos d'escapament de la turbina. El punt 5 ubicat en el cos del turbocompressor mostra l'entrada d'oli que engrassa els dos coixinets de fricció de l'eix solidari entre el compressor i la turbina. La lubricació d'oli d'aquests coixinets és crucial, sense aquesta lubricació seria impossible el funcionament del turbocompressor.

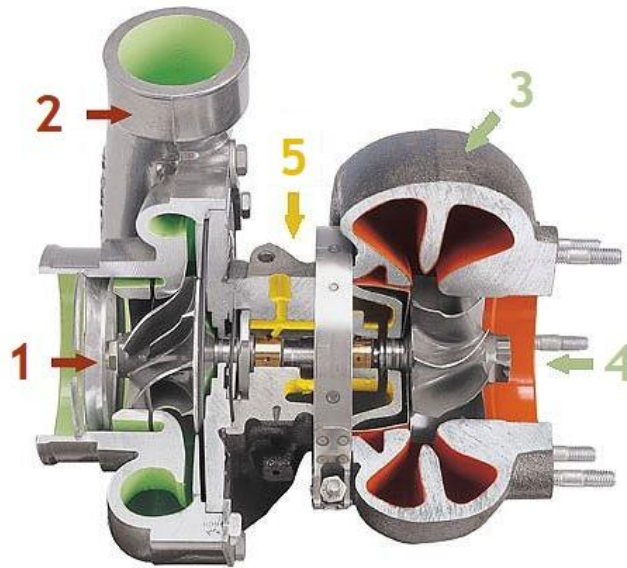


Figura 92: Secció d'un turbocompressor (Turbomekanics. 2019)

La Figura 93 mostra l'eix del turbocompressor esmentat anteriorment. Gràcies a aquest eix, el rodet del compressor i el rotor de la turbina són solidaris i poden rotar sobre dos coixinets de fricció d'oli. Aquest eix pot tenir una velocitat de rotació de entre 50.000 i 200.000 rpm. La velocitat d'aquest eix és constant quan el parell que genera la turbina d'escapament és igual al parell entregat al compressor d'admissió.



Figura 93: Eix d'un turbocompressor (BJAB. 2020)

A.5.1 Turbina

La turbina és la part que acciona el turbocompressor i ho fa utilitzant l'energia dels gasos d'escapament del motor. Els gasos d'escapament entren radialment al rotor de la turbina conduïts per la voluta. Aquests gasos cedeixen gran part de la seva energia mecànica i tèrmica al rotor de la turbina i després surten axialment també conduïts per la voluta. A la Figura 94 es pot veure una voluta d'escapament on està senyalada l'entrada i la sortida de gasos d'aquesta. També s'hi indica la ranura circular per la qual els gasos d'escapament entren dins el rotor de la turbina. Quan els gasos entren dins

el rotor xoquen amb les pales d'aquest i com a conseqüència el fan girar. La Figura 95 és un esquema de com l'aire circula per dins la voluta i va entrant dins el rotor per la ranura circular.

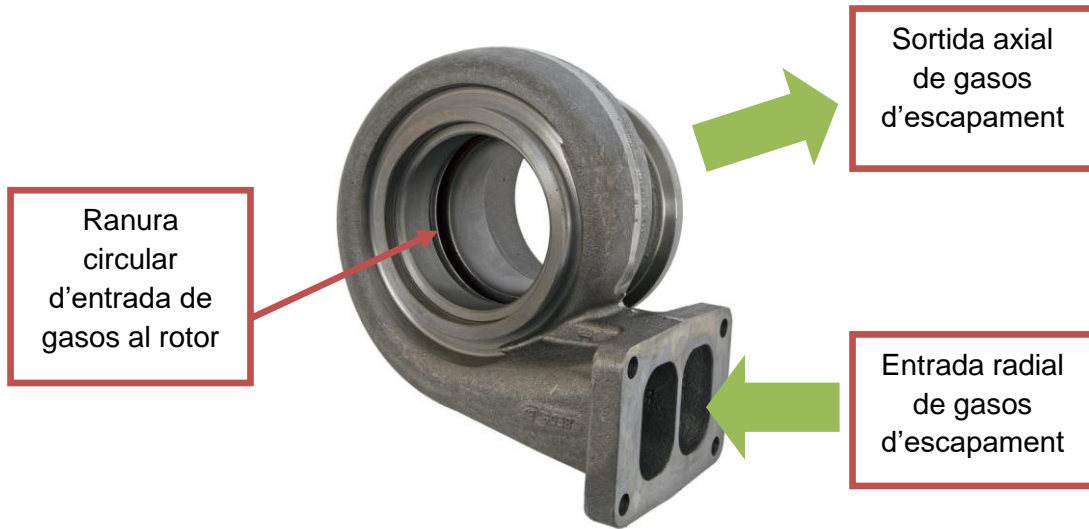


Figura 94: Voluta d'escapament (Summitracing. 2020)

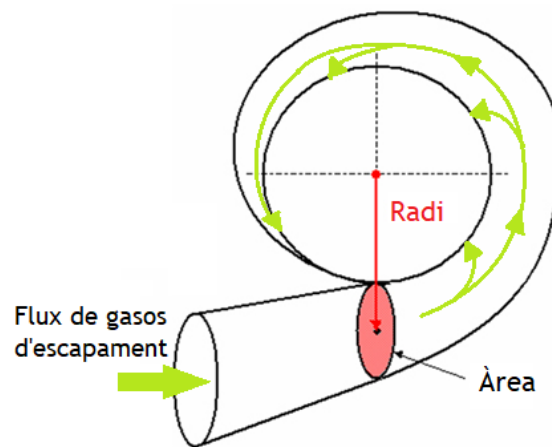


Figura 95: Esquema de funcionament de la voluta d'escapament (Enginebasics. 2010)

El paràmetre que defineix la geometria d'una voluta d'escapament de turbocompressor és la relació A/R (Equació 6). Aquest paràmetre relaciona l'àrea de la secció de pas de flux dins la voluta i el radi entre el centre d'aquesta àrea i l'eix de gir del rotor (Figura 95). Cada voluta pot tenir una relació A/R diferent, però aquesta relació A/R és igual en totes les seccions d'una mateixa voluta. La relació A/R és la que defineix l'àmbit de cabal de gasos d'escapament amb que pot treballar una voluta d'escapament.

Equació 6: Relació A/R (Garrettmotion. 2020)

$$\text{Relació } \frac{A}{R} (\text{mm}) = \frac{\text{Àrea } (\text{mm}^2)}{\text{Radi } (\text{mm})}$$

Per definir la turbina del turbocompressor s'utilitza un gràfica com la de la Figura 96. Aquesta es una gràfica de cabal màssic de gasos d'escapament en funció del rati de pressió de la turbina. Aquest rati de pressió és la pressió absoluta d'entrada a la turbina dividit entre la pressió absoluta de sortida. Cada corba d'aquest gràfic fa referència a una voluta d'escapament diferent que pot utilitzar aquest turbocompressor. Aquestes volutes tenen diferents relacions A/R, per això cada corba té uns àmbits de cabal diferents. Es pot observar que com més alta és la relació A/R, més alt és el cabal amb que treballa aquella voluta.

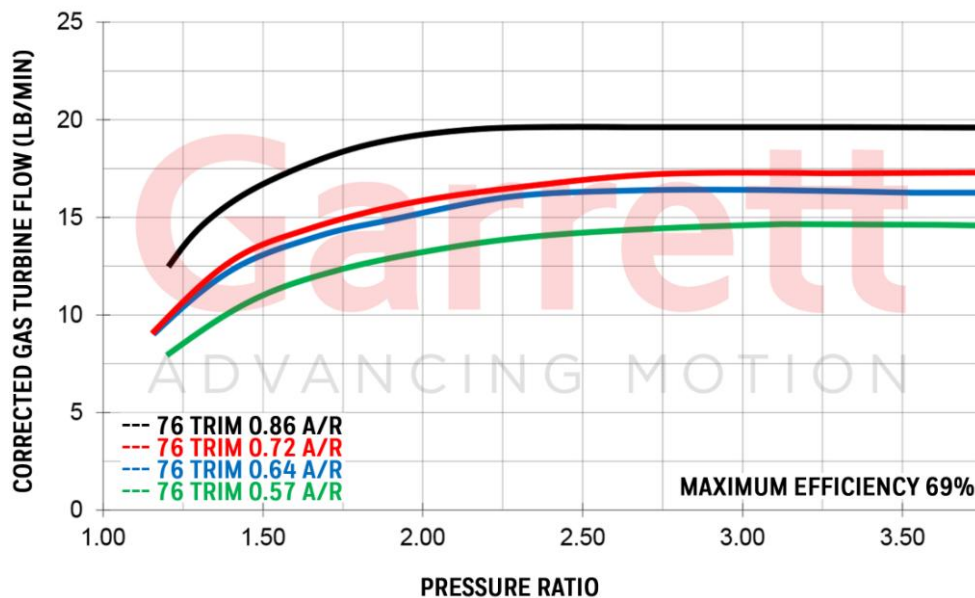


Figura 96: Gràfic de flux d'escapament d'un turbocompressor (Garrettmotion. 2020)

És molt important escollir bé la relació A/R de la voluta de la turbina. Aquesta elecció és crucial pel bon funcionament del turbocompressor i també del motor. Si s'escull una voluta amb una A/R massa grossa, la turbina no tindrà suficient cabal per entrar en règim de funcionament i com a conseqüència aquell turbocompressor no complirà la seva funció que és comprimir l'aire d'admissió. En el cas contrari, si s'escull una voluta amb una A/R massa petita, el cabal màxim que pot entrar a la turbina és inferior al que li arriba del motor. Degut a que hi ha més cabal d'escapament del que la pròpia turbina pot ingerir, la pressió a l'entrada de la turbina augmenta considerablement, i juntament

amb aquesta també augmenta la pressió de l'escapament del motor i dels col·lectors d'escapament. Aquest augment de pressió s'anomena contrapressió i és un fenomen que s'ha d'evitar. Com a conseqüència de la contrapressió, tant la turbina com el motor es sobreescalfen i l'augment de pressió fa que li costi més esforç al motor evacuar els gasos d'escapament. Per culpa de la contrapressió es perd rendiment i potència al motor. Degut a l'excés de temperatura i pressió provocat per la contrapressió es malmet el motor, els col·lectors d'escapament i el turbocompressor. La contrapressió depèn principalment de la relació A/R de la turbina, però també depèn dels col·lectors d'escapament i de la pressió a la sortida de la turbina.

A.5.2 Compressor

El compressor d'un turbocompressor és la part que comprimeix l'aire d'admissió mitjançant un compressor de rodets. A la inversa que la turbina, en el compressor l'aire entra axialment amb l'eix del rodets (Figura 97). Aquest aire un cop comprimit surt del compressor radialment. El compressor de rodets augmenta la pressió de l'aire a base de transferir-li energia cinètica amb el rodets. Aquesta energia cinètica transferida es transforma en un increment de pressió quan l'aire xoca contra les parets de la voluta. Mitjançant la geometria interna de la voluta, tot aquest aire impulsat pel rodets segueix una trajectòria radial a l'eix de rotació del rodets fins sortir fora del compressor.

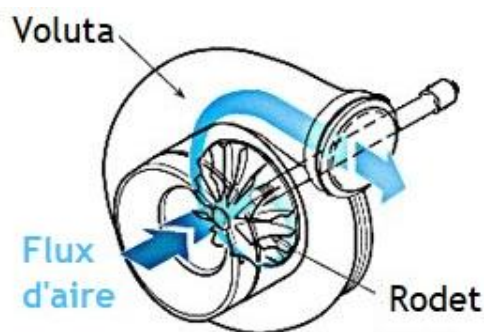


Figura 97: Esquema de funcionament del compressor (Carmen Pilar Acera. 2018)

Per definir el compressor d'un turbocompressor s'utilitza una gràfica com la de la Figura 98. Consisteix amb una sèrie de línies de constant velocitat que defineixen un cabal màssic d'aire, un rati de pressió i una eficiència. El cabal màssic d'aire està definit a l'eix horitzontal de la gràfica. El rati de pressió, que és la pressió absoluta de la sortida del compressor dividit entre la pressió absoluta d'entrada, està definit a l'eix

vertical. L'eficiència està marcada per àrees. A l'àrea central l'eficiència és major i a mesura que es va allunyant, l'eficiència va disminuint.

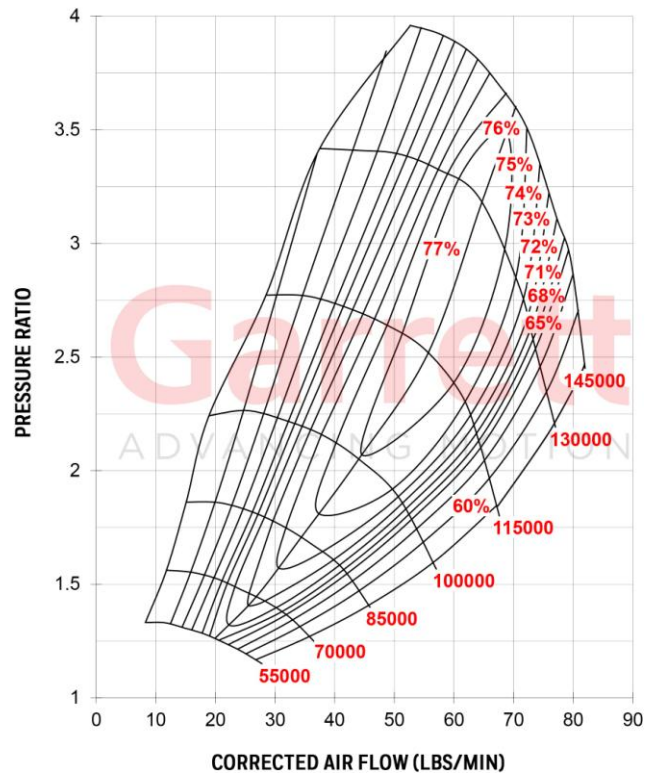


Figura 98: Mapa d'un compressor de turbocompressor (Garrettmotion. 2020)

ANNEX B

SIMULACIÓ

ANNEX B. SIMULACIÓ

Per poder fer un bon disseny del sistema d'escapament del vehicle, s'ha de simular el motor d'aquest vehicle amb un programa adient per aquesta tasca. Aquest programa és el *Lotus Engine Simulation*.

B.1 Lotus Engine Simulation

El *Lotus Engine Simulation* és un programa que permet simular motors de combustió interna alternatius. L'objectiu d'aquest programa és simular aquests motors de la manera més fidel i semblant a la realitat. El *Lotus engine simulation* es pot conceptualitzar com a tres mòduls discrets. El mòdul de dades, on s'entren les dades i es genera el model. El mòdul resolutiu o "solver", on es solucionen les equacions que representen els processos físics. Per últim el mòdul de resultats, on s'analitzen els resultats prèviament calculats. El mòdul de dades i el mòdul de resultats només es divideixen nocionalment i en realitat són una sola unitat que juntament amb el mòdul "solver", que és essencialment una unitat externa, formen una sola aplicació conjunta.

Tota la informació sobre el programa està extreta de l'apartat d'ajuda a la simulació del mateix *Lotus engine simulation*. Aquest apartat d'ajuda està desglossat en temes i és de gran servei a l'usuari per entendre com funciona el programa, evitar errors de simulació del motor i estalviar temps.

B.1.1 Mòdul de dades

El mòdul de dades està basat en una interfície de construcció. La interfície de construcció permet a l'usuari construir i veure el seu model de motor mitjançant un mètode gràfic. Es poden afegir components a la pantalla i unir-los de forma gràfica permetent a l'usuari construir una representació visual del model. Es pot afegir, seleccionar i manipular cada component i es poden introduir totes les dades dels components mitjançant aquesta interfície.

A la Figura 99 es veu aquesta interfície de construcció. A la part superior hi ha els diferents menús i opcions del programa els quals permeten guardar el document i canviar d'arxiu, entre d'altres. A l'esquerra pots triar els diferents elements disponibles per muntar el motor i estan ordenats per categories com per exemple elements de l'admissió, elements de l'escapament, màquines tèrmiques, etc. Al centre hi ha l'espai

per muntar aquest motor i posar els elements com convingui. Aquests elements que col·loques, al seleccionar-los pots canviar les seves mesures o característiques a la part dreta de la interfície.

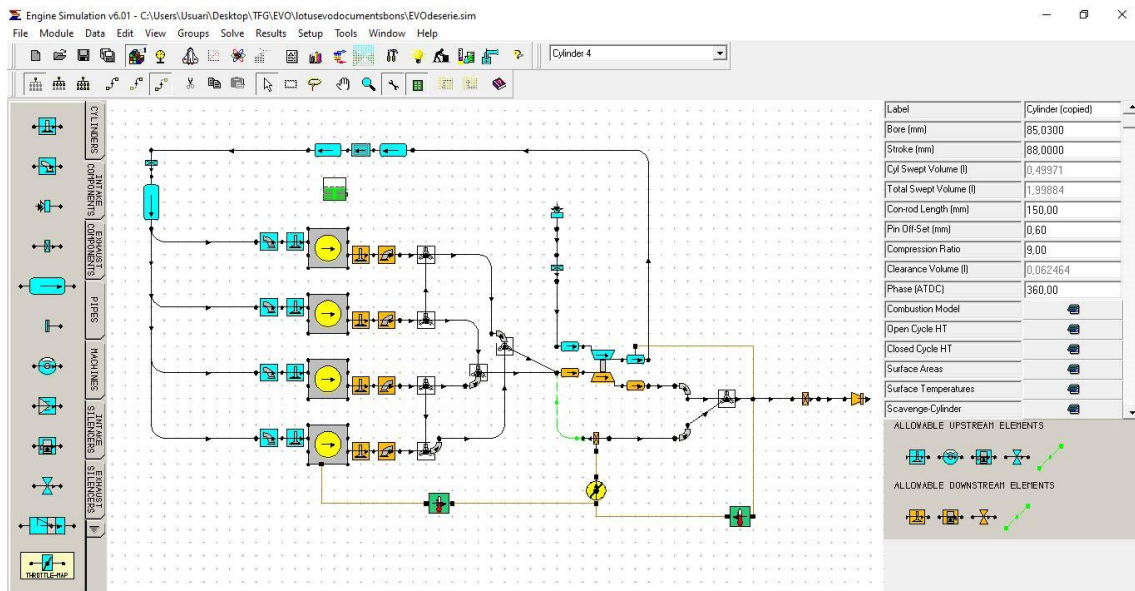


Figura 99: Interfície de construcció del Lotus engine simulation

B.1.2 Mòdul resolutiu

El motor es modelitza mitjançant un conjunt d'equacions diferencials que caracteritzen els processos físics i químics que s'hi produeixen. El "solver" proporciona un mecanisme algorítmic per resoldre aquestes equacions de govern, que es proporcionen essencialment amb condicions de limitació i limitacions pel model construït pel conjunt de dades d'entrada.

La funció principal del programa és predir els fluxos entre els elements del model i resoldre les equacions d'energia, moment i continuïtat segons convingui dins de cada element per obtenir les variables d'estat termodinàmic i la velocitat de flux a cada angle de posició del cigonyal al llarg del cicle del motor. El procediment de resolució es desenvolupa durant un període de temps en el qual l'usuari pot veure el procediment i l'evolució dels càlculs. Es simulen diversos cicles del motor per obtenir una solució convergent que sigui cíclicament repetible. La convergència es comprova automàticament si hi ha un flux de massa cap a dins i fora de cada cilindre, plènum i conducte. Quan la diferència en el promig de flux de massa per cicles sobre cicles

successius per a tots els elements cau per sota dels límits de convergència definits, es considera que la simulació ha convergit i no es fa cap càlcul més.

El programa calcula automàticament les condicions inicials de pressió, temperatura i massa per a cada element. D'aquesta manera es garanteix que els resultats de qualsevol simulació no es basin en les estimacions inicials realitzades per l'usuari i que s'obtidran resultats consistents per a un conjunt de dades determinat.

Per simular un motor, els processos es desglossen de manera que es puguin formular diversos sub-models discrets. Aquests diversos sub-models son: propietats termodinàmiques, combustible i sistema de combustible, combustió, calor transferida, models de mescla de combustible, vàlvules, dinàmica de gasos inestables, turbocompressors i fricció.

La Figura 100 és la interfície on l'usuari veu el procediment de resolució cicle per cicle del programa. Es pot seleccionar veure els diferents càlculs que s'estan calculant a la vegada com poden ser les diferents velocitats d'un mateix motor simulat. Les diferents barres vermelles mostren valors del motor just en el cicle en que s'estan calculat. Aquests diferents valors que apareixen es poden seleccionar anteriorment a la interfície de construcció, però els més importants per l'usuari solen ser la potència, el parell, l'eficiència volumètrica dels cilindres i la convergència màxima la qual s'ha d'anar reduint a mesura que passen els cicles fins ser menor que el valor màxim requerit perquè la simulació acabi.



Figura 100: Interfície de resolució del Lotus engine simulation

B.1.3 Mòdul de resultats

El *Lotus engine simulation* està estructurat de manera que es poden especificar fins a 50 condicions de càrrega i velocitat del motor en estat constant, o 20 cicles de prova transitoria amb qualsevol model de simulació. Al final de cada cicle de simulació els resultats mitjans per al flux d'aire, l'eficiència volumètrica, el flux de combustible, la potència de fre i indicada, el consum de combustible i la transferència de calor s'imprimeixen en un fitxer de resultats. Aquest fitxer de resultats amb extensió .mrs es pot visualitzar en el propi programa com a text o com a gràfics de les diferents dades obtingudes.

Per a proves en estat estacionari, es poden emmagatzemar detalls de les condicions dels elements i els fluxos en cada angle de cigonyal en un fitxer de traç binari amb extensió .prs per a un posterior processament en el propi programa. Aquests resultats inclouen pressions, temperatures, volums i fraccions de massa de combustible cremades i es poden visualitzar de diverses maneres mitjançant el visualitzador de resultats.

Degut a que el model resolutiu es desenvolupa cicle per cicle fins a arribar a la convergència, l'estat dels components del model durant la resolució d'un test estacionari o transitori es pot escriure en un fitxer binari o ASCII. Aquest fitxer és el

que utilitza la interfície gràfica durant la resolució, però també es pot consultar un cop s'ha acabat la simulació.

A la Figura 101 es veu el visualitzador dinàmic de resultats. En aquest visualitzador es processen els fitxers amb extensió .prs. L'usuari pot veure l'estat de tots els elements que componen el motor i els fluxos de gasos en aquests. El visualitzador dinàmic és una eina molt útil per l'usuari perquè gràcies a aquest pot veure com treballa realment el motor simulat donant grans possibilitats de modificació per millorar el rendiment i posteriors estudis del motor entre d'altres.

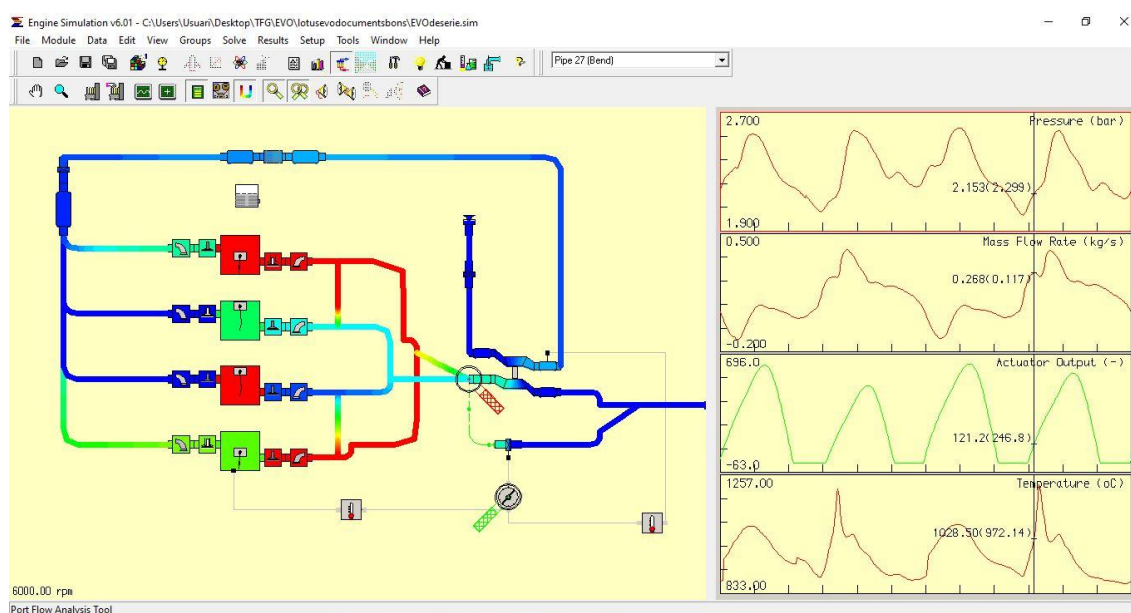


Figura 101: Visualitzador dinàmic de resultats del Lotus engine simulation

B.1.4 Extres del Lotus engine simulation

Dins el *Lotus engine simulation* també es pot accedir a una sèrie d'eines que es poden utilitzar per crear valors precisos per utilitzar-los en models de simulació. Aquestes eines són essencialment programes autònoms també desenvolupats per Lotus que han estat adaptats per a ser utilitzats en el mateix entorn de simulació del *Lotus engine simulation*. Aquestes eines extres són:

Assistent de comprovació de dades: Proporciona una eina que permet a l'usuari comprovar la validesa i la qualitat de les dades entrades dins el mòdul de dades. L'assistent de comprovació de dades és una eina de gran ajuda a l'usuari per estalviar

temps i problemes en el cas d'entrar malament les dades del motor o resoldre dubtes de quins elements falten per posar o s'han de canviar.

Eina conceptual: Aquesta eina permet a l'usuari estudiar de forma limitada els paràmetres que afecten el rendiment d'una determinada configuració del motor. Es pot utilitzar per generar un model de simulació de motor ràpidament mitjançant dades d'entrada mínimes.

Eina d'estimació de fricció: Aquesta eina proporciona un mètode per estimar el nivell de fricció creat per una configuració específica de motor a diverses velocitats del motor. També serveix per comparar aquesta fricció amb una base de dades de motors existents.

Eina d'anàlisi de combustió: Analitza la corba de pressió del cilindre per tal de calcular els índexs d'alliberament de calor. També permet al *Lotus engine simulation* crear ràpidament dades de combustió definides pel l'usuari que es poden carregar directament en un model de simulació del motor.

Eina d'anàlisi de flux de conductes de culata: S'utilitza per post processar els resultats de bancs de flux de conductes de culata mesurats de forma independent per obtenir el coeficient de flux d'aquests conductes. Els resultats proporcionats per aquesta eina es poden introduir directament en el *Lotus engine simulation*.

Eina de càlcul del tren de vàlvules: És una eina d'anàlisi destinada a ajudar en el disseny inicial i la disposició d'un perfil d'arbre de lleves, des de la disposició de la corba d'elevació polinòmica segmentada fins a l'anàlisi estàtic del tren de vàlvules i el disseny de molles de vàlvula. També hi ha plantilles específiques omplertes amb dissenys de dades predeterminades que permeten a l'usuari produir ràpidament un sistema bàsic de tren d'arbre de lleves.

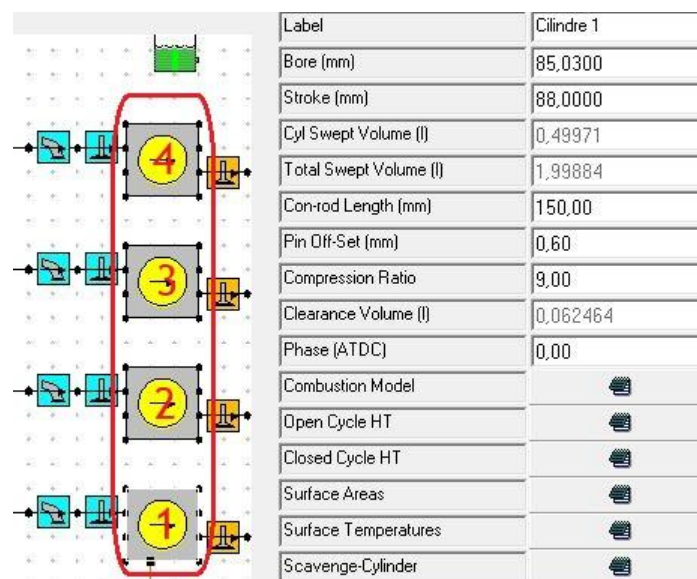
B.2 Introducció de dades del motor

B.2.1 Dades del cilindre

Les dades del cilindre o del bloc motor han estat obtingudes de la fitxa tècnica del vehicle i de la fitxa d'homologació de ral·li de la FIA Historic Database. Les dades entrades al programa són:

- Diàmetre del cilindre: 85mm
- Carrera del pistó: 88mm
- Distància entre centres de la biela: 150mm
- Ratí de compressió del cilindre: 9:1
- Número de cilindres: 4
- Desfasament dels cicles dels diferents cilindres en graus de cigonyal. El cilindre 1 és la referència, i segueix l'ordre: 1,3,4,2.
 - o Cilindre 1: 0°
 - o Cilindre 2: 540°
 - o Cilindre 3: 180°
 - o Cilindre 4: 360°

La Figura 102 mostra en la interfície de construcció del *Lotus* aquestes dades entrades en el cilindre 1. Els altres cilindres són iguals però amb el seu respectiu desfasament de cicle.



Label	Cilindre 1
Bore (mm)	85,0300
Stroke (mm)	88,0000
Cyl Swept Volume (l)	0,49971
Total Swept Volume (l)	1,99884
Con-rod Length (mm)	150,00
Pin Off-Set (mm)	0,60
Compression Ratio	9,00
Clearance Volume (l)	0,062464
Phase (ATDC)	0,00
Combustion Model	
Open Cycle HT	
Closed Cycle HT	
Surface Areas	
Surface Temperatures	
Scavenge-Cylinder	

Figura 102: Dades del cilindre en el Lotus

Degut a la complexitat de modelar i obtenir dades del model de cambra de combustió d'un motor, el programa *Lotus* té un model de cambra de combustió predeterminat de combustió ideal. S'utilitzarà aquest model de combustió predeterminat però tenint en compte que és ideal i no real. Es suposa que el motor modelat al ser ideal donarà un rendiment més elevat que el motor real. Degut a això, en la fase de validació del model de sèrie s'haurà d'ajustar un valor d'eficiència de combustió perquè el model de cambra de combustió predeterminat del programa s'assembli el màxim possible al motor real. Aquest valor d'eficiència de combustió és un coeficient que va entre 0 i 1 i encara que es pot modificar, al simular un model de cambra de combustió ideal, aquest valor és per defecte 1.

B.2.2 Dades de les lleves

Gràcies a la fitxa d'homologació de ral·li de la FIA Historic Database, s'han pogut aconseguir els valors que determinen els límits de la geometria dels arbres de lleves. Aquests valors són els següents:

- Vàlvules d'admissió:
 - o Màxima obertura: 10mm
 - o Duració d'obertura: 260° de rotació de cigonyal
 - o Punt de màxima obertura: 107° després del punt mort superior del pistó
- Vàlvules d'escapament:
 - o Màxima obertura: 9'5mm
 - o Duració d'obertura: 256° de rotació de cigonyal
 - o Punt de màxima obertura: 113° abans del punt mort superior del pistó

Els perfils de les lleves al ser simètrics, amb el punt de màxima obertura i la duració d'obertura es poden calcular fàcilment els punts d'obertura i tancament de les lleves.

En el programa *Lotus* es pot entrar el perfil d'un arbre de lleves punt per punt de la corba per aconseguir el perfil exacte de la lleva. En el cas de no poder mesurar el perfil de la lleva, amb les mateixes dades que s'han pogut obtenir de les lleves del motor a estudiar (màxima obertura, duració d'obertura i punt de màxima obertura), el propi programa et genera el perfil de la lleva. Aquest perfil de lleva generat pel programa té una diferència menyspreable amb el perfil de la lleva real ja que ha estat elaborat amb les mateixes fórmules i mètodes que els perfils de lleves reals. Es pot elegir entre un perfil de lleva agressiu i un perfil moderat. Els motors de carreres porten perfils agressius per augmentar la potència i els motors dels vehicles de carrer porten perfils

moderats per augmentar la vida del motor i el confort de conducció. Es suposarà que el motor a estudiar al ser un motor de carrer, té un perfil moderat.

La Figura 103 mostra les dades d'una lleva d'admissió entrades en el programa. Les dades de les lleves d'escapament s'entren de la mateixa forma.

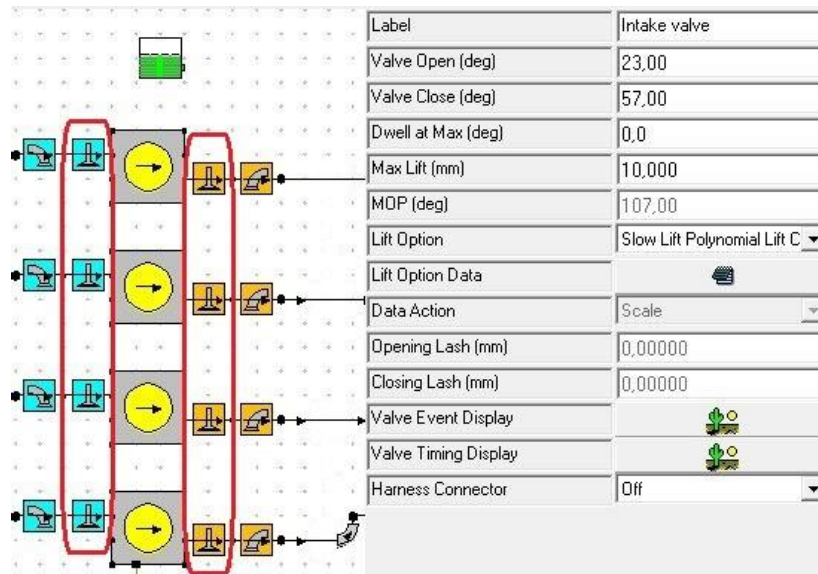


Figura 103: Dades de les lleves en el Lotus

Un cop s'han entrat els perfils d'arbres de lleves dins el programa, es pot visualitzar un diagrama que mostra gràficament els temps d'obertura de les lleves (en graus de rotació del cigonyal) durant una revolució de cigonyal. En blau mostra la lleva d'admissió i en taronja la lleva d'escapament. Les sigles mostren els diferents punts que defineixen les lleves, alguns dels quals s'han entrat per l'usuari en el programa.

- MOP (Maximum opening point) És el punt d'obertura màxima de la lleva.
- IVO (Intake valve open) El punt on obre la vàlvula d'admissió
- IVC (Intake valve close) El punt on tanca la vàlvula d'admissió
- EVO (Exhaust valve open) El punt on obre la vàlvula d'escapament
- EVC (Exhaust valve close) El punt on tanca la vàlvula d'escapament.

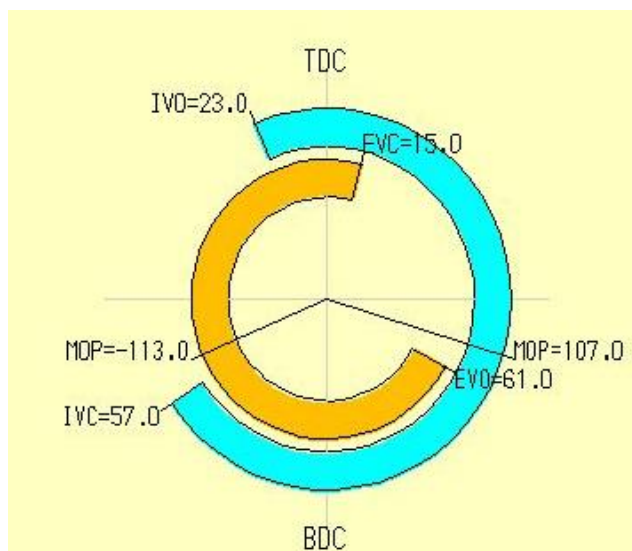


Figura 104: Diagrama de posta a temps de les lleves

B.2.3 Dades de les vàlvules i conductes de la culata

Les dades de les vàlvules i el flux dels conductes de la culata han estat obtinguts durant l'estància en l'entorn laboral a la UDG. Aquestes pràctiques es basaven en la simulació i experimentació de motors tèrmics, i es van assajar diverses culates de motors en un banc de flux per tal de mesurar i treballar amb les dades obtingudes. Les dades obtingudes van ser entre d'altres, els fluxos dels conductes d'aquestes culates. L'explicació de l'obtenció i transformació d'aquestes dades està a l'apartat B.4 Obtenció de dades de flux de la culata en aquest mateix Annex.

Un cop aquestes dades han estat mesurades pel banc de flux i transformades pel programa *Port flow analysis tool*, un programa adjunt amb el *Lotus engine simulation*, estan llestes per ser entrades en la interfície de construcció.

La Figura 105 mostra les dades d'un conducte d'escapament de la culata del motor. Els conductes d'admissió són iguals però amb les seves respectives dades. Les dades són:

- Numero de vàlvules d'admissió: 2
- Numero de vàlvules d'escapament: 2
- Diàmetre de pas de flux a la vàlvula d'admissió: 30mm (cada vàlvula)
- Diàmetre de pas de flux a la vàlvula d'escapament: 26'5mm (cada vàlvula)

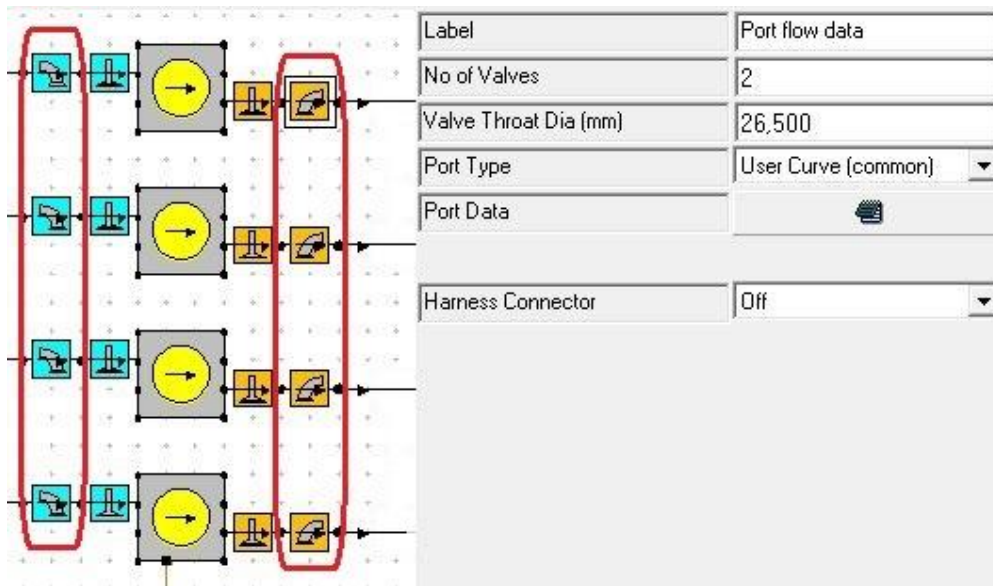


Figura 105: Dades dels conductes de culata en el Lotus

A l'apartat "port data" de la interfície de la Figura 105 és on s'entren les dades de flux dels conductes de la culata (Figura 106). Aquestes dades són les obtingudes amb el banc de flux i modificades amb el *Port flow analysis tool*. Mostra el coeficient de flux en funció del rati L/D. El rati L/D és l'obertura de la vàlvula en mil·límetres dividit entre el diàmetre de secció de pas de flux també en mil·límetres.

El coeficient de flux d'un dispositiu és una mesura relativa de la seva eficiència a l'hora de permetre el flux de fluids. Descriu la relació entre la caiguda de pressió a través d'una vàlvula d'orifici o un altre conjunt i el cabal corresponent. (Font: Jerry Herman. 2020).

La Figura 106 mostra aquestes dades de flux dins l'apartat de "port data". Mostren les dades de flux d'un conducte d'escapament. Les dades dels conductes d'admissió s'entren de la mateixa forma però són uns valors diferents. Les dades de flux tant d'admissió com d'escapament estan a l'apartat B.3 Resum de Dades del motor dins aquest mateix Annex.

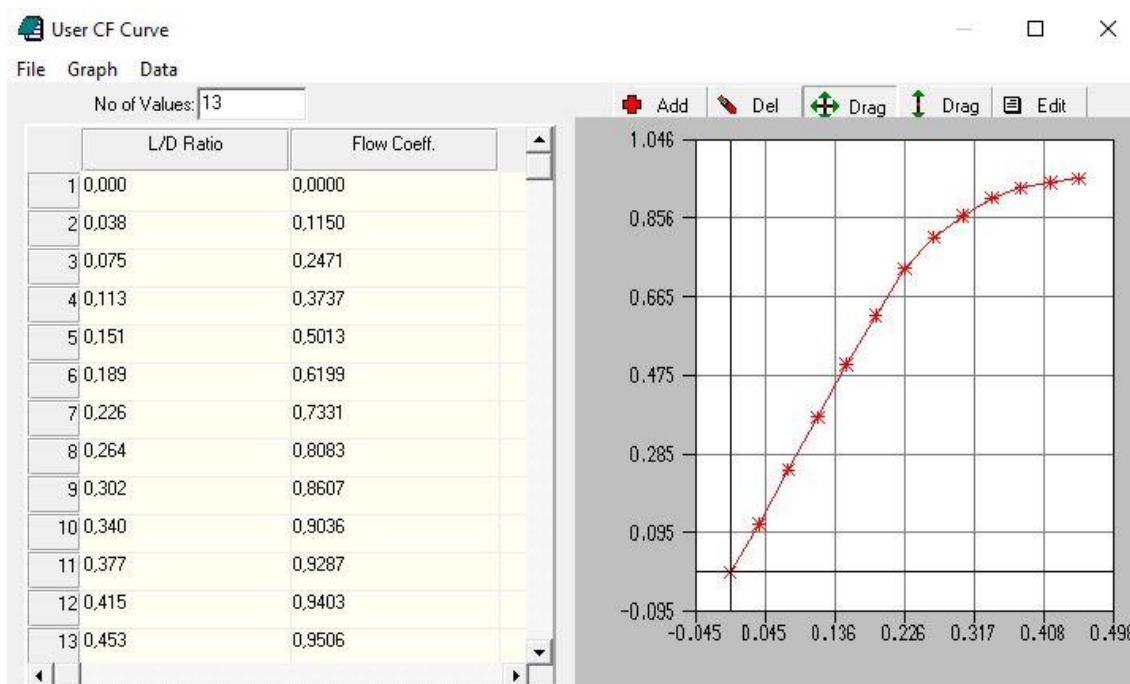


Figura 106: Dades de flux de culata en el Lotus

B.2.4 Dades del turbocompressor

Les dades del turbocompressor es poden dividir entre mesures dimensionals, mapa de funcionament del compressor i mapa de funcionament de la turbina. Les mesures dimensionals s'han obtingut mesurant el propi turbocompressor del vehicle. La Figura 107 mostra les dades entrades del turbocompressor en el Lotus. Aquestes dades són:

- Diàmetre de l'entrada d'aire del compressor: 48mm
- Diàmetre de la sortida d'aire del compressor: 43mm
- Diàmetre de l'entrada de gasos de la turbina: 60mm (2x42mm)
- Diàmetre de la sortida de gasos de la turbina: 62mm
- Relació de transmissió entre la turbina i el compressor: 1

El valor del diàmetre de l'entrada de gasos de la turbina és degut a que hi ha dos entrades per separat amb un diàmetre equivalent de 42mm cadascuna. Les dos conjuntament tenen un diàmetre equivalent de 60mm. Les turbines d'escapament que funcionen amb aquest sistema es diuen "Twin scroll". Aquesta entrada de gasos a la turbina està representada i explicada a l'apartat 4.1.1 Dades dels col·lectors d'escapament.

La inèrcia rotacional del rodets del compressor i el rotor de la turbina es deixarà com el valor per defecte del programa degut a que les simulacions portades a terme són en

règim estacionari. Degut al règim estacionari no hi ha acceleracions en el sistema per tant les masses i les inèrcies són dades amb un valor menyspreable pel càlcul.

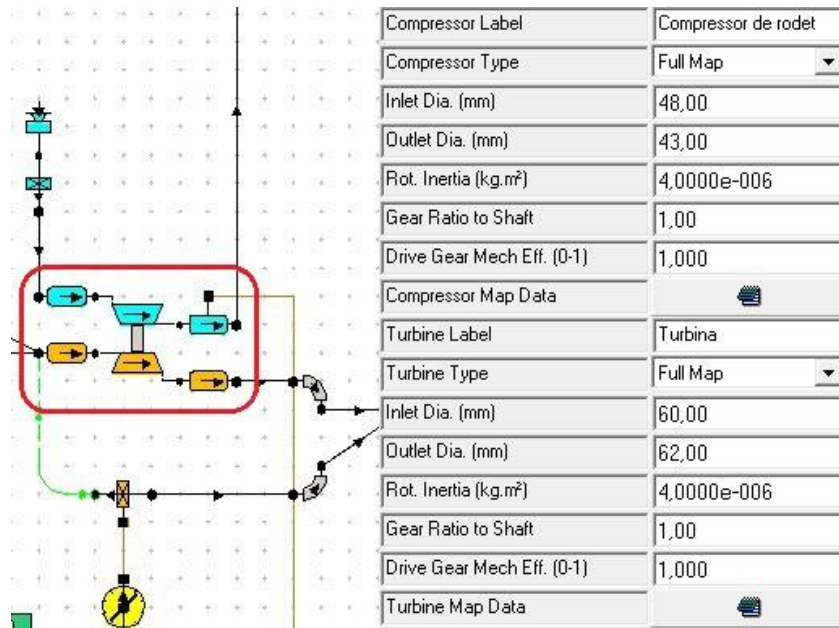


Figura 107: Dades del turbocompressor en el Lotus

Dins els apartats “Compressor Map Data” i “Turbine Map Data” és on s’entren els mapes de treball que defineixen el compressor i la turbina.

La Figura 108 mostra la interfície de “Compressor Map Data”. Aquesta interfície és on s’entra el mapa de funcionament del compressor. Aquest mapa de funcionament segueix el mateix estil que l’explicat a l’apartat A.5.2 Compressor, dins l’annex A – Teoria. Consisteix amb una sèrie de línies de velocitat constant que defineixen un cabal màssic d’aire, un rati de pressió i una eficiència. Per entrar aquestes dades en el *Lotus*, s’han d’entrar diferents punts de cada línia d’igual velocitat, on per cada punt s’ha de definir el cabal màssic, el rati de pressió i l’eficiència. Aquesta interfície consta de factors d’escala per cada magnitud (velocitat, cabal màssic, rati de pressió i eficiència) per tal de poder modificar fàcilment el mapa de funcionament sense haver de canviar punt per punt.

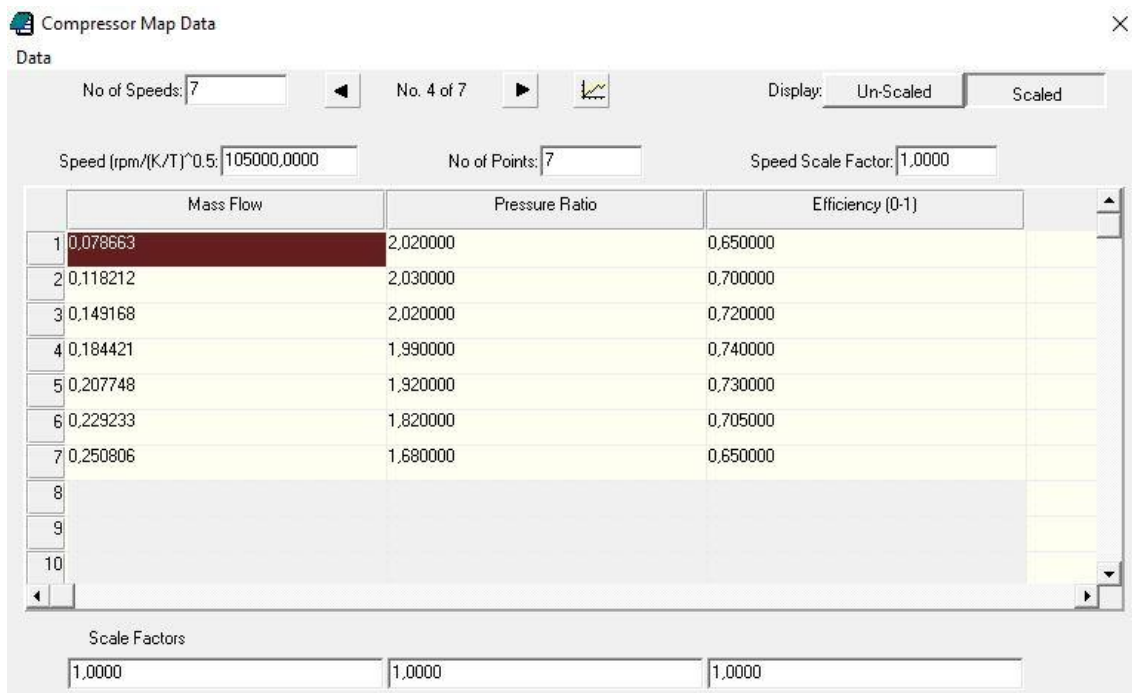


Figura 108: Dades del Compressor en el Lotus

En la mateixa interfície “Compressor Map Data” es pot visualitzar aquest mapa de treball (Figura 109). Les dades del compressor s’han obtingut via Internet buscant la referència del turbocompressor. Les dades obtingudes d’Internet estan a l’apartat B.3 Resum de Dades del motor dins aquest mateix Annex.

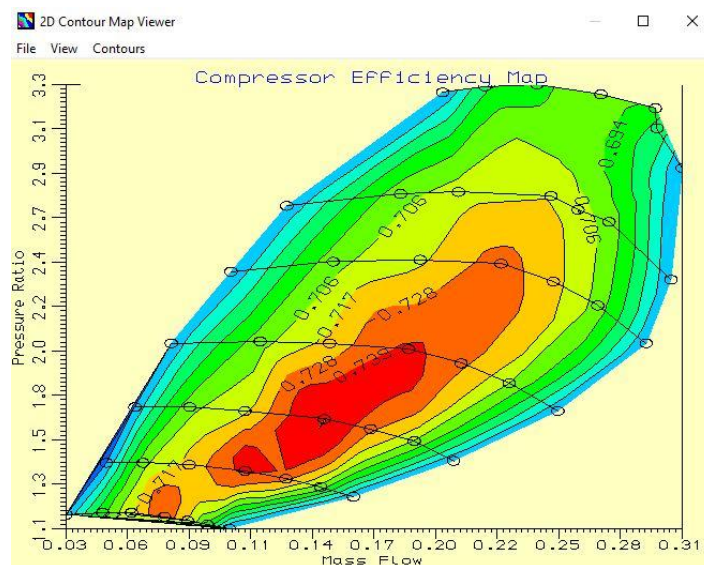


Figura 109: Mapa del compressor en el Lotus

Les dades de la turbina s'entren de la mateixa manera que les del compressor. La Figura 110 mostra la interfície de "Turbine Map Data" on s'han entrat les dades de la turbina. Aquestes dades de la turbina s'han extret de la mateixa manera que les del compressor i es poden visualitzar a l'apartat B.3 Resum de Dades del motor dins aquest mateix Annex. La interfície de la turbina també permet representar la corba de treball d'aquesta (Figura 111). A diferència de la corba explicada a l'apartat A.5.1 Turbina dins aquest mateix Annex, aquesta té els eixos girats, es a dir que el cabal de gasos està representat a l'eix horitzontal i el rati de pressió a l'eix vertical.

Turbine Map Data

Data

No of Speeds: 6 No. 1 of 6

Speed (rpm/K^{0.5}): 1625,0000 No of Points: 7 Speed Scale Factor: 1,0000

	Mass Flow	Pressure Ratio	Efficiency (0-1)
1	0,016064	1,099170	0,677800
2	0,016490	1,113660	0,674000
3	0,017128	1,129950	0,679900
4	0,017553	1,147500	0,681900
5	0,018063	1,167210	0,679400
6	0,019267	1,194030	0,672900
7	0,020400	1,212930	0,667600
8			
9			
10			

Scale Factors: 1,0000 1,0000 1,0000

Figura 110: Dades de la turbina en el Lotus

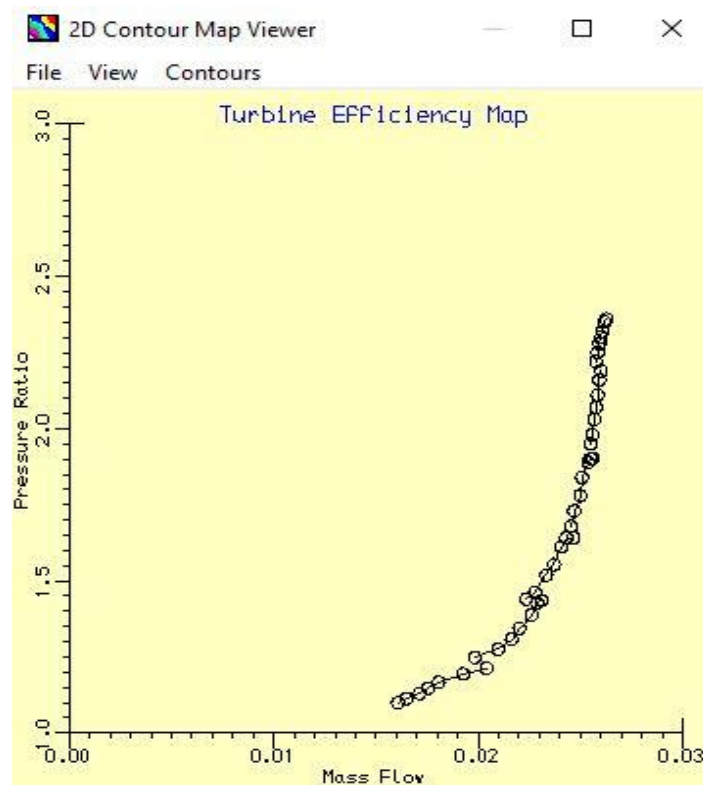


Figura 111: Mapa de la turbina en el Lotus

B.2.5 Dades de la wastegate i pressió de sobrealimentació

La pressió de sobrealimentació es regula mitjançant la vàlvula wastegate (veure apartat 3.2.3 Wastegate, dins el marc teòric). En el programa *Lotus* la wastegate es simula com una simple vàlvula que varia la seva àrea de pas. La complexitat està en l'accionador d'aquesta vàlvula, el qual s'ha de simular mitjançant una interfície de blocs de càlcul.

La vàlvula wastegate del motor a estudiar consta de dos orificis circulars de diàmetre 21'8mm cadascun. Quan la vàlvula està completament oberta hi ha una àrea de pas de flux de 750mm². A la Figura 112 es veu la interfície de la vàlvula wastegate on s'ha entrat la dada d'obertura màxima de 750mm². A la interfície de construcció de la mateixa figura, esta indicada aquesta vàlvula i també l'accionador que controla l'obertura. Els dos requadres verds són el sensor de pressió de sobrealimentació i el sensor de velocitat de gir del cigonyal, els quals són necessaris pel càlcul d'obertura de la wastegate.

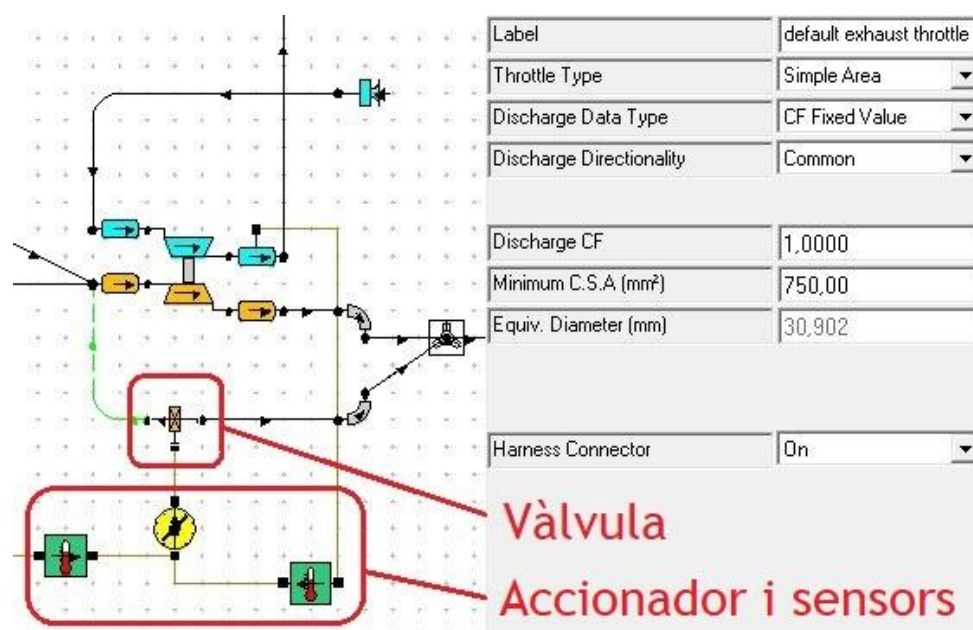


Figura 112: Dades de la wastegate en el Lotus

La Figura 113 mostra la interfície de càlcul de dins l'accionador de la wastegate. Igual que la interfície de construcció, aquesta també es modela per blocs. Aquests blocs es poden diferenciar entre entrades, sortida i elements de control. Hi ha tantes entrades com sensors es connectin a aquest accionador. En aquest cas les dues entrades provenen del sensor de pressió de sobrealimentació (IN1) i el sensor de velocitat angular del cigonyal (IN2). Els elements de control serveixen per transformar com convingui les dades d'entrada per tal de donar el valor de sortida desitjat. Per últim, la sortida (OUT) és el valor el qual adoptarà l'element controlat per aquest accionador, en aquest cas és l'àrea d'obertura de la vàlvula wastegate.

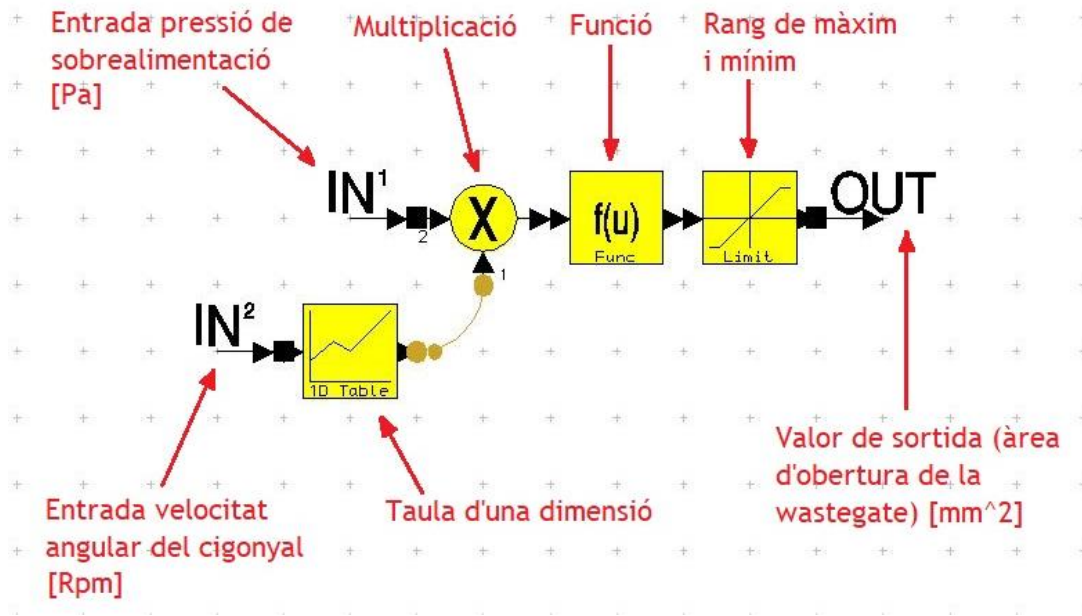


Figura 113: Interfície de l'accionador de la vàlvula wastegate en el Lotus

En la disposició d'elements de la Figura 113 s'han de diferenciar dos grups d'elements amb un propòsit diferent. El primer grup és l'encarregat de simular l'accionador mecànic de la wastegate i està compost pels elements següents: Entrada de pressió de sobrealimentació, Funció, Rang de màxim i mínim, i valor de sortida (àrea d'obertura de la wastegate). El segon grup és l'encarregat de simular el treball que fa la ECU per poder variar la pressió de sobrealimentació com convingui i està composta pels següents elements: Entrada de velocitat angular del cigonyal, Taula d'una dimensió i Multiplicació.

B.2.5.1 Dades de l'accionador mecànic de la vàlvula wastegate

Per simular l'accionador mecànic de la vàlvula wastegate s'utilitza l'element de control "Funció", el qual mitjançant una funció simula el comportament de la molla i el pulmó d'aquest. Aquesta funció (Equació 7) s'ha obtingut del manual d'usuari del propi programa *Lotus*. La variable d'entrada és F1, la qual arriba al bloc "Funció" per la seva connexió de l'esquerra.

Equació 7: Funció de l'accionador de la wastegate (Lotus engine simulation. 2001)

$$S[\text{mm}^2] = \left(\frac{F1[\text{Pa}] * A[\text{m}^2] - F[\text{N}]}{K[\text{Nm}^{-1}]} \right) * S_{\text{max}}[\text{mm}^2] * \frac{1}{L}[\text{m}^{-1}]$$

On:

- S Àrea instantània d'obertura de la wastegate [mm^2]
- F1 Pressió de sobrealimentació instantània [Pa]
- A Àrea del pulmó de l'accionador [m^2]
- F Força de pretensió de la molla [N]
- K Constant elàstica de la molla [Nm^{-1}]
- S_{max} Àrea d'obertura màxima de la wastegate [mm^2]
- L Recorregut de l'accionador [m]

El propòsit d'aquesta funció (Equació 7), igual que el funcionament en el motor real de l'accionador mecànic de la wastegate, és fer obrir de forma progressiva la vàlvula quan la pressió de sobrealimentació sobrepassa un valor determinat. Segons l'Equació 8, la força de pretensió de la molla (F) es calcula segons la pressió de sobrealimentació amb què la vàlvula wastegate comença a obrir (P).

Equació 8: Elecció de la pretensió de la molla (Lotus engine simulation. 2001)

$$F[\text{N}] = P[\text{Pa}] * A[\text{m}^2]$$

Per determinar la constant elàstica K de la molla, apart dels valors anteriors també es necessita la pressió dins el pulmó amb la qual la vàlvula wastegate està completament oberta. L'Equació 9 mostra la fórmula per determinar aquesta constant elàstica, on P_{max} és la pressió quan la vàlvula wastegate està completament oberta.

Equació 9: Equació per determinar la constant elàstica de la molla (Lotus engine simulation. 2001)

$$K[\text{Nm}^{-1}] = \frac{(P_{\text{max}}[\text{Pa}] - P[\text{Pa}]) * A[\text{m}^2]}{L[\text{m}]}$$

Les dades obtingudes mesurant la vàlvula wastegate del motor són:

- Secció de pas de flux màxim de la wastegate: 750mm² (Dos orificis circulars de 21'8mm de diàmetre)
- Àrea del pulmó de l'accionador mecànic: 0'002124m² (Pulmó circular de 52mm de diàmetre)
- Pressió d'inici d'obertura de la wastegate: 2'18 bar absoluts (218.000Pa)
- Pressió de màxima obertura de la wastegate: 2'30 bar absoluts (230.000Pa)
- Recorregut de l'accionador de la wastegate: 0'01m (10mm)

Amb aquestes dades i utilitzant l'Equació 8 i l'Equació 9, s'han obtingut les següents:

- F (pretensió de la molla): 463N
- K (Constant elàstica de la molla): 2.550 Nm⁻¹

Un cop s'han obtingut totes les dades de l'Equació 7, aquesta queda com la següent:

$$S[mm^2] = \left(\frac{F1[Pa] * 0'002124[m^2] - 463[N]}{2550[Nm^{-1}]} \right) * 750[mm^2] * \frac{1}{0'01} [m^{-1}]$$

A la Figura 114 es pot veure la interfície de l'element de control "Funció" on hi ha entrada l'Equació 7 amb els valors mesurats i calculats anteriorment.

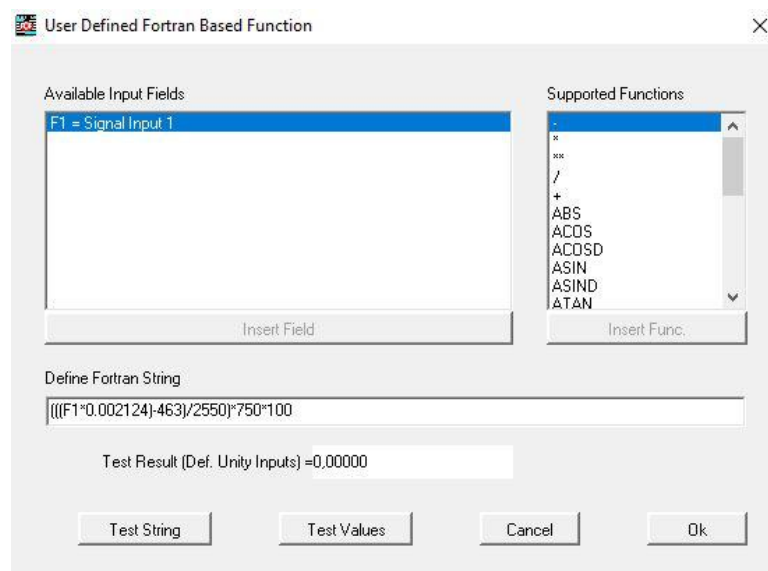


Figura 114: Interfície de l'element Funció amb les dades de l'accionador

A la Figura 113 just després de l'element de control "Funció" hi ha l'element de "Rang" el qual delimita uns límits de mínim i màxim pels quals el valor d'entrada no pot sobrepassar. Els valors entrats són els límits d'obertura de la vàlvula wastegate. Com a valor mínim és la vàlvula tancada: 0mm^2 , i com a valor màxim és la vàlvula completament oberta: 750mm^2 .

B.2.5.2 Dades de la ECU en la pressió de sobrealimentació

La pressió de sobrealimentació també varia en funció de la velocitat de gir del cigonyal. En els cotxes de carrer, a partir d'una velocitat de cigonyal la pressió de sobrealimentació disminueix per evitar malmetre els elements del motor. Aquesta disminució de pressió de sobrealimentació s'aconsegueix mitjançant una electrovàlvula governada per la ECU que fa variar la pressió que arriba al pulmó de la wastegate. Fent variar la pressió que arriba al pulmó, la ECU pot escollir la pressió de sobrealimentació desitjada.

Dins la interfície de construcció de l'accionador de la wastegate, els blocs encarregats per simular el funcionament de la ECU i l'electrovàlvula són la "Taula d'una dimensió" i la "Multiplicació".

La Figura 115 mostra la interfície del bloc "Taula d'una dimensió", on es representa una corba que relaciona el valor d'entrada X amb el valor de sortida Y. El valor d'entrada X és la velocitat de gir de cigonyal provinent de l'entrada IN2, i el valor de sortida Y és un factor que modificarà la pressió d'entrada a la part mecànica de la vàlvula wastegate mitjançant el bloc "Multiplicació".

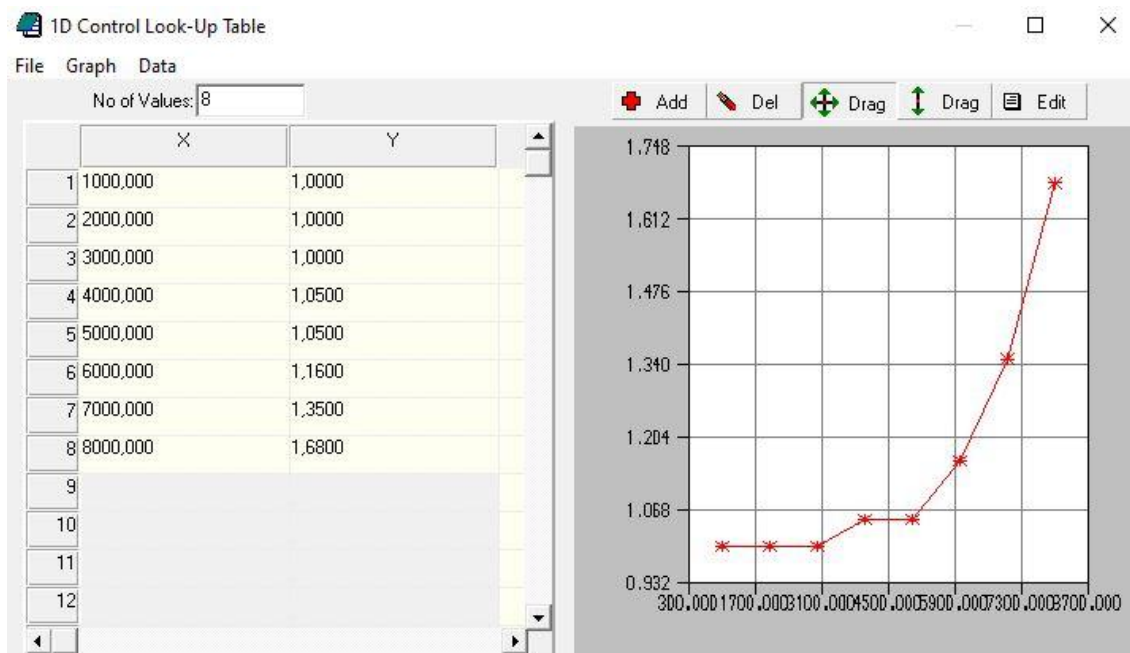


Figura 115: Dades de modificació de la pressió de sobrealimentació de la ECU

Aquests valors multiplicadors s'han obtingut mitjançant la corba de pressió de sobrealimentació de la ECU del vehicle i es poden consultar a l'apartat B.3 Resum de Dades del motor en aquest mateix Annex. Els valors multiplicadors s'han obtingut dividint la pressió d'inici d'obertura de la wastegate (2'18bar) entre la pressió de sobrealimentació a cada velocitat de gir del cigonyal.

B.2.6 Dades de l'admissió

Els diferents elements del sistema d'admissió han estat entrats en la interfície de construcció del programa tal i com es veu a la Figura 116. Apart de l'intercooler i el filtre d'aire, tots els elements de l'admissió han estat mesurats del propi motor del vehicle. Totes les dades mostrades es troben agrupades a l'apartat B.3 Resum de Dades del motor en aquest mateix Annex.

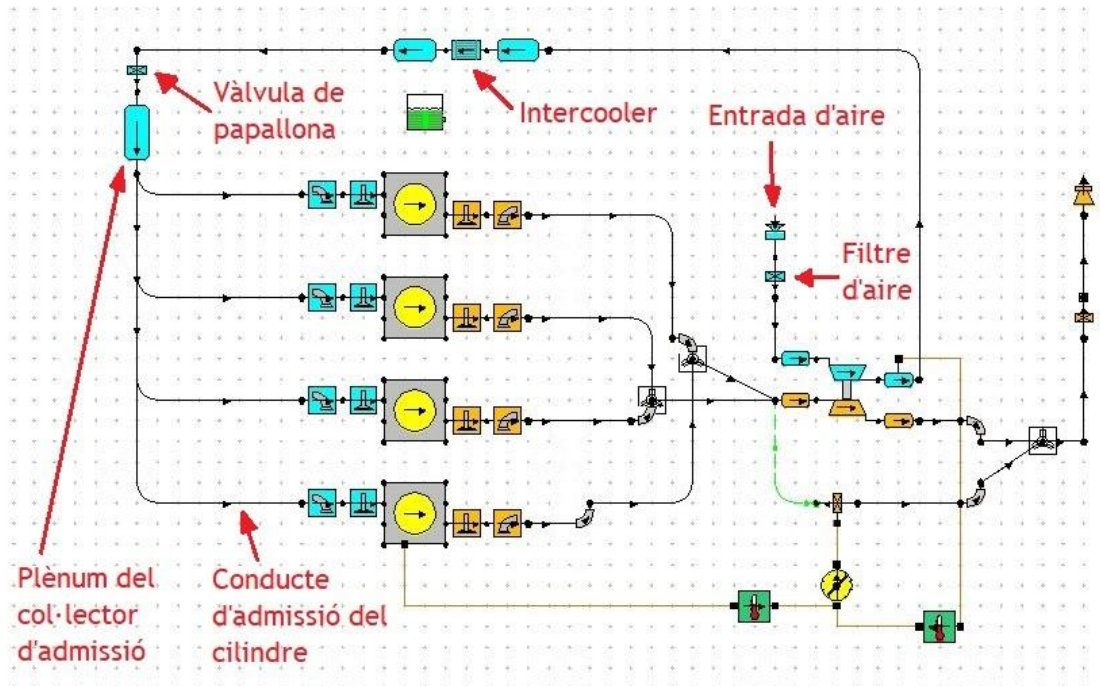


Figura 116: Elements d'admissió a la interfície de construcció del Lotus

Seguint el flux d'aire de l'admissió, primer de tot hi ha l'entrada d'aire. A l'entrada d'aire s'ha d'especificar la pressió d'entrada d'aire la qual és 1 bar absolut (pressió atmosfèrica) i la temperatura d'aquest és de 20°. Justament després hi ha el filtre d'aire el qual s'han deixat els valors predeterminats de filtre d'aire de cotxe del programa *Lotus*.

Després d'aquest hi ha el compressor el qual s'ha explicat a l'apartat A.5.2 Compressor. Seguidament hi ha l'intercooler. La interfície de l'intercooler és la de la Figura 117. Els valors de pèrdua de càrrega de l'intercooler han sigut mesurats en un banc de flux, la temperatura de l'aire que el refrigera són 20° iguals que l'aire d'aspiració del motor i els valors d'eficiència d'intercanvi de calor són els predeterminats del programa *Lotus*.

	Mass Flow (kg/s)	Pressure Loss (bar)	Coolant Temperature(C)	Effectiveness (0-1)
1	0,000000	0,000000	20,000000	0,600000
2	0,050000	0,010000	20,000000	0,650000
3	0,100000	0,020000	20,000000	0,700000
4	0,150000	0,030000	20,000000	0,750000
5	0,200000	0,040000	20,000000	0,750000
6	0,250000	0,050000	20,000000	0,750000
7	0,300000	0,080000	20,000000	0,750000
8	0,350000	0,120000	20,000000	0,750000

Figura 117: Dades de l'intercooler en el Lotus

La vàlvula de papallona té un diàmetre de pas de 60mm. Com que totes les proves i simulacions es fan a plena càrrega del motor, la vàlvula de papallona representa que està sempre completament oberta. A efectes pràctics de la simulació, aquesta vàlvula només representa una secció de 60mm de diàmetre pel qual passa l'aire d'admissió.

La Figura 118 mostra la interfície per entrar els plènum. En aquest cas és el plènum del col·lector d'admissió el qual té una forma aproximada d'un cilindre de 100mm de diàmetre per 200mm de llarg. Fent càlculs de geometria bàsica, surt un volum d'aproximadament 1'6 litres i una àrea de 95.000mm². La temperatura de la paret d'aquest plènum ha estat mesurada amb una pistola de calor quan el motor estava funcionant a plena càrrega i és d'aproximadament 30°.

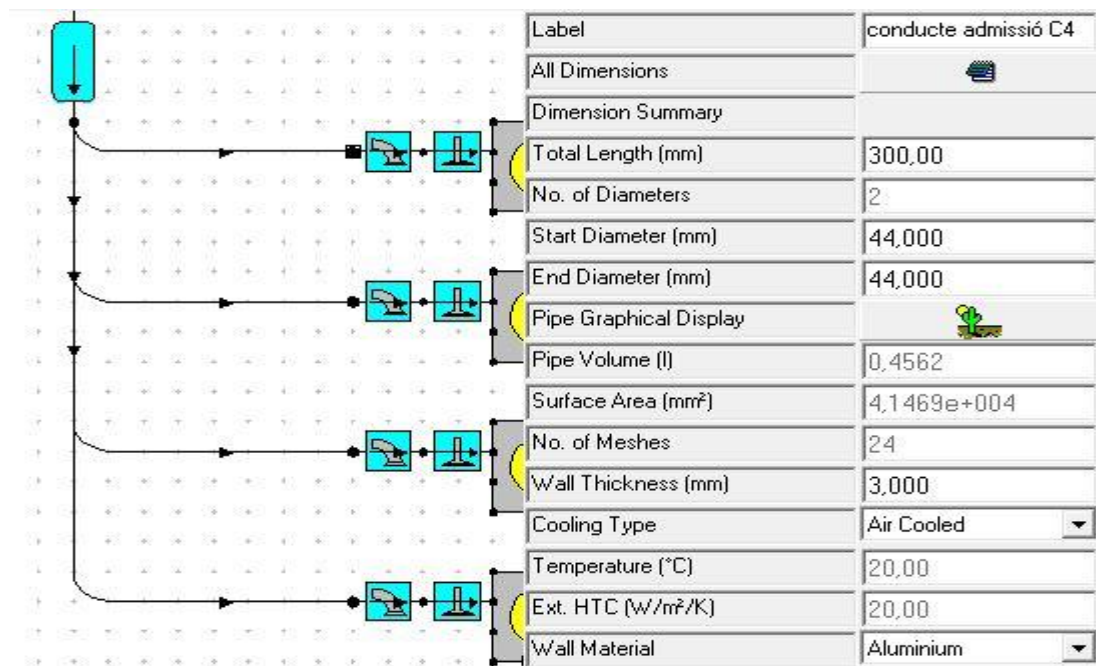
Label	plenum d'admissió
Volume (litres)	1,6000
Surface Area (mm ²)	9,5000e+004
Wall Temperature (°C)	30,0000
Plenum HTC (w/m ² /K)	0,00
Harness Connector	Off

Figura 118: Dades del plènum d'admissió en el Lotus

Els plènum d'entrada i sortida de l'intercooler són iguals però invertits. Són els encarregats de conduir l'aire provinent d'un conducte cap a dins de l'intercooler i quan surti d'aquest tornar-lo a conduir a un altre conducte. S'ha calculat que tenen un volum

aproximat de 1 litre i una àrea de 60.000mm^2 cadascun. La temperatura de la paret s'ha suposat de 20° igual que la temperatura de l'aire exterior de l'intercooler, i és d'alumini.

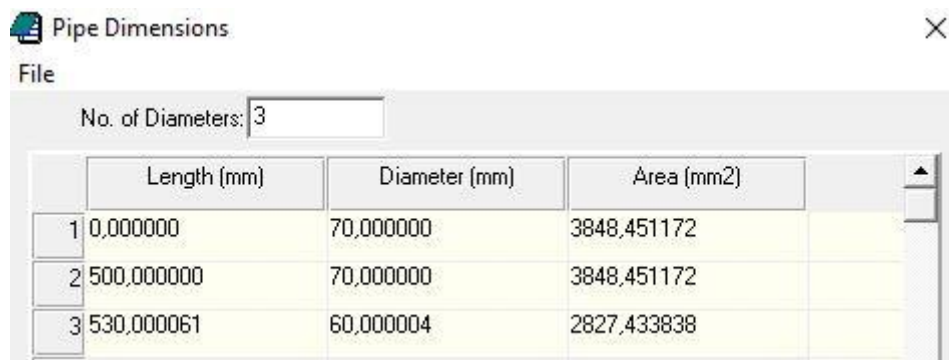
Per entrar les dades dels conductes s'utilitza una interfície com la de la Figura 119. Per definir un conducte de manera simple en el programa *Lotus* s'ha d'entrar la longitud, el diàmetre d'entrada i de sortida, el gruix de la paret, el material de la paret i el medi amb que intercanvia la calor amb l'exterior de la paret. La Figura 119 mostra la interfície del conducte del cilindre 4 en el col·lector d'admissió, encara que els quatre conductes del col·lector són iguals. Aquest conducte té una secció amb un diàmetre equivalent de 44mm durant tota la seva longitud de 300mm. Està fet d'alumini de fosa amb un gruix de 3mm i la paret exterior està en contacte amb aire.



Label	conducció C4
All Dimensions	
Dimension Summary	
Total Length (mm)	300,00
No. of Diameters	2
Start Diameter (mm)	44,000
End Diameter (mm)	44,000
Pipe Graphical Display	
Pipe Volume (l)	0,4562
Surface Area (mm ²)	4,1469e+004
No. of Meshes	24
Wall Thickness (mm)	3,000
Cooling Type	Air Cooled
Temperature (°C)	20,00
Ext. HTC (W/m ² /K)	20,00
Wall Material	Aluminium

Figura 119: Dades dels conductes del col·lector d'admissió en el Lotus

Pels conductes que tenen canvis de secció, dins aquesta interfície hi ha els apartats "All Dimensions" i "Pipe Graphical Display" on es poden entrar les diferents seccions i longituds que formen un conducte i visualitzar-lo. La Figura 120 és la interfície on s'entren aquestes dimensions. Per entrar la geometria es fa posant el diàmetre o l'àrea de la secció i la longitud del conducte on es troba aquesta. Després el programa interpola entre les dades entrades i forma la geometria sencera del conducte. Aquesta geometria elaborada pel programa es pot visualitzar a la Figura 121.



	Length (mm)	Diameter (mm)	Area (mm2)
1	0,000000	70,000000	3848,451172
2	500,000000	70,000000	3848,451172
3	530,000061	60,000004	2827,433838

Figura 120: Interfície d'entrada de la geometria d'un conducte en el Lotus

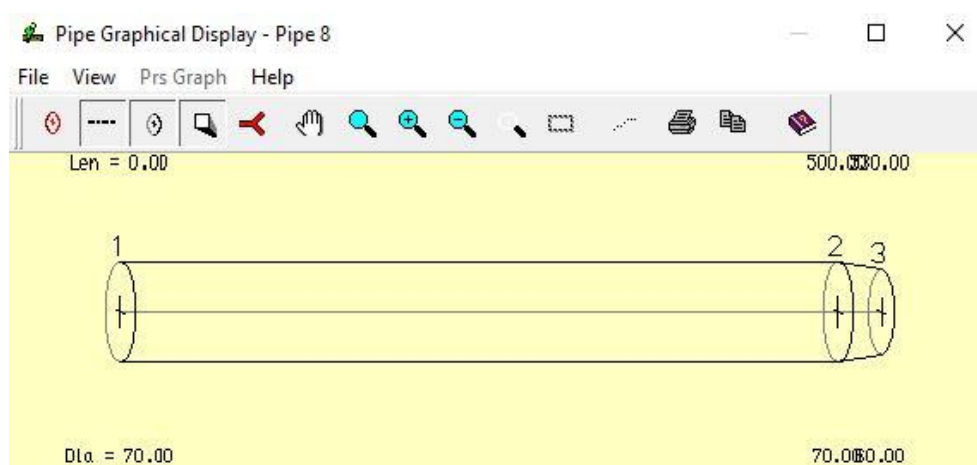


Figura 121: Interfície de visualització d'un conducte en el Lotus

Les dades entrades de la Figura 120 pertanyen al conducte que surt de l'intercooler i va fins la vàlvula de papallona. Totes les geometries i dades dels conductes es troben a l'apartat B.3 Resum de Dades del motor en aquest mateix Annex.

B.2.7 Dades de l'escapament

La Figura 122 mostra en la interfície de construcció els tres elements que componen el sistema d'escapament: els col·lectors d'escapament, el downpipe i el tub d'escapament. Les dades dels col·lectors d'escapament i el downpipe estan explicades a l'apartat 4.1.1 i 4.1.2 dins la Memòria.

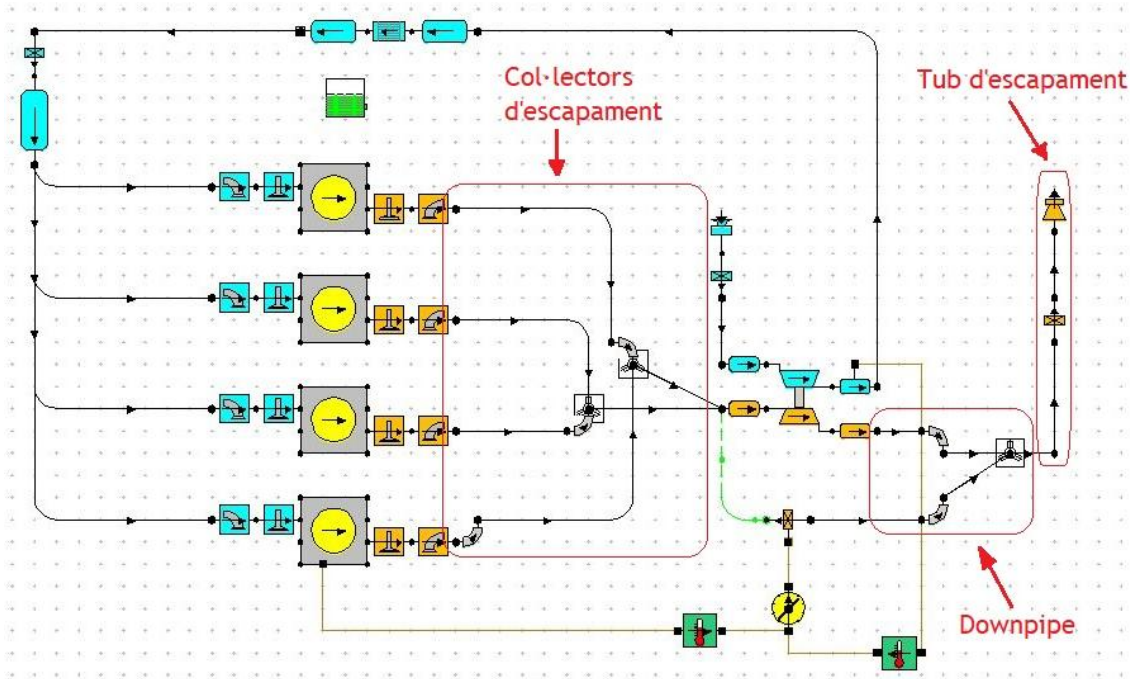


Figura 122: Elements d'escapament a la interfície de construcció del Lotus

El tub d'escapament del vehicle té un diàmetre de 70mm en tot el conducte. La primera part del tub d'escapament té una longitud de 1'5m (1.500mm) i la segona 2m (2.000mm). Entre mig de les dues parts s'hi ubica el catalitzador dels gasos d'escapament. S'ha utilitzat el bloc de catalitzador de motor de benzina, i s'han introduït les dades i mesures com es pot veure a la interfície de la Figura 123.

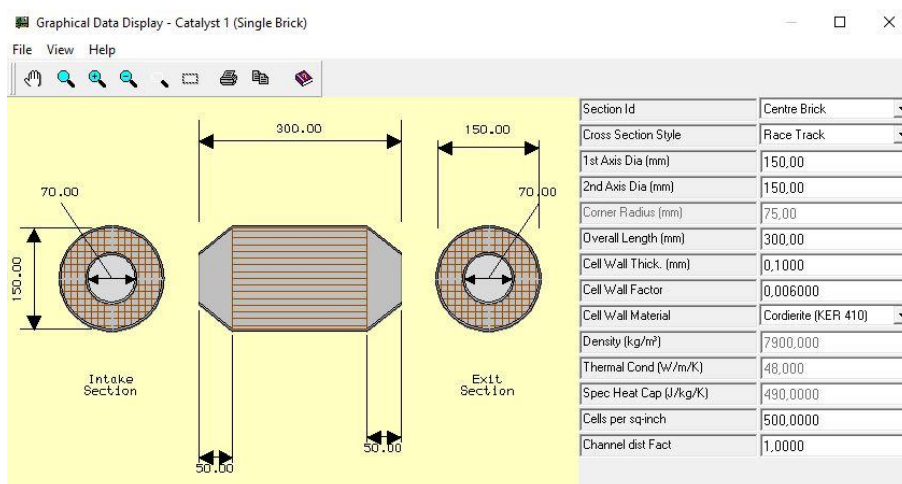


Figura 123: Dades del catalitzador en el Lotus

B.3 Resum de Dades del motor*Taula 21: Dades dels cilindres o bloc motor*

Dades del bloc motor	
Diàmetre del cilindre	85mm
Carrera del pistó	88mm
Distància entre centres de la biela	150mm
Rati de compressió del cilindre	9,0:1
Número de cilindres	4
Duració d'un cicle	720 graus de cigonyal
Ordre d'encesa dels cilindres	1,3,4,2
Graus de desfassament entre cilindres	Cilindre 1: 0°
	Cilindre 2: 540°
	Cilindre 3: 180°
	Cilindre 4: 360°

Taula 22: Dades de les lleves

Dades de les lleves	
Vàlvules d'admissió	
Màxima obertura	10mm
Duració d'obertura	260° de rotació del cigonyal
Punt de màxima obertura	107° després del punt mort superior
Obertura de la vàlvula	23° abans del punt mort superior
Tancament de la vàlvula	57° després del punt mort inferior
Diagrama d'obertura	Figura 124
Vàlvules d'escapament	
Màxima obertura	9'5mm
Duració d'obertura	256° de rotació del cigonyal
Punt de màxima obertura	113° abans del punt mort superior
Obertura de la vàlvula	61° abans del punt mort inferior
Tancament de la vàlvula	15° després del punt mort superior
Diagrama d'obertura	Figura 124

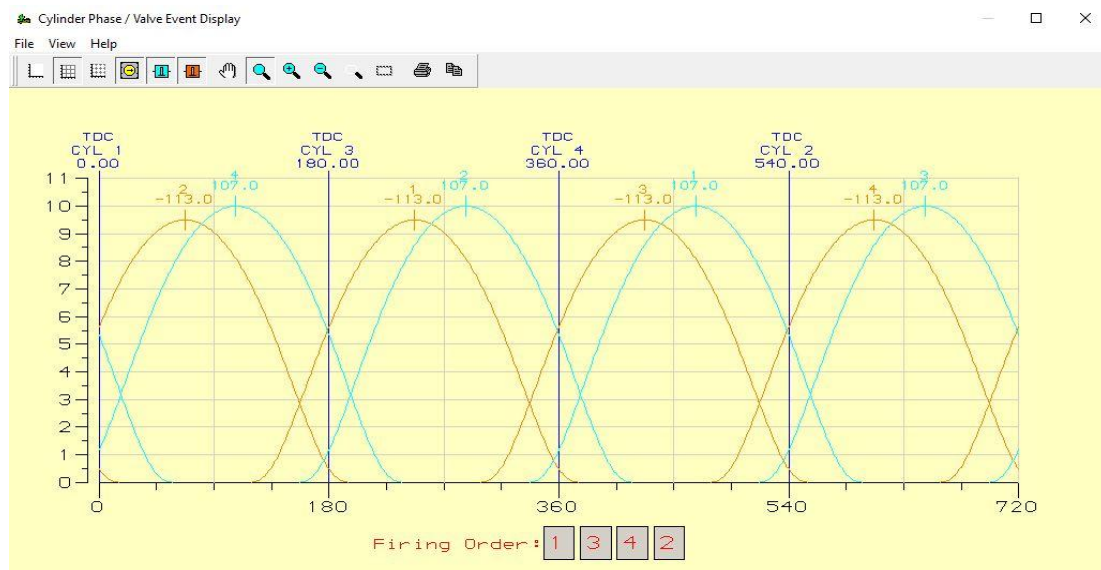


Figura 124: Diagrama temporal de totes les vàlvules del motor al Lotus

Taula 23: Dades de les vàlvules i la culata

Dades de les vàlvules i culata	
Admissió	
Numero de vàlvules	2
Diàmetre de la vàlvula	34'2mm
Diàmetre del conducte en el pas per vàlvula	30mm
Angle del seient de la vàlvula	45°
Diàmetre de la tija de la vàlvula	6'57mm
Gràfica de coeficient de flux	Figura 125
Escapament	
Numero de vàlvules	2
Diàmetre de la vàlvula	30'7mm
Diàmetre del conducte en el pas per vàlvula	26'5mm
Angle del seient de la vàlvula	45°
Diàmetre de la tija de la vàlvula	6'57mm
Gràfica de coeficient de flux	Figura 126

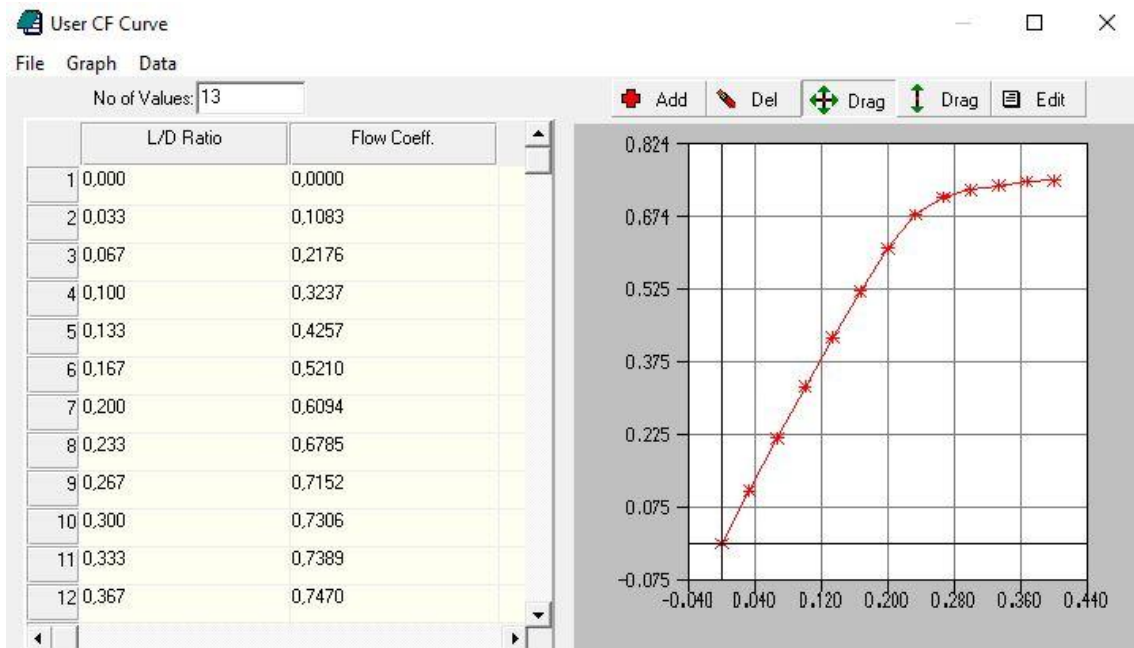


Figura 125: Dades del flux d'admissió de la culata en el Lotus

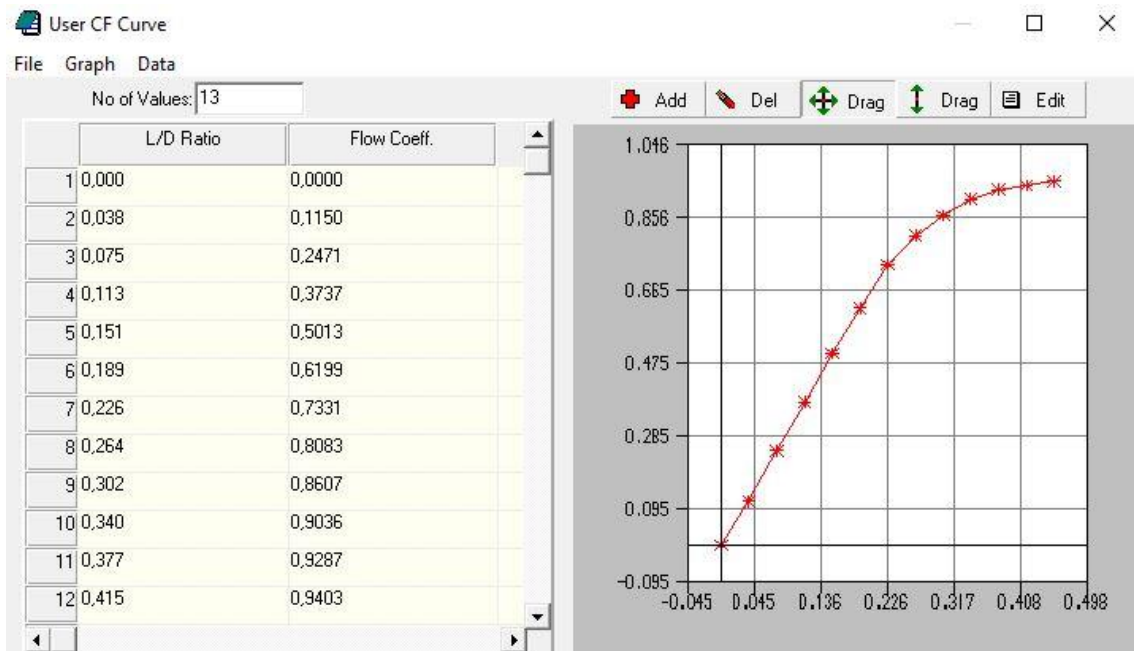


Figura 126: Dades del flux d'escapament de la culata en el Lotus

Taula 24: Dades del turbocompressor i la vàlvula wastegate

Dades del turbocompressor i la vàlvula wastegate	
Turbocompressor	
Diàmetre d'entrada al compressor	48mm
Diàmetre de sortida del compressor	43mm
Diàmetre equivalent de l'entrada de la turbina	60mm (42x2mm)
Diàmetre de la sortida de la turbina	62mm
Relació de transmissió turbina-compressor	1
Mapa de funcionament del compressor	Figura 127
Mapa de funcionament de la turbina	Figura 128
Vàlvula wastegate	
Diàmetre dels orificis de la wastegate	2x21'8mm ²
Àrea de pas de flux de la wastegate	750mm ²
Diàmetre del pulmó de l'accionador mecànic	52mm
Àrea del pulmó de l'accionador mecànic	0'002124m ²
Pressió d'inici d'obertura de la wastegate	2'18 bar absoluts
Pressió de màxima obertura de la wastegate	2'30 bar absoluts
Recorregut de l'accionador de la wastegate	10mm
Força de pretensió de la molla de l'accionador	463N
Constant elàstica de la molla de l'accionador	2.550 Nm ⁻¹
Dades de pressió de sobrealimentació	Taula 25

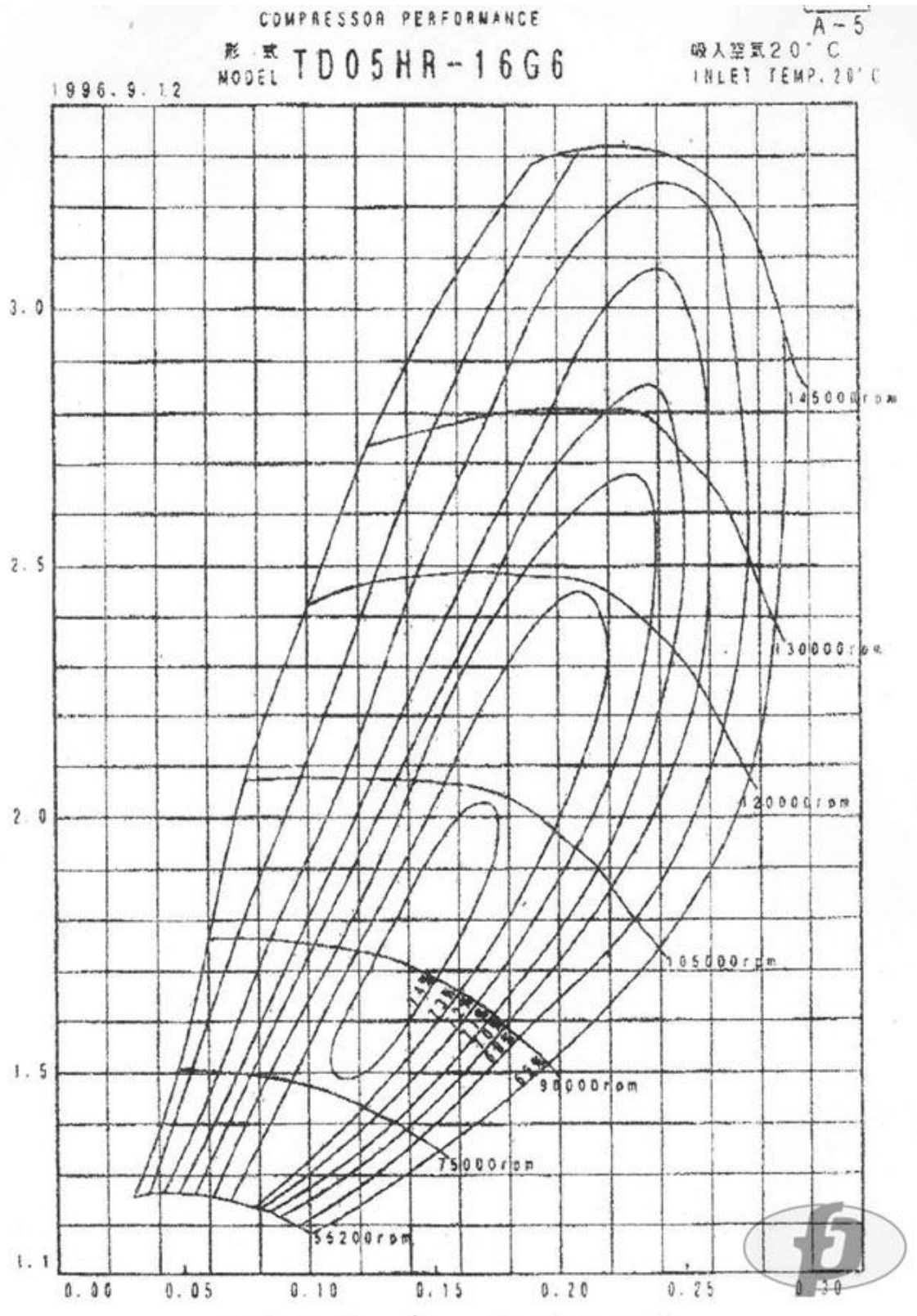


Figura 127: Mapa de funcionament del compressor (tech-racingcars. 2019)

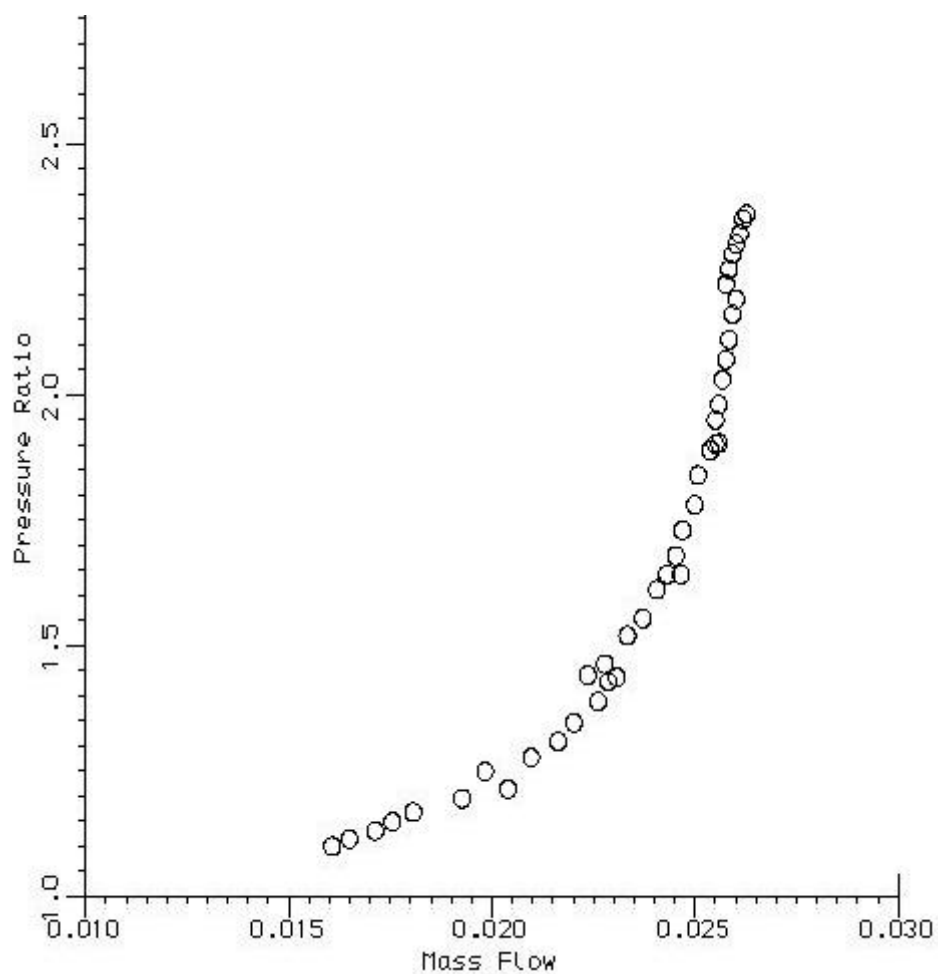


Figura 128: Mapa de funcionament de la turbina (tech-racingcars. 2019)

Taula 25: Dades de pressió de sobrealimentació

Rpm cigonyal	Pressió de sobrealimentació (bar)	Multiplicador entrat al Lotus
1.000	2,18	1
2.000	2,18	1
3.000	2,18	1
4.000	2,07	1,05
5.000	2,07	1,05
6.000	1,92	1,16
7.000	1,66	1,35
8.000	1,35	1,68

Taula 26: Dades dels elements de l'admissió

Dades dels elements de l'admissió				
Entrada d'aire	Pressió	1 bar absolut		
	Temperatura	20°C		
Intercooler	Dades de funcionament	Figura 129		
Papallona	Diàmetre	60mm		
Plènum d'admissió	Mesures	Ø100 x 200		
	Volum	1'6L		
	Àrea	95.000mm ²		
	Material	Alumini		
	Temp. Exterior	30°C		
Plènum de l'intercooler (x2)	Volum	1L		
	Àrea	60.000mm ²		
	Material	Alumini		
	Temp. Exterior	20°C		
Conductes de l'admissió				
Conductes del col·lector d'admissió (x4)	Longitud total	300mm		
	Diàmetre	44mm		
	Gruix de paret	3mm		
	Material	Alumini		
	Refrigeració	Aire		
	Longitud (mm)	0	300	
	Diàmetre (mm)	44	44	
Conducte de l'intercooler a la papallona	Longitud total	530mm		
	Diàmetre	Variació de diàmetre		
	Gruix de paret	3mm		
	Material	Plàstic		
	Refrigeració	Aire		
	Longitud (mm)	0	500	530
	Diàmetre (mm)	70	70	60
Conducte del compressor a l'intercooler	Longitud total	500mm		

	Diàmetre	Variació de diàmetre		
	Gruix de paret	3mm		
	Material	Plàstic		
	Refrigeració	Aire		
	Longitud (mm)	0	200	500
	Diàmetre (mm)	43	45	70
Conducte de la caixa d'aire al compressor	Longitud total	630mm		
	Diàmetre	Variació de diàmetre		
	Gruix de paret	3mm		
	Material	Plàstic		
	Refrigeració	Aire		
	Longitud (mm)	0	630	
	Diàmetre (mm)	80	48	

Mass Flow (kg/s)	Pressure Loss (bar)	Coolant Temperature(C)	Effectiveness (0-1)
0,000000	0,000000	20,000000	0,600000
0,050000	0,010000	20,000000	0,650000
0,100000	0,020000	20,000000	0,700000
0,150000	0,030000	20,000000	0,750000
0,200000	0,040000	20,000000	0,750000
0,250000	0,050000	20,000000	0,750000
0,300000	0,080000	20,000000	0,750000
0,350000	0,120000	20,000000	0,750000

Figura 129: Dades de l'intercooler

Taula 27: Dades dels col·lectors d'escapament (I)

Dades dels col·lectors d'escapament (I)			
Conducte	Longitud (mm)	Radi (mm)	Angle de curvatura (graus)
1.1	168	120	80
1.2	90	Conducte recte	
2.1	70	Conducte recte	
2.2	42	40	60

3.1	100	Conducte recte	
4.1	50	Conducte recte	
4.2	86	70	70
Sortida	10	Conducte recte	

Taula 28: Dades dels col·lectors d'escapament (II)

Dades dels col·lectors d'escapament (II)		
Secció	Àrea (mm ²)	Diàmetre equivalent (mm)
Entrada als col·lectors (x4)	1560	44,5
Sortida dels col·lectors (x2)	1400	42,2
1.2	830	32,5
2.2	790	31,8
3.2	1080	37
4.2	910	34

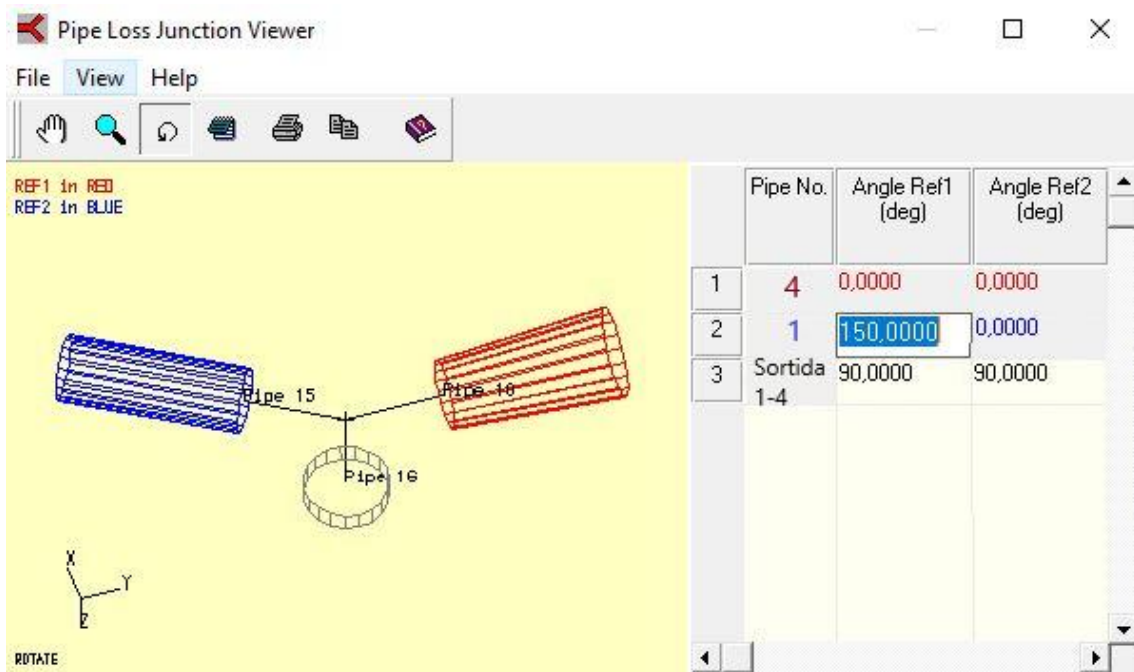


Figura 130: Dades dels col·lectors d'escapament (III)

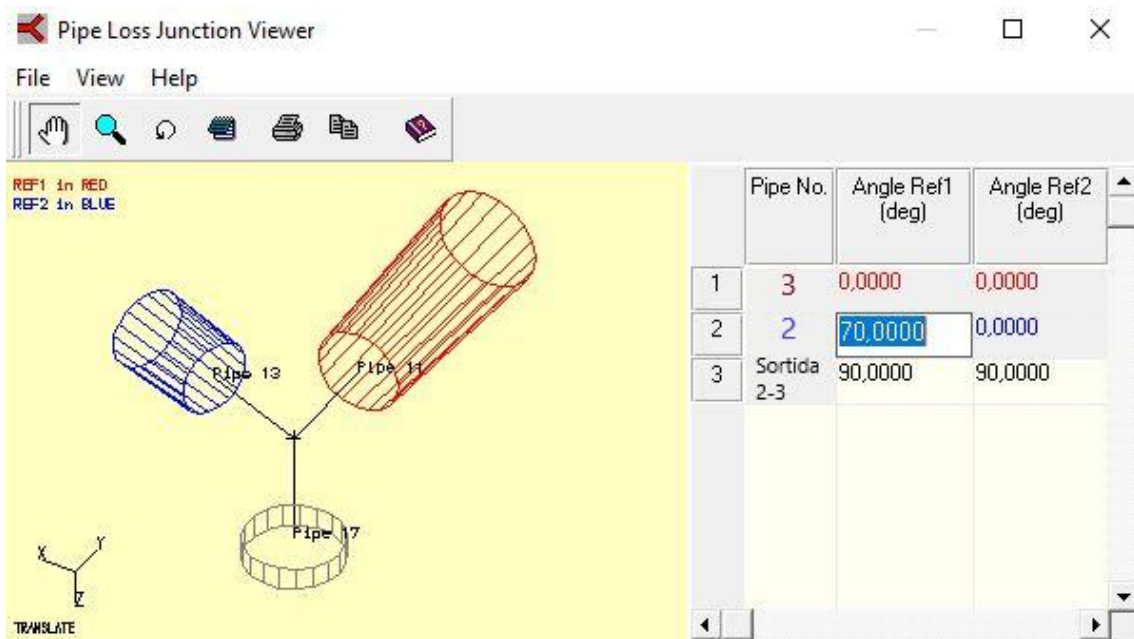


Figura 131: Dades dels col·lectors d'escapament (IV)

Taula 29: Dades del downpipe (I)

Dades del downpipe (I)			
Conducte	Longitud (mm)	Radi (mm)	Angle de curvatura (graus)
5.1	30	Conducte recte	
5.2	56	38	85
5.3	10	Conducte recte	
5.4	30	Conducte recte	
5.5	71	45	90
5.6	30	Conducte recte	
5.7	50	Conducte recte	

Taula 30: Dades del downpipe (II)

Dades del downpipe (II)		
Secció	Àrea (mm ²)	Diàmetre equivalent (mm)
Sortida de la turbina	Secció circular	62
Sortida de la wastegate	15400	70
5.1	Secció circular	56
5.2	Secció circular	70
5.3	Secció circular	35
5.4	Secció circular	40

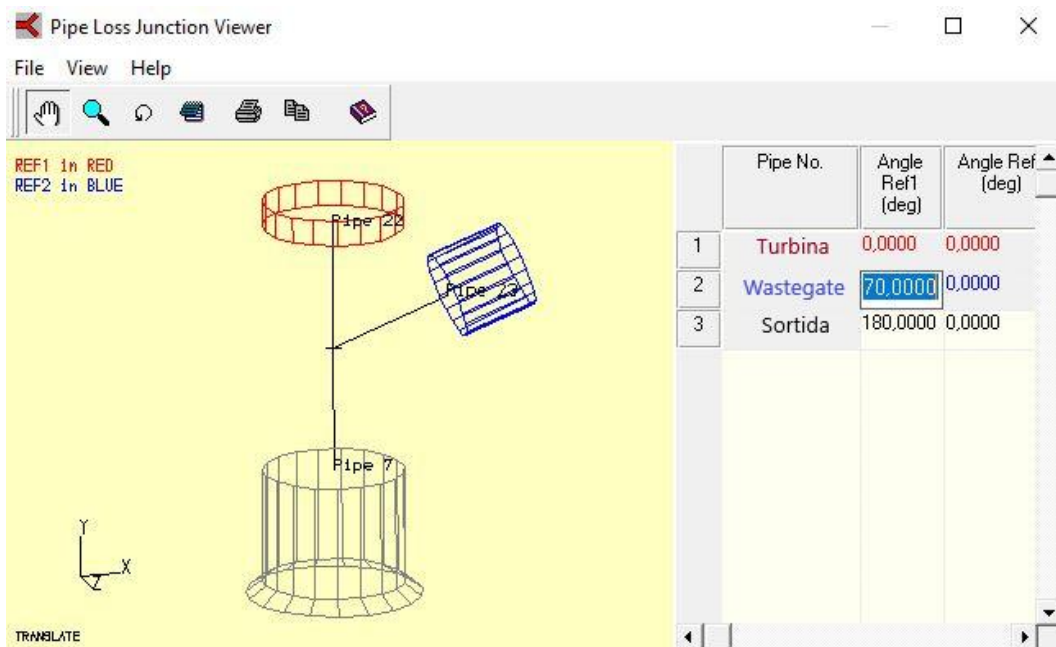


Figura 132: Dades del downpipe (III)

B.4 Obtenció de dades de flux de la culata

Els fluxos de la culata es van obtenir mitjançant un banc de fluxos. Per mesurar els fluxos en una culata, es recreen els fluxos de gasos que circulen per aquesta en el mateix sentit i direcció que tindrien amb el funcionament del motor. Tant per l'admissió com per l'escapament, la mesura es basa en elaborar una corba de flux de gasos en funció de l'obertura de la vàlvula. El banc de flux crea una depressió o pressió (depèn de si les proves són d'admissió o d'escapament) per tal que hi hagi aquest flux de gasos per la culata. Aquesta pressió de treball sempre és constant i és de 28" d'aigua, que és l'equivalent a 711mm de columna d'aigua.

La Figura 133 mostra la culata muntada en el banc de flux. El suport negre que connecta la culata amb el banc de flux és un cilindre pel qual passa l'aire amb que es mesura la culata. Aquest cilindre és del mateix diàmetre que el cilindre del motor per tal de simular exactament la geometria per on passa el flux de gasos. L'obertura de les vàlvules es porta a terme mitjançant un accionador el qual les empeny, i amb un rellotge comparador es mesura l'obertura d'aquestes.



Figura 133: Culata muntada en el banc de flux

Les mesures obtingudes de la culata de Mitsubishi EVO VI són les de la Taula 31. El banc de flux dona els resultats de flux en CFM (Peus cúbics per minut). 1 CFM és l'equivalent a 1'7 m³/h (metres cúbics per hora).

Taula 31: Valors obtinguts del banc de flux

Obertura de les vàlvules (mm)	Admissió CFM a 28"	Escapament CFM a 28"
1	31	25,7
2	62,3	55,2
3	92,7	83,5
4	121,9	112
5	149,2	138,5
6	174,5	163,8
7	194,3	180,6
8	204,8	192,3
9	209,2	201,9
10	211,6	207,5
11	213,9	210,1
12	214,6	212,4

En el programa *Lotus* les dades de flux s'han d'entrar com el coeficient de flux en funció del rati L/D. El rati L/D és l'obertura de la vàlvula en mil·límetres dividit entre el diàmetre de secció de pas de flux també en mil·límetres. El coeficient de flux d'un dispositiu és una mesura relativa de la seva eficiència a l'hora de permetre el flux de fluids. Descriu la relació entre la caiguda de pressió a través d'una vàlvula d'orifici o un altre conjunt i el cabal corresponent. (Font: Jerry Herman. 2020).

Com que les dades obtingudes del banc de flux i les dades que s'han d'entrar a la interfície gràfica del programa *Lotus* són amb magnituds diferents, s'utilitzarà un apartat del *Lotus Simulation Tools* dissenyat per dur a terme aquesta tasca. Aquest apartat és el *Port flow analysis tool*.

La Figura 134 mostra la primera interfície del *Port flow analysis tool*. En aquesta primera interfície s'han d'entrar dades del banc de flux, de la cambra de combustió del motor i les vàlvules, i les condicions de pressió ambient i temperatura amb les quals es van realitzar la mesura de fluxos.

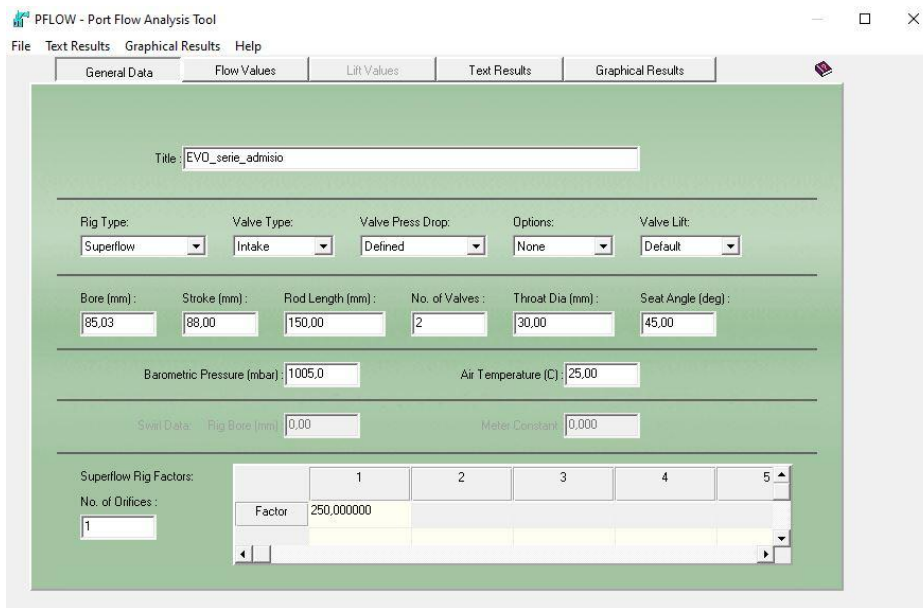


Figura 134: Interfície del Port flow analisis tool (I)

La Figura 135 mostra la segona interfície del *Port flow analisis tool*. En aquesta segona interfície s'introdueixen els valors obtinguts del banc de flux. S'entra per cada valor d'obertura de vàlvula el cabal de flux, la pressió utilitzada per la mesura i la temperatura del flux d'aire. Es poden utilitzar factors de conversió per tal de canviar les unitats dels valors introduïts.

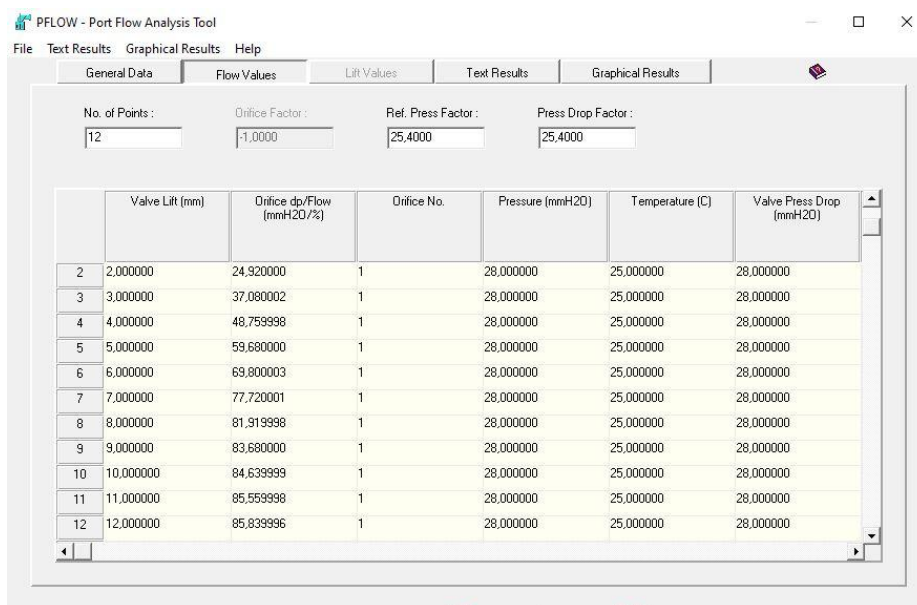


Figura 135: Interfície del Port flow analisis tool (II)

Un cop entrades aquestes dades en el *Port flow analisis tool*, el programa calcula els valors de la corba de coeficient de flux en funció del rati L/D per tal de ser entrats en la interfície de construcció del *Lotus engine simulation*. El mateix programa permet carregar aquestes dades automàticament sense necessitat de ser apuntades per l'usuari. Les dades obtingudes de la transformació amb el *Port flow analisis tool* i entrades a la interfície de construcció del *Lotus* són les de la Taula 32.

Taula 32: Valors de coeficient de flux en funció del rati L/D

Admissió		Escapament	
L/D	Coeficient de flux	L/D	Coeficient de flux
0	0	0	0
0,033	0,1083	0,038	0,115
0,067	0,2176	0,075	0,2471
0,1	0,3237	0,113	0,3737
0,133	0,4257	0,151	0,5013
0,167	0,521	0,189	0,6199
0,2	0,6094	0,226	0,7331
0,233	0,6785	0,264	0,8083
0,267	0,7152	0,302	0,8607
0,3	0,7306	0,34	0,9036
0,333	0,7389	0,377	0,9287
0,367	0,747	0,415	0,9403