



UST
FACULTAT DE CIÈNCIES
I TECNOLOGIA
UVIC-UCC

Treball de Fi de Grau

Projecte d'Actualització en el Disseny del Simulador de Moto GP de l'Empresa CKU Sport Fitness per a la Verificació Estructural dels Elements i la Millora del Sistema de Control

Josep Franquesa Canudas

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Tutor/a: Pau Català Calderón i Antoni Suriñach Albareda

Vic, Juny de 2018

Índex

1. Introducció	9
1.1.Objectius	9
1.2. Motivació.....	10
1.3 Estructura i contingut del TFG.....	11
2. Estat de l'art	11
2.1 Recerca de simuladors en el mercat	11
2.2. Simulador de Moto GP CKU28	14
3. Disseny, Anàlisi i Implementació de millores	15
3.1 Secció Mecànica	15
3.1.1 Dibuix i Disseny	15
3.1.2 Càlculs Mecànics	17
3.2 Secció Elèctrica i Electrònica	26
3.2.1 Circuits Elèctrics	27
3.2.2 Circuits Electrònics i Programació	27
4. Resultats i Discussions de les millores proposades.....	30
4.1 Secció Mecànica	30
4.1.1 Dibuix i Disseny	30
4.1.2 Càlculs Mecànics	30
4.2 Secció Elèctrica i Electrònica	48
4.2.1 Circuits Elèctrics	48
4.2.2 Circuits Electrònics	48
5. Conclusions.....	49
5.1 Recomanacions de pròxims passos.....	49
6. Agraïments	50
7. Bibliografia	51
Annex A.1 - Càlculs Cinemàtics i Dinàmics	52
Annex A.2 - Càlculs Mecànics.....	76
A2.1 Càlculs Estructurals	76
A2.2 Càlculs de Fatiga.....	108
A2.3 Càlculs d'Harmònics	113
A2.4 Càlculs de Vibracions Aleatòries	124
A2.5 Càlculs d'Optimitzacions Topològiques de Masses	127
Annex A.3 - Circuits Elèctrics.....	142
Annex A.4 - Circuits Electrònics.....	162

A4.1 Dimensionament Circuit Analògic que converteix de 10V-0V a 5V-0V:	163
A4.2 Dimensionament Circuit Analògic que converteix de 5V-0V a 10V-0V:	164
A4.3 Dimensionament Circuit Digital que converteix de 24V a 5V:	164
A4.4 Dimensionament Circuit Digital que converteix de 5V a 24V:	165
A4.5 Definició dels Components Utilitzats:	166
A4.6 Disseny dels Circuits Electrònics	173
A4.7 Fabricació dels Circuits Electrònics	179
A4.8 Programació dels Microprocessadors.....	186
Annex A.5 - Dibuix del Simulador	194

Índex d'Il·lustracions

IL·LUSTRACIÓ 1 - SIMULADOR DE VOL MODEL: BOEING 737-800 [1].....	12
IL·LUSTRACIÓ 2 - SIMULADOR DE COTXES DE CARRETERA / SIMULADOR DE COTXES DE MUNTANYA O RALLI [2]	12
IL·LUSTRACIÓ 3 - SIMULADOR BIRDLY [3].....	13
IL·LUSTRACIÓ 4 - SIMULADOR VIRTUX OMNI.....	13
IL·LUSTRACIÓ 5 - SIMULADOR DE MOTOCICLETA DE L'EMPRESA TWOREALITY	14
IL·LUSTRACIÓ 6 - IMATGE SIMULADOR MOTO GP EN PRE-ACTUALITZACIÓ	14
IL·LUSTRACIÓ 7 - DIBUIX DEL SIMULADOR 3D	16
IL·LUSTRACIÓ 8 - DIBUIX DEL SIMULADOR 3D DIFERENT PERSPECTIVA	16
IL·LUSTRACIÓ 9 - ESQUEMA DEL SIMULADOR DE MOTO GP AMB UN PILOT INCORPORANT TOTS ELS PARÀMETRES IMPLEMENTATS EN ELS CÀLCULS.....	18
IL·LUSTRACIÓ 10 - EXEMPLE DE VARIACIÓ ALEATÒRIA DE LA TENSIÓ APLICADA AL LLARG DEL TEMPS [4]	20
IL·LUSTRACIÓ 11 - TENSIÓ APLICADA EN L'ANÀLISI DE FATIGA [4]	21
IL·LUSTRACIÓ 12 - GRÀFIC EXTRET D'UN INFORME D'INTERNET [5].....	22
IL·LUSTRACIÓ 13 - EXPRESSIÓ GRÀFICA DE L'EQUACIÓ DE GOODMAN [5]	22
IL·LUSTRACIÓ 14 - GRÀFIC DE VARIACIÓ DE LA TENSIÓ MITJANA I LA TENSIÓ VARIABLE	23
IL·LUSTRACIÓ 15 - PEÇA DE PARTIDA PER A L'OPTIMITZACIÓ TOPOLÒGICA DE MASSA	26
IL·LUSTRACIÓ 16 - ARDUINO MEGA 2560 REV3	29
IL·LUSTRACIÓ 17 - ARDUINO NANO	29
IL·LUSTRACIÓ 18 - GRÀFICA DE POSICIÓ, VELOCITAT I ACCELERACIÓ DEL XASSÍS SUPERIOR DELS SIMULADOR DES DE 60º A 0º	31
IL·LUSTRACIÓ 19 - PARELL DEL SERVOMOTOR EN EL PRIMER CAS DEL CODI	32
IL·LUSTRACIÓ 20 - GRÀFICA DE POSICIÓ, VELOCITAT I ACCELERACIÓ DEL XASSÍS SUPERIOR DELS SIMULADOR DES DE 60º A -60º	33
IL·LUSTRACIÓ 21 - PARELL DEL SERVOMOTOR EN EL SEGON CAS DEL CODI	34
IL·LUSTRACIÓ 22 - ESPECIFICACIONS SERVOMOTOR.....	34
IL·LUSTRACIÓ 23 - CARACTERÍSTIQUES REDUCTOR PLANETARI AXIAL	35
IL·LUSTRACIÓ 24 - DIAGRAMES DSL SIMULADOR I PERSONA. ESQUERRA: DSL COS 2. DRETA: DSL COS1.	35
IL·LUSTRACIÓ 25 - REACCIONS AL LLARG DE L'EIX X	36
IL·LUSTRACIÓ 26 - REACCIONS AL LLARG DE L'EIX Y.....	37
IL·LUSTRACIÓ 27 - TENSIÓ EQUIVALENT DE VON-MISSES.....	38
IL·LUSTRACIÓ 28 - DEFORMACIÓ AL LLARG DE L'EIX Y	38
IL·LUSTRACIÓ 29 - TENSIÓ DE VON-MISSES EN L'ORELLA	40
IL·LUSTRACIÓ 30 - DEFORMACIÓ TOTAL ESTRUCTURA LATERAL	41
IL·LUSTRACIÓ 31 - VIDA ÚTIL DE LA PEÇA EN FUNCIÓ DEL RATI MULTIPLICATIU DE CÀRREGA	42
IL·LUSTRACIÓ 32 - BIAIXIALITAT DEL SISTEMA	43
IL·LUSTRACIÓ 33 - DEFORMACIÓ RESPECTE A L'EIX Y	44

Projecte d'Actualització en el Disseny del Simulador de Moto GP de l'Empresa CKU Sport
Fitness per a la Verificació Estructural dels Elements i la Millora del Sistema de Control

IL·LUSTRACIÓ 34 - DEFORMACIONS AL LLARG DE L'EIX X - ANÀLISI DE VIBRACIONS ALEATÒRIES	45
IL·LUSTRACIÓ 35 - OPTIMITZACIÓ TOPOLÒGICA VERSIÓ 01.....	46
IL·LUSTRACIÓ 36 - TENSÍO EQUIVALENT DE VON-MISSES DE LA PEÇA OPTIMITZADA VERSIÓ 01.....	46
IL·LUSTRACIÓ 37 - OPTIMITZACIÓ TOPOLÒGICA VERSIÓ 02.....	47
IL·LUSTRACIÓ 38 - TENSÍO EQUIVALENT DE VON-MISSES PEÇA OPTIMITZADA VERSIÓ 02.....	47
IL·LUSTRACIÓ 39 - CIRCUIT ELECTRÒNIC FRESAT PER LA CAPA DE COURE	48
IL·LUSTRACIÓ 40 - CIRCUIT ELECTRÒNIC AMB COMPONENTS SOLDATS	48
IL·LUSTRACIÓ 41 - PROPOSTA DE MILLORA DEL SISTEMA DE ROTACIÓ	50
IL·LUSTRACIÓ 42 - ESQUEMA DEL SIMULADOR DE MOTO GP AMB UN PILOT INCORPORANT TOTS ELS PARÀMETRES IMPLEMENTATS EN ELS CÀLCULS.	54
IL·LUSTRACIÓ 43 - GRÀFIC CINEMÀTICA COS XASSÍS SUPERIOR	65
IL·LUSTRACIÓ 44 – POSICIÓ ANGULAR AL LLARG DEL TEMPS DEL XASSÍS SUPERIOR	66
IL·LUSTRACIÓ 45 - PARELL NECESSARI DEL SERVOMOTOR PER FER MOURE EL SISTEMA.....	66
IL·LUSTRACIÓ 46 - RESULTATS CINEMÀTICS.....	67
IL·LUSTRACIÓ 47 - POSICIÓ ANGULAR ENVERS AL TEMPS.....	68
IL·LUSTRACIÓ 48 - PARELL NECESSARI DEL SERVOMOTOR PER FER MOURE EL SISTEMA.....	68
IL·LUSTRACIÓ 49 - RESULTAT CINEMÀTIC COS 2	69
IL·LUSTRACIÓ 50 - SUPERPOSICIÓ DELS RESULTATS CINEMÀTICS DEL XASSÍS SUPERIOR I DEL COS 2.....	70
IL·LUSTRACIÓ 51 - DSL DEL CONJUNT DELS COSSOS	71
IL·LUSTRACIÓ 52 - DSL XASSÍS SUPERIOR	71
IL·LUSTRACIÓ 53 - DSL PILOT	72
IL·LUSTRACIÓ 54 - RESULTAT DE FORCES HORITZONTALS EN LES REACCIONS	74
IL·LUSTRACIÓ 55 - RESULTAT DE FORCES VERTICALS EN LES REACCIONS.....	74
IL·LUSTRACIÓ 56 - GRÀFIC DE VARIACIÓ DE LA TENSÍO MITJANA I LA TENSÍO VARIABLE UTILITZAT PEL CÀLCUL DE FATIGA	77
IL·LUSTRACIÓ 57 - WORKBENCH ANSYS PEL CÀLCUL ESTRUCTURAL	77
IL·LUSTRACIÓ 58 - MALLAT PEÇA SUPORT XASSÍS SUPERIOR	78
IL·LUSTRACIÓ 59 - SUPORT PEÇA SUPORT XASSÍS SUPERIOR	79
IL·LUSTRACIÓ 60 - CÀRREGUES EXTERNES.....	80
IL·LUSTRACIÓ 61 - ACCELERACIÓ DE LA GRAVETAT.....	80
IL·LUSTRACIÓ 62 - TENSÍO EQUIVALENT DE VON-MISSES	81
IL·LUSTRACIÓ 63 - DEFORMACIÓ AL LLARG DE L'EIX Y	82
IL·LUSTRACIÓ 64 - WORKBENCH ANSYS PEL CÀLCUL DE VINCLAMENT	83
IL·LUSTRACIÓ 65 - ACTUACIÓ DE LES FORCES DE COMPRESSIÓ PER CALCULAR EL VINCLAMENT	83
IL·LUSTRACIÓ 66 - TENSÍO EQUIVALENT DE VON-MISSES – CAS ESTRUCTURAL	84
IL·LUSTRACIÓ 67 - DEFORMACIÓ TOTAL – CAS ESTRUCTURAL	84
IL·LUSTRACIÓ 68 - PRIMER MODE DE VINCLAMENT	85
IL·LUSTRACIÓ 69 - SEGON MODE DE VINCLAMENT	85
IL·LUSTRACIÓ 70 - TERCER MODE DE VINCLAMENT.....	86
IL·LUSTRACIÓ 71 - QUART MODE DE VINCLAMENT.....	86
IL·LUSTRACIÓ 72 - MALLAT ORELLA	87
IL·LUSTRACIÓ 73 - SUPORTS ORELLA. ESQUERRA: CYLINDRICAL SUPORT. DRETA: FRICTIONLESS SUPPORT.....	88
IL·LUSTRACIÓ 74 - APLICACIÓ DE LES REACCIONS OX I OY	89
IL·LUSTRACIÓ 75 - DEFORMACIÓ TOTAL ORELLA	89
IL·LUSTRACIÓ 76 - TENSÍO EQUIVALENT DE VON-MISSES ORELLA	90
IL·LUSTRACIÓ 77 - WORKBENCH ANSYS CÀLCUL ESTRUCTURA	91
IL·LUSTRACIÓ 78 - MALLAT ESTRUCTURA CENTRAL	92
IL·LUSTRACIÓ 79 - MALLAT ESTRUCTURA LATERAL.....	92
IL·LUSTRACIÓ 80 - DETALL SUPERFÍCIE SUPORT FIX O AMB LLISCAMENT.....	93
IL·LUSTRACIÓ 81 - DETALL ON ES SUBJECTA EL MOTOR I CARGOLS ON ES SUBJECTEN ESTRUCTURES	93
IL·LUSTRACIÓ 82 - DETALL ON ES CARGOLEN ESTRUCTURES PER A SUBJECTAR EL MOTOR	93
IL·LUSTRACIÓ 83 - CÀRREGA TRAVESSERS	96
IL·LUSTRACIÓ 84 - CÀRREGA MUNTANTS	97

Projecte d'Actualització en el Disseny del Simulador de Moto GP de l'Empresa CKU Sport
Fitness per a la Verificació Estructural dels Elements i la Millora del Sistema de Control

IL·LUSTRACIÓ 85 - CÀRREGA DELS TUBS UBICATS ALS EXTREMS	97
IL·LUSTRACIÓ 86 - CÀRREGA DE L'ESTRUCTURA CENTRAL	98
IL·LUSTRACIÓ 87 - DEFORMACIÓ TOTAL ESTRUCTURA LATERAL	98
IL·LUSTRACIÓ 88 - TENSÍO DE VON-MISSES ESTRUCTURA LATERAL	99
IL·LUSTRACIÓ 89 - DEFORMACIÓ TOTAL ESTRUCTURA CENTRAL	99
IL·LUSTRACIÓ 90 - ESQUEMATITZACIÓ DE L'ESTRUCTURA EN EL PRIMER CAS DE CONDICIONS DE CONTORN	100
IL·LUSTRACIÓ 91 - CÀRREGUES EN L'ESTRUCTURA	101
IL·LUSTRACIÓ 92 - DIAGRAMA DE MOMENT I TALLANT AL LLARG DE LA BIGA	101
IL·LUSTRACIÓ 93 - DEFORMACIÓ AL LLARG DE LA BIGA.....	101
IL·LUSTRACIÓ 94 - DIAGRAMA DE MOMENT I TALLANT DE LA BIGA EN FUNCIÓ DEL PES PROPI.....	102
IL·LUSTRACIÓ 95 - REACCIONS DE L'ESTRUCTURA.....	102
IL·LUSTRACIÓ 96 - CONDICIONS DE CONTORN BIGA BIRECOLZADA	102
IL·LUSTRACIÓ 97 - ESTAT DE CÀRREGUES BIGA BIRECOLZADA	102
IL·LUSTRACIÓ 98 - DIAGRAMA DE MOMENT I TALLANT AL LLARG DE LA BIGA	103
IL·LUSTRACIÓ 99 - DIAGRAMA DE MOMENT I TALLANT AL LLARG D'ELA BIGA EN EL CAS DEL PES PROPI.....	103
IL·LUSTRACIÓ 100 - REACCIONS DE L'ESTRUCTURA EN EL CAS DE LA BIGA BIRECOLZADA	103
IL·LUSTRACIÓ 101 - SECCIONS TUB ESTRUCTURA. ESQUERRA: AMB TUB EXTERIOR. DRETA: AMB TUB INTERIOR	104
IL·LUSTRACIÓ 102 - ESQUEMA CÀLCUL BOLC ESTRUCTURA.....	107
IL·LUSTRACIÓ 103 - WORKBENCH ANSYS PEL CÀLCUL DE FATIGA	108
IL·LUSTRACIÓ 104 - CÀRREGA APLICADA	109
IL·LUSTRACIÓ 105 - SISTEMA DE FIXACIÓ ENCASTAT	109
IL·LUSTRACIÓ 106 - TENSÍO VARIABLE APLICADA	110
IL·LUSTRACIÓ 107 - DIAGRAMA DE GOODMAN	110
IL·LUSTRACIÓ 108 - VIDA ÚTIL DE LA PEÇA EN FUNCIÓ DEL RATI MULTIPLICATIU DE CÀRREGA	111
IL·LUSTRACIÓ 109 - ÀREA DE LOCALITZACIÓ DEL DANY DEL MAJOR DANY DEL SISTEMA	111
IL·LUSTRACIÓ 110 - ÀREA DE LOCALITZACIÓ DEL MÀXIM I MÍNIM DANY DEL SISTEMA.....	112
IL·LUSTRACIÓ 111 - FACTOR DE SEGURETAT	112
IL·LUSTRACIÓ 112 - BIAXIALITAT DEL SISTEMA	113
IL·LUSTRACIÓ 113 - WORKBENCH ANSYS ANÀLISI MODAL	113
IL·LUSTRACIÓ 114 - HARMÒNICS TROBATS PEL PROGRAMA	114
IL·LUSTRACIÓ 115 - DEFORMACIÓ DEL MODE VIBRACIONAL NÚMERO 1	115
IL·LUSTRACIÓ 116 - DEFORMACIÓ DEL MODE VIBRACIONAL NÚMERO 1 PERSPECTIVA DES DE L'EIX X POSITIU	115
IL·LUSTRACIÓ 117 - DEFORMACIÓ DEL MODE VIBRACIONAL NÚMERO 2	116
IL·LUSTRACIÓ 118 -DEFORMACIÓ DEL MODE VIBRACIONAL NÚMERO 2 PERSPECTIVA DES DE L'EIX Z NEGATIU.....	116
IL·LUSTRACIÓ 119 - DEFORMACIÓ DEL MODE VIBRACIONAL NÚMERO 3	117
IL·LUSTRACIÓ 120 - DEFORMACIÓ DEL MODE VIBRACIONAL NÚMERO 3 PERSPECTIVA DES DE L'EIX Y POSITIU AMB LA VISUALITZACIÓ "WIREFRAME"	117
IL·LUSTRACIÓ 121 -DEFORMACIÓ DEL MODE VIBRACIONAL NÚMERO 4.....	118
IL·LUSTRACIÓ 122 - DEFORMACIÓ DEL MODE VIBRACIONAL NÚMERO 4 PERSPECTIVA DIFERENT.....	118
IL·LUSTRACIÓ 123 - DEFORMACIÓ DEL MODE VIBRACIONAL NÚMERO 5	119
IL·LUSTRACIÓ 124 - DEFORMACIÓ DEL MODE VIBRACIONAL NÚMERO 5 PERSPECTIVA DES DE L'EIX Z NEGATIU	119
IL·LUSTRACIÓ 125 - DEFORMACIÓ DEL MODE VIBRACIONAL NÚMERO 5 AMB DISTRIBUCIÓ DE VECTORS.....	120
IL·LUSTRACIÓ 126 - DEFORMACIÓ DEL MODE VIBRACIONAL NÚMERO 5 AMB DISTRIBUCIÓ DE VECTORS PERSPECTIVA EIX Z NEGATIU	120
IL·LUSTRACIÓ 127 - DEFORMACIÓ DEL MODE VIBRACIONAL NÚMERO 6	121
IL·LUSTRACIÓ 128 - DEFORMACIÓ DEL MODE VIBRACIONAL NÚMERO 6 PERSPECTIVA DIFERENT.....	121
IL·LUSTRACIÓ 129 - DEFORMACIÓ I ANGLE DE DESFASAMENT DES DE L'EIX Y	122
IL·LUSTRACIÓ 130 - DEFORMACIÓ I ANGLE DE DESFASAMENT DES DE L'EIX X	123
IL·LUSTRACIÓ 131 - DEFORMACIÓ I ANGLE DE DESFASAMENT DES DE L'EIX Z.....	123
IL·LUSTRACIÓ 132 - WORKBENCH ANSYS DE VIBRACIONS ALEATÒRIES.....	124
IL·LUSTRACIÓ 133 - PSD INTRODUÏT EN L'ANSYS.....	125
IL·LUSTRACIÓ 134 - GRÀFICA OBTINGUDA DEL PSD DE L'ANSYS	125

**Projecte d'Actualització en el Disseny del Simulador de Moto GP de l'Empresa CKU Sport
Fitness per a la Verificació Estructural dels Elements i la Millora del Sistema de Control**

IL·LUSTRACIÓ 135 - DEFORMACIÓ DIRECCIONAL EIX X	126
IL·LUSTRACIÓ 136 - DEFORMACIÓ DIRECCIONAL EIX Y	126
IL·LUSTRACIÓ 137 - DEFORMACIÓ DIRECCIONAL EIX Z	127
IL·LUSTRACIÓ 138 - WORKBENCH ANSYS DE L'OPTIMITZACIÓ TOPOLÒGICA DE MASSA	127
IL·LUSTRACIÓ 139 - MALLAT DE LA PEÇA A OPTIMITZAR	128
IL·LUSTRACIÓ 140 - SISTEMA DE CONDICIONS DE CONTORN - FIXACIONS	128
IL·LUSTRACIÓ 141 - SISTEMA DE CÀRREGUES DE LA PEÇA	129
IL·LUSTRACIÓ 142 - TENSIÓ EQUIVALENT DE VON-MISSES	130
IL·LUSTRACIÓ 143 - DEFORMACIÓ AL LLARG DE L'EIX Y	130
IL·LUSTRACIÓ 144 - OPTIMITZACIÓ TOPOLÒGICA DE MASSA PRE-REDISSENYADA	131
IL·LUSTRACIÓ 145 - OPTIMITZACIÓ TOPOLÒGICA DE MASSA PRE-REDISSENYADA PERSPECTIVA DIFERENT	132
IL·LUSTRACIÓ 146 - PROCÉS DE REDISENY DE LA PEÇA OPTIMITZADA	132
IL·LUSTRACIÓ 147 - CONTORN DE LA PEÇA OPTIMITZADA	133
IL·LUSTRACIÓ 148 - FIGURA REDISENYADA	133
IL·LUSTRACIÓ 149 - CONTORN FIGURA REDISENYADA	134
IL·LUSTRACIÓ 150 - TENSIÓ EQUIVALENT DE VON-MISSES DE LA PEÇA OPTIMITZADA I REDISENYADA	134
IL·LUSTRACIÓ 151 - TENSIÓ EQUIVALENT DE VON-MISSES DE LA PEÇA OPTIMITZADA I REDISENYADA PERSPECTIVA DIFERENT	135
IL·LUSTRACIÓ 152 - DEFORMACIÓ AL LLARG DE L'EIX Y	135
IL·LUSTRACIÓ 153 - NOU MALLAT AMB LA PEÇA DE 6 MM D'ESPESSOR	136
IL·LUSTRACIÓ 154 - TENSIÓ EQUIVALENT DE VON-MISSES AMB LA PEÇA PRE-OPTIMITZADA	137
IL·LUSTRACIÓ 155 - DEFORMACIÓ OBTINGUDA AL LLARG DE L'EIX Y	137
IL·LUSTRACIÓ 156 - OPTIMITZACIÓ TOPOLÒGICA DE MASSA PRE-REDISSENYADA	138
IL·LUSTRACIÓ 157 - OPTIMITZACIÓ TOPOLÒGICA DE MASSA PRE-REDISSENYADA PERSPECTIVA DIFERENT	138
IL·LUSTRACIÓ 158 - PROCÉS DE REDISENY DE LA PEÇA OPTIMITZADA	139
IL·LUSTRACIÓ 159 - RESULTAT GEOMÈTRIC DE LA PEÇA REDISENYADA	139
IL·LUSTRACIÓ 160 - TENSIÓ EQUIVALENT DE VON-MISSES DE LA PEÇA POST-REDISSENYADA	140
IL·LUSTRACIÓ 161 - DEFORMACIÓ AL LLARG DE L'EIX Y DE LA PEÇA POST-REDISSENYADA	140
IL·LUSTRACIÓ 162 - FILTRE EMIKON DE 10A	142
IL·LUSTRACIÓ 163 - DISPOSITIUS PER CONVERTIR LA SENYAL DE 220V AC A 24V DC	142
IL·LUSTRACIÓ 164 - SISTEMA D'ALIMENTACIÓ I RASPBERRY PELS ESTUDIANTS DEL GRAU EN MULTIMÈDIA	143
IL·LUSTRACIÓ 165 - CONVERTIDOR STEP DOWN CC-CC	143
IL·LUSTRACIÓ 166 - CIRCUIT INTERN DE LA CENTRALETA DE SEGURETAT OMRON G9SB-2002-A	144
IL·LUSTRACIÓ 167 - CENTRALETA DE SEGURETAT	144
IL·LUSTRACIÓ 168 - UNITAT DE CONTROL QUE ES SUBSTITUEIX	145
IL·LUSTRACIÓ 169 - PANTALLA OMRON DEL VOLANT DEL SIMULADOR	145
IL·LUSTRACIÓ 170 - COMMUTADOR SWITCH	146
IL·LUSTRACIÓ 171 - DRIVER INVERSOR IMPLEMENTAT PEL CONTROL DEL SERVOMOTOR PER INCLINAR EL SIMULADOR	146
IL·LUSTRACIÓ 172 - CONNECTROS DRIVER TOPLINE C 8400	149
IL·LUSTRACIÓ 173 - ESQUEMA CONNEXIONAT DRIVER TOPLINE C 8400	150
IL·LUSTRACIÓ 174 - ESQUEMA CONNECTORS X5 - DIGITAL INPUT	151
IL·LUSTRACIÓ 175 - ESQUEMA CONNECTORS X4 - DIGITAL OUTPUT	151
IL·LUSTRACIÓ 176 - ESQUEMA CONNECTORS X3 - ANALÒGIC	151
IL·LUSTRACIÓ 177 - ESQUEMA CONNECTOR X7 - ENCODER	152
IL·LUSTRACIÓ 178 - ESQUEMA CONNECTOR X107	152
IL·LUSTRACIÓ 179 - ESQUEMA CONNECTOR X105	152
IL·LUSTRACIÓ 180 - ESQUEMA CONNECTOR X106	153
IL·LUSTRACIÓ 181 - DADES TÈCNiques DELS CONNECTORS	153
IL·LUSTRACIÓ 182 - ESQUEMA CONNEXIONS LENZE DRIVER TOPLINE C 8400	154
IL·LUSTRACIÓ 183 - DRIVER INVERSOR TOPLINE C 8400 DE LA MARCA LENZE	155
IL·LUSTRACIÓ 184 - DRIVER INVERSOR TOPLINE C 8400 DE LA MARCA LENZE	155
IL·LUSTRACIÓ 185 - DRIVER MODEL R7D-BP04H	156

IL·LUSTRACIÓ 187 - CONNECTOR CNA	157
IL·LUSTRACIÓ 188 - ESQUEMA DE CONNEXIÓ	157
IL·LUSTRACIÓ 189 - ESQUEMA CONNECTOR CN1	158
IL·LUSTRACIÓ 190 - DRIVER IMPLEMENTAT EN EL SISTEMA	160
IL·LUSTRACIÓ 191 - ESQUEMA CONNECTORS DRIVER	161
IL·LUSTRACIÓ 192 - ESQUEMA CIRCUIT DIGITAL REDUCTOR DE TENSÍO DE 24V A 5V	162
IL·LUSTRACIÓ 193 - ESQUEMA CIRCUIT DIGITAL AMPLIFICADOR DE 5V A 24V	162
IL·LUSTRACIÓ 194 - CIRCUITS ANALÒGICS. ESQUERRA: DIVISOR DE TENSÍO. DRETA: AMPLIFICADOR NO INVERSOR DE TENSÍO	162
IL·LUSTRACIÓ 195 - CIRCUIT DE L'AMPLIFICADOR OPERACIONAL LM324N	166
IL·LUSTRACIÓ 196 - ENCAPSULAT I DISPOSICIÓ FÍSICA DELS PINS DEL DISPOSITIU LM324N	167
IL·LUSTRACIÓ 197 - SENYAL DE SORTIDA ENVERS EL SENYAL D'ENTRADA APLICAT	169
IL·LUSTRACIÓ 198 - MIDES FÍSQUES DEL COMPONENT UTILITZAT	170
IL·LUSTRACIÓ 199 - MIDES DELS PADS A REALITZAR	170
IL·LUSTRACIÓ 200 - CARCASSA UTILITZADA PER L'OPTOACOBADOR PC817	171
IL·LUSTRACIÓ 201 - CARACTERÍSTIQUES MÀXIMES PERMESES PER L'OPTOACOBADOR PC817	171
IL·LUSTRACIÓ 202 - CONNEXIONAT EN PULL-DOWN DE L'OPTOACOBADOR I ESQUEMA DE DIFERÈNCIA TEMPORAL DEL SENYAL D'ENTRADA ENVERS EL SENYAL DE SORTIDA	172
IL·LUSTRACIÓ 203 - DIMENSIONS DEL DÍODE 1N4148	173
IL·LUSTRACIÓ 204 - CIRCUIT DIGITAL - VERSIÓ UN CIRCUIT	174
IL·LUSTRACIÓ 205 - CIRCUIT DIGITAL - VERSIÓ 3 CIRCUITS INTEGRATS	174
IL·LUSTRACIÓ 206 - CIRCUITS ANALÒGICS. ESQUERRA: MODEL REDUCTOR I AMPLIFICADOR. DRETA: MODEL REDUCTOR ..	175
IL·LUSTRACIÓ 207 - EMPREMTA AMPLIFICADOR OPERACIONAL LM324N AMB LA CARCASSA HOUSINGS_DIP:DIP-14_W7.62MM	175
IL·LUSTRACIÓ 208 - DISSENY PLACA PCB CIRCUIT DIGITAL D'UNA UNITAT	176
IL·LUSTRACIÓ 209 - DISSENY PLACA PCB CIRCUIT DIGITAL AMB 3 CIRCUITS INTEGRATS	177
IL·LUSTRACIÓ 210 - DISSENY PLACA PCB CIRCUIT ANALÒGIC AMB 2 REDUCCIONS I 2 AMPLIFICACIONS	177
IL·LUSTRACIÓ 211 - DISSENY PLACA PCB CIRCUIT ANALÒGIC AMB 4 REDUCCIONS	178
IL·LUSTRACIÓ 212 - CÀLCUL AMPLADA DE PISTA PCB	179
IL·LUSTRACIÓ 213 - LAYOUT DE LES PLAQUES A FRESSAR	180
IL·LUSTRACIÓ 214 - CIRCUITS ANALÒGICS. ESQUERRA: REDUCTOR I AMPLIFICADOR. DRETA: 4 CIRCUITS REDUCTORS	180
IL·LUSTRACIÓ 215 - CIRCUITS DIGITALS. ESQUERRA: PLACA DE 3 CIRCUITS INTEGRATS. DRETA: PLAQUES D'UN CIRCUIT INTEGRAT	180
IL·LUSTRACIÓ 216 - OPERACIÓ DE FORADAR ELS FORATS SELECCIONATS AMB UNA BROCA D'1 MM	181
IL·LUSTRACIÓ 217 - ELEMENTS A CONTORNEJAR AMB LA BROCA DE CONTORNEJAR PLAQUES DE PCB	181
IL·LUSTRACIÓ 218 - QUADRES D'INSTRUCCIONS PER A LES OPERACIONS DE: ESQUERRA: CONTORNEJAR. DRETA: GRAVAR LES LLETRES	183
IL·LUSTRACIÓ 219 - GRAVACIÓ DE LES LLETRES	184
IL·LUSTRACIÓ 220 - OPERACIÓ DE FER ELS FORATS DE SUBJECCIÓ DE LES PLAQUES	184
IL·LUSTRACIÓ 221 - OPERACIÓ DE CONTORNEJAR L'EXTERIOR DE LES PLAQUES	184
IL·LUSTRACIÓ 222 - QUADRE D'OPERACIONS. ESQUERRA: OPERACIÓ DE FORATS. DRETA: CONTORNEJAR	185
IL·LUSTRACIÓ 223 - PLACA ANALÒGICA FRESADA	186
IL·LUSTRACIÓ 224 - RESULTAT DE LA PLACA FRESADA AMB ELS COMPONENTS SOLDATS	186
IL·LUSTRACIÓ 225 - DIBUIX DEL SIMULADOR 3D	194
IL·LUSTRACIÓ 226 - DIBUIX DEL SIMULADOR 3D DIFERENT PERSPECTIVA	194
IL·LUSTRACIÓ 227 - ESTRUCTURA LATERAL DEL QUADRE ELÈCTRIC	195
IL·LUSTRACIÓ 228 - ESTRUCTURA CENTRAL	196
IL·LUSTRACIÓ 229 - FIXACIÓ PLATAFORMES LATERALS	196
IL·LUSTRACIÓ 230 - SISTEMES DE SUBJECCIÓ EN L'ESTRUCTURA CENTRAL	197
IL·LUSTRACIÓ 231 - CONJUNT DE SERVOMOTOR I SISTEMA D'ENGRANATGES DE PLANETARIS AXIALS	197
IL·LUSTRACIÓ 232 - ORELLA	198

Projecte d'Actualització en el Disseny del Simulador de Moto GP de l'Empresa CKU Sport
Fitness per a la Verificació Estructural dels Elements i la Millora del Sistema de Control

IL·LUSTRACIÓ 233 - SISTEMA DE BLOQUEIG DEL MOVIMENT D'INCLINACIÓ	198
IL·LUSTRACIÓ 234 - PEÇA SUPORT XASSÍS SUPERIOR.....	199
IL·LUSTRACIÓ 235 - SISTEMA FRE	199
IL·LUSTRACIÓ 236 - PEÇA DE SUBJECCIÓ DEL SISTEMA DE FRENADA.....	200
IL·LUSTRACIÓ 237 - XASSÍS	200
IL·LUSTRACIÓ 238 - XASSÍS PERSPECTIVA DIFERENT	201
IL·LUSTRACIÓ 239 - ESTRUCTURA SUPORT TELEVISIÓ DES DE DIFERENTS PERSPECTIVES	201
IL·LUSTRACIÓ 240 - VOLANT I PANTALLA DE CONTROL PEL PILOT DES DE DIFERENTS PERSPECTIVES	202

Índex de Taules

TAULA 1 - FREQÜÈNCIES DELS HARMÒNICS LOCALITZATS	43
TAULA 3 - ENGINEERING DATA DE L'ACER DE L'ANSYS WORKBENCH	76
TAULA 4 - CÀRREGUES DE FORCES PER VINCLAMENT	87
TAULA 5 - DEFINICIÓ DE FORCES.....	88
TAULA 6 – VALORS TÍPICS DE LES SOBRECÀRREGUES D'ÚS	91
TAULA 7 - FREQÜÈNCIES DELS HARMÒNICS LOCALITZATS	114
TAULA 8 - POWER SPECTRAL DENSITY	124
TAULA 9 - INPUTS CONNECTOR CN1	159
TAULA 10 - OUTPUTS CONNECTOR CN1	160
TAULA 11 - DESCRIPCIÓ DE LA FUNCIÓ DE CADA PIN DEL DISPOSITIU LM324N	167
TAULA 12 - CARACTERÍSTIQUES DEL DISPOSITIU LM324N	168
TAULA 13 - CARACTERÍSTIQUES PER LA DETERMINACIÓ DE DERIVES DEL DISPOSITIU LM324N	168
TAULA 14 - CARACTERÍSTIQUES ESTÀNDARDS DE TREBALL DE L'OPTOACOBLADOR.....	172
TAULA 15 - SEGMENT DE LLISTAT DE COMPONENTS AMB LES EMPREMTES ASSIGNADES	176

RESUM TREBALL FINAL DE GRAU GRAU EN ENGINYERIA EN TECNOLOGIES INDUSTRIALS

Títol: *Projecte d'Actualització en el Disseny del Simulador de Moto GP de l'Empresa CKU Sport Fitness per a la Verificació Estructural dels Elements i la Millora del Sistema de Control.*

Paraules clau: *Dibuix 3D CAD, Càlcul Estructural, CAE, Programació, Fabricació*

Autora: Josep Franquesa Canudas

Tutores: Dr. Pau Català Calderón i Antoni Suriñach Albareda

Data: Juny de 2018

Aquest Treball Final de Grau consisteix en l'actualització i desenvolupament d'un simulador de Moto GP de l'empresa CKU Sport Fitness. El simulador de moto GP està pensat per l'entrenament dels pilots de competició, un entrenament que no poden realitzar en els gimnasos convencionals i a part aquest simulador també és apte per a tot el públic on poden ser més o menys agressius en el seu pilotatge.

Aleshores, aquest treball es divideix en dues parts; una part mecànica i una part elèctrica, electrònica i de programació. En la part mecànica es tracten tots els temes de verificació i comprovació estructural com la verificació i resistència de les estructures, la fatiga, el càlcul d'harmònics, càlcul de vibracions aleatòries i càlculs d'optimitzacions topològiques de masses amb la finalitat de dimensionar i verificar que les peces més crítiques d'aquest simulador resisteixin les càrregues aplicades durant el transcurs de la seva vida útil.

Per altra banda, referenciant-se a la part elèctrica, electrònica i programació, en aquesta es gestiona tota la part d'electrònica de potència del sistema tractant la tensió provinent de la xarxa i convertint-la a diverses tensions per alimentar tot el sistema intern del simulador. Per a la part electrònica s'ha realitzat tot un conjunt de sistemes d'adquisició de dades que apart adapten les dades que reben a diferents tensions i en diferents sentits per així poder combinar les tensions del microprocessador amb el sistema de sensors i actuadors que disposa el simulador que funcionen a més elevada tensió. D'aquesta manera, integrant un microprocessador es podrà substituir l'antic sistema de control basat en PLC. Per últim, aquest TFG integra una part de programació que consisteix en la programació de microprocessadors per a controlar el simulador i ajustar aquest al comportament d'una moto de competició real.

Alguns dels objectius més importants d'aquest treball són la reducció de costos alhora de fabricar i la reducció del temps de muntatge i desmuntatge per a la part mecànica. Mentre que per la part elèctrica i electrònica els objectius a destacar són el control del simulador substituint el sistema industrial de control anterior basat en PLC per un nou sistema de control basat en microprocessadors fent totes les adaptacions necessàries al sistema que integra el simulador.

El resultat del treball ha conclòs amb la comprovació dels elements estructurals del simulador on en varies ocasions aquests elements s'han modificat degut al seu alt grau en sobre dimensionament. Aleshores, s'han fet models més petits i més ajustats a les condicions de contorn i a les càrregues a la que es troba sotmès el simulador en el seu ús habitual. Respecte a la part de control, s'ha aconseguit complir l'objectiu de controlar el simulador amb un microprocessador.

DEGREE FINAL PROJECT SUMMARY DEGREE IN BIOTECHNOLOGY

Title: *Projecte d'Actualització en el Disseny del Simulador de Moto GP de l'Empresa CKU Sport Fitness per a la Verificació Estructural dels Elements i la Millora del Sistema de Control*

Key words: *Dibuix 3D CAD, Càlcul Estructural, CAE, Programació, Fabricació*

Author: Josep Franquesa Canudas

Tutor/s: Dr. Pau Català Calderón i Antoni Suriñach Albareda

Date: Juny de 2018

This Degree Final Project is based on the update and development of a Moto GP Simulator from the company CKU Sport Fitness. This Simulator is designed for the training of professional riders, a training that no one could realise in a conventional gym. Moreover, this simulator is not only for professional riders, everyone who line riding motorbikes could ride this simulator riding it more or less aggression.

This Project is divided into two sections: a mechanic part and electric, electronics and programming part. In the mechanical part verifications and structural checks are studied such as structure resistance, fatigue, harmonic calculus, random vibrations and mass topological optimization. This is done due to check the withstanding of every element on the simulator system until its normal life will over.

On the other hand, in the electric, electronics and programming part, it is studied the power electronics of the system which convert the main tension into different levelled tensions in order to supply energy at every component in the simulator. In the electronics part, it has been designed integrated circuits to adapt the tensions to communicate the new microcontroller to the rest of the system. So that microcontroller would be able to control every sensor and actuator. In such wise, integrating for the programming part it is integrated a microcontroller to control the whole system and replace the previous control based on industrial controlling of PLC. Integrating that microcontroller to the system it able us to control and approximate the simulation to a real riding simulation.

Some of the most important objectives of this Degree Final Project are the cost reduction of the whole project, the reduction of the mounting and disassembling the simulator. For the electric's section, the objective to stand out is the controlling of that system with a microcontroller integrating all kind of circuits instead of using the conventional PLC for industrial proposes.

To sum up, in some elements the structural check turns out to be over sized, so there were some elements which had been replaced and redesigned in order not to be over sized and taking profit of their resistance. From the branch control, the whole simulator has been with microcontrollers replacing the previous control from the PLC.

1. Introducció

En aquest Treball Final de Grau es duu a terme actualitzacions en el disseny del simulador de moto GP de l'empresa *CKU28 Sport Fitness* amb la finalitat d'optimitzar costos, el procés de muntatge i desmuntatge i aportar noves millores mecàniques i electròniques.

Aquest treball està dividit en dos grans blocs ben diferenciables entre ells; la secció mecànica del projecte i la secció elèctrica, electrònica i de programació d'aquest. En aquest projecte s'ha profunditzat en diferents àrees de treball aplicant tots els coneixements adquirits en diferents àrees d'estudi provinent dels cursos universitaris cursats en la Universitat de Vic – Universitat Central de Catalunya (UVic-UCC) dins del Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials.

En aquest TFG es tracten temes diversos i multi didàctics de diferents àrees de l'enginyeria. Per a realitzar aquest treball s'ha requerit una plataforma de programes molt extensa i amb la llicència d'estudiants s'han realitzat els dibuixos, els càlculs i les simulacions necessàries per a concloure aquest projecte.

Com es veurà més endavant, aquest TFG és pot diferenciar en dues parts; una part mecànica i de disseny i una part elèctrica, electrònica i de programació on s'ocupa del control del simulador. Respecte a la part mecànica, aquí es realitzen tots els càlculs estructurals, verificacions, harmònics i optimitzacions topològiques de massa. I respecte a la part elèctrica, electrònica i de programació, es realitza una adequació de la xarxa d'alimentació tractant temes d'electrònica de potència, seguidament, es realitzen circuits per adaptar tensions a la nova unitat de control basada en microprocessadors a fi de substituir l'antic sistema de control el qual utilitza un control industrial basat en PLC.

1.1.Objectius

L'objectiu principal d'aquest Treball Final de Grau (TFG) és proposar redissenys i actualitzacions en el simulador de Moto GP de l'empresa CKU28 Sport Fitness per optimitzar els costos i el procés de muntatge/desmuntatge i aportar una verificació estructural dels elements del simulador. Aquest objectiu es divideix en altres subobjectius més específics dividits en dos grans àmbit: mecànica i disseny per una banda; electrònica, electricitat i programació per l'altre.

En quant a l'àmbit mecànica els subobjectius proposats són:

- O.1: Verificar estructuralment la resistència d'elements principals del simulador.
- O.2: Determinar les freqüències naturals i harmònics de peces crítiques en el simulador.
- O.3: Optimitzar el disseny de determinades peces.
 - Mètode d'avaluació: Reducció d'un 40% o superior de la massa de la peça.

- O.4: Realitzar una anàlisi de fallada per fatiga en determinades peces del simulador.
- O.5: Proposar un model matemàtic per a dimensionar el motor i la transmissió del conjunt que permet inclinar la moto fins a 60° respecte de la vertical.
- O.6: Redissenyar l'estructura del simulador per reduir el temps de muntatge/desmuntatge.
 - Mètode d'avaluació: Reducció del temps de muntatge i desmuntatge en un temps inferior a 10 min.
- O.7: Redissenyar l'estructura del simulador per reduir el temps de fabricació.
 - Mètode d'avaluació: Reducció dels temps de fabricació en un 25%.
- O.8: Reduir els costos de fabricació dels components mecànics.
 - Mètode d'avaluació: 25% de reducció costos.

Per altra banda, en quant a l'àmbit Elèctric i electrònic els objectius proposats són:

- O.9: Substituir la unitat de control basada en PLCs per una unitat de control basada en Microprocessadors i Ordinadors
- O.10: Integrar nous sensors en diferents parts de la moto
- O.11: Optimitzar sistemes per mesurar accions físiques de l'usuari
- O.12: Integrar els circuits realitzats en plaques PCB d'elaboració pròpia.
-

1.2. Motivació

La motivació principal per realitzar aquest projecte ha set la passió personal cap al món del motor, concretament al de les motos. Sempre m'ha entusiasmat aquest món i la gent que el rodeja, així que una manera d'endinsar-m'hi ha set treballant amb aquest simulador, el qual ha suposat un gran repte aplicant els coneixements que he anat adquirint d'assignatures cursades al llarg de la carrera així que ha set un projecte multidisciplinari aplicant una combinació equitativa d'assignatures relacionades amb la mecànica, l'electrònica i la gestió empresarial.

1.3 Estructura i contingut del TFG

Aquest TFG s'estructura tal com s'explica a continuació. En el primer capítol es presenta l'estat de l'art en quant als simuladors de vehicles d'oci en general i es presenta el simulador de moto GP de l'empresa *CKU28 Sport Fitness*. En el segon capítol es presenten els processos per obtenir els resultats del TFG. Aquest capítol estarà dividit en dos grans seccions que mostren els processos aplicats per obtenir els resultats de la secció mecànica assolint els objectius del O.1 al O.8 i en l'altre secció es presenta els processos per adquirir els objectius relacionats amb el bloc elèctric, electrònic i programació, per assolir els objectius O.9 al O.12. En un apartat s'ha dut a terme una part d'anàlisi de costos que inclou el cost dels processos de fabricació d'aquesta moto, el valor de les matèries primeres, el valor de les peces necessàries per a la construcció d'aquest simulador, juntament amb les hores i preus hores requerits per fabricar una unitat. A continuació d'aquest capítol on s'hauran mostrat els processos d'obtenció dels resultats, es mostra en el capítol 4 els resultats obtingut ens aquest TFG. En el cinquè capítol es presenten les conclusions del TFG així com recomanacions i futurs treballs a realitzar que no s'han pogut tractar. Finalment es disposa d'uns annexos a on es detalla la obtenció dels resultats amb tots els càlculs realitzats i els procediments seguits.

2. Estat de l'art

2.1 Recerca de simuladors en el mercat

En l'estat de l'art es pot destacar que avui en dia en el mercat hi ha tota una sèrie de simuladors a part del d'una moto de competició. Per exemple, en el mercat es pot trobar simuladors de vol, simuladors basats en els cotxes de carrera; tant de ralli com de carretera, simuladors de jocs virtuals, simuladors de realitat virtual, etcètera. En aquesta secció del projecte es fa una mica de resum dels diferents simuladors que es poden trobar avui en dia en el mercat. La secció finalitza amb una breu presentació i descripció del simulador de moto GP de l'empresa *CKU28 Sport Fitness*. A continuació es mostren diferents simuladors de vol que es poden trobar en el mercat.

En el mercat existeixen simuladors de vol de tipus estàtic que representa l'interior d'una cabina de pilotatge d'un avió a escala real. Aquest és un simulador amb la finalitat d'entrenar i formar a pilots d'avions oferint una immersió total en el vol simulant la conducció d'un avió real.



Il·lustració 1 - Simulador de Vol model: Boeing 737-800 [1]

Un altre tipus de simulador són els simuladors de cotxes de carrera o simuladors de ralli on amb aquest tipus de simuladors hi ha diferents variants degut a les diferents modalitats de cotxes. Per tant, es poden trobar simuladors basats amb els cotxes de muntanya o ralli i simuladors més per cotxes de carretera. En la Il·lustració 2 es mostra un simulador de cotxes de competició de carretera (esquerra) i un simulador de cotxes de muntanya o ralli (dreta).



Il·lustració 2 - Simulador de cotxes de carretera / Simulador de cotxes de muntanya o Ralli [2]

Un altre simulador seria el simulador de l'empresa "Birdly" on és un simulador per simular com una persona és capaç de volar amb el seu propi cos de la mateixa manera que ho fa un ocell. Aquest és un simulador de la categoria d'oci, és a dir, està fet amb la finalitat de complir el desig de molts humans per volar. Aquest simulador aporta aquesta sensació a les persones que el proven donant-los-hi capacitat per volar amb el seu propi cos controlant tots els seus moviments amb diversos joysticks i botons.



Il·lustració 3 - Simulador Birdly [3]

Una altre modalitat de simulador anomenat “Virtux Omni” on simulen una persona física a dins d'un joc, podent moure's i corre per dins del joc de la mateixa manera que permet interactuar amb altres persones o personatges del joc. És a dir, que aquest simulador et permet endinsar-te en el món virtual del joc.



Il·lustració 4 - Simulador Virtux Omni

Per últim es disposa d'un simulador semblant al simulador de l'empresa *CKU28 sport fitness* on aquest simulador és un simulador de caire més futurista per a ser implementat en videojocs. En la següent Il·lustració es mostra el simulador de l'empresa *tworeality*.



Il·lustració 5 - Simulador de motocicleta de l'empresa tworeality

2.2. Simulador de Moto GP CKU28

El simulador de l'empresa *CKU28 sport fitness* es un dispositiu d'entreteniment únic al mercat, pensat perquè els pilots professionals de motocicleta pugin exercitar aquells músculs i moviments que són impossibles d'estimular amb una sessió d'entrenament amb màquines de gimnàs convencionals. L'aparell reproduceix les respostes físiques reals de la moto en plena cursa mitjançant sistemes electrònics i mecànics que s'ajusten en funció del pilot i el seu pilotatge. Aquest dispositiu es diferencia d'altres simuladors en el mercat per la seva capacitat d'inclinarse $\pm 60^\circ$ sent aquesta la inclinació real dels pilots de moto GP. A més, se li ha incorporat un eix d'inclinació vertical que permet simular el moviment de frenada i acceleració que es produeix al moment de pilotar una moto de competició. Aquest simulador pot ser de caire d'oci o entrenament professional, en el qual es pot controlar paràmetres en el simulador tals com la inclinació pels usuaris més inexperts de la mateixa manera que la agressivitat dels moviments. En la Il·lustració 6 es mostra el simulador de moto GP abans de començar l'actualització que es presenta en aquest TFG.



Il·lustració 6 - Imatge Simulador Moto GP en pre-actualització

3. Disseny, Anàlisi i Implementació de millores

En aquesta secció del treball es presenten les diferents tasques que s'han realitzat al llarg del TFG i s'expliquen els models matemàtics i eines utilitzades (com pot ser els programes de simulació d'elements finits, programes de càlcul, programes de dibuix en 3D, programes per a generar codi CNC, etcètera), per posteriorment en el capítol 4, mostrar els resultats i discutir-los.

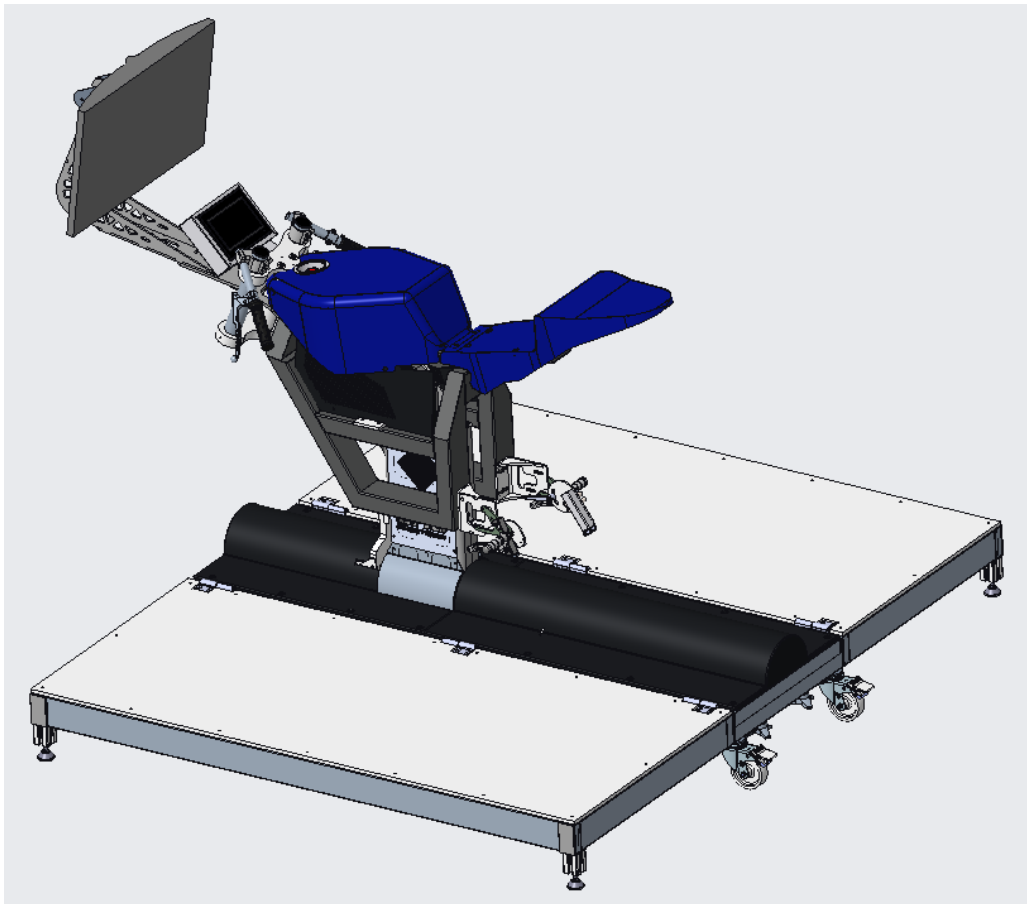
Aquest capítol, també està dividit en dos grans blocs: part mecànica i part elèctrica. A continuació s'exposarà la part mecànica i s'anirà comentant i relacionant aspectes d'aquest projecte.

3.1 Secció Mecànica

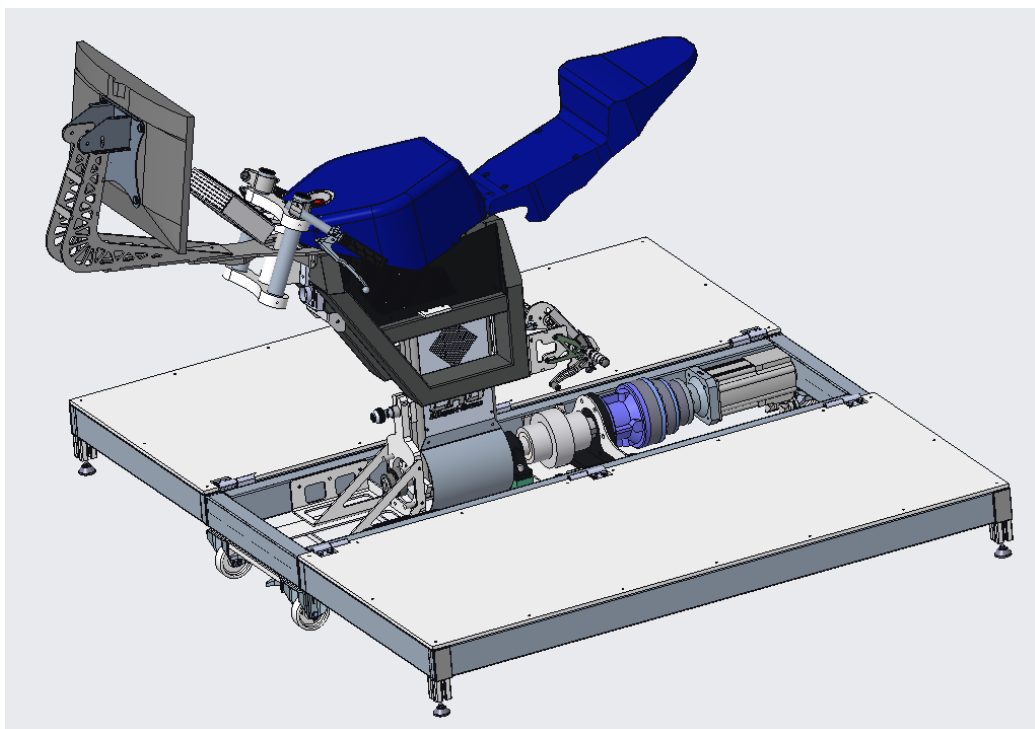
Dins de la secció mecànica es pot dividir en diferents termes, una part de dibuix CAD (acrònim anglès de Computer Aided Design) i disseny del projecte i una part de càlculs mecànics, cinemàtics, dinàmics i estàtics. Cal mencionar que aquestes dos parts del projecte estan molt relacionades i que moltes vegades es produeix un procés iteratiu on es dissenya una peça, es realitzen els càlculs i si aquesta no resisteix les condicions que se li apliquen, s'ha de tornar a passar per una fase de disseny fins que la peça resisteixi en tots els aspectes com per exemple: les càrregues, vibracions, acceleracions i deformacions que haurà de resistir durant la seva vida útil.

3.1.1 Dibuix i Disseny

En aquesta secció del TFG es mostra el disseny final del simulador on s'han anat actualitzat les diferents parts d'aquest al llarg del projecte i finalment s'han implementat estructures i peces noves. En l'Annex A.5 es mostra detalladament tots els dibuixos realitzats i ben identificats. Cal recordar que per a realitzar el dibuix com s'ha comentat anteriorment, moltes vegades consta d'un procés iteratiu, on es realitza un primer dibuix, es calcula i en cas no resistir aquest es torna a redissenyar per què aguanti, així doncs els dibuixos que es veuen en aquest annex ja han passat per tots els processos de càlcul i verificació estructural. En la il·lustració que es mostra a continuació correspon al model 3D del simulador.



Il·lustració 7 - Dibuix del Simulador 3D



Il·lustració 8 - Dibuix del Simulador 3D diferent perspectiva

3.1.2 Càlculs Mecànics

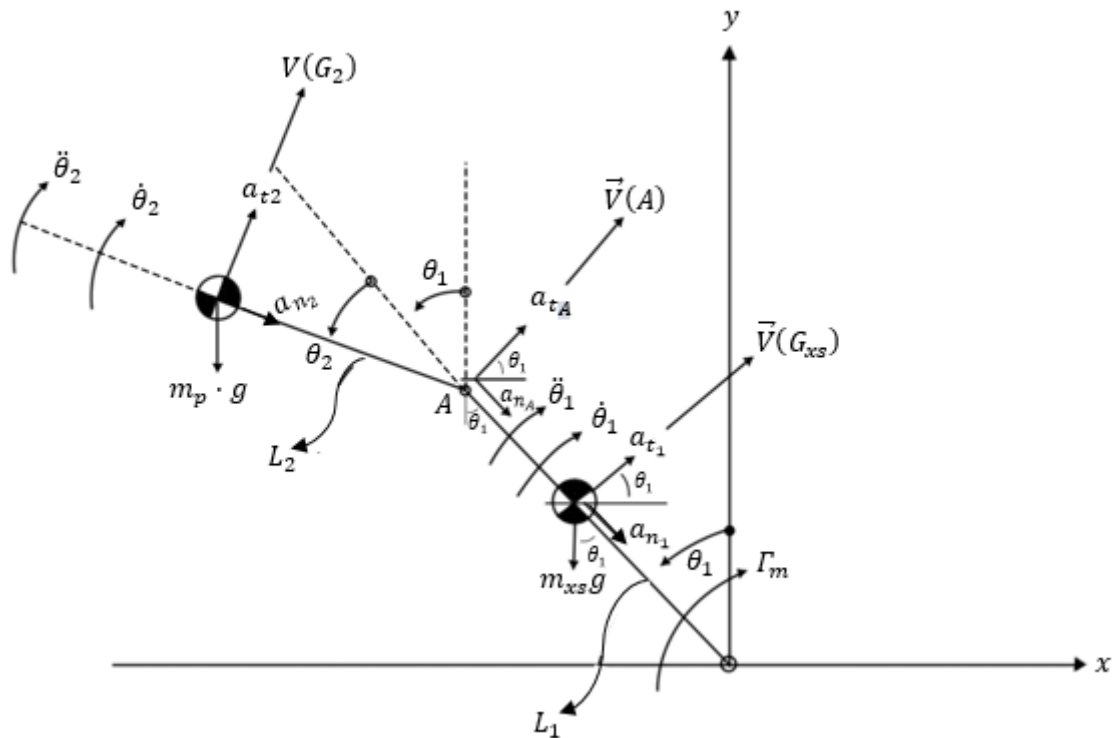
En aquest apartat del projecte es mostraran els càlculs de verificacions estructurals i dimensionaments relacionats amb els dissenys mostrats en el subcapítol 3.1.1. Aquesta secció està dividida en dos parts; una part de càlculs estructurals referenciats a la resistència i verificació de l'estructura i una part relacionada amb altres càlculs orientats al dimensionament del motor sent aquests uns càlculs més cinemàtics i dinàmics.

3.1.2.1 Càlculs Cinemàtics i Dinàmics

Com s'ha vist en la secció 3.1.1 es disposa d'un motor per tal d'accionar el moviment angular d'inclinació de la moto i el pilot. Aquest motor és un servomotor seguit d'un reductor d'engrenatges planetaris axials, que permet reduir les dimensions respecte un reductor basat en trens d'engrenatges convencionals. Per dimensionar aquest motor amb el seu reductor, s'han realitzat uns càlculs del parell necessari detallats en l'Annex A.1, on s'ha tingut en compte la inèrcia del xassís superior de la moto més la inèrcia d'una persona situada al damunt de la motocicleta. *Vegeu annex A.1.* Com que la moto pot inclinar-se $\pm 60^\circ$ s'han realitzat aquests càlculs en la posició més desfavorable del motor, on aquest haurà d'aplicar el parell màxim o bé sigui per frenar l'acceleració angular que aporti el pilot amb la motocicleta o bé per accelerar-los per pujar el pilot i la motocicleta fins a la posició 0. Aquests càlculs s'han implementat de la manera més real possible, per tant, no només s'han realitzat els càlculs en la posició més crítica del motor sinó que s'ha implementat un codi amb el programa *Matlab®* i s'ha realitzat un escombrat en diferents posicions del motor obtenint el parell necessari en cada posició. A més, en aquest programa s'inclouen molts paràmetres que es poden variar i es pot veure com influencia cada paràmetre amb el parell que necessita el motor en cada instant de temps, per així poder fer una anàlisi de sensibilitat de diferents eleccions d'accionaments

A més, s'han realitzat dos codis a dins del mateix programa. Una part del codi inclou un escombrat des de 60° a 0° on representant que el motor ha d'accelerar la moto i a la persona que porta a sobre a fi de pujar fins a la posició 0. Per tant, en aquesta secció del programa es podrà veure el parell del motor, amb la posició angular, velocitat angular i l'acceleració angular que ha de donar. Per altra banda, es disposa d'una altra secció a on es representa que s'accelera i es desaccelera el motor, és a dir que es fa anar de 60° a 0° accelerant i de 0° a -60° desaccelerant, obtenint un anàlisi complet de les diferents formes de treball del motor¹, d'aquesta manera es podrà visualitzar el parell necessari del motor en cada situació per així poder realitzar un dimensionament adequat del motor accionant d'aquest moviment.

¹ El motor només pot treballar en tres 3 estats: accelerant, desaccelerant i sense realitzar cap parell.



Il·lustració 9 - Esquema del simulador de moto GP amb un pilot incorporant tots els paràmetres implementats en els càlculs

Conseqüentment, a part de realitzar un anàlisi de cinemàtica també es realitza un anàlisi dinàmic per a determinar les forces que actuen en cada articulació del sistema per a poder realitzar futurament un nou càlcul estructural en l'Orella que conté l'eix del motor, peça que ajuda a centrar els eixos; eix del motor i eix del suport del xassís superior. A més, aquesta peça ha de resistir les forces aplicades és a dir, aquestes reaccions que també es deduiran en l'Annex A.1 junt amb la resolució dinàmica.

3.1.2.2 Càlculs Estructurals

En aquest apartat del treball es procedirà en realitzar una sèrie de càlculs estructurals com s'ha citat anteriorment, on s'inclouen els següents tipus d'anàlisi: de fatiga, de resistència, de vibracions i anàlisi d'optimització topològica de massa. Es verificarà que la peça dissenyada aguanta i resisteix les càrregues i vibracions aplicades sense deformar-se més del compte i sense obtenir ruptura de l'estructura o peça.

De totes les peces analitzades en aquesta secció, es farà un anàlisi en les seves condicions més desfavorables de treball a fi de verificar que resisteixen les càrregues o condicions externes aplicades. Cal ressaltar que en alguns casos el fet més important és la forma geometria de l'objecte ja que en funció de la seva forma podrà resistir o no determinades forces internes produïdes per acceleracions i desacceleracions, tals com la fallada per fatiga.

Seguidament es procedirà en explicar cada metodologia de càlcul per l'obtenció de diferents

$$\delta_{max} < \frac{L}{300} \quad [2]$$

resultats que s'han de verificar. Per a realitzar aquests càlculs s'ha utilitzat el programa *Ansys*®, per a realitzar uns càlculs del tipus CAE² basat en elements finits. I més endavant, per tal de verificar l'estructura d'acer del simulador, s'ha implementat el programa *Autodesk Robot*® per dur a terme aquesta verificació estructural.

3.1.2.2.1 Càlculs Estructurals

Per analitzar les tensions de les peces sotmeses a esforços o càrregues externes es comprova que les tensions que suporten no superen el seu límit elàstic. Cal ressaltar que s'han calculat tensions tallants, tensions tangencials i tensions normals. A més, totes aquestes tensions són resultants de tensions degudes a flexions, a forces tallants, a forces axials, a forces de torsió, etcètera. Aleshores, es procedeix en calcular la tensió equivalent de Von-Misses per a verificar que aquesta és inferior al límit elàstic del material.

Es recorda que l'equació de Von-Misses relaciona les 3 tensions citades anteriorment (anomenades tensions principals) on el valor d'aquesta tensió ha de ser inferior al límit elàstic del material³. La fórmula descrita per Richard Edler Von Misses és:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad [1]$$

Nogensmenys, aquesta és una fórmula implementada pel programa en cada element finit i les tensions σ_1 , σ_2 i σ_3 corresponen a les tensions principals de cada element.⁴

Un altre paràmetre que caldrà verificar en aquesta secció és la deformació. El programa proporciona dos tipus de deformacions, unes deformacions totals o unes deformacions direccionals. En les deformacions direccionals, aquest ens mostra la deformació al llarg de l'eix seleccionat. Per altra banda, la deformació total ens mostra el valor absolut de les deformacions direccionals dels 3 eixos, és a dir la deformació resultant en els 3 eixos. En aquest cas es verificarà que la deformació màxima compleixi la següent expressió:

² CAE de les sigles en anglès *Computer-aided engineering*, software que permet fer anàlisis on inclou diferents softwares com FAE (*finite element analysis*), MBD (*multibody dynamics*), CFD (*computational fluid dynamics*), durabilitat i optimització.

³ Normalment es treballarà amb acer S275 on el límit elàstic d'aquest acer és 275MPa.

⁴ Donat un punt d'un sòlid deformable sempre existeix almenys una tensió principal i com a màxim tres tensions principals diferents. Físicament, les tensions principals són perpendiculars a plans tals que en el punt considerat només existeix una tensió normal al pla sense esforços tallants ni tangencials.

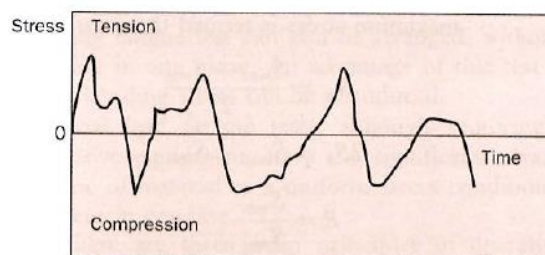
Per tal de veure el desenvolupament dels càlculs amb la plataforma del programa *Ansys*® vegeu Annex A.2. En aquest annex es mostra el procediment, desenvolupament i obtenció dels resultats mitjançant aquest programa. A més, s'explica les característiques necessàries dels materials utilitzats, es comenten les condicions de contorn en cada element analitzat així les forces i/o pressions externes que hi actuen i el tipus de malla que es realitza en cada peça⁵.

3.1.2.2.2 Càlculs de Fatiga

En aquest sub-capítol es procedeix en calcular els paràmetres relacionats amb la fatiga⁶ tals com el nombre de cicles que pot suportar les peces estudiades, de la mateixa manera que els factors de seguretat i els danys de l'estructura. Aquests càlculs permeten determinar la vida útil de la màquina o d'una determinada peça en funció dels cicles de vida que pot suportar ja que el límit de fatiga determina el nombre de cops que pot actuar aquesta càrrega cíclica fins a obtenir la ruptura la qual cosa comporta a la fi de la vida útil de la peça o del sistema.

Cal ressaltar que primer es realitza un càlcul estructural com el que s'ha vist en el sub-capítol anterior amb el programa *Ansys*® i posteriorment s'utilitzen els resultats per procedir amb els càlculs de fatiga.

La peça que s'analitza a continuació és la peça del suport del xassís superior de la moto i s'analitza per fatiga per veure el nombre de cicles que pot resistir fins assolir la ruptura. Cal ressaltar que per obtenir la ruptura, no fa falta que la peça treballi a prop del seu límit elàstic sinó que pot estar en unes tensions inferiors i no properes aquest límit i es pot trencar de la mateixa manera. Per tant, la fatiga apareix quan el material està sotmès a una càrrega repetitiva on va variant el seu valor al llarg del temps. també es podria ser el cas en que les tensions van variant al llarg del temps, obtenint una tensió màxima i una tensió mínima on d'aquestes es podria deduir una tensió mitjana. En la il·lustració següent es mostra l'espectre de tensió variable al llarg del temps, un exemple de quin tipus de tensió podria tenir la peça.

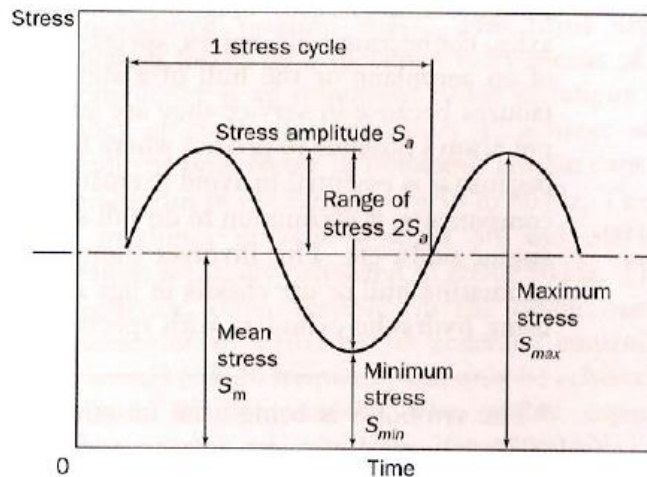


Il·lustració 10 - Exemple de variació aleatòria de la tensió aplicada al llarg del temps [4]

⁵ Al ser un programa amb la versió d'estudiant, les malles de cada peça es veuen afectades degut a les limitacions del programa.

⁶ La fatiga és la debilitat d'un material causada per la repetibilitat d'una càrrega aplicada, és a dir el dany que se li fa en una estructura quan aquesta està sotmesa a cicles de càrregues.

Conseqüentment, per realitzar aquests anàlisis es considera que hi ha una variació sinusoidal de la tensió, amb una tensió màxima i mínima, obtenint una tensió mitjana. Però cal ressaltar que apart de tenir una tensió variable, també hi ha una tensió constant⁷, corresponent a la tensió que normalment estaria sotmesa l'estructura. Aleshores, la tensió que se li aplica per realitzar aquest anàlisi de fatiga seria de la forma que es mostra en la gràfica següent:



Il·lustració 11 - Tensió aplicada en l'anàlisi de fatiga [4]

D'aquesta manera s'aconsegueix una aproximació molt més real a les fluctuacions de tensió que obtindria en la peça. Per analitzar la peça de suport del xassís superior, s'ha realitzat un anàlisi on la tensió aplicada és purament sinusoidal i la seva mitjana es troba centrada a 0.

Posteriorment, també s'utilitzarà una teoria anomenada "Goodman relation"⁸ la qual és una equació utilitzada per quantificar la interacció entre la mitjana de la tensió i l'alteració de les tensions en la vida útil de la peça. Aleshores, aquesta equació relaciona la mitjana de la tensió aplicada i la tensió variable aplicada mostrant quan el material fallarà per a un número determinat de cicles de treball. Cal anotar que la tensió variable aplicada es pot calcular de la següent manera:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad [3]$$

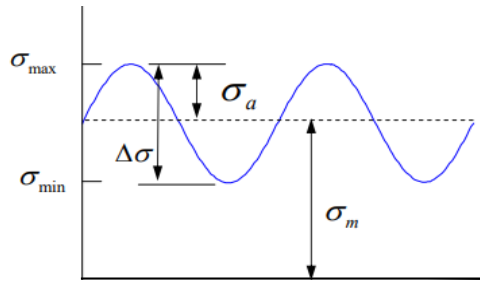
I la tensió mitjana:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad [4]$$

⁷ Equivalent en el cas d'electricitat a una tensió d'offset sumada a una tensió sinusoidal.

⁸ Aquesta teoria també és anomenada "Haigh-Soderberg diagram".

El gràfic que es mostra a continuació esquematitza les tensions citades anteriorment:



Il·lustració 12 - Gràfic extret d'un Informe d'Internet [5]

Aleshores, l'equació de Goodman es pot representar gràficament obtenint una línia, la qual marcarà la diferència entre la seguretat i la no seguretat, és a dir que si es fa treballar la peça en una zona de no seguretat, aquesta obtindrà una ruptura per fatiga i si es fa treballar dins la zona de seguretat, aquesta no es veuria greument afectada per la fatiga.

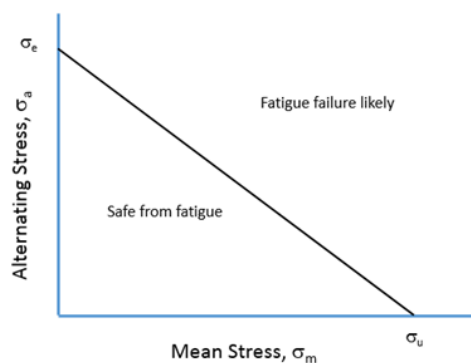
L'equació que descriu aquesta línia determinada per la següent expressió:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma'_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1$$

On:

$$\sigma_a = \sigma'_e \cdot \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_u}\right) \quad [5]$$

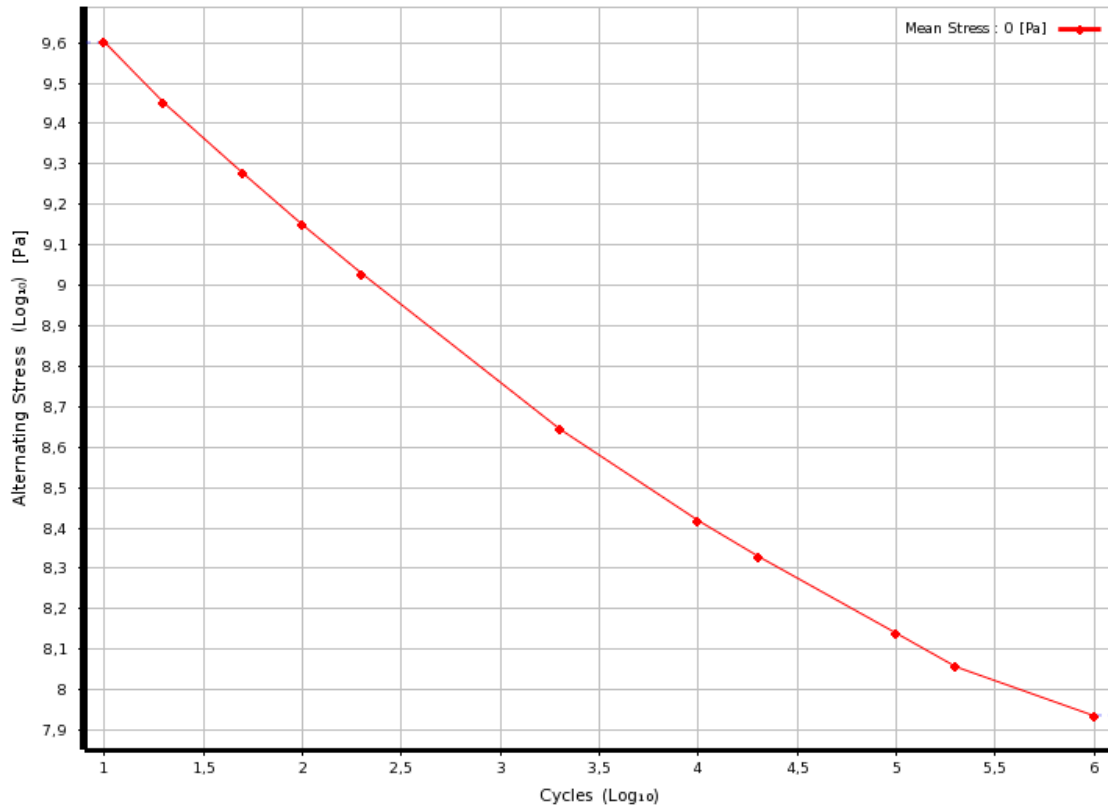
On σ_u és la tensió última del material estudiat i σ'_e seria la tensió equivalent alterna, on aquesta determinarà el nombre de cicles que la peça podrà aguantar, Per obtenir aquest valor s'ha d'extreure del diagrama S-N⁹ del material. Representant l'equació de forma gràfica s'obté:



Il·lustració 13 - Expressió gràfica de l'equació de Goodman [5]

⁹ El diagrama S-N és un diagrama que determina el nombre de cicles que es pot aplicar una determinada tensió fins que es produeix en el material una ruptura per fatiga. Els diagrames S-N s'obtenen de forma pràctica aplicant en provetes càrregues sinusoidals i comptant els cicles que s'apliquen fins que el material es fissura. D'aquesta manera es pot obtenir la resistència a la fatiga d'un determinat material.

En el cas del material utilitzat (Acer estructural) el programa proporciona el següent gràfic, equivalent al diagrama anterior, el qual es mostra en l'Annex A.2:



Il·lustració 14 - Gràfic de variació de la tensió mitjana i la tensió variable

Com es pot veure, aquesta seria la corba del material obtinguda pràcticament pels tècnics del programa.

Per altra banda, la ruptura per fatiga vindrà determinada per la forma de la peça analitzada, per la càrrega que se li aplica i pel material utilitzat, on això podria ser motiu de re-disseny de la peça o estructura en cas d'obtenir una ruptura per fatiga en pocs cicles de treball.

Abans de procedir en la realització dels càlculs es definiran uns conceptes que s'estudiaran:

La vida de la peça anomenada "Life":

La vida de la peça es defineix com el nombre de cicles de la tensió variada aplicada que pot resistir abans de la seva fallada per enduriment d'una determinada secció degut a les propietats de ductilitat del material.

El dany anomenat "damage":

El dany és definit com el valor de la vida dissenyada respecte la vida útil de la peça. Un valor superior a 1 indica que aquesta part de la peça fallarà per fatiga abans que per vida de disseny.

Factor de seguretat:

El factor de seguretat, és un paràmetre que mostra la seguretat en que el sistema provocar la ruptura per fatiga o no. On un valor superior a 1 mostra que l'estructura no sofrirà ruptura per fatiga, mentre que un valor inferior a 1 aquesta fallarà degut a la fatiga.

Biaxiality Indication:

Els indicadors biaxials indiquen en cada part de la peça com actuen les tensions. Un valor de 0 indicaria una tensió uniaxial, un valor de -1 indicaria a una tensió tallant pura i un valor de 1 correspondria a una tensió biaxial pura.

3.1.2.2.3 Càlculs d'Harmònics

Un altre cas molt important a estudiar és com influencia la forma geomètrica d'una determinada figura quan es troba sotmesa a moviment de rotació amb una certa freqüència o a vibracions que excitin l'estructura. Per a totes les formes geomètriques s'obté una o més freqüències naturals¹⁰. Aleshores, es pot afirmar que quan un sistema és excitat treballant en una de les seves freqüències naturals, totes les masses es mouen amb la mateixa freqüència. A més, les fases amb les que oscil·len les masses són de valor exactament igual o contrari.

Per tant, en aquest sub-capítol, es determinen les freqüències naturals de les peces analitzades i les corresponents formes de cada mode vibracional, fent referència a la seva deformació quan aquest entra en ressonància amb l'harmònic corresponent.

Nogensmenys, quan es fa treballar el sistema en entorns de freqüències properes a les freqüències naturals, el sistema entrarà en ressonància¹¹. En altres paraules, quan una estructura o peça entra en ressonància vol dir que dona lloc a la inestabilitat del sistema o simplement a la ruptura del sistema en algun punt d'aquest; fenomen que es vol evitar i per això el motiu d'aquest sub-capítol per tal de verificar les peces dissenyades on aquestes treballaran en entorns no propers a les seves freqüències naturals.

Un dels mètodes utilitzats per evitar que vibracions properes a les freqüències naturals siguin absorbides per la peça o estructura és la utilització d'esmoreïdors de manera que aquests absorbeixin aquestes vibracions o les intentin disminuir.

¹⁰ La freqüència natural o harmònics naturals d'un sistema és la freqüència a la qual l'estructura oscil·larà en ser pertorbada.

¹¹ Freqüència de ressonància és aquella freqüència característica d'un cos o massa quan obté el seu màxim grau d'oscil·lació. Tot cos té una o diverses freqüències de ressonància.

Per tant, en aquest apartat es procedeix en calcular aquestes freqüències naturals de les peces perquè són de vital importància per al conjunt del simulador. A més, calculant aquestes freqüències, permet redefinir i redissenyar algunes de les peces per tal d'evitar que entrin en ressonància. Cal notar que en el nostre sistema de treball (simulador de moto GP) s'obté una gran font de vibracions procedent del servomotor. Aleshores, en aquest cas s'ha d'assegurar que qualsevol peça dissenyada treballi fora dels rangs de les seves freqüències naturals i en cas de no poder dissenyar una peça capaç de treballar fora dels rangs de les freqüències naturals, s'haurà de recórrer a la utilització d'esmoreïdors.

Per començar a analitzar un model, s'ha procedit en analitzar el mateix model que en els apartats anteriors, corresponent a la peça de suport del xassís superior del simulador, vegeu **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Per tal d'analitzar aquesta peça, vegeu l'Annex A.2 on es mostra la resolució completa de l'anàlisi modal de les peces estudiades on es centra en l'anàlisi de la peça del suport del xassís superior.

3.1.2.2.4 Càlculs de Vibracions Aleatòries

En el cas dels càlculs de vibracions, aquests es produeixen quan hi ha càrregues dinàmiques variables o quan els cossos vibren sota la influència de diversos polsos periòdics. Això també passa quan una massa no uniforme es troba en rotació i el seu centre de gravetat no està alineat amb el centre de rotació, cosa que produeix unes vibracions degudes a les excentricitats dels eixos. Per altra banda, el cas més important és quan aquests casos es sincronitzen amb les freqüències naturals de vibració cosa que comporta excitar una estructura quan aquesta obté el seu màxim grau d'oscil·lació, conduint-la a la ruptura o a deformacions no desitjables.

A més, un anàlisi de vibracions aleatòries permet determinar la resposta de l'estructura amb vibracions aleatòries trobades en la natura. Cal afegir que aquestes vibracions no són periòdiques i contenen multituds de freqüències, tot aquest historial de freqüències es guardat en l'espectre de freqüències¹², una taula que utilitza aquest historial com a càrregues vibracionals en l'anàlisi de vibracions aleatòries.

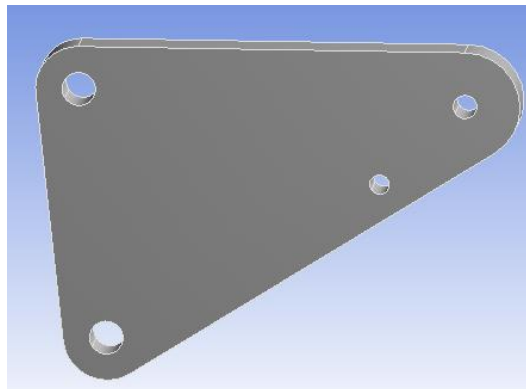
Tot el procediment de càlcul es mostra en l'Annex A.2 on inclou tot el procés d'anàlisi de vibracions aleatòries mitjançant el programa *Ansys*®.

¹² Aquest espectre de freqüències és anomenat amb Densitat de Potència Espectral de les sigles en anglès Power Spectral Density (PSD).

3.1.2.2.5 Càlculs d'Optimitzacions Topològiques de Masses

Aquest apartat s'ha incorporat en aquest treball per la necessitat en el món contemporani de l'optimització de cossos per tal de reduir la seva massa, el seu volum, etcètera i així utilitzar només la massa necessària en el lloc necessari i que l'estructura o la peça segueixi resistent de la mateixa manera les càrregues o condicions de contorn aplicades. En aquest projecte s'ha realitzat una optimització topològica de massa per tal de reduir la massa de la peça fins a un 40% i posteriorment un anàlisi per a reduir la massa de la peça fins a un 60% per així posar en pràctica les tècniques d'optimització que proporciona el programa *Ansys*®. Aquesta peça un cop optimitzada s'ha redibuixat per obtenir unes formes més mecanitzables ja que alhora de fabricar-la es farà a través d'un tall làser en una placa metàl·lica d'acer. En cas que la peça es fabriqués en una impressora 3D per a materials metàl·lics es podria obtenir o re-dissenyar la peça en formes més orgàniques.

En aquest sub-capítol analitzarem una peça ubicada en els estreps de la moto, utilitzada com a suport allargador de l'estrep. La peça de partida és la que es mostra en la Il·lustració 15 - Peça de partida per a l'optimització topològica de massa.



Il·lustració 15 - Peça de partida per a l'optimització topològica de massa

Vegeu l'Annex A.2 per seguir tot el procediment de càlcul d'optimització topològica de massa mitjançant el programa *Ansys*®.

3.2 Secció Elèctrica i Electrònica

En aquesta secció del treball es tracta els temes relacionats amb la part elèctrica i electrònica del simuladors de la mateixa manera que la programació d'aquest simulador. Aleshores, es parlarà en temes generals d'una part elèctrica o electrònica de potència i una part d'electrònica de control.

3.2.1 Circuits Elèctrics

Aquest simulador de moto GP ha de ser apte per a ser connectat a una xarxa de subministrament de tensió alterna de 220V i 50Hz almenys per poder ser comercialitzada a Europa i a gran part d'Àsia. Per tant, en la resta del circuit s'ha d'adaptar i integrar aquesta tensió que arriba per alimentar totes les parts elèctriques del sistema.

Llavors, en aquesta secció del treball es mostra detalladament en l'Annex A.3 tots els sistemes implementats en el simulador per adaptar aquesta tensió i protegir els circuits de sobretensions o curtcircuits fins a obtenir la senyal desitjada d'alimentació en cada sistema del simulador. A més, en aquest annex s'explica el funcionament dels drivers implementats per al control dels motors, amb tots els connectors utilitzats i les entrades i sortides. En un cas es disposa d'un driver programable amb diversos connectors on l'operari pot determinar la funció de cada pin dins del connector i per altra banda, el segon driver utilitzat, aquest ve amb tots els pins definits els quals s'especifiquen en aquest annex.

Cal mencionar que aquest simulador disposava d'un controlador PLC el qual estava alimentat a 24V DC conjuntament amb tot el sistema de sensors industrials integrats en el simulador. Per altra banda, també es disposa d'un dispositiu anomenat Raspberry Pi el qual està alimentat amb una tensió de 5V DC. A part dels sistemes existents en el simulador, en el següent capítol s'integra la part nova de control la qual ha d'anar alimentada a 5V DC. Llavors en l'Annex A.3 mencionat, s'explica tots els sistemes de potència implementats per aconseguir aquestes tensions partint de la tensió subministrada per la xarxa elèctrica externa a aquest simulador.

3.2.2 Circuits Electrònics i Programació

Una part de la secció electrònica en aquest TFG consisteix en implementar un nou sistema de control que no sigui el sistema convencional industrial de control corresponent al PLC. En aquest cas s'ha optat per a la implementació de microcontroladors per a realitzar les tasques de control, concretament els microprocessadors de la marca *Arduino*®. Aleshores, tot sistema digital treballa en unes tensions de 24V digitals i 0V – 10V analògicament. Aleshores, una altre fase d'aquest capítol és el disseny de circuits electrònics que adaptin aquestes tensions provinents dels sensors i sistemes industrials que rodegen la nova unitat de processament que controla el simulador¹³. Aleshores, aquests sistemes industrials, com s'ha comentat treballen en un rang de tensions de 0V a 24V on s'ha de realitzar uns circuits electrònics per poder combinar les dues

¹³ Aquests processadors treballen en un rang de tensions de 0V a 5V i per altra banda, el sector industrial normalment treballa en uns rangs de tensió compresos entre 0V i 24V

etapes, és a dir adaptar les tensions del microprocessador de 5V a 24V digitalment en tots els sentits i a més, analògicament¹⁴.

Anteriorment, per controlar aquest simuladors s'utilitzava un controlador basat en un PLC de la marca *OMRON*¹⁵ el qual treballava en unes tensions digitals de 24V i tensions analògiques de 0V-10V. Llavors, s'ha realitzat uns circuits que redueixen i augmenten aquestes senyals de control en funció de la tasca que es necessita realitzar. Per aquest motiu s'han dimensionat 4 circuits. De la part digital, s'han realitzat dos circuits un per augmentar digitalment (tot o res) la tensió, és a dir d'una sortida digital del microprocessador de 5V a la tensió de 24V. Aquest pas es necessitarà cada cop que es vulgui enviar una senyal provinent del microprocessador. Per altra banda, s'ha realitzat un circuit reductor de tensió digital (tot o res) que redueix de 24V a 5V, per adaptar senyals provinents de sistemes externs al microprocessador. Cal ressaltar que en el cas digital s'han realitzat els circuits amb aïllament entre una tensió i l'altre, és a dir, que és un circuit aïllat elèctricament de l'altre mitjançant optoacobladors.

Nogensmenys, també passa el mateix en el cas analògic. On s'han dimensionat dos circuits, un per la reducció de 10V-0V a 5V-0V i per l'altre banda, s'ha realitzat una augment de la tensió des de 5V-0V a 10V-0V analògics.

Tots aquests circuits citats es dimensionaran en l'Annex A.4 on s'exposarà cada circuits, es calcularà cada components i es dimensionarà en funció de determinats paràmetres dels diferents elements que els constitueixen. A més a més, es mostraran algunes de les característiques importants d'aquests components.

A part de dissenyar els circuits, s'han implementat pràcticament on s'ha hagut de dissenyar prèviament uns circuits electrònics mitjançant el programa *Kicad*[®] un programa on es pot realitzar dissenys en la part "schematics" i aquest ho sincronitza amb el disseny de PCB on posteriorment s'utilitzarà aquests dissenys per a fabricar-los amb el centre de fresatge de laUVic-UCC, una fresadora de control CNC de 3 eixos.

Un cop el disseny de la placa PCB ha set realitzat, es procedirà en implementar el programa *Vcarve*[®] per a indicar quines operacions ha de realitzar la fresadora i com les ha de realitzar. Llavors un cop fresades totes les plaques només caldrà soldar tots els components i es disposarà d'una placa electrònica per adaptar tensions d'un sistema a un altre. Tot el procediment de disseny, desenvolupament i fabricació es troba en l'Annex A.4

A part de fabricar circuits per integrar-los en el sistema de control, s'ha utilitzat un Arduino Mega 2560 com a centraleta, on aquest microprocessador s'ocupa del control de tots els sensors externs

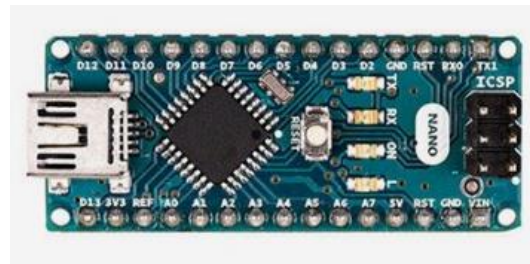
¹⁴ On analògicament, les tensions estan compreses entre 0V – 10V per a la part industrial del PLC i 0V – 5V per a la part del microprocessador.

¹⁵ Aquest PLC s'ha vist explicat en l'Annex A3

i del moviment del motor d'inclinació. A més, s'ha incorporat un altre microprocessador que porta la gestió del moviment del motor vertical el qual estableix una comunicació bidireccional amb l'Arduino Mega, el microprocessador establert per a la gestió del moviment vertical del simulador és un Arduino Nano.



Il·lustració 16 - Arduino Mega 2560 rev3



Il·lustració 17 - Arduino Nano

Com en els casos anteriors, el codi de programació d'aquests microprocessadors es mostra en l'Annex A.4

4. Resultats i Discussions de les millores proposades

En aquest capítol com s'ha citat anteriorment, es mostra i es discuteix tots els resultats obtinguts en el capítol 3. A l'igual que el capítol anterior, aquest també es divideix en dos sub-capítols; un sub-capítol de mecànica i un sub-capítol de part Elèctrica i Electrònica.

4.1 Secció Mecànica

4.1.1 Dibuix i Disseny

En aquesta secció com s'ha vist en el capítol 3 s'han presentat tots els dibuixos realitzats, i com a resultat es pot extreure que el nou sistema de muntatge i desmuntatge del simulador ha resultat satisfactori ja que es pot muntar i desmuntar l'estructura amb un temps mig de 5 minuts, cosa que abans de l'actualització aquesta es muntava amb un temps mig de 25 o 30 minuts. A més, respecte a les noves actualitzacions que s'han fet, s'ha fet la moto més estètica i s'han reduït els costos del simulador un 16% només en el nou disseny de l'estructura basada en acer.

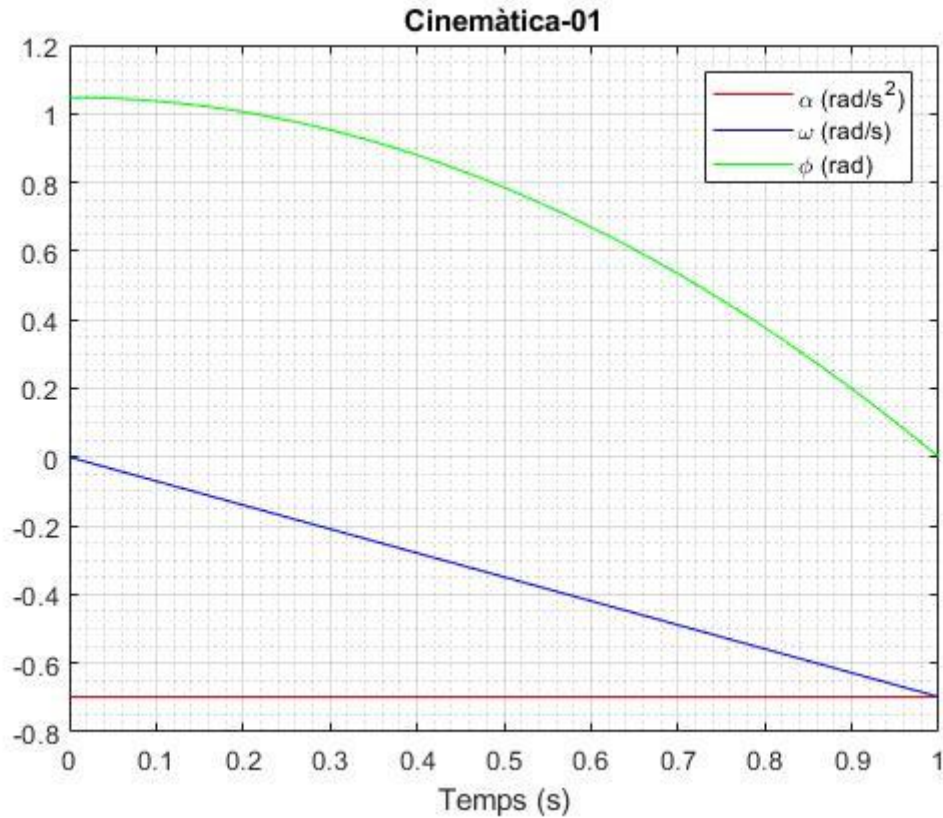
També en aquest apartat s'ha realitzat la nova implementació de *CreoView* on et genera un *ThingMark* el qual pots extreure el teu model 3D a la realitat augmentada del teu dispositiu mòbil per obtenir una millor visió de tots els components del simulador.

4.1.2 Càlculs Mecànics

4.1.2.1 Càlculs Cinemàtics i Dinàmics

Els resultats obtingut en els càlculs cinemàtics i dinàmics vistos en l'Annex A.1 són els que es mostren a continuació.

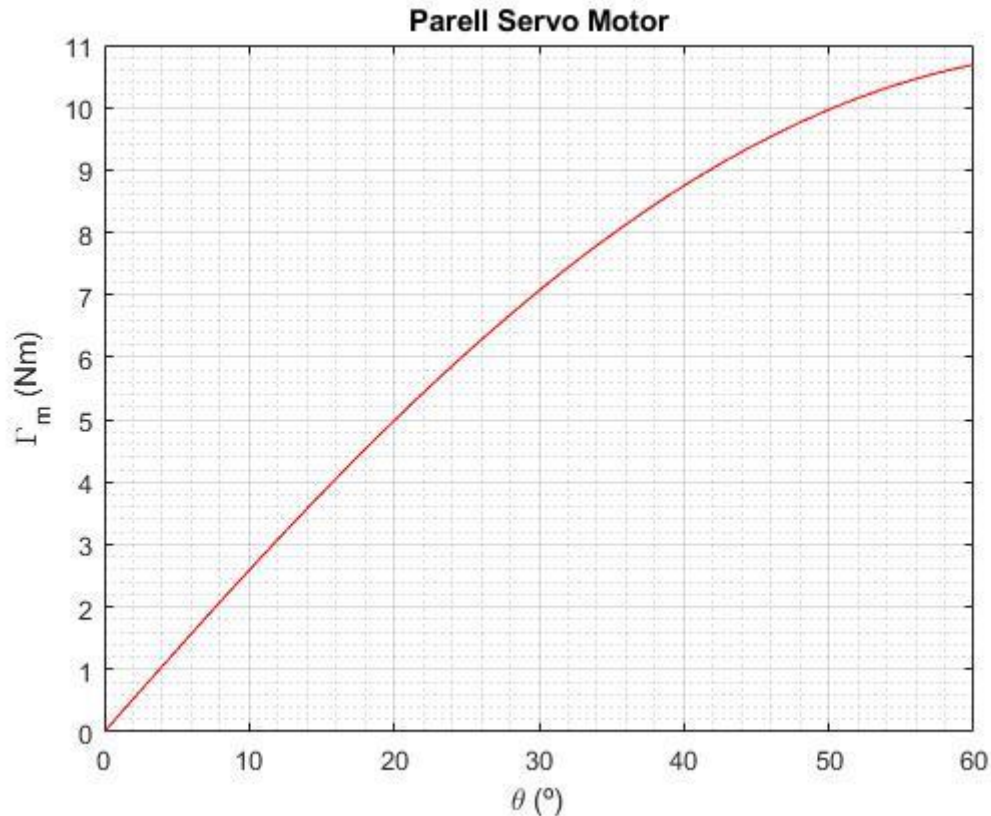
En la Il·lustració 18 - Gràfica de posició, velocitat i acceleració del xassís superior dels simulador des de 60° a 0° es mostra el perfil de posició angular, velocitat angular i acceleració angular imposat al motor. És un moviment angular uniformement accelerat, que ha de complir la condició d'anar des de 60° a 0° amb un 1 s.



Il·lustració 18 - Gràfica de posició, velocitat i acceleració del xassís superior dels simulador des de 60° a 0°

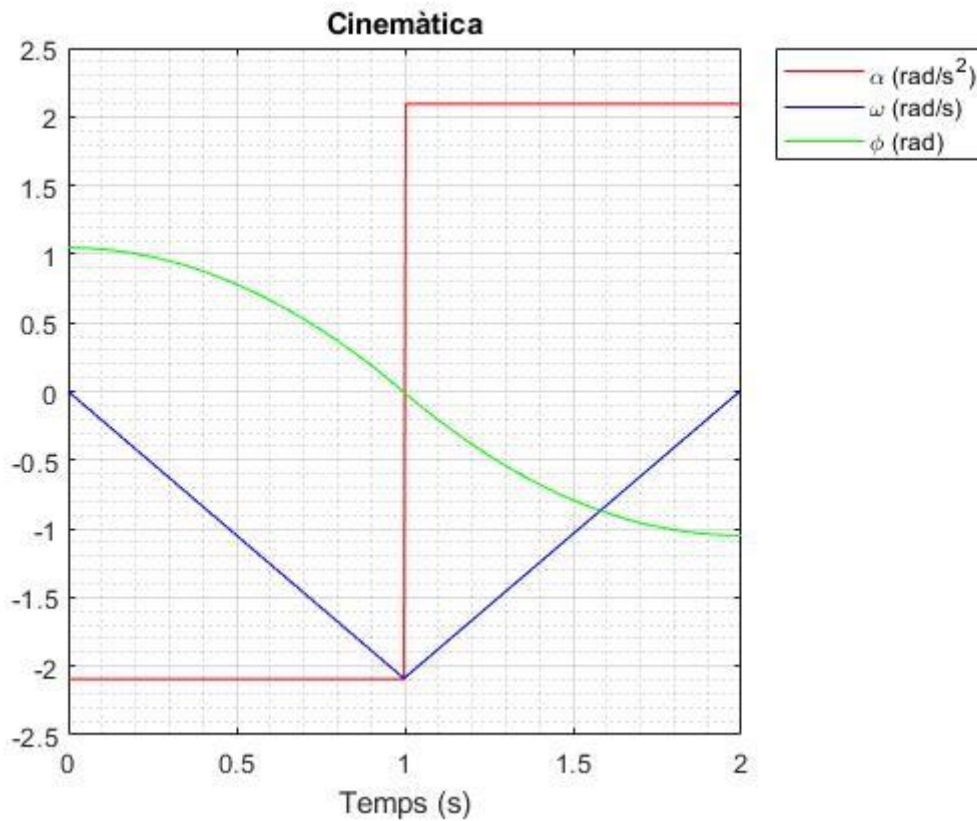
. Com s'ha mostrat en l'Annex A.1 es pot veure que obtenint unes velocitats, i acceleracions d'aquest estil, complint amb els requisits de pujar la moto amb un segon des de la seva màxima posició.

En la Il·lustració 19 - Parell del servomotor en el primer cas del codi es mostra el parell motor necessari per obtenir aquest moviment i s'observa com en la posició de màxima inclinació de 60° es requereix el parell màxim, que val 10,686 Nm. Com es pot veure en aquest gràfic, nosaltres partiríem de la posició inicial de 60° (corresponent a la dreta del gràfic) i just en aquesta posició, per tal d'accelerar el xassís superior i la persona, el motor hauria d'aplicar el seu màxim parell per a contrarestar i superar totes les forces que se li apliquen. A més, a mesura que anem avençant i ens apropem a la posició vertical de la moto, corresponent a 0° d'inclinació, el parell que necessita el motor és 0 Nm.



Il·lustració 19 - Parell del servomotor en el primer cas del codi

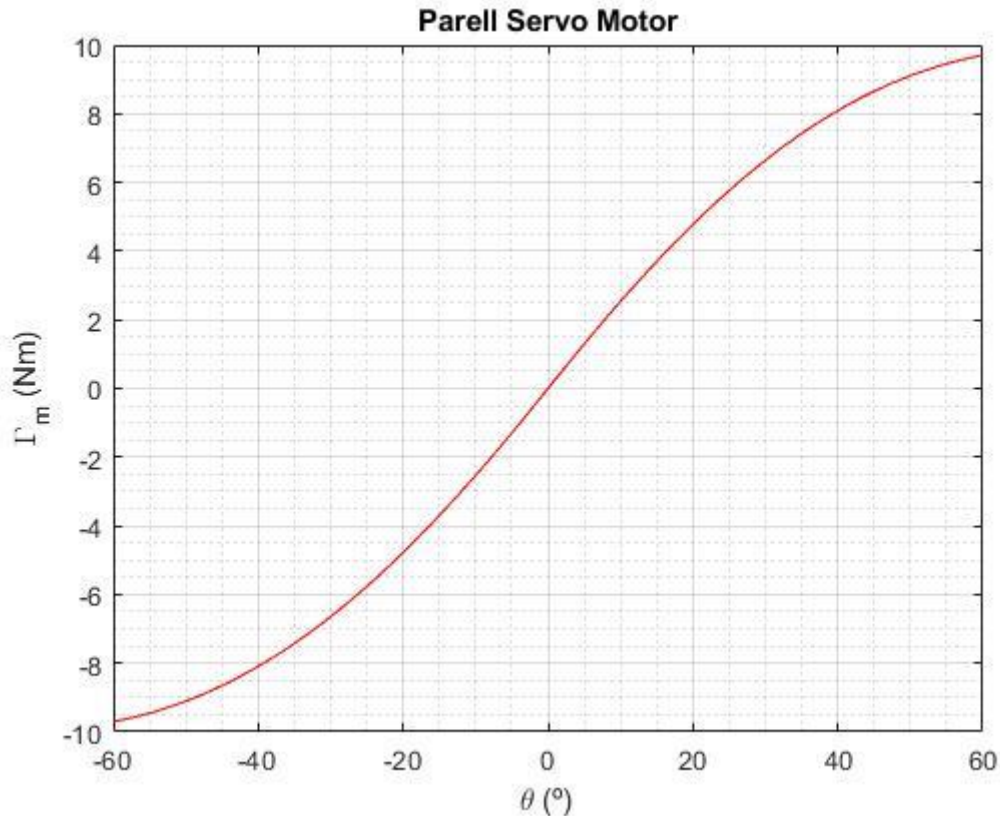
Com s'ha comentat en l'Annex A.1, s'han realitzat dos seccions de càlcul, on la segona secció correspon al moviment del simulador amb una acceleració i una desacceleració, és a dir, representant el moviment des de 60° a -60° . Per a realitzar aquest moviment, en la Il·lustració 20 - Gràfica de posició, velocitat i acceleració del xassís superior dels simulador des de 60° a -60° es pot veure la inclinació del simulador com va variant al llarg del temps, de la mateixa manera que la seva velocitat angular i la seva acceleració. En aquest cas, es pot veure que l'acceleració pren dos valors, un de negatiu i un de positiu, equivalents a una acceleració i una desacceleració respectivament. Per altra banda, el parell motor màxim que es necessita en aquesta situació equival a 9,7 Nm i el seu corresponent parell negatiu de frenada de -9,7 Nm.



Il·lustració 20 - Gràfica de posició, velocitat i acceleració del xassís superior dels simulador des de 60° a -60°

Com a resultat es pot dir que s'ha obtingut un bon model matemàtic per obtenir un bon dimensionament del motor en funció del parell que necessita, el motor requereix d'un parell nominal mínim de 10,686 Nm, seguit d'un sistema d'engranatges de planetaris axials.

Per últim, la variació del parell motor al llarg del temps en la segona secció del codi implementat és el que es mostra en la Il·lustració 21 - Parell del servomotor en el segon cas del codi.



Il·lustració 21 - Parell del servomotor en el segon cas del codi

Un cop seleccionat el parell necessari del motor, s'ha procedit en realitzar una selecció de motor i sistemes de reducció basats en el sistema de reducció d'engranatges planetaris axials. El motor seleccionat prové de la casa *Lenze* amb la referència: 0010 15640062 i algunes de les especificacions del producte es mostren a continuació:

Compact servo motor	
Motor	MCS 12H15LRS0P2
Tensión de alimentación	230 V CA
Potencia nominal	1,6 kW
Velocidad nominal	1500 r/min
Par nominal	10 Nm
Tensión nominal	158 V
Frecuencia nominal	100 hz
Intensidad nominal	7,8 A
Factor de potencia	0,89
Inercia motor	10,553 kgcm2
Índice de protección	IP54
Clase de temperatura	F
Forma constructiva motor	B5A160 (FF130)
Eje de motor dxi	19x40 mm sin chaveta
Conexión eléctrico-potencia	Conector
Conexión eléc.-realimentación	Conector
VMTXXX_KUEHLUNG_ANSCHLUSS	sin
Protección motor	KTY83 + PTC
VMTXXX_RUECKFUEHR_SICHERH	N
Transductor	Resólver RS0

Il·lustració 22 - Especificacions Servomotor

Aquest servomotor, també ha estat seleccionat en funció de les seves mides per a la part de disseny del simulador i a més, disposa d'un encoder de gran utilitat per la part electrònica.

Per altra banda, segons els paràmetres que s'han implementat en el codi, es necessita un sistema d'engrenatges planetaris axials, que segons els valors imposats en el codi, es selecciona un reductor planetari de la casa *Lenze* amb la referència 0020 13141507 on algunes de les seves característiques tècniques es mostren a continuació:

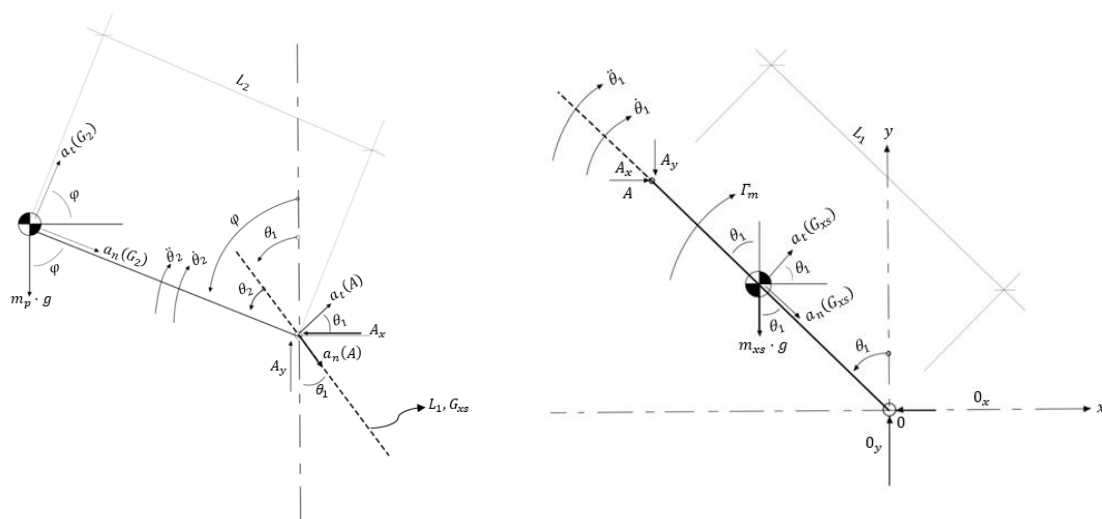
Reductor planetario	
Tipo	MPF16
Relación de reducción	100
Brida motor	130 / cuadrado
Diámetro de centraje	110 mm
Diámetro agujero centraje	130 mm
Motor agujeros mecanizados para eje motor	4xM8 19x40 mm
Tipo d. lubricante	Aceite mineral 150 c/St
Cara inferior	C
Indicador de nivel de aceite	E
Calidad / juego angular	Juego máx. 20 minutos
Color	RAL 9005 = Negro Jet

Il·lustració 23 - Característiques reductor planetari axial

Aquest reductor, també ha set seleccionat en funció de la relació de transmissió, pel seu sistema de reducció i en funció de les seves dimensions respecte al disseny del simulador.

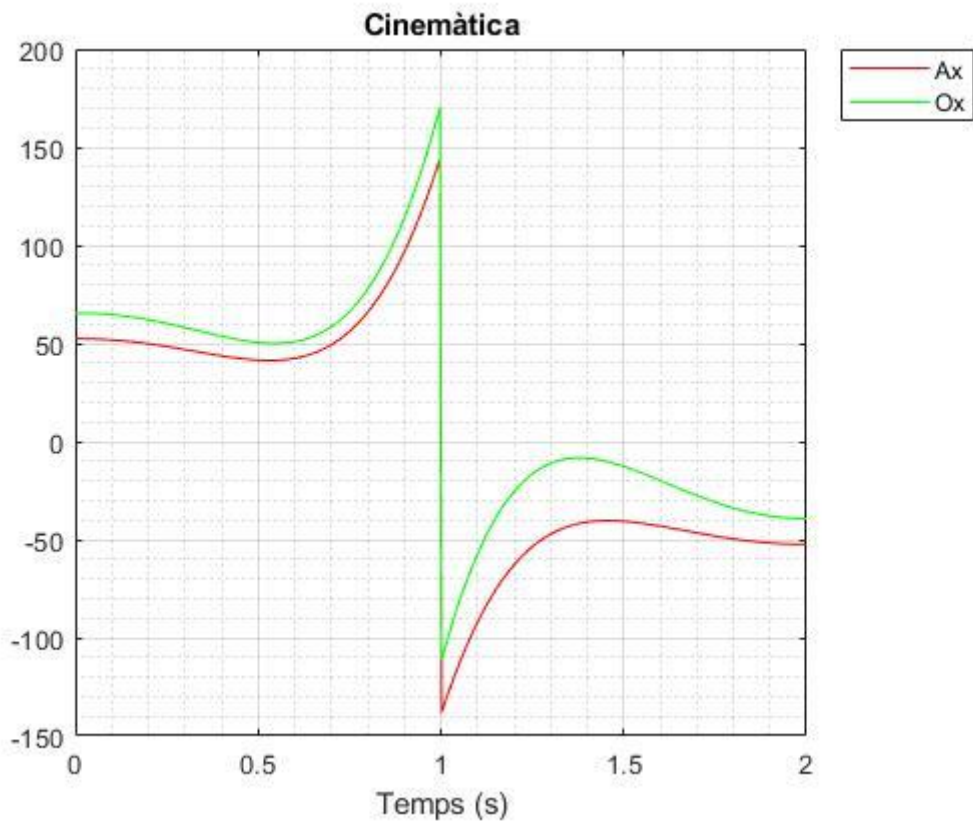
Com s'ha vist en el capítol 3 en l'apartat dels càlculs dinàmics, a continuació es mostraran els resultats obtinguts, que serviran de partida per analitzar estructuralment l'orella que centra l'eix del motor amb l'eix de gir del suport del xassis superior de la moto.

Les reaccions que s'han analitzat com s'ha mostrat en l'Annex són les reaccions en l'articulació A i en l'articulació O. On les reaccions en l'articulació O s'utilitzen per a realitzar un càlcul estructural de dimensionament d'aquesta orella que com s'ha citat es mostrarà més endavant. Per altra banda, fent referència a aquestes reaccions, es pot veure en la següent il·lustració els diferents DSL que s'han presentat en l'Annex per tenir constància de les reaccions que es parla.



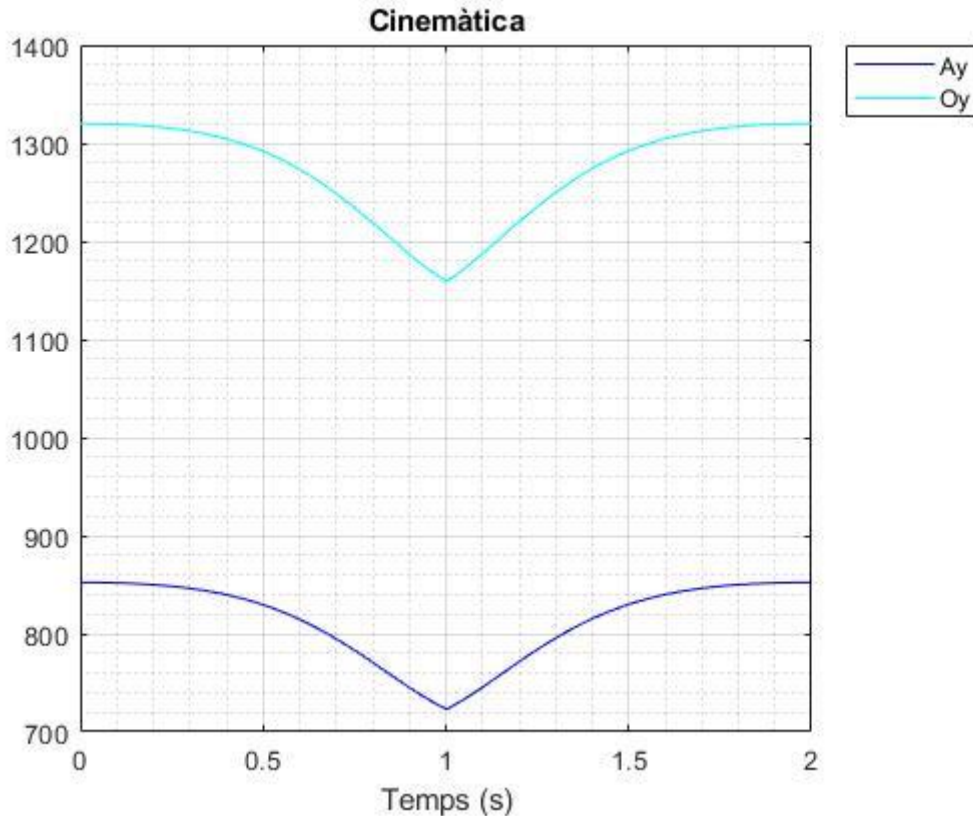
Il·lustració 24 - Diagrames DSL simulador i persona. Esquerra: DSL cos 2. Dreta: DSL cos1.

Aleshores, les reaccions obtingudes al llarg de l'eix X es mostren en la figura següent:



Il·lustració 25 - Reaccions al llarg de l'eix X

Per altra banda, les reaccions al llarg de l'eix Y són:



Il·lustració 26 - Reaccions al llarg de l'eix Y

Com es pot veure els valors màxims obtinguts en l'articulació O, ubicada en el centre de gir del simulador, són de 1320N respecte a la força vertical mentre que la màxima força aplicada horitzontalment és de 170N. Llavors, aquests resultats obtinguts seran utilitzats com a càrregues en l'apartat de càlculs estructurals de l'orella citada anteriorment.

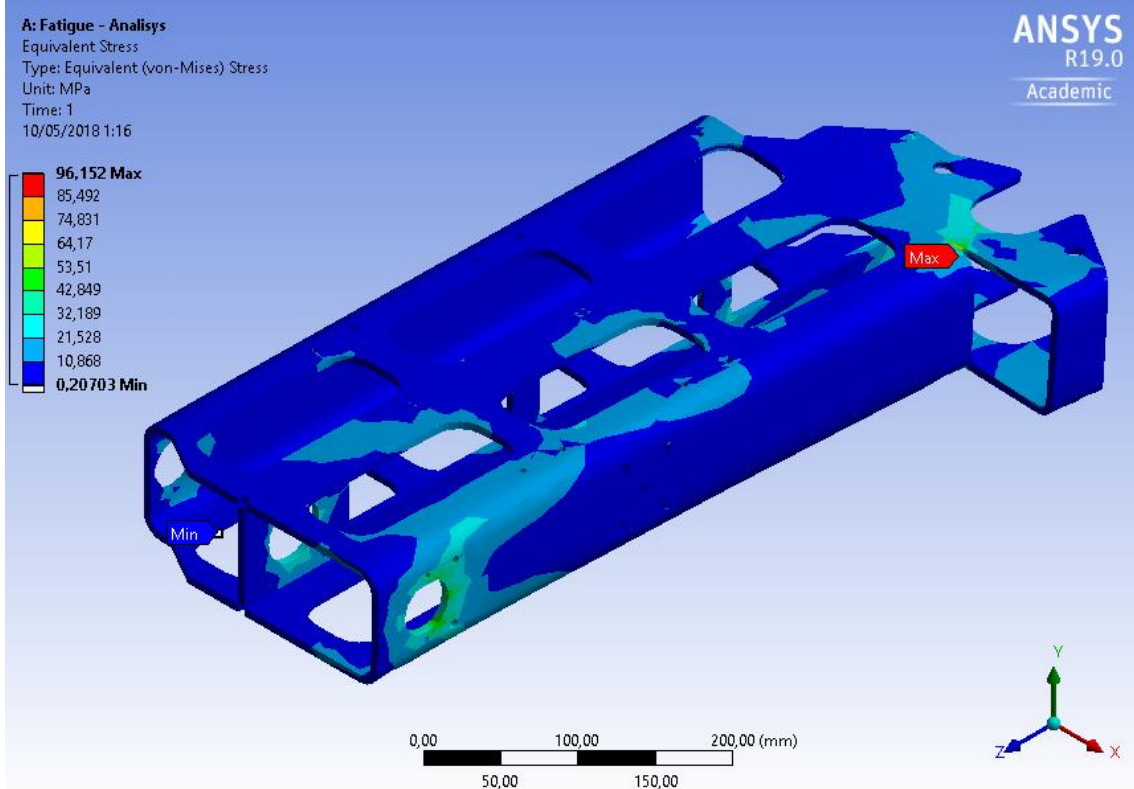
4.1.2.2 Càlculs Estructurals

En aquesta secció del treball es comentaran els resultats obtinguts dels càlculs estructurals realitzats en el capítol 3.

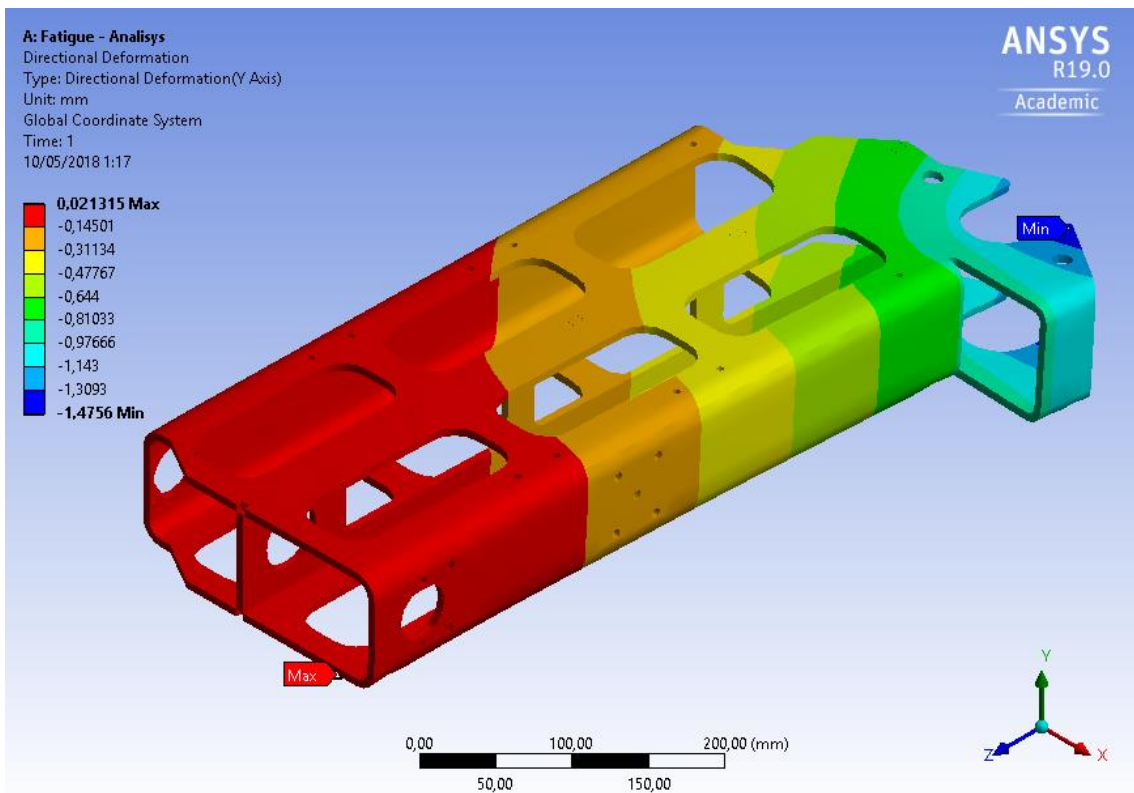
4.1.2.2.1 Càlculs Estructurals

Per la part de càlculs estructurals realitzats en l'Annex A2 en aquesta secció del TFG es presenta la discussió dels resultats. En aquest apartat s'ha estudiat la peça de suport del xassís superior, l'Orella citada i l'estructura del simulador. Per començar, es discutirà els resultats obtinguts de la verificació estructural de la peça de suport del xassís superior.

Tenint en compte aquestes les condicions de contorn aplicades i les càrregues que i actuen, vist en l'Annex A2. Els resultats obtinguts són els que es mostren a continuació, on es mostra la seva tensió equivalent de Von-Misses i la seva deformació al llarg de l'eix Y:



Il·lustració 27 – Tensió equivalent de Von-Misses



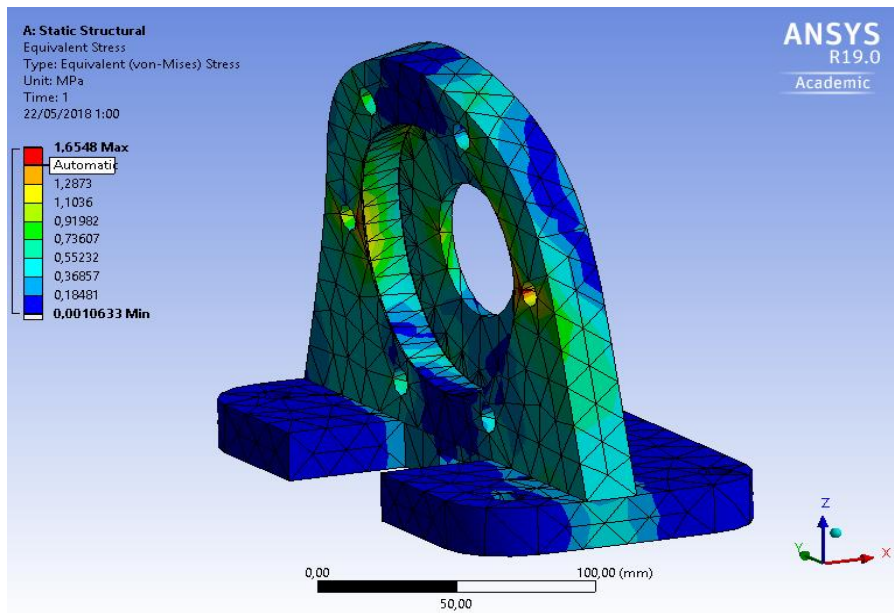
Il·lustració 28 - Deformació al llarg de l'eix Y

Aquesta peça la tensió màxima que podria resistir seria $\sigma_{max} \leq \sigma_y = 275 \text{ MPa}$ corresponent al seu límit elàstic però en aquest cas la tensió que ha de suportar és de 96,152 MPa. Per altra banda, la deformació màxima que pot assolir aquesta peça ve determinada per $\delta_{max} < \frac{L}{300} = \frac{560}{300} = 1,86 \text{ mm}$ i com es pot veure la deformació màxima adquirida és de 1,476 mm encara per sota de la deformació màxima permesa. D'aquesta manera es pot afirmar que la peça resistirà les càrregues aplicades.

Per altra banda, s'han realitzat els càlculs de vinclament, que comproven que l'estructura no es vinci en cas d'estar sotmesa a càrregues purament de compressió¹⁶. Com s'ha vist en l'Annex A.2, primer es realitza un càlcul estructural i seguidament un càlcul de vinclament, aleshores, els resultats obtinguts en la verificació estructural són satisfactoris ja que s'obté una tensió de 12,52 MPa i una deformació de 0,026mm. Vegeu la Il·lustració 66 - Tensió equivalent de Von-Misses – cas estructural i la Il·lustració 67 - Deformació total – cas estructural. Nogensmenys, cal ressaltar l'estudi de vinclament que s'ha realitzat per observar quines formes geomètriques podia adoptar aquesta estructura i a partir de quina càrrega assolia aquestes deformacions. Com s'ha vist, en cas de vinclament de l'estructura aquesta adoptaria unes configuracions molt rígides ja que per assolir aquestes configuracions de vinclament, les càrregues que s'han d'assolir són molt més elevades de les que s'assoleixen en el comportament mitjà de la vida útil d'aquest simulador. Donat que la càrrega mínima a partir de la qual l'estructura es comença a vinclar és de 182,92KN i en aquests cassos de càrrega l'estructura està carregada 1,5KN molt per sota de la tensió principal de vinclament.

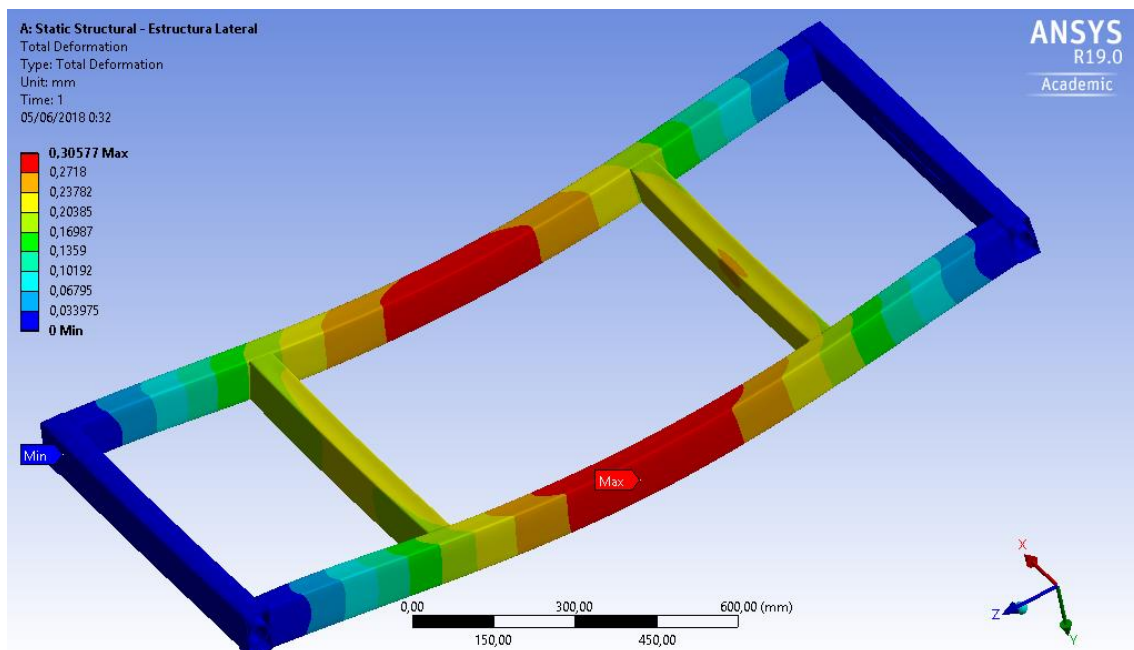
Respecte a l'Orella analitzada, mostrada en l'Annex A.2, els resultats obtinguts és de que es tracta d'una peça sobredimensionada ja que treballa en tensions de 1,66 MPa quan el seu límit elàstic es troba a 275MPa. Aleshores, aquesta peça es podria optimitzar o reduir la seva espessor. Per altra banda, per motius de disseny s'ha utilitzat aquesta espessor per obtenir un encaix ajustat en el posicionament d'aquesta peça. On en la il·lustració que es mostra a continuació es mostra la distribució de tensions en la peça i com es pot veure, la tensió màxima es troba ubicada als forats on és normal trobar tensions de valor 3 vegades superior a les tensions equidistants a aquest punt degut a la presència de forats.

¹⁶ Situació quan la peça es troba en una posició vertical (0° respecte a la vertical)



Il·lustració 29 - Tensió de Von-Misses en l'Orella

Com a últim tòpic a discutir en aquest apartat són els resultats obtinguts en la verificació estructural de l'estructura del simulador. On en aquest cas s'han realitzat dos tipus de càlculs i s'ha verificat aquesta estructura de diverses maneres. Per la part dels càlculs realitzats amb el programa Ansys, dels resultats se'n pot extreure la deformació total de l'estructura lateral sent aquesta de 0,31mm aproximadament de la Il·lustració 30 - Deformació Total Estructura Lateral i per a l'estructura central 0,573mm, vegeu la Il·lustració 89 - Deformació Total Estructura Central.



Il·lustració 30 - Deformació Total Estructura Lateral

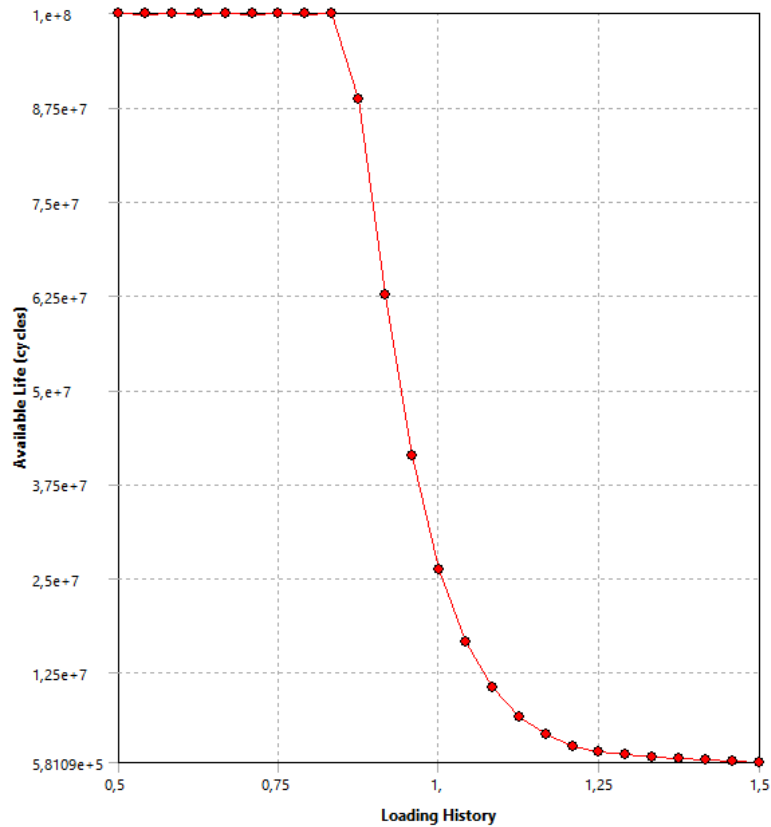
Sabent que a partir de l'expressió $\delta_{max} < \frac{L}{500}$ s'obté una deformació màxima de 3,42 mm. Aleshores es pot veure que aquesta és una estructura molt rígida respecte a les deformacions i per la part de tensions, s'obtenen unes tensions de 98,76 MPa de la Il·lustració 88 - Tensió de Von-Misses Estructura Lateral i sabent que el límit de l'estructura es situa a una tensió de 257 MPa es pot veure que aquesta resistirà les càrregues aplicades.

Per altra banda, referenciant el càlcul realitzat amb el programa Autodesk Robot, es pot veure que en les dues situacions, tant amb l'estructura totalment recolzada amb els 4 suports com en el cas que l'estructura es recolza amb els suports dels extrems, aquesta resisteix totes les càrregues aplicades degut a que en un cas estaria sol·licitada al 31,58% i en l'altre al 51,6% respectivament.

Finalitzant, s'ha realitzat una petita comprovació de bolc simulant que la moto està totalment inclinada amb una càrrega d'una persona de 100Kg en el seu extrem. Com s'ha vist en els resultats teòrics s'han obtingut les dues reaccions de valor positiu, cosa que indica que de la manera que estan dibuixades segons la Il·lustració 102 - Esquema càlcul bolc estructura mostra que qualsevol valor negatiu de les dues comportaria la inestabilitat del sistema significat així el bolc de l'estructura. Tret que aquest no és el cas i els dos valor s'han obtingut positius, es verifica que l'estructura no bolcarà.

4.1.2.2.2 Càlculs de Fatiga

Respecte als resultats obtinguts en l'anàlisi de fatiga cal ressaltar el nombre de cicles de càrrega que podrà aguantar aquesta estructura, és a dir, la corresponent vida útil del sistema. Per comprendre millor el valor d'aquesta vida útil es feia referència a la il·lustració següent, corresponent a una vida útil de 2.5×10^7 cicles.

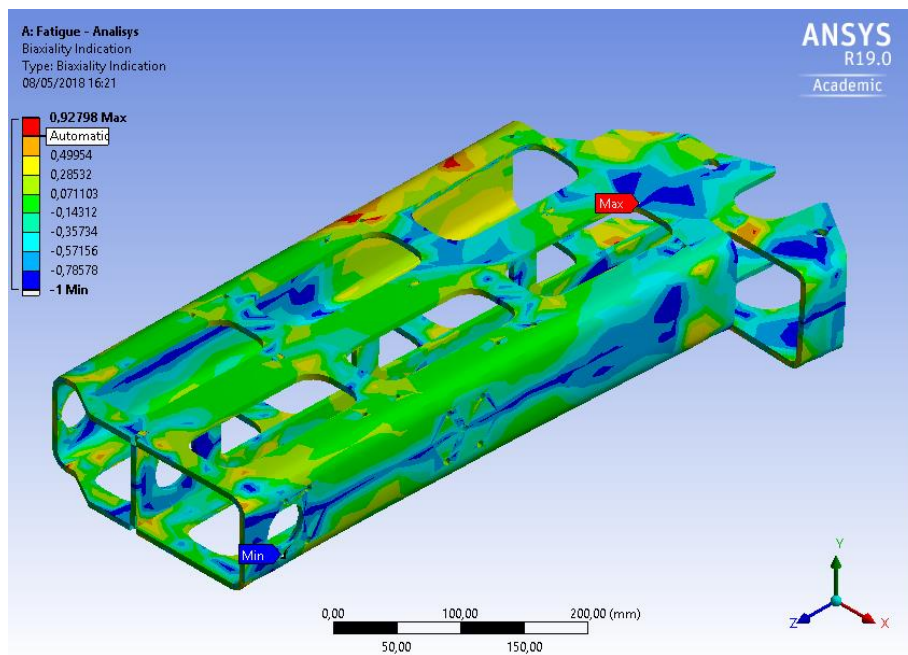


Il·lustració 31 - Vida útil de la peça en funció del rati multiplicatiu de càrrega

Com es pot veure en aquest gràfic, es mostra la proporció de càrrega que se li pot aplicar en l'estructura i es mostra la variació del nombre de cicles que podrà resistir. Per exemple, en cas que l'estructura estigues sotmesa a unes càrregues d'un 25% superior, aquesta aguantaria aproximadament 2×10^6 Cicles i si la càrrega que se li apliqués fos d'un 12% inferior, aquest sistema podria suportar aproximadament $8,8 \times 10^7$ Cicles. Aleshores, amb aquest gràfic es pot determinar aproximadament el nombre de cicles que pot resistir l'estructura en funció de la càrrega amb la que treballa.

Un altre factor important a destacar és el factor de seguretat el qual s'ha obtingut uns resultats compresos entre 0,86051 i 15 on el factor número 15 és el màxim factor que es pot aconseguir. Respecte al factor < 1 ubicat en el tall que es realitza per plegar el material, cal ressaltar que per tal de resistir millor i eliminar aquesta possible fallada per fatiga l'estructura s'ha soldat en aquest punt corregint així aquestes arestes amb variació de la seva forma geomètrica tan pronunciada.

Llavors, com a curiositat acadèmica cal ressaltar el diagrama de les tensions biaxials que actuen en aquesta peça on un valor de 0 indicaria una tensió uniaxial, un valor de -1 indicaria a una tensió tallant pura i un valor de 1 correspondria a una tensió biaxial pura. Aleshores, el diagrama obtingut és el que es mostra a continuació:



Il·lustració 32 - Biaxialitat del Sistema

4.1.2.2.3 Càlculs d'Harmònics

Com s'ha comentat en el capítol 3, el que s'ha pretès torbar en aquest apartat són tots els harmònics de l'estructura i per a quines freqüències l'estructura pot entrar en ressonància provocant així la ruptura d'aquesta o deformacions permanents no desitjades. Aleshores, de l'anàlisi realitzat en l'Annex A.2 se'n poden extreure els diferents nodes vibracionals del sistema, mostrats en la següent taula.

	Mode	<input checked="" type="checkbox"/> Frequency [Hz]
1	1,	189,03
2	2,	310,03
3	3,	312,78
4	4,	486,38
5	5,	604,17
6	6,	701,36

Taula 1 - Freqüències dels harmònics localitzats

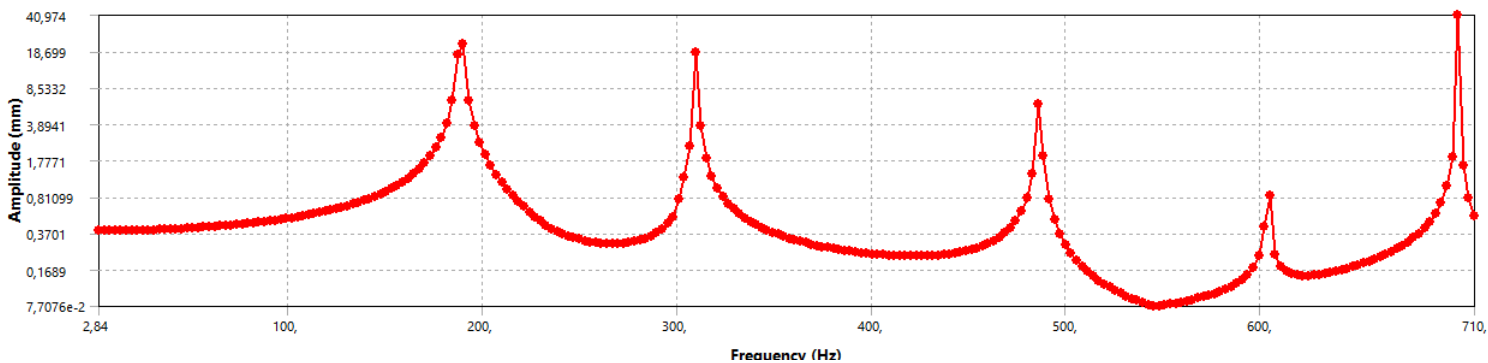
Com es pot veure en aquesta taula el primer mode vibracional que s'obté es troba a una freqüència de 189Hz. Conseqüentment, fent un anàlisi ràpid de les possibles vibracions que es poden trobar en tot el conjunt del simulador serien vibracions procedents dels motors. En aquest cas, fent un petit anàlisi en el servomotor, es pot veure que si el motor gira a una velocitat màxima de rotació angular de $w_m = 1500 \text{ rpm} = 25 \text{ voltes/s}$ és equivalent a entrar vibracions en l'estructura a una freqüència de 25 Hz. A més el sistema passa pel reductor d'engranatges planetaris axials d'aquesta manera es veu influenciada la velocitat angular on la velocitat angular obtinguda a la

sortida del reductor seria de 0.25 voltes/s equivalent a entrar freqüències en el sistema a una freqüència de 0.25Hz. Com es pot veure aquestes dues fonts de freqüències que hi ha en el sistema actuen a unes freqüències molt inferiors a la freqüència de l'harmònic fonamental o freqüència natural del sistema corresponent a una freqüència de 189.03 Hz. Llavors es pot afirmar que el sistema treballarà en un rang de freqüències fora de les freqüències dels harmònics, freqüències de les quals l'estructura podria entrar en ressonància i conseqüentment, ser conduïda a la ruptura.

Successivament, en l'Annex A2 s'estudiava les diferents formes geomètriques que pot obtenir l'estructura al entrar en ressonància amb les freqüències de cada harmònic, on com es pot veure en cada harmònic, les deformacions són pròpies d'un estat en ressonància ja que són deformacions de l'ordre de 30 mm per una peça de longitud de 560mm corresponents a unes deformacions 16 vegades més grans que la deformació màxima permesa per l'estructura. Això vol dir que aquesta estructura col·lapsaria al obtenir unes deformacions tan gran i alhora podent ser aquesta excitada per qualsevol força externa al sistema.

Un altre aspecte molt important d'aquest anàlisi és l'escombrat de freqüències que ens proporciona el programa, on ens diu quines amplituds d'oscil·lació del sistema es podrien obtenir per a cada freqüència identificant així la ubicació dels diferents harmònics en l'espectre de freqüències.

La imatge més característica d'aquest espectre de freqüències és la que es mostra a continuació:

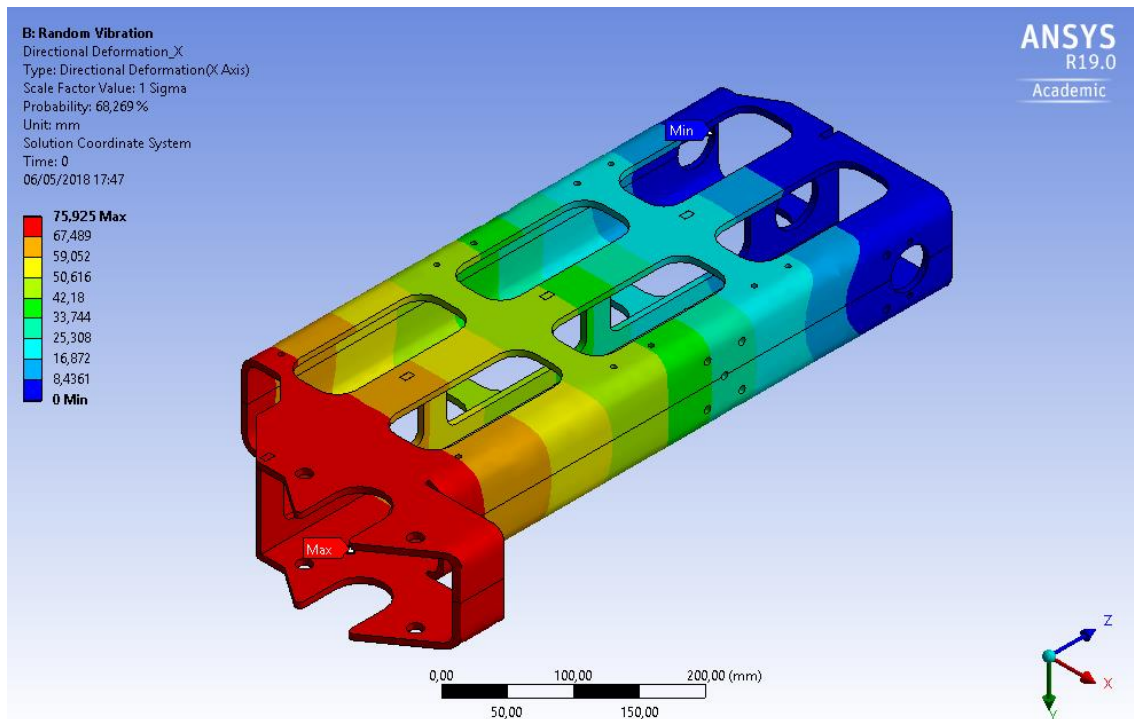


Il·lustració 33 - Deformació respecte a l'eix Y

D'aquest gràfic es pot veure com varia l'amplitud d'oscil·lació de l'estructura en funció de la freqüència amb la que s'excita.

4.1.2.2.4 Càlculs de Vibracions Aleatòries

Respecte a la part d'anàlisi de vibracions aleatòries aplicades en l'estructura s'obté el gràfic anomenat desplaçament PSD que serà el gràfic a través del qual s'excita el sistema i consegüentment, es mostren les deformacions de l'estructura on la deformació màxima assolida és en el cas de l'eix X on assoleix una deformació màxima de 75.905 mm, en l'eix Y 8.3704 mm i per últim en l'eix Z de 9.7848 mm, és a dir, que en un cas aleatori que se li apliquin vibracions aleatòries d'elevada freqüència provinents de la natura, la màxima deformació que podria obtenir seria de 75.905 mm on seria en freqüències properes als harmònics de la peça la qual la conduirien a la ruptura degut a la ressonància en la que hauria entrat.

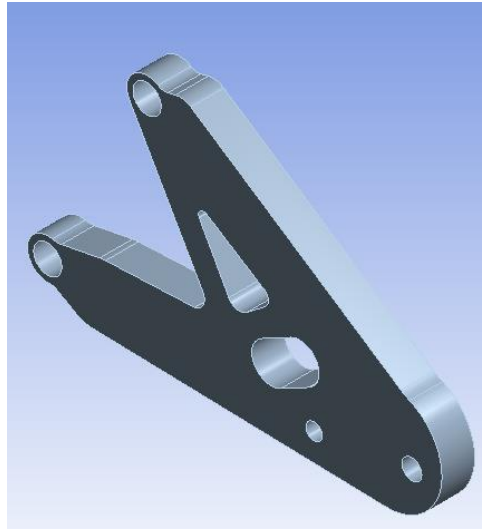


Il·lustració 34 - Deformacions al llarg de l'eix X - Anàlisi de vibracions aleatòries

Vegeu les il·lustracions de l'Annex A.2: Il·lustració 136 - Deformació direccional eix Y i Il·lustració 137 - Deformació direccional eix Z.

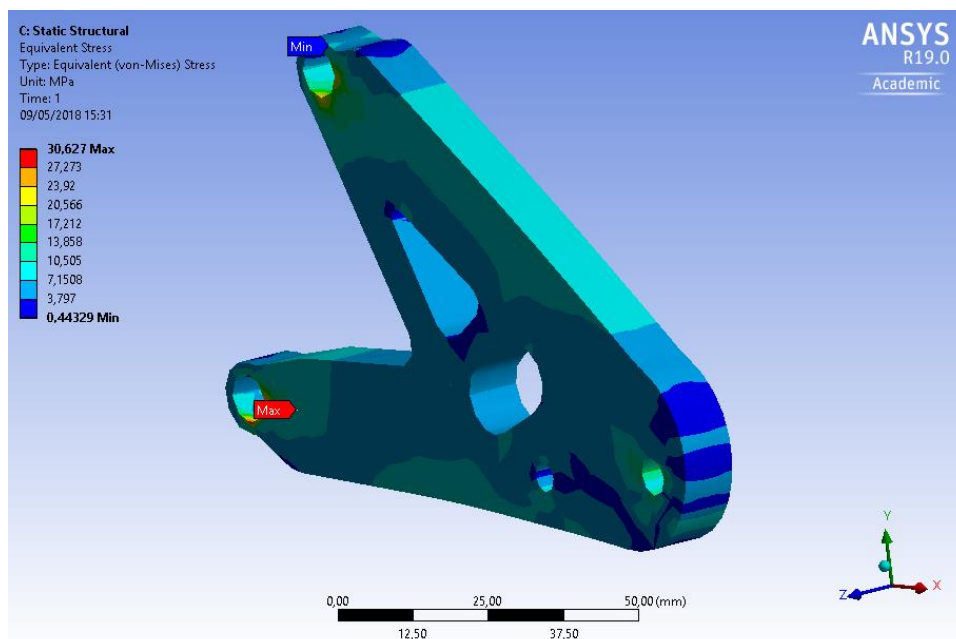
4.1.2.2.5 Càlculs d'Optimitzacions Topològiques de Masses

Per part dels càlculs d'optimització topològica de la figura de suport de l'estrep, es pot veure que s'ha obtingut 2 tipus de resultats diferents: un amb una optimització de la massa del 40%, és a dir, conservant un 60% de la massa inicial i amb una espessor de 10mm; mentre que el segon resultat que s'ha obtingut, és el d'una optimització de la massa del 60% conservant el 40% de la massa i amb una espessor de la peça de 6mm. El primer resultat que s'ha obtingut re-dissenyant la peça ha set el que es mostra en la següent imatge:



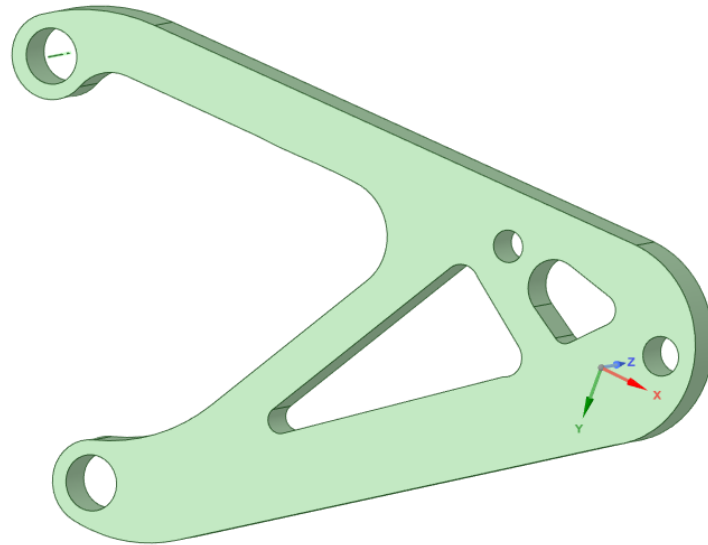
Il·lustració 35 - Optimització topològica Versió 01

Respecte aquesta peça, els resultats de tensió de Von-Misses, s'ha obtingut una tensió màxima de 30,627MPa sent aquesta molt inferior al límit elàstic del material motiu pel qual es va realitzar un segon anàlisi. Vegeu la següent il·lustració:



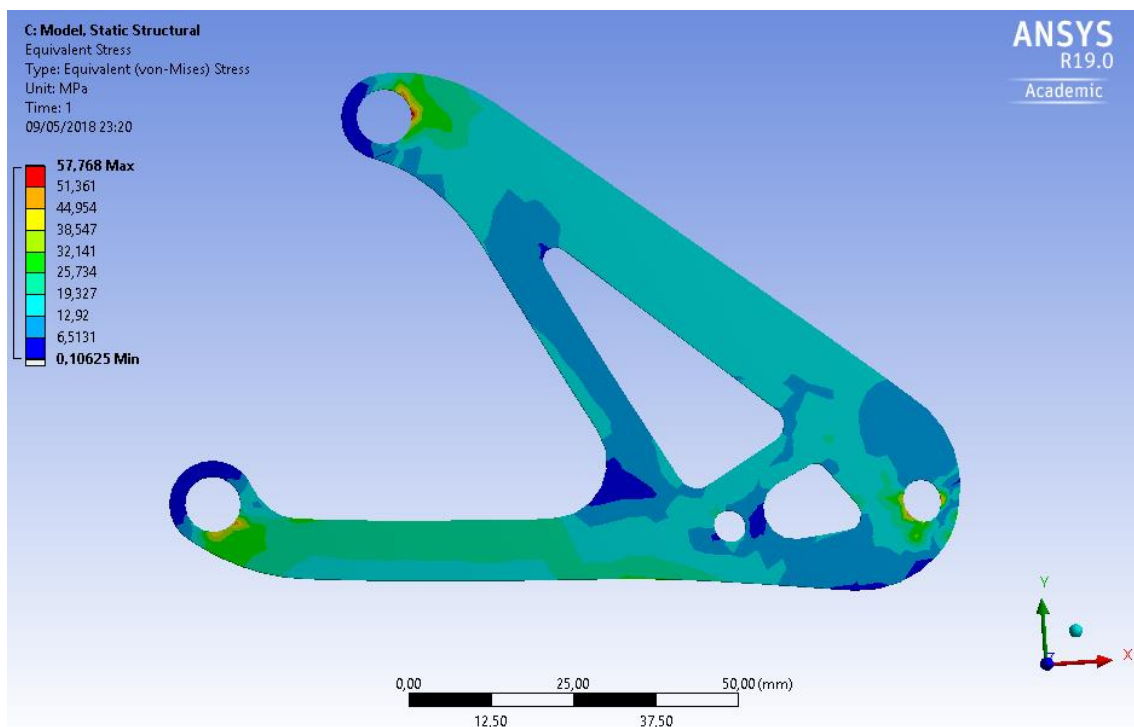
Il·lustració 36 - Tensió equivalent de Von-Misses de la peça optimitzada Versió 01

Per part de la deformació s'ha obtingut una deformació en l'eix de les Y de 0.01mm una deformació inapreciable. Per altra banda, el resultat re-dissenyat en el segon cas és el que es mostra en la següent figura:



Il·lustració 37 - Optimització topològica Versió 02

I els resultats obtingut com la tensió màxima de Von-Misses on en aquest cas és de 57,768 MPa, també és una tensió molt allunyada del límit elàstic del material, però es considerarà aquesta peça com a peça definitiva. Vegeu il·lustració consecutiva:



Il·lustració 38 - Tensió equivalent de Von-Misses peça optimitzada Versió 02

Respecte a la deformació, s'ha obtingut una deformació màxima de 0,02 mm, sent aquesta també una deformació inapreciable pel sistema.

4.2 Secció Elèctrica i Electrònica

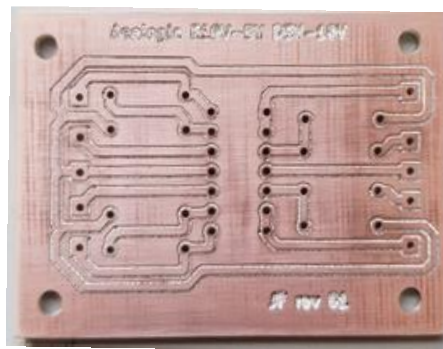
En aquesta secció es comenten i discuteixen els resultats obtinguts en la part elèctrica, electrònica i de programació del sistema. Al igual que al capítol 3 aquesta secció està dividida en dos sub-capítols, un per a la part elèctrica i l'altre per a la part electrònica

4.2.1 Circuits Elèctrics

En aquesta secció s'ha pogut establir un sistema de control de la tensió provinent de la xarxa la qual ha passat per diverses etapes per arribar a alimentar els diferents sistemes del simulador a diferents tensions. A més s'ha definit i establert els diferents connectors i els diferents pins que s'utilitzen en el driver referenciats a la part de control dels motors.

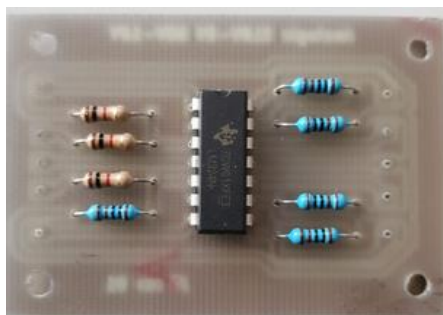
4.2.2 Circuits Electrònics

En aquest apartat s'havien calculat, dimensionat i fabricat diferents circuits electrònics per adaptar tensions de sistemes exteriors del microprocessador amb tensions de 24V i s'han realitzat circuits per adaptar aquestes tensions a 5V. Aleshores, els circuits que s'han obtingut físicament són els que es mostren a continuació, on ja tenen els seus components respectius.



Il·lustració 39 - Circuit electrònic fresat per la capa de coure

I amb els components soldats queda de la següent manera:



Il·lustració 40 - Circuit electrònic amb components soldats

Respecte als resultats obtingut de l'apart de control mitjançant els microprocessadors es pot mencionar que els resultats esperats són els correctes donat que es pot inicialitzar el driver i accedir a tots els senyals, tan analògics com digitals, tan d'Input com d'Output, però aquest procés de control com s'ha vist en l'Annex A4.8, resta a l'espera fins al dia de la presentació del TFG ja que encara esta en desenvolupament. Aleshores, els resultats d'aquest apartat es presentaran amb l'Annex d'ampliació anomenat Annex A.6 Ampliació de codi en Arduino.

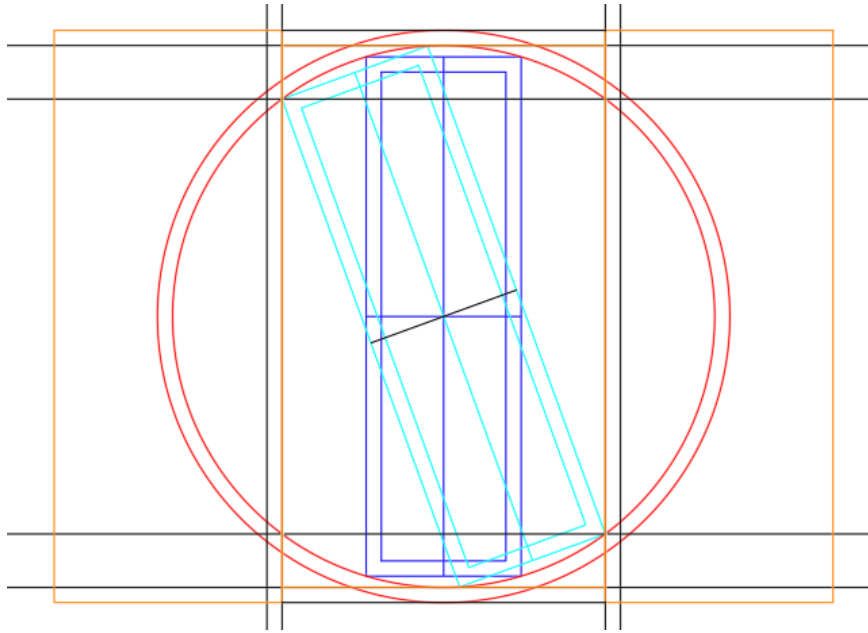
5. Conclusions

En aquesta apartar es mostren les conclusions assolides durant el transcurs del TFG. Des del punt de vista personal, es pot afirmar que s'han adquirit coneixements significatius realitzant aquest TFG i que en aquesta fase de la carrera universitària és on s'agrupen tots els coneixements obtinguts durant la carrera i per així poder-los posar en pràctica.

D'altra banda, referenciant els objectius s'ha aconseguit el seu acompliment, concretament el de l'optimització de massa on s'han realitzat càlculs i optimitzacions de fins a un 60% de la massa. Respecte al temps de muntatge i desmuntatge, aquest s'ha reduït a un temps de 5 min aproximadament i pel temps de fabricació, ara es pot soldar tota l'estructura eliminant així tot el temps de muntatge i unió dels diferents cargols que componien aquesta estructura.

5.1 Recomanacions de pròxims passos

Com a proper pas a seguir es podria millorar de nou l'estructura del simulador afegint un tercer grau de llibertat, corresponent al moviment de rotació respecte a l'eix Z del simulador, és a dir, vist des de la part superior tal com es mostra en el següent esquema, es podria afegir una plataforma rotatòria on permetés el moviment rotatori de tot el conjunt del simulador d'aquesta manera es podria aportar una nova sensació a les persones que utilitzessin aquest simulador.



Il·lustració 41 - Proposta de millora del sistema de rotació

A més, una de les coses que ha quedat pendent, és la millora de la interacció del simulador amb la PlayStation® on s'havia de modificar el programa de la Play amb els proveïdors del joc de Moto GP i així poder establir una comunicació entre el simulador i la Play.

Un altre punt a millorar seria el sistema de pujar de la moto, on actualment el simulador pot pujar gràcies a l'acció que dona l'usuari amb el gas, però s'hauria de torbar un nou sistema que s'ajustés més a la realitat on una acció proposada seria la de girar el volant per pujar.

6. Agraïments

Voldria agrair tot l'ajut d'aquelles persones que han fet possible la realització d'aquest treball final de grau i la paciència que han tingut al llarg del curs acadèmic. Especialment vull donar gràcies a: Kini Muntada, Pau Català, Antoni Suriñach, Sandra Szewczak, Jordi Franquesa, Jordi Serra, Moisès Serra, Juli Ordeix, Junjie Zhu, Rut Tió, Enric Lopez, Sergi Grau, Oriol Garcia i Alex Crivillé.

7. Bibliografia

- [1] «Atrapalo,» [En línia]. Available: https://www.atrapalo.com/actividades/simulador-de-vuelo-boeing-737-800ng_e86846/. [Último acceso: 5 4 2018].
- [2] «tworeality,» [En línia]. Available: <https://www.tworeality.com/simuladores-realidad-virtual/>. [Último acceso: 5 4 2018].
- [3] «Birdly,» inparkmagazine, [En línia]. Available: <http://www.inparkmagazine.com/d3d-birdly/>. [Último acceso: 5 4 2018].
- [4] P. Benham, «Mechanics of Engineering Materials,» Pearson prentice hall, 1996, pp. 544-546.
- [5] -, «Fatigue Life Evaluation,» [En línia]. Available: http://www.public.iastate.edu/~e_m.424/Fatigue.pdf. [Último acceso: 08 05 2018].
- [6] BSI, «Eurocode 3: Design of steel structures,» 2012.
- [7] SE-AE, «Seguridad Estructural CTE,» 2009.
- [8] ANSYS®, «Ansys Mechanical User's Guide,» ANSYS®, [En línia]. Available: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v190/wb_sim/ds_Home.html. [Último acceso: 29 05 2018].
- [9] T. Instruments, «LM324-N,» Texas Instruments, 2015.
- [10] Lenze, «Lenze Hardware Manual,» [En línia]. Available: http://download.lenze.com/TD/E84AVxCx__8400%20StateLine-HighLine-TopLine%200.25-45kW__v10-0__EN.pdf. [Último acceso: 3 06 2018].
- [11] Lenze, «Lenze Inverter Driver 8400 TopLine,» [En línia]. Available: http://download.lenze.com/TD/E84AVxCx__8400%20StateLine-HighLine-TopLine%200.25-45kW__v10-0__EN.pdf. [Último acceso: 03 06 2018].
- [12] Omron, «Omron,» [En línia]. Available: https://assets.omron.eu/downloads/datasheet/es/j130_g9sb_safety_relay_unit_datasheet_es.pdf. [Último acceso: 03 06 2018].
- [13] BSI, «Eurocode 3: Design of steel structures,» 2012.
]
- [14] SE-AR, «Seguridad Estructural CTE,» 2009.
]

Annex A.1 - Càlculs Cinemàtics i Dinàmics

En aquest Annex es mostren els càlculs cinemàtics i dinàmics utilitzats per determinar l'equació que descriu el parell que necessita el motor en cada instant de temps i en cada posició en funció de molts paràmetres externs tal com el rendiment del motor, la relació de reducció del sistema d'engrenatges planetaris axials i les masses considerades. Aleshores, a continuació es mostra el procediment que s'ha utilitzat per obtenir l'equació del Parell motor on posteriorment, aquesta equació s'implementarà amb el programa *Matlab*® per simular el parell que necessita el motor en cada instant de temps i en cada posició. Per determinar el parell, es partirà de l'equació de potència següent, on tota potència que entra equival a tota la potència que surt més la derivada de l'energia cinètica acumulada:

$$P_{in} = P_{out} + \dot{E}_c \quad [6]$$

Per procedir, cal recordar les següents equacions que s'utilitzaran:

$$P = \Gamma w \quad [7]$$

$$i = \frac{1}{\tau}$$

Fent una igualtat es pot expressar de dos maneres diferents la velocitat angular del motor:

$$w_m = \dot{\theta}_m$$

Cal ressaltar, que es disposa de dos velocitats angulars; una velocitat angular procedent del servomotor anomenada w_m i una velocitat angular havent passat pel sistema de reducció d'engrenatges planetaris anomenada $w_{s,red}$ on aquesta velocitat vindrà determinada en funció del tren d'engrenatges present i de la seva relació de reducció. Es considerarà que la relació de reducció és de $i = 100$ un valor estàndard que es pot trobar en el mercat. Cal recordar que la substitució de valors només s'aplica al final quan s'utilitza l'equació final per implementar-la amb el *Matlab*. Procedint amb l'obtenció de l'equació, es pot escriure l'equació [6] utilitzant l'equació [7]:

$$\Gamma_m \cdot w_m = \Gamma_{s,red} \cdot w_{s,red} + \dot{E}_c \quad [8]$$

En aquesta equació s'obté una relació entre el parell del motor i el parell de sortida del reductor. A més, s'utilitzarà la següent equació que relaciona la velocitat angular d'entrada i la velocitat angular de sortida:

$$\tau = \frac{w_s}{w_e} = \frac{w_{s,red}}{w_m}$$

Aplicant-la a l'equació [8]:

$$\Gamma_m \cdot \omega_m = \Gamma_{s,red} \cdot \tau \cdot \omega_m + \dot{E}_c$$

D'aquesta equació es pot dir que l'acumulació de la derivada de l'energia cinètica és 0 en un cas ideal:

$$\Gamma_m \cdot \omega_m = \Gamma_{s,red} \cdot \tau \cdot \omega_m$$

Aïllant termes s'obté una equació que relaciona el parell d'entrada (Parell motor) amb el parell de sortida (Parell del reductor):

$$\Gamma_m = \tau \cdot \Gamma_{s,red} \quad [9]$$

Per altra banda, partint de la mateixa equació d'inici es pot obtenir els resultats d'una manera més precisa i concisa on s'inclou les propietats de cada cos en el sistema¹⁷. Aleshores, partint de la llei de conservació de l'energia:

$$E_{in}|_1^2 = E_{out}|_1^2 + \Delta E_{acum}|_1^2$$

I derivant aquesta respecte al temps:

$$\frac{d(E_{in}|_1^2)}{dt} = \frac{d(E_{out}|_1^2)}{dt} + \frac{d(\Delta E_{acum}|_1^2)}{dt}$$

S'obté l'equació mostrada anteriorment:

$$P_{in} = P_{out} + \dot{E}_{acum} \quad [10]$$

Per altra banda, en aquest cas no es considerarà l'energia acumulada com a 0 sinó que s'implementa la derivada d'aquesta de la següent manera:

$$\frac{d(E_c)}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} m v^2 \right)$$

On aquesta derivada queda de la forma següent:

$$\dot{E}_c = m v a \quad [11]$$

A més, sabent la relació:

$$P = F v \quad [12]$$

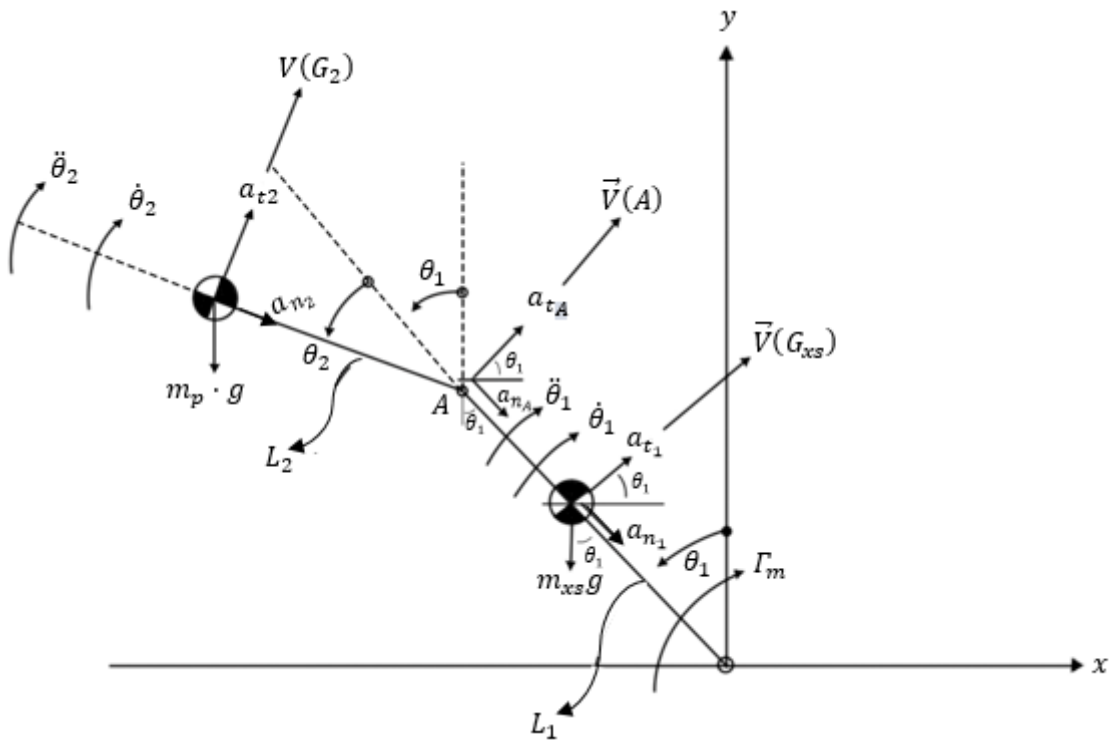
¹⁷ Fent referència al cos del xassís de la motocicleta i al cos de la persona.

Es pot escriure l'equació [10] utilitzant els paràmetres de les equacions [11] i [12] aplicades a cada cos del sistema. L'equació resultant que serveix per obtenir el parell del motor en cada instant de temps i en cada posició del sistema vindrà descrita per:

$$\Gamma_m \cdot \omega_m = P_{xs} \cdot \vec{V}(G_{xs}) + P_p \cdot \vec{V}(G_2) + P_{rp} + m_{xs} \cdot \vec{V}(G_{xs}) \cdot \ddot{\alpha}(G_{xs}) + m_p \cdot \vec{V}(G_2) \cdot \ddot{\alpha}(G_2)$$

[13]

A on: $\vec{V}(G_{xs})$ i $\ddot{\alpha}(G_{xs})$ són la velocitat lineal i acceleració lineal del punt corresponent al centre d'inèrcia del xassís de la moto. $\vec{V}(G_2)$ i $\ddot{\alpha}(G_2)$ són la velocitat lineal i acceleració lineal del punt corresponent al centre d'inèrcia del pilot. Cal ressaltar que aquesta equació no està desenvolupada del tot i hi falta molts paràmetres per determinar. Per desenvolupar aquesta equació cal mirar el següent esquema on inclou una esquematització de totes les forces, angles, velocitats angulars, acceleracions angular i el parell motor. D'aquesta manera es podrà desenvolupar l'equació [13].



Il·lustració 42 - Esquema del simulador de moto GP amb un pilot incorporant tots els paràmetres implementats en els càlculs.

Per desenvolupar l'equació s'ha de calcular les velocitats i acceleracions que no hi són presents, corresponent a les velocitats tangencials dels cossos i les acceleracions d'aquests. Procedint amb els càlculs de la velocitat tangencial a partir de la fórmula:

$$v = \omega \cdot r$$

La velocitat tangencial del xassís superior (G_{xs}) serà:

$$\vec{V}(G_{xs}) = \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \cdot \frac{L_1}{2} \cos(\theta_1) \hat{i} \\ \dot{\theta}_1 \cdot \frac{L_1}{2} \sin(\theta_1) \hat{j} \end{pmatrix} \quad [14]$$

De la mateixa manera però expressada en vectors es pot deduir la velocitat tangencial corresponent al cos 2 aplicada al seu centre de gravetat. Per trobar aquesta velocitat que alhora dependrà de la velocitat del cos anterior, es pot trobar a partir de l'expressió següent:

$$\vec{V}(G_2) = \vec{V}(A) + \overrightarrow{\theta_2} \times \overrightarrow{AG_2} \quad [15]$$

Com s'ha pogut veure en l'esquema anterior, es ressalta que la suma dels dos angles θ_1 i θ_2 és l'equivalent a l'angle respecte a la vertical que la persona quan aquesta s'inclina. D'aquesta manera es substitueix per l'expressió:

$$\varphi = \theta_1 + \theta_2$$

A partir de l'equació [15] es pot obtenir:

$$\vec{V}(G_2) = \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \cdot L_1 \cdot \cos(\theta_1) \hat{i} \\ \dot{\theta}_1 \cdot L_1 \cdot \sin(\theta_1) \hat{j} \\ 0 \cdot \hat{k} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \hat{i} \\ 0 \hat{j} \\ -\dot{\theta}_2 \cdot \hat{k} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} -L_2 \cdot \sin(\varphi) \cdot \hat{i} \\ L_2 \cdot \cos(\varphi) \cdot \hat{j} \\ 0 \cdot \hat{k} \end{pmatrix}$$

Implementant el producte matricial:

$$\vec{V}(G_2) = \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \cdot L_1 \cdot \cos(\theta_1) \cdot \hat{i} \\ \dot{\theta}_1 \cdot L_1 \cdot \sin(\theta_1) \cdot \hat{j} \\ 0 \cdot \hat{k} \end{pmatrix} + \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ 0 & 0 & -\dot{\theta}_2 \\ -L_2 \cdot \sin(\varphi) & L_2 \cdot \cos(\varphi) & 0 \end{vmatrix}$$

Resolent aquest producte:

$$\vec{V}(G_2) = \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \cdot L_1 \cos(\theta_1) \hat{i} \\ \dot{\theta}_1 \cdot L_1 \sin(\theta_1) \hat{j} \\ 0 \hat{k} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -L_2 \cdot \cos(\varphi) \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \hat{i} \\ L_2 \cdot \sin(\varphi) \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \hat{j} \\ 0 \hat{k} \end{pmatrix}$$

I finalment, fent l'última suma, s'obté la velocitat en el centre de gravetat del cos 2:

$$\vec{V}(G_2) = \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \cdot L_1 \cdot \cos(\theta_1) - L_2 \cdot \cos(\varphi) \cdot \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1 \cdot L_1 \cdot \sin(\theta_1) + L_2 \cdot \sin(\varphi) \cdot \dot{\theta}_2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad [16]$$

De la mateixa manera que s'han calculat les velocitats, es calcula les acceleracions de cada cos en el seu centre de gravetat. Com s'ha vist en l'esquema, es pot apreciar que cada cos disposa de dos tipus d'acceleracions; una acceleració normal i una acceleració tangencial. Aleshores, de la mateixa manera que en el cas anterior, es pot determinar l'acceleració vectorial en el centre de gravetat del xassís superior de la moto (G_{xs}).

$$\vec{a}(G_{xs}) = \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_1 \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \cos(\theta_1) + \dot{\theta}_1^2 \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \sin(\theta_1) \\ \ddot{\theta}_1 \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \sin(\theta_1) - \dot{\theta}_1^2 \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \cos(\theta_1) \end{pmatrix} \quad [17]$$

Un cop definit el vector d'acceleracions que actuen en el centre de gravetat del xassís superior, s'ha procedit en calcular l'acceleració en el centre de gravetat del cos 2. Aquest cop, s'utilitzarà la següent expressió:

$$\vec{a}(G_2) = \vec{a}(A) + \vec{\theta}_2 \times (\vec{\theta}_2 \times \overrightarrow{AG_2}) + (\vec{\alpha}_2 \times \overrightarrow{AG_2}) \quad [18]$$

Com que aquesta expressió és llarga, es descompon per desenvolupar-la millor. Llavors, començant per l'acceleració corresponent al punt A de l'esquema, aquesta s'obté de la mateixa manera que l'acceleració en el centre de gravetat del xassís superior:

$$\vec{a}(A) = \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_1 \cdot L_1 \cdot \cos(\theta_1) + \dot{\theta}_1^2 \cdot L_1 \cdot \sin(\theta_1) \\ \ddot{\theta}_1 \cdot L_1 \cdot \sin(\theta_1) - \dot{\theta}_1^2 \cdot L_1 \cdot \cos(\theta_1) \end{pmatrix}$$

A més, es pot expressar l'acceleració angular de la manera següent:

$$\vec{\alpha}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -\ddot{\theta}_2 \end{pmatrix}$$

Conseqüentment, es mostra el producte vectorial de l'acceleració angular:

$$\vec{\alpha}_2 \times \overrightarrow{AG_2} = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ 0 & 0 & -\ddot{\theta}_2 \\ -L_2 \cdot \sin(\varphi) & L_2 \cdot \cos(\varphi) & 0 \end{vmatrix} = \begin{pmatrix} -L_2 \cdot \cos(\varphi) \cdot \ddot{\theta}_2 \\ L_2 \cdot \sin(\varphi) \cdot \ddot{\theta}_2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Seguidament es resol aquest producte vectorial:

$$\vec{\theta}_2 \times (\vec{\theta}_2 \times \overrightarrow{AG_2}) = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ 0 & 0 & -\dot{\theta}_2 \\ -L_2 \cdot \cos(\varphi) \cdot \dot{\theta}_2 & L_2 \cdot \sin(\varphi) \cdot \dot{\theta}_2 & 0 \end{vmatrix}$$

D'aquest producte vectorial ja es disposava d'una part calculada la qual era:

$$\vec{\theta}_2 \times \overrightarrow{AG_2} = \begin{pmatrix} -L_2 \cdot \cos(\varphi) \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \hat{i} \\ L_2 \cdot \sin(\varphi) \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \hat{j} \\ 0 \end{pmatrix}$$

D'aquesta manera el producte vectorial resulta ser d'una complexitat més senzilla. Llavors, el resultat del producte anterior és:

$$\vec{\theta}_2 \times (\vec{\theta}_2 \times \overrightarrow{AG_2}) = \begin{pmatrix} -L_2 \cdot \sin(\varphi) \cdot \dot{\theta}_2^2 \cdot \hat{i} \\ L_2 \cdot \cos(\varphi) \cdot \dot{\theta}_2^2 \cdot \hat{j} \\ 0 \end{pmatrix}$$

Un cop s'ha obtingut tots els termes de l'expressió [18] l'acceleració en el cos 2 és:

$$\vec{a}(G_2) = \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_1 \cdot L_1 \cdot \cos(\theta_1) + \dot{\theta}_1^2 \cdot L_1 \cdot \sin(\theta_1) \\ \ddot{\theta}_1 \cdot L_1 \cdot \sin(\theta_1) - \dot{\theta}_1^2 \cdot L_1 \cdot \cos(\theta_1) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -L_2 \cdot \sin(\varphi) \cdot \dot{\theta}_2^2 \\ L_2 \cdot \cos(\varphi) \cdot \dot{\theta}_2^2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -L_2 \cdot \cos(\varphi) \cdot \ddot{\theta}_2 \\ L_2 \cdot \sin(\varphi) \cdot \ddot{\theta}_2 \end{pmatrix}$$

On agrupant els termes, s'obté:

$$\ddot{a}(G_2) = \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_1 \cdot L_1 \cdot \cos(\theta_1) + \dot{\theta}_1^2 \cdot L_1 \cdot \sin(\theta_1) - L_2 \cdot \sin(\varphi) \cdot \dot{\theta}_2^2 - L_2 \cdot \cos(\varphi) \cdot \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_1 \cdot L_1 \cdot \sin(\theta_1) - \dot{\theta}_1^2 \cdot L_1 \cdot \cos(\theta_1) + L_2 \cdot \cos(\varphi) \cdot \dot{\theta}_2^2 + L_2 \cdot \sin(\varphi) \cdot \ddot{\theta}_2 \end{pmatrix} \quad [19]$$

Un cop calculats tots els paràmetres necessaris, falta trobar el paràmetre P_{rp} corresponent a la potència perduda per fregaments, per dissipacions de calor, etcètera. Aquesta es pot obtenir a través del rendiment del motor i del sistema de reducció d'engranatges planetaris axials. Aleshores:

$$\eta = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{sub}}} = \frac{P_m - P_{rp}}{P_m}$$

Aïllant P_{rp} d'aquesta equació:

$$P_{rp} = P_m \cdot (1 - \eta) = \Gamma_m \cdot w_m \cdot (1 - \eta) \quad [20]$$

Un cop es disposa de tots els paràmetres, es procedeix en desenvolupar l'equació [13], on l'expressió resulta ser:

$$\begin{aligned} \Gamma_m \cdot w_m = & m_{xs} \cdot g \cdot \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \cos(\theta_1) \\ \dot{\theta}_1 \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \sin(\theta_1) \end{pmatrix} + m_p \cdot g \cdot \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \cdot L_1 \cdot \cos(\theta_1) - L_2 \cdot \cos(\varphi) \cdot \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1 \cdot L_1 \cdot \sin(\theta_1) + L_2 \cdot \sin(\varphi) \cdot \dot{\theta}_2 \end{pmatrix} + \\ & + \Gamma_m \cdot w_m \cdot (1 - \eta) + m_{xs} \cdot \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \cos(\theta_1) \\ \dot{\theta}_1 \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \sin(\theta_1) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_1 \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \cos(\theta_1) + \dot{\theta}_1^2 \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \sin(\theta_1) \\ \ddot{\theta}_1 \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \sin(\theta_1) - \dot{\theta}_1^2 \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \cos(\theta_1) \end{pmatrix} + m_p \cdot \\ & \cdot \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \cdot L_1 \cdot \cos(\theta_1) - L_2 \cdot \cos(\varphi) \cdot \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1 \cdot L_1 \cdot \sin(\theta_1) + L_2 \cdot \sin(\varphi) \cdot \dot{\theta}_2 \end{pmatrix} \cdot \\ & \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_1 \cdot L_1 \cdot \cos(\theta_1) + \dot{\theta}_1^2 \cdot L_1 \cdot \sin(\theta_1) - L_2 \cdot \sin(\varphi) \cdot \dot{\theta}_2^2 - L_2 \cdot \cos(\varphi) \cdot \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_1 \cdot L_1 \cdot \sin(\theta_1) - \dot{\theta}_1^2 \cdot L_1 \cdot \cos(\theta_1) + L_2 \cdot \cos(\varphi) \cdot \dot{\theta}_2^2 + L_2 \cdot \sin(\varphi) \cdot \ddot{\theta}_2 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Aquesta resultaria ser l'equació resultant, però encara es pot arreglar tenint en compte les següents consideracions:

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_1 &= \tau w_m \\ \dot{\theta}_2 &= \frac{\dot{\theta}_1}{2} = \frac{\tau w_m}{2} \end{aligned}$$

Llavors, si es substitueixen aquestes expressions, l'equació resultant és:

$$\begin{aligned}
 \Gamma_m \cdot w_m &= m_{xs} \cdot g \cdot \tau \cdot w_m \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \sin(\theta_1) + m_p \cdot g \\
 &\cdot \left(\tau \cdot w_m \cdot L_1 \cdot \sin(\theta_1) + L_1 \cdot \sin(\varphi) \cdot \frac{\tau w_m}{2} \right) + \Gamma_m \cdot w_m \cdot (1 - \eta) + m_{xs} \cdot \tau w_m \\
 &\cdot \frac{L_1}{2} \cdot \sin(\theta_1) \cdot \left(\ddot{\theta}_1 \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \sin(\theta_1) - (\tau w_m)^2 \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \cos(\theta_1) \right) + m_p \\
 &\cdot \left(\tau w_m \cdot L_1 \cdot \sin(\theta_1) + L_2 \cdot \sin(\varphi) \cdot \frac{\tau w_m}{2} \right) \\
 &\cdot \left(\ddot{\theta}_1 \cdot L_1 \cdot \sin(\theta_1) - (\tau w_m)^2 \cdot L_1 \cdot \cos(\theta_1) + L_2 \cdot \cos(\varphi) \cdot \left(\frac{\tau w_m}{2} \right)^2 + L_2 \right. \\
 &\left. \cdot \sin(\varphi) \cdot \ddot{\theta}_2 \right)
 \end{aligned}$$

D'aquesta equació encara es pot simplificar algunes velocitats angulars del motor obtenint la següent expressió:

$$\begin{aligned}
 \Gamma_m &= m_{xs} \cdot g \cdot \tau \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \sin(\theta_1) + m_p \cdot g \cdot \left(\tau \cdot L_1 \cdot \sin(\theta_1) + L_1 \cdot \sin(\varphi) \cdot \frac{\tau}{2} \right) + \Gamma_m \\
 &\cdot (1 - \eta) + m_{xs} \cdot \tau \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \sin(\theta_1) \\
 &\cdot \left(\ddot{\theta}_1 \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \sin(\theta_1) - (\tau w_m)^2 \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \cos(\theta_1) \right) + m_p \quad [21] \\
 &\cdot \left(\tau \cdot L_1 \cdot \sin(\theta_1) + L_2 \cdot \sin(\varphi) \cdot \frac{\tau}{2} \right) \\
 &\cdot \left(\ddot{\theta}_1 \cdot L_1 \cdot \sin(\theta_1) - (\tau w_m)^2 \cdot L_1 \cdot \cos(\theta_1) + L_2 \cdot \cos(\varphi) \cdot \left(\frac{\tau w_m}{2} \right)^2 \right. \\
 &\left. + L_2 \cdot \sin(\varphi) \cdot \ddot{\theta}_2 \right)
 \end{aligned}$$

Com es pot veure en aquesta equació es disposa del parell motor a banda i banda, aïllant s'utilitza l'expressió "Eq" per representar tota l'equació:

$$\Gamma_m - \Gamma_m \cdot (1 - \eta) = Eq$$

Finalment, l'expressió resultant [21], es redueix a:

$$\Gamma_m = \frac{Eq}{\eta} \quad [22]$$

Un cop s'ha desenvolupat l'equació per obtenir el parell motor en cada instant de temps i per cada grau d'inclinació, es procedeix en explicar el codi implementat amb el *Matlab* i la obtenció de diferents paràmetres, juntament amb les consideracions que s'han tingut en compte.

Com s'ha mencionat, per realitzar aquest codi s'han realitzat moltes suposicions de valors com el rendiment del motor, la relació de transmissió del reductor i la massa de la persona. Tots aquests paràmetres es mostren en la secció de constants dins del programa. Per altra banda, en el programa s'ha seccionat en dos seccions. En una es fa anar la moto des de la posició de 60° fins a 0° amb un temps d'un segon. A partir d'aquí es podrà determinar la velocitat, la posició i l'acceleració necessària per a realitzar-ho. En el codi del *Matlab*, aquest valor podria ser modificat, però es considera que és un valor prou ajustat.

Per determinar la posició, la velocitat angular i l'acceleració s'ha partit de les equacions del moviment circular:

$$\theta(t) = \varphi_0 + w_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot t^2$$
$$w(t) = w_0 + \alpha \cdot t$$
$$\alpha = cnt.$$

Aleshores, s'ha dimensionat aquest sistema a partir d'aquestes equacions. De la primera secció del codi en resulta una acceleració de $\alpha = -\frac{2\pi}{p} \text{ rad/s}^2$.

Per altra banda, la segona secció del codi consta de fer anar el simulador des de 60° fins a -60° amb un temps de 2 segons¹⁸ i de la mateixa manera es calcularà la velocitat angular i la posició angular en cada instant de temps fins assolir la posició desitjada. D'aquesta manera s'obindrà el parell necessària en cada instant de temps i per a cada posició.

Per últim, s'afegeix que la velocitat normal de rotació d'un servomotor és de:

$$w_m = 1500rpm$$

¹⁸ Aquest valor també pot ser modificat i ajustat, però de nou es considera que és un valor prou ajustat per a un us convencional del simulador.

I el codi implementat és el que es mostra a continuació degudament comentat¹⁹. Cal anotar que en aquest codi s'hi incorpora la part de Càlculs Dinàmics, on aquesta secció s'explica més endavant.

```
%Programa per resoldre el sistema energètic del simulador de Moto GP
CKU
%Neteja:
close all
clc
clear all
%Incrementem el nombre de xifres significatives:
format long

%Definició de variables:
%x1=teta1; y1=teta1'; z1=teta1'';
%x2=teta2; y2=teta2'; z2=teta2'';

%Constants:
g=9.807;           %m/s^2
L1=0.5;           %m
L2=0.36;          %m
mxs=50;           %Kg
mp=100;           %Kg
eta=0.6;          %(tant per 1) Rendiment
tau=0.01;         %(tant per 1) Relació Transmissió

n=200; %Número de segments per l'escombrat

%Definició temps de pujada de la moto:
t_pujada=1;       %segons

%Velocitat rotació del motor:
wm=1500*2*pi/60; %Rad/s ->Velocitat servomotor

%Condicions Inicials:
x10=pi/3;         %Rad
x20=x10/2;        %Rad
y10=0;           %Rad/s
y20=y10/2;       %Rad/s

%Escombrat del temps:
temps=linspace(0,t_pujada,n);

%Velocitat i acceleració venen definides segons la regla de la mà
dreta.
for i=1:n
    %Càlcul d'Acceleracions, Velocitats i Posicions Angulars:
    z1(i)=-2*pi/9;
    z2(i)=z1(i)/2;
    y1(i)=y10+z1(i)*temps(i);
    y2(i)=y1(i)/2;
    x1(i)=x10+y1(i)*temps(i)+0.5*z1(i)*temps(i).^2;
    x2(i)=x1(i)/2;
```

¹⁹ Cal anotar que en aquest codi es realitza un escombrat en el temps, és a dir, s'agafa el temps descrit per anar de 60º a 0º i es divideix en "n" segments, conseqüentment, es calcula la velocitat i posició en cada instant de temps i llavors s'implementa l'equació del parell anterior.

```
%Implementació de l'equació del parell motor:

Tm(i)=(mxs*g*tau*L1/2*sin(x1(i))+mp*g*(tau*L1*sin(x1(i))+L2*sin(x1(i)+
x2(i))*tau/2)+mxs*tau*L1/2*sin(x1(i))*(z1(i)*L1/2*sin(x1(i))-
(tau*wm).^2*L1/2*cos(x1(i)))+mp*(tau*L1*sin(x1(i))+L2*sin(x1(i)+x2(i))
*tau/2)*(z1(i)*L1*sin(x1(i))-
(tau*wm).^2*L1*cos(x1(i))+L2*cos(x1(i)+x2(i))*(tau*wm/2).^2+L2*sin(x1(
i)+x2(i))*z2(i)))/eta;
end

%Càlcul Parell màxim i mínim:
a1=Tm(1);
Tmax=a1;
Tmin=a1;
for i=2:n
    a1=Tm(i-1);
    a2=Tm(i);
    if a2>=a1
        Tmax=a2;
    elseif a2<=a1
        Tmin=a2;
    end
end

disp('Parell des de 60° a 0°:')
disp('El Parell màxim serà: ')
disp(Tmax)
disp('El parell mínim serà: ')
disp(Tmin)

%Representació posició, velocitat i acceleració:
figure(1)
plot(temps,z1,'r',temps,y1,'b',temps,x1,'g')
title('Cinemàtica-01')
legend('\alpha (rad/s^2)', '\omega (rad/s)', '\phi (rad)')
xlabel('Temps (s)')
grid on
grid minor
%Representació posició en graus:
figure(2)
plot(temps,x1*180/pi,'r')
title('Cinemàtica-02')
xlabel('Temps (s)')
ylabel('\theta (°)')
grid on
grid minor

%Representació gràfica Tm respecte posició:
figure(3)
degtetaxs=x1*360/(2*pi);
plot(degtetaxs,Tm,'r')
title('Parell Servo Motor')
xlabel('\theta (°)')
ylabel('\Gamma_{m} (Nm)')
grid on
grid minor
axis([0 60 0 11])
```

```
% Suposem el cas que partim de la posició 60° i anem cap a -60°:
n=400; %Número de segments

%Condicions Inicials:
x10=pi/3;           %Rad
x20=x10/2;         %Rad
y10=0;             %Rad/s
y20=y10/2;         %Rad/s

%Definició del temps
t_total=2;         %Segons

%Escombrat del temps:
temps=linspace(0,t_total,n);

%Primera iteració:
i=1;
zz1(i)=-2*pi/3;
zz2(i)=zz1(i)/2;
yy1(i)=y10+zz1(i)*temps(i);
yy2(i)=yy1(i)/2;
xx1(i)=x10+yy1(i)*temps(i)+0.5*zz1(i)*temps(i).^2; %Tindrem velocitat
i acceleració negativa, segons la regla de la ma dreta
xx2(i)=xx1(i)/2;

%Càlcul Acceleració, Velocitat i Posició Angular en cada instant de
temps
for i=2:n
    if i<=n/2
        zz1(i)=-2*pi/3;
        zz2(i)=zz1(i)/2;
        yy1(i)=yy1(i-1)+zz1(i)*(temps(i)-temps(i-1));
        yy2(i)=yy1(i)/2;
        xx1(i)=xx1(i-1)+yy1(i)*(temps(i)-temps(i-
1))+0.5*zz1(i)*(temps(i)-temps(i-1)).^2; %Tindrem velocitat i
acceleració negativa, segons la regla de la ma dreta
        xx2(i)=xx1(i)/2;
    elseif i>n/2
        zz1(i)=2*pi/3;
        zz2(i)=zz1(i)/2;
        yy1(i)=yy1(n/2)+zz1(i)*(temps(i)-temps(n/2));
        yy2(i)=yy1(i)/2;
        xx1(i)=xx1(n/2)+yy1(n/2)*(temps(i)-
temps(n/2))+0.5*zz1(i)*(temps(i)-temps(n/2)).^2; %Tindrem velocitat i
acceleració negativa, segons la regla de la ma dreta
        xx2(i)=xx1(i)/2;
    end
end

%Càlcul i implementació de l'equació del parell motor en funció del
temps:
for i=1:n

Tm(i)=(mxs*g*tau*L1/2*sin(xx1(i))+mp*g*(tau*L1*sin(xx1(i))+L2*sin(xx1(i)
+xx2(i))*tau/2)+mxs*tau*L1/2*sin(xx1(i))*(zz1(i)*L1/2*sin(xx1(i))-
(tau*wm).^2*L1/2*cos(xx1(i)))+mp*(tau*L1*sin(xx1(i))+L2*sin(xx1(i)+xx2
(i))*tau/2)*(zz1(i)*L1*sin(xx1(i))-
```



```
(tau*wm).^2*L1*cos(xx1(i))+L2*cos(xx1(i)+xx2(i))*(tau*wm/2).^2+L2*sin(
xx1(i)+xx2(i))*zz2(i))/eta;
end
```

```
%Càlcul Parell màxim i mínim:
```

```
b1=Tm(1);
Tlmax=b1
Tlmin=b1
for i=2:n-1
    b1=Tm(i-1);
    b2=Tm(i);
    if b2>b1
        Tlmax=b2;
    elseif b2<b1
        Tlmin=b2;
    end
end
disp('Parell des de 60° a -60°:')
disp('El Parell màxim serà: ')
disp(Tlmax)
disp('El parell mínim serà: ')
disp(Tlmin)
```

```
%Càlcul Dinàmic i i càlcul de les reaccions ens les articulacions i en
%l'origen:
```

```
for i=1:n
    Ax(i)=-
mp*(yy2(i).^2*L2*sin(xx1(i)+xx2(i))+zz2(i)*L2*cos(xx1(i)+xx2(i))+yy1(i)
).^2*L1*sin(xx1(i))+zz1(i)*L1*cos(xx1(i)));
    Ay(i)=mp*g+mp*(-
yy2(i).^2*L2*cos(xx1(i)+xx2(i))+zz2(i)*L2*sin(xx1(i)+xx2(i))-
yy1(i).^2*L1*cos(xx1(i))+zz1(i)*L1*sin(xx1(i)));
    Ox(i)=Ax(i)-
mxs*(yy1(i).^2*L1/2*sin(xx1(i))+zz1(i)*L1/2*cos(xx1(i)));
    Oy(i)=Ay(i)+mxs*g+mxs*(-
yy1(i).^2*L1/2*cos(xx1(i))+zz1(i)*L1/2*sin(xx1(i)));
end
```

```
%Representació posició, velocitat i acceleració del cos 1:
```

```
figure(4)
plot(temps,zz1,'r',temps,yy1,'b',temps,xx1,'g')
title('Cinemàtica')
legend('\alpha_1 (rad/s^2)', '\omega_1 (rad/s)', '\phi_1
(rad)', 'Location', 'northeastoutside')
xlabel('Temps (s)')
grid on
grid minor
```

```
%Representació posició angular en graus centígrads:
```

```
figure(5)
plot(temps,xx1*180/pi,'r')
title('Cinemàtica-02')
xlabel('Temps (s)')
ylabel('\theta (°)')
grid on
grid minor
```

```
%Representació gràfica Tm respecte posició:
```

```
figure(6)
```

```
degtetaxs=xx1*360/(2*pi);
plot(degtetaxs,Tm,'r')
title('Parell Servo Motor')
xlabel('\theta (°)')
ylabel('\Gamma_{m} (Nm)')
grid on
grid minor

%Representació posició, velocitat i acceleració del cos 2:
figure(7)
plot(temps,zz2,'r',temps,yy2,'b',temps,xx2,'g')
title('Cinemàtica')
legend('\alpha_2 (rad/s^2)','\omega_2 (rad/s)','\phi_2
(rad)','Location','northeastoutside')
xlabel('Temps (s)')
grid on
grid minor

%Representació posició, velocitat i acceleració dels dos cossos
superposats:
figure(8)
plot(temps,zz1,'r',temps,yy1,'b',temps,xx1,'g',temps,zz2,'m',temps,yy2
,'c',temps,xx2,'k')
title('Cinemàtica')
legend('\alpha_1 (rad/s^2)','\omega_1 (rad/s)','\phi_1
(rad)','\alpha_2 (rad/s^2)','\omega_2 (rad/s)','\phi_2
(rad)','Location','northeastoutside')
xlabel('Temps (s)')
grid on
grid minor

%Representació Dinàmica:
figure(9)
plot(temps,Ax,'r',temps,Ox,'g')
title('Cinemàtica')
legend('Ax','Ox','Location','northeastoutside')
xlabel('Temps (s)')
grid on
grid minor

%Representació Dinàmica:
figure(10)
plot(temps,Ay,'b',temps,Oy,'c')
title('Cinemàtica')
legend('Ay','Oy','Location','northeastoutside')
xlabel('Temps (s)')
grid on
grid minor
```

D'aquest codi s'obté uns resultats gràfics i uns resultats numèrics. Respecte als resultats de la primera secció s'han aconseguit els valors del parell màxim i mínim:

Parell des de 60° a 0° :

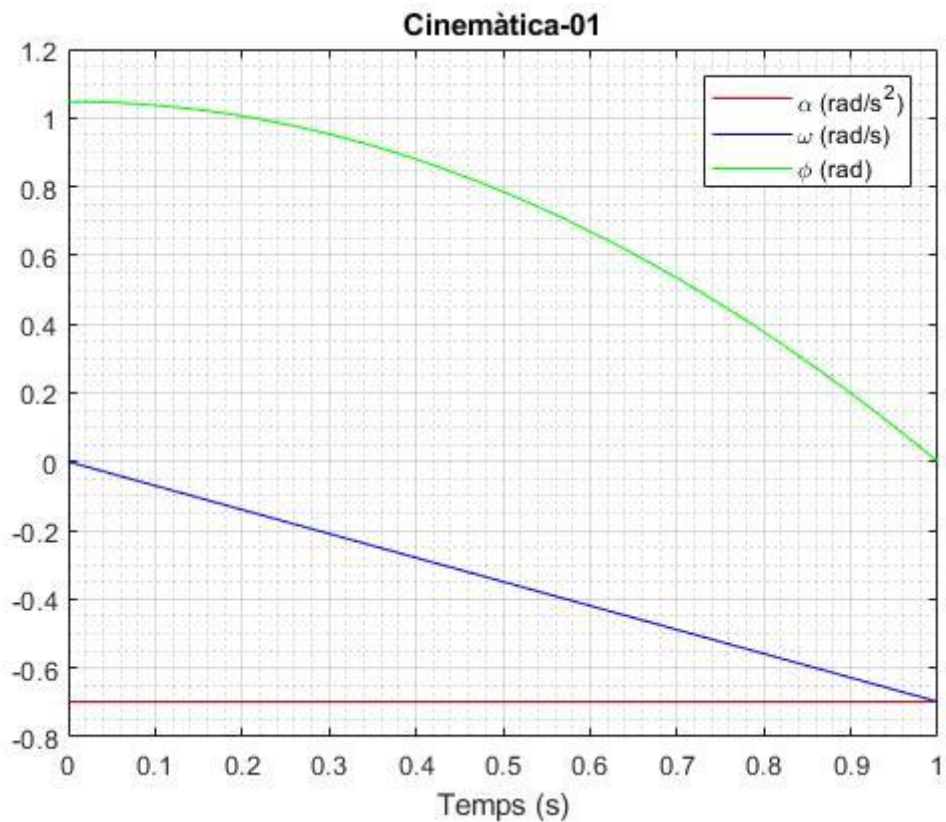
El Parell màxim serà:

10.638699700680172

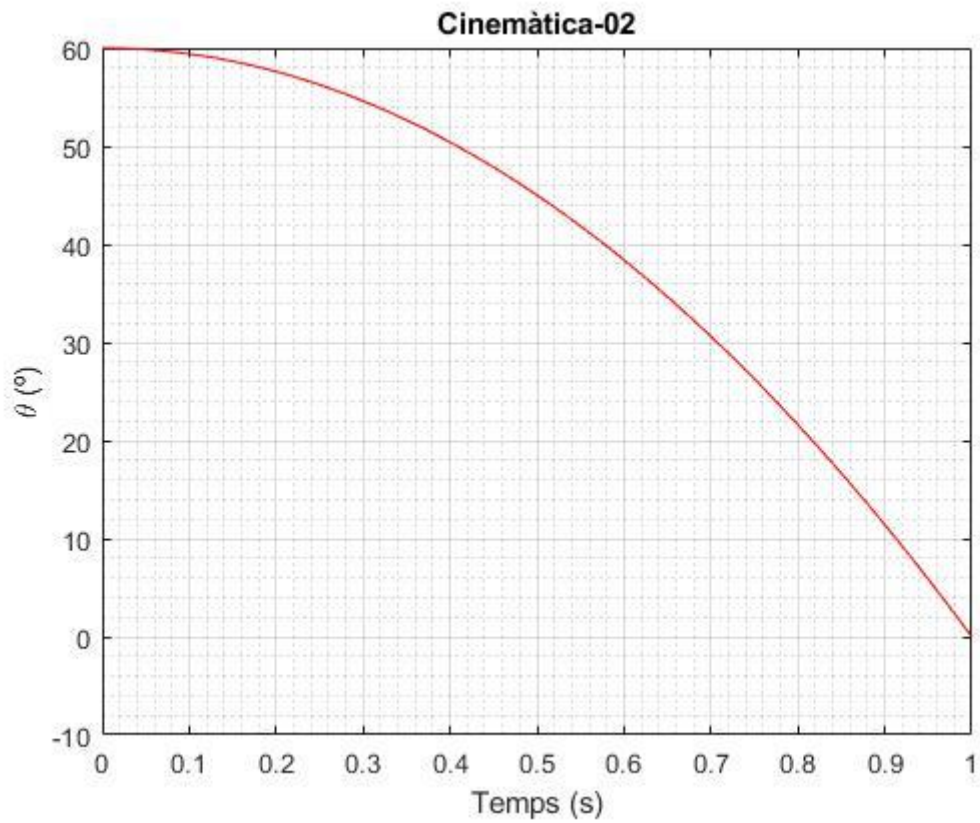
El parell mínim serà:

$-7.328582359726620e-16$

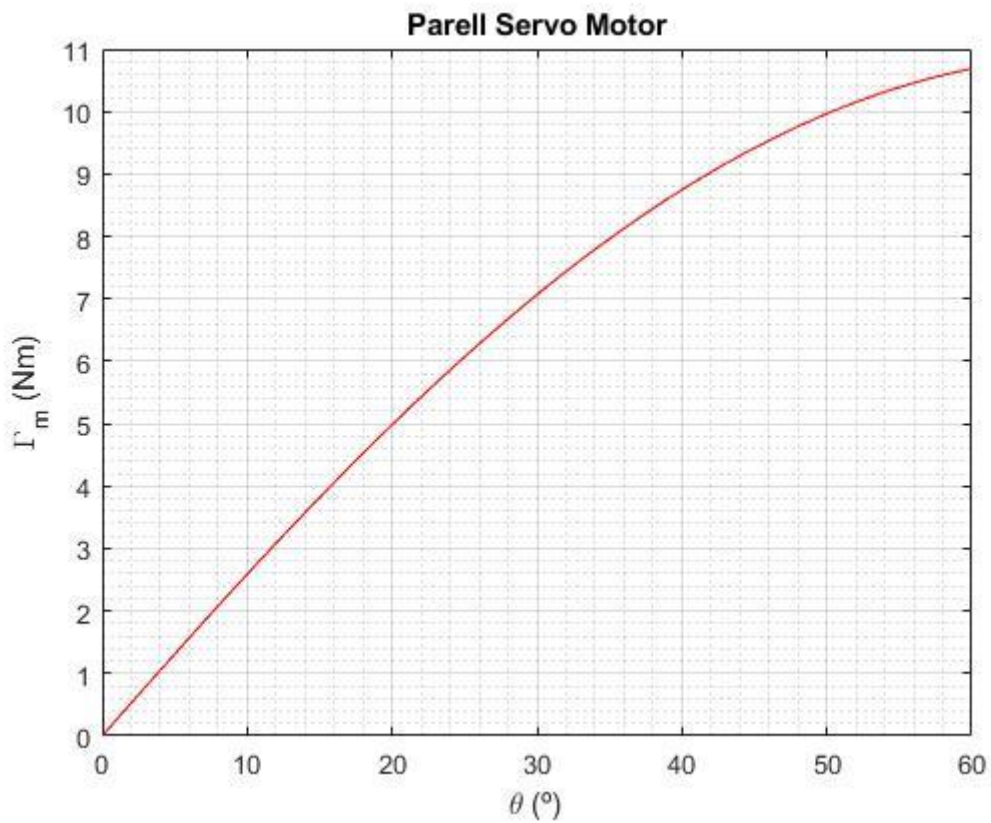
I els gràfics que es mostren en les il·lustracions següents:



Il·lustració 43 - Gràfic cinemàtica cos xassis superior



Il·lustració 44 – Posició angular al llarg del temps del Xassís superior

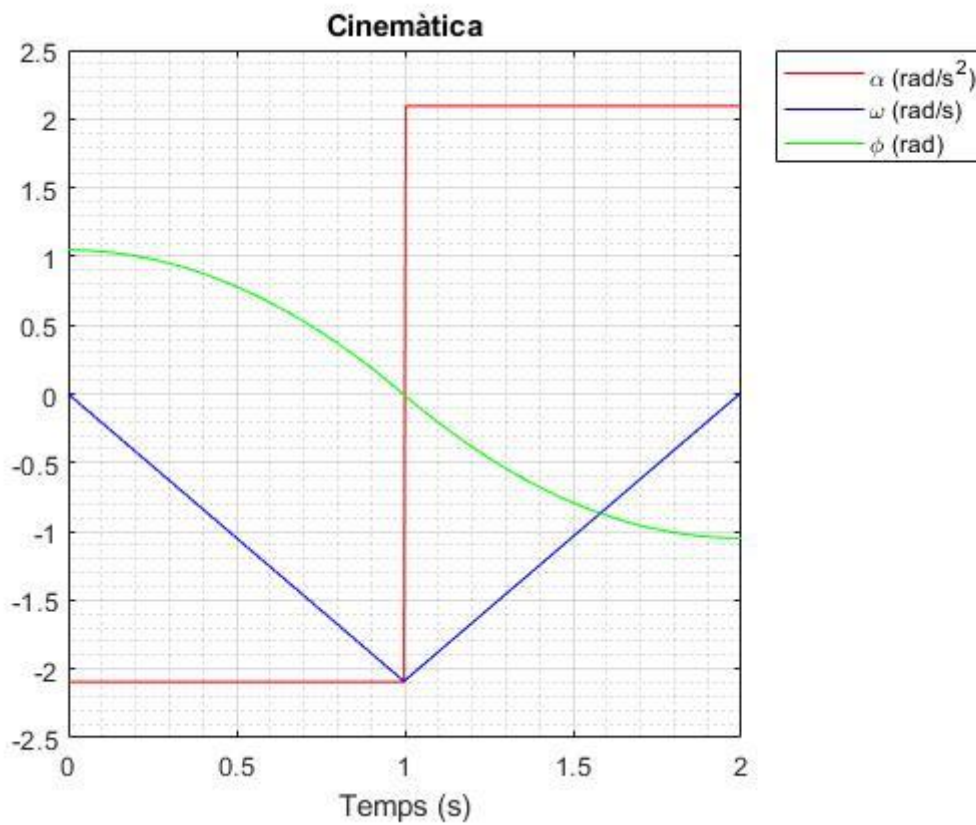


Il·lustració 45 - Parell necessari del Servomotor per fer moure el sistema

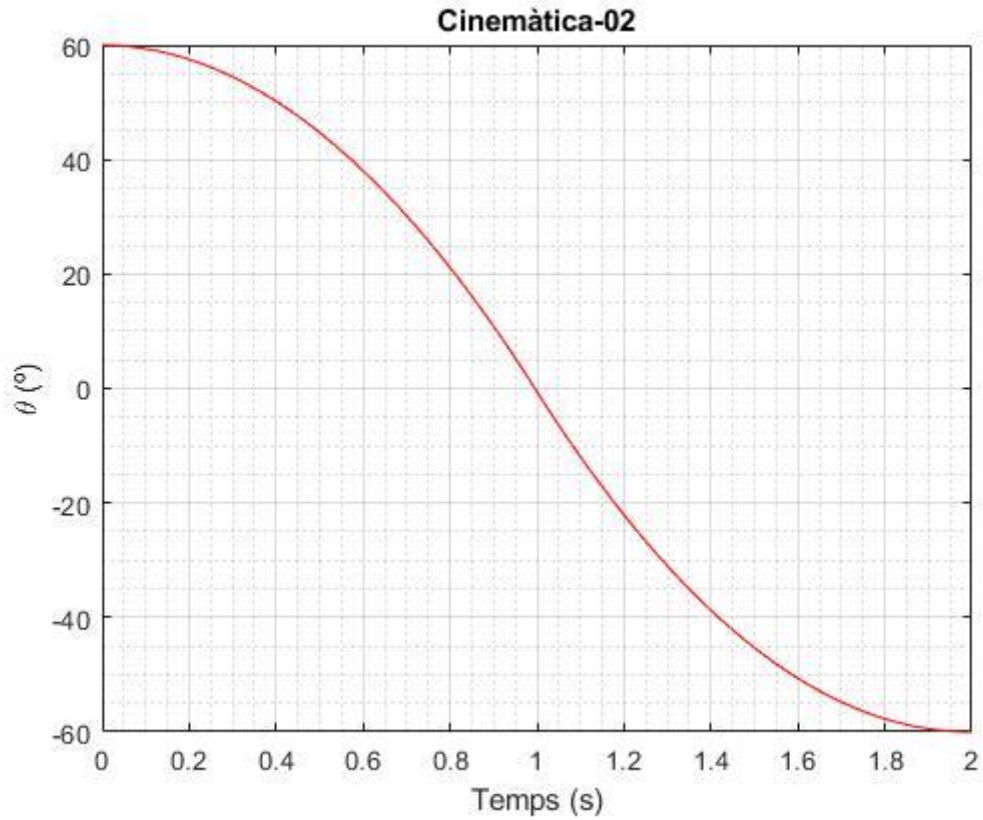
Per altra banda, respecte a la segona secció del codi s'han aconseguit els següents resultats referits al parell màxim i mínim del motor:

```
Parell des de 60° a -60°:  
El Parell màxim serà:  
    9.709667752023767  
  
El parell mínim serà:  
   -9.709608525239274
```

I a continuació es mostren els resultats cinemàtics representats gràficament:



Il·lustració 46 - Resultats cinemàtics

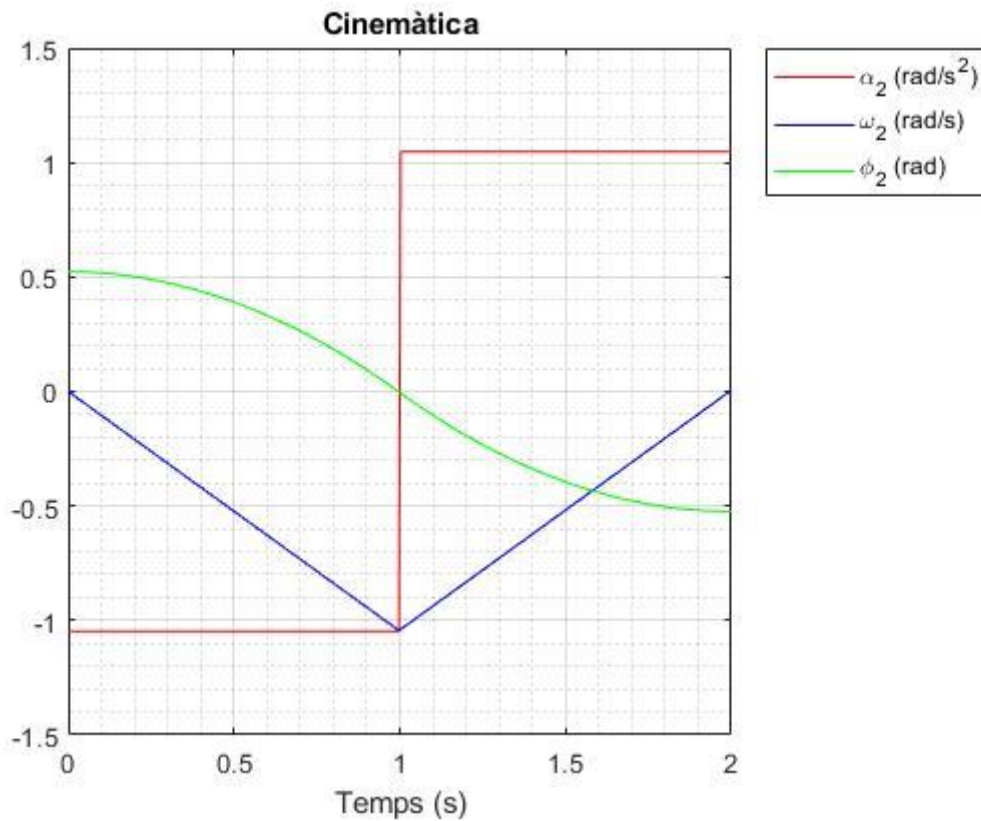


Il·lustració 47 - Posició angular envers al temps



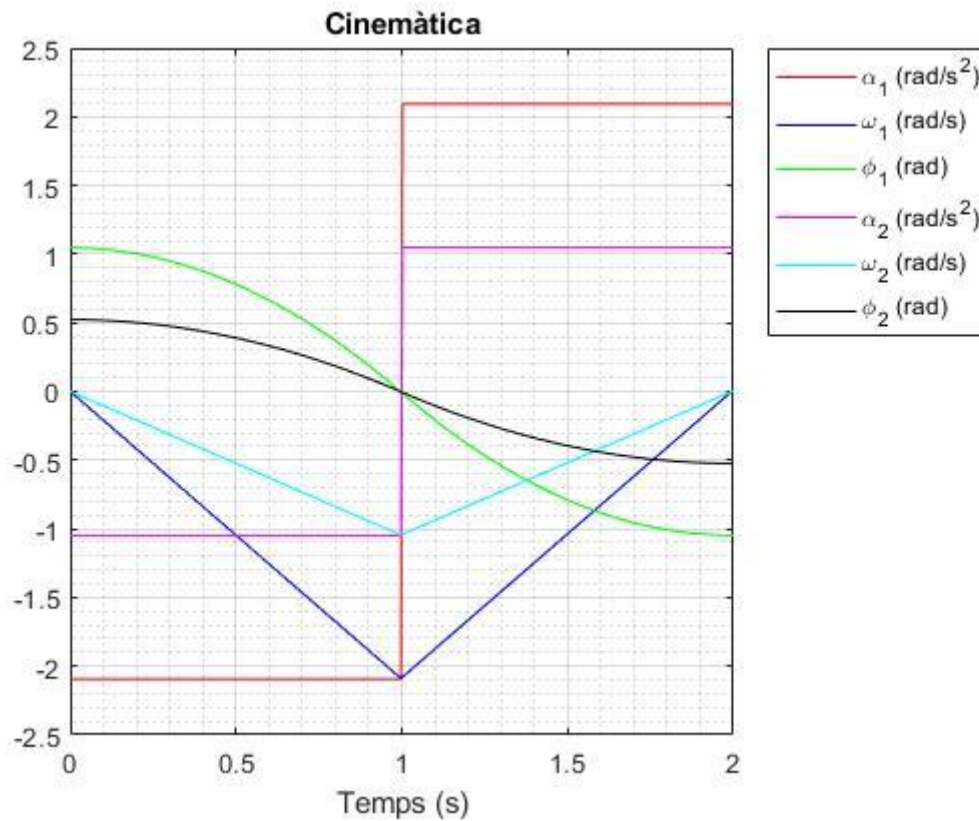
Il·lustració 48 - Parell necessari del Servomotor per fer moure el sistema

A continuació es mostra la cinemàtica del cos 2 on es pot visualitzar l'acceleració, la velocitat i la posició del cos en cada instant de temps.



Il·lustració 49 - Resultat cinemàtic cos 2

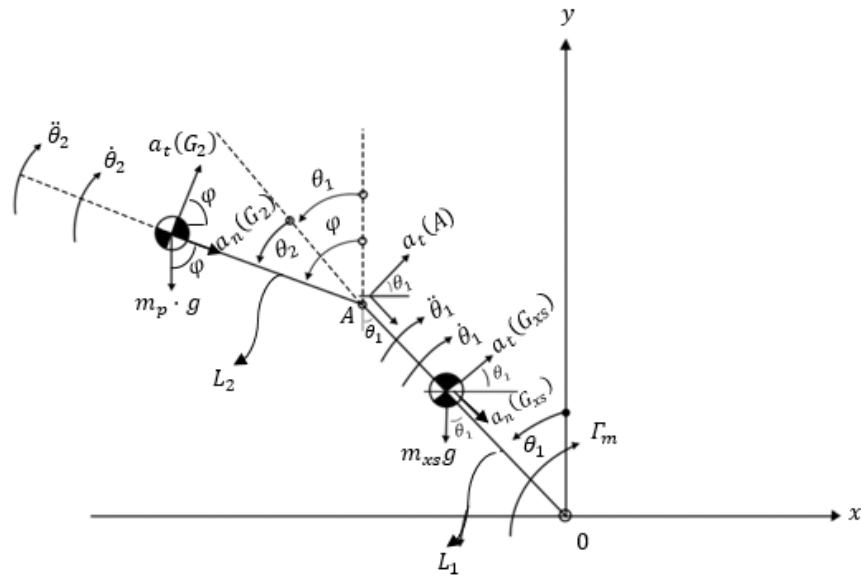
Seguidament, es mostra amb superposició la cinemàtica del cos 1 i la cinemàtica del cos 2 amb les posicions, velocitats i acceleracions de cada cos en cada instant de temps.



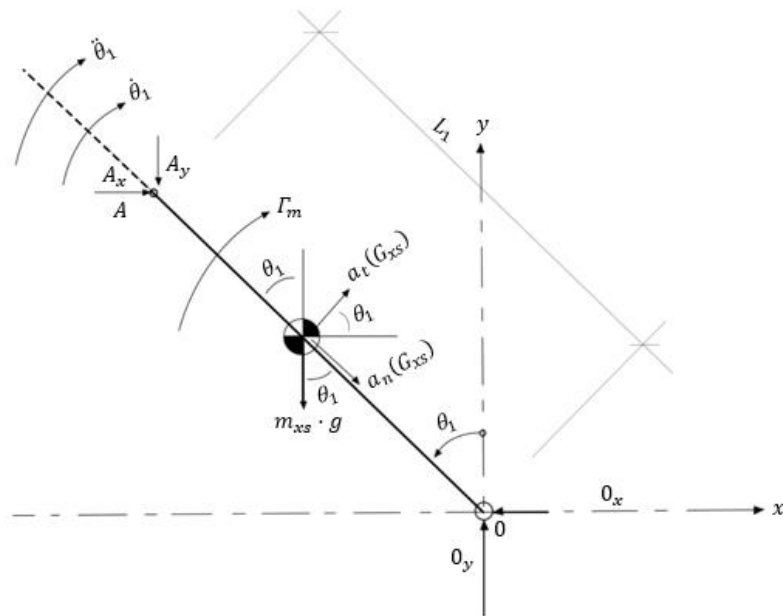
Il·lustració 50 - Superposició dels resultats cinemàtics del xassís superior i del cos 2

Seguidament, es mostren els procediments dels càlculs dinàmics on inclou l'obtenció de les equacions dinàmiques per a calcular les reaccions en les articulacions del sistema que s'han utilitzat per a dimensionar una peça del sistema. Aleshores, per a calcular les reaccions en l'eix d'origen i en l'articulació anomenada A, s'implementen les equacions de la dinàmica estudiades en l'assignatura de *Teoria de Màquines i Mecanismes*.

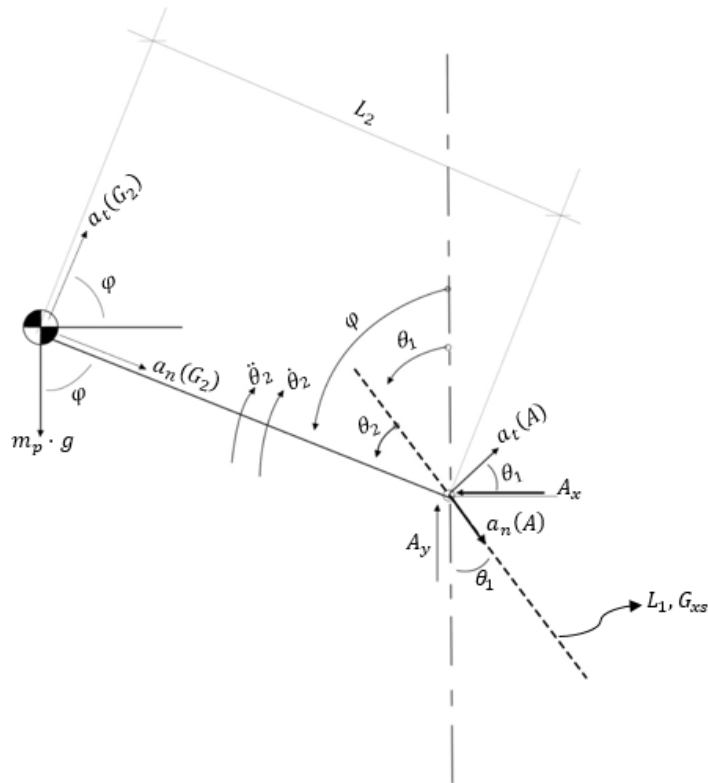
Descomposant el conjunt del sistema en diagrames de sòlids lliures, s'analitzen totes les forces externes i acceleracions que actuen en aquest sistema a fi d'obtenir les equacions que descriguin la dinàmica d'aquests diagrames. En les il·lustracions consecutives es representen aquests diagrames.



Il·lustració 51 - DSL del conjunt dels cossos



Il·lustració 52 - DSL xassís superior



Il·lustració 53 - DSL pilot

Aplicant el teorema de la quantitat de moviment en l'eix x i en l'eix y del sistema, on en l'eix X es pot expressar de la següent manera:

$$\sum F_{ext_x} = \sum_i^n m_i \cdot a_x(G_i) \quad [23]$$

Expressant totes les forces exteriors del sistema i tenint en compte totes les acceleracions, l'equació obtinguda és la que es mostra a continuació:

$$A_x - O_x = m_{xs} \cdot \left(\dot{\theta}_1^2 \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \sin(\theta_1) + \ddot{\theta}_1 \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \cos(\theta_1) \right)$$

De la mateixa manera, aplicant l'expressió anterior en l'eix Y:

$$\sum F_{ext_y} = \sum_i^n m_i \cdot a_y(G_i) \quad [24]$$

s'aconsegueix la següent expressió:

$$O_y - A_y - m_{xs} \cdot g = m_{xs} \cdot \left(-\dot{\theta}_1^2 \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \cos(\theta_1) + \ddot{\theta}_1 \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \sin(\theta_1) \right)$$

Com va ser ensenyat en aquesta assignatura, es pot aplicar el teorema del moment cinètic per acabar de determinar i descriure totes les equacions dinàmiques del sistema. On es podrien aplicar les següents opcions:

$$\sum M_{ext}(O) = \sum_i^n (I_{oi} \cdot \ddot{\alpha}_i + \overrightarrow{OG_i} x m_i \cdot \ddot{a}(G_i))$$

O:

$$\sum M_{ext}(G_{xs}) = \sum_i^n (I_{G_i} \cdot \ddot{\alpha}_i + \overrightarrow{QG_i} x m_i \cdot \ddot{a}(G_i))$$

On en aquest cas s'utilitzarà la segona expressió escrita de la següent manera:

$$\begin{aligned} A_y \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \sin(\theta_1) - A_x \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \cos(\theta_1) + O_y \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \sin(\theta_1) - O_x \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \cos(\theta_1) - \Gamma_m \\ = I_{G_{xs}} \cdot (-\ddot{\theta}_1) \end{aligned}$$

Un cop ja s'han definit les equacions que descriuen la dinàmica del cos 1 es procedeix en definir les equacions que descriuen la dinàmica del cos 2 aplicant el mateix procediment de càlcul utilitzant l'equació [23];

D'aquesta equació se'n pot deduir:

$$-A_x = m_p \cdot \left(\dot{\theta}_2^2 \cdot L_2 \cdot \sin(\varphi) + \ddot{\theta}_2 \cdot L_2 \cdot \cos(\varphi) + \dot{\theta}_1^2 \cdot L_1 \cdot \sin(\theta_1) + \ddot{\theta}_1 \cdot L_1 \cdot \cos(\theta_1) \right)$$

I aplicant l'equació [24]:

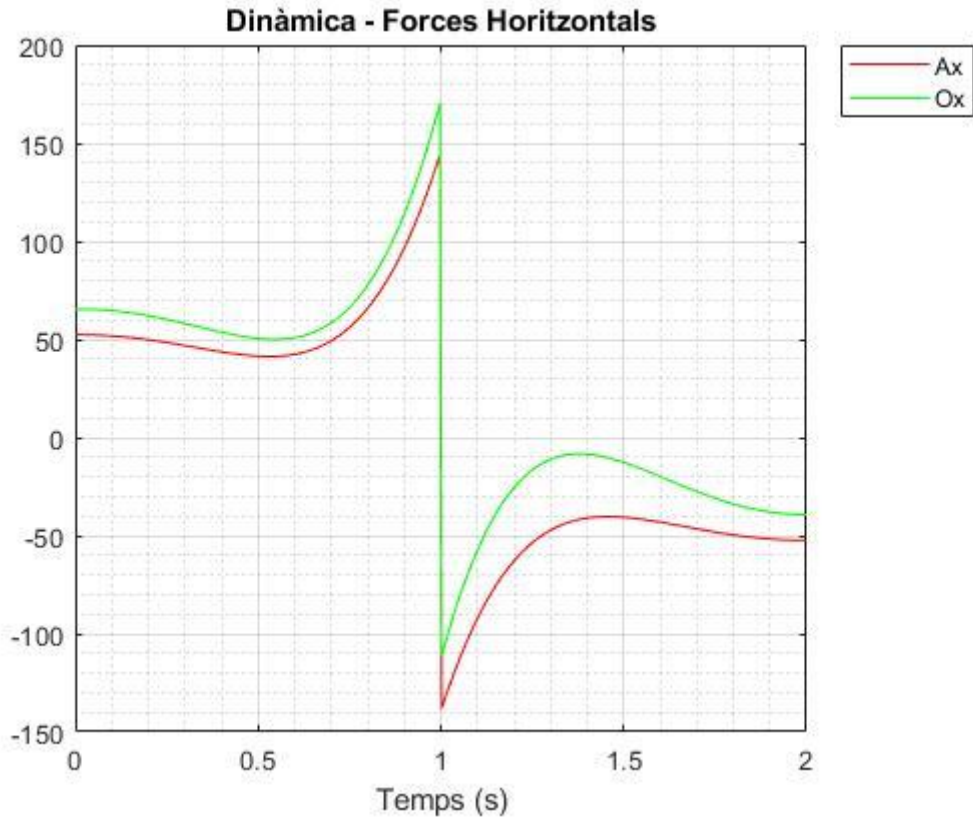
S'obté la següent expressió:

$$\begin{aligned} A_y - m_p \cdot g = m_p \left(-\dot{\theta}_2^2 \cdot L_2 \cdot \cos(\varphi) + \ddot{\theta}_2 \cdot L_2 \cdot \sin(\varphi) - \dot{\theta}_1^2 \cdot L_1 \cdot \cos(\theta_1) + \ddot{\theta}_1 \cdot L_1 \right. \\ \left. \cdot \sin(\theta_1) \right) \end{aligned}$$

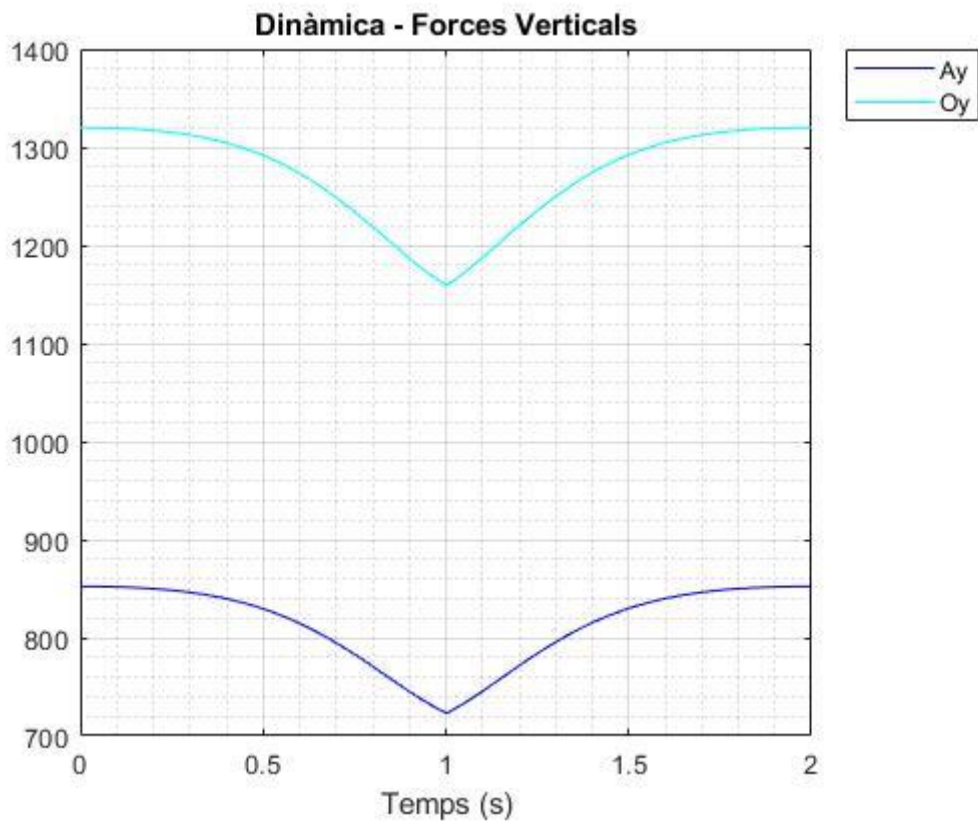
Per altra banda, aplicant la segona opció del teorema del moment cinètic s'obté:

$$A_y \cdot L_2 \cdot \sin(\varphi) - A_x \cdot L_2 \cdot \cos(\varphi) = I_{G_2} \cdot \ddot{\alpha}_2$$

Un cop obtingudes totes les expressions com s'ha vist en el codi del *Matlab*® hi ha un apartat on s'ha fet un bucle "for" per a calcular el valor de cada reacció, A_x , A_y , O_x i O_y , les quals s'han escrit aïllades sense necessitat d'un sistema d'equacions per a resoldre les equacions plantejades anteriorment. Aleshores, el codi calcula el valor d'aquestes reaccions i el mostra en diferents gràfics per tal d'apreciar el seu comportament. A continuant dels resultats obtinguts del codi, les il·lustracions que es mostren són els resultats dinàmics obtinguts:



Il·lustració 54 - Resultat de forces horitzontals en les reaccions



Il·lustració 55 - Resultat de forces verticals en les reaccions

Com es pot veure els valors màxims obtinguts en l'articulació O, ubicada en el centre de gir del simulador, són de 1320N respecte a la força vertical mentre que la màxima força aplicada horitzontalment és de 170N. Aleshores, un cop obtinguts aquests resultats, es pot procedir en realitzar uns càlculs amb el programa Ansys vist en l'apartat de Càlculs Mecànics on s'apliquen aquestes forces en l'Orella que s'implementa per centrar l'eix de gir del motor, cosa que haurà de resistir totes aquestes càrregues degudes al moviment del simulador i la persona que el pilota.

Annex A.2 - Càlculs Mecànics

En aquest Annex es mostrarà la metodologia de càlcul i el procediment per obtenir els resultats dels diferents càlculs mecànics citats en la memòria.

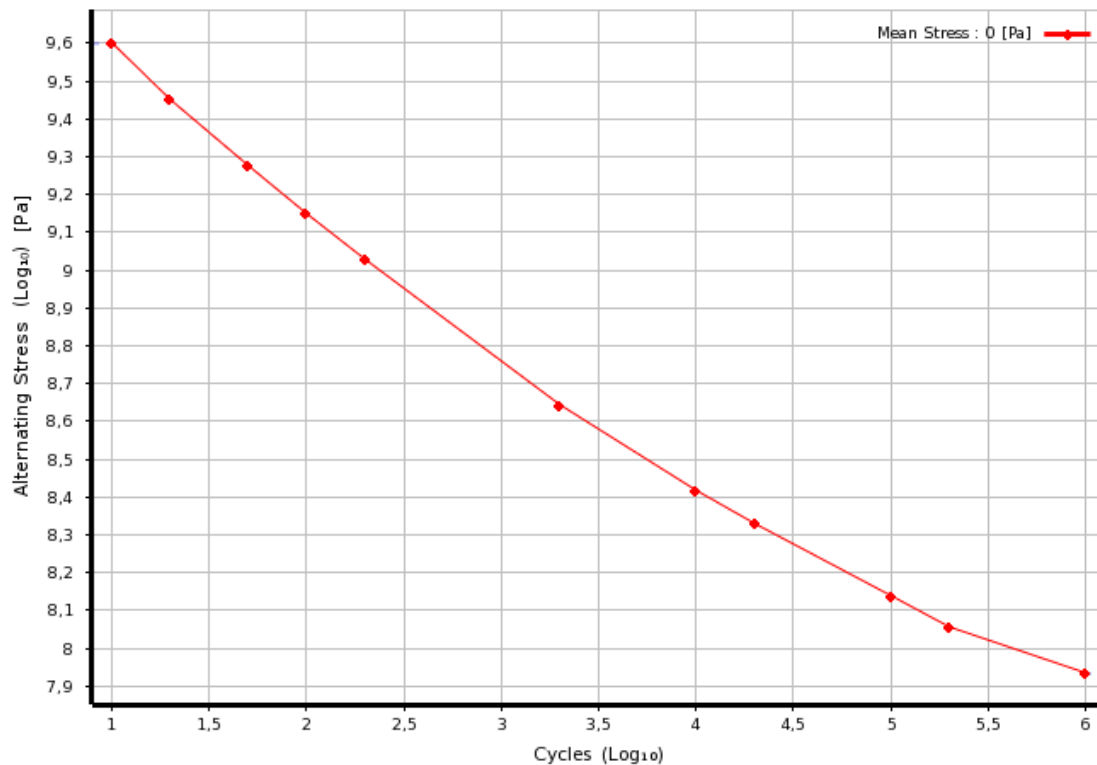
A2.1 Càlculs Estructurals

En aquesta secció es procedeix en mostrar com es realitzen els càlculs estructurals amb el programa *Ansys*®. Dels programes de l'*Ansys* es treballarà amb el "Workbench" que consisteix en un programa on es realitzen diferents blocs dels quals cada consisteix en un tipus de càlcul, aleshores, per a la realització dels càlculs estructurals es procedirà en utilitzar el bloc "Static Structural". Primer de tot, abans d'endinsar-se en el procés del càlcul caldrà definir el material emprat. Si no s'indica el contrari, el material utilitzat serà acer estructural considerant un límit elàstic de 275MPa. Aquest programa proporciona la majoria de les dades d'aquest material tal com les que es veuen en la següent taula dins de la pestanya "Engineering Data" del programa:

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	7850	kg m ⁻³
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
4	Coefficient of Thermal Expansion	1,2E-05	C ⁻¹
5	Isotropic Elasticity		
6	Derive from	Young's Modulu...	
7	Young's Modulus	2E+11	Pa
8	Poisson's Ratio	0,3	
9	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa
10	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa
11	Alternating Stress Mean Stress	Tabular	
12	Interpolation	Log-Log	
13	Scale	1	
14	Offset	0	Pa
15	Strain-Life Parameters		
16	Display Curve Type	Strain-Life	
17	Strength Coefficient	9,2E+08	Pa
18	Strength Exponent	-0,106	
19	Ductility Coefficient	0,213	
20	Ductility Exponent	-0,47	
21	Cyclic Strength Coefficient	1E+09	Pa
22	Cyclic Strain Hardening Exponent	0,2	
23	Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa
24	Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa
25	Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa
26	Compressive Ultimate Strength	0	Pa

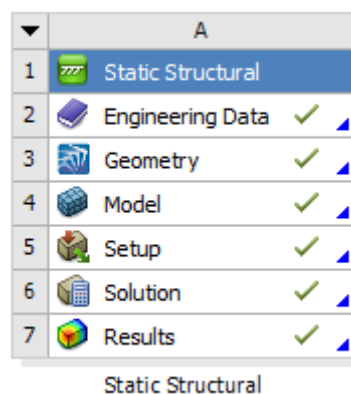
Taula 2 - Engineering data de l'acer de l'Ansys workbench

Els paràmetres importants a destacar seria la densitat, el coeficient d'expansió tèrmica, el mòdul de Young, el rati de Poisson, el gràfic obtingut entre la relació de tensió variable i tensió mitjana²⁰ mostrat en la il·lustració següent i per últim la tensió última del material.



Il·lustració 56 - Gràfic de variació de la tensió mitjana i la tensió variable utilitzat pel càlcul de fatiga

Aleshores, un cop determinat el material, per realitzar un primer càlcul estructural i verificació que la peça resisteix la càrrega aplicada es procedeix en inserir el bloc “Static Structural” i incorporant la peça a analitzar:



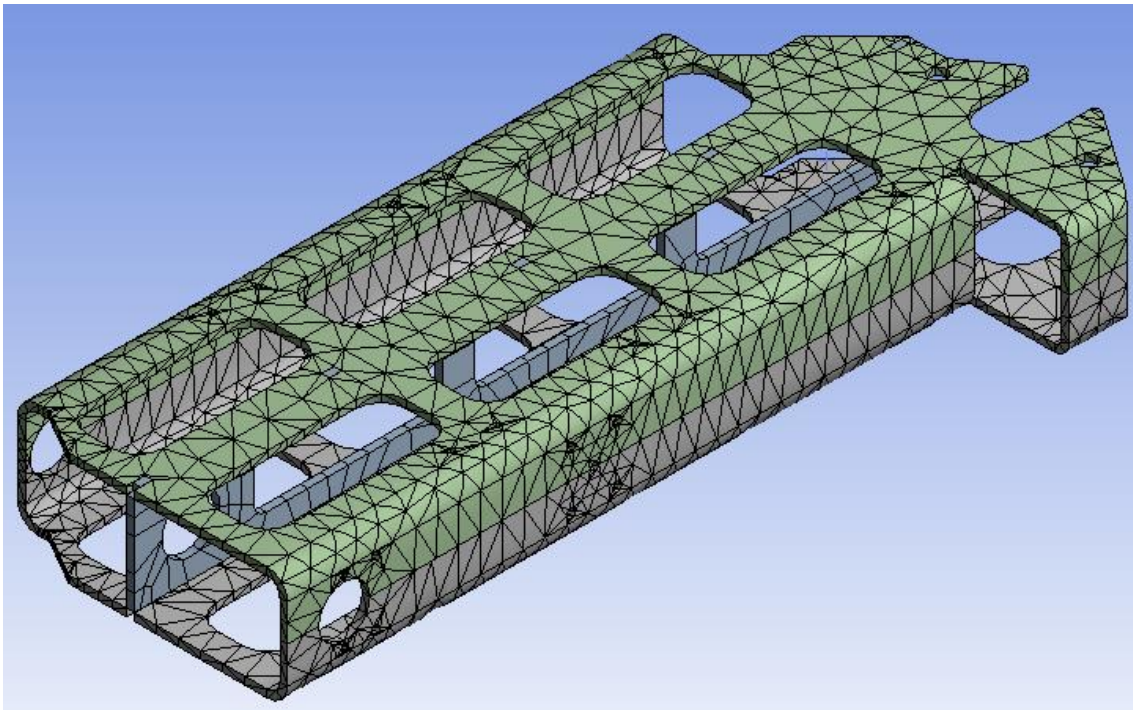
Il·lustració 57 - Workbench ansys pel Càlcul Estructural

²⁰ Utilitzat en el cas de la fatiga.

Seguidament, es treballa dins de l'apartat "Model" per incorporar les condicions de contorn i les càrregues que hi actuen. A continuació es mostra el procediment d'aplicació de les condicions de contorn d'aquesta peça i aplicant les càrregues corresponents.

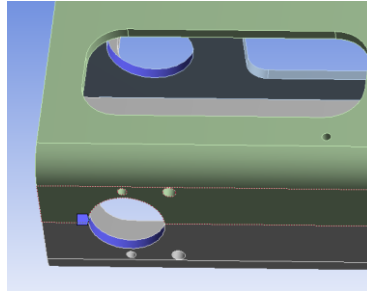
Un cop dins el "Model", abans d'establir les condicions de contorn i les càrregues aplicades caldrà definir una malla en el sistema ja que es disposa d'un programa CAE que treballa amb elements finits. Cal ressaltar que com que es treballa amb un programa amb llicència acadèmica aquest està capat respecte a la limitació del nombre de nodes i elements. On el nombre màxim de nodes i elements que el sistema pot tenir és de 32 000 nodes o 32000 elements, aleshores, realitzar una malla que s'ajusti a les necessitats de la peça i que no sobrepassi el límit de nodes es converteix en una tasca curiosa.

Aleshores, per definir aquesta malla en el sistema, s'ha optat per definir una malla adaptativa a la superfície on s'ha obtingut un total de 12010 nodes i 5173 elements, nombre inferior al límit de la llicència. Cal ressaltar que no s'ha pogut profunditzar més el sistema de mallat degut a que qualsevol millora significava un augment considerable del nombre de nodes o elements superant així el límit de la llicència. Llavors, el mallat obtingut és el que es mostra en la il·lustració següent:



Il·lustració 58 - Mallat Peça Suport Xassís Superior

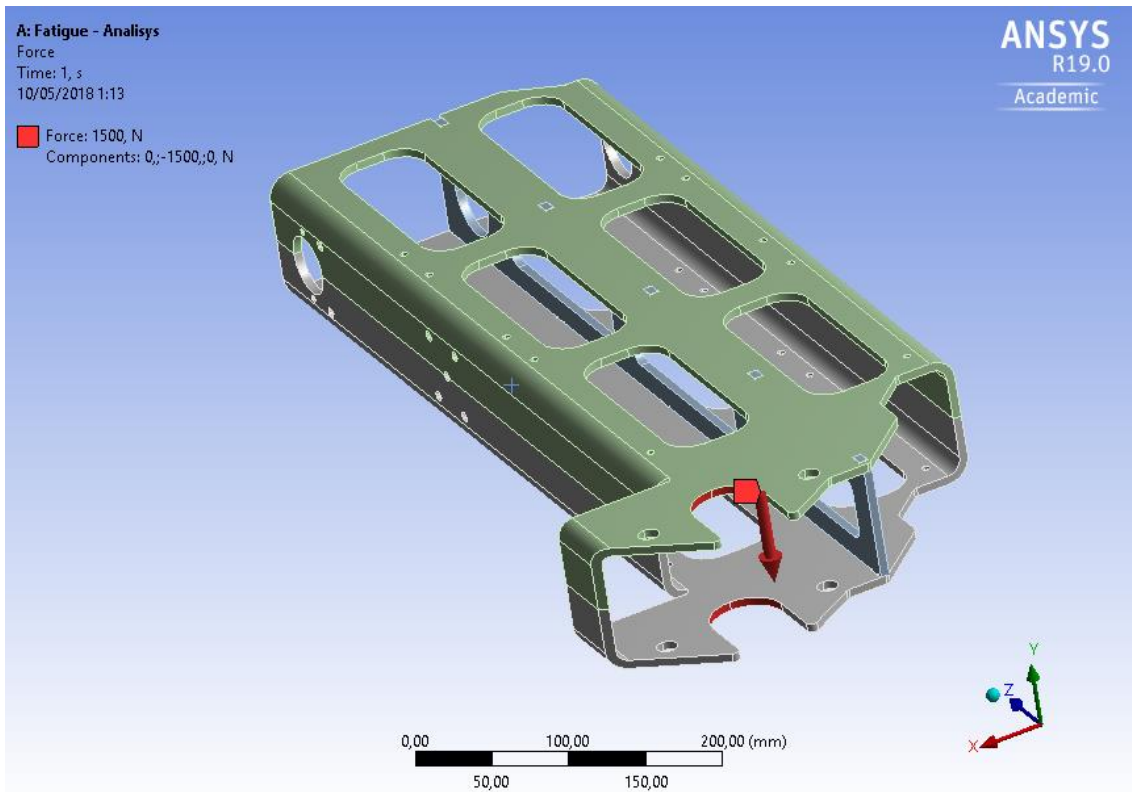
Un cop realitzat el mallat en la peça s'ha definit les condicions de contorn, en aquest cas s'ha definit els suports de l'estructura. Per definir els suports, s'ha considerat que la peça es trobava en la pitjo posició corresponent a una inclinació de 90° respecte a la vertical²¹. Aleshores, considerant que es troba en una posició de 90° s'ha definit el sistema de fixació com una biga en voladís establint un suport fix al lloc d'ubicació de l'eix del motor tal com es mostra en la següent il·lustració:



Il·lustració 59 - Suport Peça Suport Xassís Superior

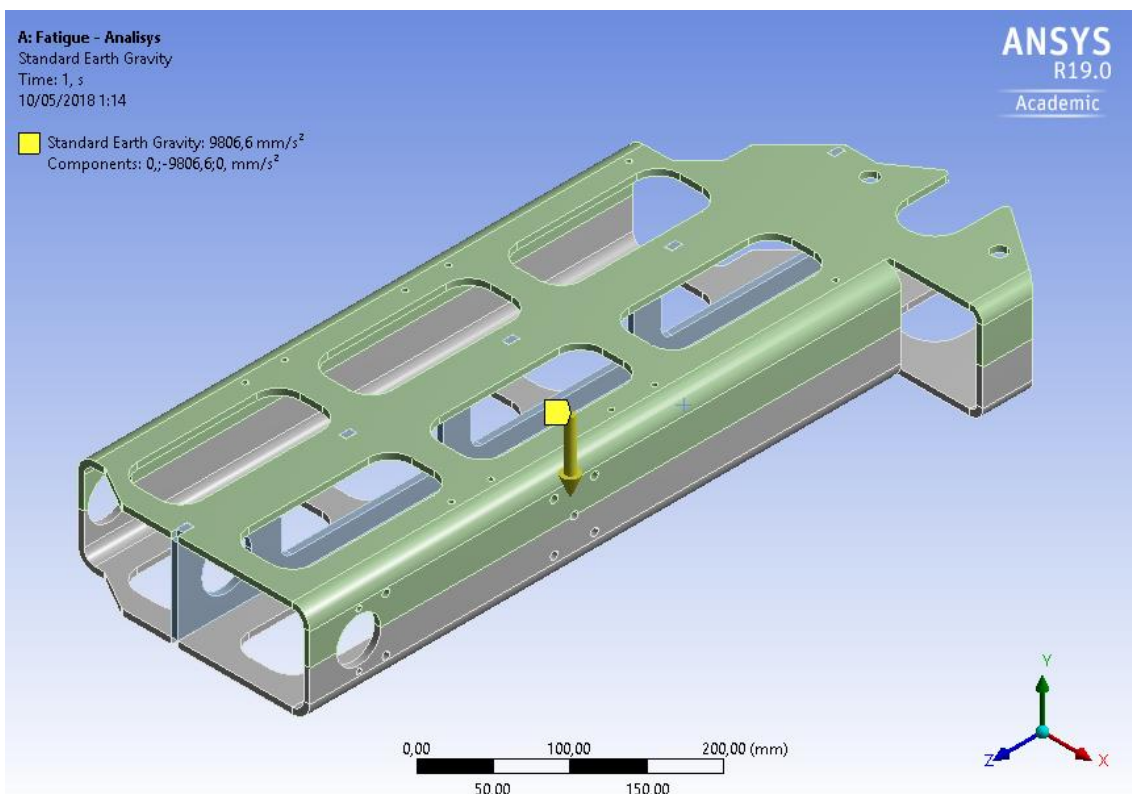
Un cop definit el suport caldrà definir quina és la força que actua en el sistema. Llavors s'ha considerat que es carrega el sistema amb el pes d'una persona de massa 100Kg i també se l'hi ha sumat el pes del xassís superior del simulador de la moto. Sent una força total aproximada de 1500N aplicada en el eix superior de la peça tal com es veu en la il·lustració successiva:

²¹ Posició a la qual mai podrà assolir ja que es pot inclinar un màxim de $\pm 60^\circ$. Però referit al càlcul estructural, aquesta posició correspon a la posició més indesitjable pel sistema obtenint unes tensions més elevades.



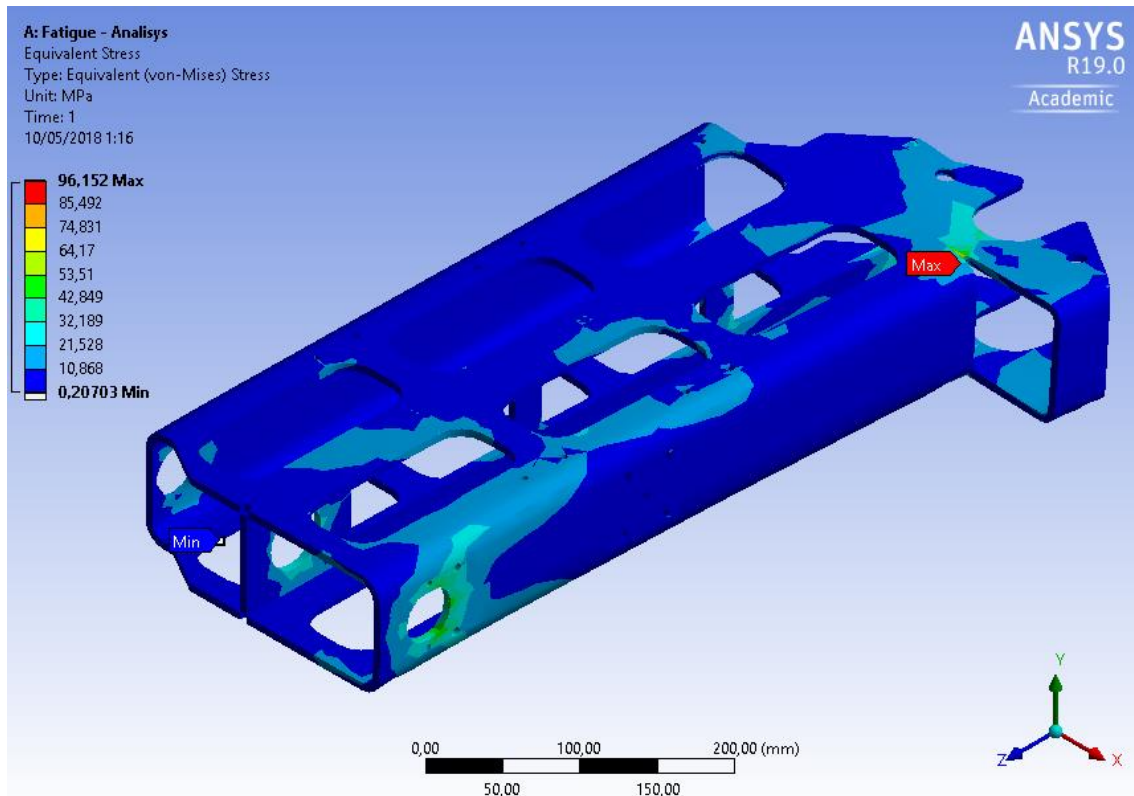
Il·lustració 60 - Càrregues externes

Per últim, per fer el sistema encara més real s'ha incorporat l'acceleració de la gravetat en direcció i sentit de l'eix Y negatiu.

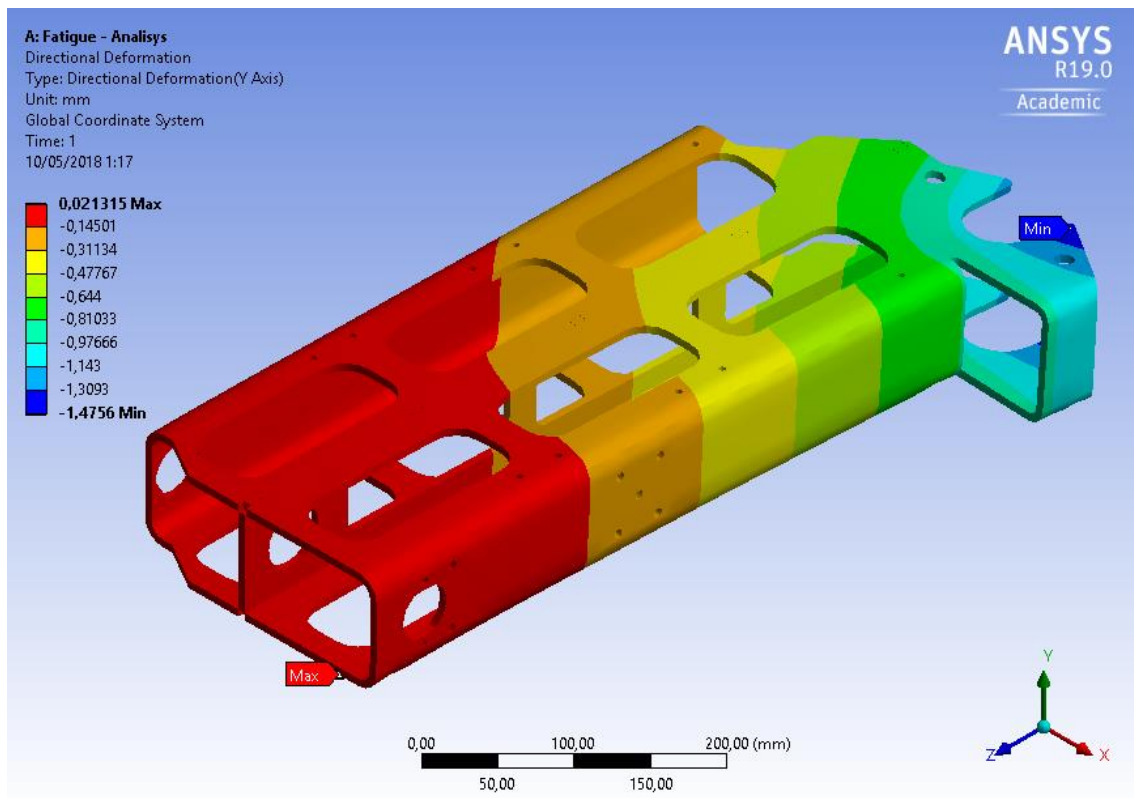


Il·lustració 61 - Acceleració de la gravetat

Un cop definides totes les condicions de contorn i totes les càrregues que actuen en el sistema es pot procedir en realitzar el càlcul. Per obtenir els resultats, se li ha indicat que calculi la tensió equivalent de Von-misses i la seva deformació al llarg de l'eix Y. Aleshores, els resultats obtinguts es mostren a continuació:



Il·lustració 62 - Tensió equivalent de von-Misses

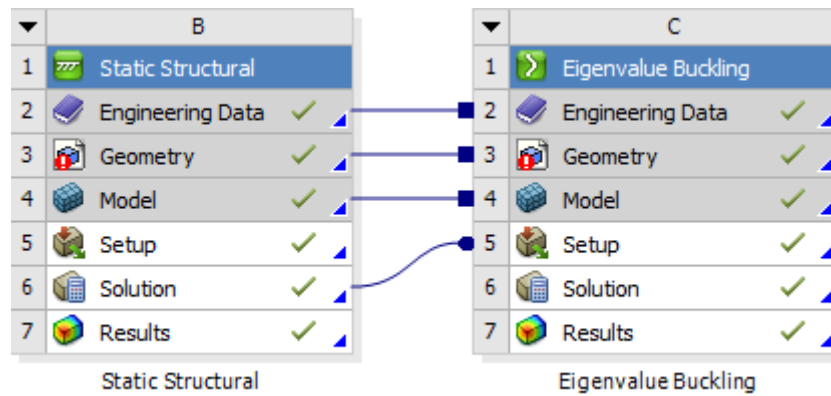


Il·lustració 63 - Deformació al llarg de l'eix Y

Com es pot veure, la tensió obtinguda és de 96,152 MPa una tensió per sota del seu límit elàstic. El que ens indica que aquesta peça resisteix les càrregues aplicades. Per part de la deformació, aquesta és de l'ordre de 1,476 mm on segons l'expressió: $\delta_{max} < \frac{L}{300}$ la deformació màxima que podria assolir aquesta peça seria de $\frac{560}{300} = 1.86mm$.

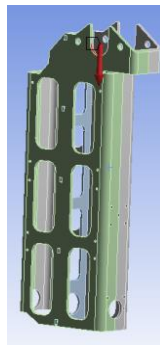
Com es pot veure la verificació estructural d'aquesta peça en aquestes condicions és satisfactòria. Nogensmenys es realitza un altre càlcul estructural però en condicions diferents i a part de ser verificat estructuralment, es verifica el vinclament de la peça al estar sotmesa a forces axials²². La peça es col·loca verticalment amb un suport fix a la part inferior i una força de compressió a la part superior, actuant aquesta peça com un pilar. Aleshores, per realitzar aquests càlculs, el "workbench" que s'ha de realitzar és el que es mostra a continuació on s'aplica un càlcul estructural i s'aprofiten les solucions per implementar el càlcul del vinclament de la peça.

²² Moto ubicada en posició vertical, corresponent a 0° d'inclinació.



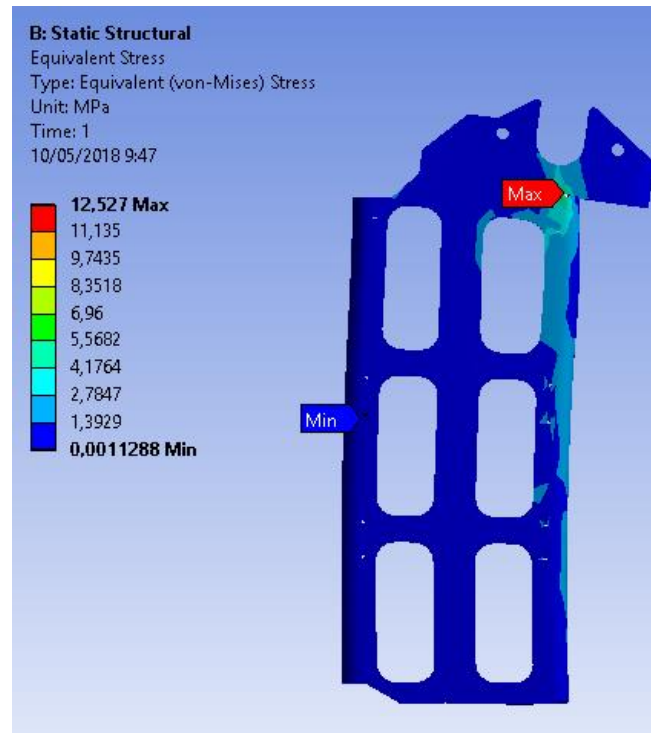
Il·lustració 64 - Workbench Ansys pel Càlcul de Vinclament

Dins de l'apartat de "Model" s'ha definit el suport com en el cas anterior i les forces que actuen, s'apliquen en aquest sentit:

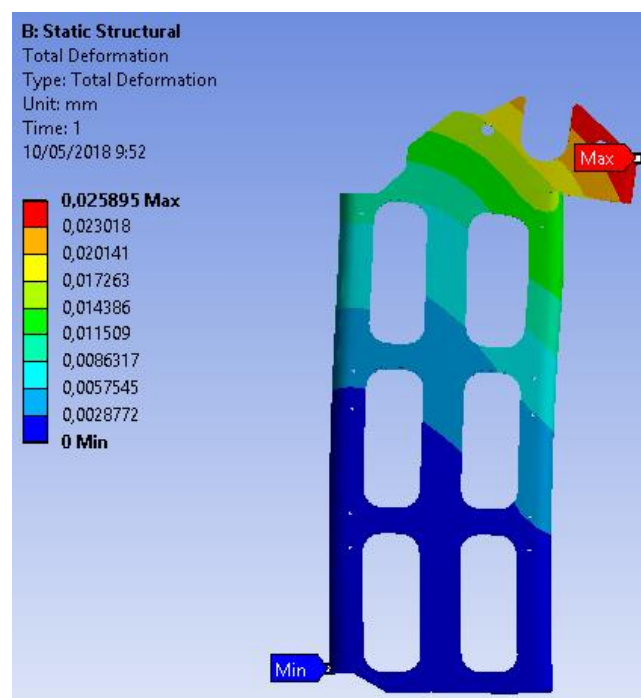


Il·lustració 65 - Actuació de les forces de compressió per calcular el vinclament

Conseqüentment, realitzant el càlcul estructural s'obté la tensió equivalent de Von-Misses i la deformació total d'aquesta peça. Els resultats obtinguts es mostren a continuació:



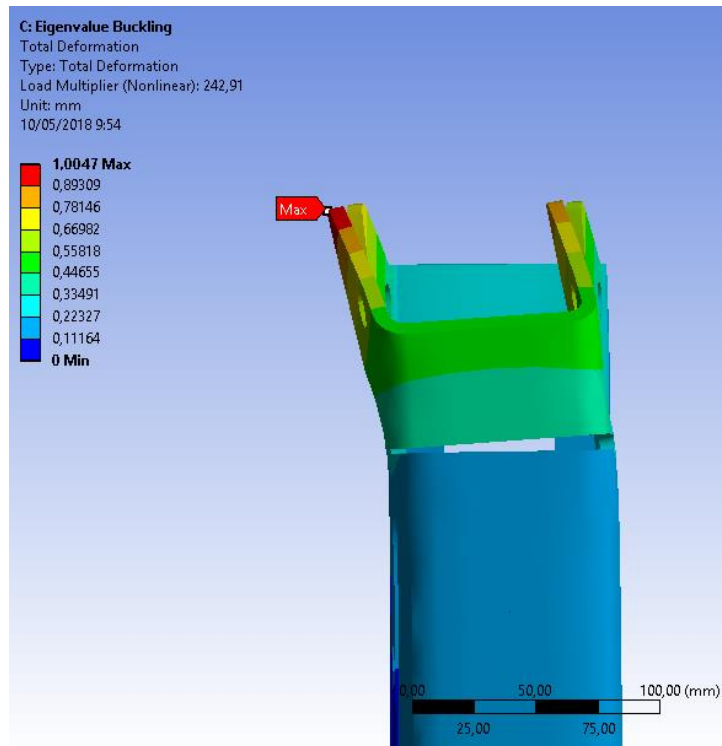
Il·lustració 66 - Tensió equivalent de Von-Misses – cas estructural



Il·lustració 67 - Deformació total – cas estructural

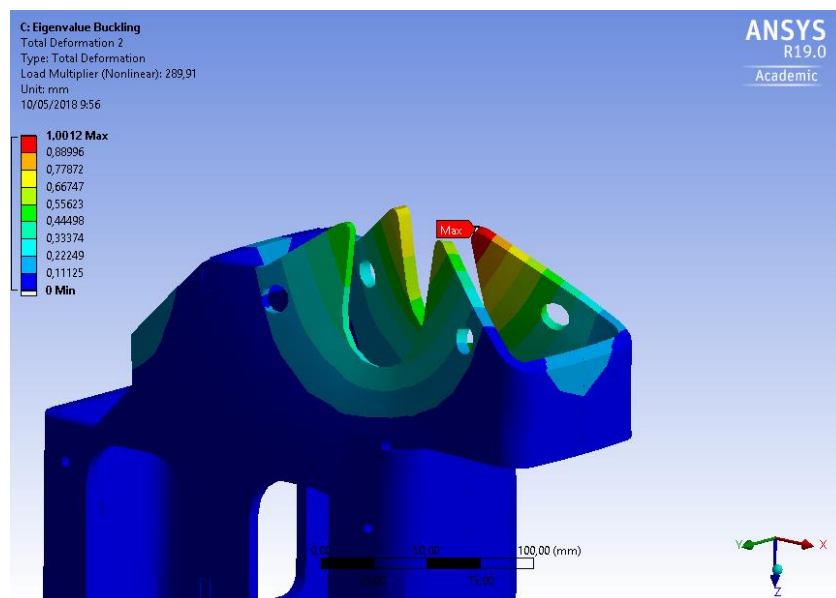
La tensió màxima assolida és de 12,527 MPa i la deformació és de 0,0259mm. Per altra banda, s'aprofitaran aquests resultats per obtenir els resultats del càlcul de vinclament. On en l'anàlisi de vinclament s'ha indicat que es volen trobar 4 modes de vinclament sent aquests els que es mostren a continuació:

El primer tipus de deformació que s'obté és el que es mostra en la imatge successiva on és vista des de l'eix X positiu.



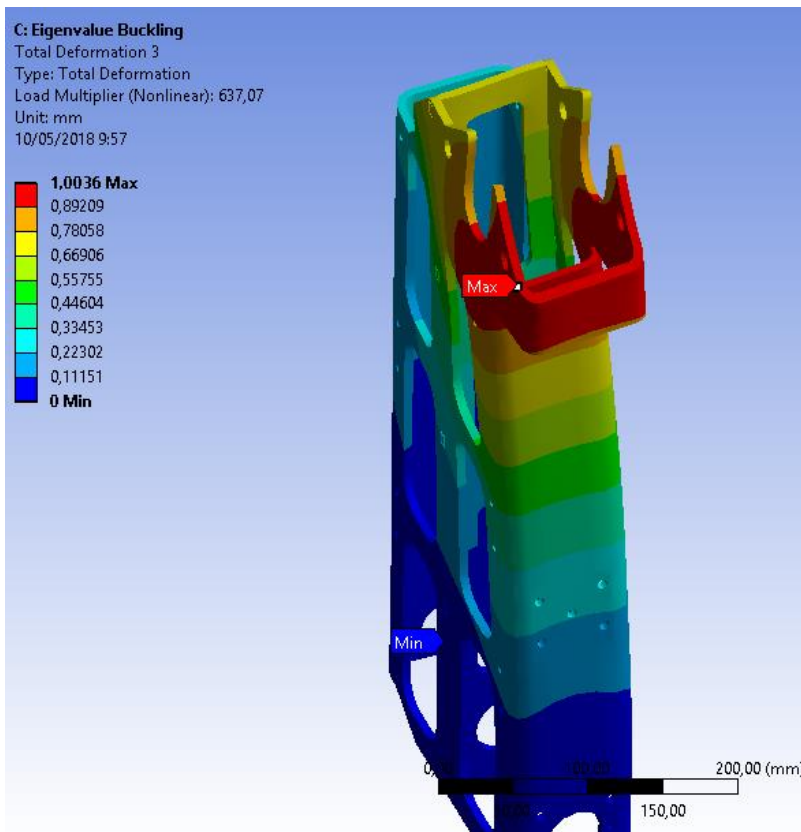
Il·lustració 68 - Primer mode de Vinclament

Per altra banda, el segon tipus de deformació que es pot obtenir és el que es mostra a continuació:



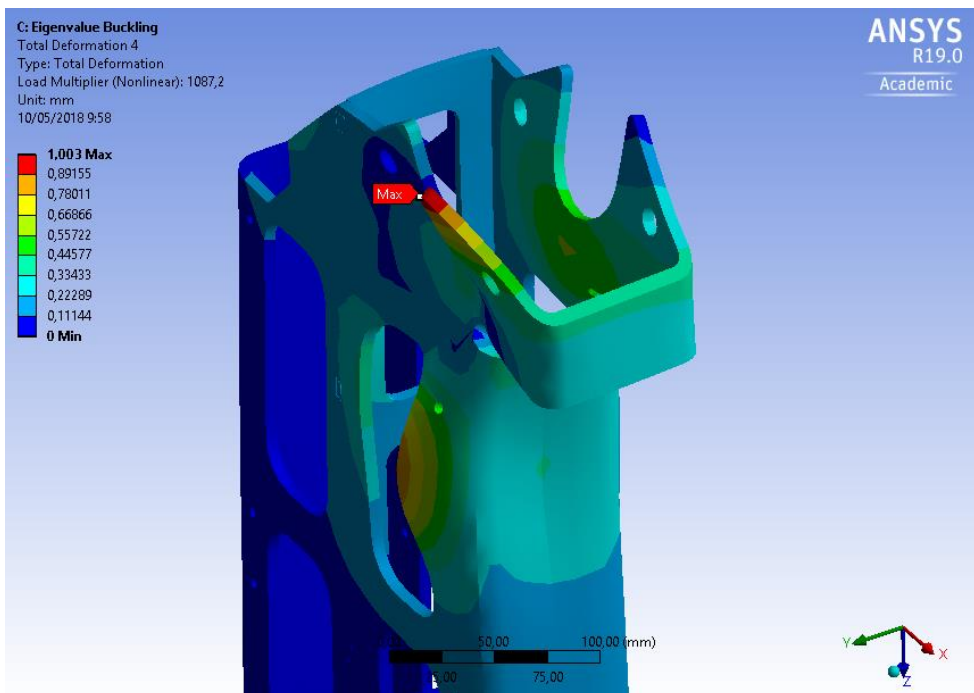
Il·lustració 69 - Segon mode de Vinclament

El tercer tipus de deformació seria el següent:



Il·lustració 70 - Tercer mode de Vinclament

Per últim, la quarta deformació obtinguda mostra el següent tipus de deformació:



Il·lustració 71 - Quart mode de Vinclament

Per assolir cada deformació s'ha realitzat una taula amb l'Ansys on obté la càrrega que se li ha d'aplicar a la peça per obtenir aquesta deformació. S'ha considerat en aquest cas que se li aplicava una força de 1N en comptes de 1500N i així el programa obté un factor multiplicatiu de la força aplicada, sent aquest valor el resultat de la força aplicada per assolir aquestes deformacions en el cas de vinclament. Els resultats obtinguts es mostren a la taula successiva:

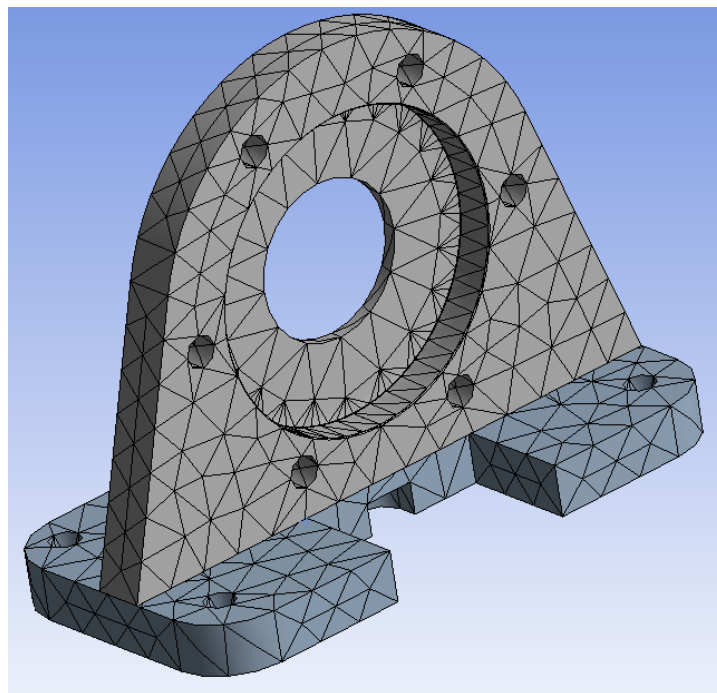
	Mode	<input checked="" type="checkbox"/> Load Multiplier
1	1,	1,8292e+005
2	2,	2,1817e+005
3	3,	4,7855e+005
4	4,	8,1613e+005

Taula 3 - Càrregues de forces per vinclament

Com es pot veure es disposa d'uns valors molt elevats de càrrega degut a que la peça es dunes dimensions molt reduïdes i caldria una càrrega més elevada per produir un vinclament de la peça.

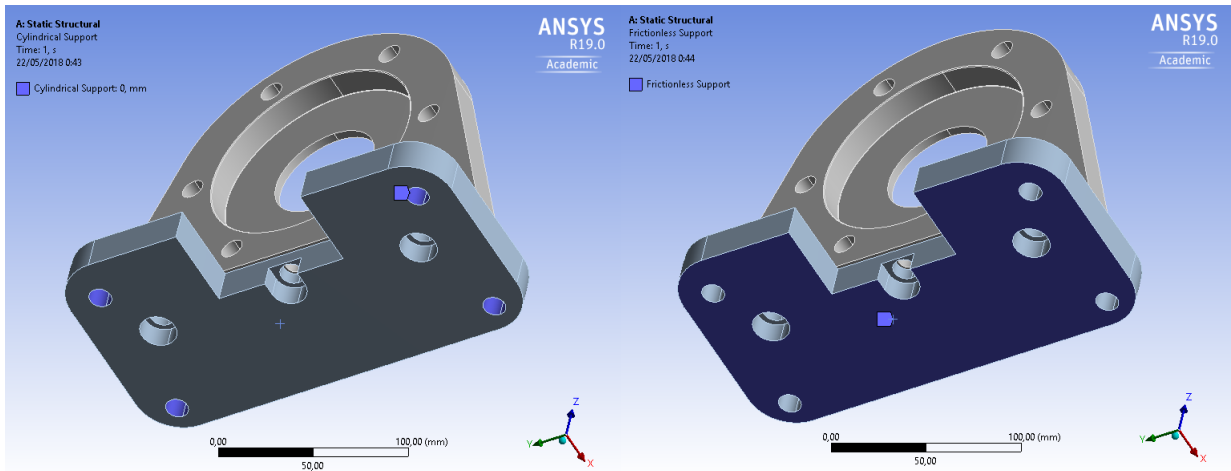
En aquest apartat, a part de realitzar un càlcul estructural i un de vinclament en la peça de suport del xassís superior del simulador de moto GP, també s'ha analitzat una altre peça ubicada en el suport de l'eix del motor, on aquesta aguanta la part superior del simulador de moto GP. Per a determinar les forces que actuen en aquesta peça, s'han obtingut dels càlculs prèviament realitzats en l'Annex A.1 on s'han aplicat els càlculs dinàmics per obtenir les reaccions sent aquestes aplicades com a càrregues en aquesta peça.

Aleshores, procedint com en aquest cas anterior, primerament, es realitzarà un mallat tal com es mostra en la il·lustració següent:



Il·lustració 72 - Mallat Orella

Un cop realitzat el mallat de la peça suficient adequat en funció de la resolució que es vol obtenir i del nombre de malles i elements que es disposen amb la versió estudiant²³, es procedeix en definir les condicions de contorn i les càrregues que actuen en aquesta peça. Respecte a les condicions de contorn, es pot definir 4 suports cilíndrics (esquerra) i un suport de contacte (dreta) tal com es mostra en la il·lustració següent:



Il·lustració 73 - Suports Orella. Esquerra: Cylindrical Suport. Dreta: Frictionless support

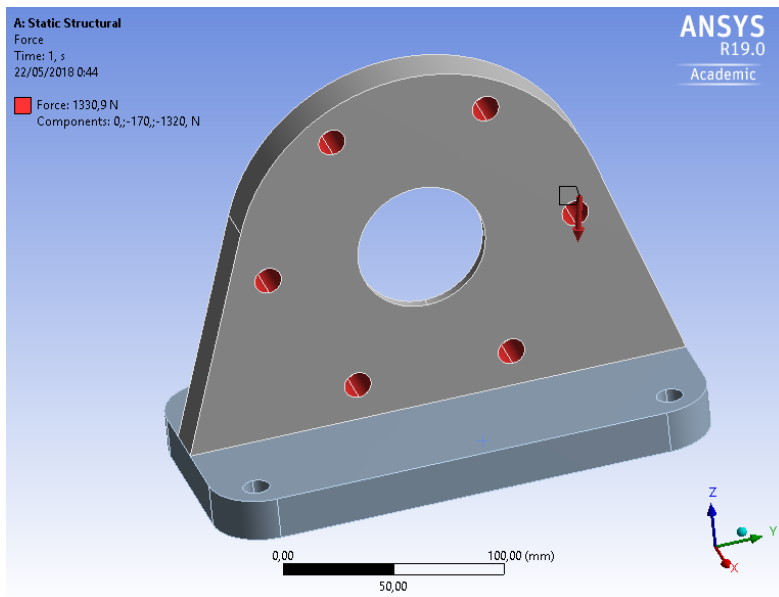
Un cop definides les condicions de contorn caldrà definir les forces que actuen, on aquestes corresponen a les reaccions O_y i O_x calculades en l'Annex A.1 en la secció de càlcul dinàmic. Seguidament, per definir aquestes forces, es defineixen en la taula que es mostra a continuació:

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	12 Faces
Definition	
Type	Force
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Component	0, N (ramped)
<input type="checkbox"/> Y Component	-170, N (ramped)
<input type="checkbox"/> Z Component	-1320, N (ramped)
Suppressed	No

Taula 4 - Definició de forces

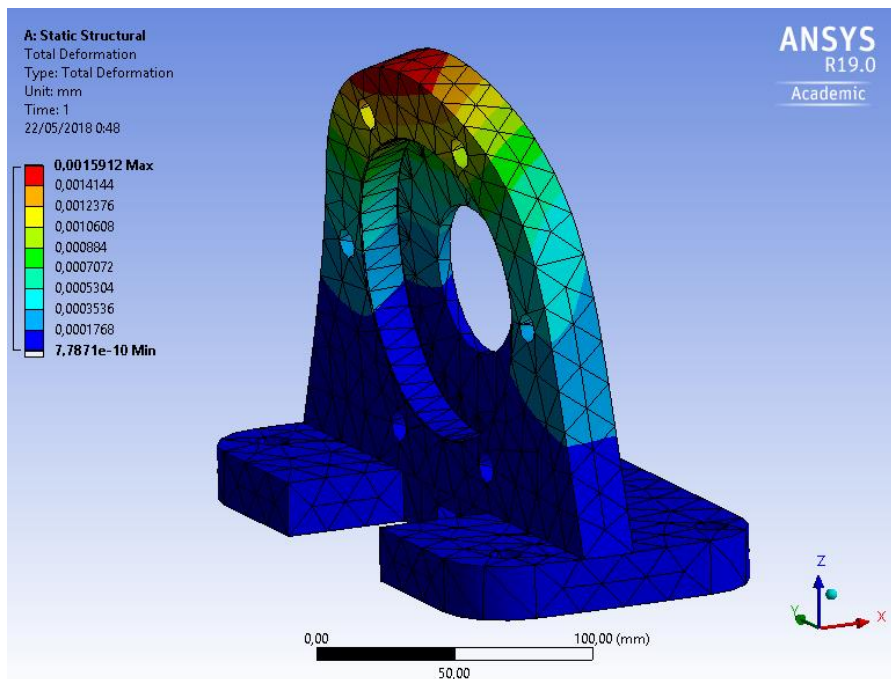
²³ Limitació de càlcul comentada anteriorment.

I s'apliquen en les superfícies de contacte amb els cargols, vegeu la següent il·lustració:

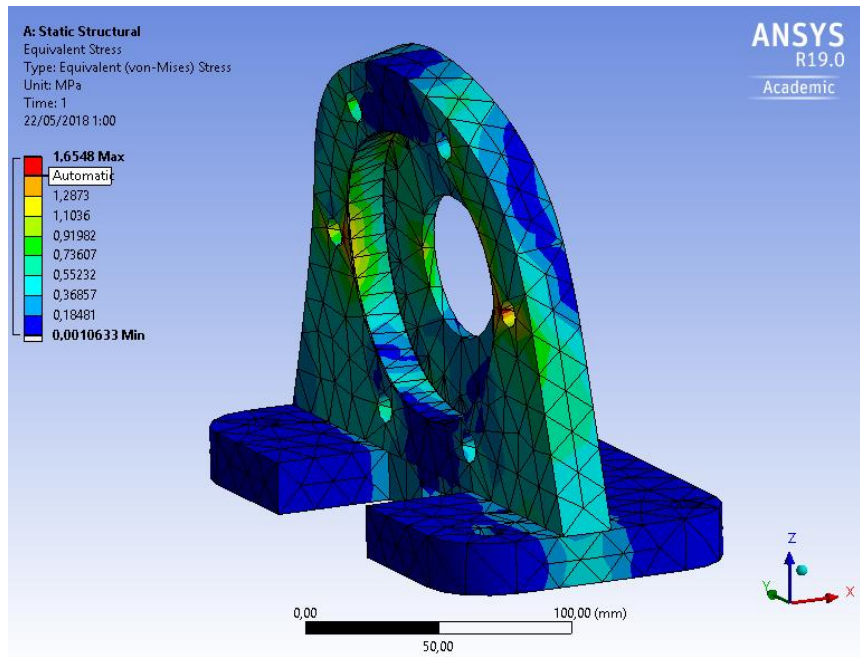


Il·lustració 74 - Aplicació de les reaccions O_x i O_y

En aquest càlcul estructural s'ha analitzat la deformació total de la peça i la seva tensió equivalent de Von-Misses, on els resultats obtinguts són:



Il·lustració 75 - Deformació Total Orella



Il·lustració 76 - Tensió Equivalent de Von-Misses Orella

La deformació de la peça és insignificant i per part de la tensió que pateix la peça, d'aquesta es pot apreciar la seva localització en un dels forats cosa que sempre la tensió que es localitza al voltant d'un forat és normalment 3 vegades més gran que la tensió normal en un altre punt equidistant de la peça. De la mateixa manera, aquesta peça tenint en compte les càrregues que se li apliquen, es pot deduir que és una peça sobredimensionada.

Com s'ha comentat en la memòria del TFG s'han realitzat uns càlculs per la verificació de l'estructura del simulador, on en aquest cas s'han implementat amb l'Ansys i un programa anomenat Autodesk Robot®. Un per verificar a través d'elements finits que l'estructura resisteix les càrregues aplicades segons (BSI, 2012) i (SE-AE, 2009). I l'altre programa per verificar manualment les tensions en les unions un cop les estructures estan unides.

Aleshores, com s'ha vist en la memòria aquest simulador disposa de dos tipus de mòduls per a l'estructura; un corresponent al mòdul central i l'altre corresponent als mòduls laterals. Aleshores, en el cas del programa Ansys, programa d'elements finits, s'analitzarà cada mòdul considerant les càrregues que i actuen en cada un d'ells. Per altra banda, en el cas del càlcul amb el programa Autodesk Robot, s'utilitzaran unes càrregues puntuals i uns moments aplicats en el centre de l'estructura per verificar-la en diferents posicions de recolzament.

Primerament, per determinar la càrrega que s'aplicarà en cada plataforma, aquesta ve regida pel CTE com s'ha mencionat anteriorment, sent aquesta una categoria C3²⁴ sent aquesta una càrrega de 5 KN/m².

²⁴ Zona C3 del CTE definit com a zona sense obstacles que impedeixen el lliure moviment de les persones.

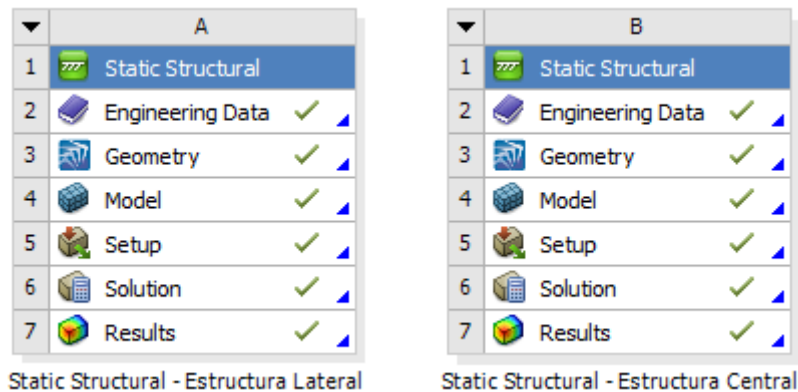
Projecte d'Actualització en el Disseny del Simulador de Moto GP de l'Empresa CKU Sport Fitness per a la Verificació Estructural dels Elements i la Millora del Sistema de Control

Categoría de uso		Subcategorías de uso		Carga uniforme [kN/m ²]	Carga concentrada [kN]
A	Zonas residenciales	A1	Viviendas y zonas de habitaciones en, hospitales y hoteles	2	2
		A2	Trasteros	3	2
B	Zonas administrativas			2	2
C	Zonas de acceso al público (con la excepción de las superficies pertenecientes a las categorías A, B, y D)	C1	Zonas con mesas y sillas	3	4
		C2	Zonas con asientos fijos	4	4
		C3	Zonas sin obstáculos que impidan el libre movimiento de las personas como vestíbulos de edificios públicos, administrativos, hoteles; salas de exposición en museos; etc.	5	4
		C4	Zonas destinadas a gimnasio u actividades físicas	5	7
		C5	Zonas de aglomeración (salas de conciertos, estadios, etc)	5	4
D	Zonas comerciales	D1	Locales comerciales	5	4
		D2	Supermercados, hipermercados o grandes superficies	5	7
E	Zonas de tráfico y de aparcamiento para vehículos ligeros (peso total < 30 kN)			2	20 ⁽¹⁾
F	Cubiertas transitables accesibles sólo privadamente ⁽²⁾			1	2
G	Cubiertas accesibles únicamente para conservación ⁽³⁾	G1 ⁽⁷⁾	Cubiertas con inclinación inferior a 20°	1 ⁽⁴⁾⁽⁶⁾	2
			Cubiertas ligeras sobre correas (sin forjado) ⁽⁶⁾	0,4 ⁽⁴⁾	1
		G2	Cubiertas con inclinación superior a 40°	0	2

Taula 5 – Valores típicos de les sobrecàrregues d'ús

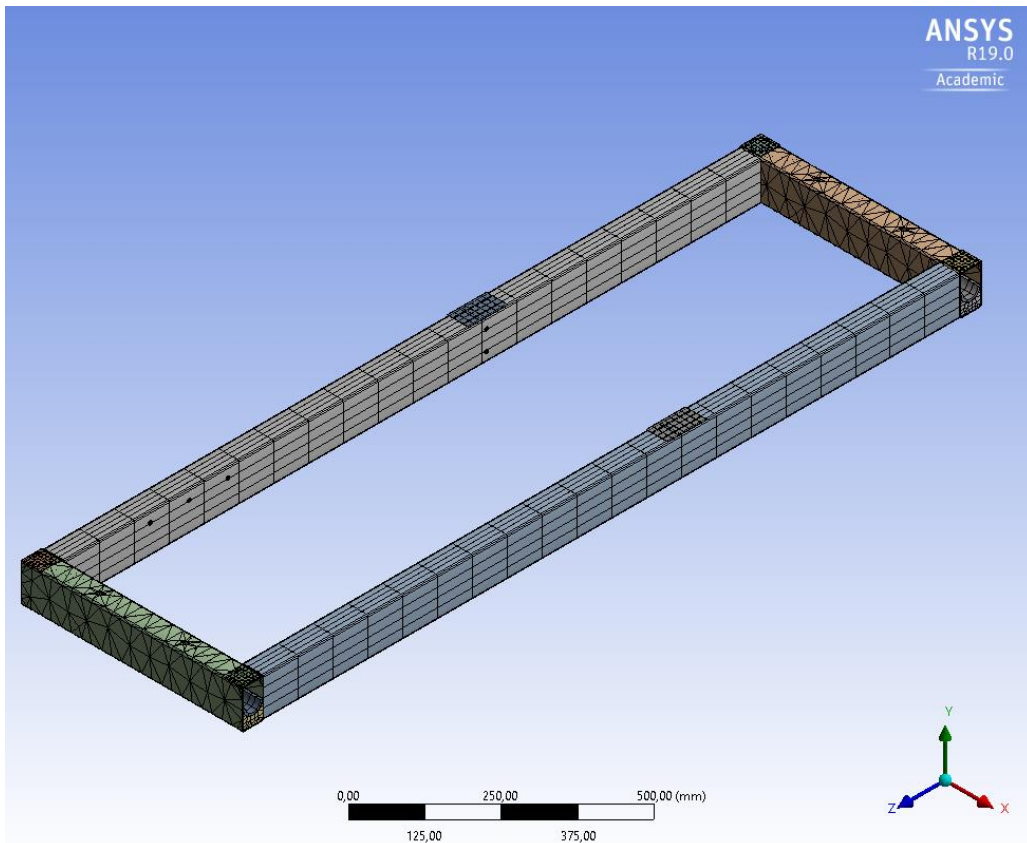
Analitzant l'estructura amb el programa Ansys, com en els cassos anteriors, on es verifica la seva resistència estructural calculant la seva tensió i a més es verifica la seva deformació que no excedeixi del seu llindar.

Aleshores, en el workbench s'hi ha implementat les dues estructures en blocs diferents:

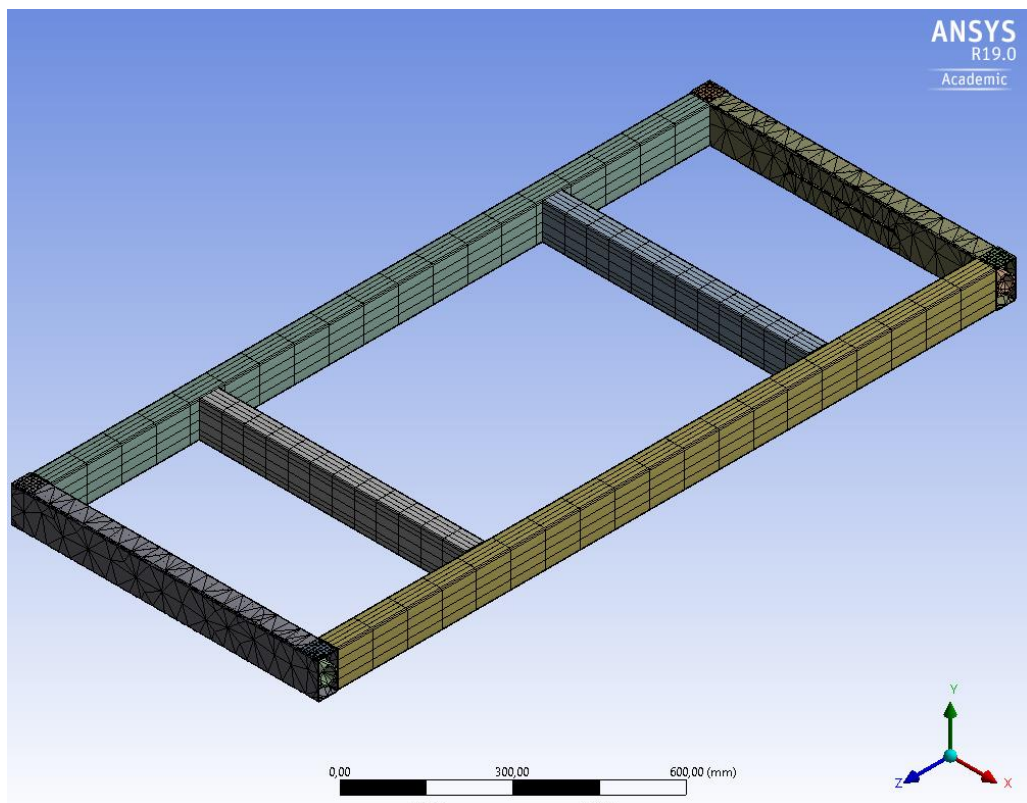


Il·lustració 77 - Workbench Ansys càlcul estructura

Seguidament, analitzant el mallat de les dues estructures:

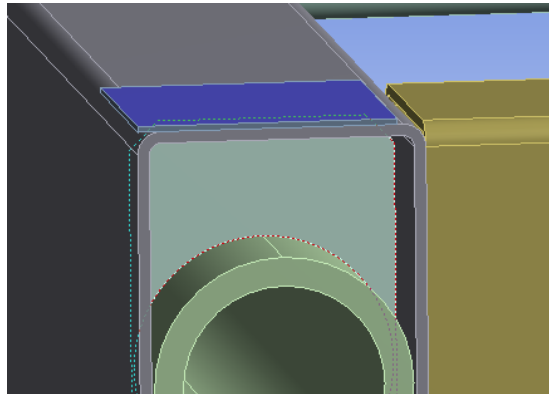


Il·lustració 78 - Mallat Estructura Central



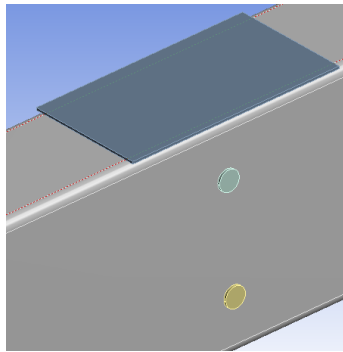
Il·lustració 79 - Mallat Estructura Lateral

Cal notar que en aquestes estructures s'hi ha incorporat petites superfícies en determinats llocs per tal de simular les condicions de contorn que esdevenen en cada estructura. Algunes de les superfícies són les que es mostren a continuació:

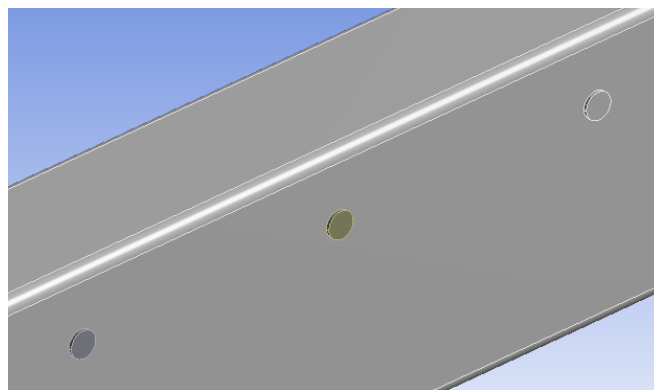


Il·lustració 80 - Detall Superfície Suport fix o amb lliscament

Il·lustració 81 - Detall on es subjecta el motor i cargols on es subjecten estructures



Il·lustració 81 - Detall on es subjecta el motor i cargols on es subjecten estructures



Il·lustració 82 - Detall on es cargolen estructures per a subjectar el motor

Com s'ha vist en aquestes il·lustracions es disposa de diferents condicions de contorn que intervenen en el càlcul. Per aquest motiu s'ha realitzat un anàlisi més acurat per simular millor les condicions de contorn i les càrregues aplicades en el sistema. En el cas de la Il·lustració 81 - Detall on es subjecta el motor i cargols on es subjecten estructures i la Il·lustració 82 - Detall on es cargolen estructures per a subjectar el motor corresponen únicament a l'estructura central.

Llavors, un cop s'ha definit les condicions de contorn com les fixacions, els suport que permeten el desplaçament, consegüentment, es defineixen i es calculen d'una manera curosa les càrregues que actuen en cada sistema. Referenciats a les estructures laterals on aquestes han de resistir la càrrega provinent de les persones, es realitza una distribució de càrregues trapezoidal aplicada en cada tub, sent aquesta una manera molt ajustada de la distribució de les càrregues en cada tub d'acer. En la següent il·lustració es mostra un esquema de la càrrega que haurà de resistir cada tub de l'estructura lateral.

Per calcular la càrrega equivalent que s'ha d'aplicar en els travesser centrals, es calcula l'àrea de càrrega que ha de resistir.

$$A_1 = 2 \cdot \frac{b_1 \cdot h_1}{2} + (750 - b_1 \cdot 2) \cdot h_1 = 445 \cdot 445 + (750 - 2 \cdot 445) \cdot 445$$

On:

$$b_1 = \tan(45) \cdot \frac{890}{2} = 445mm$$

$$h_1 = \frac{890}{2} = 445mm$$

$$b_2 = \frac{410}{2} = 205mm = h_2$$

$$A_1 = 135,73 \times 10^3 mm^2$$

$$A_2 = 2 \cdot \frac{b_2 \cdot h_2}{2} + (750 - 2 \cdot b_2) \cdot h_2 = 205^2 + (750 - 2 \cdot 205) \cdot 205$$

$$A_2 = 111,73 \times 10^3 mm^2$$

I l'àrea total:

$$A_2 = A_1 + A_2 = 247,46 \times 10^3 mm^2$$

Llavors la càrrega total que haurà de resistir aquest travesser en funció de la tensió que s'ha acordat, ve determinada per la fórmula següent:

$$Q = \sigma \cdot A = 5 \times 10^3 \frac{N}{m^2} \cdot \frac{1m^2}{1000^2 mm^2} \cdot 247,46 \times 10^3 = 1237,3N$$

Ara si es calcula la superfície sobre la que es recolzarà aquesta càrrega, sent aquesta la superfície del tub.

$$S = 50 \cdot 750 = 37500 mm^2$$

Aleshores, la tensió que s'aplica en aquest tub per a realitzar els càlculs de verificació estructural ve determinada per:

$$\sigma = \frac{1237,3}{37500} = 32,99 \times 10^{-3} \text{MPa} = \text{N/mm}^2$$

Llavors calculant els muntants de l'estructura, seguint el mateix procediment s'obté l'àrea triangular en aquest cas de diferents mides corresponent a:

$$A_1 = \frac{b \cdot h}{2} = \frac{410 \cdot 205}{2} = 42025 \text{ mm}^2$$
$$A'_1 = \frac{b \cdot h}{2} = \frac{890 \cdot 445}{2} = 198023 \text{ mm}^2$$

I l'àrea total:

$$A_T = 240050 \text{ mm}^2$$

Aleshores, tenint en compte que l'àrea de contacte amb el tub ve descrita per:

$$A_{sup,tub} = (410 \cdot 2 + 890) \cdot 50 = 85500 \text{ mm}^2$$

La càrrega total que s'aplica en aquest muntant és:

$$Q = 5 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \frac{1 \text{ m}^2}{1000^2 \text{ mm}^2} \cdot 240,05 \times 10^3 = 1200,25 \text{ N}$$

I la tensió:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{1200,25 \text{ N}}{85500 \text{ mm}^2} = 0,014 \times 10^{-3} \text{MPa} = 0,014 \text{ KN/m}^2$$

Llavors pels tubs ubicats a l'extrem l'àrea de càrrega correspon a la mateixa àrea que la A_2 així que la càrrega total aplicada és:

$$A = A_2 = 111,73 \times 10^3 \text{ mm}^2$$
$$Q = \sigma \cdot A = 5 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \frac{1 \text{ m}^2}{1000^2 \text{ mm}^2} \cdot 111,73 \times 10^3 \text{ mm}^2 = 558,65 \text{ N}$$

I la tensió:

$$\sigma = \frac{558,65}{37500} = 14,897 \times 10^{-3} \text{MPa} = 14,897 \text{ KN/m}^2$$

Llavors, un cop determinades totes les càrregues que s'apliquen en cada tub, es pot definir en el programa, però per altra banda, per determinar les càrregues que actuen en l'estructura central, s'agafa el pes total de l'estructura que es troba al damunt seu, se l'hi aplica un coeficient de seguretat i es distribueix de forma uniforme per tots els components que subjecten l'estructura del motor. Per altra banda, les masses que intervenen serien el pes de la persona, el pes del xassís superior de la moto, la massa del motor i la massa de l'estructura de ferro que subjecte el motor i el xassís superior, sent aquestes:

$$P = 100kg$$

$$x = 50kg$$

$$m = 50kg$$

$$F \cong 20kg$$

$$m_T = 100kg + 50kg + 50kg + 20kg \cong 220kg$$

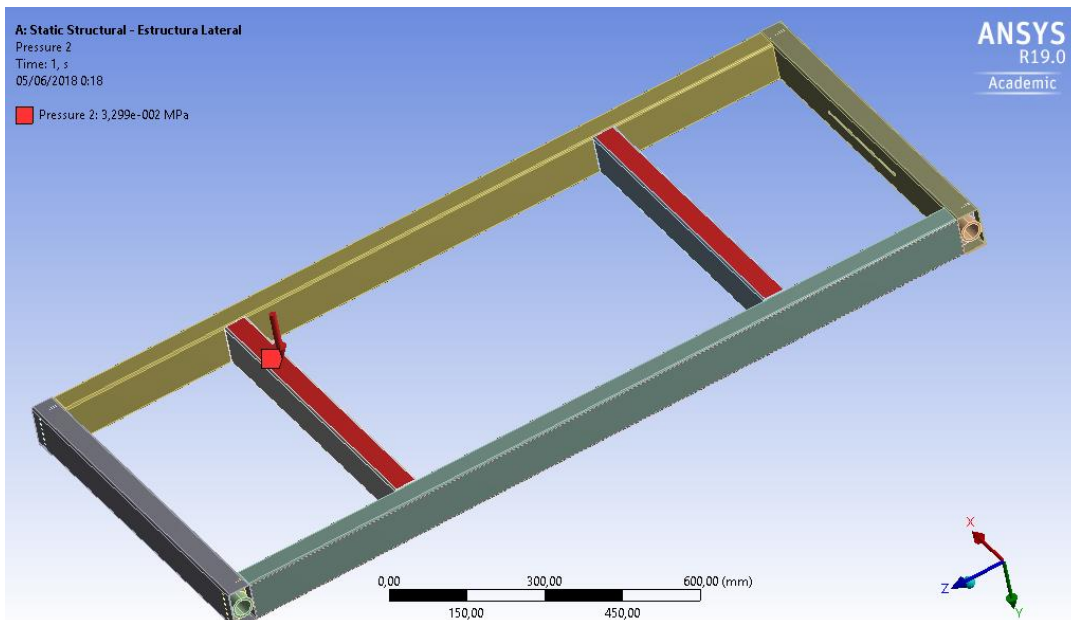
On es majora la càrrega amb el coeficient de seguretat:

$$220kg \cdot 1,35 = 297kg$$

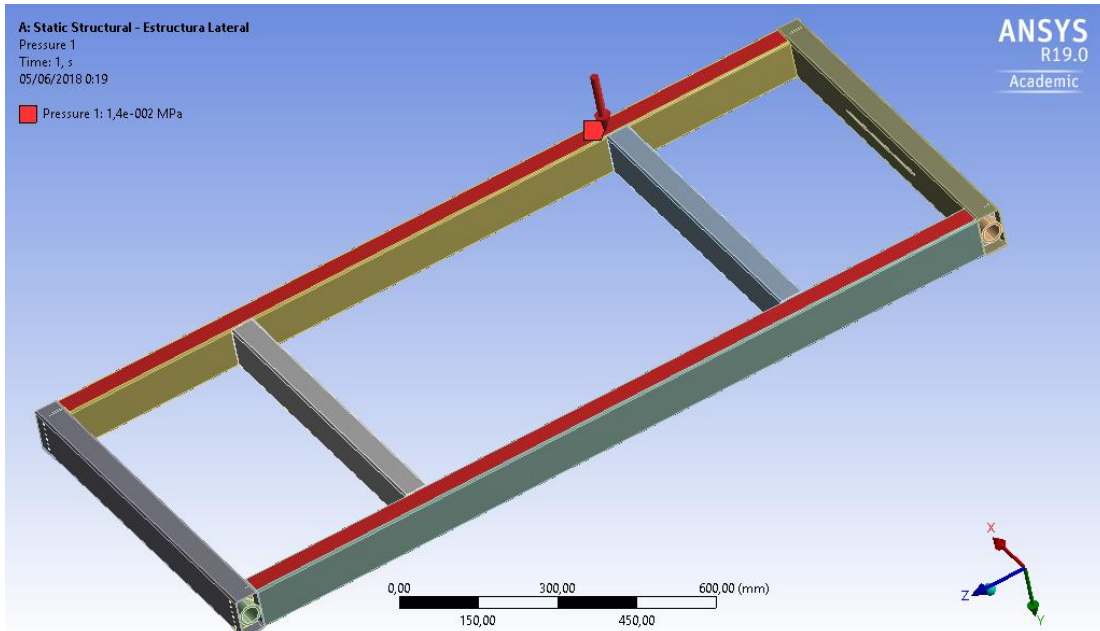
I finalment, la força que s'aplica uniformement en l'estructura és:

$$F = 297kg \cdot 9,81 = 2913,5N$$

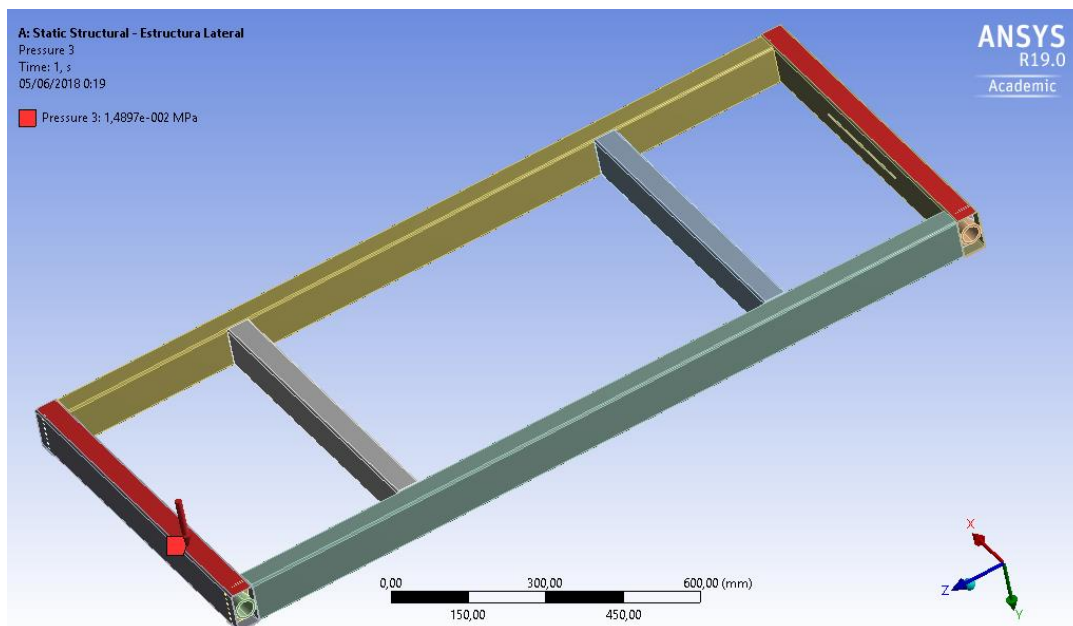
Aleshores, en les il·lustracions següents es mostra les diferents càrregues aplicades en els sistemes, tant en l'estructura lateral com en l'estructura central.



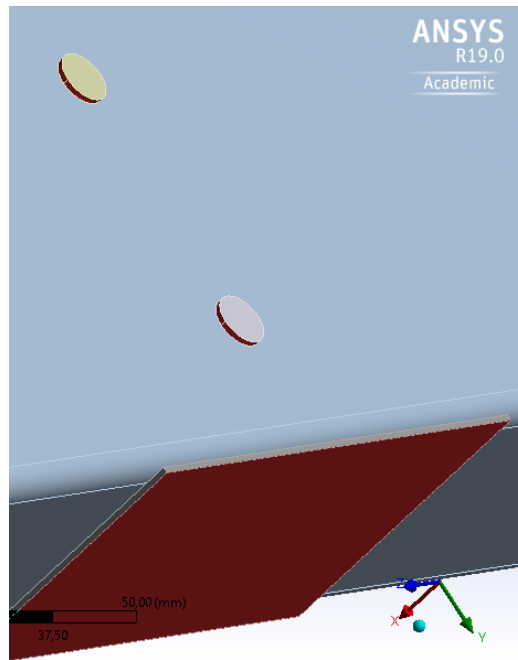
Il·lustració 83 - Càrrega Travessers



Il·lustració 84 - Càrrega Muntants



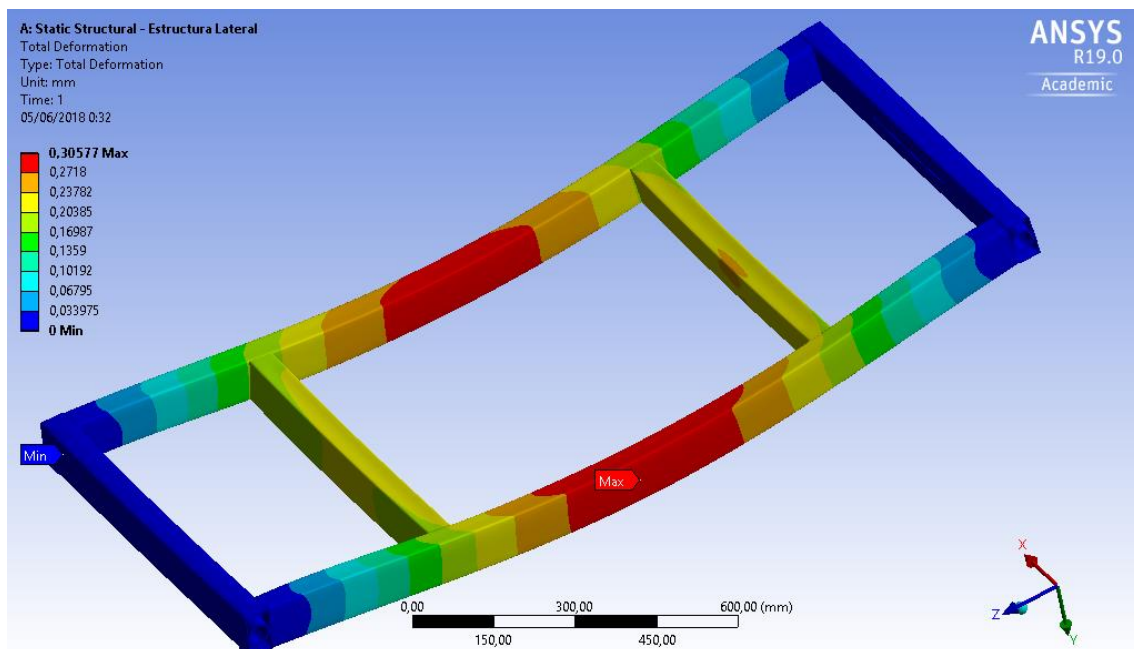
Il·lustració 85 - Càrrega dels tubs ubicats als extrems



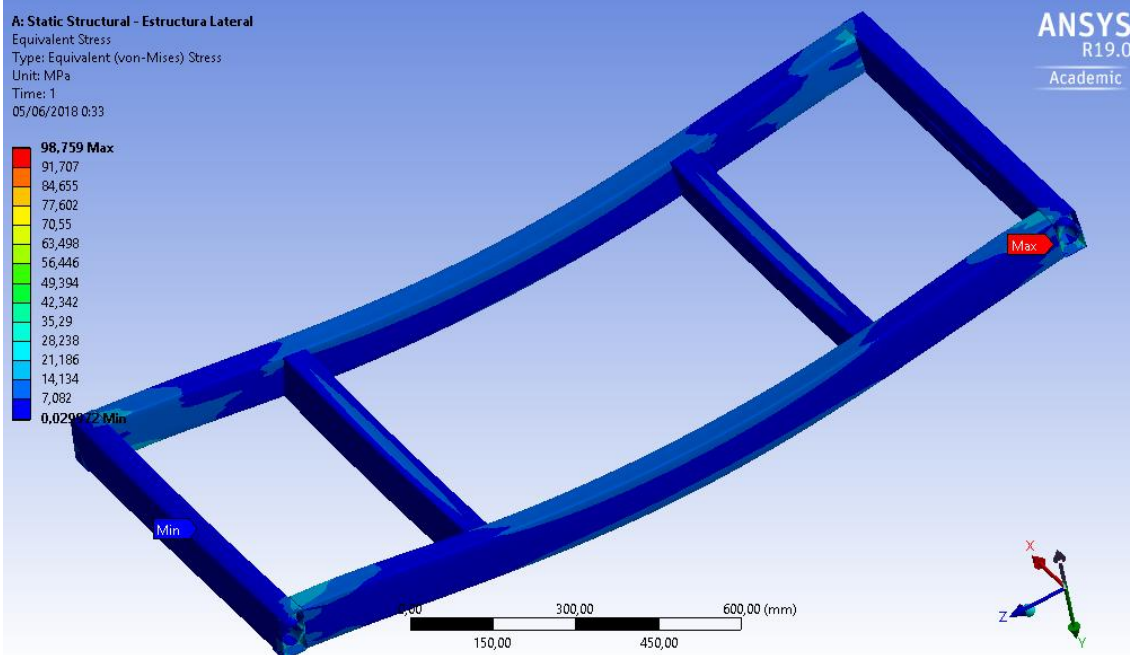
Il·lustració 86 - Càrrega de l'estructura central

En l'última il·lustració, correspon aquesta a l'estructura central, on les càrregues s'apliquen de manera uniforme i en aquest cas s'apliquen en les unions per cargols en el sentit de l'eix Y positiu representant l'acció de la gravetat.

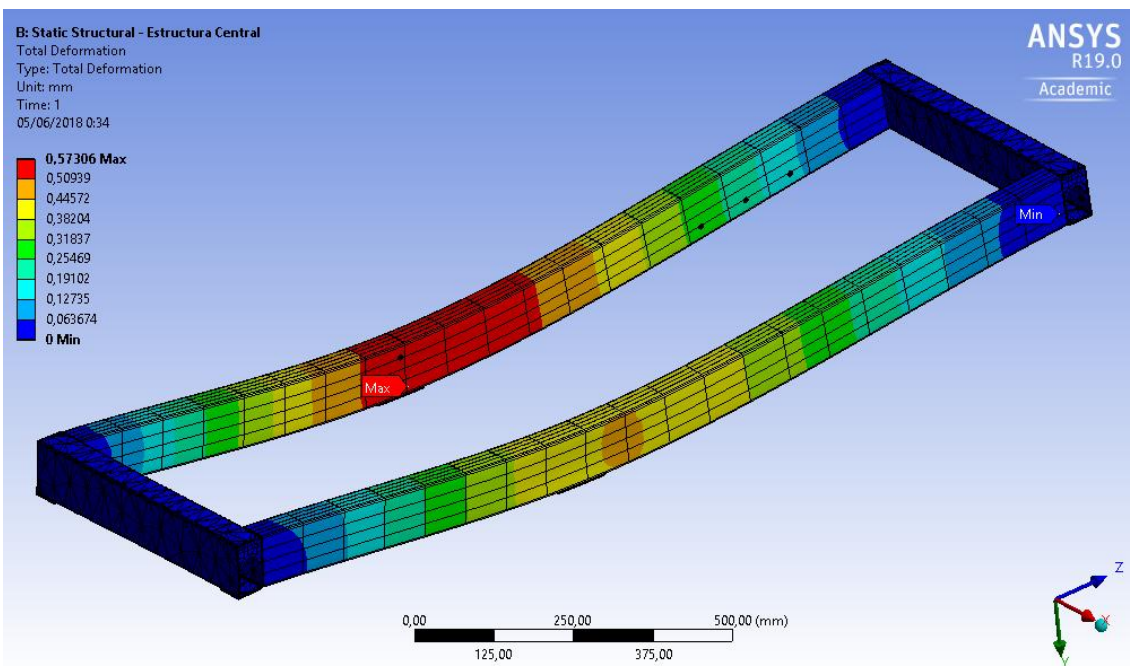
Seguidament, es mostren els resultats obtinguts i s'analitza la tensió equivalent de Von-Misses i la deformació total.



Il·lustració 87 - Deformació Total Estructura Lateral



Il·lustració 88 - Tensió de Von-Misses Estructura Lateral



Il·lustració 89 - Deformació Total Estructura Central

Com es pot veure en els resultats, en el cas de l'estructura lateral, la deformació total obtinguda és de 0,3mm sent la màxima permessa de 3,42mm. Per altra banda, la tensió obtinguda és de 98,759 MPa d'un màxim permès de 275MPa i com es pot veure, es localitza en les extremitats en els punts menys definits respecte al mallat realitzat.

En el cas de l'estructura central, aquesta només es disposa de la deformació obtinguda corresponent a una deformació de 0,573 mm acceptant també una deformació màxima de 3,42mm. Respecte a la tensió, no s'ha pogut facilitar en aquest cas degut a problemes de malla per a la resolució de cada element on donava indeterminacions en les zones de carència de malla.

Un cop dimensionada l'estructura es procedeix en treballar a través del programa *Autodesk Robot®* citat anteriorment. Aleshores a continuació es procedirà en analitzar l'estructura un cop unida mitjançant dues situacions de càrrega, una on es disposa de 4 suports, les dues rodes i els dos punts de suport en els extrems de les plataformes laterals. I l'altre cas corresponent en que s'ha cargolat massa els suports laterals i l'estructura central no toca a terra així només es recolza les potes laterals de les estructures laterals. Com es pot veure, en el segon cas de càrrega s'ha suposat que és el cas més nefasta.

Llavors, s'analitza el primer cas i s'explica detallada ment els passos seguits on posteriorment, s'acabarà de fer una verificació segons la normativa vigent en l'Eurocodi 3 d'estructures d'acer.

En aquest programa es treballarà sobre un pla XZ on s'han definit els diferents nodes del sistema sent aquests en els extrems de cada estructura i en el centra on s'aplicarà la càrrega de l'estructura i el seu corresponent moment, simulant que el simulador es torba inclinat. Seguidament, es defineixen els elements que uneixen aquest sistema i els diferents suports d'aquest, un de fix i els altres que bloquegen el moviment vertical de l'element. Obtenint el següent resultat:



Il·lustració 90 - Esquematzació de l'estructura en el primer cas de condicions de contorn

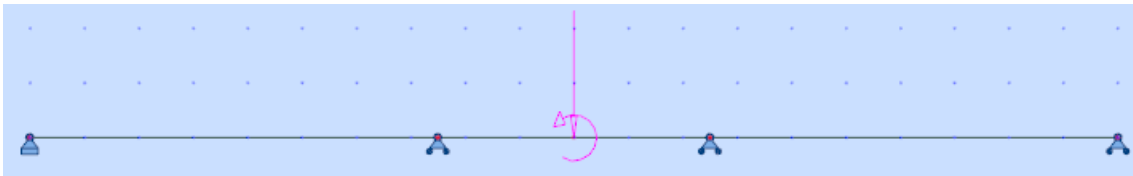
Per calcular el valor de les càrregues que se li ha d'aplicar, aquestes es calculen:

$$Q = (P_m + P_p) \cdot 1,35 \cdot 9,81 = (50 + 100) \cdot 1,35 \cdot 9,81$$
$$Q = 1986,55N$$

Mentre que el moment ve determinat per:

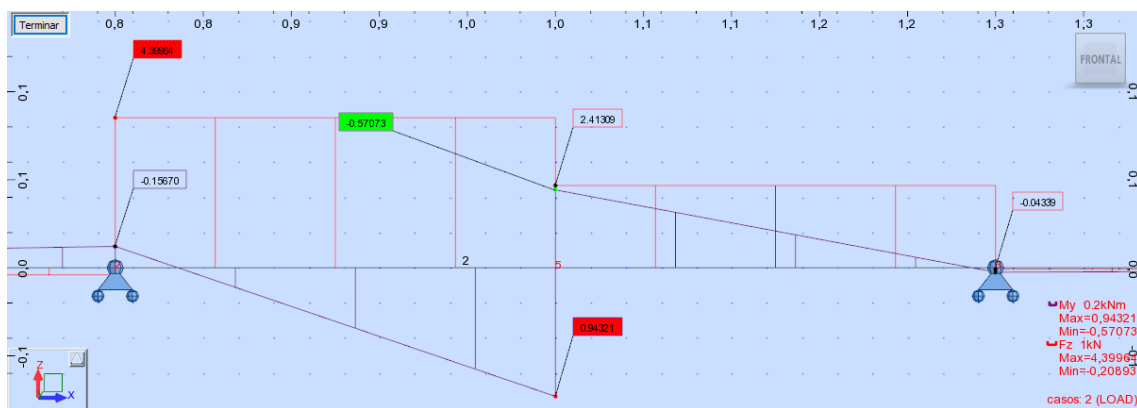
$$M = (P_m \cdot d_m + P_p \cdot d_p) \cdot 1,35 \cdot \cos(\alpha) \cdot 9,81$$
$$d_m = 560mm \quad d_p \cong 1040 mm$$
$$M = (50 \cdot 560 \cdot 10^{-3} + 100 \cdot 1,04) \cdot 1,35 \cdot 9,81 \cdot \cos(30)$$
$$M = 1513,94 Nm$$

Posteriorment, s'han definit aquestes càrregues sent una força nodal i un moment aplicat en el node 5:

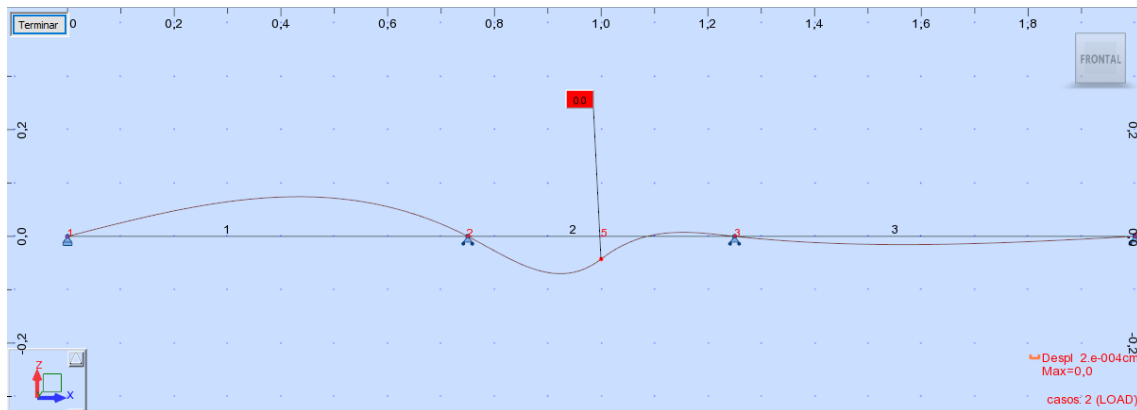


Il·lustració 91 - Càrreges en l'estructura

A continuació es defineix la secció de la biga i el tipus d'acer utilitzat. Un cop realitzat aquests passos es procedeix en mostrar els resultats obtinguts. Cal ressaltar que per establir les càrreges que actuaven, aquestes s'han definit com a càrreges "Load" mentre que també actua en el sistema el propi pes de l'estructura. Aleshores, els resultats obtinguts en el cas d'aplicar-hi la càrrega es mostren a continuació:



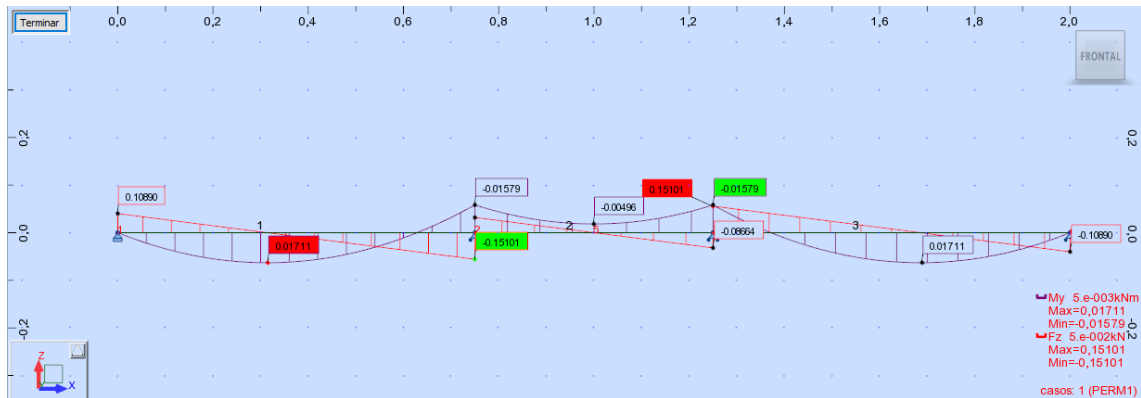
Il·lustració 92 - Diagrama de Moment i Tallant al llarg de la Biga



Il·lustració 93 - Deformació al llarg de la Biga

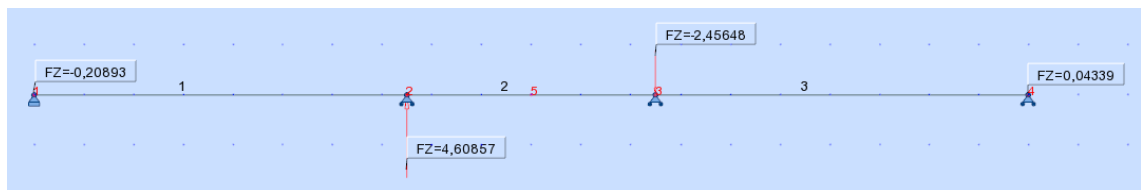
En aquesta situació s'ha obtingut uns diagrames de tensió tallant i moment flector escalonats de valors màxims de 0,943KNm pel diagrama de moment flector i aquesta configuració obté un tallant màxim de 4,399KN. Cal recordar que aquests valors són utilitzats posteriorment per a realitzar una verificació estructural. Aquest programa permet realitzar aquesta opció de verificació segons l'Eurocodi, però només per a perfils de bigues com HEBs o IPEs. Aleshores en el cas de tubs s'ha de realitzar un càlcul manual. A més, en el cas de la deformació s'ha obtingut

uns valors insignificant, per tant a continuació les deformacions ja no es mostraran. Seguidament es mostra l'estat de càrrega del pes propi:



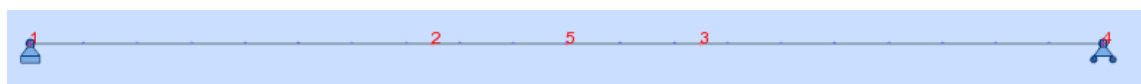
Il·lustració 94 - Diagrama de Moment i Tallant de la Biga en funció del Pes Propi

En el cas de l'estat de càrrega del pes propi, aquí s'obtenen uns valors màxims de 17,1Nm en el cas del moment flector i en el cas del tallant s'obté un valor màxim de 151,01N. Llavors, un cop calculats tots els cassos de càrrega es procedeix en calcular les reaccions en cadascun dels seus suports per a determinar quines càrregues hauran de resistir els suports i les rodes.



Il·lustració 95 - Reaccions de l'estructura

Un cop realitzat aquest estudi on la memòria es disposa dels resultats comentat, es procedeix en realitzar el cas més nefasta per a l'estructura, sent aquest com una biga birecolzada:



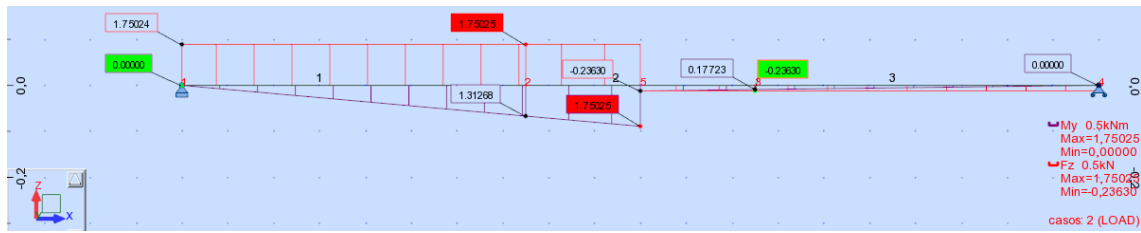
Il·lustració 96 - Condicions de contorn biga birecolzada

Les càrregues s'apliquen en el mateix node 5:



Il·lustració 97 - Estat de càrregues biga birecolzada

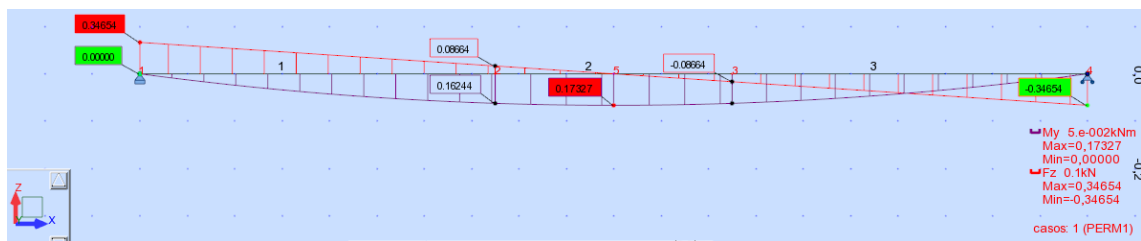
Els resultats obtinguts amb aquest estat de càrrega són:



Il·lustració 98 - Diagrama de Moment i Tallant al llarg de la biga

Com es pot veure en aquest cas s'obtenen uns resultats majors, tant de moment flector com de tallant, per aquest motiu aquesta configuració és la més desfavorable per a l'estructura. Llavors els valors màxims obtinguts de moment flector i tallant són de 1,75KNm i 1,75KN respectivament.

En el cas del pes propi només es disposa del diagrama de moment i tallant degut a la seva poca actuació on produeixen una deformació insignificant.



Il·lustració 99 - Diagrama de Moment i Tallant al llarg de la biga en el cas del pes propi

Per altra banda, les reaccions en aquest cas són:²⁵



Il·lustració 100 - Reaccions de l'estructura en el cas de la biga birecolzada

Seguidament, es continua amb la verificació estructural d'aquests cassos de carrega segons una comprovació estàndard i la normativa vigent en l'Eurocodi 3 d'Estructures d'Acer. Per procedir amb els càlculs de verificació es recorda que totes les dades com els Moments i Tallants estan extrets dels resultats del programa anterior. Aleshores, es realitzen les verificacions per la primera configuració de l'estructura i per la segona configuració utilitzant el moment màxim i el tallant màxim sense tenir en compte que aquests es produeixen en punts diferents de l'estructura:²⁶

²⁵ Es recorda que els resultats es troben comentats en el capítol 4 de la memòria.

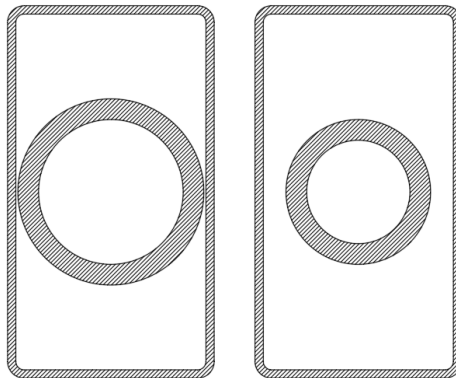
²⁶ La càrrega que es mostra en l'estructura, és a dir el diagrama i els resultats, aquesta teòricament s'hauria de dividir en dos perquè es disposa d'una estructura travessera frontal i una altre posterior. Però en aquest cas s'han realitzat els càlculs només en una estructura sent així un cas encara més desfavorable.

Comprovació estructural amb l'estructura recolzada a través de quatre suports:

L'equació que ens verificarà si la tensió en un determinat punt de l'estructura és superior del seu límit elàstic és la següent expressió:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W_{el,y}} < \sigma_y \quad [25]$$

On la inèrcia d'aquesta estructura ha set calculada a través del programa *Autodesk Autocad*®. Vegeu la següent il·lustració:



Il·lustració 101 - Seccions Tub estructura. Esquerra: Amb Tub Exterior. Dreta: Amb Tub Interior

Per això cal recordar que per calcular aquesta inèrcia s'ha considerat la inèrcia del tub interior sent aquesta la secció amb menys inèrcia, és a dir, que es converteix en la secció amb menys resistència.

$$I = 63,326 \times 10^4 \text{mm}^4$$

De la mateixa manera, l'àrea de la secció és:

$$A = 10,04 \times 10^2 \text{mm}^2$$

D'aquesta manera el moment resistent elàstic es calcula de la manera següent:

$$W_{el} = \frac{I}{z} = \frac{63,326 \times 10^4}{45} = 14.072 \times 10^3 \text{mm}^3$$

Així la tensió màxima deguda a la flexió resulta ser:

$$\sigma_{max} = \frac{0,94321 \times 10^6 \text{Nmm}}{14.072 \times 10^3 \text{mm}^3} = 67.027 \text{MPa} < \sigma_y = 275 \text{MPa}$$

Inferior al seu límit elàstic d'aquesta manera s'assegura que l'estructura en aquesta configuració i aquesta càrrega resisteix. A més, es fa una comprovació de si aquesta estructura resisteix amb el tallant màxim aplicant sent:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{4399,5N}{10,04 \times 10^2 \text{mm}^2} = 4,38 \text{MPa} < \sigma_y = 275 \text{MPa}$$

Afirmativament, aquesta estructura amb aquesta combinació també resisteix les màximes tensions tallants. Posteriorment, es realitza una comprovació segons la normativa vigent en l'Eurocodi3 on s'ha de complir la següent expressió:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \leq 1 \quad [26]$$

On els termes amb el sub-index "Ed" significa que són els valors de les tensions tallants i els moments flectors màxims de l'estructura.

$$N_{Ed} = 4399,5N$$

$$M_{y,Ed} = 0,94321 \times 10^6 N_{mm}$$

L'àrea de tallant es pot calcular a través de l'expressió:

$$A_v = \frac{2A}{\pi} \quad [27]$$
$$A_v = \frac{2 \cdot 10,04 \times 10^2}{\pi} = 639,166 \text{mm}^2$$

Per calcular el moment resistiu, aquest es pot obtenir a partir d'aquesta expressió:

$$M_{y,Rd} = \frac{W_{el,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad [28]$$

On:

$$M_{y,Rd} = \frac{14.072 \times 10^3 \cdot 275}{1,1} = 3,518 \times 10^6 N_{mm}$$

De la mateixa manera que el tallant resistiu:

$$N_{Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_{M0}} \quad [29]$$

$$N_{Rd} = \frac{639,166 \cdot (275/\sqrt{3})}{1,1} = 92,25 \times 10^3 N$$

Així doncs, l'expressió anterior es pot expressar:

$$\frac{4399,5}{92,25 \times 10^3} + \frac{0,94321 \times 10^6}{3,518 \times 10^6} = 0,3158 \leq 1$$

Afirmativament, aquesta estructura resistirà les càrregues aplicades amb la configuració establerta. Per últim es mostra la verificació de la configuració més desfavorable per aquesta estructura, comportant-se com una biga birecolzada. Així doncs els paràmetres que es necessiten s'aprofiten dels càlculs anteriors.

$$I = 63,326 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

$$A = 10,04 \times 10^2 \text{ mm}^2$$

$$W_{el} = 14.072 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

Aleshores, tornant a re-calcular l'expressió [25] s'obté:

$$\sigma_{max} = \frac{1,75 \times 10^6 \text{ Nmm}}{14.072 \times 10^3} = 124,36 \text{ MPa} < \sigma_y = 275 \text{ MPa}$$

Com es pot veure en aquest cas l'estructura treballaria aproximadament a la meitat del que podria treballar, és a dir que ja es converteix en una estructura més sol·licitada però de la mateixa manera segueix resistint les càrregues aplicades, per aquest motiu, es procedeix en calcular la tensió degut al tallant:

$$\sigma = \frac{F}{A} < \sigma_y$$

$$\sigma = \frac{1750}{10,04 \times 10^2} = 1.743 \text{ MPa} < \sigma_y = 275 \text{ MPa}$$

Afirmativament, l'estructura també resisteix les càrregues aplicades en aquesta combinació i es continuen els càlculs amb la part de verificació segons la normativa vigent de l'Eurocodi 3 complint l'expressió [26] tal com es mostra a continuació:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \leq 1$$

Amb els paràmetres:

$$N_{Ed} = 1750 \text{ N}$$

$$M_{y,Ed} = 1,75 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

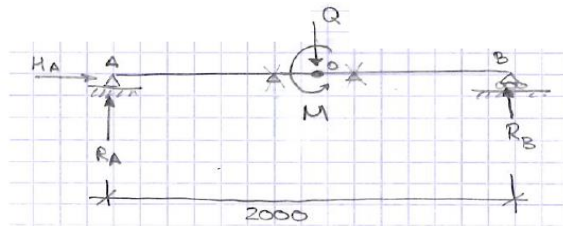
$$N_{Rd} = 92,25 \times 10^3 \text{ N}$$

$$M_{y,Rd} = 3,518 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

$$\frac{1750}{92,25 \times 10^3} + \frac{1,75 \times 10^6}{3,518 \times 10^6} = 0,516 \leq 1$$

Com es pot veure, l'estructura en aquesta configuració treballaria a un 51,6% de la seva capacitat de càrrega. Aleshores, aquesta es converteix en una estructura més sol·licitada però de la mateixa manera aquesta aguanta les càrregues que se li apliquen i sent aquest el cas més desfavorable es pot afirmar que l'estructura està verificada.

Un altre càlcul que s'ha realitzat és la comprovació del bolc de l'estructura, que amb el moviment d'aquesta i les configuracions d'aquesta no provoquin en cap moment el bolc lateral.



Il·lustració 102 - Esquema càlcul bolc estructura

Segons aquest esquema per evitar el bolc s'ha de verificar que la reacció R_B en aquest cas no sigui de valor negatiu. Per tant, realitzant un sumatori de forces verticals, forces horitzontals i moments seguint la regla de la mà dreta:

$$\sum_{i=0}^n F_{V,i} = 0 \rightarrow R_A + R_B = Q$$

$$\sum_{i=0}^n F_{H,i} = 0 \rightarrow H_A = 0$$

$$\sum_{i=0}^n M_0 = 0 \rightarrow -R_A \cdot 1000 + M + R_B \cdot 1000 = 0$$

Aïllant aquestes equacions s'obté els valors de R_A i R_B .

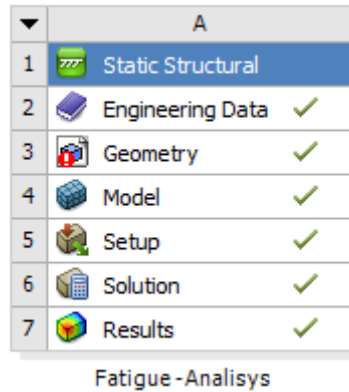
$$R_A = 994,03N$$

$$R_B = 992,52N$$

Com es pot veure, en aquest cas $R_B > 0$ on això vol dir que l'estructura no es bolcarà.

A2.2 Càlculs de Fatiga

En aquesta secció s'explica com es realitzen els càlculs de fatiga amb el programa *Ansys* de la mateixa manera que s'ha realitzat prèviament amb els càlculs estructurals. Caldrà definir en el banc de treball els blocs que s'han de calcular. En aquest cas el càlcul de fatiga és una eina que es troba dins del bloc "Static Structural". Llavors el "Workbench" queda de la manera següent:

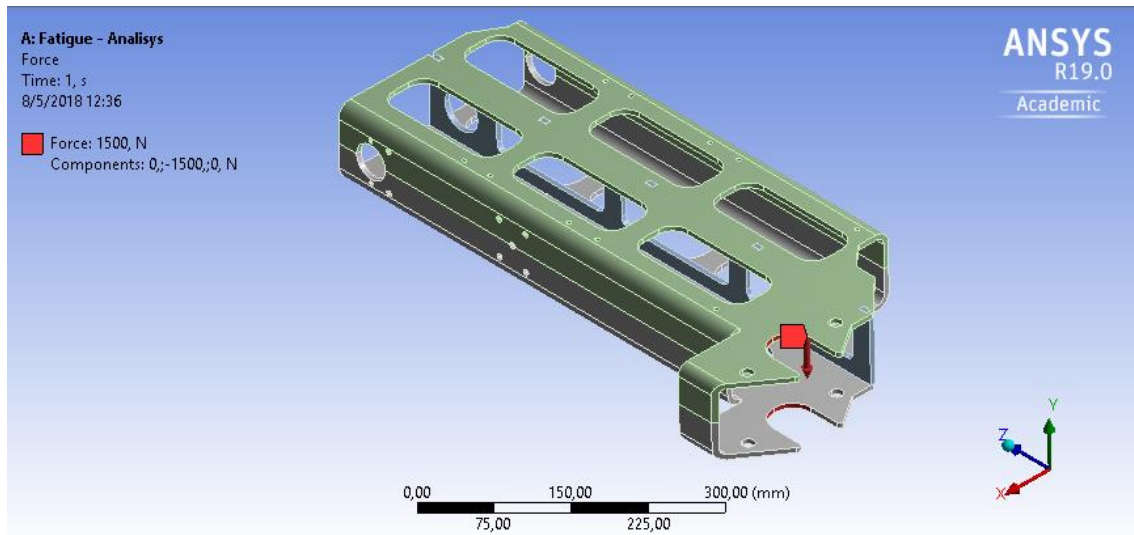


Il·lustració 103 - Workbench Ansys pel càlcul de Fatiga

Al conservar l'apartat "Engineering data" com en el cas anterior i també la mateixa geometria, s'analitza el model. Un cop a dins el "Model" es defineix el mallat de la peça, on aquesta serà igual que el de la Il·lustració 58 - Mallat Peça Suport Xassís Superior. Un cop realitzat el mallat, s'han les condicions de contorn, on es defineixen els suport i les forces que actuen en la peça.

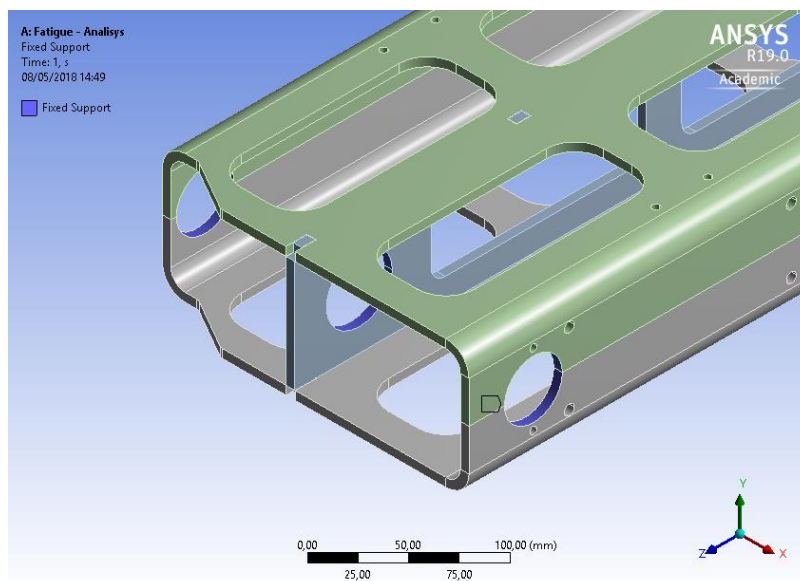
Per realitzar aquests càlculs de fatiga s'ha considerat que la peça es trobava en posició horitzontal, completament a 90° respecte a la vertical²⁷. Llavors s'ha considerat que seria carregada pel pes del xassís superior del simulador i el pes d'una persona de 100Kg on arrodonint, s'obtidria una força degut a la massa i a la gravetat de 1500N que s'aplicaria en l'extrem d'aquesta peça, tal com es pot veure en la il·lustració següent:

²⁷ Cas extrem que no es podrà arribar a donar mai en la pràctica degut a que aquesta peça obtindrà un màxim de 60° d'inclinació respecte a la vertical però s'utilitza la mateixa ideologia de càlcul que en el cas anterior.



Il·lustració 104 - Càrrega aplicada

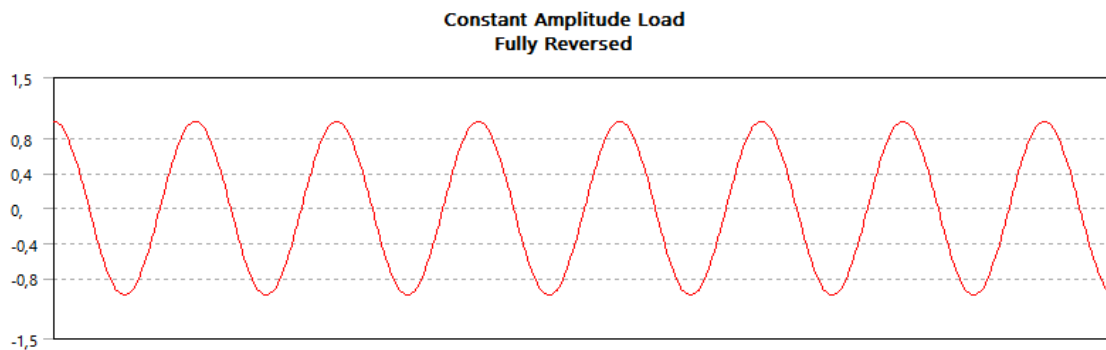
Seguidament, es defineixen els suports de la peça i el seu sistema de fixació. En aquest cas aquesta peça treballa com una biga en voladís, aleshores, es considera que el seu sistema de fixació és per l'eix de rotació d'aquesta peça on s'ha definit un sistema de fixació encastat, bloquejant tots els moviments i totes les rotacions dels tres sistemes de coordenades.



Il·lustració 105 - Sistema de fixació encastat

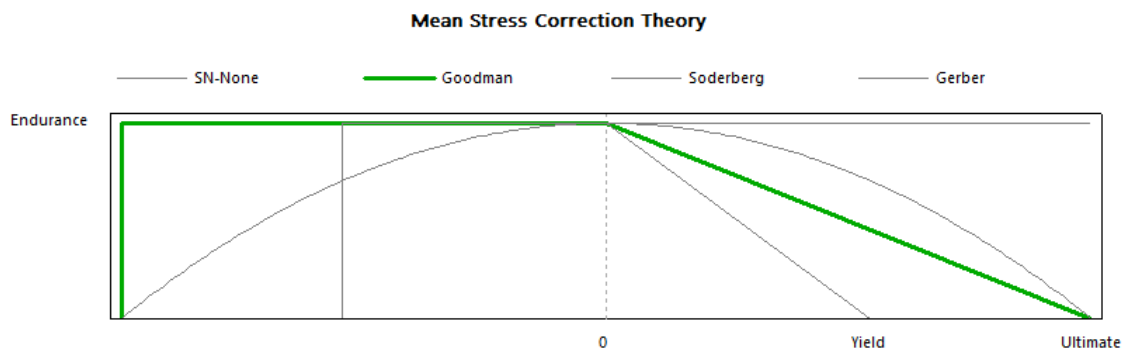
Un cop s'ha definit totes les condicions de contorn, falta establir l'acceleració de la gravetat en el sentit de l'eix Y negatiu. Conseqüentment, s'ha realitzat un càlcul estructural com el que s'ha vist en l'apartat anterior i seguidament s'ha utilitzat l'eina de fatiga per a determinar diferents factors relacionats amb la fatiga.

Un cop l'eina ha estat afegida, s'ha procedit en introduir les dades necessàries per a realitzar aquest anàlisi. Primer de tot com s'ha vist en el capítol 3 s'haurà d'introduir amb quin tipus de càrrega es realitzarà l'anàlisi on en aquest cas es realitzarà amb una càrrega variable sense càrrega constant, és a dir una càrrega sinusoidal d'amplitud totalment reversible amb una mitjana centrada al 0. Llavors en el programa se l'hi ha indicat que serà totalment reversible i el factor d'escala amb el que s'ha aplicat. En Aquest cas s'ha considerat que un factor de 1 és suficient degut a que no es sobre esforçarà l'estructura. El resultat obtingut de la tensió que si aplicarà es mostra en la il·lustració següent; en l'eix horitzontal hi pertany el temps i al eix vertical, el rati de l'amplitud de la tensió aplicada.



Il·lustració 106 - tensió variable aplicada

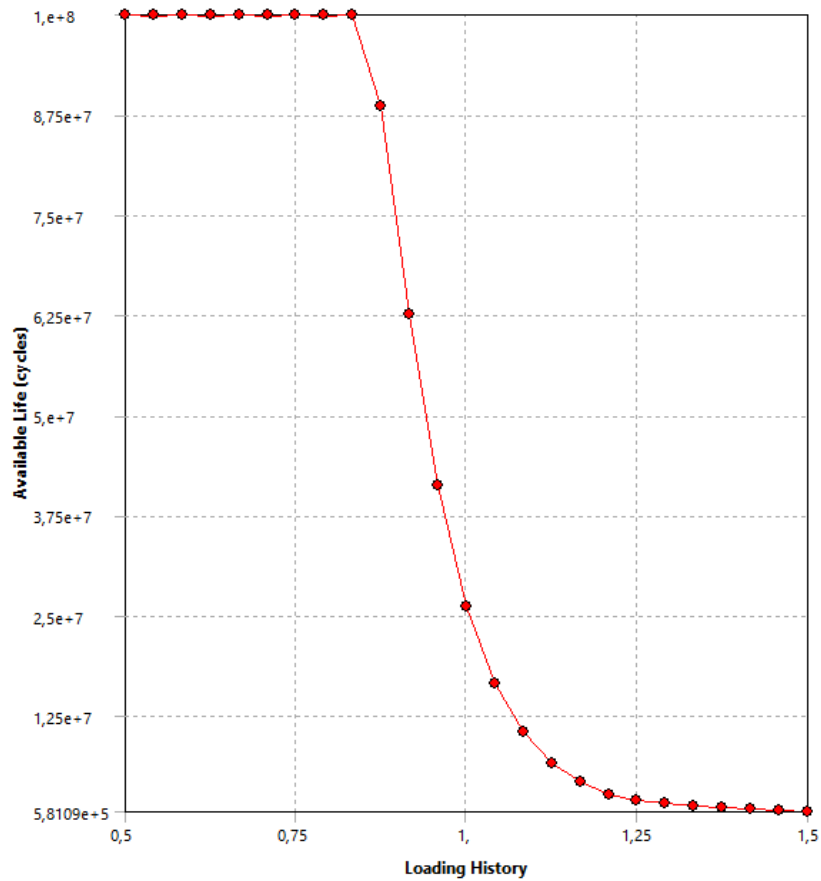
Seguidament, s'indica la teoria amb la que es realitza el càlcul, sent aquesta la teoria Goodman utilitzada per a realitzar el càlcul de fatiga i poder determinar la vida útil d'aquesta peça. Per tant el diagrama de Goodman es representa de la forma següent:



Il·lustració 107 - Diagrama de Goodman

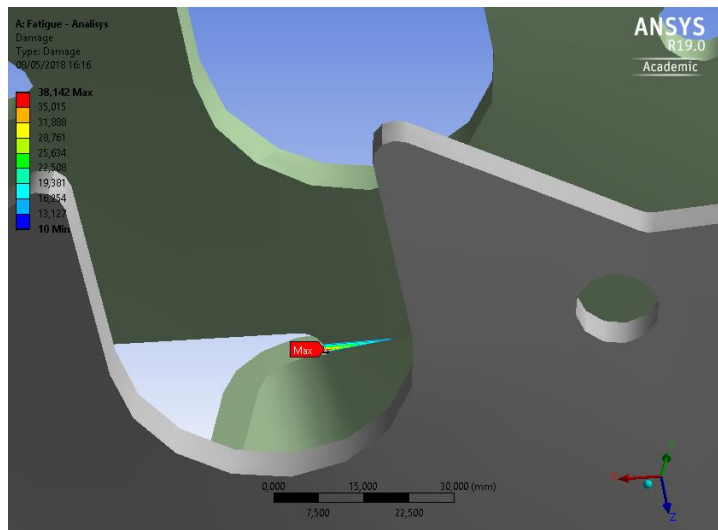
Un cop s'ha definit tots aquests paràmetres es pot procedir en obtenir els resultats de la vida útil, del dany causat a la peça, del factor de seguretat i dels indicadors biaxials. On els resultats obtinguts es mostren a continuació. Cal remarcar que els resultats obtinguts es comentaran i es discutiran en el capítol 4 de l'informe d'aquest TFG.

Respecte als resultats de la vida útil, s'ha obtingut el diagrama següent on mostra com varia la vida útil del sistema en funció del rati multiplicatiu de tensió que se li apliqui.



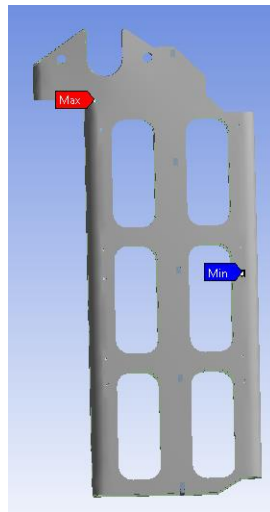
Il·lustració 108 - Vida útil de la peça en funció del rati multiplicatiu de càrrega

Respecte al dany causat en l'estructura aquest es veuria localitzat en la següent aresta del sistema:



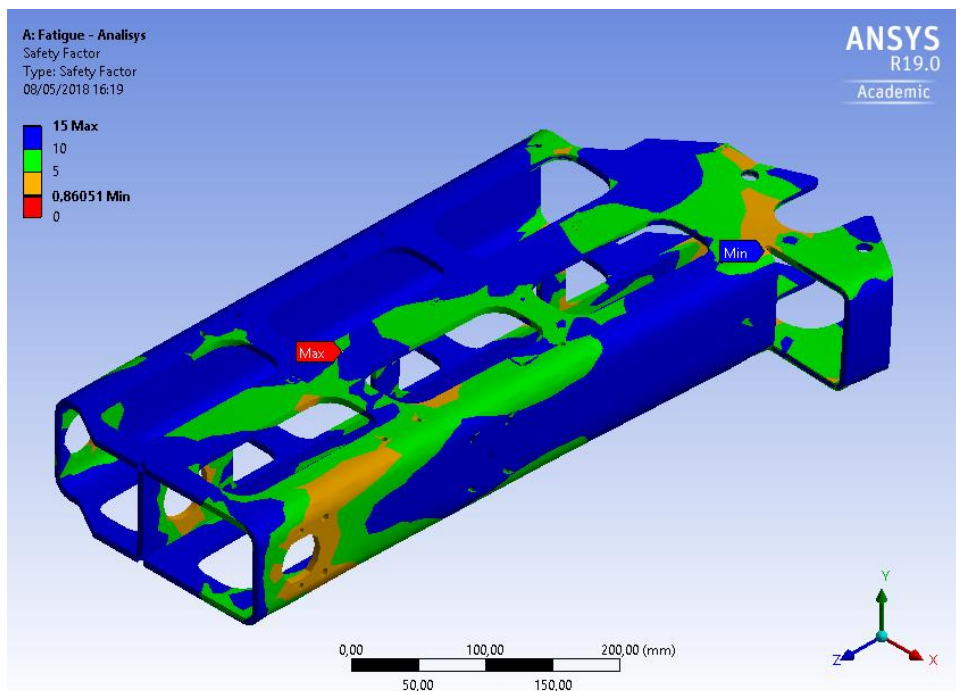
Il·lustració 109 - Àrea de localització del dany del major dany del sistema

Ubicada a la part superior de la peça tal com es mostra en la il·lustració següent:



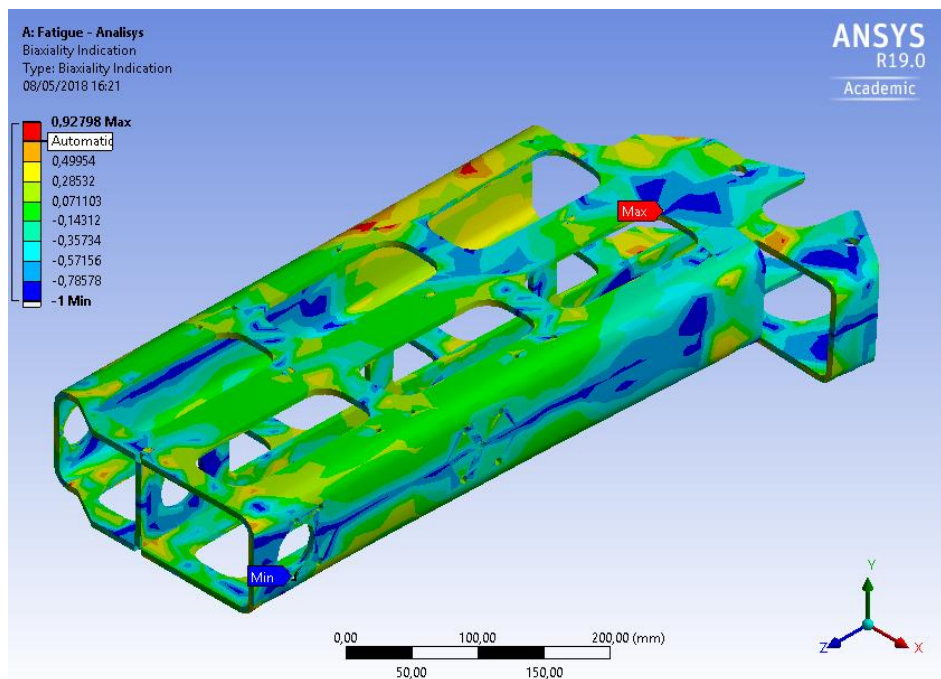
Il·lustració 110 - Àrea de localització del màxim i mínim dany del sistema

Per part del factor de seguretat, aquest es troba compres entre 0,86051 i 15 distribuïts de la següent manera:



Il·lustració 111 - Factor de Seguretat

Per últim, la biaxialitat de les tensions suportades per la peça es mostren en la il·lustració següent:

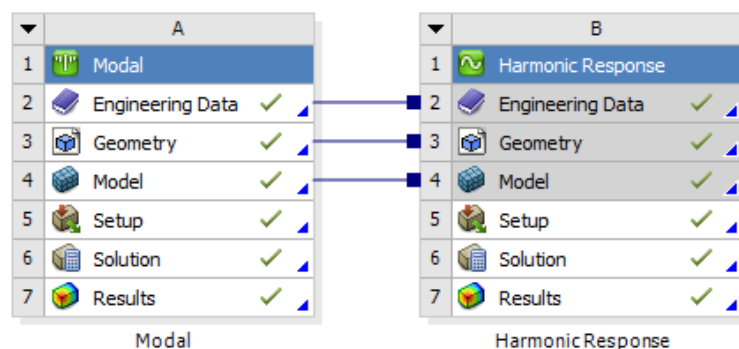


Il·lustració 112 - Biaxialitat del Sistema

Els resultats obtingut van des d'un valor de -1 a un valor de 0,92798 obtenint gairebé una tensió biaxial pura en els punts d'un color més vermellós.

A2.3 Càlculs d' Harmònics

Per començar a realitzar aquests càlculs amb el programa *Ansys®* cal definir un banc de treball (Workbench) on inclogui el que es vol analitzar. Per torbar els diferents harmònics de la peça s'ha fet un anàlisi "Modal" i un anàlisi "Harmonic Response" tal com es mostra en la il·lustració següent:



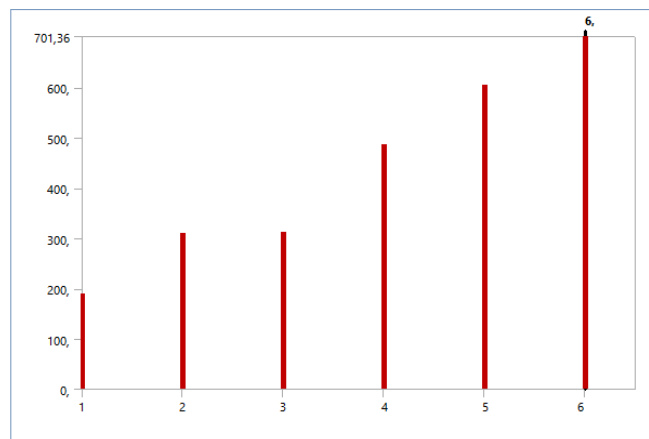
Il·lustració 113 - Workbench Ansys Anàlisi Modal

A dins del model de l'anàlisi "Modal" cal definir la malla de la peça com en els cassos anteriors i ajustar aquesta a les necessitats de l'anàlisi o punts en concret de la peça a fi d'obtenir la millor resolució de la peça. Com que es disposa d'una versió estudiantil, el límit de nodes o elements està limitat i no es pot fer un mallat tal com es voldria i s'ha procedit en realitzar mallats més alleugerits amb un petit nombre d'elements²⁸. En aquest cas el mallat serà com el que es mostrà en la Il·lustració 58 - Mallat Peça Suport Xassís Superior del mateix nombre de nodes i elements.

A continuació es defineixen les condicions de contorn de la peça sense aplicar-hi càrregues externes, només fixacions i els suports necessaris. Aleshores, cal ressaltar que en aquesta peça només es disposa d'un suport fix tal com el de la Il·lustració 59 - Suport Peça Suport Xassís Superior on actua aquesta peça com una biga en voladís.

Un cop s'han definit aquestes condicions de contorn, s'ha indicat al programa quants modes vibracionals es vol trobar, en aquest cas s'ha establert un màxim de 6 modes i s'ha establert una temperatura ambiental de 22°C.

Primer de tot el programa proporciona la taula següent on en l'eix horitzontal si representa el nombre d'harmònics trobats i en l'eix vertical la freqüència de cada harmònic:



Il·lustració 114 - Harmònics trobats pel programa

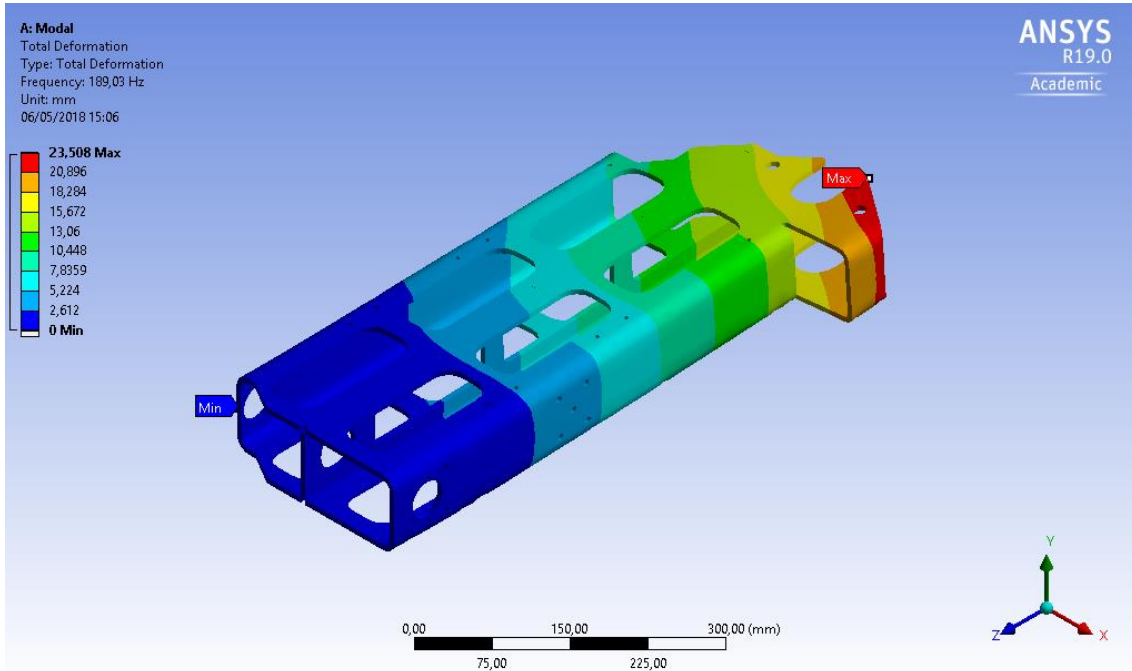
Amb els valors:

	Mode	<input checked="" type="checkbox"/> Frequency [Hz]
1	1,	189,03
2	2,	310,03
3	3,	312,78
4	4,	486,38
5	5,	604,17
6	6,	701,36

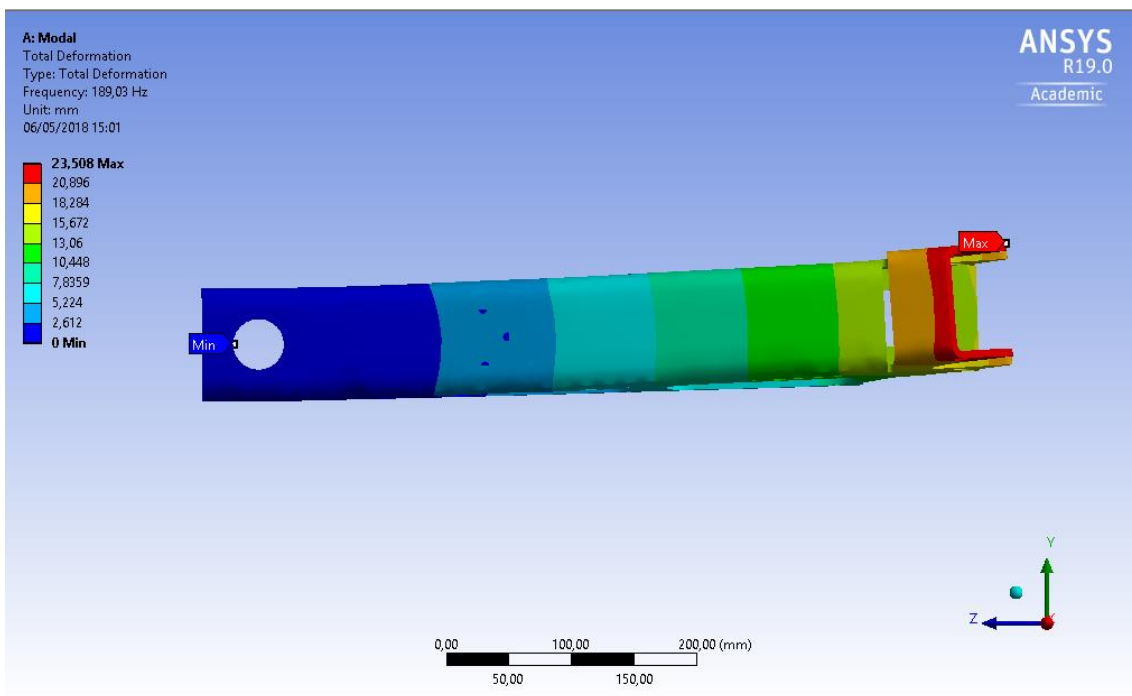
Taula 6 - Freqüències dels harmònics localitzats

²⁸ El màxim nombre d'elements o nodes disponibles amb la versió estudiantil és de 32.000.

El primer mode vibracional en el que la peça entra en ressonància es troba a una freqüència de 189,03 Hz obtenint una oscil·lació (deformació) màxima de 23,508mm al llarg de l'eix Y. Per visualitzar la forma geomètrica que la peça obté al deformar-se quan és excitada per aquesta freqüència, entrant aquesta en ressonància, es pot observar en la il·lustració següent:

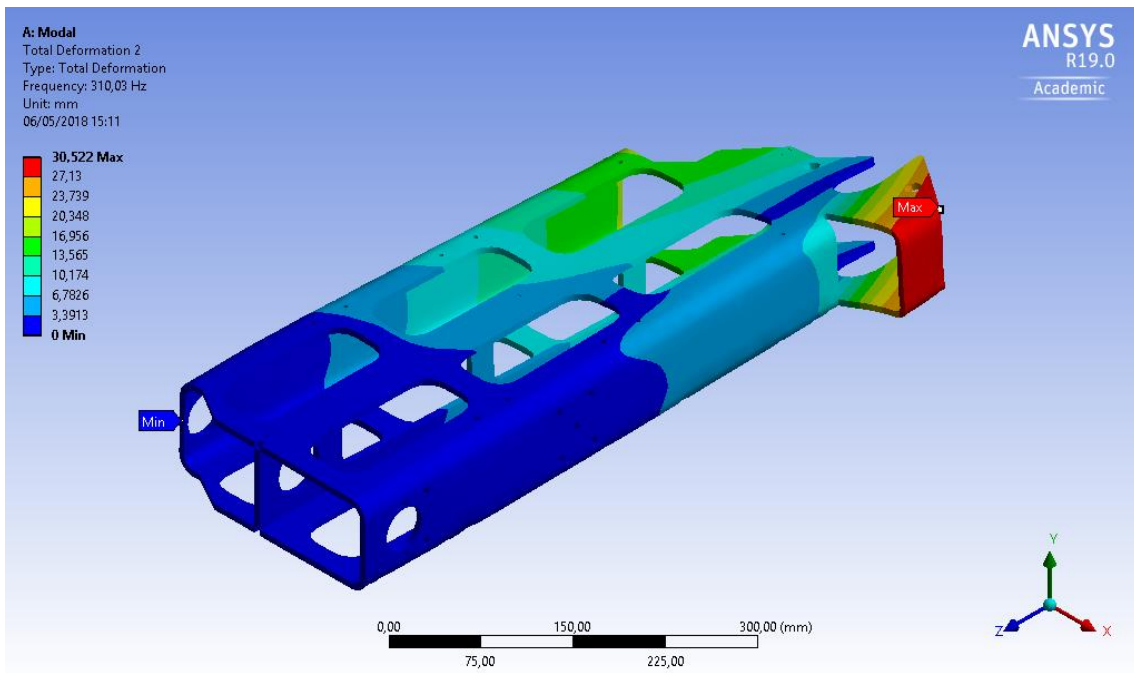


Il·lustració 115 - deformació del mode vibracional número 1

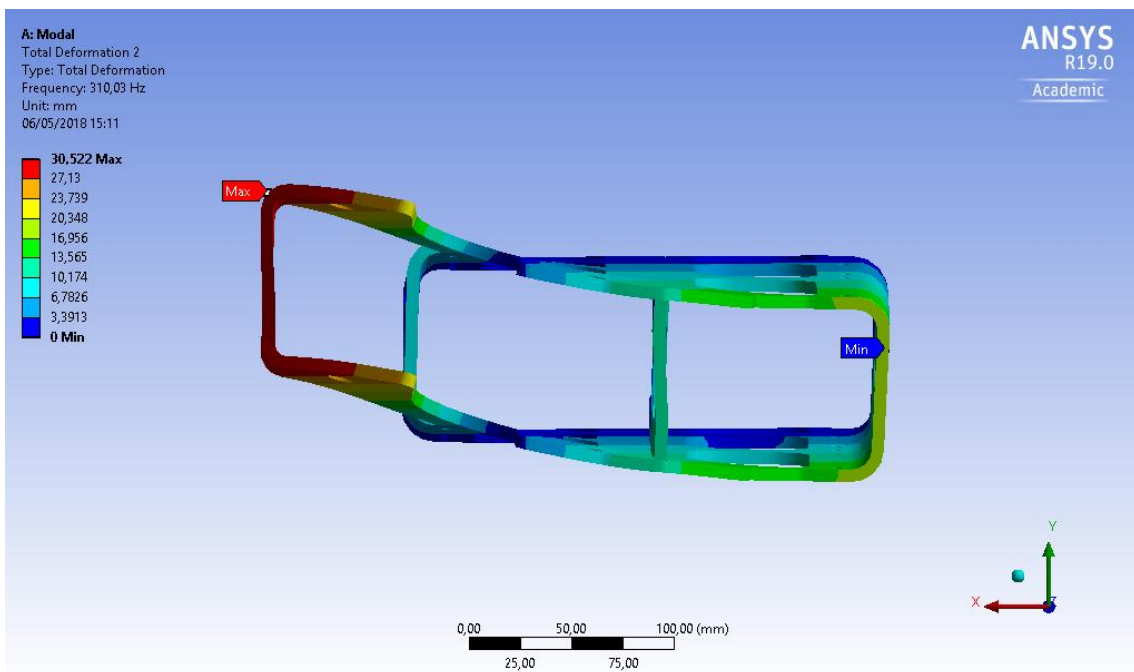


Il·lustració 116 - deformació del mode vibracional número 1 perspectiva des de l'eix X positiu

El segon mode vibracional d'aquesta peça es troba a una freqüència de 310,03Hz amb una oscil·lació màxima de 30,522 mm i la seva forma geomètrica al ser excitada per aquesta freqüència és la que es mostra en la il·lustració següent:

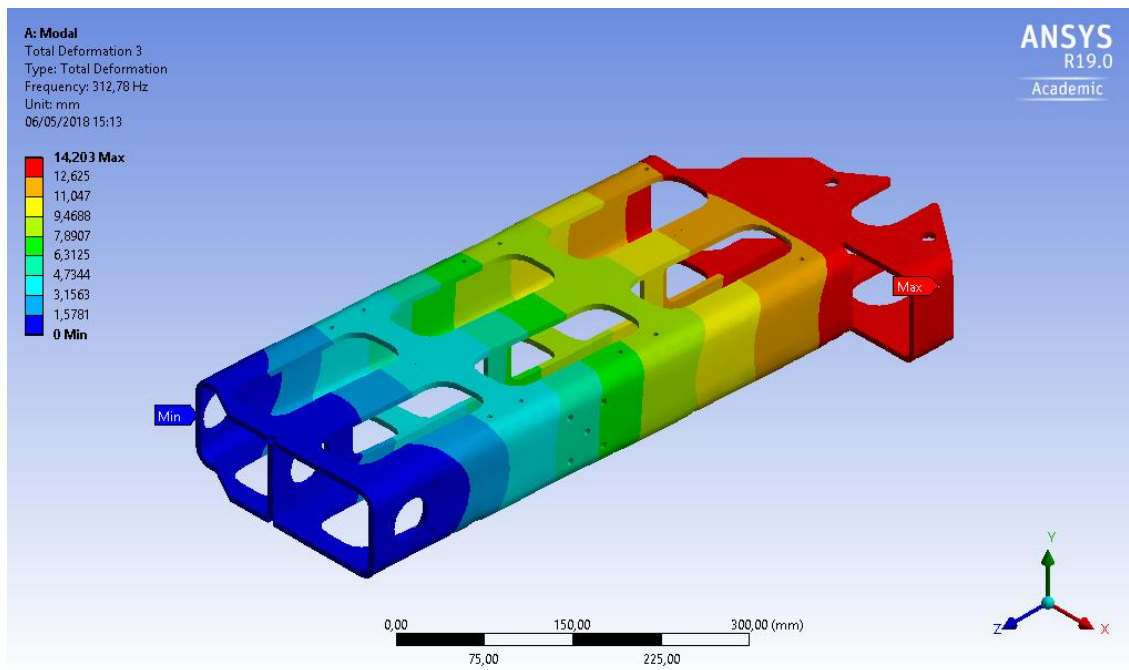


Il·lustració 117 - deformació del mode vibracional número 2



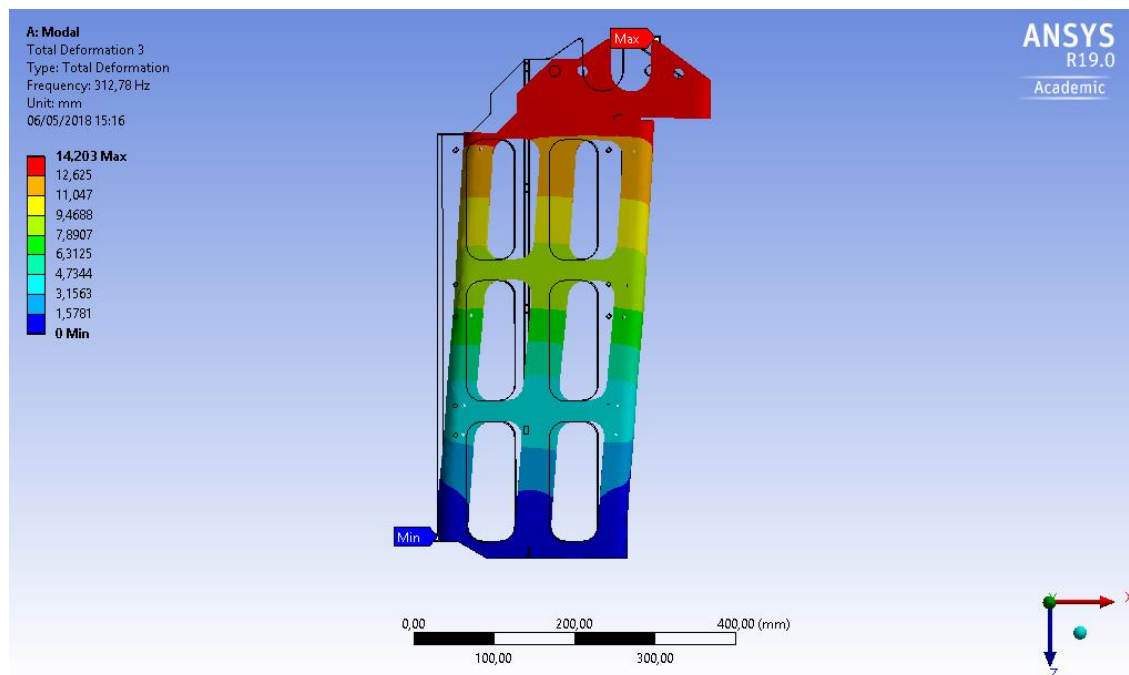
Il·lustració 118 -deformació del mode vibracional número 2 perspectiva des de l'eix Z negatiu

El tercer mode vibracional trobat es a una freqüència 312,78 Hz on la oscil·lació màxima és de 14,203 mm al llarg de l'eix X i la forma geomètrica obtinguda és:



Il·lustració 119 - deformació del mode vibracional número 3

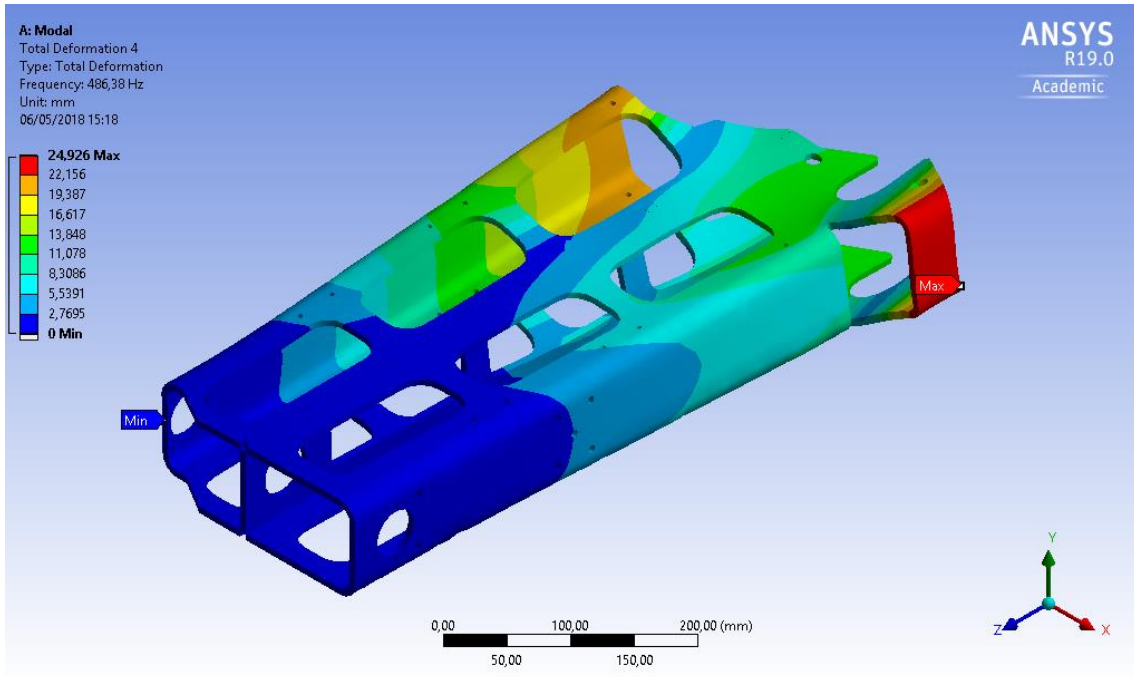
Vist des d'una altre perspectiva, la forma geomètrica obtinguda respecte a la forma geomètrica sense deformar seria:



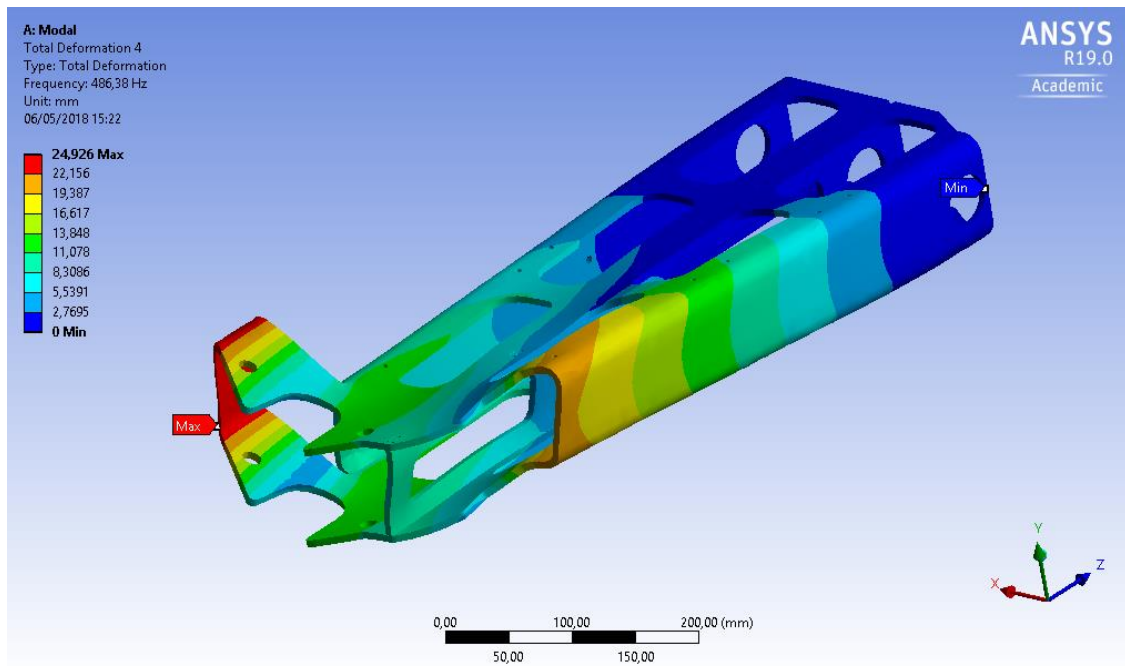
Il·lustració 120 - deformació del mode vibracional número 3 perspectiva des de l'eix Y positiu amb la visualització "wireframe"

Respecte a l'armònic quatre, aquí s'obté formes geomètriques més complexes i més orgàniques. La freqüència natural de l'armònic quatre correspon a una freqüència de 486,38 Hz i la

oscil·lació màxima experimentada és de 24,926 mm. En la il·lustració següent, s'observa la forma geomètrica que aquesta peça obté al ser excitada per una freqüència vibracional de 486,38 Hz.

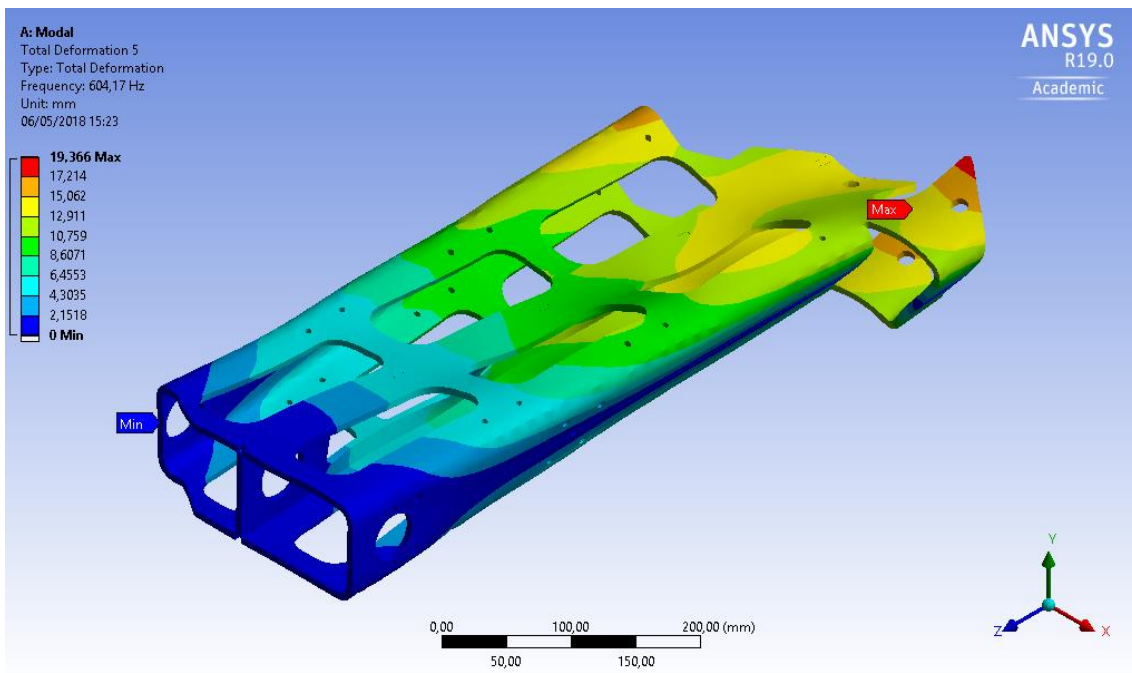


Il·lustració 121 -deformació del mode vibracional número 4

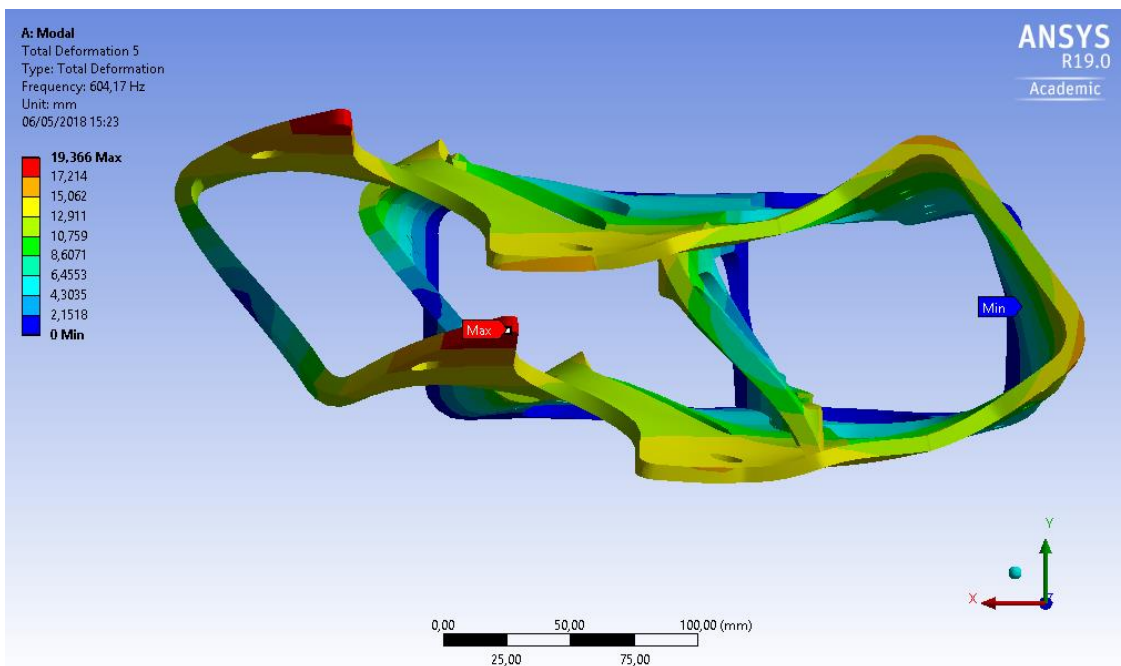


Il·lustració 122 - deformació del mode vibracional número 4 perspectiva diferent

L'harmònic cinc es troba a una freqüència de 604,17 Hz, la màxima oscil·lació obtinguda és de 19,366 mm i la forma geomètrica que adopta la peça en aquesta freqüència és:

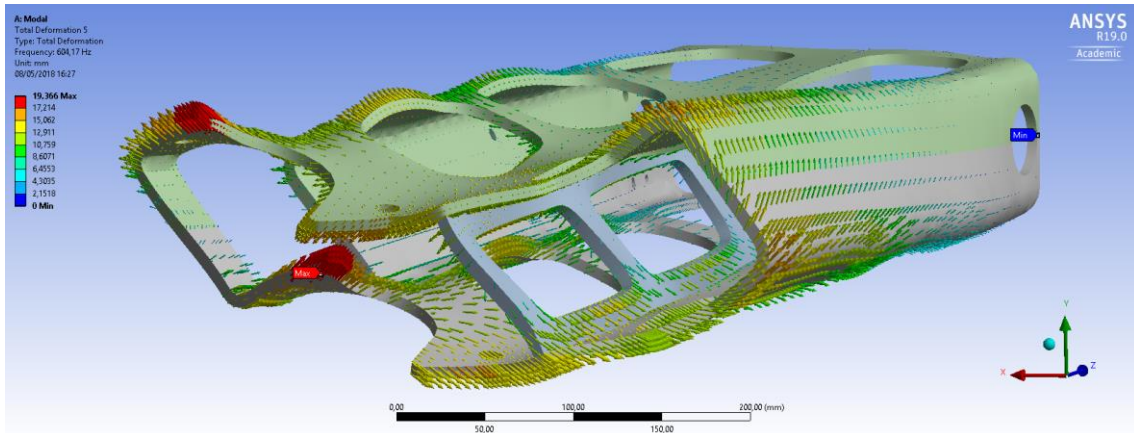


Il·lustració 123 - deformació del mode vibracional número 5

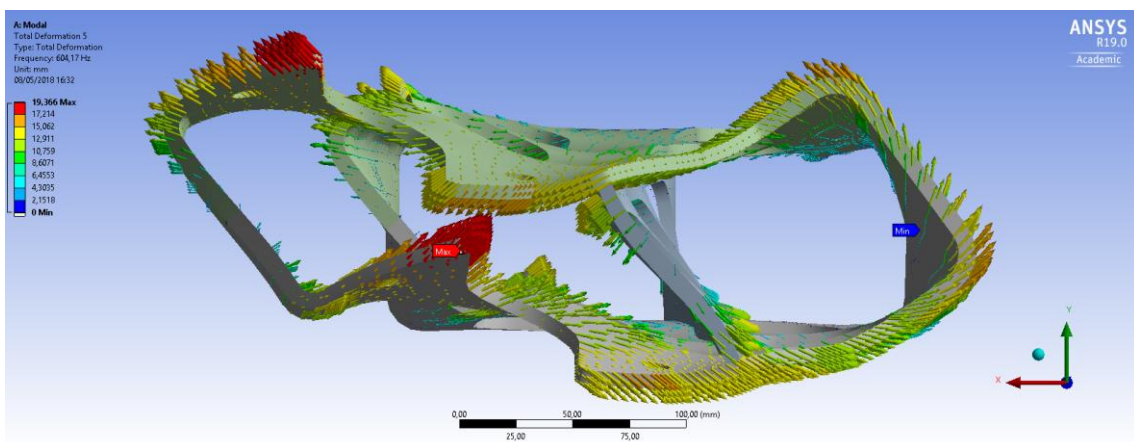


Il·lustració 124 - deformació del mode vibracional número 5 perspectiva des de l'eix Z negatiu

Per poder apreciar una millor forma geomètrica de la deformació experimentada en el cas de la freqüència natural de l'harmònic 5 s'implementa la següent esquematització del dibuix utilitzant fletxes que indiquen el sentit i la magnitud de la deformació en cada espai. Vegeu la següent il·lustració:

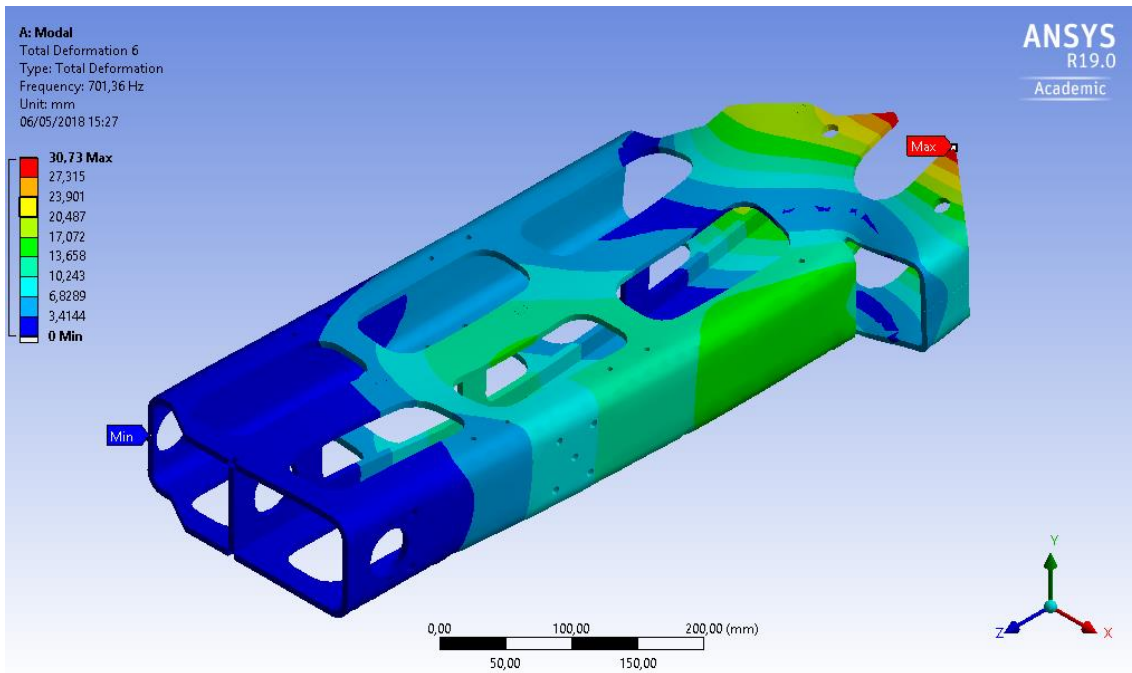


Il·lustració 125 - deformació del mode vibracional número 5 amb distribució de vectors

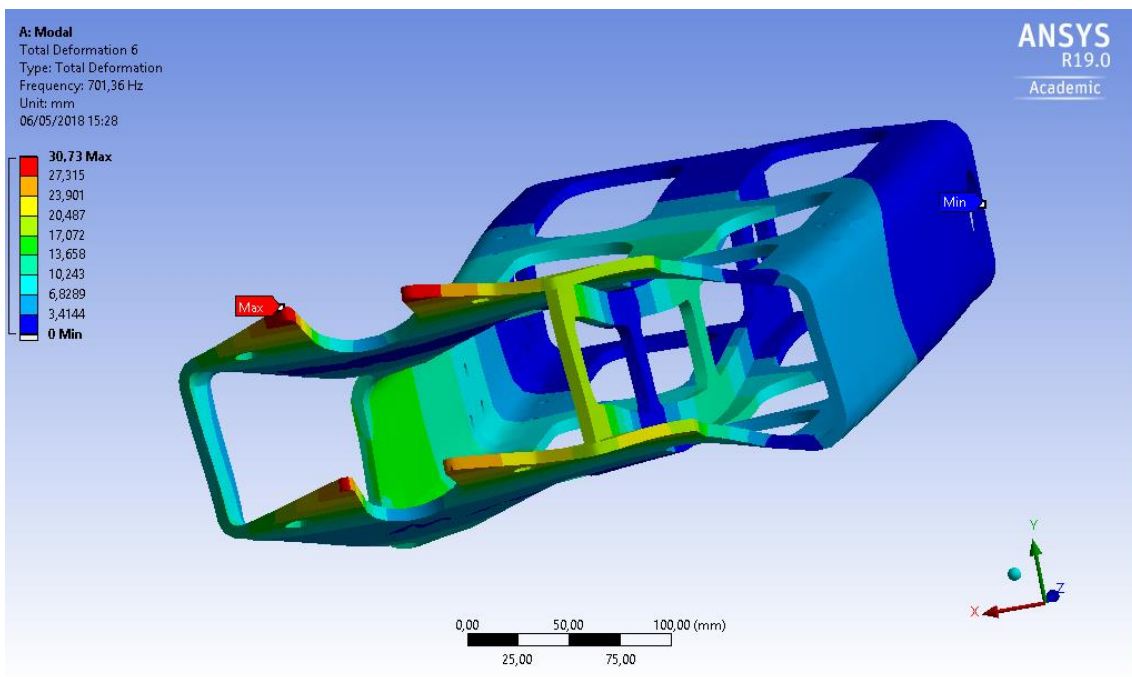


Il·lustració 126 - deformació del mode vibracional número 5 amb distribució de vectors perspectiva eix Z negatiu

Per últim, l'harmònic sis es troba a una freqüència de 701,36 Hz i obté una oscil·lació màxima de 30,73 mm i la seva forma geomètrica és mostra a continuació:



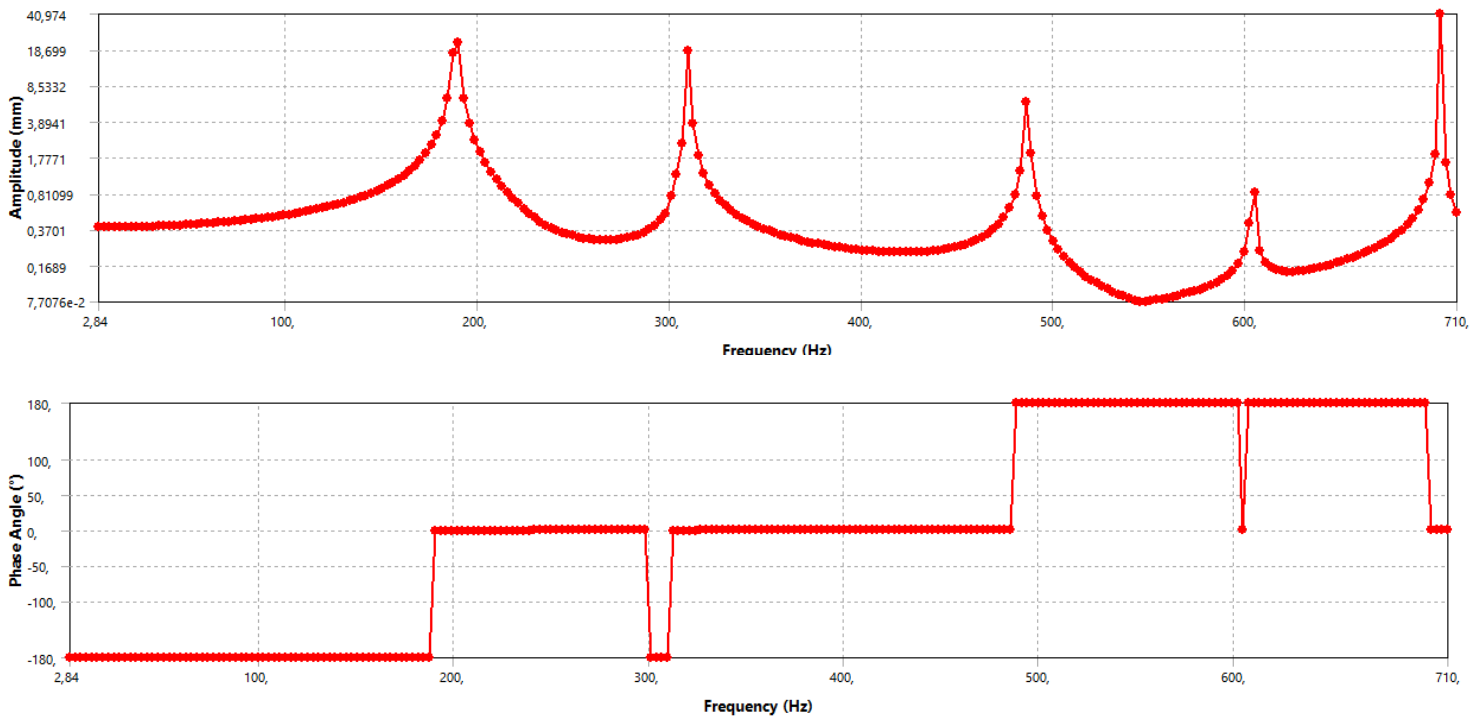
Il·lustració 127 - deformació del mode vibracional número 6



Il·lustració 128 - deformació del mode vibracional número 6 perspectiva diferent

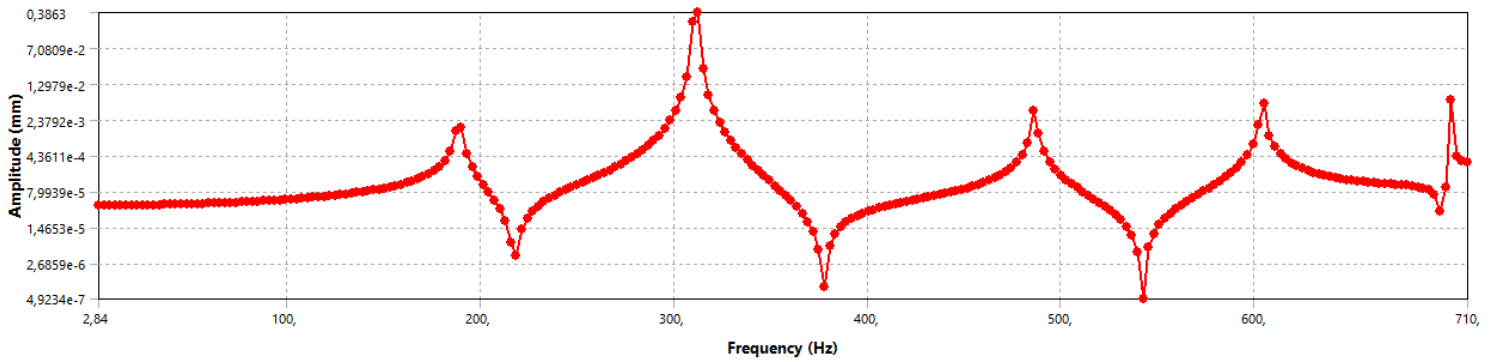
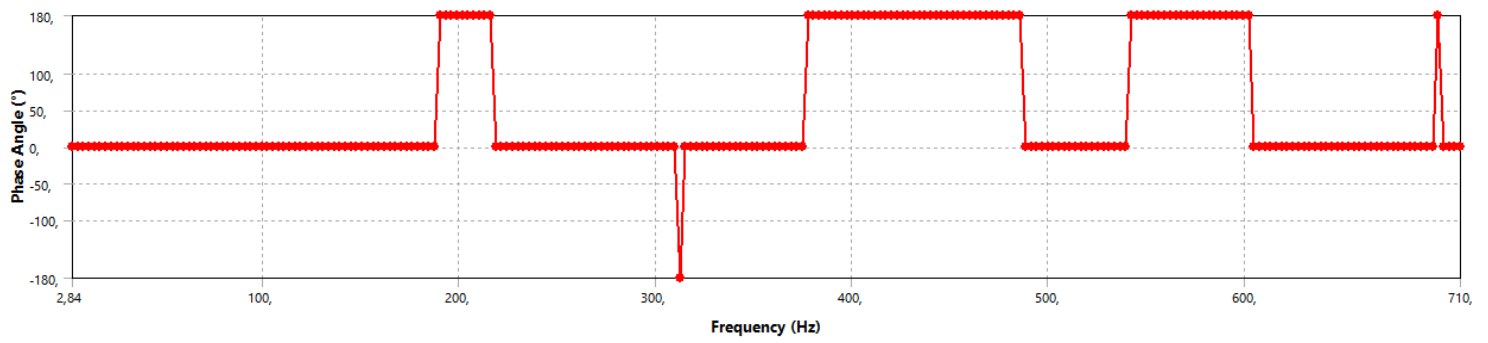
Un cop realitzat l'anàlisi "Modal" s'ha procedit a realitzar l'anàlisi "Harmonic Response" que consisteix en realitzar un escanament de freqüències al llarg de tot l'espectre de freqüències fins al sisè harmònic podent així observar el comportament de la peça per a freqüències diferents dels harmònics estudiats.

Per començar, es mostren les deformacions i fases al llarg de les freqüències, començant per l'eix Y, llavors l'eix X i finalment l'eix Z. Vegeu les següents il·lustracions:

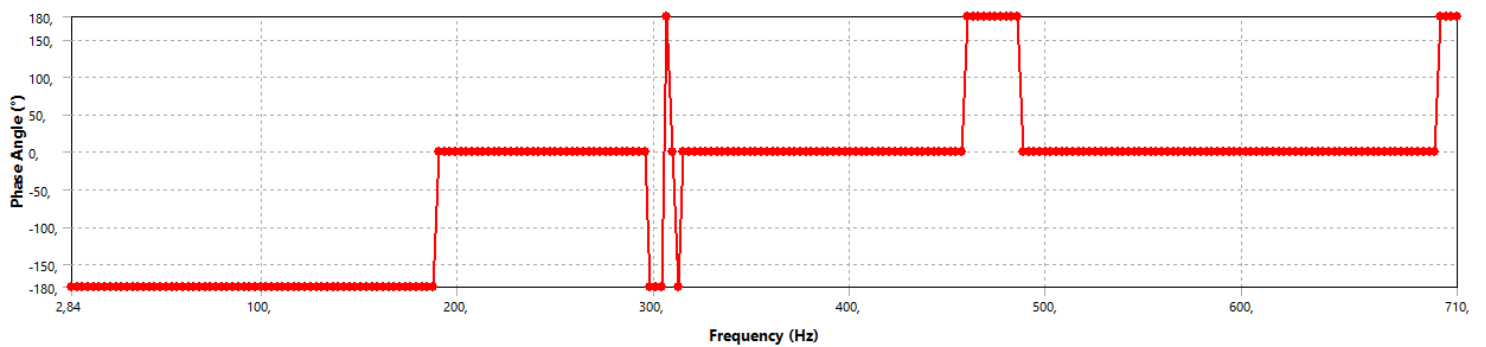
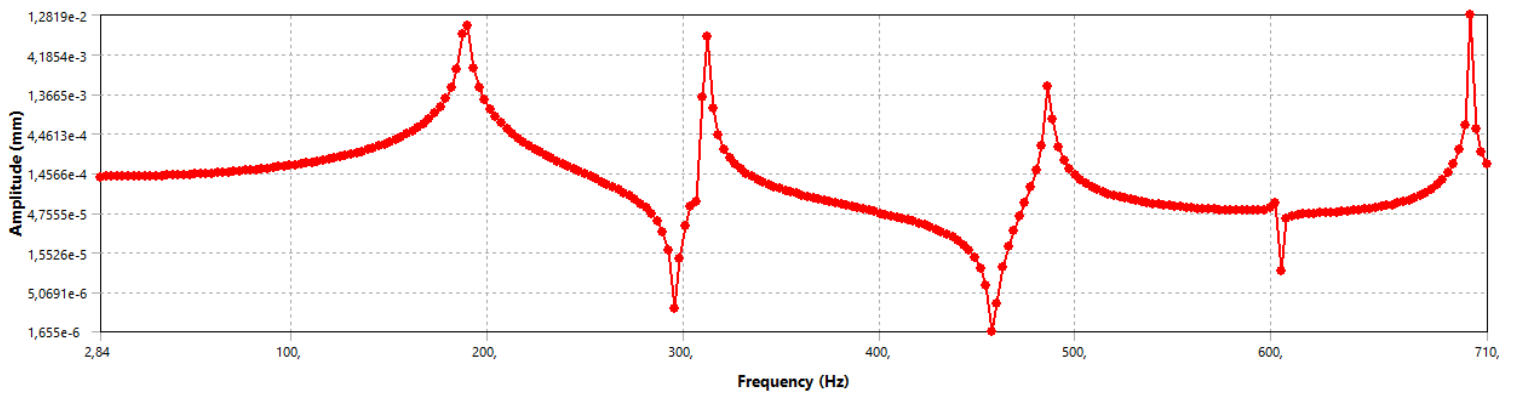


Il·lustració 129 - Deformació i angle de desfasament des de l'eix Y

Com es pot veure, les deformacions obtingudes al llarg de l'eix Y de la peça analitzada en funció de les freqüències aplicades són les que s'han mostrat anteriorment. Cal ressaltar que en determinades freqüències les deformacions augmenten considerablement i la peça entra en ressonància. Aquestes freqüències són les que s'han trobat en l'anàlisi harmònic realitzat. Aleshores, es pot afirmar que treballar en vibracions properes a les freqüències naturals de la peça provoca que la peça també entri en ressonància obtenint unes deformacions majors i conduint-la al col·lapse. El mateix passa amb les deformacions al llarg dels altres eixos.



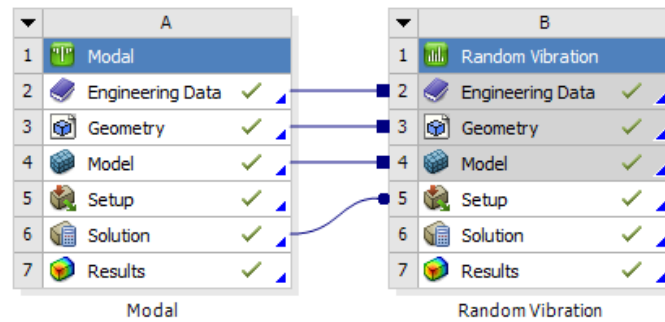
Il·lustració 130 - Deformació i angle de desfasament des de l'eix X



Il·lustració 131 - Deformació i angle de desfasament des de l'eix Z

A2.4 Càlculs de Vibracions Aleatòries

Per a realitzar els càlculs de Vibracions Aleatòries amb el programa *Ansys®* s'ha realitzat primer una selecció dels mòduls amb els que es treballaran a la part del "Workbench" on s'utilitza un anàlisi "modal", com en l'apartat anterior i consegüentment, s'aprofitarà les solucions dels modes vibracionals de la peça i es procedeix en aplicar les vibracions aleatòries utilitzant l'anàlisi "Random Vibration". Llavors, el *workflow* quedarà de la següent manera:



Il·lustració 132 - Workbench Ansys de Vibracions Aleatòries

Per veure la part d'anàlisi "Modal", vegeu l'apartat de càlcul anterior anomenat *Càlculs d' Harmònics* on el procediment i els resultats obtinguts és el mateix. Aleshores, partint de l'apartat d'anàlisi de vibracions aleatòries s'ha de calcular el PSD²⁹. Per realitzar aquest PSD s'han obtingut els resultats de l'anàlisi modal, concretament la freqüència natural de cada harmònic i la seva deformació. Finalment s'ha eleva al quadrat les deformacions obtingudes i el PSD obtingut es mostra en la taula següent:

No	Freq.(Hz)	Deformation(m)	m ²
1	189,03	0,023508	0,00055
2	310,03	0,030522	0,00093
3	312,78	0,014203	0,00020
4	486,38	0,024926	0,00062
5	604,17	0,019366	0,00038
6	701,36	0,03073	0,00094

Taula 7 - Power Spectral Density

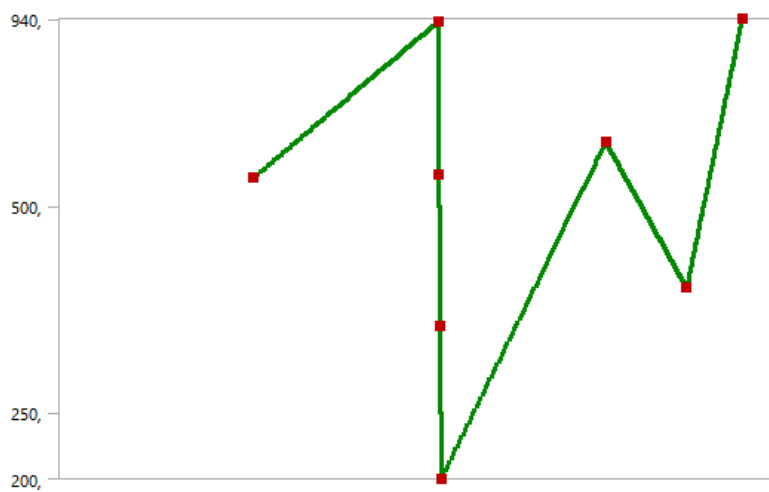
²⁹ Power Spectral Density, citat anteriorment com a historial de l'espectre de freqüències.

Aquests resultats s'han introduït en l'apartat de "PSD Displacement" on les dades s'han inclòs en mm^2 quedant de la manera següent:

	Frequency [Hz]	<input checked="" type="checkbox"/> Displacement [(mm ²)/Hz]
1	189,03	550,
2	310,03	930,
3	310,94	557,18
4	311,86	333,82
5	312,78	200,
6	486,38	620,
7	604,17	380,
8	701,36	940,

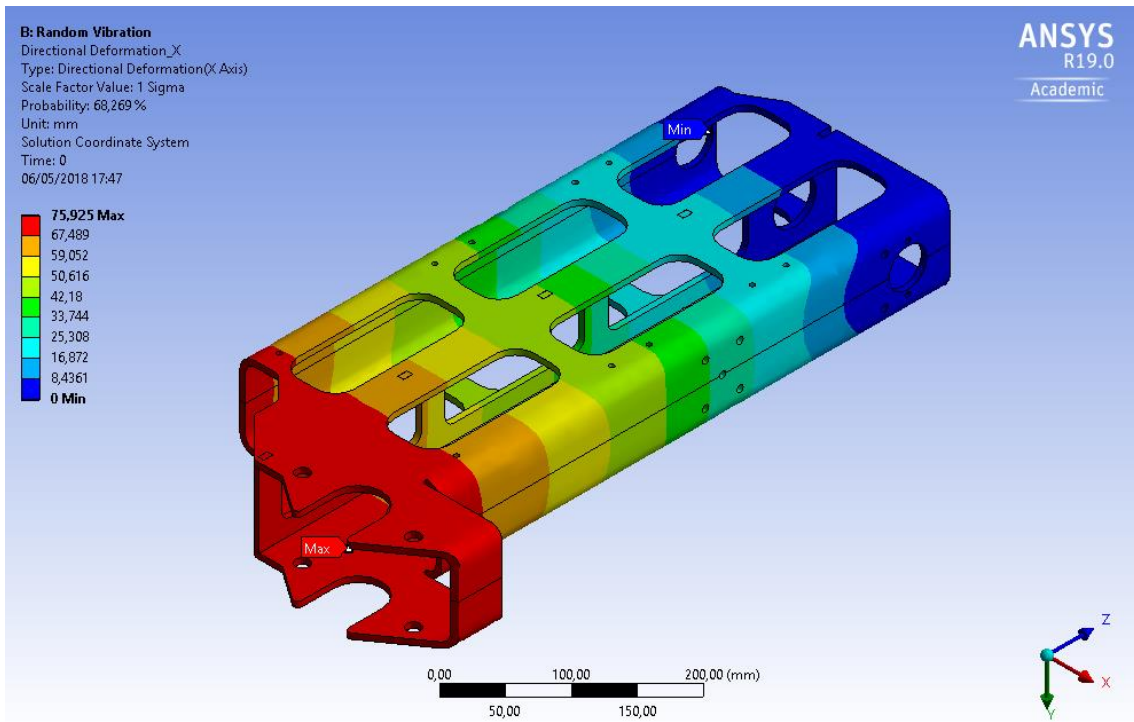
Il·lustració 133 - PSD introduït en l'Ansys

Seguidament, s'ha obtingut la següent gràfica:

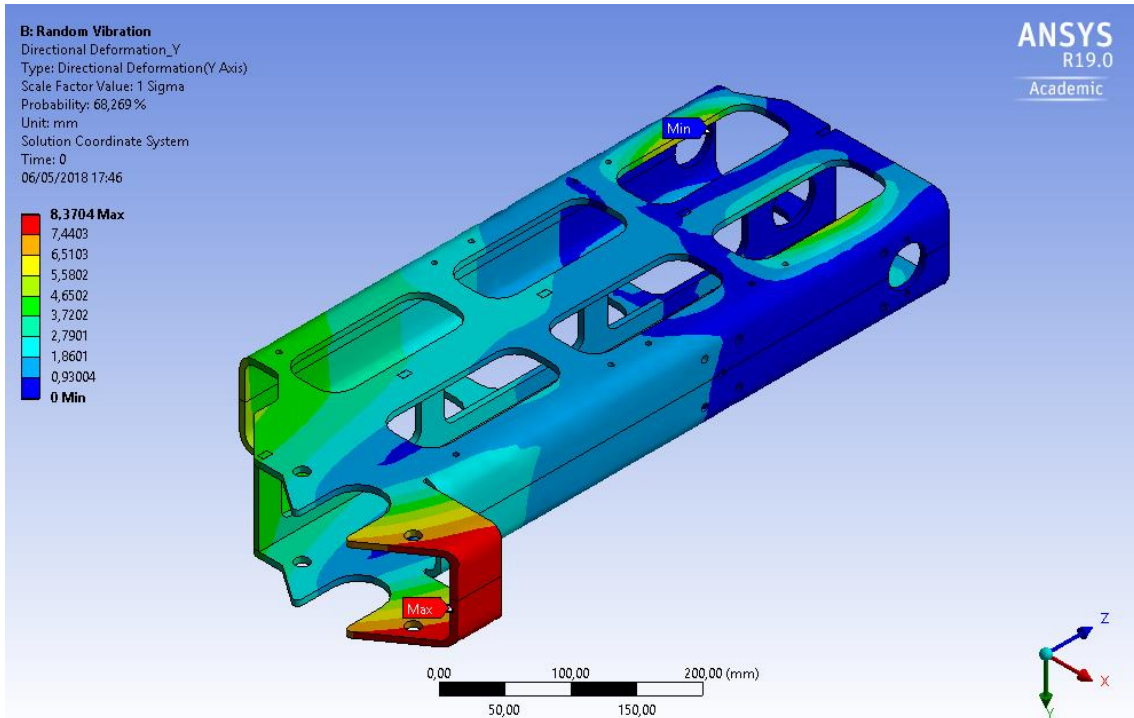


Il·lustració 134 - Gràfica obtinguda del PSD de l'Ansys

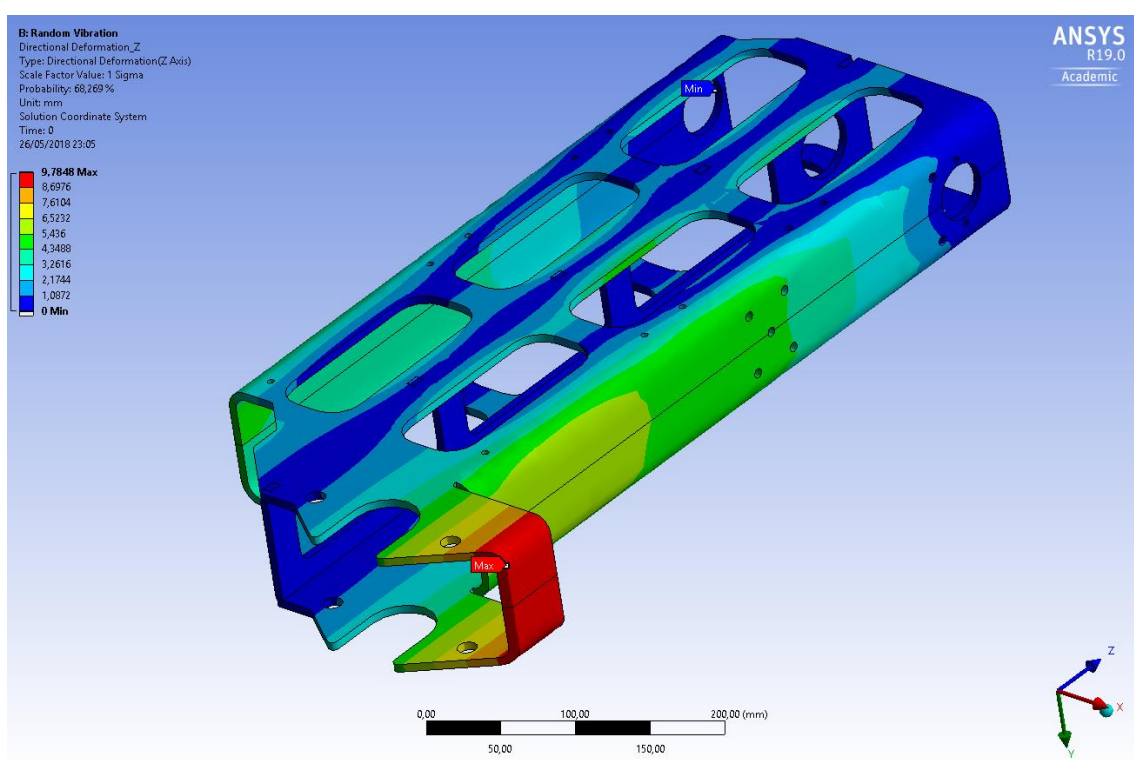
Els resultats obtinguts són les deformacions de la peça on aquestes han set descompostes en els tres eixos de referència, X, Y i Z.



Il·lustració 135 - Deformació direccional eix X



Il·lustració 136 - Deformació direccional eix Y

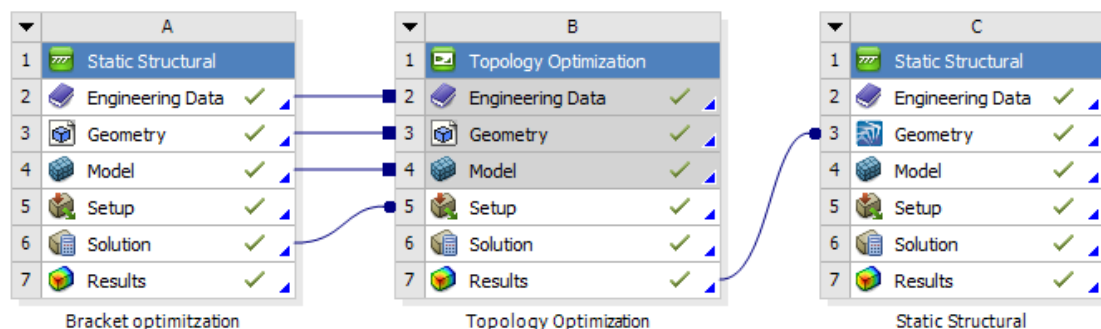


Il·lustració 137 - Deformació direccional eix Z

Cal recordar que els resultats com tots els altres casos es mostren discutits en el capítol 4.

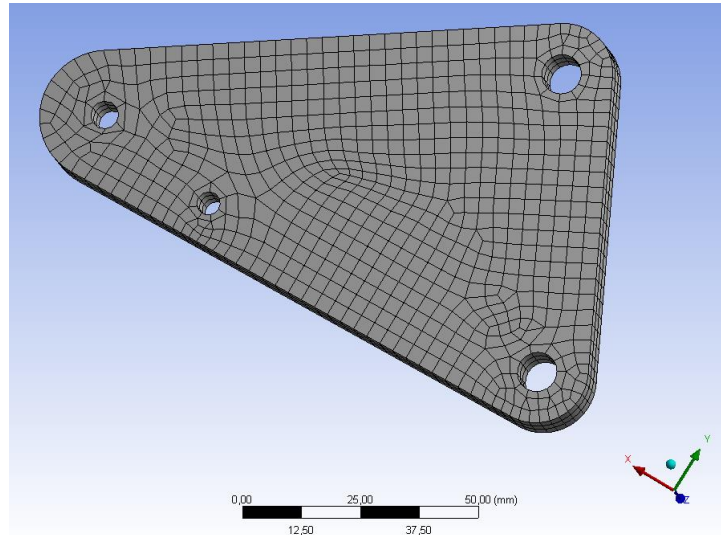
A2.5 Càlculs d'Optimitzacions Topològiques de Masses

Per a realitzar aquests càlculs amb el programa *Ansys®* s'ha definit com en els casos anteriors un banc de treball (Workbench) on ens inclogui el que es vol analitzar. En aquest cas s'ha començat amb un càlcul estructural "Static Structural" per analitzar per primera vegada la peça obtenint les tensions i deformacions inicials i seguidament s'implementa el bloc d'optimització topològica "Topology Optimization" on es realitza el procés d'optimització de la massa de la peça. Finalment, els resultats obtinguts serveixen per redissenyar la peça on consecutivament es realitzen uns càlculs estructurals per tal de verificar el correcte funcionament de la peça.



Il·lustració 138 - Workbench Ansys de l'Optimització Topològica de Massa

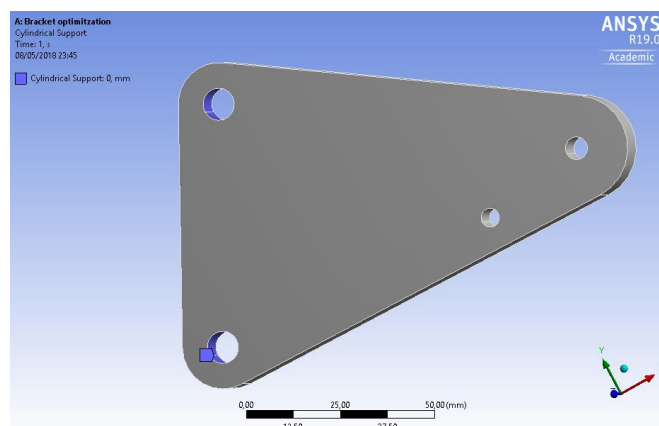
Com en els cassos anteriors s'ha realitzat una malla per tal de definir els diferents elements de la peça. Com s'ha comentat anteriorment, hi ha moltes maneres de realitzar malles i al disposar d'una llicència de producte acadèmica no es pot abusar del nombre de nodes ni nusos. Aleshores, per realitzar el mallat d'aquesta peça en aquest cas s'ha utilitzat la funció d'aproximació i curvatura on s'aconsegueix una bona resolució del mallat, concretament utilitzant 11402 nodes i 2124 elements s'obté el següent mallat:



Il·lustració 139 - Mallat de la peça a optimitzar

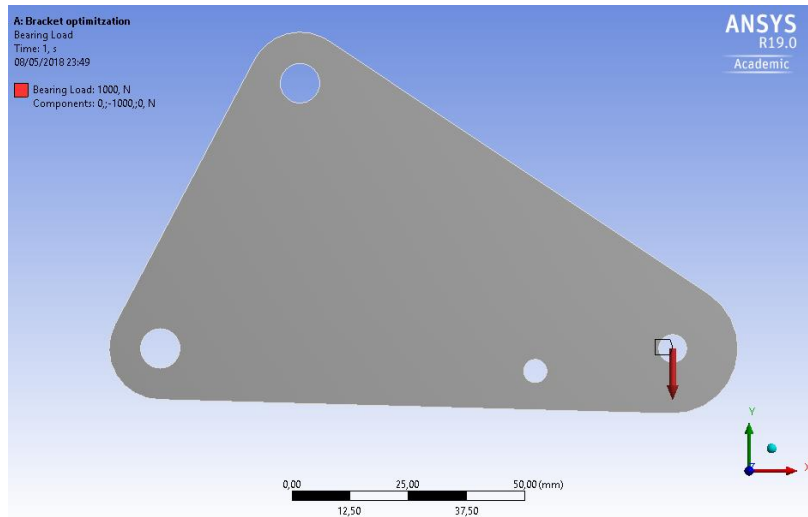
Com es pot veure, el mallat de la peça és un mallat molt uniforme on els elements són aproximadament de la mateixa mida i es troben tots distribuïts d'una manera equidistant.

Un cop realitzat el mallat, s'han determinat les càrregues que actuen en el sistema i les condicions de contorn. Per part de les condicions de contorn, aquestes es defineixen fixant els dos forats de suport tal com es mostra en la figura següent:



Il·lustració 140 - Sistema de condicions de contorn - Fixacions

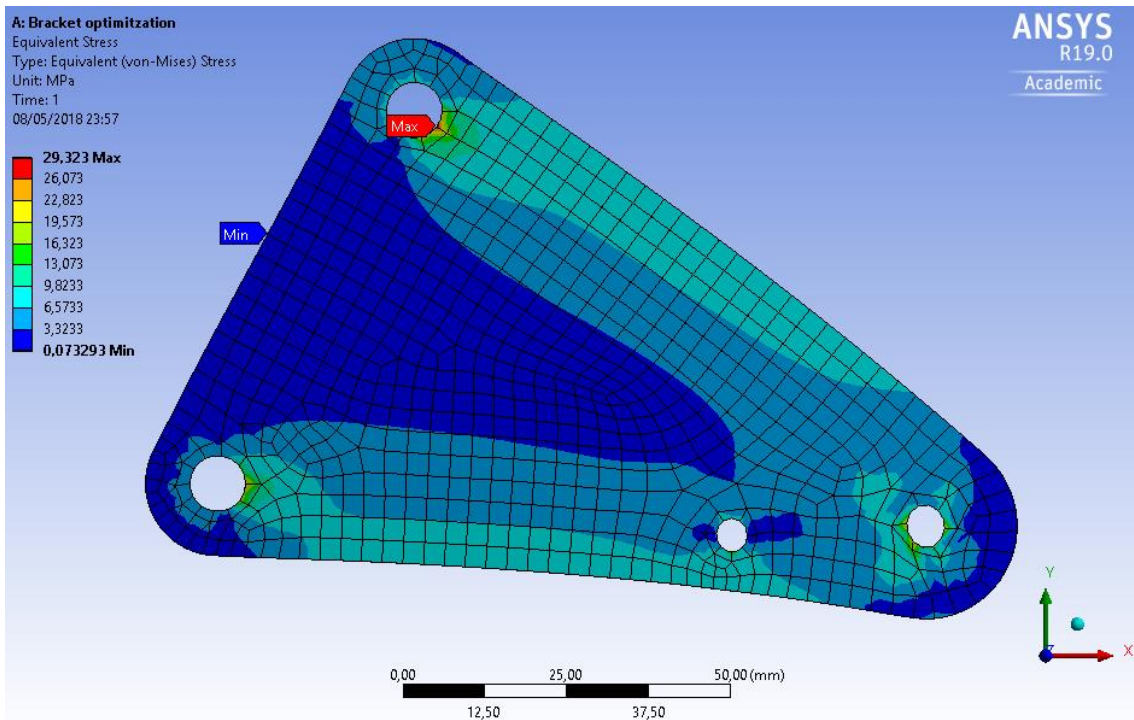
Seguidament, s'ha d'indicat quina és la càrrega aplicada en aquest sistema corresponent a la càrrega que ha de suportar l'estrep. Per determinar aquesta càrrega es suposa que una persona de massa 100Kg es recolza totalment sobre un estrep de la motocicleta. Aleshores, la força total que s'haurà d'aplicar és d'aproximadament 1000N. El sentit i la direcció de la força és en el sentit de l'acceleració de la gravetat (direcció Y negativa).



Il·lustració 141 - Sistema de càrregues de la peça

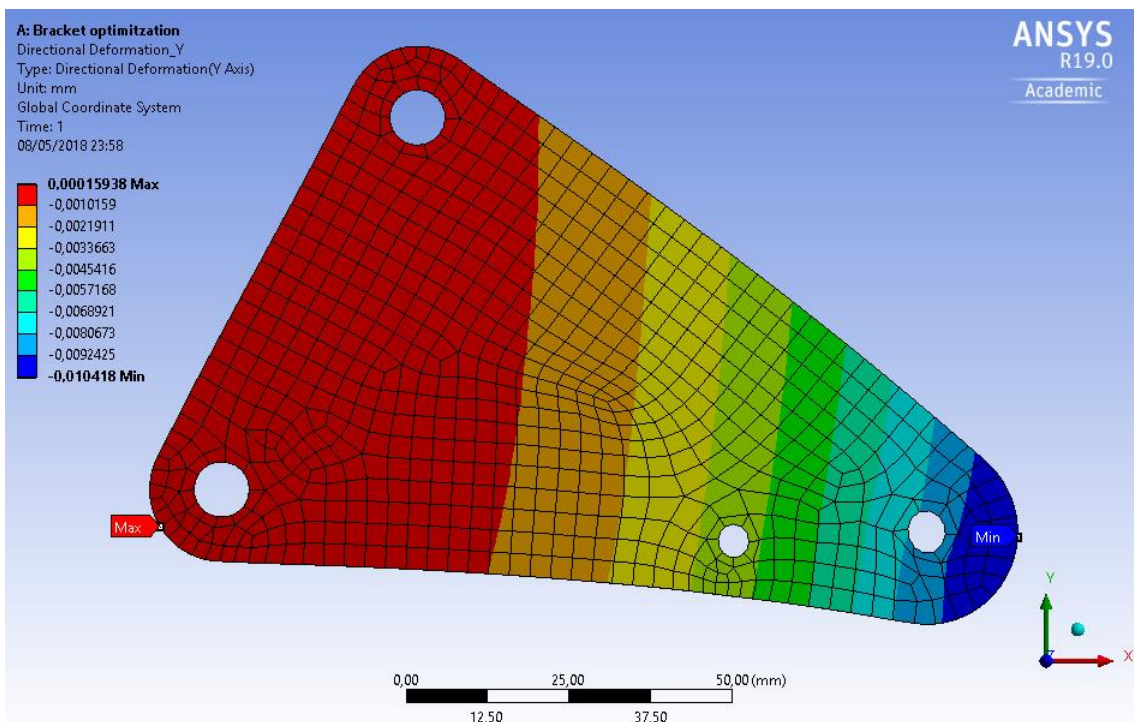
Un cop definides totes les condicions de contorn i les càrregues que actuen, s'ha indicat en el programa que les dades que s'obtenen es volen exportar a un futur anàlisi d'optimització topològica. Llavors, els resultats estructurals obtinguts en aquest anàlisi es mostren a continuació:

Respecte a la tensió equivalent de Von-Mises, s'ha obtingut una tensió de 29,323MPa, una tensió molt inferior al seu límit elàstic corresponent a 275MPa, cosa que indueix que es pot optimitzar molt més.



Il·lustració 142 - Tensió Equivalent de Von-Misses

Per altra banda, la deformació obtinguda al llarg de l'eix Y és de 0,01mm cosa que també ens indica que aquesta peça està sobredimensionada.



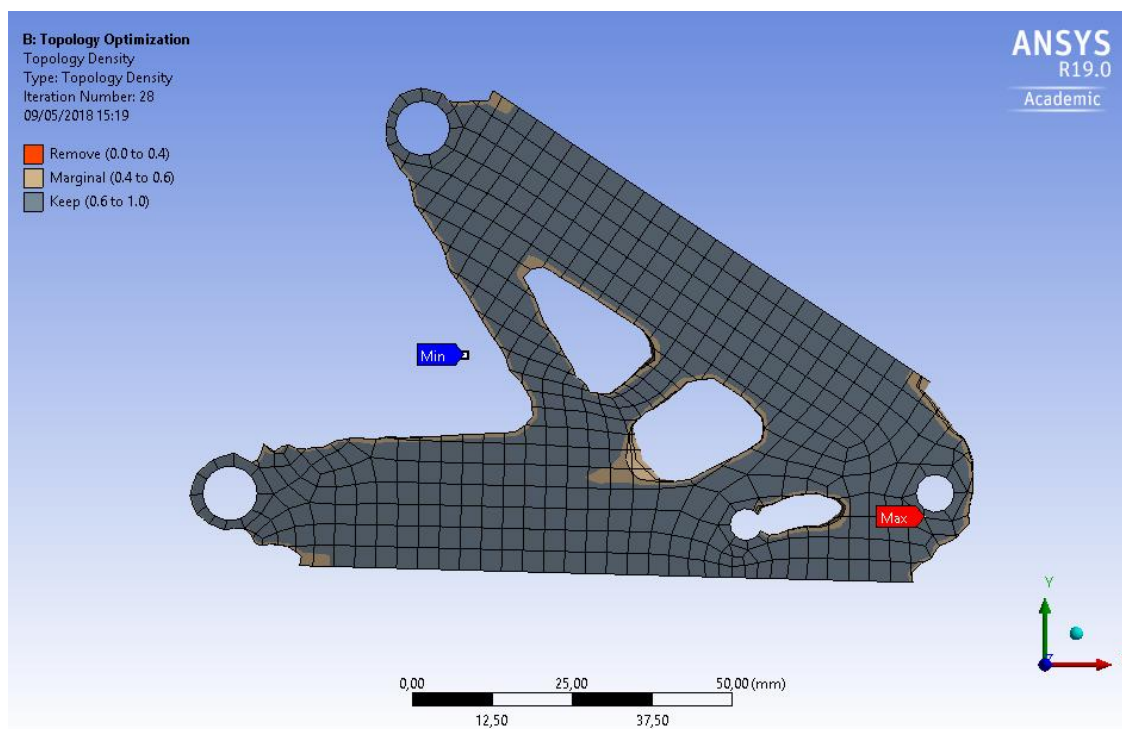
Il·lustració 143 - Deformació al llarg de l'eix Y

Un cop realitzats aquests càlculs estructurals, tota la informació es passa cap a l'anàlisi d'optimització topològica. On seguidament es procedirà amb l'explicació d'aquest anàlisi.

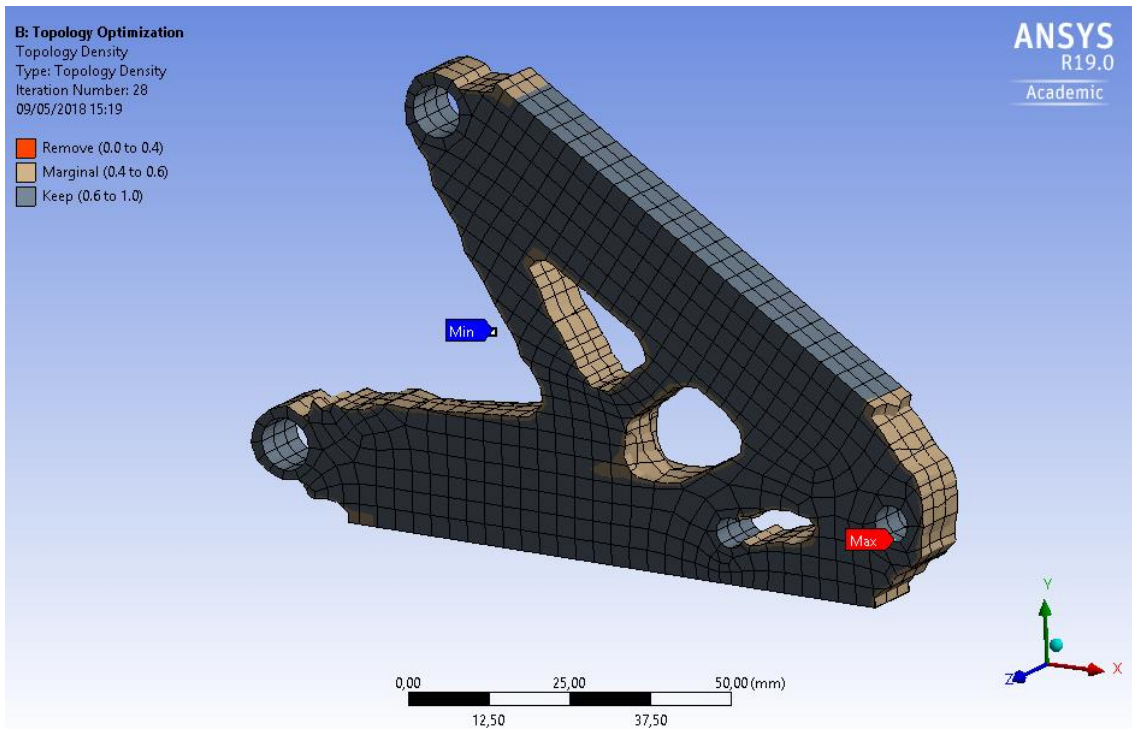
Un cop dins de l'anàlisi topològic s'ha definit tot una sèrie de paràmetres per a realitzar l'anàlisi. Primerament, es defineix el nombre màxim d'iteracions que caldrà fer el programa fins a obtenir els resultats. En aquest cas, s'ha establert un nombre màxim de 500 iteracions i a més s'ha definit una precisió per la convergència de 0.1%, tots els altres paràmetres s'han deixat amb el valor per defecte.

A continuació s'indica de quin tipus d'optimització es tracta. Com s'ha comentat en el Capítol 3 i pot haver optimitzacions de massa, de volum, de tensions principals, de desplaçaments i de les forces de reacció. En aquest cas s'ha optat per la optimització de la massa a fi de reduir la quantitat de material del sistema. En el cas d'optimització de massa s'ha indicat quin percentatge de massa es vol conservar on en aquest cas s'ha optat per conservar un 60% de la massa inicial de la peça.

Un cop s'ha realitzat tots aquests passos el resultat obtingut és el que es mostra a continuació:

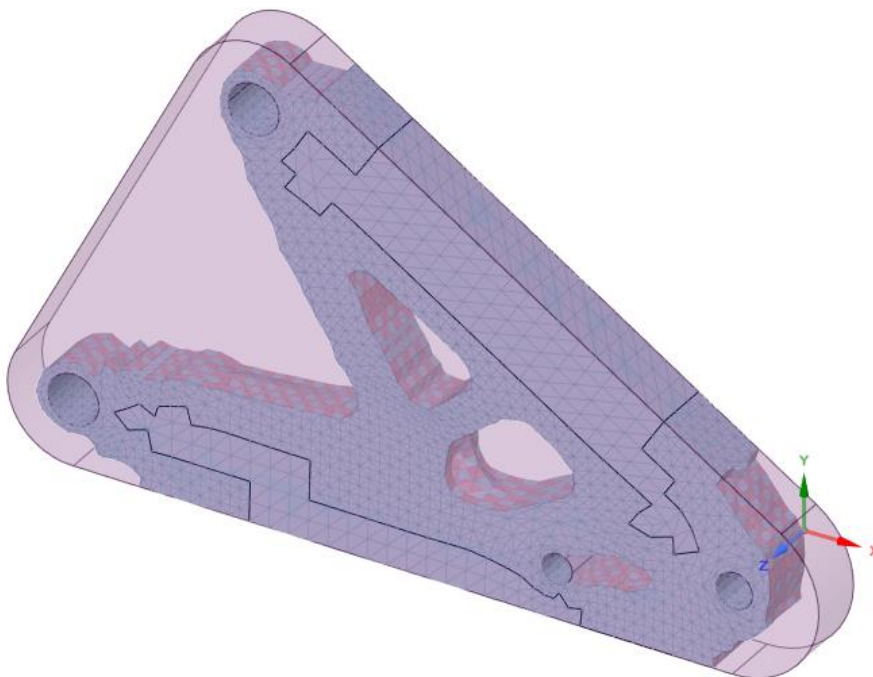


Il·lustració 144 - Optimització Topològica de massa pre-redissenyada



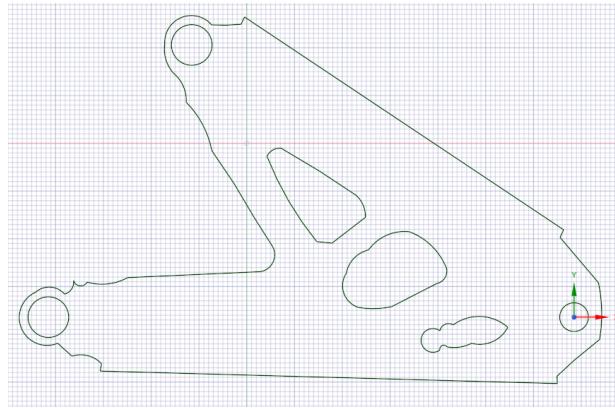
Il·lustració 145 - Optimització Topològica de massa pre-redissenjada perspectiva diferent

Com es pot veure la forma geomètrica d'aquesta peça és molt poc mecanitzable, aleshores s'haurà d'arreglar amb un programa de disseny a fi d'obtenir una peça més mecanitzable i ràpida de fabricar. En aquest cas per re-dissenyar aquesta peça s'ha utilitzat el programa que proporciona l'Ansys®. Aleshores, obrint la plataforma de dibuix del programa Ansys i important la peça obtinguda, es mostra el següent resultat:



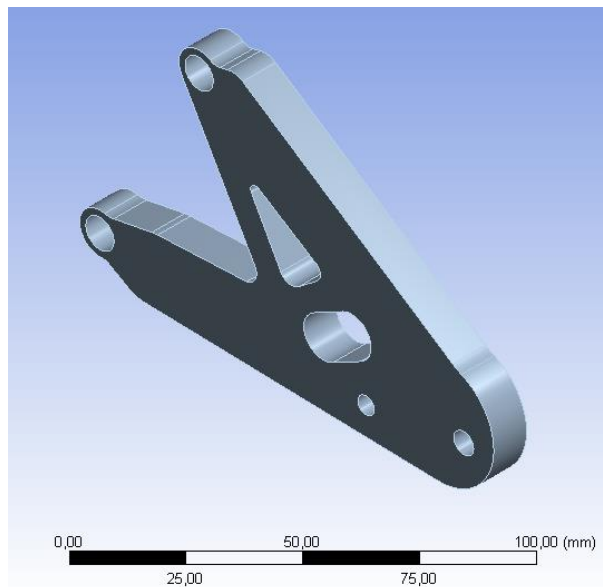
Il·lustració 146 - Procés de redisseny de la peça optimitzada

Com es pot veure, el programa mostra els dos dibuixos de la peça, l'actual en un "Wireframe" i el resultat optimitzat a l'interior de la peça principal. Per tal de redissenyar aquesta forma geomètrica i fer que pugui ser mecanitzable o tallada mitjançant un tall làser o tall d'aigua, es procedeix en re-dibuixar-la en un pla 2D important el contorn de la nova geometria tal com es mostra en la il·lustració següent:

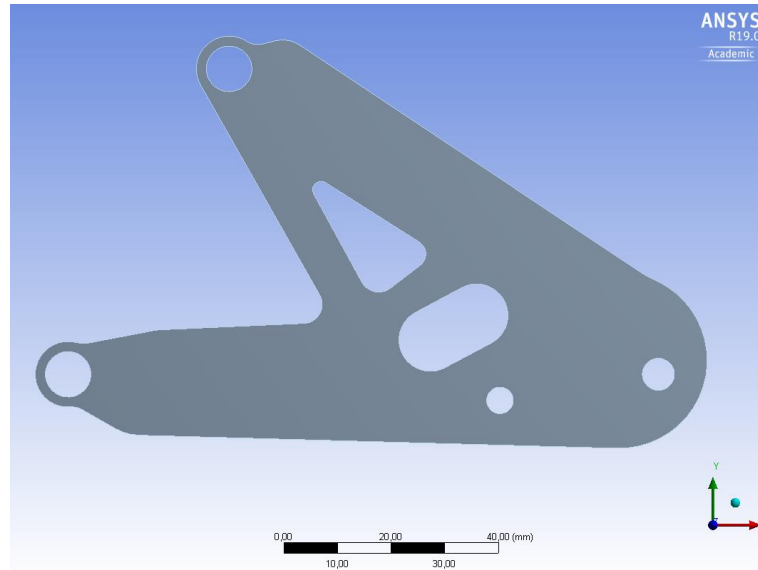


Il·lustració 147 - contorn de la peça optimitzada

Un cop la peça ha set redibuixada el resultat final és el que es mostra a continuació:

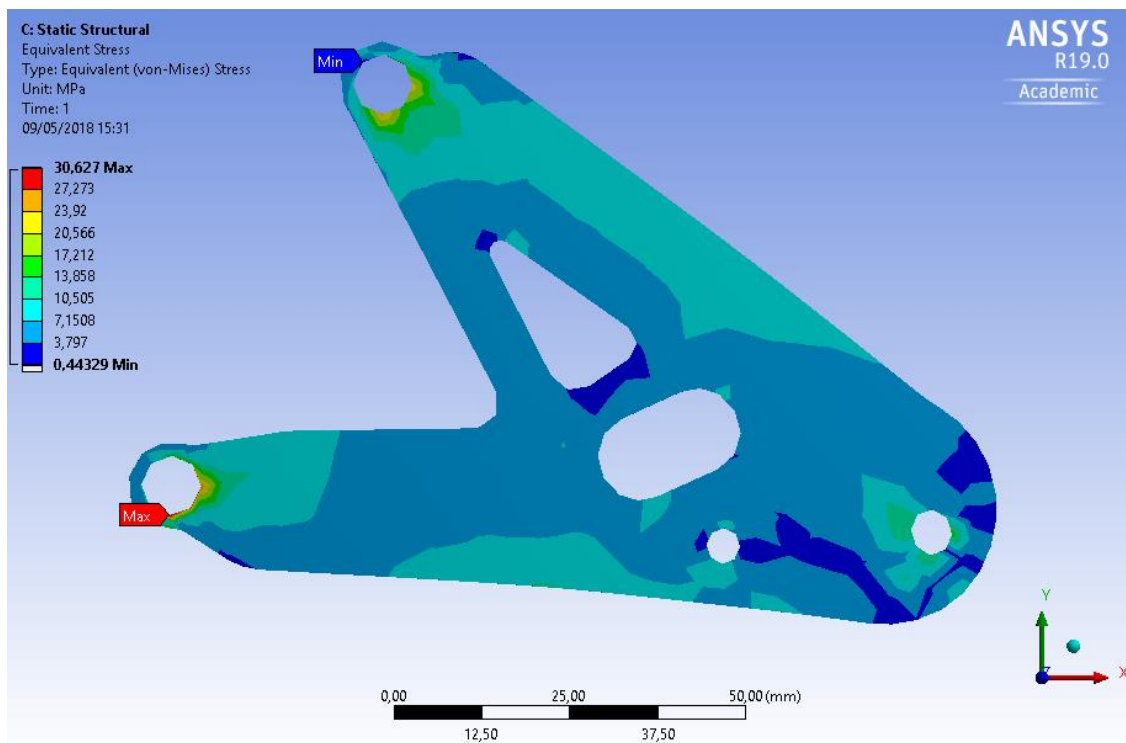


Il·lustració 148 - Figura redissenyada

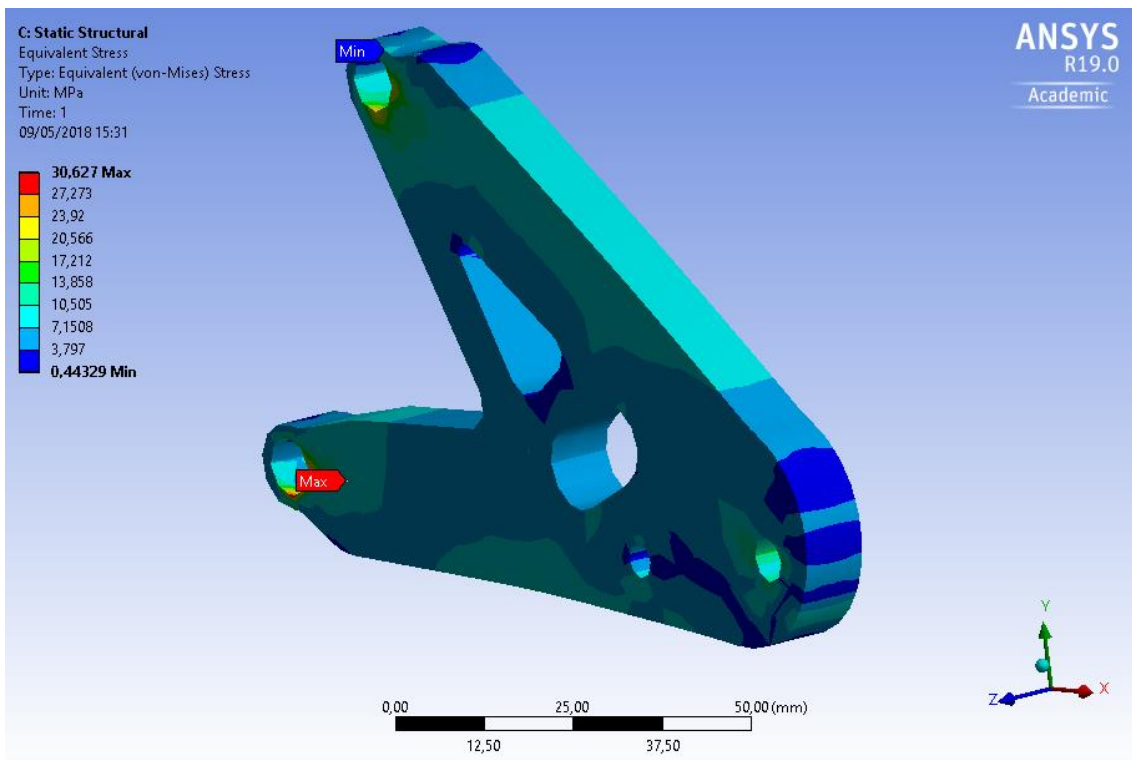


Il·lustració 149 - Contorn figura redissenyada

Aquesta és una peça molt més mecanitzable i fàcil de fabricar. Per últim es tornar a aplicar el càlcul estructural realitzat al principi del procés per verificar que la peça re-dissenyada i optimitzada segueixi resistint les càrregues aplicades. Aleshores, tornant a aplicar les càrregues i els suports dels que disposava, s'ha tornat a analitzar la peça comprovant la seva tensió màxima i les seves deformacions.

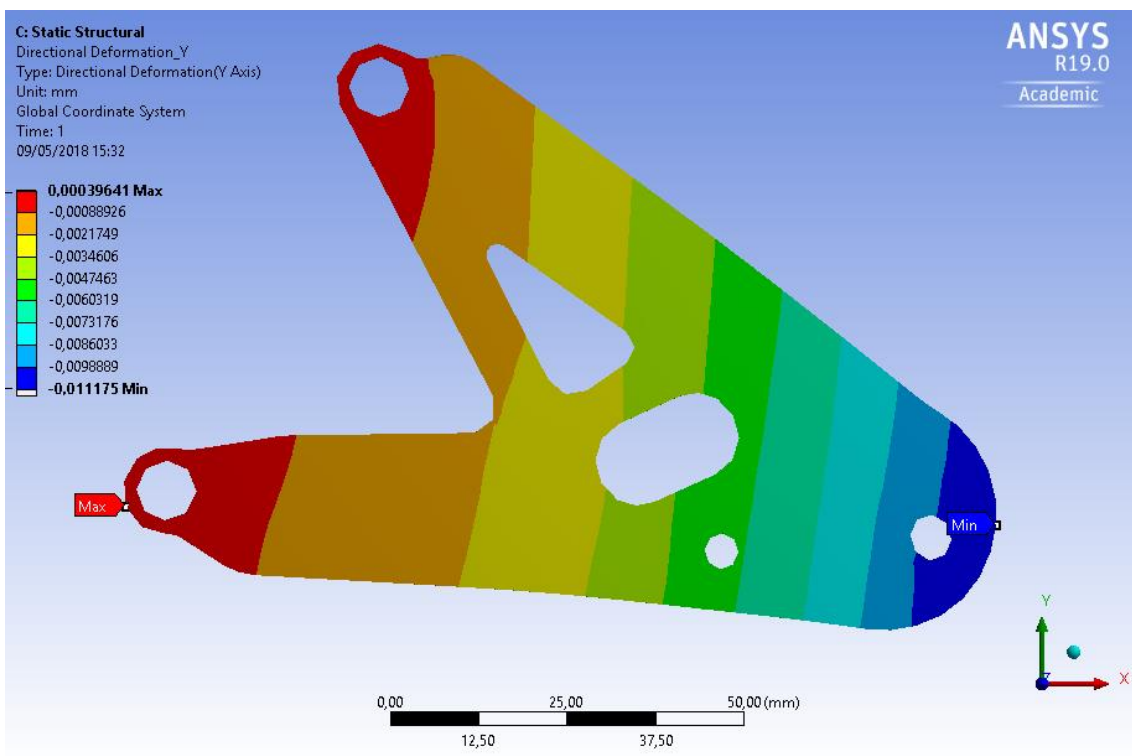


Il·lustració 150 - Tensió equivalent de Von-Misses de la peça optimitzada i redissenyada



Il·lustració 151 – Tensió equivalent de Von-Misses de la peça optimitzada i redissenjada perspectiva diferent

Com es pot veure la tensió màxima és de 30,627MPa sent aquesta inferior al seu límit elàstic de 275MPa i respecte a les deformacions al llarg de l'eix Y, el resultat obtingut és el que es mostra a continuació:

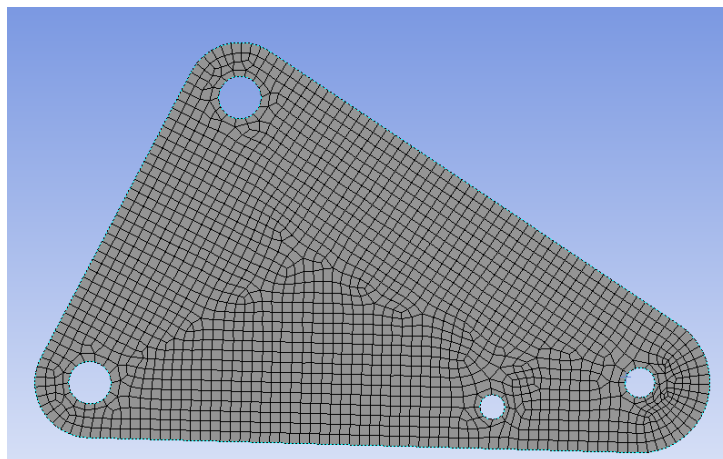


Il·lustració 152 - Deformació al llarg de l'eix Y

On es segueix obtenint una deformació màxima de 0,01mm. Com s'ha pogut veure, els resultats obtinguts amb aquesta peça encara queden sobre dimensionats aleshores s'ha procedit en realitzar un nou anàlisi d'optimització topològica de massa. A diferència del càlcul realitzat anteriorment amb una peça de 10 mm d'espessor, a continuació es realitza el mateix càlcul però amb una peça de 6 mm d'espessor i en comptes de reduir la massa un 40% en aquest cas es reduirà la massa un 60%, és a dir, que es conservarà només un 40% de la massa inicial.

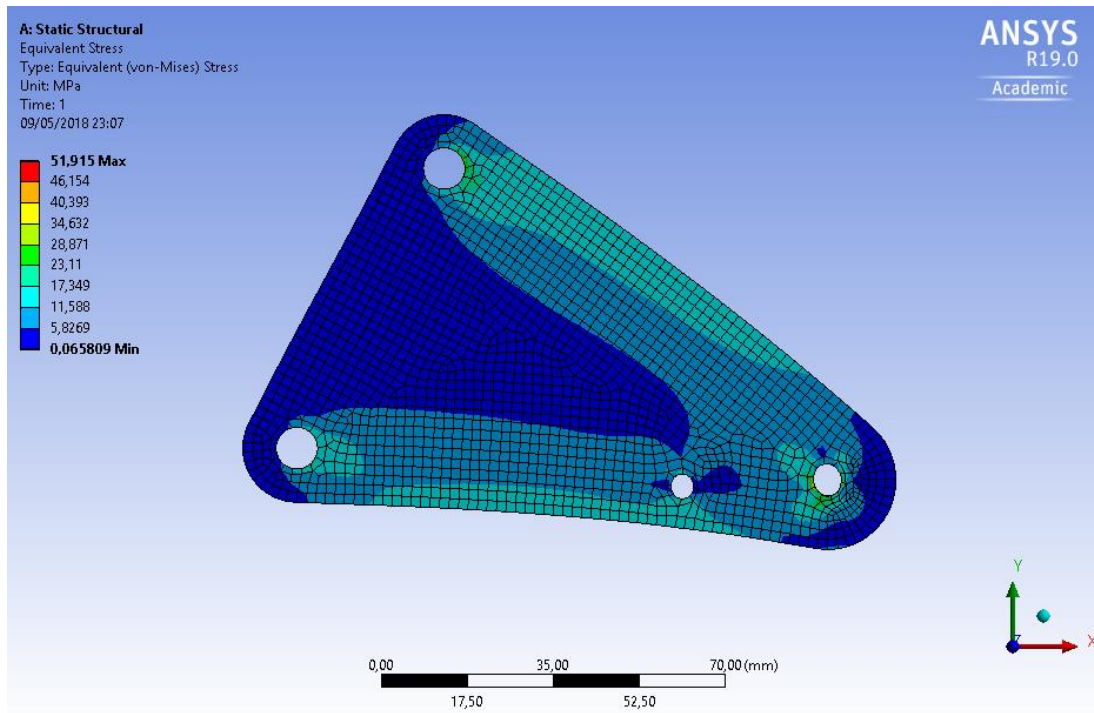
Llavors, el "Workbench" creat té una similitud al cas anterior on consta d'una part de càlcul estructural amb un mòdul de "Static Structural" seguit d'un mòdul de càlcul d'optimització topològica (Topology Optimization). Seguidament, quan s'hagi realitzat l'optimització i s'hagi re-dissenyat el model, es torna a calcular la peça final confirmant que els resultats obtinguts són correctes i no excedeixen el límit elàstic de la peça ni les deformacions són excessives.

Per començar, es realitza el càlcul estructural utilitzant les mateixes condicions de contorn que en els càlculs realitzats anteriorment, és a dir, que s'utilitzen les mateixes forces i els mateixos suports emprats en la peça anterior. Llavors, el mallat realitzat en aquesta peça és el que es mostra a continuació:



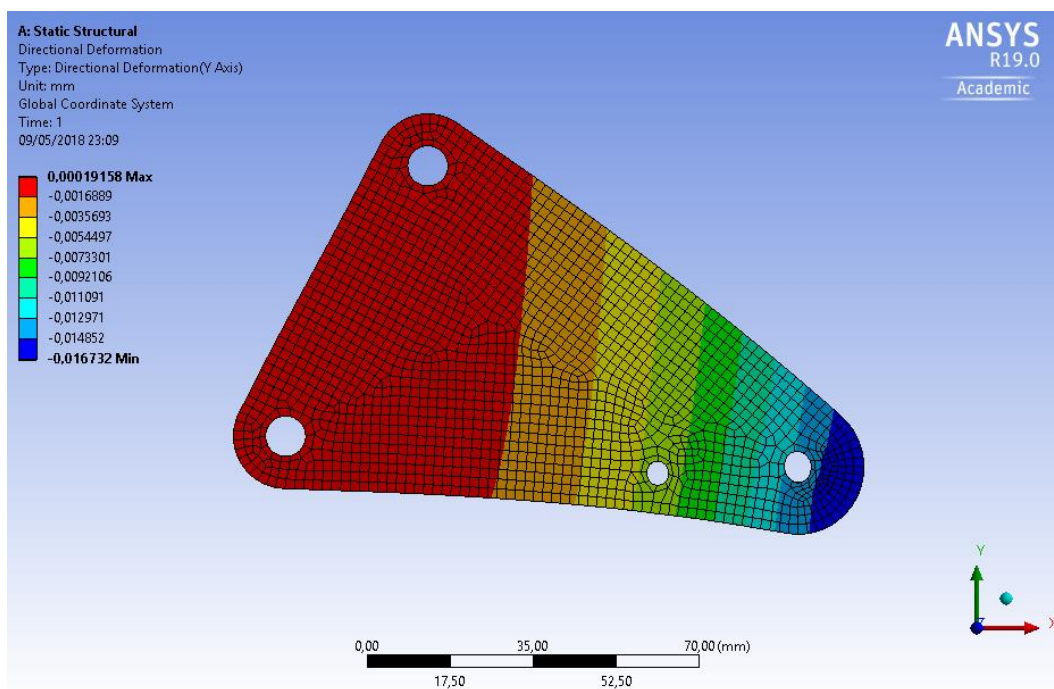
Il·lustració 153 - Nou mallat amb la peça de 6 mm d'espessor

Seguidament, la tensió resultant, aplicant la càrrega de 1000N en el sentit negatiu de l'eix Y com s'ha comentat anteriorment, es mostra a continuació.



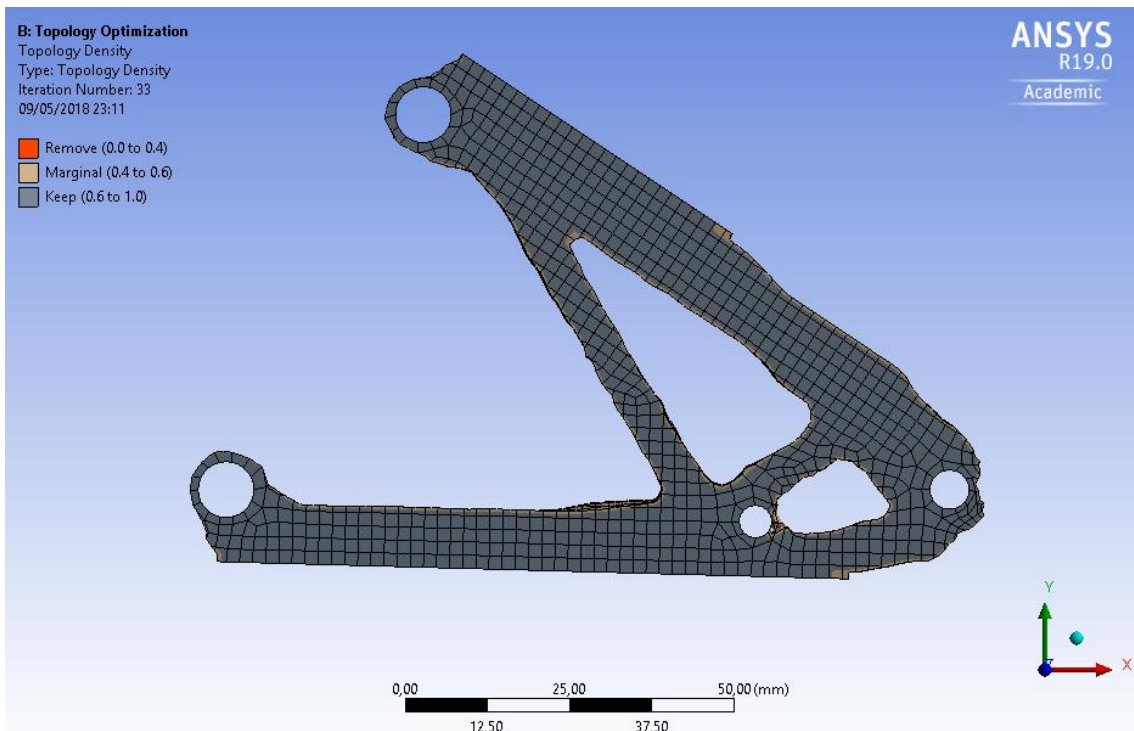
Il·lustració 154 - Tensió equivalent de Von-Misses amb la peça pre-optimitzada

Com es pot veure el resultat de la tensió de Von-Misses abans d'aplicar l'optimització de massa, correspon a una tensió de 51,915 MPa, encara molt per sota del seu límit elàstic corresponent a una tensió de 275MPa. Per altra banda, la deformació obtinguda al llarg de l'eix Y és:

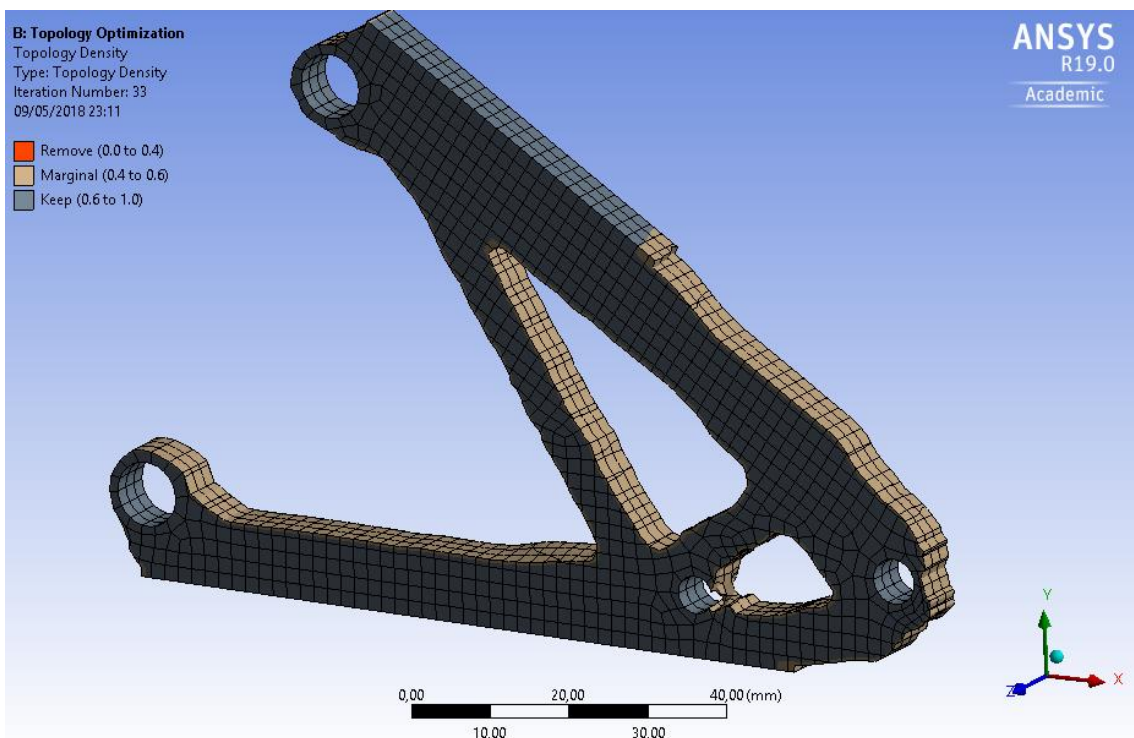


Il·lustració 155 - Deformació obtinguda al llarg de l'eix Y

Aleshores, com s'ha comentat, en aquest cas s'ha realitzat una optimització topològica de massa del 60% (conservant el 40% de la massa actual). Redefinit i completant tots els paràmetres que s'han citat en el cas anterior, el resultat de l'optimització és el que es mostra en la següent figura:

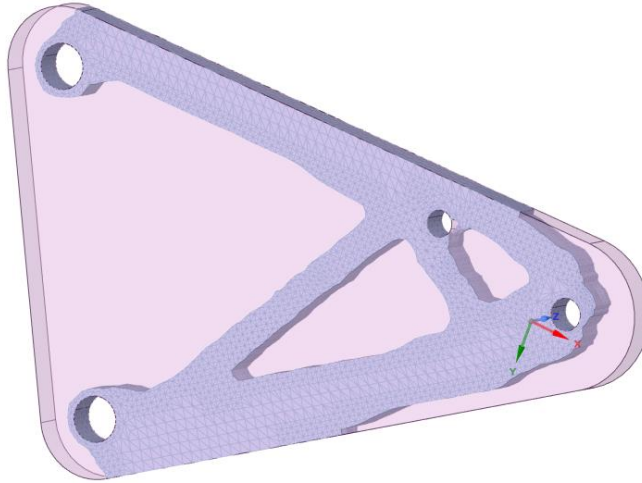


Il·lustració 156 - Optimització Topològica de massa pre-redissenyada



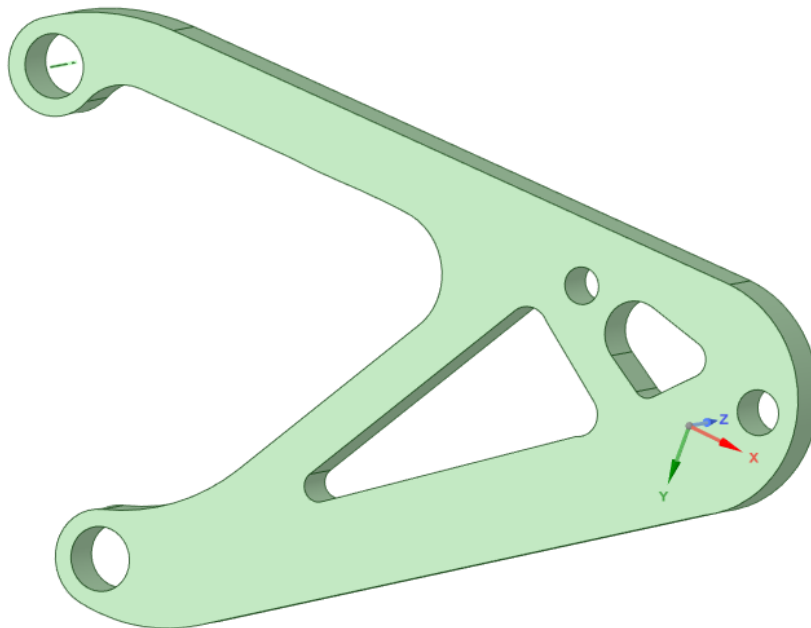
Il·lustració 157 - Optimització Topològica de massa pre-redissenyada perspectiva diferent

Un cop s'ha obtingut la peça optimitzada s'ha procedit en re-dissenyar-la amb el programa que proporciona el propi Ansys® anomenat *SpaceClaim* de la mateixa manera que en el cas anterior, on primer de tot es procedeix en actuar sobre un pla de la peça i dibuixar una peça de 2 dimensions facilitant així el procés de fabricació d'aquesta sent apta per a tall amb làser o tall amb aigua de la mateixa manera que podria ser fresada. Aleshores, procedint amb el re-disseny en la següent il·lustració es pot observar les dos peces juntes, la peça abans de l'optimització en format "Framework" i la peça interior sent aquesta la optimitzada:



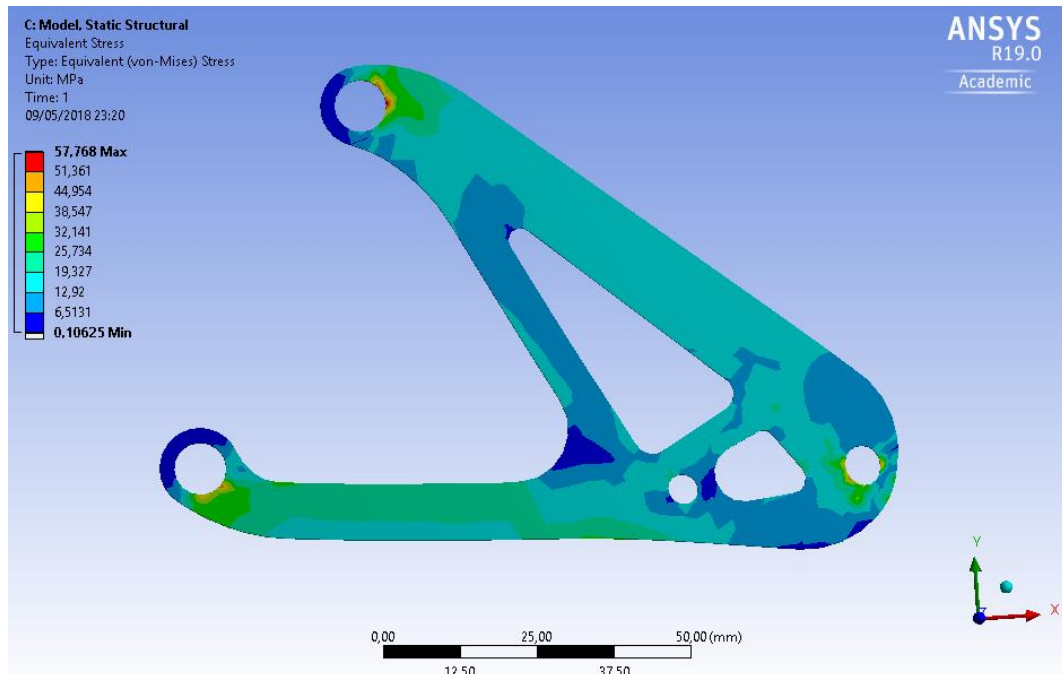
Il·lustració 158 - Procés de redisseny de la peça optimitzada

Posteriorment, s'arreglarà una de les superfícies de la peça fent-la més mecanitzable i se li retornarà l'espessor corresponent, obtenint el resultat que es mostra en la il·lustració següent:

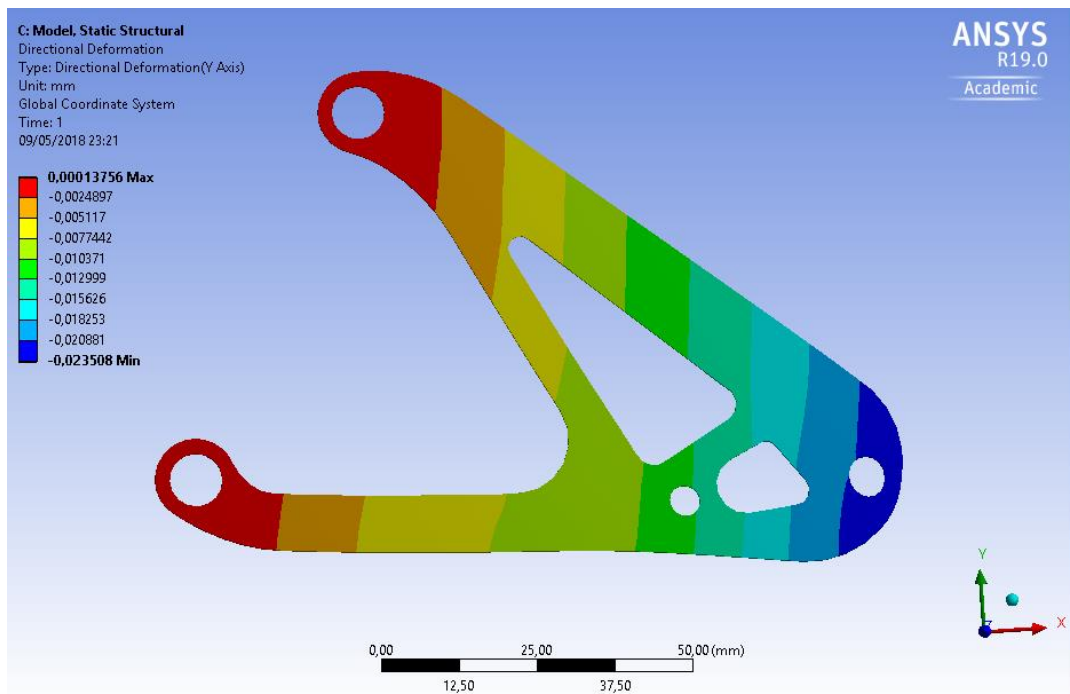


Il·lustració 159 – Resultat geomètric de la peça redissenjada

Per últim, com s'ha comentat anteriorment, s'haurà de tornar a realitzar un càlcul estructural per verificar que la pesa re-dissenyada resisteixi totes les càrregues aplicades amb les seves condicions de contorn. En aquest càlcul estructural s'ha verificat la tensió i la seva deformació sent aquestes les que es mostren en les figures següents:



Il·lustració 160 - Tensió equivalent de Von-Misses de la peça post-redissenyada



Il·lustració 161 - Deformació al llarg de l'eix Y de la peça post-redissenyada

Com es pot veure, un cop optimitzada la peça aquesta obté unes tensions de 57,768MPa també molt inferiors al seu límit elàstic i es pot dir que aquesta peça resistirà les càrregues aplicades. Per altra banda, en el cas de la seva deformació, aquesta també obté unes deformacions molt petites de l'ordre de 0,02mm. On la deformació màxima que podria obtenir aquesta peça d'acord amb la següent regla: $\delta_{max} < \frac{L}{300}$ on la longitud de la peça és de 134mm, la deformació màxima permesa segons aquesta regla seria de 0,447 mm i com es pot veure la seva deformació és inferior.

Annex A.3 - Circuits Elèctrics

En aquest simulador de Moto GP com s'ha comentat en la memòria, es disposa d'una font d'alimentació de 220V AC amb una freqüència de 50 Hz el qual s'ha de convertir aquesta font a diferents fonts de tensió segons els requeriments de cada sistema. Sent majoritàriament 24V DC i a 5V DC³⁰. Però abans de realitzar aquesta conversió la xarxa primerament passa per un filtre del senyal per tal d'eliminar soroll produït per les interferències especialment utilitzat per sistemes de control, convertidors de potències i controls de motors.



Il·lustració 162 - Filtre EMIKON de 10A

Després del filtre, la xarxa ja és capaç de passar a la següent etapa on passa per un magnetotèrmic sent aquest capaç d'interrompre la circulació de corrent elèctric quan aquesta sobrepasa certs valors protegint-la així de sobrecàrregues i curtcircuits. Del qual el procedeix un contactor principal, l'equivalent d'un relé però per altes potències, el qual pot interrompre el corrent que circula pel sistema al ser activat o desactivat segons el controlador que el controli³¹. Posteriorment, s'ubica un convertidor de tensió el qual converteix i redueix la tensió de 220V AC a 24V DC sent aquesta la font d'alimentació de tot el sistema industrial de sensors. Tots aquests dispositius es mostren en la il·lustració següent:



Il·lustració 163 - Dispositius per convertir la senyal de 220V AC a 24V DC

³⁰ Pel nou sistema de control s'han realitzat uns circuits externs que adapten la tensió a 10V DC per a sistemes analògics.

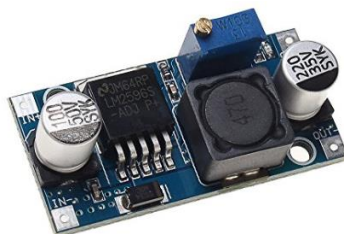
³¹ Aquest contactor anomenat contactor de Rearme va directe cap a la unitat de control sent utilitzat per abastir la potència elèctrica al sistema.

Per altra banda, es disposa d'un sistema de conversió de 220V AC a 5V DC destinat per la Raspberry que utilitzen els del Grau en Multimèdia de la Universitat de Vic. Aquest convertidor, s'ocupa d'alimentar i subministrar prou tensió i corrent per alimentar aquesta Raspberry i el corresponent SAI que porta incorporat. La finalitat d'aquesta Raspberry és controlar tota la interfície gràfica del simulador, el qual estan desenvolupant diferents projectes de millora incorporant nous aspectes visuals per un futur anar sincronitzats amb els moviments del simulador. Aleshores, la unitat d'aquesta Raspberry es troba en la il·lustració següent:



Il·lustració 164 - Sistema d'alimentació i Raspberry pels estudiants del Grau en Multimèdia

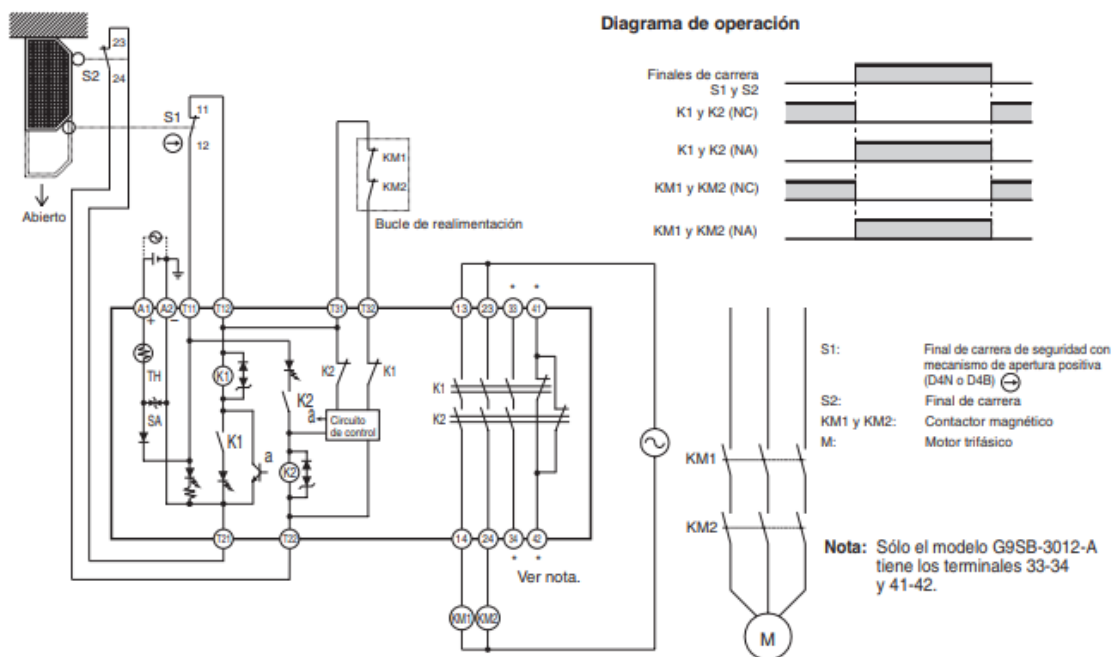
En aquest sistema de control, s'hi ha incorporat una font d'alimentació per a la part electrònica basada en Microprocessadors el qual és un reductor "step down CC-CC" que redueix des d'una tensió continua a una altre de més baixa. D'aquesta manera es redueixen els 24V d'entrada d'un sistema industrial a 5V d'alimentació pel microprocessador i els circuits que s'han realitzat en la part electrònica del TFG. En la següent il·lustració es mostra el convertidor Step Down CC-CC.



Il·lustració 165 - Convertidor Step Down CC-CC

A part de la font d'alimentació de 24V DC i del sistema de la raspberry també hi ha una centraleta de seguretat on aquesta porta a terme totes les mesures de seguretat del sistema, en aquest cas, aquest relé de seguretat està directament connectat en el pulsador de parada d'emergència on bàsicament aquest relé només està dissenyat per a realitzar funcions específiques com en aquest cas el control de la parada d'emergència. Cal ressaltar que aquesta centraleta de seguretat funciona com a un relé, però el que passa que un relé a partir d'un determinat nombre de cicles pot ser que les bobines s'acabin soldant i aquest es quedi estable en una posició, per aquest motiu, moltes normatives de seguretat, tant europees com americanes han fet implementar aquest tipus de dispositius que en el cas d'una determinada fallada de connexió no provoqui la pèrdua de la funció de seguretat.

Sobre aquest dispositiu es poden mostra algunes de les seves característiques com seria el consum d'aquest, sent de 1,4W. La càrrega nominal que podria suportar serien de 250V amb una corrent de 5A. Per altra banda, el temps màxim d'operació i el temps màxim de resposta són de 30ms i 10 ms respectivament. Tota aquesta informació s'ha extret del *datasheet* del fabricant (Omron, 2018) a més, el circuit de la centraleta d'aquest dispositiu és el que es mostra a continuació:



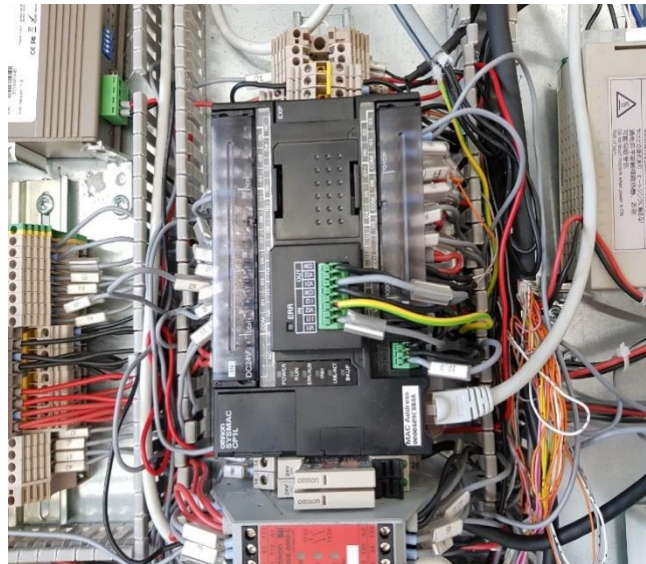
Il·lustració 166 - Circuit intern de la centraleta de seguretat Omron G9SB-2002-A



Il·lustració 167 - Centraleta de seguretat

Projecte d'Actualització en el Disseny del Simulador de Moto GP de l'Empresa CKU Sport Fitness per a la Verificació Estructural dels Elements i la Millora del Sistema de Control

Per altra banda, la moto disposa d'una unitat de control basada en un PLC Omron Sysmac CP1L el qual es substitueix en la secció electrònica de la memòria per un microprocessador de la marca *Arduino*® el qual s'ocupa del processament de dades i del control dels motors per així poder obtenir un control complet del simulador. Per altra banda, la unitat de control industrial basada en PLC que es substitueix és la que es mostra en la il·lustració següent:



Il·lustració 168 - Unitat de control que es substitueix

A més, en el sistema de cablejat del simulador es disposa d'un commutador switch per establir una red d'ethernet entra els diferents dispositius del sistema, on en aquest cas correspondria a una xarxa interna constituïda per la Raspberry, la unitat de Control basada en el PLC i una pantalla que es troba ubicada en el volant del simulador.



Il·lustració 169 - Pantalla Omron del volant del simulador



Il·lustració 170 - commutador switch

Tret d'aquesta unitat de control, es preservaran tots els altres elements del sistema, de la mateixa manera que els *drivers* que controlen els diferents motors que hi ha. Aleshores, es disposa d'un divers més complex i un de més senzill. El driver complex que s'utilitza per controlar el moviment d'inclinació, porta integrades motles funcions de control d'intensitat, potència, parell, velocitat i posició del motor. A continuació s'explica les característiques més importants d'aquests divers així com algunes de les seves connexions.

Respecte al driver que controla el moviment d'inclinació del simulador, aquest és un driver de la marca *Lenze* que acciona el servomotor de la mateixa casa³². Aquest driver es pot veure en la següent il·lustració:



Il·lustració 171 - Driver inversor implementat pel control del servomotor per inclinar el simulador

³² Motor prèviament seleccionat en l'apartat de càlculs cinemàtics i dinàmics

Aquest és especial degut a la seva gran varietat d'interfícies de comunicació, també pot controlar diversos paràmetres i característiques dinàmiques del motor i a més disposa de pins programables els quals s'utilitzen per comunicar-se amb el driver i així controlar les seves funcions i accions a realitzar. Cal destacar que en aquest driver s'ha li ha programat aquests pins i se l'hi ha introduït una gràfica de parell en funció dels graus d'inclinació de la moto, també se li ha introduït una gràfica de frenada. A part de totes aquestes funcions, aquest també disposa d'un sistema de control de frenada del motor, on s'hi ha incorporat una resistència de dissipació de potència externa en el driver per la qual si fa circular tot el corrent que genera el motor en el cas de frenada i així es dissipa en la resistència i s'evita que aquest corrent vagui cap a la xarxa.

Aquest driver és un inversor que genera impulsos de tensió per a poder controlar el moviment del sevomotor. A més, també converteix una senyal de 220V AC d'entrada provinent de la xarxa la converteix en una tensió trifàsica per accionar el motor.

Conseqüentment s'explicarà les entrades i sortides que s'utilitzen del driver i les imatges que es mostren a continuació s'han extret de (Lenze, Lenze Inverter Driver 8400 TopLine, 2018).

Aleshores, com es pot veure a la Il·lustració 172 - Connectros Driver TopLine C 8400 es disposa de tots els connectors, interfícies i mòduls que es poden utilitzar. En aquest cas, s'utilitzarà la part de potència sent aquesta la part superior on arriba la línia de 220V AC connectada al connector X100 de dos entrades. Suposant que ja es disposen d'una línia trifàsica es connectaria aquesta en l'altre connector X100. Llavors per la part inferior del driver es disposa del connector X105 de 5 encaixos on 3 dels quals són per alimentar el motor trifàsic sent aquests 3 cables les 3 línies de tensió corresponents (U, V i W), vegeu Il·lustració 179 - Esquema connector X105. Els dos connectors que queden en aquesta regleta són per connectar la resistència dissipadors de potència per la frenada.

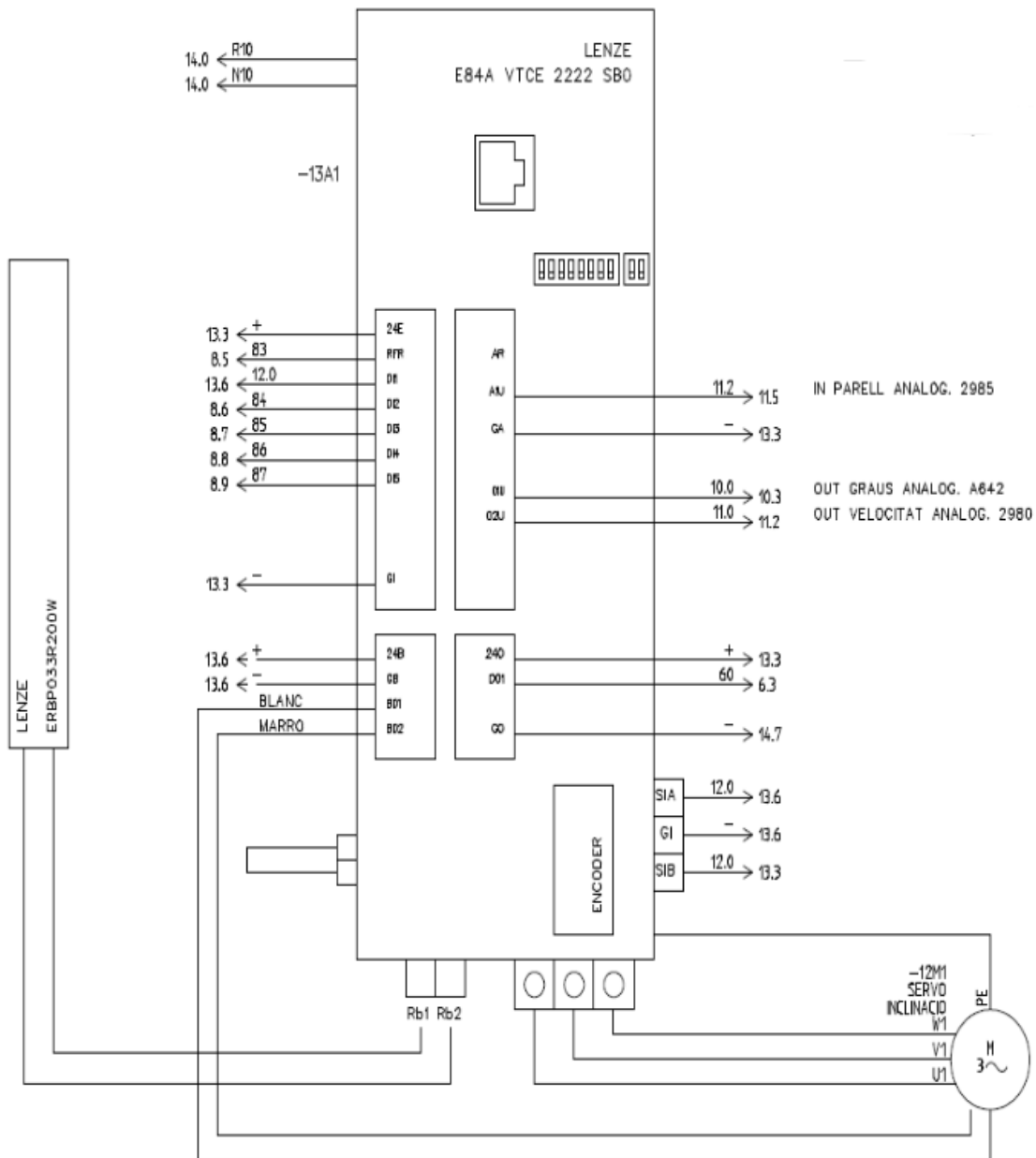
Per la part del motor, només falta el terminal de connectors per establir el freno, aleshores, aquests cables es connecten al terminal X107. Per saber on es connecta cada cable, vegeu Il·lustració 173 - Esquema Connexionat Driver TopLine C 8400 i Il·lustració 178 - Esquema connector X107. Un cop definides totes les parts de potència i les parts del motor, es procedeix en determinar els connectors de control.

Començant per la part digital, corresponent als Inputs, aquesta correspon al terminal X5 on l'esquema de cada connector es mostra a la Il·lustració 174 - Esquema connectors X5, la Il·lustració 173 - Esquema Connexionat Driver TopLine C 8400 i la Il·lustració 172 - Connectros Driver TopLine C 8400.

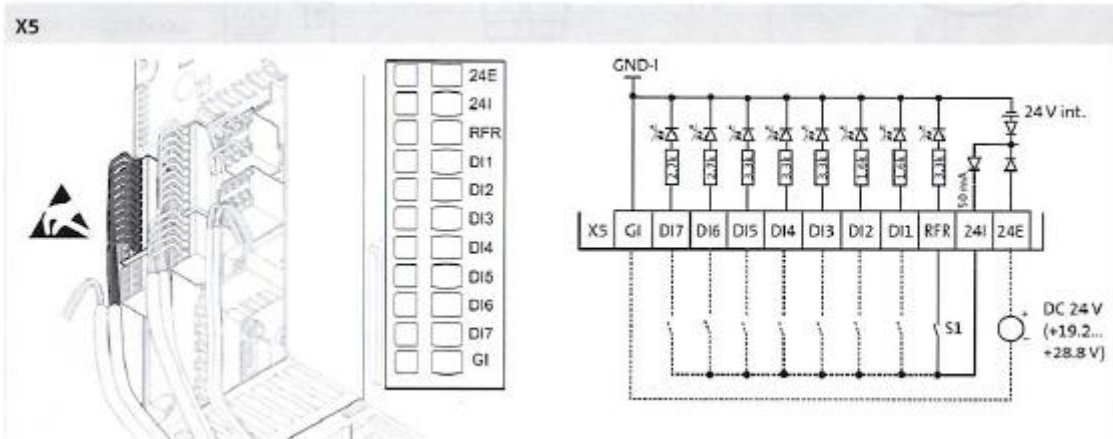
Respecte a la part dels connectors digitals Output, són en el connector X4 i es poden veure en la Il·lustració 175 - Esquema connectors X4 - Digital Output, la Il·lustració 173 - Esquema Connexionat Driver TopLine C 8400i la Il·lustració 172 - Connectros Driver TopLine C 8400.

Per la part analògica, tant inputs com outputs, aquests es troben en el connector X3 i es poden veure en la Il·lustració 176 - Esquema connectors X3 - Il·lustració 175 - Esquema connectors X4 - Digital Output, la Il·lustració 173 - Esquema Connexionat Driver TopLine C 8400 i la Il·lustració 172 - Connectros Driver TopLine C 8400.

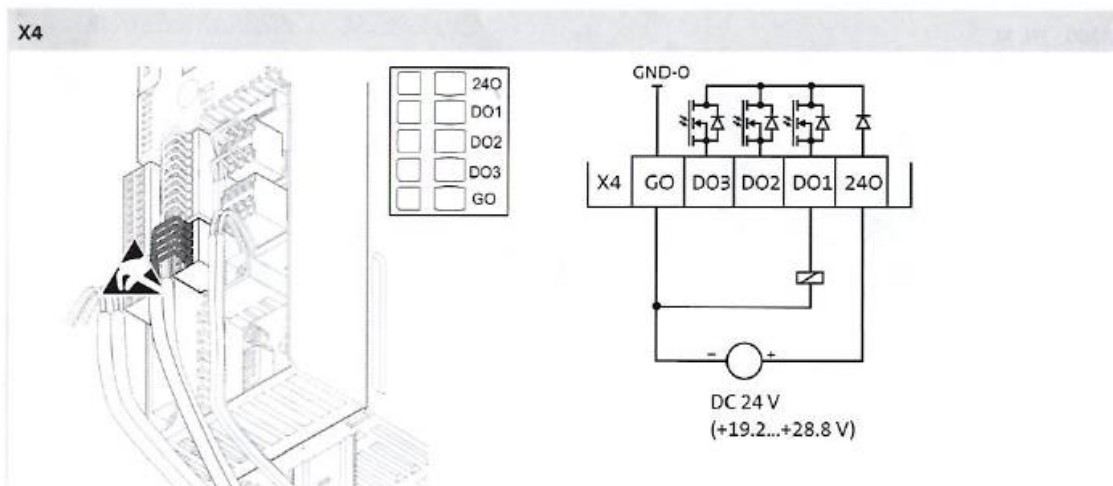
Finalment en el terminal X7 es connecta el cable especial que prové de l'encoder i el terminal X106 és un control de temperatura del motor, mostrats a Il·lustració 177 - Esquema connector X7 - Encoder i Il·lustració 180 - Esquema connector X106.



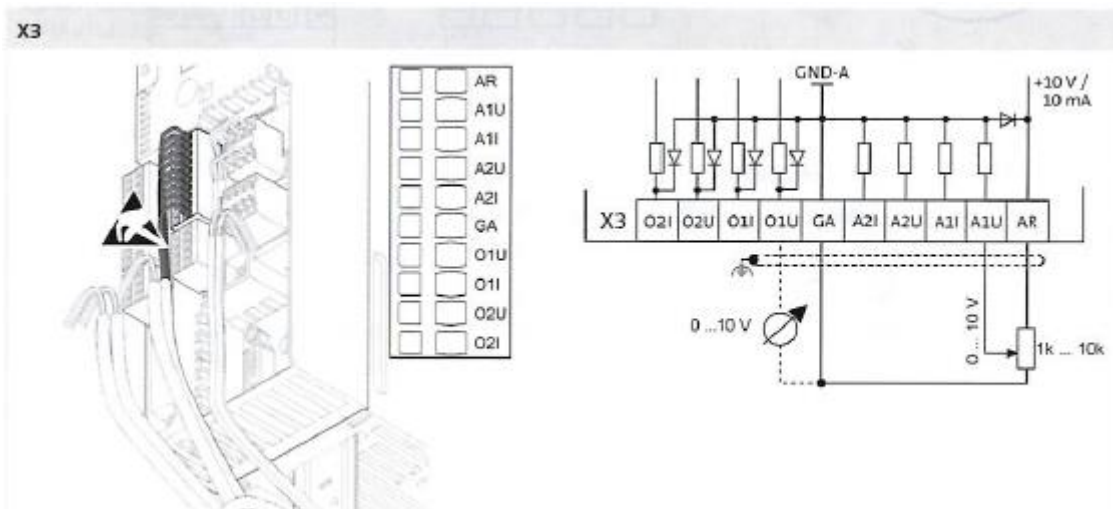
Il·lustració 173 - Esquema Connexionat Driver TopLine C 8400



Il·lustració 174 - Esquema connectors X5 – Digital Input

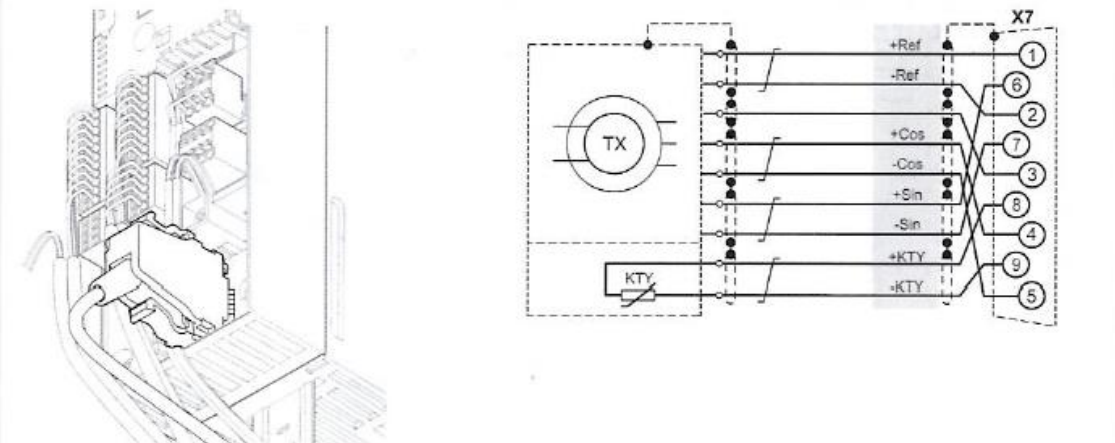


Il·lustració 175 - Esquema connectors X4 - Digital Output



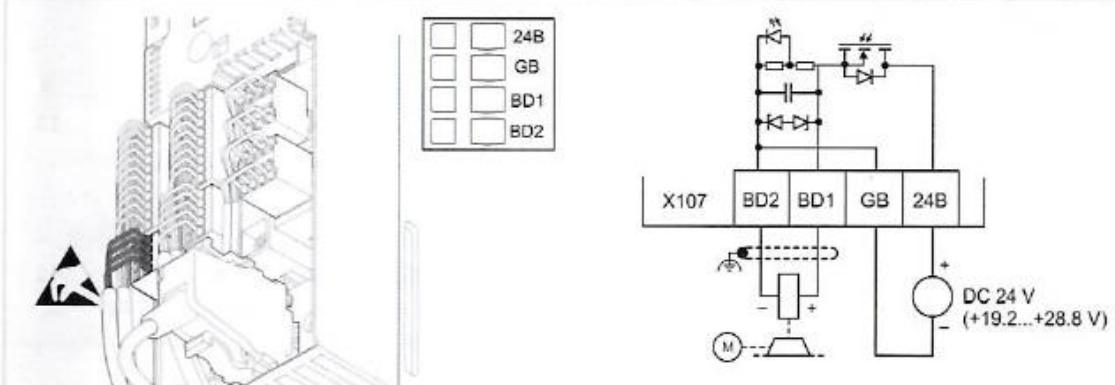
Il·lustració 176 - Esquema connectors X3 - Analògic

X7



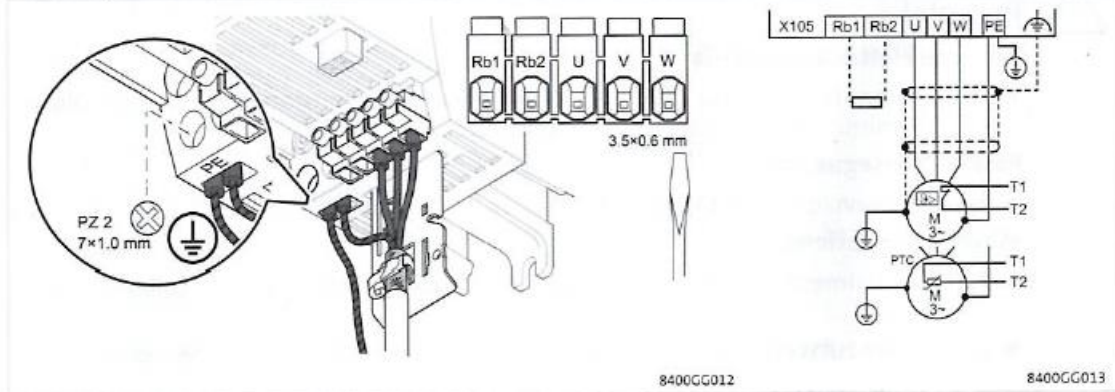
Il·lustració 177 - Esquema connector X7 - Encoder

X107

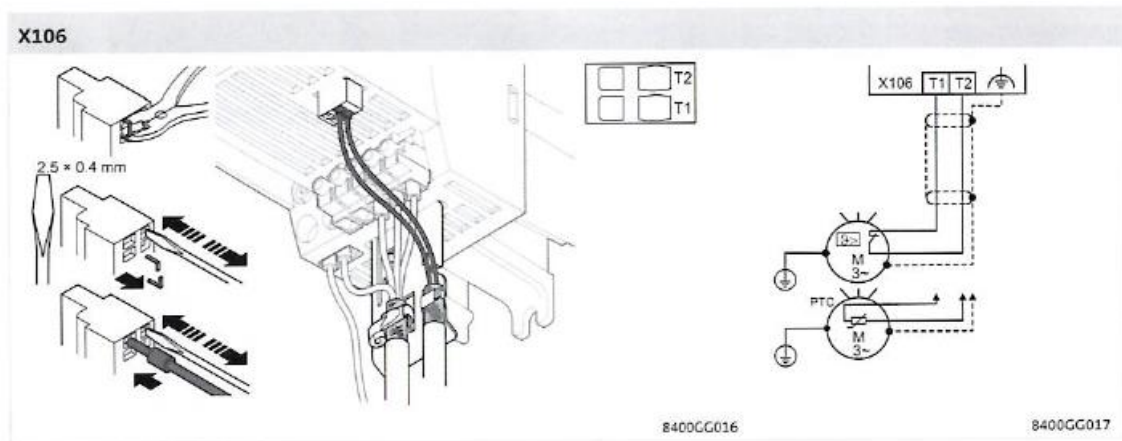


Il·lustració 178 - Esquema connector X107

X105 - TN, TT



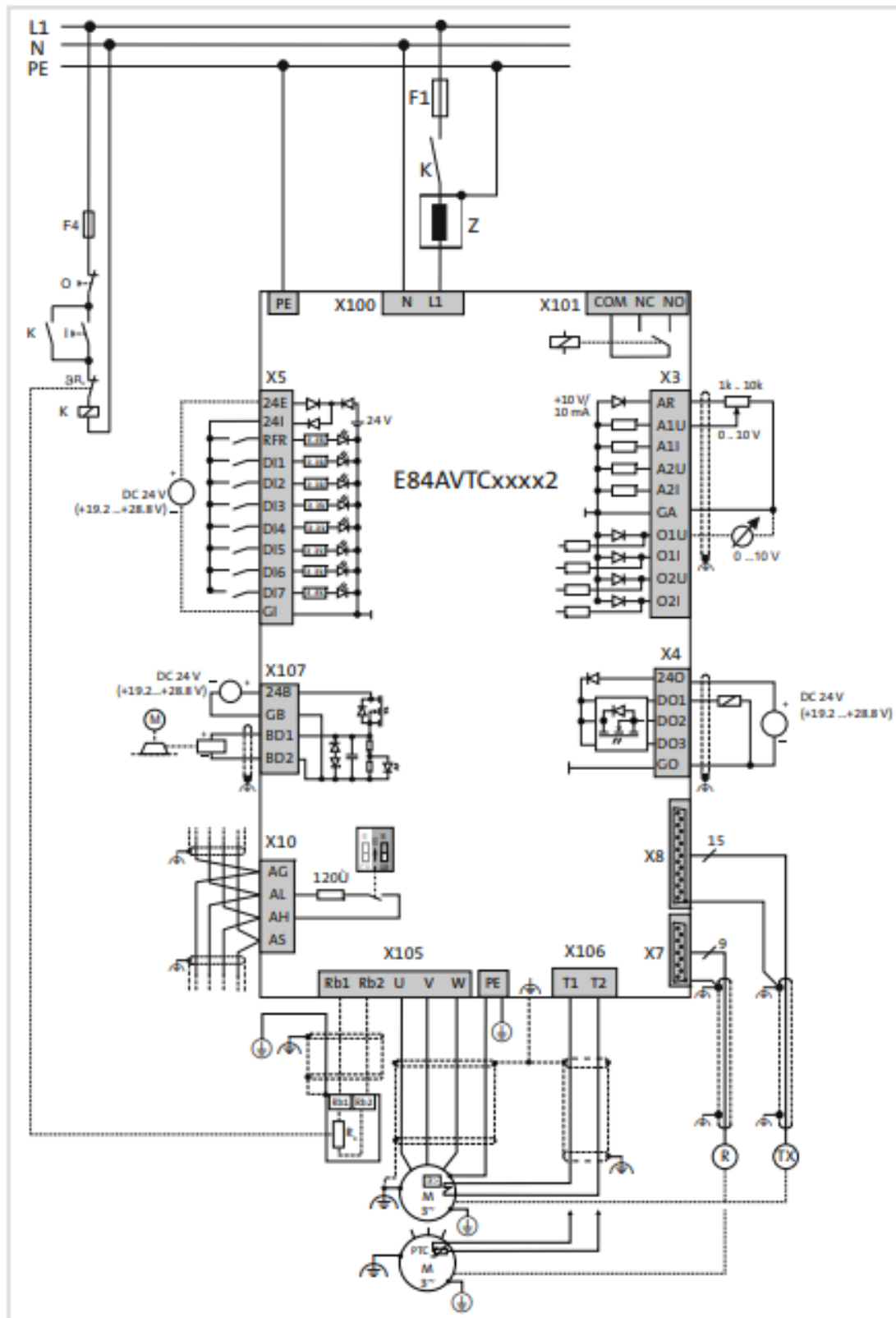
Il·lustració 179 - Esquema connector X105



Il·lustració 180 - Esquema connector X106

Connection		Number
Pos.	Description	TopLine C
X1	System bus (CANopen)	1
S1	System bus settings (CANopen)	1
X3	Analog inputs (voltage/current)	2/2
	Analog outputs (voltage/current)	2/2
X4	10 V reference voltage	1
	Digital outputs	3
X5	24 V voltage output	1
	Digital inputs	7
	Controller enable	1
	24 V supply of the control electronics	1
X6	24 V internal supply	1
	Diagnostics	1
X7	Resolver (D-Sub 9-pole)	1
X8	Multi encoder (D-Sub 15-pole)	1
X10	Axis bus	1
	- Sync/State - CAN	
X107	Motor holding brake	1

Il·lustració 181 - Dades tècniques dels connectors

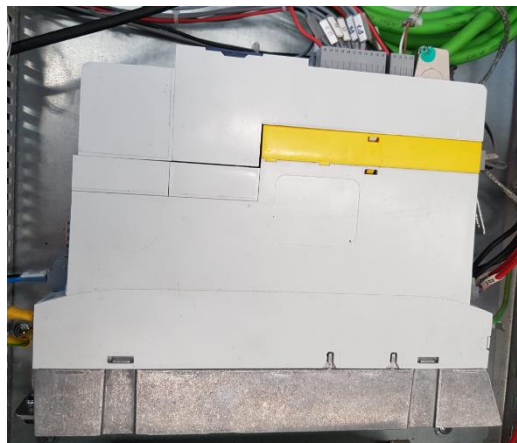


Il·lustració 182 - Esquema connexions Lenze Driver TopLine C 8400

Un cop vistes les connexions que s'han realitzat per a controlar el driver es mostra aquest integrat en el sistema del simulador i cal afegir que totes aquestes connexions que actualment funcionen amb la unitat de control basada en el PLC, també funcionen de la mateixa manera pel nou sistema de control basat en microprocessadors.



Il·lustració 183 - Driver inductor TopLine C 8400 de la marca Lenze



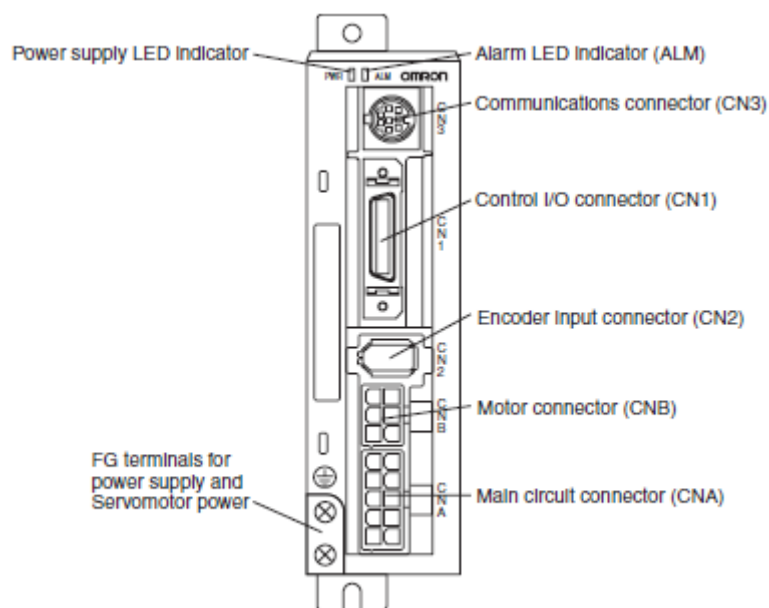
Il·lustració 184 - Driver inductor TopLine C 8400 de la marca Lenze

Un cop vist el driver més important d'aquest sistema de control, es procedeix en comentar algunes de les característiques més importants del driver que controla el motor vertical. En aquest cas, el driver utilitzat és el model R7D-BP04H. El qual es mostra en la següent il·lustració:

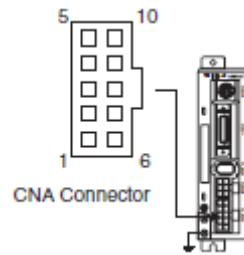


Il·lustració 185 – Driver model R7D-BP04H

En la il·lustració que es mostra a continuació s'hi representa cada entrada del driver amb la seva funció. Com es pot veure, es disposa d'un terminal (CN3) per connectar-se amb ordinadors per així poder programar algunes de les funcions d'aquests driver. A més, també es disposa d'un connector anomenat CN1 a través del qual s'establirà la comunicació amb el driver per a poder-lo accionar. Conseqüentment, aquest també disposa d'un connector al motor, per alimentar-lo (CNB) i en retorna un connector de l'encoder per saber la seva posició. Per últim, el connector (CNA) serveix per alimentar aquest driver i es pot fer a través de tensió trifàsica o monofàsica com en aquest cas on es connecten els pins 10 i 6 segons la Il·lustració 187 - Connector CNA.

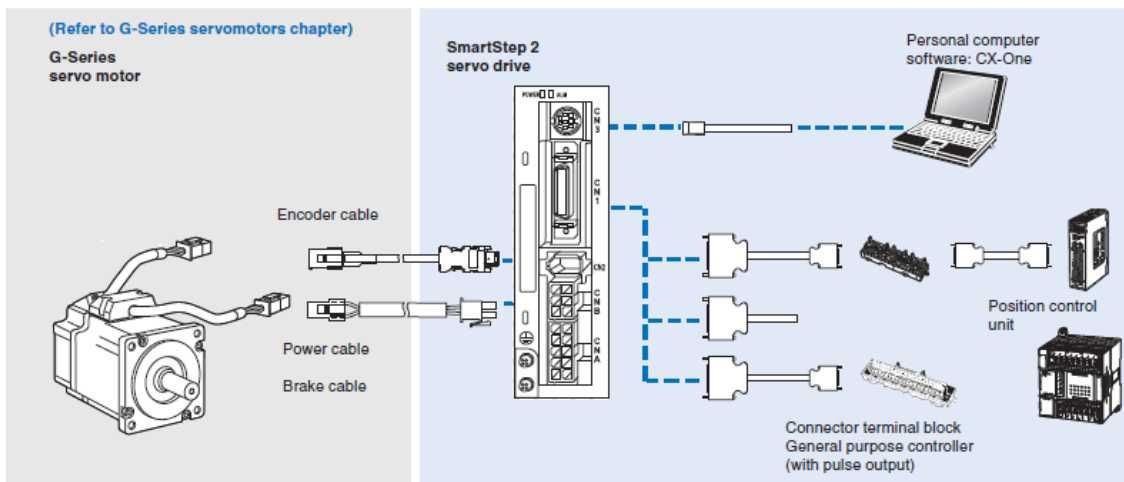


Il·lustració 186 - Parts del Driver



Il·lustració 187 - Connector CNA

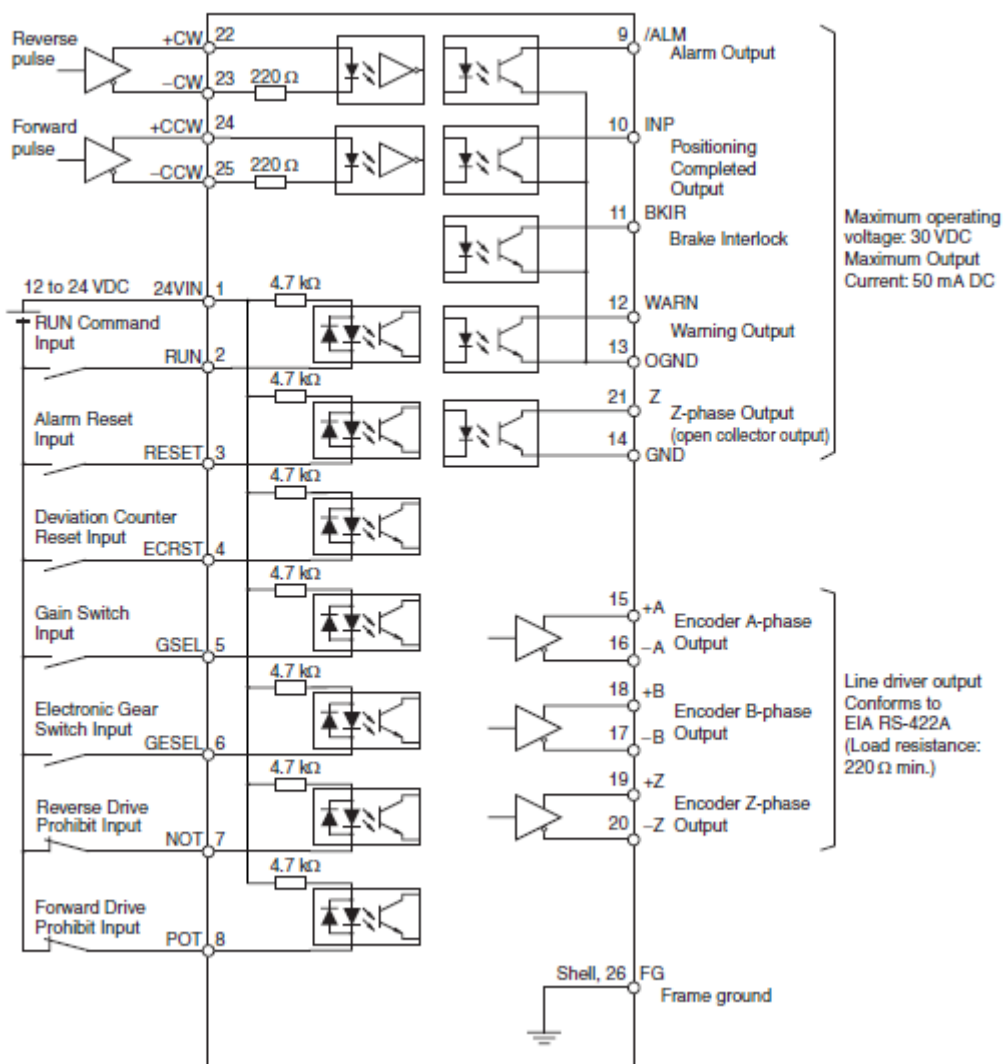
En la il·lustració que es mostra a continuació es detalla els tipus de cable a utilitzar per a realitzar la connexió així com un esquema de com es connecta cada element al driver.



Il·lustració 188 - Esquema de connexió

Per altra banda, respecte a les connexions del connector CN1 corresponents a la part de control, es disposa de dos pins a través dels quals se'ls hi ha d'enviar una senyal de polsos per accionar el motor, i en funció de la freqüència a la que se l'hi enviï aquest reaccionarà més ràpidament o menys. Concretament de la Il·lustració 189 - Esquema connector CN1 es pot veure els diferents pins amb les funcions atorgades. En aquest cas s'utilitza el pin 22 i el 24 per enviar les senyals de polsos per accionar el motor, un corresponent a un sentit i l'altre cap a l'altre. Els pins 1, 13, 25 i 23 es connecten al terra. La resta de pins s'utilitzen pel control d'aquest servomotor

■ Control I/O Signal Connections and External Signal Processing



Il·lustració 189 - Esquema connector CN1

Conseqüentment, es mostra una taula amb les funcions de cada pin, una corresponent als Inputs i l'altre als Outputs del connector CN1:

Projecte d'Actualització en el Disseny del Simulador de Moto GP de l'Empresa CKU Sport Fitness per a la Verificació Estructural dels Elements i la Millora del Sistema de Control

Pin No.	Signal name	Name	Function/Interface
1	+24VIN	DC power supply Input for control	Power supply Input terminal (12 to 24 VDC) for sequence Input (pin 1).
2	RUN	RUN Command Input	ON: Servo ON (Starts power to Servomotor.)
3	RESET	Alarm Reset Input	ON: Servo alarm status is reset. ^{**1} Must be ON for 120 ms min.
4	ECRST/ VSEL2	Deviation Counter Reset Input or Internally Set Speed Selection 2 Input	Deviation Counter Reset Input in Position Control Mode (when Pn02 is set to 0 or 2). ON: Pulse commands prohibited and deviation counter cleared. Must be ON for at least 2 ms. Internally set speed selection 2 in Internal Speed Control Mode (when Pn02 is set to 1). ON: Internally Set Speed Selection 2 Input.
5	GSEL/ VZERO/ TLSEL	Gain Switch Input, Zero Speed Designation Input, or Torque Limit Switch Input	Gain Switch Input in Position Control Mode (when Pn02 is set to 0 or 2) when Zero Speed Designation/Torque Limit Switch (Pn06) is set to 0 or 1. Zero speed designation Input in Internal Speed Control Mode (when Pn02 is set to 1). OFF: Speed command is zero. Input can also be disabled by the Zero Speed Designation/Torque Limit Switch (Pn06) setting: Enabled: Pn06 = 1, Disabled: Pn06 = 0 Torque limit selection in both Position Control Mode and Internal Speed Control Mode when Zero Speed Designation/Torque Limit Switch (Pn06) is set to 2. OFF: Torque limit 1 enabled. (Pn70, 5E, 63) ON: Torque limit 2 enabled. (Pn71, 72, 73)
6	GESEL/ VSEL1	Electronic Gear Switch Input or Internally Set Speed Selection 1 Input	Electronic Gear Switch Input in Position Control Mode (when Pn02 is set to 0 or 2). ^{**2} OFF: Electronic Gear Ratio Numerator 1 (Pn46) ON: Electronic Gear Ratio Numerator 2 (Pn47) Internally set speed selection 1 in Internal Speed Control Mode (when Pn02 is set to 1). ON: Internally set speed selection 1 is Input.
7	NOT	Reverse Drive Prohibit Input	Reverse rotation overtravel input. OFF: Prohibited, ON: Permitted
8	POT	Forward Drive Prohibit Input	Forward rotation overtravel input. OFF: Prohibited, ON: Permitted

Pin No.	Signal name	Name	Function/Interface
22	+CW/ PULS/FA	Reverse Pulses Input, Feed Pulses Input, or 90° Phase Difference Pulses (Phase A)	Input terminals for position command pulses.
23	-CW/ PULS/FA	Reverse Pulses Input, Feed Pulses Input, or 90° Phase Difference Pulses (Phase A)	Line-driver Input: Maximum response frequency: 500 kpps Open-collector input: Maximum response frequency: 200 kpps
24	+CCW/ SIGN/FB	Forward Pulses, Direction Signal, or 90° Phase Difference Pulses (Phase B)	Any of the following can be selected by using the Pn42 setting: forward and reverse pulses (CW/CCW); feed pulse and direction signal (PULS/SIGN); 90° phase difference (phase A/B) signals (FA/FB).
25	-CCW/ SIGN/FB	Forward Pulses, Direction Signal, or 90° Phase Difference Pulses (Phase B)	

Taula 8 - Inputs connector CN1

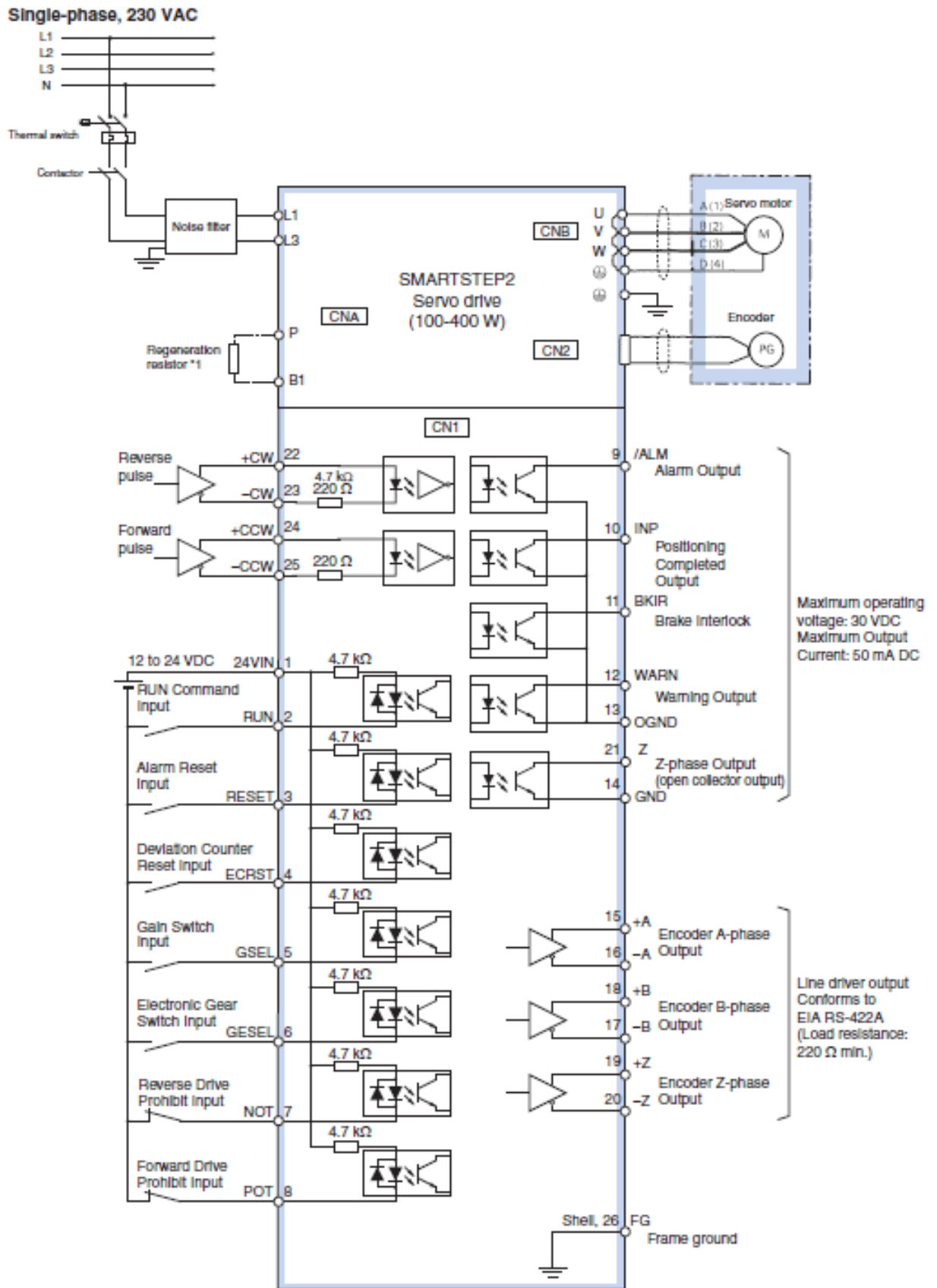
Pin No.	Signal name	Name	Function/Interface
9	/ALM	Alarm Output	When the Servo Drive generates an alarm, the output turns OFF. ¹
10	INP/TGON	Positioning Completed Output or Servomotor Rotation Speed Detection Output	Positioning completed output in Position Control Mode (when Pn02 is set to 0 or 2). ON: The residual pulses for the deviation counter are within the setting for Positioning Completion Range (Pn60).
		Motor rotation detection output in Internal Speed Control Mode (when Pn02 is set to 1). ON: The number of Servomotor rotations exceeds the value set for Servomotor Rotation Detection Speed (Pn62).	
11	BKIR	Brake Interlock Output	Outputs the holding brake timing signals. Release the holding brake when this signal is ON.
12	WARN	Warning Output	The signal selected in the Warning Output Selection (Pn09) is output.
13	OGND	Output Ground Common	Ground common for sequence outputs (pins 9, 10, 11, and 12).
14	GND	Ground Common	Common for Encoder output and phase-Z output (pin 21).
15	+A	Encoder Phase-A Output	These signals output encoder pulses according to the Encoder Dividing Ratio Setting (Pn44).
16	-A		
17	-B	Encoder Phase-B Output	This is the line-driver output (equivalent to RS-422).
18	+B		
19	+Z	Encoder Phase-Z Output	
20	-Z		
21	Z	Phase-Z Output	Outputs the phase Z for the Encoder (1 pulse/rotation). This is the open-collector output.

Taula 9 - Outputs connector CN1

Per últim en les següents il·lustracions es mostra el driver implementat i un esquema general de tots els connectors d'aquest.



Il·lustració 190 - Driver implementat en el sistema

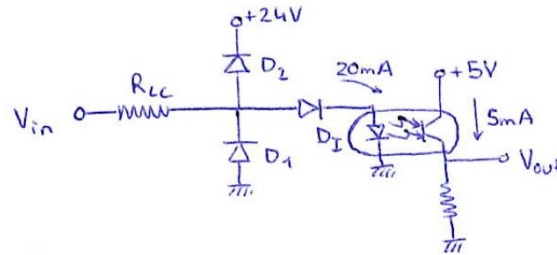


Il·lustració 191 - Esquema connectors driver.

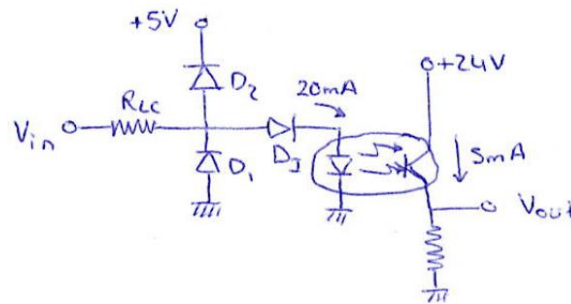
Annex A.4 - Circuits Electrònics

En aquesta secció del TFG es mostra el procediment de disseny, dimensionament i el procés de fabricació de les plaques realitzades per adaptar les tensions dels sistemes externes al microprocessador a fi de poder controlar tot el simulador.

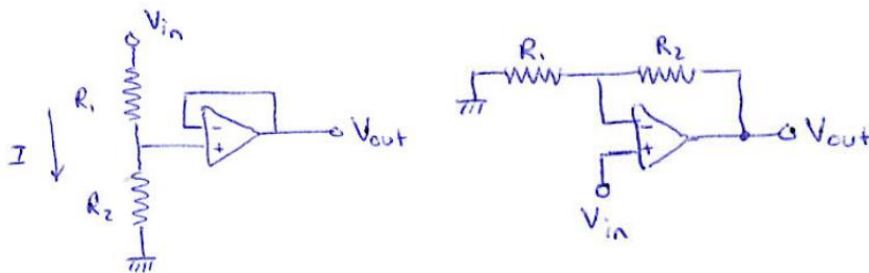
Com s'ha comentat en el cos de la memòria es disposa de 4 tipologies de circuit els quals són els esquemes que es mostren a continuació:



Il·lustració 192 - Esquema circuit digital reductor de tensió de 24V a 5V



Il·lustració 193 - Esquema circuit digital amplificador de 5V a 24V



Il·lustració 194 - Circuits Analògics. Esquerra: Divisor de tensió. Dreta: Amplificador no inversor de tensió

Com es pot veure en el cas digital es disposa de díodes (D1 i D2) connectats un cap a la font de tensió i l'altre cap al terra, la utilitat d'aquests díodes és per assegurar que no hi ha tensions més grans que la d'alimentació n'hi tensions inferiors a la del terra. En cas d'haver-hi tensions fora d'aquests rangs, la corrent serà conduïda pels díodes, preservant així la integritat del sistema.

Aquests circuits s'han dissenyat en funció de les necessitats del microprocessador per adaptar les seves tensions d'entrada i sortida. Per la part digital s'ha optat per utilitzar optoacobladors per tal

d'aïllar la part de 24V de la part de 5V del microprocessador. Per altra banda, per amplificar la tensió s'ha utilitzat amplificadors operacionals per a dur a terme aquesta tasca i amplificar de 0V-5V a 0V-10V. Aleshores, per determinar el dimensionament de cada resistència mostrades anteriorment es mostraran els càlculs necessaris a continuació.

A4.1 Dimensionament Circuit Analògic que converteix de 10V-0V a 5V-0V:

Per tal de dissenyar aquest divisor de tensió, vegeu Il·lustració 194 - Circuits Analògics. Esquerra: Divisor de tensió. Dreta: Amplificador no inversor de tensió, on s'ha optat per fer passar una intensitat de 5mA a través de les resistències i agafar la tensió del divisor seguida d'un seguidor de tensió utilitzant un amplificador operacional, d'aquesta manera s'assegura de preservar les impedàncies del circuit d'entrada i del circuit que vingui a continuació, d'aquesta manera s'assegura mantenir constant el guany reductor del sistema.

Primerament se suposa que el valor de la resistència R_2 és: $R_2 = 1k\Omega$ d'aquesta manera el valor de R_1 ve determinat per la següent expressió:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_2 + R_1} \cdot V_{in} \quad [30]$$

Així que substituint valors s'ha obtingut:

$$5 = \frac{1k}{1k + R_1} \cdot 10$$
$$R_1 = \frac{1 \times 10^3 \cdot 10}{5} - 1 \times 10^3 = 1k\Omega$$

Un cop obtingut el valor de R_1 es procedeix en la verificació de la intensitat.

$$I = \frac{V_{in} - V_{out}}{R_1} = \frac{10 - 5}{1k} = 5mA$$

Llavors alhora de fabricar els circuits s'ha de dimensionar les resistències, on no n'hi ha prou en calcular el valor d'aquestes sinó també quina potència han de consumir. Llavors per calcular la potència que aquestes consumeixen, s'aplica el següent càlcul:

$$P_{R_1} = V \cdot I = (10 - 5) \cdot 5 \times 10^{-3} = 0,025W$$

$$P_{R_2} = 5 \cdot 5 \times 10^{-3} = 0,025W$$

Com es pot veure la potència consumida per les dos resistències és de 0.025W cada una, per tant, es pot implementar en el circuit resistències de 0.25W, les és més habituals en el mercat.

A4.2 Dimensionament Circuit Analògic que converteix de 5V-0V a 10V-0V:

Per tal de dissenyar aquest amplificador no inversor, vegeu la Il·lustració 194 - Circuits Analògics. Esquerra: Divisor de tensió. Dreta: Amplificador no inversor de tensió, el qual ve regit per l'expressió següent:

$$V_{out} = V_{in} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad [31]$$

Aleshores, suposant que $R_1 = 1k\Omega$:

$$\left(\frac{V_{out}}{V_{in}} - 1 \right) \cdot R_1 = R_2$$
$$R_2 = \left(\frac{10}{5} - 1 \right) \cdot 1x10^3$$

On $R_2 = 1k\Omega$

En aquest cas també s'utilitza resistències de 0.25W molt habituals en el mercat.

A4.3 Dimensionament Circuit Digital que converteix de 24V a 5V:

Respecte el circuit de la Il·lustració 192 - Esquema circuit digital reductor de tensió de 24V a 5V s'ha dimensionat les dues parts per separat; la de l'esquerra corresponent a la tensió d'entrada i la de la dreta, corresponent a la tensió de sortida. En aquest cas, la intensitat ve limitada pel fabricant, on s'utilitza una intensitat "tipus" assegurant així que en cas d'haver-hi moment en que la intensitat és superior, el dispositiu no es vegi afectat. Aleshores, aquesta intensitat de l'optocobrador és de:

$$I_f = 20mA$$

Llavors s'ha de procedir en calcular la resistència que limita aquesta intensitat, sent aquesta R_{LC} , si es considera que la tensió que cau en l'optocobrador és de $V_{opto} = 1,4V$, dada obtinguda del fabricant, llavors:

$$R_{LC} = \frac{V_{in} - V_{DI} - V_{opto}}{20x10^{-3}}$$
$$R_{LC} = \frac{24 - 1 - 1,4}{20x10^{-3}} \cong 1,2k\Omega$$

De la mateixa manera que en els cassos anteriors, es procedeix en calcular la potència que consumeix cada resistència, sent aquesta de:

$$P = V \cdot I = I^2 \cdot R$$

$$P_{RLC} = 1,1x10^3 \cdot (20x10^{-3}) = 0,44W$$

Respecte a la part de sortida del circuit, es considera que la intensitat que hi circula és de $I = 5x10^{-3}A$. Aleshores, la resistència que condiciona aquesta intensitat ve determinada per:

$$R_2 = \frac{5}{5x10^{-3}} = 1k\Omega$$

Llavors, calculant la potència que dissipa aquesta resistència:

$$P_2 = 1x10^3 \cdot (5x10^{-3})^2 = 0,025W$$

Com es pot veure, en la primera resistència s'utilitzarà una resistència de 0.5W i en el segon cas, una resistència de 0.25W.

A4.4 Dimensionament Circuit Digital que converteix de 5V a 24V:

Respecte al circuit que amplifica la tensió digital, vegeu Il·lustració 193 - Esquema circuit digital amplificador de 5V a 24V, també es realitza a través d'optoacobladors, cosa que el circuit és el mateix i el que canvia és el valor de les resistències.

Aleshores, sabent que la intensitat que passa pel optoacoblador és de 20mA es torna a dimensionar la resistència R_{LC} sent aquesta:

$$R_{LC} = \frac{V_{in} - V_{DI} - V_{opto}}{20x10^{-3}} = \frac{5 - 1 - 1,4}{20x10^{-3}} = 130\Omega$$

On en valor comercial s'utilitzarà resistències de 150Ω. Llavors respecte a la potència que dissipa aquesta resistència és de:

$$P_{RLC} = 130 \cdot (20x10^{-3})^2 = 0,052W$$

On també s'utilitzarà una resistència de 0.25W.

Respecte a la sortida del sistema, també es considera que hi circula una intensitat de 5mA i la resistència R_2 s'ha dimensiona de la manera següent:

$$R_2 = \frac{10}{5x10^{-3}} = 2k\Omega$$

Aleshores, la potència que dissipa aquesta resistència és de:

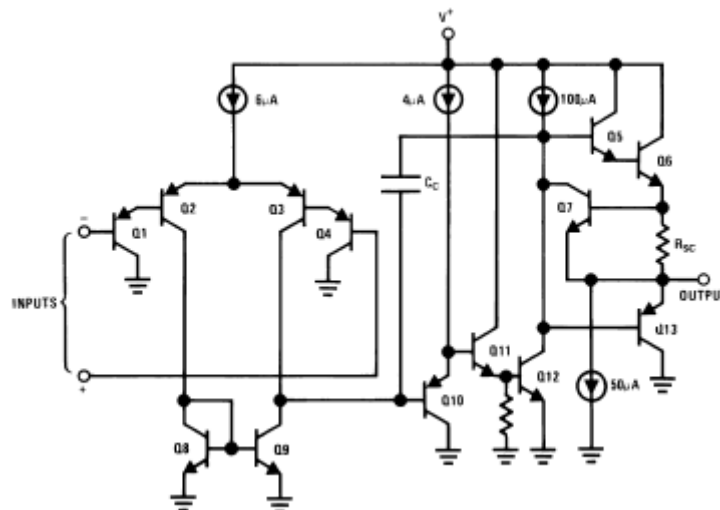
$$P_2 = 2k \cdot (5x10^{-3})^2 = 0,05W$$

A4.5 Definició dels Components Utilitzats:

A part dels càlculs realitzats, cal seleccionar els components necessaris perquè compleixin amb els requisits estàndards, o en cas contrari com s'ha realitzat en algun cas, provinent de les característiques de treball nominal dels components es dimensiona tot el circuit. Aleshores, a continuació es mostraran algunes de les característiques dels components que s'han tingut en compte en aquesta secció.

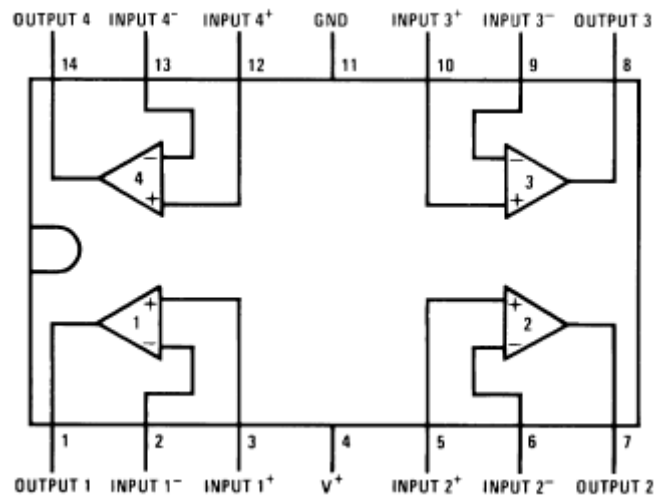
Respecte a l'amplificador operacional seleccionat, aquest correspon al model LM324N de *Texas Instruments*® on és un amplificador operacional capaç d'amplificar un màxim diferencial de 32V, aleshores, connectant al terra un dels seus pins i l'altre a l'alimentació (V_{CC}) a 24V, aquest proporciona una amplificació adequada i ajustada amb uns errors molt baixos. Ja que es treballa en tensions analògiques de 10V. Aleshores, paràmetres que s'han tingut en compte alhora de dimensionar el circuit, provinents aquests del datasheet corresponent, serien les tensions d'alimentació compreses entre 3V i 32V en el cas d'estar alimentat amb una sola font de tensió. Un altre paràmetre és el poc corrent que es desvia cap a l'interior de l'operacional sent aquest de 45nA.

Per a la part de disseny dels circuits electrònics mostrats posteriorment, ha set necessari tenir en compte el tipus d'encapsulat per a la correcta ubicació dels pins en l'empremta del dispositiu. Aleshores, l'encapsulat d'aquest dispositiu és el corresponent CDIP(14). On l'esquema del que conté aquest amplificador operacional és el que es mostra a continuació:



Il·lustració 195 - Circuit de l'Amplificador Operacional LM324N

La distribució física del circuit en relació a l'encapsulat és el que es mostra a continuació:



Il·lustració 196 - Encapsulat i disposició física dels pins del dispositiu LM324N

On la descripció de cada pin ve descrita per la següent taula:

PIN		TYPE	DESCRIPTION
NAME	NO.		
OUTPUT1	1	O	Output, Channel 1
INPUT1-	2	I	Inverting Input, Channel 1
INPUT1+	3	I	Noninverting Input, Channel 1
V+	4	P	Positive Supply Voltage
INPUT2+	5	I	Nonverting Input, Channel 2
INPUT2-	6	I	Inverting Input, Channel 2
OUTPUT2	7	O	Output, Channel 2
OUTPUT3	8	O	Output, Channel 3
INPUT3-	9	I	Inverting Input, Channel 3
INPUT3+	10	I	Noninverting Input, Channel 3
GND	11	P	Ground or Negative Supply Voltage
INPUT4+	12	I	Noninverting Input, Channel 4
INPUT4-	13	I	Inverting Input, Channel 4
OUTPUT4	14	O	Output, Channel 4

Taula 10 - Descripció de la funció de cada pin del dispositiu LM324N

A més a més, altres paràmetres que s'han tingut en compte per preservar la integritat del sistema i no produir sobre tensions, ni escalfaments localitzats del dispositiu de la mateixa manera que la ruptura o provocar que aquest es curtcircuiti és respectar tots els paràmetres que proporciona el fabricant mostrats en la següent il·lustració:

Projecte d'Actualització en el Disseny del Simulador de Moto GP de l'Empresa CKU Sport Fitness per a la Verificació Estructural dels Elements i la Millora del Sistema de Control

		LM124-N/LM224-N/LM324-N LM124A/LM224A/LM324A		LM2902-N		UNIT
		MIN	MAX	MIN	MAX	
Supply Voltage, V*		32		26		V
Differential Input Voltage		32		26		V
Input Voltage		-0.3	32	-0.3	26	V
Input Current ($V_{IN} < -0.3$ V) ⁽³⁾		50		50		mA
Power Dissipation ⁽⁴⁾	PDIP	1130		1130		mW
	CDIP	1260		1260		mW
	SOIC Package	800		800		mW
Output Short-Circuit to GND (One Amplifier) ⁽⁵⁾		V* ≤ 15 V and T _A = 25°C		Continuous		Continuous
Lead Temperature (Soldering, 10 seconds)		260		260		°C
Soldering Information	Dual-In-Line Package	Soldering (10 seconds)		260		°C
	Small Outline Package	Vapor Phase (60 seconds)		215		°C
		Infrared (15 seconds)		220		°C
Storage temperature, T _{stg}		-65	150	-65	150	°C

Taula 11 - Característiques del dispositiu LM324N

On els paràmetres que cal ressaltar seria la tensió d'alimentació, la tensió diferencial d'entrada, el màxim voltatge d'entrada. I a més, per fer una estimació del consum, la potència que aquest consumeix, sent aquesta de 1.13W.

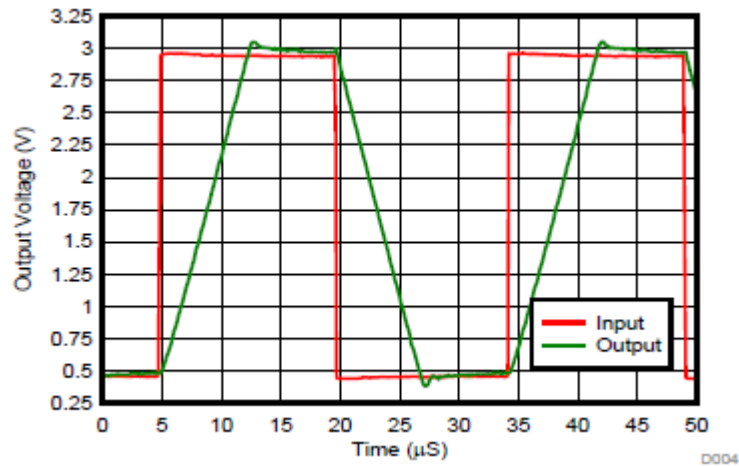
Per altra banda, més característiques tècniques que poden ser d'ajuda per al dimensionament de circuits implementant aquest amplificador són les que es mostren a continuació:

PARAMETER	TEST CONDITIONS	LM124-N / LM224-N			LM324-N			LM2902-N			UNIT
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage	T _A = 25°C ⁽²⁾		2	5		2	7		2	7	mV
Input Bias Current ⁽³⁾	I _{IN(+)} or I _{IN(-)} , V _{CM} = 0 V, T _A = 25°C		45	150		45	250		45	250	nA
Input Offset Current	I _{IN(+)} or I _{IN(-)} , V _{CM} = 0 V, T _A = 25°C		3	30		5	50		5	50	nA
Input Common-Mode Voltage Range ⁽⁴⁾	V* = 30 V, (LM2902-N, V* = 26 V), T _A = 25°C	0		V*-1.5	0		V*-1.5	0		V*-1.5	V
Supply Current	Over Full Temperature Range R _L = ∞ On All Op Amps, V* = 30 V (LM2902-N V* = 26 V)		1.5	3		1.5	3		1.5	3	mA
	V* = 5 V		0.7	1.2		0.7	1.2		0.7	1.2	
Large Signal Voltage Gain	V* = 15V, R _L ≥ 2 kΩ, (V _O = 1 V to 11 V), T _A = 25°C	50	100		25	100		25	100		V/mV
Common-Mode Rejection Ratio	DC, V _{CM} = 0 V to V* - 1.5 V, T _A = 25°C	70	85		65	85		50	70		dB
Power Supply Rejection Ratio	V* = 5 V to 30 V (LM2902-N, V* = 5 V to 26 V), T _A = 25°C	65	100		65	100		50	100		dB
Amplifier-to-Amplifier Coupling ⁽⁵⁾	f = 1 kHz to 20 kHz, T _A = 25°C (Input Referred)	-120			-120			-120			dB

Taula 12 - Característiques per la determinació de derives del dispositiu LM324N

En aquest cas no s'han aplicat càlculs d'errors d'offset ni càlculs d'errors de derivacions de tensió estudiats en l'assignatura *Instrumentació Electrònica* ja que la resolució mínima acceptada cobreix la totalitat de tots aquests errors incloent la deriva de la font de tensió i les derives temporals. De la mateixa manera no s'han realitzat càlculs de soroll ja que el soroll en aquest circuit queda inapreciable degut al poc guany que té el sistema.

Un altre paràmetre important a tenir en compte en aquests amplificadors operacionals és l'anomenat *slew rate*³³, és a dir l'enrederament en el temps entra que s'entra una senyal d'entrada fins que surt la resposta, és a dir quan tarda aquest instrument a amplificar o reduir una tensió aplicada en els pins d'entrada. Aleshores, es proporciona una gràfica que permet apreciar aquests enrederiments aproximats de 7.5 microsegons.

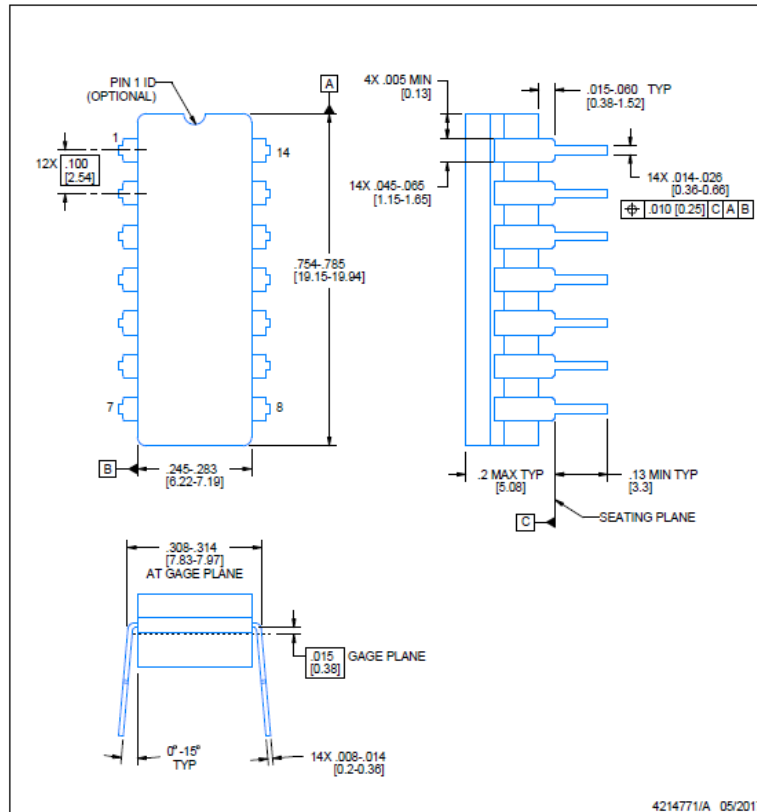


Il·lustració 197 - Senyal de sortida envers el senyal d'entrada aplicada

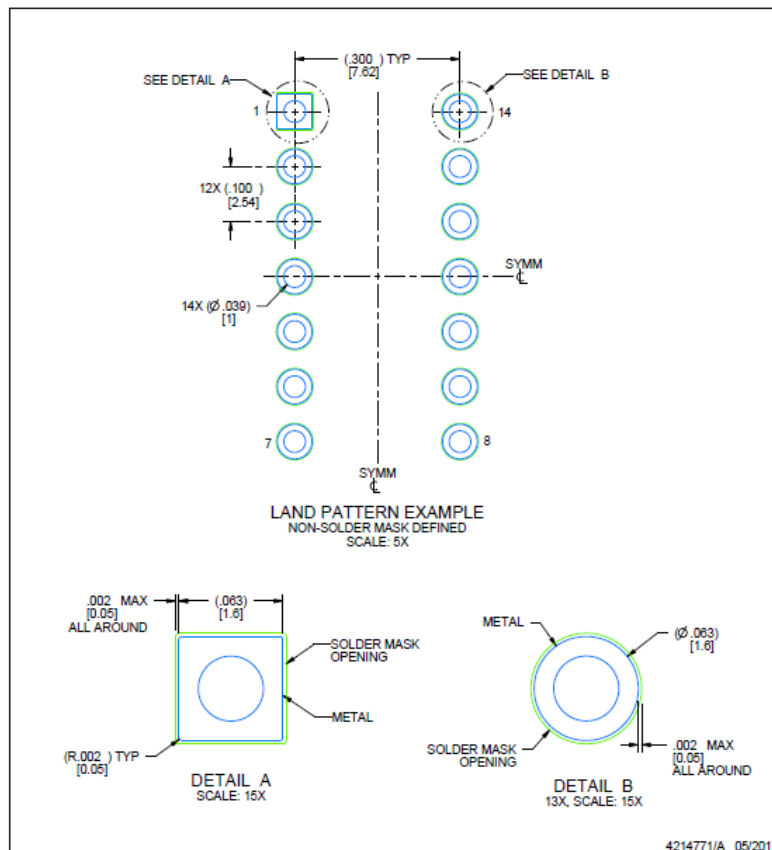
En aquesta il·lustració es pot apreciar per la sortida donada envers a l'entrada aplicada, aquest optoacoblador té un caràcter capacitiu, corresponent aquest a un valor 50pF definit pel fabricant.

En aquest cas, l'encapsulat com s'ha comentat és el corresponent CDIP(14). Aleshores, per poder realitzar el disseny del circuit en una placa PCB cal determinar les mides del component, de la mateixa manera que les mides dels pads a fabricar. Aleshores, aquest fabricant, subministra aquestes dades mostrades en les il·lustracions següents:

³³ És un efecte no lineal que es produeix en els amplificadors operacionals que representa la incapacitat d'un amplificador per seguir variacions ràpides del senyal d'entrada.



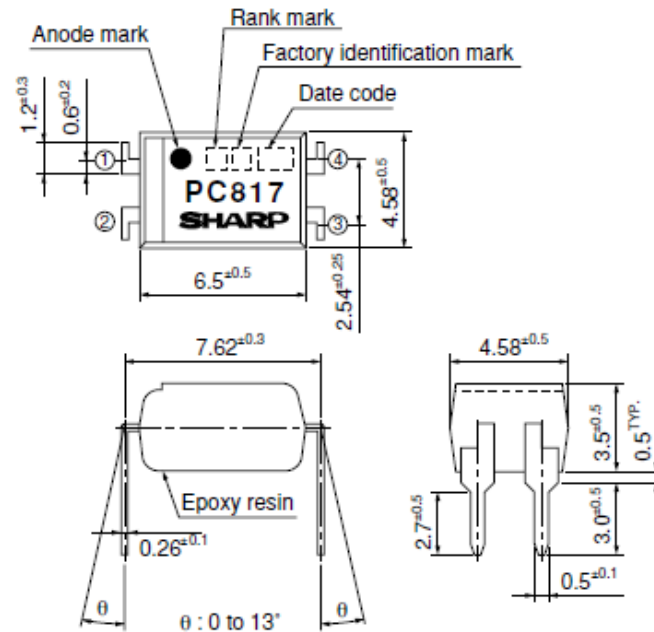
Il·lustració 198 - Mides Físiques del component utilitzat



Il·lustració 199 - Mides dels pads a realitzar

Respecte als optoacobladors utilitzats, s'ha utilitzat el model PC817 del proveïdor SHARP®. Les característiques més importants d'aquest optoacoblador és que pot suportar unes tensions entre el col·lector i l'emissor de 80V amb una intensitat màxima d'entrada de 50mA. A més, garanteix un aïllament entre la primera fase i la segona de 5kV de tensió. Per altra banda, la carcassa utilitzada en aquest projecte és la THT on es mostra a continuació:

1. Through-Hole [ex. PC817X]



Il·lustració 200 - Carcassa utilitzada per l'optoacoblador PC817

A més, les característiques importants que s'han tingut en compte per a les dos fases venen definides en la figura següent:

■ Absolute Maximum Ratings				(T _a =25°C)
Parameter	Symbol	Rating	Unit	
Input	Forward current	I _F	50	mA
	*1 Peak forward current	I _{FM}	1	A
	Reverse voltage	V _R	6	V
	Power dissipation	P	70	mW
Output	Collector-emitter voltage	V _{CEO}	*4 80	V
	Emitter-collector voltage	V _{ECO}	6	V
	Collector current	I _C	50	mA
	Collector power dissipation	P _C	150	mW
Total power dissipation	P _{tot}	200	mW	
*2 Isolation voltage	V _{iso (rms)}	5.0	kV	
Operating temperature	T _{opr}	-30 to +100	°C	
Storage temperature	T _{stg}	-55 to +125	°C	
*3 Soldering temperature	T _{sol}	260	°C	

Il·lustració 201 - Característiques màximes permeses per l'optoacoblador PC817

Aquest pot suportar corrents d'entrada de 50mA amb pics de tensió fins a 1 A. Seguidament, també pot suportar tensions negatives de fins a 6V. I a la corresponent sortida, pot suportar tensions de 80V, intensitats de fins a 50mA i com es pot veure, el consum total és de 200mW.

Aleshores, vistos els valors màxims en que aquest opto pot treballar i sent aquestes condicions superiors a les condicions de treball definides en els càlculs, es procedirà en treballar en condicions estàndards on els paràmetres necessaris implementats en el càlcul s'obtenen de la taula següent:

■ **Electro-optical Characteristics**

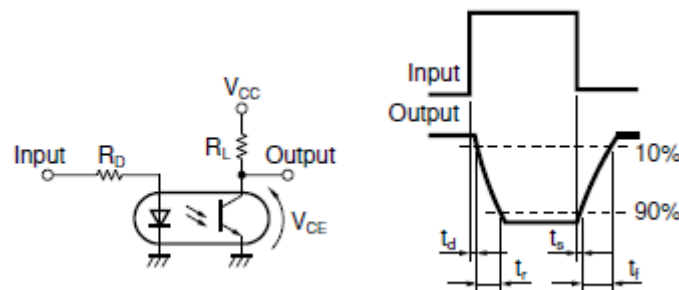
($T_a=25^\circ\text{C}$)

Parameter	Symbol	Conditions	MIN.	TYP.	MAX.	Unit	
Input	Forward voltage	$I_F=20\text{mA}$	-	1.2	1.4	V	
	Peak forward voltage	$I_{FM}=0.5\text{A}$	-	-	3.0	V	
	Reverse current	$V_R=4\text{V}$	-	-	10	μA	
	Terminal capacitance	$V=0, f=1\text{kHz}$	-	30	250	pF	
Output	Collector dark current	$V_{CE}=50\text{V}, I_F=0$	-	-	100	nA	
	Collector-emitter breakdown voltage	$I_C=0.1\text{mA}, I_F=0$	*5 80	-	-	V	
	Emitter-collector breakdown voltage	$I_E=10\mu\text{A}, I_F=0$	6	-	-	V	
Transfer characteristics	Collector current	$I_F=5\text{mA}, V_{CE}=5\text{V}$	2.5	-	30.0	mA	
	Collector-emitter saturation voltage	$I_F=20\text{mA}, I_C=1\text{mA}$	-	0.1	0.2	V	
	Isolation resistance	DC500V, 40 to 60%RH	5×10^{10}	1×10^{11}	-	Ω	
	Floating capacitance	$V=0, f=1\text{MHz}$	-	0.6	1.0	pF	
	Cut-off frequency	$V_{CE}=5\text{V}, I_C=2\text{mA}, R_L=100\Omega, -3\text{dB}$	-	80	-	kHz	
	Response time	Rise time	$V_{CE}=2\text{V}, I_C=2\text{mA}, R_L=100\Omega$	-	4	18	μs
		Fall time		-	3	18	μs

*5 From the production Date code "J5" (May 1997) to "P7" (July 2002), however the products were screened by $BV_{CEO} \geq 70\text{V}$.

Taula 13 - Característiques estàndards de treball de l'optocobrador

Com en el cas anterior dels amplificadors operacionals, en el cas dels optocobradors, cal tenir en compte el retràs de temps entre l'entrada i la sortida del senyal. Aquests endarreriments es mostren per escrit en la taula anterior i es representen gràficament en la il·lustració següent:

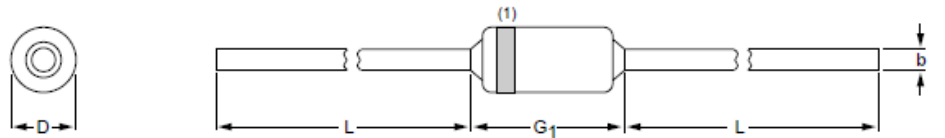


Il·lustració 202 - Connexió en Pull-Down de l'optocobrador i esquema de diferència temporal del senyal d'entrada envers el senyal de sortida

Cal ressaltar que en aquest cas la tensió de sortida treballa en Pull-Down, on en aquest projecte es fa treballar al transistor aquest com a Pull-Up, la diferència gràfica seria la inversió d'aquesta gràfica. Per altra banda, aquests temps corresponent a uns valors estàndards de 4 i 3 microsegons, suficientment petits per a no tenir-los en compte alhora de programar ja es pot treballar amb aquest fins a unes freqüències de 80kHz especificades pel fabricant.

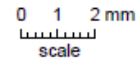
Per últim, els díodes implementats són del model 1N4148, normalment, el díode més utilitzat en l'electrònica, aquest amb la carcassa SOD27; DO-35. D'aquest díode cal ressaltar la màxima corrent que hi pot circular sent de 200mA i a més suporta una tensió inversa màxima de 75V. Per altra banda, la caiguda de tensió treballant en condicions normals és de 1V amb una circulació de corrent de 10mA. En cas de ser commutat moltes vegades successivament, aquest té una capacítancia de 4pF a una freqüència de 1MHz. A més, el temps d'activació d'aquest díode és de 4ns amb una intensitat nominal de 10mA.

Les dimensions d'aquest díode es mostren a continuació:



DIMENSIONS (mm are the original dimensions)

UNIT	b max.	D max.	G ₁ max.	L min.
mm	0.56	1.85	4.25	25.4



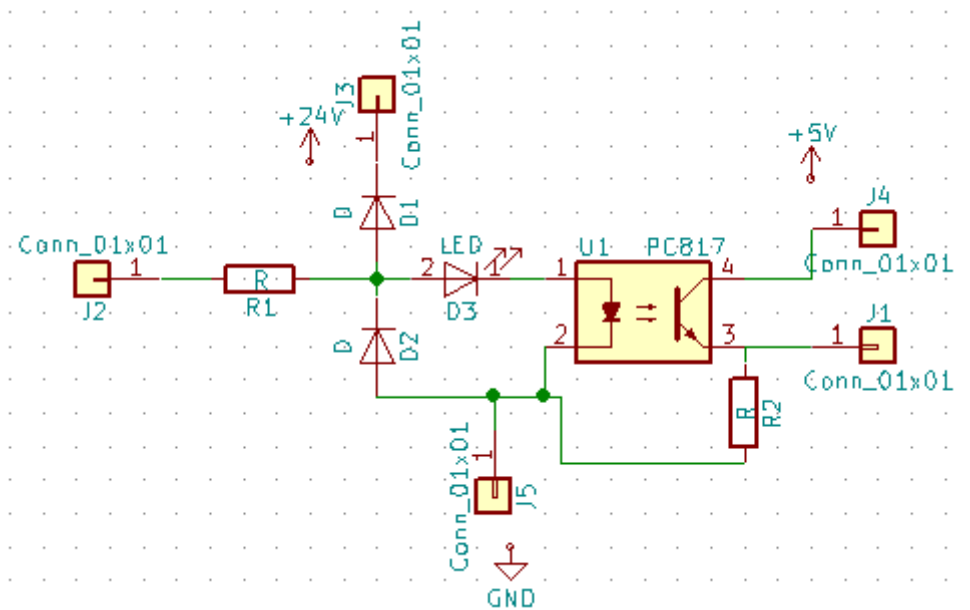
Il·lustració 203 - Dimensions del Díode 1N4148

A4.6 Disseny dels Circuits Electrònics

Llavors, un cop realitzat el càlcul i el dimensionament d'aquests circuits, es procedirà en realitzar el disseny "shcematic" amb el programa *Kicad*® on relacionarà aqueta part amb la part de disseny de la placa PCB, la qual s'utilitzarà aquest format per a processar-lo amb un altre programa i així procedir amb la fabricació. Aleshores, la part de l'esquema ha d'incloure tots els pins on es connectaran cables externs, tots els components passius i components actius, de la mateixa manera que els xips que si incorporin.

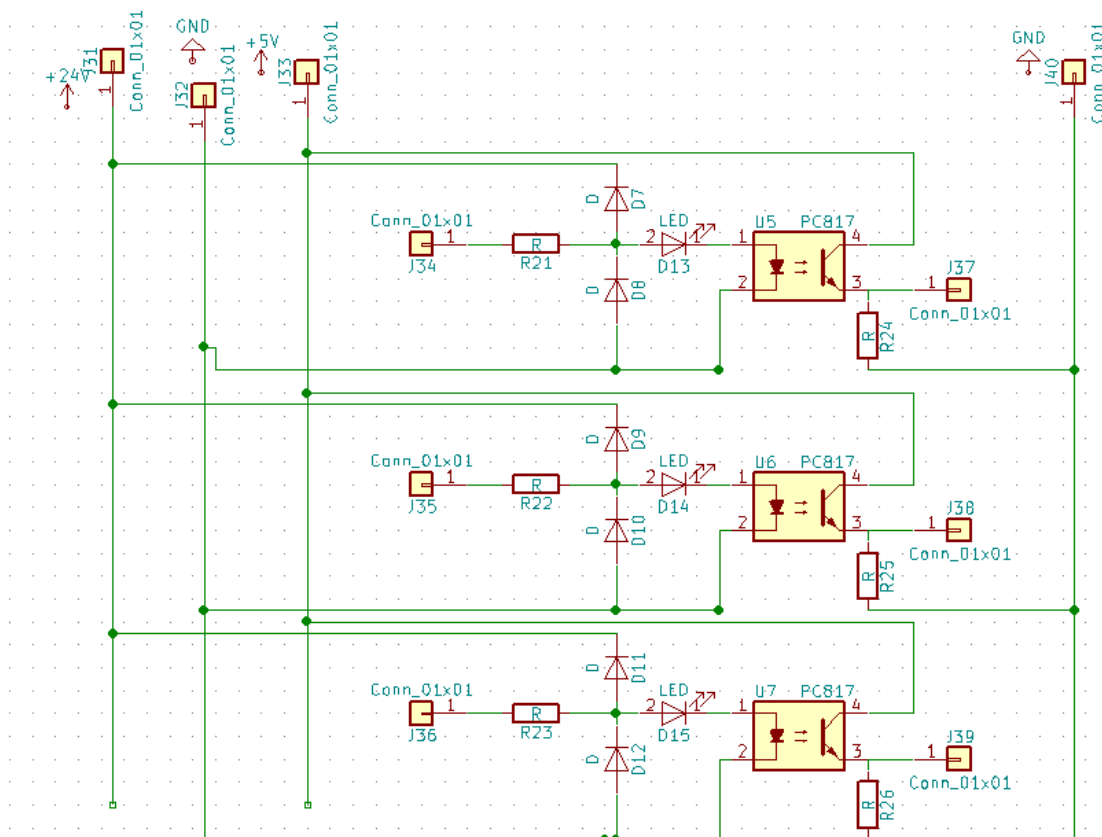
En aquest programa un cop s'ha realitzat l'esquema s'ha d'assignar una "empremta" a cada component per vincular-lo amb la part de disseny de la placa PCB. Llavors, procedint dels circuits anteriors, s'han realitzat diferents plaques PCB. De la part digital, s'ha realitzat mòduls individuals i mòduls de 3 circuits. Respecte a la part analògica s'han realitzat mòduls que inclouen dos circuits de reducció i dos circuits d'amplificació i també s'han realitzat plaques que inclouen 4 circuits reductors. A continuació es mostra l'esquema de cada placa i cal citar que en el cas digital, l'esquema és el mateix per als dos casos i el que canvia d'un circuit a l'altre és el valor de les resistències.

A continuació es mostra la esquematització d'un circuit digital realitzada amb el programa Kicad però tenint el terra en comú, llavors, el que es realitza quan s'integra en els mòduls de 3 circuits, es separen els terres.



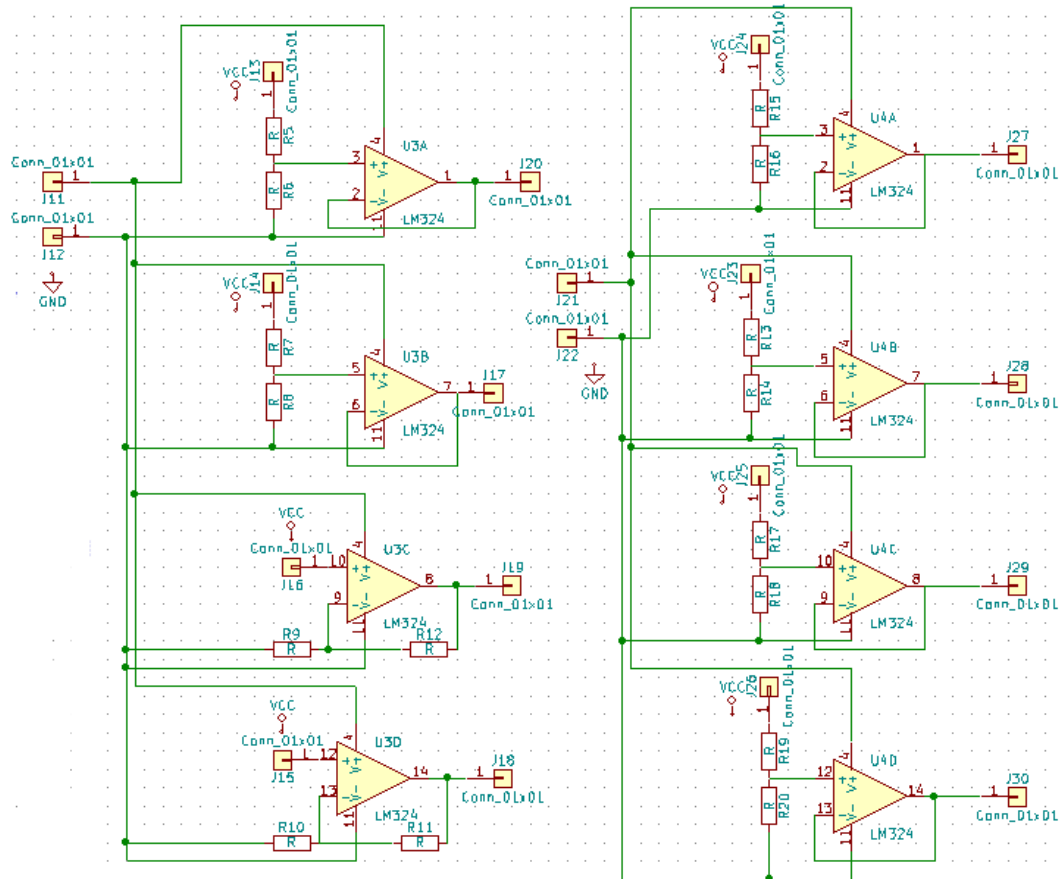
Il·lustració 204 - Circuit digital - versió un circuit

En la placa que es realitza una combinació de 3 circuits es pot expressar de la manera següent:



Il·lustració 205 - Circuit digital - versió 3 circuits integrats

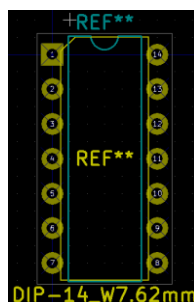
Per altra banda, els esquemes realitzats per a la part analògica són els que es mostren a continuació:



Il·lustració 206 - Circuits analògics. Esquerra: Model Reductor i amplificador. Dreta: Model Reductor

En la il·lustració mostrada anteriorment, el circuit que es mostra a la banda esquerra correspon a dos circuits divisors i dos amplificadors. Respecte al circuit que es mostra a la dreta, aquest correspon al circuit de tot divisors de tensió.

Seguidament, s'ha d'assignar una empremta a cada component, com es pot veure a continuació es mostra un exemple:



Il·lustració 207 - Empremta Amplificador operacional LM324N amb la carcassa Housings_DIP:DIP-14_W7.62mm

Llavors es realitza el mateix per a la resta de components, incloent els pins que s'han afegit. A més, aquest programa facilita la llista següent que mostra tots els components que hi ha en la fulla de treball juntament amb l'empremta assignada. A continuació es mostra un segment d'aquesta llista:

80	R25 -	R : Resistors_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P10.16mm_Horizontal
81	R26 -	R : Resistors_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P10.16mm_Horizontal
82	U1 -	PC817 : Housings_DIP:DIP-4_W7.62mm
83	U2 -	PC817 : Housings_DIP:DIP-4_W7.62mm
84	U3 -	LM324 : Housings_DIP:DIP-14_W7.62mm
85	U4 -	LM324 : Housings_DIP:DIP-14_W7.62mm
86	U5 -	PC817 : Housings_DIP:DIP-4_W7.62mm
87	U6 -	PC817 : Housings_DIP:DIP-4_W7.62mm
88	U7 -	PC817 : Housings_DIP:DIP-4_W7.62mm

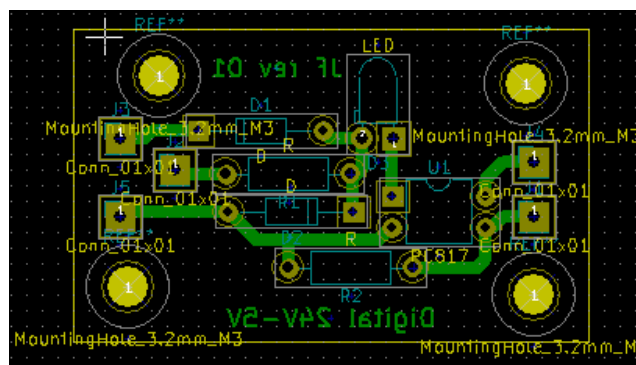
Taula 14 - Segment de llistat de components amb les empremtes assignades

Com es pot notar, d'un mateix component i poden haver moltes empremtes, és a dir que es pot trobar en el mercat el mateix component amb caràtules diferents o mides diferents, aleshores en aquest programa s'ha de seleccionar per a cada component la caràtula corresponent per poder sincronitzar l'esquema i els components de la placa PCB per així poder tenir les mides i les empremtes de cada component i així poder procedir en el disseny de plaques.

Procedint amb el disseny de plaques PCB, cal recordar que en aquesta secció les pistes no es poden creuar ja que es realitza els circuits en una sola cara, és a dir que s'haurà de posar els components per una cara i fresar per l'altre. En cas que s'utilitzés diferents nivells o diferents capes de coure, es podrien realitzar circuits integrats amb dimensions més reduïdes i a més es podrien fer ponts d'una capa a l'altre permeten el creuament de pistes.

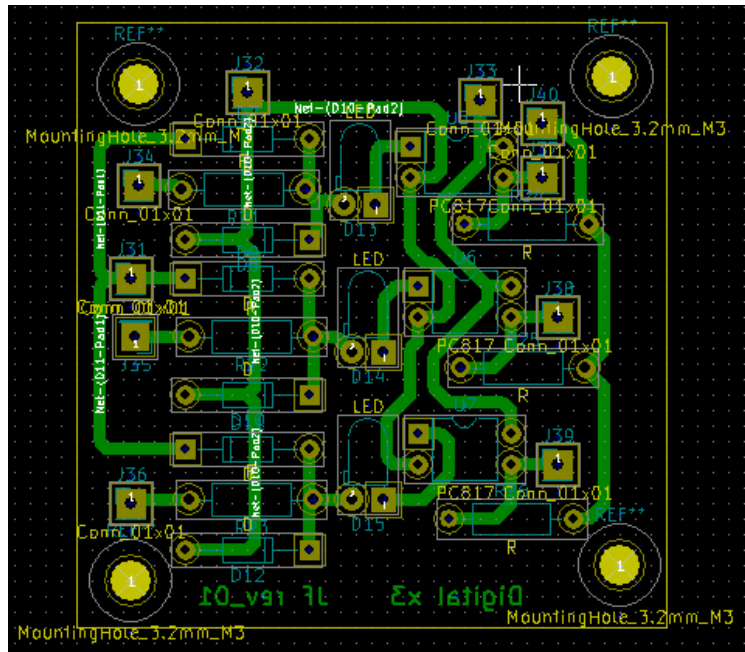
Llavors com s'ha comentat en aquest cas, s'han realitzat circuits en una sola cara, és a dir que s'utilitzaran plaques de coure amb material d'una sola capa. Llavors físicament s'ubicaran els components en una cara on els seus pins travessaran la placa fins a l'altre extrem on seran soldats.

Per tant, el disseny que s'ha realitzat en aquesta capa de coure per a cada placa PCB, citades anteriorment, són els que es mostren a continuació:



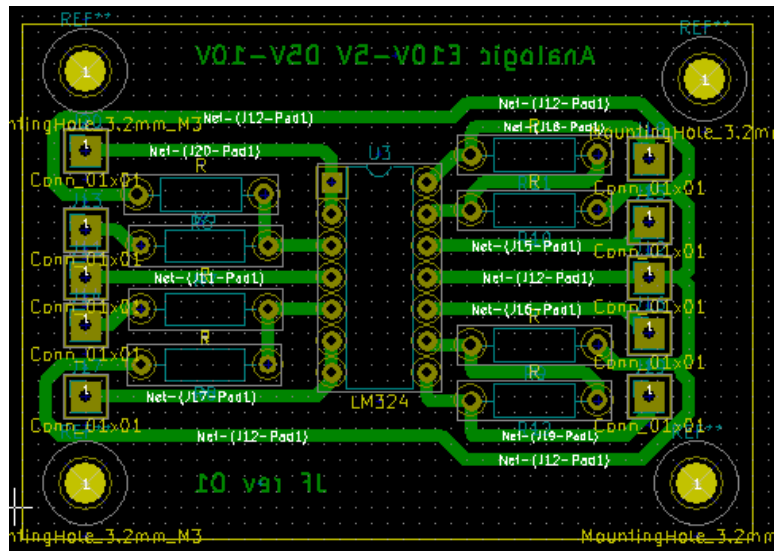
Il·lustració 208 - Disseny placa PCB Circuit Digital d'una unitat

Com es pot veure en la placa digital d'un sol mòdul la placa no queda d'unes dimensions molt reduïdes sinó que s'estén longitudinalment. Per aquest motiu s'ha procedit en realitzar un mòdul de 3 circuits integrats que realitzen la mateixa funció i s'aprofita millor l'espai ja que es redueix l'espai buit que ocupa l'emplaçament dels cargols per subjectar la placa. Aleshores la placa digital de 3 circuits integrats és la que es mostra subseqüentment.



Il·lustració 209 - Disseny placa PCB Circuit Digital amb 3 Circuits integrats

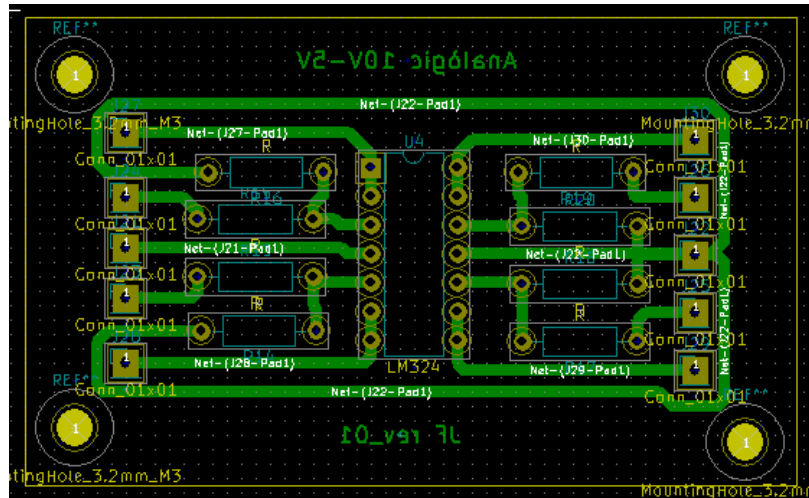
Per altra banda, les plaques d'analogia:



Il·lustració 210 - Disseny placa PCB Circuit Analògic amb 2 Reduccions i 2 Amplificacions

En aquest circuit, la part esquerra correspon a una reducció de 10V a 5V analògicament, mentre que a la dreta correspon al circuit que augmenta la tensió de 5V a 10V analògicament. En aquest cas, com que s'ha vist una necessitat més gran de circuits que redueixin la tensió s'ha realitzat la

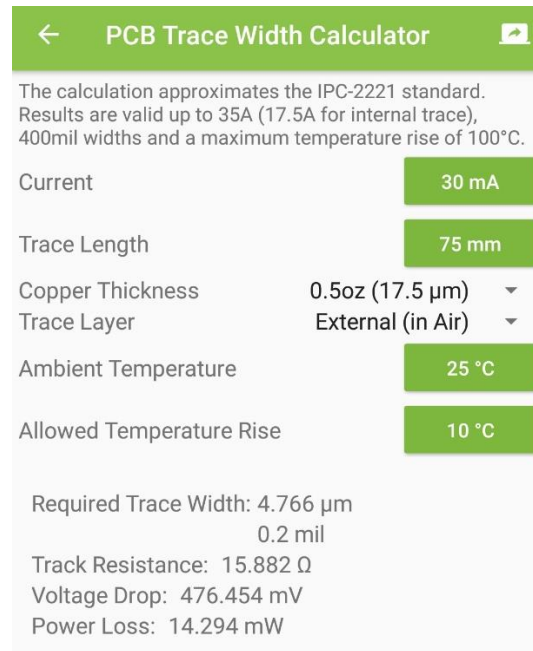
placa següent que correspon a una placa que en tots els 4 amplificadors operacionals es produeix una etapa de reducció sent aquest el circuit resultant integrat en una placa PCB.



Il·lustració 211 - Disseny placa PCB Circuit Analògic amb 4 Reduccions

Com es pot veure alhora de dissenyar circuits cal tenir en compte la intensitat que passa per cada pista per tal d'evitar sobreescalfaments i obtenir una bona dissipació tèrmica. A més, s'ha de dimensionar l'amplada de cada Pad per poder realitzar una bona soldadura, en aquest cas, els Pads convencionals tenen una mida de 1.7 mm de diàmetre mentre que els Pads que serveixen per sortida on es soldaran cables, aquests s'han ampliat a una amplada de 2.2 mm. Seguidament, un cop dibuixades totes les pistes i ubicats tots els components, es pot procedir en realitzar el contorn per on s'haurà de fressar delimitant així els límits de la placa.

A continuació es mostraran els càlculs d'amplada de pista que s'han realitzat per determinar l'amplada de la pista en funció de la seva dissipació tèrmica. Per realitzar aquests càlculs s'ha partit d'una aplicació mòbil on s'introdueixen els valors més crítics del circuit i aquest et retorna l'amplada mínima necessària.



← PCB Trace Width Calculator

The calculation approximates the IPC-2221 standard. Results are valid up to 35A (17.5A for internal trace), 400mil widths and a maximum temperature rise of 100°C.

Current: 30 mA

Trace Length: 75 mm

Copper Thickness: 0.5oz (17.5 μm) ▼

Trace Layer: External (in Air) ▼

Ambient Temperature: 25 °C

Allowed Temperature Rise: 10 °C

Required Trace Width: 4.766 μm
0.2 mil

Track Resistance: 15.882 Ω

Voltage Drop: 476.454 mV

Power Loss: 14.294 mW

Il·lustració 212 - Càlcul Amplada de Pista PCB

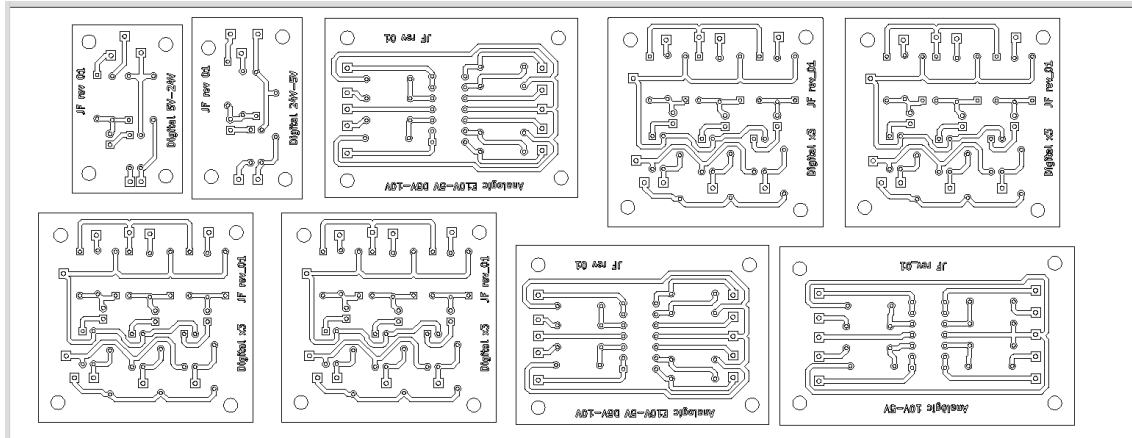
Com es pot veure, inserint una intensitat màxima de 30mA amb una longitud màxima de la pista de 75mm, amb la utilització de coure d'una espessor de 17.5 micròmetres i aquesta cara ubicada en una cara exterior amb contacte amb l'aire i suposant una temperatura ambient de 25°C i un augment de la temperatura permès de 10°C, l'amplada de pista mínim requerit és de 4.766 micròmetres on aquest oferirà una resistència de 15.882Ω sent aquest una caiguda de tensió de 476.454mV i dissipant una potència de 14.294mW. Per altra banda, s'han realitzat les pistes amb una amplada de 1mm.

A4.7 Fabricació dels Circuits Electrònics

Un cop dissenyades les plaques es procedeix amb el procés de fabricació on aquí s'utilitzarà el programa *Vcarve*® per preparar la placa PCB per ser fresada. Se li indicaran les accions que la fresa ha de fer, en quin ordre, amb quines eines, etcètera.

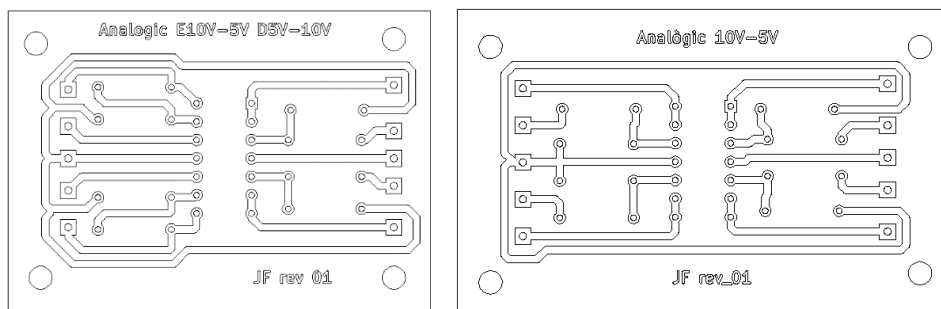
Primer de tot es determinen les mides de la placa a la que es fressaran els components i seguidament s'importen les plaques, les quals han set prèviament exportades del programa anterior, s'ubiquen en la placa tenint en compte que es realitzarà finalment un contornejat exterior i s'ha de deixar una separació mínima entre plaques³⁴ perquè la fresa pugi passar sense danyar cap altre placa. El Layout de les plaques aplicat és el que es mostra a continuació:

³⁴ Separació mínima necessària de l'amplada de la broca que contornejarà.

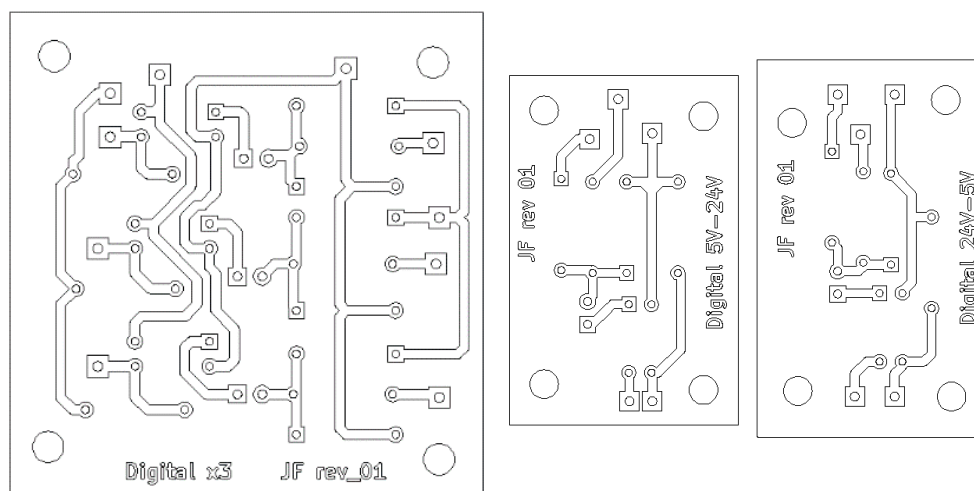


Il·lustració 213 - Layout de les plaques a fressar

Com es pot veure s'intenta aprofitar el màxim possible de la placa. Llavors s'ha arreglat cada circuit preservant els contorns que interessa per a fressar i eliminant els contorns duplicats. Els circuits arreglats que s'han fressat en diverses unitats es mostren a continuació:

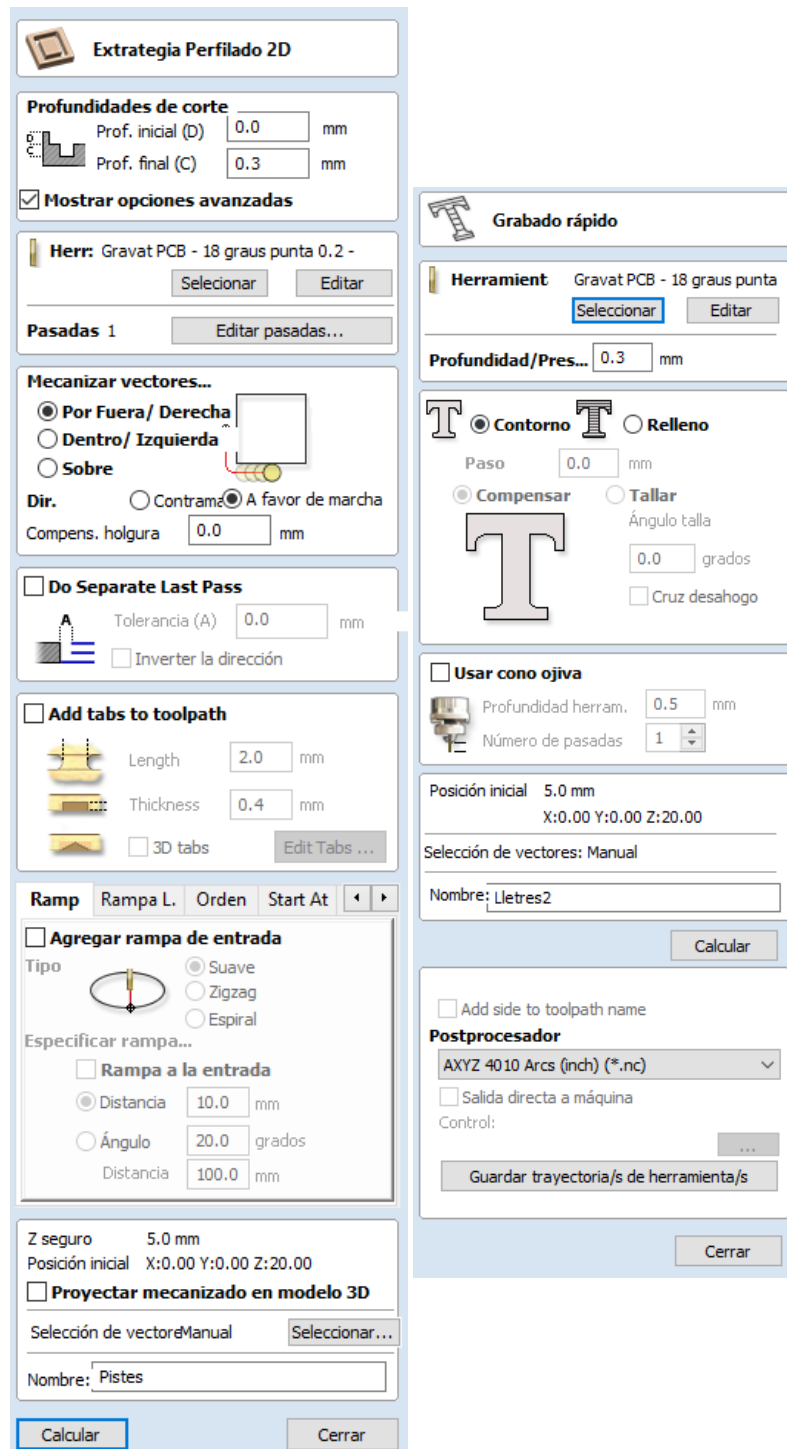


Il·lustració 214 - Circuits Analògics. Esquerra: Reductor i amplificador. Dreta: 4 circuits Reductors



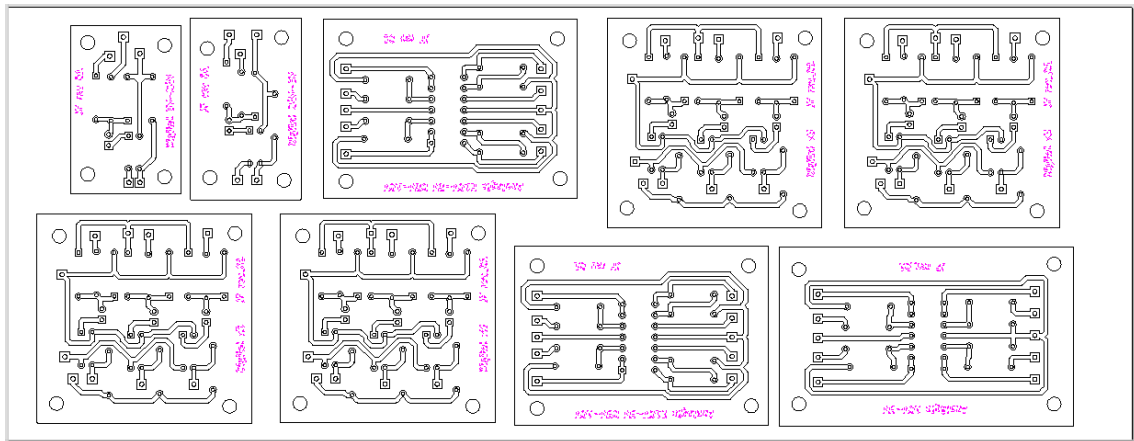
Il·lustració 215 - Circuits Digitals. Esquerra: Placa de 3 circuits integrats. Dreta: Plaques d'un circuit integrat

Vist els contorns, s'haurà de definir els paràmetres que demana el programa com la profunditat a la que treballarà. En aquest cas, es disposa d'una placa de coure on aquesta làmina fa 0.2 mm d'espessor aproximadament. Aleshores, s'indicarà que la fresa ha de treballar a una profunditat de 0.3 mm per tal d'assegurar-nos que l'eina travessa la totalitat de la làmina de coure per evitar ponts elèctrics no desitjats. En aquest cas de contornejar s'utilitzarà una broca especial per gravar la qual presenta una inclinació de 18° en el seu extrem. Les dades que s'han entrat es poden veure en la següent il·lustració (esquerra):



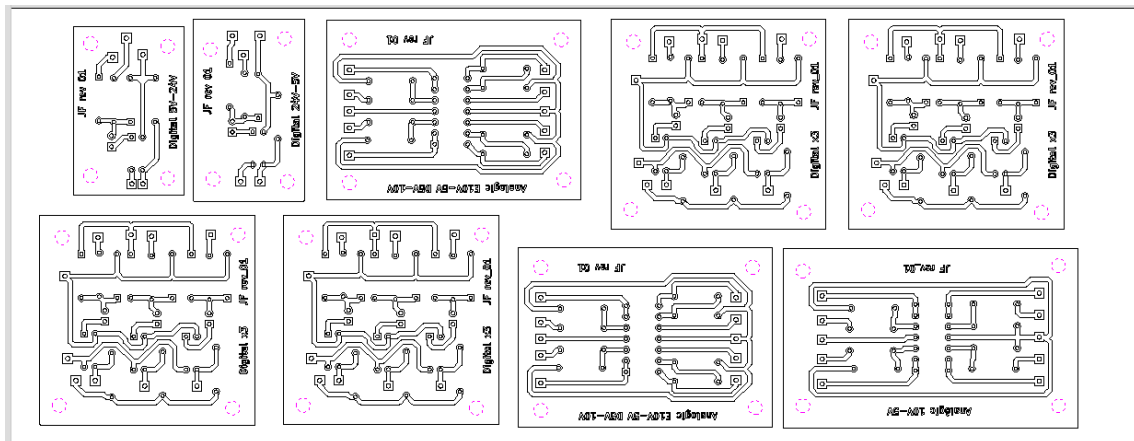
Il·lustració 218 - Quadres d'instruccions per a les operacions de: Esquerra: Contornejar. Dreta: Gravar les lletres

Un cop realitzat aquest contornejat s'han de marcar les lletres, per fer això amb la mateixa eina hi ha una opció en el programa que permet resseguir i adaptar el pas de la broca per contornejar les lletres, aleshores, es seleccionen les lletres desitjades mostrades en la il·lustració següent. Per altra banda, s'ha de completar el requadre mostrat a la Il·lustració 218 - Quadres d'instruccions per a les operacions de: Esquerra: Contornejar. Dreta: Gravar les lletres (Dreta).

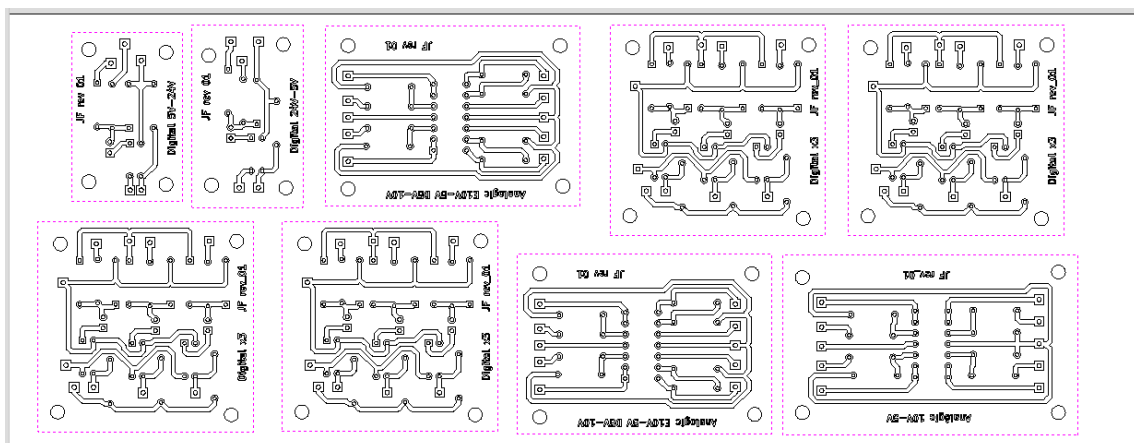


Il·lustració 219 - Gravació de les lletres

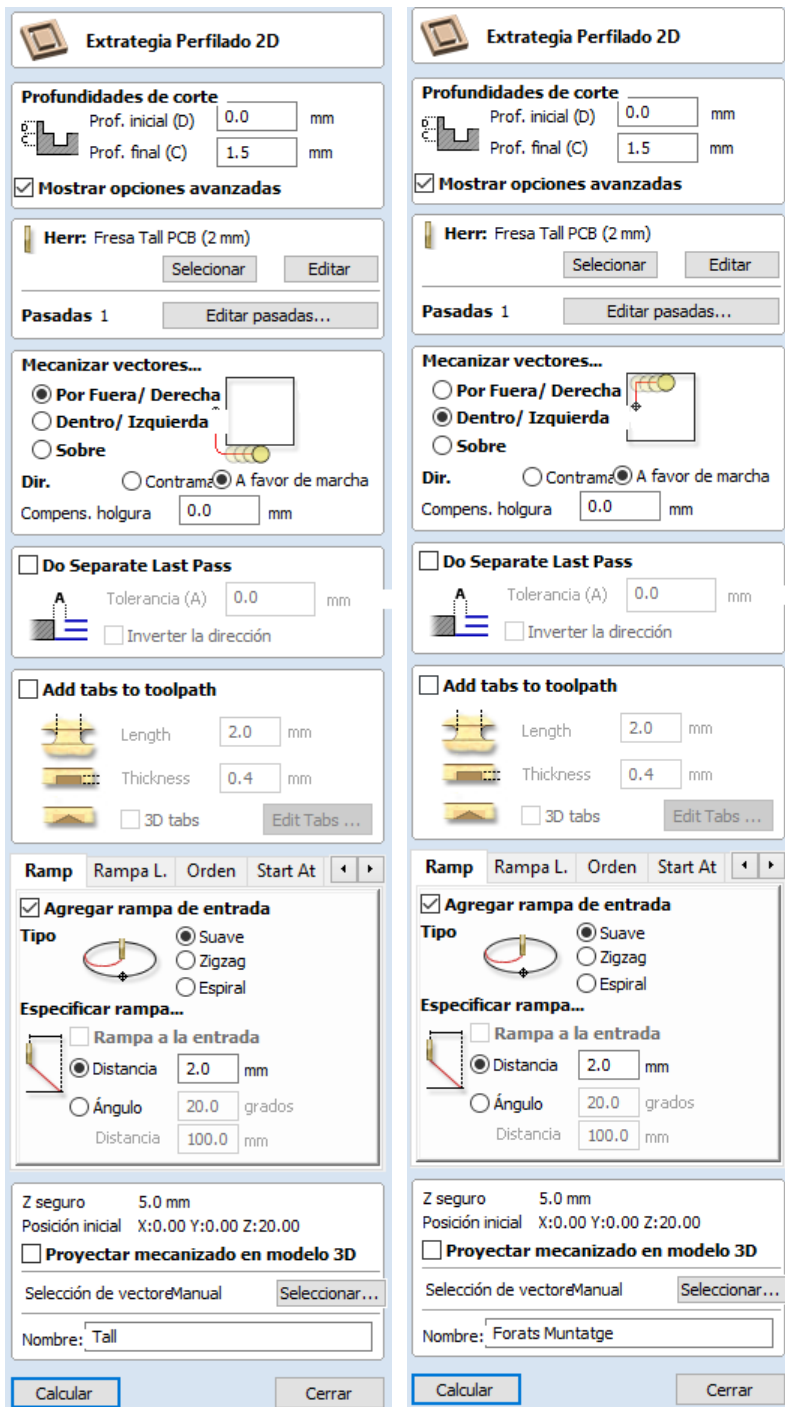
Per últim s'haurà de canviar la broca en la fresa i posar-ne una altre per a realitzar els forats de subjecció i el contornejat exterior de les pistes. On en aquest cas s'indica en dues funcions diferents, primerament de realitzar els forats i conseqüentment contornejar.



Il·lustració 220 - Operació de fer els forats de subjecció de les plaques



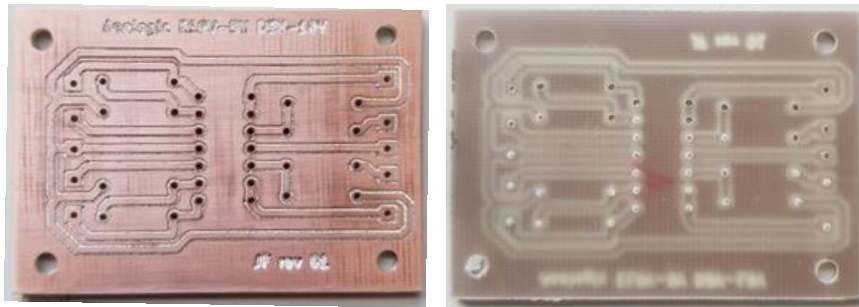
Il·lustració 221 - Operació de contornejar l'exterior de les plaques



Il·lustració 222 - Quadre d'operacions. Esquerra: Operació de Forats. Dreta: Contornejar

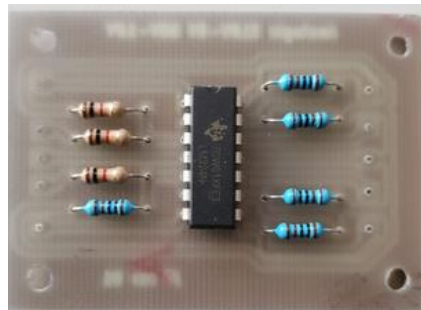
Com es pot veure en les opcions anteriors, al utilitzar unes broques de diàmetre més gran s'ha introduït una opció que és d'entrada suau, és a dir que no entra de cop sinó que entra progressivament, això s'ha introduït per tal de suavitzar l'entrada de la broca i reduir les tensions que es produeixen en ella, és a dir, s'ha realitzat per tal de prolongar la vida de la eina.

Finalment, el resultat obtingut del fresatge és el que es mostra en les il·lustracions següents:



Il·lustració 223 - Placa analògica fresada

L'últim pas és soldar els components en aquesta placa on primer s'ha de polir cada placa amb un paper de vidre d'un granulat de R1200 on deixi una superfície prou llisa i sense brutícia perquè la soldadura si pugui adherir millor. I Finalment, el resultat obtingut és el que es mostra a continuació:



Il·lustració 224 - Resultat de la placa fresada amb els components soldats

A4.8 Programació dels Microprocessadors

En aquesta secció del TFG es mostra la part de programació dels microprocessadors definits en el capítol 3.

Respecte a l'Arduino Mega utilitzat com a centraleta, en aquest es duu a terme tota una sèrie de passos per inicialitzar el simulador i verificar el correcte funcionament de totes els seves parts i definir unes condicions de seguretat com les que s'han comentat en la part de disseny, sent aquestes la comprovació que les 4 barres inserides estan cargolades, comprovant així que la moto és estable. També que el sistema d'emergència està desactivat i tota una sèrie d'altres paràmetres necessaris per inicialitzar el simulador.

De la mateixa manera, l'Arduino nano, s'ocupa del control del motor vertical, gestionan diverses entrades de sensors i estableixen una comunicació Serial Port amb l'ArduinoMega.

El codi en Arduino no s'explica en detall ja que encara està en fase de desenvolupament fins el dia de la presentació del TFG. Per aquest motiu al TFG està previst afegir un nou Annex amb el títol – Ampliació del codi en Arduino. A continuació es mostre el coid de l'Arduino Mega:

/*PROGRAMA PER ARDUINO MEGA

*

* PROGRAMA PER CONTROLAR EL MOVIMENT DEL SERVOMOTOR D'INCLINACIÓ
I EL CONTROL DE TOTS ELS SENSORS

* Aquest es comunica amb el client (Arduino Nano)

*/

//Inputs Digitals Sistema Omron:

int bloqueig_central=47;//00.02

int det_derr_D=51;//00.05

int det_dav_D=50;//00.04

int det_dav_E=49;//00.06

int det_derr_E=48;//00.07

int Standby_Motor=46;//00.01

int Pols_Alarma=22;//00.00

int Punt0_MV;//01.00

int Rele_Alarma;//01.01

int int_zm=25;//Simbolitzant l'interruptor de Marxa pantalla

//Output digital Sistema Omron:

int Baixar_Vert;//10.00

int Pujar_Vert;//10.01

int Rele_Rearme=36;//10.02

int Act_Driver=40;//10.03

int zona_morta=37;//10.04 per començar a jugar

int pos0=34;//10.05

int graf_gas=39;//10.06

int graf_fre=38;//10.07

int reset_alarma_vert;//101.

int Run_servo_vert=41;//101.01

//101.02 o 101.03 -> rele raspi

//Inputs Analògics Sistema Omron:

int Graus=A2;//-V1+

int pot_gas=A0;//-V2+

```
int velocitat=A3;//-V11
```

```
int pot_fre=A1;//-V12
```

```
//Output Analògics Sistema Omron:
```

```
int Parell=A8;//-V01
```

```
/*PINS ARDUINO:*/
```

```
int pols1 = 23;//pulsadors
```

```
int pols2 = 24;
```

```
/*int pols3 = 25;*/
```

```
int pols4 = 26;
```

```
int s1 = 30;//sortida led
```

```
int s2 = 31;
```

```
/*PINS ARDUINO*/
```

```
//Declaració variables:
```

```
int p1 = 0;//pulsadors
```

```
int p2 = 0;
```

```
int p3 = 0;
```

```
int p4 = 0;
```

```
int gas=0;//Per l'entrada del gas analògica
```

```
int fre=0;
```

```
int gas_offs;//PER DEFINIR!
```

```
int fre_offs;
```

```
//COMUNICACIÓ:
```

```
//per arduino nano
```

```
String Mis_Rebut1 = "";
```

```
String Mis_Enviat1 = "";
```

```
void Inicialitzar(){
```

```
  Serial.println("Inicialització!");
```

```
  Serial.println("Comprovació Polsador Emergencia, despresionar el pulsador!");
```

```
  while(digitalRead(Pols_Alarma) == 1){
```

```
  }
```

```
Serial.println("Premi el pulsador 1 per a continuar.");
while(digitalRead(pols1)!= 0){
}
Serial.println("Comprovació detectors plataforma");
Serial.print("ddd: ");
Serial.println(digitalRead(det_derr_D));
Serial.print("ddd2: ");
Serial.println(digitalRead(det_dav_D));
Serial.print("dde: ");
Serial.println(digitalRead(det_dav_E));
Serial.print("dde2: ");
Serial.println(digitalRead(det_derr_E));
while(digitalRead(det_derr_D) != 1 || digitalRead(det_dav_D) != 1 || digitalRead(det_dav_E) !=
1 || digitalRead(det_derr_E) != 1){
}
Serial.println("Comprovació bloqueig central moto, bloquejar la moto");
while(digitalRead(bloqueig_central) == 0){
}
Serial.println("Premi el pulsador 2 per a continuar.");
while(digitalRead(pols2)!=0){
}
Serial.println("Activant potència");
digitalWrite(Rele_Rearme, HIGH);
delay(1000);
digitalWrite(Rele_Rearme, LOW);
Serial.println("Enjgant motor...");
digitalWrite(Act_Driver, HIGH);
while(digitalRead(Standby_Motor) == 0){ // Espera resposta del Driver
}
Serial.println("Motor Apunt!");
Serial.println("Centrar moto!");
digitalWrite(pos0,HIGH);
delay(3000);
digitalWrite(pos0,LOW);
Serial.println("Desbloquejar el bloqueig central per començar!");
while(digitalRead(bloqueig_central) == 1){
}
```

```
Serial.println("Inicialització completada");
//Programes Inicialitzats!
}

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial1.begin(9600);//Comunicació amb l'Arduino Nano
  Serial.println("!Starting Program!");
  pinMode(13,OUTPUT);
  pinMode(pols1,INPUT_PULLUP);
  pinMode(pols2,INPUT_PULLUP);
  pinMode(pols4,INPUT_PULLUP);
  pinMode(s1,OUTPUT);
  pinMode(s2,OUTPUT);
  //INPUTS
  pinMode(det_derr_D,INPUT);
  pinMode(det_dav_D,INPUT);
  pinMode(det_dav_E,INPUT);
  pinMode(det_derr_E,INPUT);
  pinMode(Pols_Alarma,INPUT_PULLUP);
  pinMode(bloqueig_central,INPUT);
  pinMode(Standby_Motor,INPUT);
  pinMode(int_zm,INPUT_PULLUP);
  //OUTPUTS
  pinMode(Act_Driver,OUTPUT);
  pinMode(Run_servo_vert,OUTPUT);
  pinMode(graf_gas,OUTPUT);
  pinMode(graf_fre,OUTPUT);
  pinMode(zona_morta,OUTPUT);
  pinMode(Rele_Rearme,OUTPUT);
  pinMode(pos0,OUTPUT);
  //INPUTS ANALÒGICS
  pinMode(Graus, INPUT);
  pinMode(pot_gas,INPUT);
  pinMode(velocitat,INPUT);
  pinMode(pot_fre,INPUT);
  //OUTPUT ANALÒGICS
```



```
pinMode(Parell,OUTPUT);
}

//Main
void loop() {
  Inicialitzar();
  while (true){
    if (digitalRead(bloqueig_central) == 0){
      if(digitalRead(int_zm) == 1){//Quan sactiva el polsador de la pantalla
        gas = analogRead(pot_gas);
        fre = analogRead(pot_fre);
        int parell=0;
        parell=map(gas,185,1023,46,255); //Ho passem d'una escala 1023 a una 255
        if(analogRead(Graus) < 520 || analogRead(Graus) > 526){
          digitalWrite(graf_gas, HIGH);
          analogWrite(Parell,parell);
        }
      }
    }
    else{
      digitalWrite(zona_morta, LOW);
    }
  }
  else{
    Serial.println("Moto bloquejada! Desbloquejar pivot per continuar.");
    while(digitalRead(bloqueig_central)==1){
      //Quan es desbloqueji continuarà
    }
  }
}
```

I seguidament el codi de l'Arduino Nano:

```
/*PROGRAMA PER ARDUINO NANO
*
* PROGRAMA PER CONTROLAR EL MOVIMENT DEL SERVOMOTOR VERTICAL
* Aquest es comunica amb el servidor (Arduino Mega o Due)
```

*/

//En aquest programa s'enviaran STRINGS

//Inputs Digital Sistema Omron:

int Punt0_MV;//01.00

//Ouputs Digital Sistema Omron:

int Baixar_Vert=0;//10.00

int Pujar_Vert=0;//10.01

int graf_gas=0;//10.06

int graf_fre=0;//10.07

//Inputs Analògics Sistema Omron:

int pot_gas=A0;//-V2+

int pot_fre=A1;//-V12

//Definició de missatges:

String Mis_Rebut;

String Mis_Enviat;

int gas_offs;

int gas=0;//Valor analògic gas

int fre_offs;

int fre=0;

void setup() {

 Serial.begin(9600);

 Serial.print("!Starting Program!\r\n");

}

void loop() {

 if (Serial.available()){ //Per verificar la inicialització del Mega

 Mis_Rebut = Serial.readString();

 if (Mis_Rebut == "I"){

 Serial.write("ok");

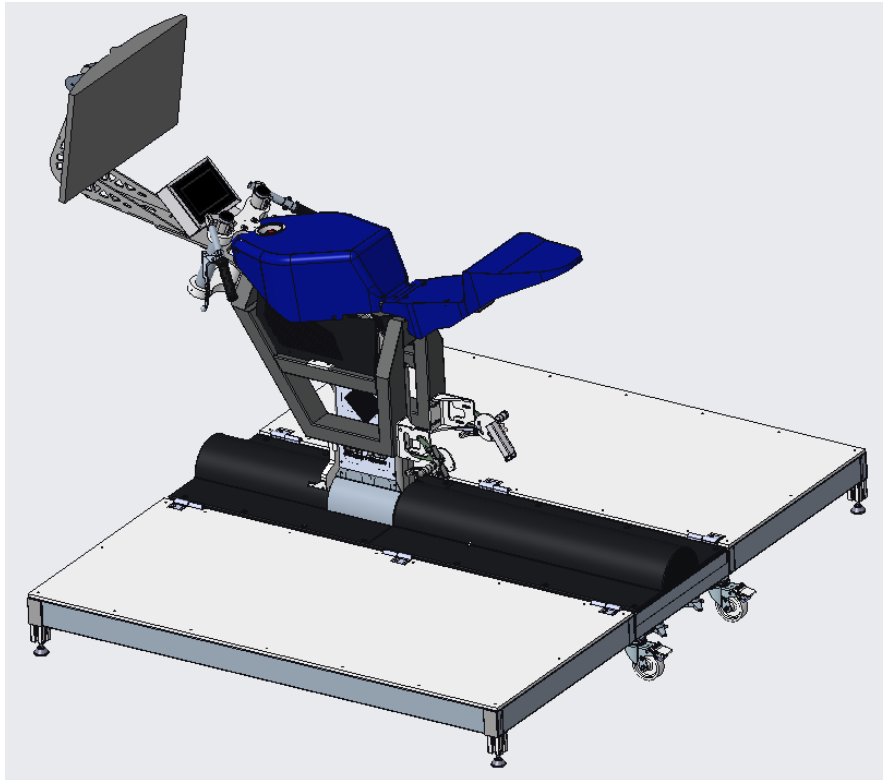
 while(true){

 gas = analogRead(pot_gas);

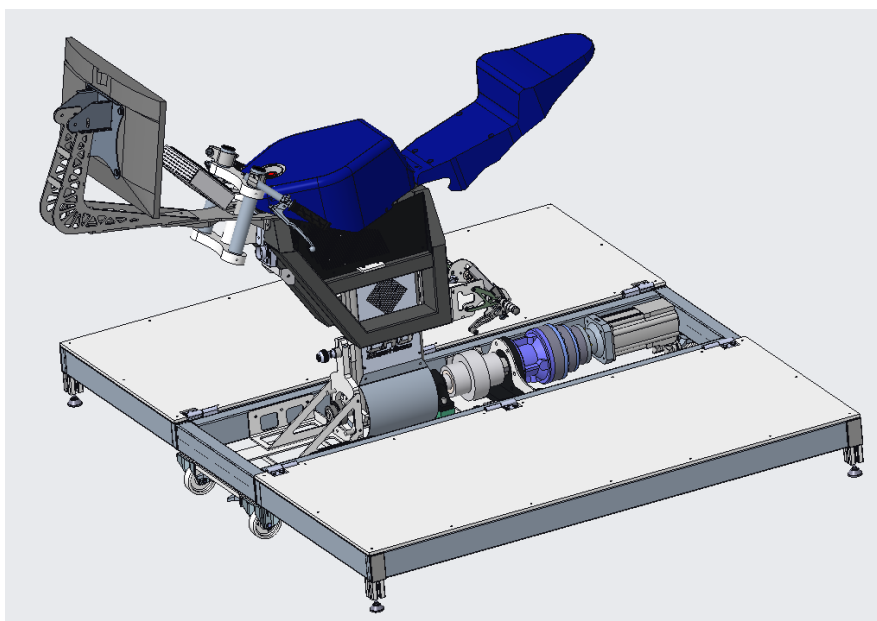
```
fre = analogRead(pot_fre);  
/*FALTA DESENVOLUPAR EL CODI*/  
}  
}  
}  
/*posicionament del motor vertical a la posició 0*/  
}
```

Annex A.5 - Dibuix del Simulador

En aquest annex com s'ha comentat en la memòria del TFG mostrarà tots els dibuixos realitzats i es comentaran per identificar cada part i cada subconjunt d'elements. Aleshores, per començar es mostra una perspectiva del simulador.

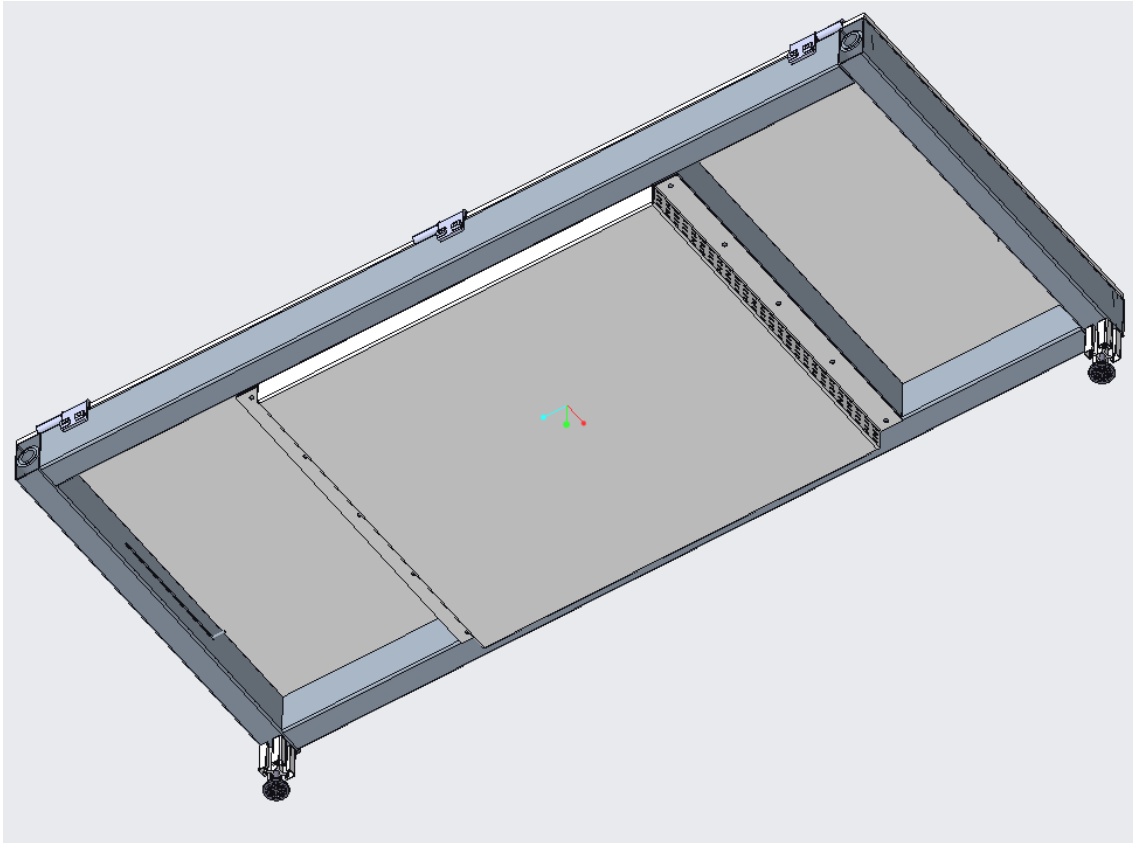


Il·lustració 225 - Dibuix del Simulador 3D



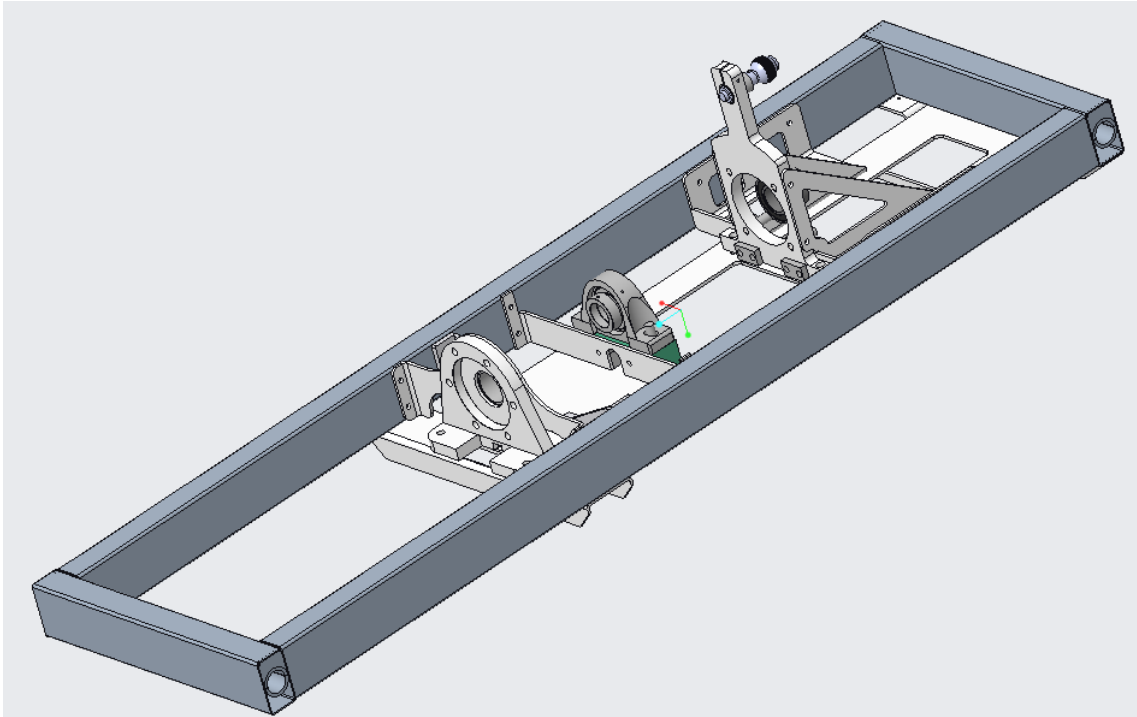
Il·lustració 226 - Dibuix del Simulador 3D diferent perspectiva

Llavors vist això es començarà a explicar l'estructura del simulador. Aquest està format per 3 mòduls d'estructura, dos laterals i un central. En el cas dels mòduls laterals, aquests són plataformes que poden ser plegades per poder transportar aquest simulador, a més, aquests mòduls laterals, estan equipats amb unes potes regulables per tal d'ajustar l'altura de les plataformes i que quedin ben anivellades amb el conjunt de la moto. En una de les plataformes laterals es disposa de tot el quadre de comandament elèctric on si pot accedir des de la part superior. Com es pot veure en la il·lustració següent, es mostra l'estructura lateral que conté el quadre elèctric.



Il·lustració 227 - Estructura lateral del quadre elèctric

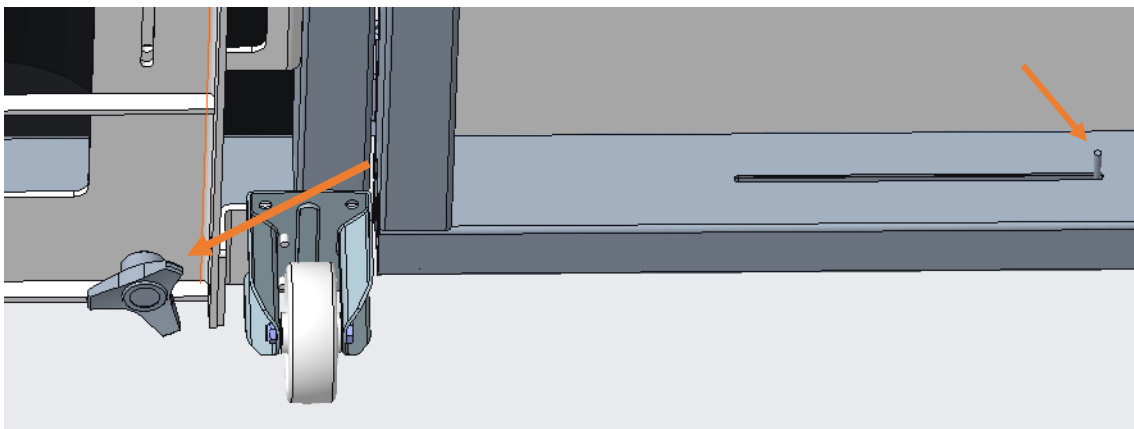
Aleshores, per accedir-hi es pot treure la tapa superior de color blanc que va adherida a l'estructura amb cargols o Velcro®. Respecte a l'estructura central, aquesta està dissenyada perquè passi a través de les portes amb tot el simulador plegat i a més resisteixi les càrregues que comporta el motor i tota la part superior del simulador inclosa la persona que el piloti. A part de resistir les càrregues dinàmiques, aquest simulador ha de resistir les càrregues dinàmiques aplicades quan està en us. Llavors l'estructura central és la que es mostra en la il·lustració següent:



Il·lustració 228 - Estructura Central

Com es pot veure aquesta estructura està equipada de diferents utensilis que s'explicaran més endavant, però abans es comenta el sistema d'unió de les dues plataformes, on s'ha millorat per tal de reduir el temps de muntatge i desmuntatge.

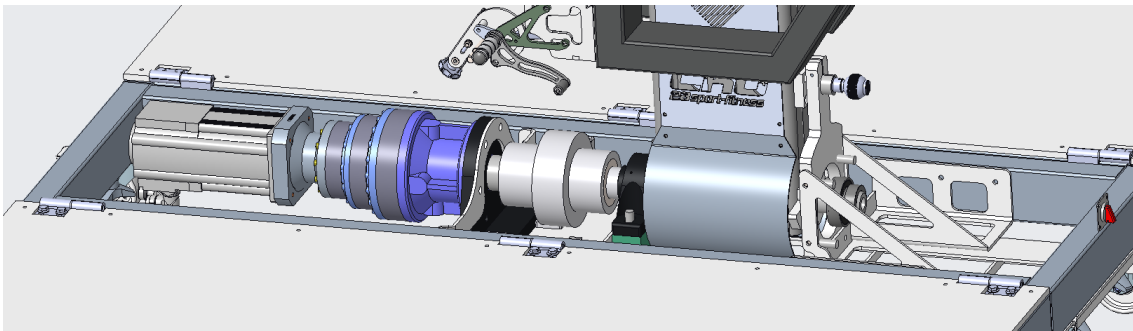
Anteriorment, aquest simulador constava d'unes plaques que havien de ser cargolades amb 8 cargols cadascuna per tal de fixar el moviment vertical de les plataformes laterals i així poder donar més estabilitat al sistema. El sistema anava bé, però el temps de muntatge i desmuntatge era molt elevat. Aleshores, s'ha proposat una nova millora que consisteix en inserir uns tubs ajustats provinent de les plataformes laterals cap a l'estructura central. Aquests tubs un cop hagin arribat a la seva aposició màxima seran fixats des de l'estructura central amb un altre tub que farà pressió entre ells. Vegeu la següent il·lustració:



Il·lustració 229 - Fixació plataformes laterals

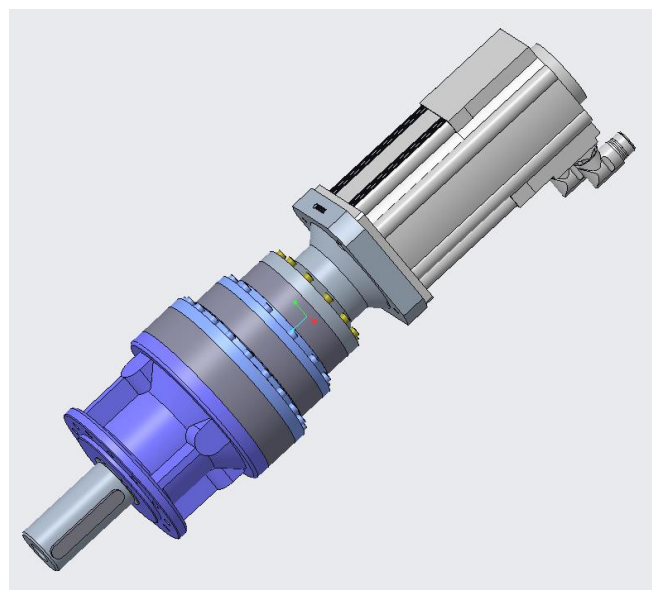
Com es pot veure en aquesta il·lustració, es disposa per la part interior de l'estructura un passador per inserir un tub cap a l'interior de l'estructura central. Aquest, quedarà fixat pel mànec senyalat amb la fletxa de l'esquerra. Un cop el sistema hagi quedat completament fixat pels dos mànec, els sensors que detecten si la plataforma està fixada, detectaran la fixació i llavors es podrà començar a fer anar el simulador.

Continuant per la part de l'estructura central, aquesta disposa de diferents sistemes de subjecció, donat que ha de subjectar el conjunt del servomotor amb el seu sistema de reducció de planetaris axials, dimensionats en l'Annex A.1 i a més disposa de suports per a subjectar tot el conjunt de la part superior de simulador i la persona que el pilota. Llavors totes les subjeccions es mostren en la il·lustració següent:



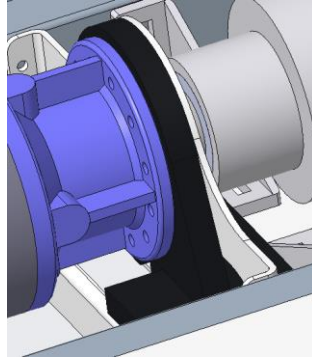
Il·lustració 230 - Sistemes de subjecció en l'estructura central

D'aquí cal destacar el conjunt del motor amb el seu sistema de reducció d'engranatges planetaris axials, cal recordar que aquest servomotor, és el que controla el moviment d'inclinació de la moto i és de la marca Lenze® el qual es controla amb el driver TopLine C 8400 especificat en l'Annex A.3.



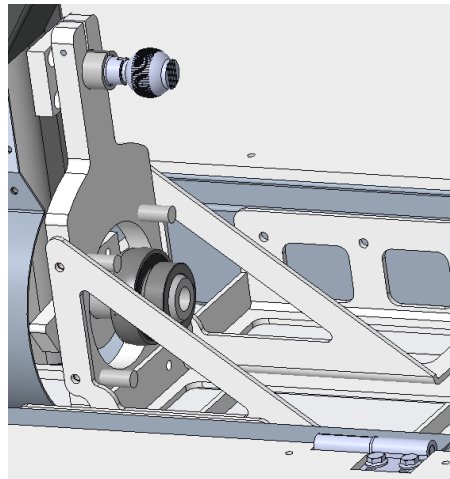
Il·lustració 231 - conjunt de servomotor i sistema d'engranatges de planetaris axials

Conseqüentment, es fa constància d'aquesta Orella, la qual subjecta el conjunt del Servomotor i alinea aquest eix amb l'eix d'inclinació de la part superior del simulador. A més, es fa constància d'aquesta orella perquè s'analiza en la secció de verificació estructural.



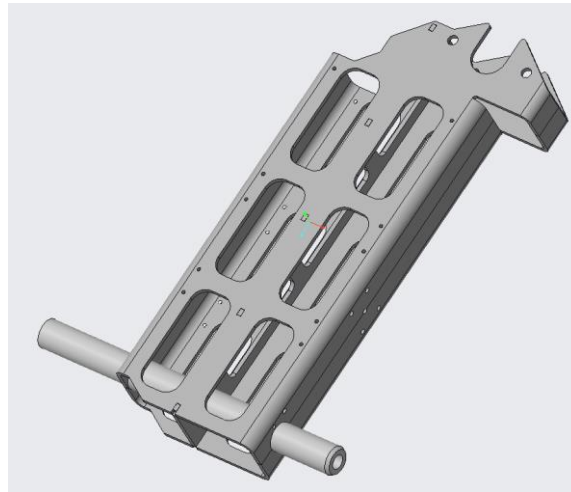
Il·lustració 232 – Orella

Un altre suport del que disposa aquest simulador és d'un de bloqueig del moviment d'inclinació, sent aquest com a factor de seguretat, permetent bloquejar aquest moviment per quan es treu l'alimentació del sistema o quan el simulador ha de ser transportat. Aquest es pot veure en la il·lustració següent on disposa d'un pivot esfèric.



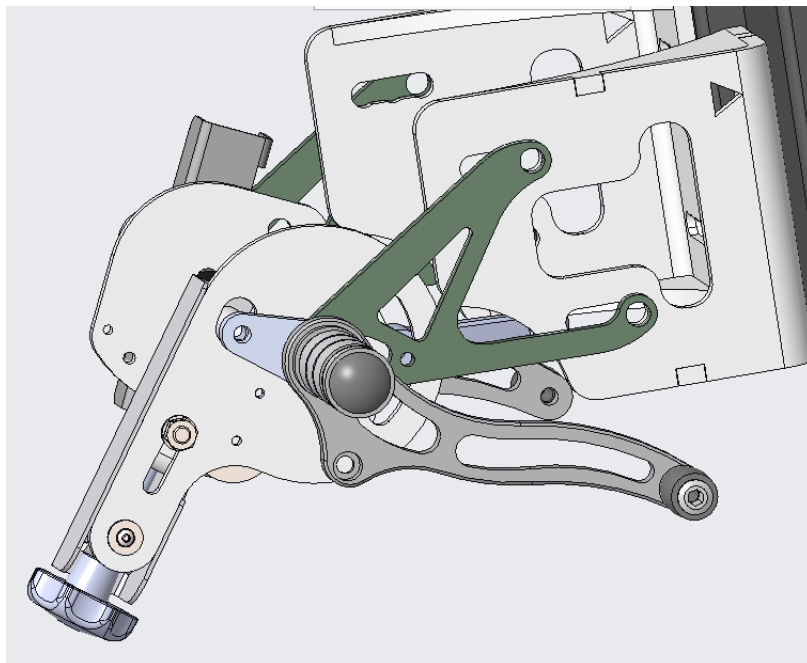
Il·lustració 233 - Sistema de bloqueig del moviment d'inclinació

Seguidament, es procedeix en analitzar la peça de suport del xassís superior, sent aquesta la més estudiada degut a la seva complexitat geomètrica i a ser una que està sotmesa a més càrregues i forces dinàmiques. Vegeu la següent il·lustració:



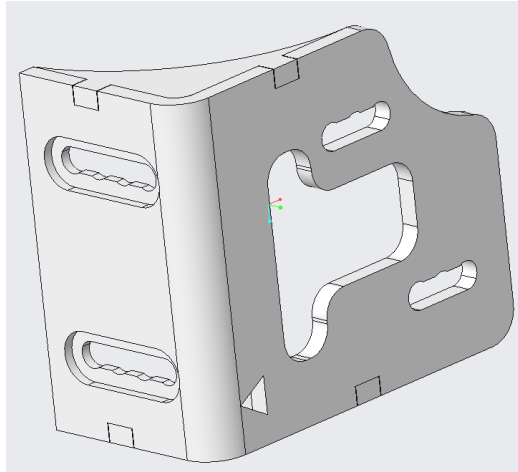
Il·lustració 234 - Peça suport Xassís superior

Conseqüentment, pujant cap a la part superior d'aquest simulador, cal fixar-se amb la zona del fre i del canvi de marxes, on aquesta si han introduït peces optimitzades tipològicament. Aleshores, la imatge que es mostra a continuació forma part del conjunt del sistema de fre de la roda de darrere d'una moto real.



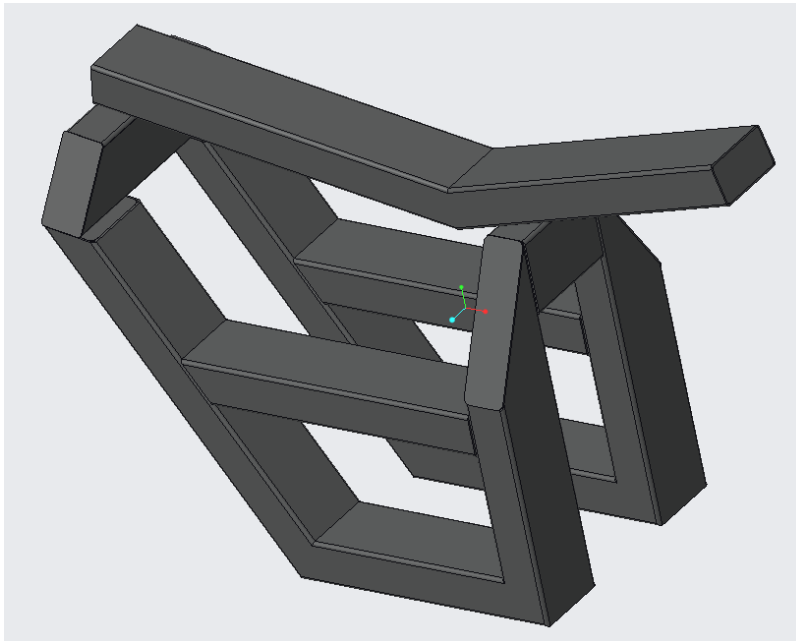
Il·lustració 235 - Sistema Fre

D'aquest sistema de fre, es pot destacar la peça de subjecció i ajustatge, que permet ajustar el sistema de fre a la mida convenient del pilot, vegeu la següent il·lustració:

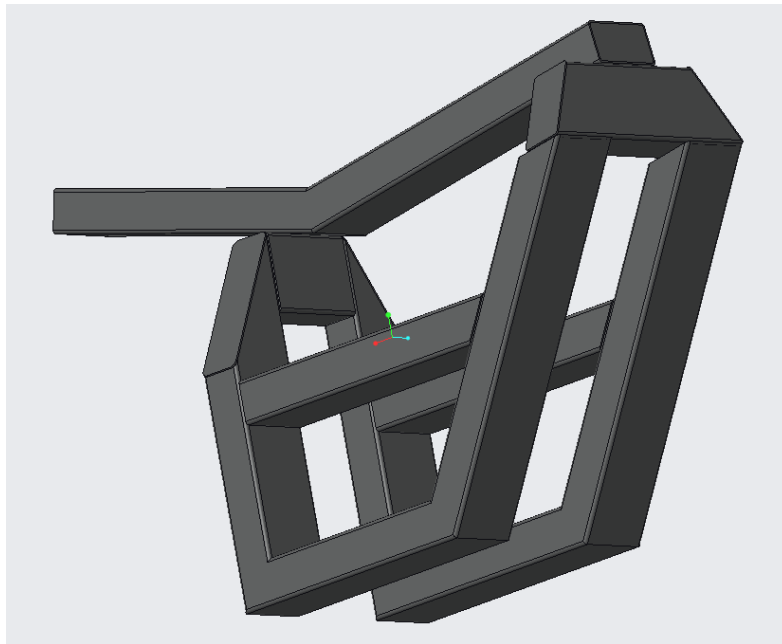


Il·lustració 236 - Peça de subjecció del sistema de frenada

Procedint, es mostra el xassís realitzat per a simular el xassís d'una moto i subjectar tot el conjunt de sistemes externs i el pilot.

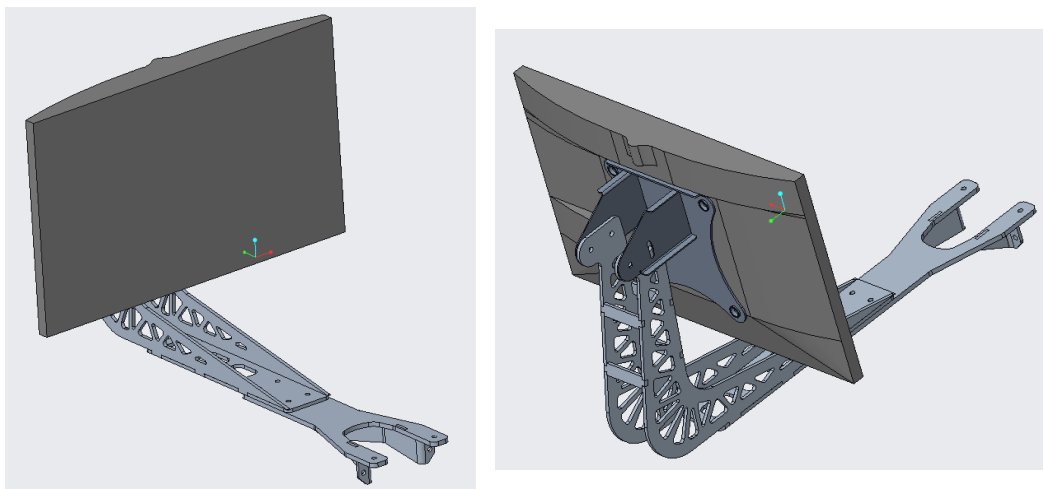


Il·lustració 237 - Xassís



Il·lustració 238 - Xassis perspectiva diferent

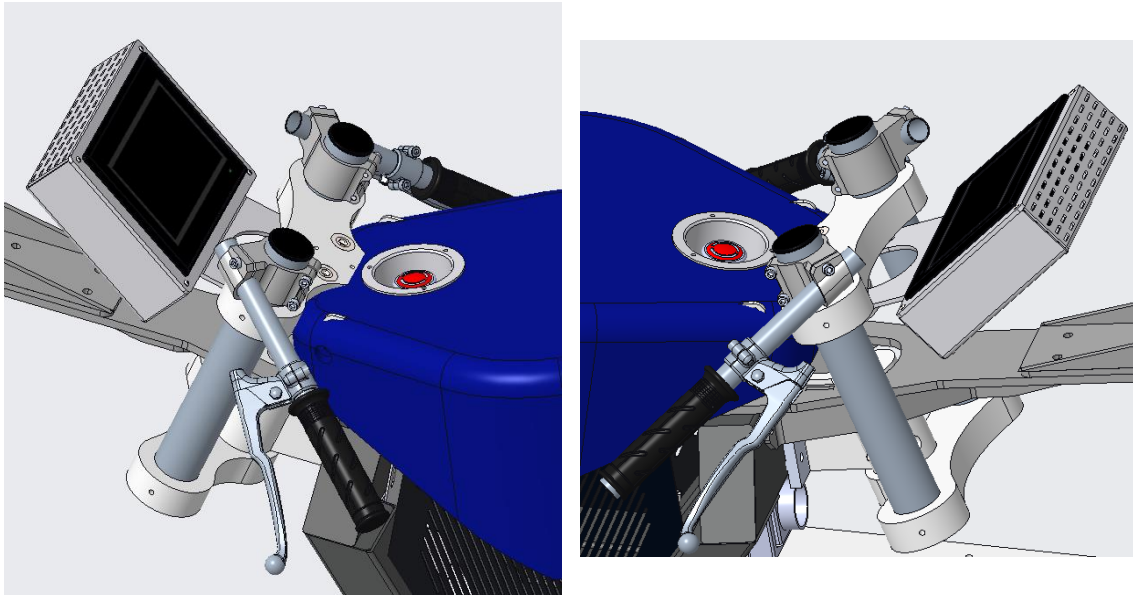
Conseqüentment, es mostra l'estructura de suport de la televisió des de diferents perspectives, en aquest cas s'utilitza una televisió LCD LED 40 SAMSUNG UE40J6300 CURVED FULL HD SMART³⁵:



Il·lustració 239 - Estructura suport televisió des de diferents perspectives

³⁵ Model de televisió no present en el dibuix.

Finalment, es mostra el volant amb la pantalla de control pel pilot, vegeu les següents il·lustracions:



Il·lustració 240 - Volant i pantalla de control pel pilot des de diferents perspectives

Per últim i per concloure aquest annex es mostra el *ThinkMark* un QR generat pel propi programa de dibuix utilitzat³⁶. Aquest QR que s'ha realitzat permet a l'usuari que tingui l'aplicatiu mòbil *View* també de PTC Creo veure el dibuix realitzat en realitat augmentada escanejant aquest codi.

En la pàgina següent es mostra un model d'aquest QR:

³⁶ Programa PTC Creo 4.0

