

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  
ESCUELA POLITÈCNICA SUPERIOR DE ALCOY**



**UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA**

**CAMPUS D'ALCOI**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN REDUCTOR DE  
VELOCIDAD CON RELACIÓN DE TRANSMISIÓN  
7.1 Y PAR MÁXIMO A LA SALIDA DE 4500 NM”**

**Autor:**

ENRIQUE MORO VALDEZATE

**Dirigido por:**

Patricia Limiñana Gregori

Sergi Montava Jordà

**Noviembre, 2018**

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**  
**ESCUELA POLITÈCNICA SUPERIOR DE ALCOY**



**UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA**

**CAMPUS D'ALCOY**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN REDUCTOR DE VELOCIDAD CON  
RELACIÓN DE TRANSMISIÓN 7.1 Y PAR MÁXIMO A LA SALIDA  
DE 4500 NM”**

**Autor:**

ENRIQUE MORO VALDEZATE

**Dirigido por:**

Patricia Limiñana Gragori

Sergi Montava Jordà

**Noviembre, 2018**

# RESUMEN

**“Diseño y cálculo de un reductor de velocidad con relación de transmisión 7.1 y par máximo a la salida de 4500 Nm”.**

El objetivo del presente trabajo final de grado es el de diseñar y calcular un reductor de velocidad de dos etapas, que va a ser utilizado a nivel industrial, e incorporado en cualquier tipo de maquinaria.

Primeramente, se van a analizar las posibles transmisiones existentes en el mercado, descartando las que no se adecúen a la consecución del objetivo del trabajo.

Una vez elegida la mejor solución posible y teniendo presente el diseño del reductor, se va a proceder a seleccionar los componentes necesarios que garanticen el correcto funcionamiento del mismo, para un determinado número de horas de funcionamiento.

Posteriormente, se van a realizar los diferentes cálculos necesarios partiendo de los datos iniciales, dimensionando los árboles, engranajes y rodamientos para posteriormente realizar una simulación de funcionamiento.

Cabe destacar, que se van a tener en cuenta ambos sentidos de giro en las hipótesis de funcionamiento, ya que los engranajes utilizados transmiten esfuerzos axiales de dirección variable, según su sentido de giro.

Por otro lado, se va a estudiar tanto la deflexión lateral como el comportamiento a fatiga en las secciones más críticas de cada árbol, así como los esfuerzos transmitidos por los engranajes helicoidales.

Finalmente, se va a confeccionar un presupuesto detallado de cada uno de los componentes del reductor, reflejando de este modo el coste de producción final.

Por último, se van a realizar tanto planos acotados de conjunto como de despiece, para definir completamente la geometría y dimensiones de los elementos que componen el reductor de velocidad.



# SUMMARY

**“Design and analysis of a speed reducer with 7.1 transmission ratio and maximum output torque of 4500 Nm”.**

The aim of this final degree work is to design and calculate a two stage speed reducer, which can be used at industrial level, and incorporated in any type of machinery.

First, the possible transmissions on the market are going to be analysed, discarding those that do not suit the achievement of the objective of the work.

Once the best possible solution has been chosen, bearing in mind the design of the reducer, the necessary components are going to be selected to guarantee the correct operation of the same, for a certain number of hours of operation.

Afterwards, the different calculations are going to be carried out starting from the initial data, sizing the trees, gears and bearings and then perform a simulation of operation.

It should be noted, that both directions of rotation are going to be taken into account in the operating hypothesis, since the gears used transmit axial forces of variable direction, according to their direction of rotation.

On the other hand, we are going to study both lateral deflection and fatigue behaviour in the most critical sections of each tree, as well as the efforts transmitted by helical gears.

Finally, a detailed budget is going to be made for each of the components of the reducer, thus reflecting the final production cost.

Finally, we are going to carry out both dimensioned drawings of assembly and cutting, to define completely the geometry and dimensions of the elements that compose the speed reducer.



# RESUM

**“Disseny i càlcul d'un reductor de velocitat amb relació de transmissió 7.1 i parell màxim a l'eixida de 4500 Nm”.**

L'objectiu del present treball final de grau és el de dissenyar i calcular un reductor de velocitat de dos etapes, que va a ser utilitzat a nivell industrial, i incorporat en qualsevol tipus de maquinària.

Primerament, es van a analitzar les possibles transmissions existents en el mercat, descartant les que no s'adeqüen a la consecució de l'objectiu del treball.

Una vegada triada la millor solució possible i tenint present el disseny del reductor, es va a procedir a seleccionar els components necessaris que garantisquen el correcte funcionament d'aquest, per a un determinat nombre d'hores de funcionament.

Posteriorment, es van a realitzar els diferents càlculs necessaris partint de les dades inicials, dimensionant els arbres, engranatges i rodaments per a posteriorment realitzar una simulació de funcionament.

Cal destacar, que es van a tindre en compte tots dos sentits de gir en les hipòtesis de funcionament, ja que els engranatges utilitzats transmeten esforços axials de direcció variable, segons el seu sentit de gir.

D'altra banda, es van a estudiar tant la deflexió lateral com el comportament a fatiga en les seccions més crítiques de cada arbre, així com els esforços transmesos pels engranatges helicoïdals.

Finalment, es va a confeccionar un pressupost detallat de cadascun dels components del reductor, reflectint d'aquesta manera el cost de producció final.

Finalment, es van a realitzar tant plans fitats de conjunt com d'especejament, per a definir completament la geometria i dimensions dels elements que componen el reductor de velocitat.



# ÍNDICE GENERAL

|   |           |
|---|-----------|
| RESUMEN.....  | 3         |
| SUMMARY.....  | 5         |
| RESUM.....  | 7         |
| ABREVIATURAS.....   | 13        |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....                                    | 17        |
| ÍNDICE DE TABLAS.....                                     | 20        |
| <br>  |           |
| <b>I. MEMORIA DESCRIPTIVA.....</b>                        | <b>23</b> |
| I.1. INTRODUCCIÓN.....                                    | 25        |
| I.1.1. ANTECEDENTES.....                                  | 26        |
| I.1.1.1. NECESIDADES Y CONDICIONES.....                   | 28        |
| I.1.1.2. SOLUCIONES ALTERNATIVAS.....                     | 29        |
| I.1.1.2.1. TRANSMISIÓN POR CORREAS.....                   | 30        |
| I.1.1.2.2. TRANSMISIÓN POR CADENAS.....                   | 31        |
| I.1.1.2.3. TRANSMISIÓN POR ENGRANAJES.....                | 32        |
| I.1.2. JUSTIFICACIÓN.....                                 | 35        |
| I.2. OBJETIVOS.....                                       | 36        |
| I.2.1. OBJETIVOS GENERALES.....                           | 36        |
| I.2.2. OBJETIVOS PARTICULARES.....                        | 36        |
| I.3. DESARROLLO DEL TRABAJO.....                          | 37        |
| I.3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL REDUCTOR.....              | 37        |
| I.3.2. DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LOS COMPONENTES.....      | 39        |
| <br>  |           |
| <b>II. CÁLCULOS.....</b>                                  | <b>53</b> |
| II.1. INTRODUCCIÓN.....                                   | 55        |
| II.2. DATOS DE PARTIDA.....                               | 55        |
| II.3. CÁLCULO DE ENGRANAJES.....                          | 56        |
| II.3.1. CÁLCULO DE DIÁMETROS POR DEFLEXIÓN TORSIONAL...57 |           |
| II.3.2. DIÁMETRO DE LOS ENGRANAJES.....                   | 59        |
| II.3.3. ANCHO DE LOS ENGRANAJES.....                      | 64        |
| II.4. DISEÑO DE LOS ÁRBOLES.....                          | 67        |

|   |            |
|---|------------|
| II.4.1. ESQUEMA DE LOS ÁRBOLES Y FUNCIONAMIENTO.....                                  | 68         |
| II.4.1.1. FUERZAS EN SENTIDO HORARIO.....   | 70         |
| II.4.1.2. FUERZAS EN SENTIDO ANTIHORARIO.....   | 85         |
| II.4.2. CÁLCULO DE LA DEFLEXIÓN.....  | 100        |
| II.4.3. CÁLCULO A FATIGA.....   | 103        |
| II.5. VISCOSIDAD DEL LUBRICANTE.....  | 112        |
| II.6. DIMENSIONADO DE RODAMIENTOS.....  | 114        |
| II.6.1. SELECCIÓN DE RODAMIENTOS.....   | 114        |
| II.6.2. CÁLCULO DE LA FUERZA EQUIVALENTE.....   | 115        |
| II.6.3. CÁLCULO DE LA VIDA DE LOS RODAMIENTOS.....                                    | 116        |
| II.6.4. MANTENIMIENTO Y SUSTITUCIÓN.....  | 118        |
| II.7. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.....   | 119        |
| II.8. CONCLUSIONES.....   | 120        |
| <b>III. PLIEGO DE CONDICIONES.....</b>  | <b>121</b> |
| III.1. INTRODUCCIÓN.....  | 123        |
| III.2. PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS.....  | 123        |
| III.2.1. MATERIALES.....  | 123        |
| III.2.1.1. ENGRANAJES.....  | 123        |
| III.2.1.2. ÁRBOLES.....   | 124        |
| III.2.1.3. CARCASA Y TAPAS DE CIERRE.....   | 124        |
| III.2.2. CONDICIONES DE EJECUCIÓN.....  | 125        |
| III.2.3. CONDICIONES DE MONTAJE.....  | 127        |
| III.2.4. CONDICIONES DE EMBALAJE Y TRANSPORTE.....                                    | 128        |
| III.3. PLIEGO DE CONDICIONES FACULTATIVAS.....  | 129        |
| III.3.1. DERECHOS Y OBLIGACIONES DEL CONTRATISTA.....                                 | 129        |
| III.3.2. DIRECCIÓN TÉCNICA.....   | 129        |
| III.3.3. LIBRO DE ÓRDENES.....  | 130        |
| III.3.4. COMIENZO, RITMO, PLAZO Y CONDICIONES DE LA<br>EJECUCIÓN DE LOS TRABAJOS..... | 130        |
| III.3.5. TRABAJOS DEFECTUOSOS Y MODIFICACIONES.....                                   | 131        |
| III.3.6. RECEPCIÓN PROVISIONAL.....   | 131        |
| III.3.7. PERÍODO DE GARANTÍA.....   | 131        |
| III.3.8. RECEPCIÓN DEFINITIVA.....  | 131        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>IV. PRESUPUESTO.....</b>                  | <b>133</b> |
| IV.1. INTRODUCCIÓN.....                      | 135        |
| IV.2. CUADRO DE PRECIOS.....                 | 135        |
| IV.2.1. MANO DE OBRA.....                    | 135        |
| IV.2.2. MATERIALES.....                      | 136        |
| IV.2.3. MAQUINARIA.....                      | 136        |
| IV.3. MEDICIONES.....                        | 137        |
| IV.4. PRECIOS DESCOMPUESTOS.....             | 139        |
| IV.5. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL..... | 143        |
| IV.6. PRESUPUESTO BASE DE CONTRATA.....      | 144        |
| IV.7. PRESUPUESTO TOTAL.....                 | 145        |
| <br>   |            |
| <b>V. NORMATIVA.....</b>                     | <b>147</b> |
| <br>   |            |
| <b>VI. PLANOS.....</b>                       | <b>151</b> |
| VI.01. CONJUNTO.....                         | 153        |
| VI.01.01-1. CARCASA.....                     | 154        |
| VI.01.01-2. CARCASA.....                     | 155        |
| VI.01.02. TAPA LATERAL IZQUIERDA.....        | 156        |
| VI.01.03. TAPA LATERAL DERECHA.....          | 157        |
| VI.01.04. TAPA SUPERIOR.....                 | 158        |
| VI.01.05. JUNTAS DE SELLADO.....             | 159        |
| VI.01.06. ÁRBOL DE ENTRADA.....              | 160        |
| VI.01.07. ÁRBOL INTERMEDIO.....              | 161        |
| VI.01.08. ÁRBOL DE SALIDA.....               | 162        |
| VI.01.09. ENGRANAJE 2.....                   | 163        |
| VI.01.10. ENGRANAJE 4.....                   | 164        |
| <br>   |            |
| <b>VII. ANEXOS.....</b>                      | <b>165</b> |
| ANEXO 1: ACEROS DE CONSTRUCCIÓN.....         | 167        |
| ANEXO 2: FUNDICIÓN NODULAR.....              | 168        |
| ANEXO 3: RODAMIENTOS SKF.....                | 169        |
| ANEXO 4: LUBRICANTE ISO VG 460.....          | 170        |
| ANEXO 5: CHAVETAS PARALELAS.....             | 171        |

|  |     |
|--|-----|
| ANEXO 6: TORNILLERÍA.....  | 172 |
| ANEXO 7: DUREZA BRINELL PARA MATERIALES.....                     | 173 |
| ANEXO 8: COEFICIENTES DE TENSIÓN LÍMITE A FLEXIÓN.....           | 174 |
| ANEXO 9: COEFICIENTES DE TENSIÓN LÍMITE A FALLO SUPERFICIAL..... | 175 |
| ANEXO 10: COEFICIENTE DE APLICACIÓN $K_A$ .....                  | 176 |
| ANEXO 11: FACTOR DE SUPERFICIE $K_A$ .....                       | 176 |
| ANEXO 12: FACTOR DE TAMAÑO $K_B$ .....                           | 177 |
| ANEXO 13: FACTOR DE CARGA $K_C$ .....                            | 177 |
| ANEXO 14: FACTOR DE CONFIABILIDAD $K_E$ .....                    | 177 |
| ANEXO 15: COEFICIENTE DE CONCENTRADOR DE TENSIONES $K_T$ .....   | 178 |
| ANEXO 16: FACTOR DE CONFIABILIDAD $a_1$ .....                    | 178 |
| ANEXO 17: FACTOR DE MODIFICACIÓN DE LA VIDA ÚTIL $a_{SKF}$ ..... | 179 |
| ANEXO 18: DEFORMACIONES PERMISIBLES DE ÁRBOLES.....              | 180 |
| ANEXO 19: TABLA DE FACTORES DE SEGURIDAD.....                    | 181 |
| ANEXO 20: TABLA DE MÓDULOS NORMALIZADOS.....                     | 182 |

# ABREVIATURAS

|                    |   |
|--------------------|---|
| $^{\circ}\text{C}$ | Grado centígrado                            |
| $\alpha_n$         | Ángulo de presión normal                    |
| $\alpha_t$         | Ángulo de presión tangencial                |
| $\beta$            | Ángulo de inclinación                       |
| $\varepsilon$      | Grado de recubrimiento                      |
| $\eta$             | Rendimiento                                 |
| $\rho$             | Densidad                                    |
| $\omega$           | Velocidad angular                           |
| $a_1$              | Factor de fiabilidad                        |
| $a_{iso}$          | Factor por condiciones de trabajo           |
| $a$                | Distancia entre centros                     |
| $b$                | Anchura de engranaje                        |
| $C$                | Carga dinámica                              |
| $C_0$              | Carga estática                              |
| $d_p$              | Diámetro primitivo                          |
| $e$                | Factor de cálculo                           |
| $E$                | Módulo elástico                             |
| $F$                | Fuerza equivalente                          |
| $F_a$              | Fuerza axial                                |
| $F_r$              | Fuerza radial                               |
| $F_t$              | Fuerza tangencial                           |
| $F_x$              | Fuerza en el eje X                          |
| $G$                | Módulo de rigidez torsional                 |
| $HB$               | Dureza Brinell                              |
| $i$                | Relación de transmisión                     |
| $i_1$              | Relación de transmisión de la primera etapa |
| $i_2$              | Relación de transmisión de la segunda etapa |
| $i_{m\acute{a}x}$  | Relación de transmisión máxima              |
| $i_{total}$        | Relación de transmisión total               |
| $K_A$              | Coefficiente de aplicación                  |
| $K_a$              | Factor de superficie                        |

|               |  |
|---------------|--|
| $K_b$         | Factor de tamaño                                   |
| $K_c$         | Factor de tipo de carga                            |
| $K_d$         | Factor de temperatura                              |
| $K_e$         | Factor de confiabilidad                            |
| $K_f$         | Factor de límite                                   |
| $K_{H\alpha}$ | Coeficiente de distribución de cargas transversal  |
| $K_{H\beta}$  | Coeficiente de distribución de cargas longitudinal |
| kN            | Kilonewton   |
| kW            | Kilovatio  |
| $K_v$         | Coeficiente dinámico                               |
| $L_{10}$      | Cálculo de vida con probabilidad de fallo del 10%  |
| M             | Momento flector                                    |
| m/s           | Metros por segundo                                 |
| $m_n$         | Módulo normal                                      |
| $N_{flanco}$  | Seguridad en el flanco                             |
| Nm            | Newton por metro                                   |
| $N_{pie}$     | Seguridad en el pie del diente                     |
| P             | Potencia   |
| q             | Constante para rodillos cónicos                    |
| rad           | Radianes   |
| rad/s         | Radianes por segundo                               |
| rpm           | Revoluciones por minuto                            |
| $S_{FL}$      | Límite de resistencia nominal                      |
| $S_{HL}$      | Tensión de contacto                                |
| $S_u$         | Límite de rotura                                   |
| $S_y$         | Límite elástico                                    |
| T             | Par torsor   |
| $\nu$         | Coeficiente de Poisson                             |
| X             | Coeficiente de seguridad                           |
| Y             | Factor de fuerza axial                             |
| $Y_{Fa}$      | Coeficiente de forma                               |
| $Y_{sa}$      | Coeficiente de concentración de tensiones          |
| $Y_{\beta}$   | Factor de inclinación                              |
| $Y_{\delta}$  | Coeficiente de conducción                          |

|            |                                  |
|------------|----------------------------------|
| $z$        | Número de dientes                |
| $Z_E$      | Coefficiente elástico            |
| $Z_H$      | Coefficiente geométrico          |
| $Z_\beta$  | Coefficiente de ángulo de hélice |
| $Z_\delta$ | Coefficiente de conducción       |



# ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: Esquema cinemático del reductor de velocidad.....   | 25 |
| Figura 2: Reductor de velocidad con engranajes planetarios.....   | 26 |
| Figura 3: Reductor de velocidad con engranajes rectos.....  | 27 |
| Figura 4: Reductor de velocidad con engranajes helicoidales.....  | 27 |
| Figura 5: Reductor de velocidad con tornillo sinfín y corona.....   | 28 |
| Figura 6: Transmisión accionada por correas planas.....   | 31 |
| Figura 7: Transmisión accionada por cadena.....   | 32 |
| Figura 8: Engranajes cilíndricos con dentado recto.....   | 33 |
| Figura 9: Engranajes de tipo cónico.....  | 33 |
| Figura 10: Transmisión formada por corona y tornillo sinfín.....  | 34 |
| Figura 11: Engranajes cilíndricos con dentado helicoidal.....   | 35 |
| Figura 12: Configuración del reductor de velocidad.....   | 37 |
| Figura 13: Posicionamiento de los rodamientos en los árboles.....   | 44 |
| Figura 14: Características del retén elastómero tipo A NBR.....   | 49 |
| Figura 15: Mirillas de nivel de aceite de poliamida termoplástica.....                                    | 49 |
| Figura 16: Tornillos tapón de acero con hexágono interior y junta NBR.....                                | 50 |
| Figura 17: Secciones analizadas del árbol de entrada.....   | 68 |
| Figura 18: Secciones analizadas del árbol intermedio.....   | 68 |
| Figura 19: Secciones analizadas del árbol de salida.....  | 69 |
| Figura 20: Fuerzas resultantes en engranajes helicoidales.....  | 69 |
| Figura 21: Solicitaciones del árbol de entrada.....   | 70 |
| Figura 22: Diagrama de momentos flectores y torsores del árbol de entrada .....                           | 72 |
| Figura 23: Diagrama de esfuerzos axiales del árbol de entrada .....                                       | 72 |
| Figura 24: Diagrama de deflexión lineal del árbol de entrada .....  | 73 |
| Figura 25: Diagrama de deflexión y torsión angular del árbol de entrada .....                             | 73 |
| Figura 26: Diagrama de tensiones de referencia según "Tresca" y "von Mises" del árbol de entrada .....    | 74 |
| Figura 27: Diagrama de grado de utilización estático y de resistencia continua del árbol de entrada ..... | 74 |
| Figura 28: Diagrama de "Goodman" del árbol de entrada.....  | 75 |
| Figura 29: Solicitaciones para el árbol intermedio del árbol intermedio .....                             | 75 |
| Figura 30: Diagrama de momentos flectores y torsores del árbol intermedio .....                           | 77 |
| Figura 31: Diagrama de esfuerzos axiales del árbol intermedio .....                                       | 77 |
| Figura 32: Diagrama de deflexión lineal del árbol intermedio .....  | 78 |
| Figura 33: Diagrama de deflexión y torsión angular del árbol intermedio .....                             | 78 |
| Figura 34: Diagrama de tensiones de referencia según "Tresca" y "von Mises" del árbol intermedio .....    | 79 |
| Figura 35: Diagrama de grado de utilización estático y de resistencia continua del árbol intermedio ..... | 79 |
| Figura 36: Diagrama de "Goodman" del árbol intermedio.....  | 80 |
| Figura 37: Solicitaciones para el árbol de salida del árbol de salida.....                                | 80 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 38: Diagrama de momentos flectores y torsores del árbol de salida .....                            | 82  |
| Figura 39: Diagrama de esfuerzos axiales del árbol de salida .....  | 82  |
| Figura 40: Diagrama de deflexión lineal del árbol de salida .....   | 83  |
| Figura 41: Diagrama de deflexión y torsión angular del árbol de salida .....                              | 83  |
| Figura 42: Diagrama de tensiones de referencia según "Tresca" y "von Mises" del árbol de salida .....     | 84  |
| Figura 43: Diagrama de grado de utilización estático y de resistencia continua del árbol de salida .....  | 84  |
| Figura 44: Diagrama de "Goodman" del árbol de salida.....   | 85  |
| Figura 45: Solicitaciones del árbol de entrada.....   | 85  |
| Figura 46: Diagrama de momentos flectores y torsores del árbol de entrada .....                           | 87  |
| Figura 47: Diagrama de esfuerzos axiales del árbol de entrada .....                                       | 87  |
| Figura 48: Diagrama de deflexión lineal del árbol de entrada .....  | 88  |
| Figura 49: Diagrama de deflexión y torsión angular del árbol de entrada .....                             | 88  |
| Figura 50: Diagrama de tensiones de referencia según "Tresca" y "von Mises" del árbol de entrada .....    | 89  |
| Figura 51: Diagrama de grado de utilización estático y de resistencia continua del árbol de entrada ..... | 89  |
| Figura 52: Diagrama de "Goodman" del árbol de entrada.....  | 90  |
| Figura 53: Solicitaciones para el árbol intermedio del árbol intermedio .....                             | 90  |
| Figura 54: Diagrama de momentos flectores y torsores del árbol intermedio .....                           | 92  |
| Figura 55: Diagrama de esfuerzos axiales del árbol intermedio .....                                       | 92  |
| Figura 56: Diagrama de deflexión lineal del árbol intermedio .....  | 93  |
| Figura 57: Diagrama de deflexión y torsión angular del árbol intermedio .....                             | 93  |
| Figura 58: Diagrama de tensiones de referencia según "Tresca" y "von Mises" del árbol intermedio .....    | 94  |
| Figura 59: Diagrama de grado de utilización estático y de resistencia continua del árbol intermedio ..... | 94  |
| Figura 60: Diagrama de "Goodman" del árbol intermedio.....  | 95  |
| Figura 61: Solicitaciones para el árbol de salida del árbol de salida.....                                | 95  |
| Figura 62: Diagrama de momentos flectores y torsores del árbol de salida .....                            | 97  |
| Figura 63: Diagrama de esfuerzos axiales del árbol de salida .....  | 97  |
| Figura 64: Diagrama de deflexión lineal del árbol de salida .....   | 98  |
| Figura 65: Diagrama de deflexión y torsión angular del árbol de salida .....                              | 98  |
| Figura 66: Diagrama de tensiones de referencia según "Tresca" y "von Mises" del árbol de salida .....     | 99  |
| Figura 67: Diagrama de grado de utilización estático y de resistencia continua del árbol de salida .....  | 99  |
| Figura 68: Diagrama de "Goodman" del árbol de salida.....   | 100 |
| Figura 69: Secciones analizadas del árbol de entrada.....   | 106 |
| Figura 70: Secciones analizadas del árbol intermedio.....   | 108 |
| Figura 71: Secciones analizadas del árbol de salida.....  | 110 |
| Figura 72: Diagrama de viscosidades cinemáticas.....  | 113 |
| Figura 73: Clasificación ISO de viscosidad.....   | 113 |
| Figura 74: Rodamientos de rodillos cónicos.....   | 114 |
| Figura 75: Fuerzas absorbidas por los rodamientos de rodillos cónicos.....                                | 115 |



# ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1: Propiedades mecánicas del acero 34CrMo4.....                             | 40 |
| Tabla 2: Propiedades mecánicas del acero 20CrMo4.....                             | 40 |
| Tabla 3: Propiedades mecánicas del acero Ck 45.....                               | 41 |
| Tabla 4: Características de la primera etapa de reducción.....                    | 41 |
| Tabla 5: Características de la segunda etapa de reducción.....                    | 42 |
| Tabla 6: Relación de rodamientos utilizados en el reductor de velocidad.....      | 44 |
| Tabla 7: Características del rodamiento izquierdo del árbol de entrada.....       | 45 |
| Tabla 8: Características del rodamiento derecho del árbol de entrada.....         | 45 |
| Tabla 9: Características del rodamiento izquierdo del árbol intermedio.....       | 45 |
| Tabla 10: Características del rodamiento derecho del árbol intermedio.....        | 46 |
| Tabla 11: Características del rodamiento izquierdo del árbol de salida.....       | 46 |
| Tabla 12: Características del rodamiento derecho del árbol de salida.....         | 46 |
| Tabla 13: Características de las chavetas planas paralelas DIN 6885.....          | 47 |
| Tabla 14: Características de los casquillos cilíndricos sinterizados.....         | 48 |
| Tabla 15: Características de los retenes elastómeros de tipo A NBR.....           | 48 |
| Tabla 16: Características mecánicas de la fundición nodular ferrítica GG-25.....  | 51 |
| Tabla 17: Valores iniciales para realizar los cálculos.....                       | 55 |
| Tabla 18: Velocidad y par torsor desarrollado por cada árbol.....                 | 56 |
| Tabla 19: Características de las etapas de reducción.....                         | 57 |
| Tabla 20: Dimensiones de los chaveteros de los engranajes.....                    | 59 |
| Tabla 21: Parámetros de los engranajes para que no se produzca interferencia..... | 62 |
| Tabla 22: Resultados para la primera etapa de reducción.....                      | 63 |
| Tabla 23: Resultados para la segunda etapa de reducción.....                      | 63 |
| Tabla 24: Resumen de las dos etapas de reducción.....                             | 64 |
| Tabla 25: Resultados de la iteración para la primera etapa.....                   | 66 |
| Tabla 26: Resultados de la iteración para la segunda etapa.....                   | 67 |
| Tabla 27: Componentes de la fuerza normal de contacto.....                        | 70 |
| Tabla 28: Reacciones en los apoyos del árbol de entrada.....                      | 71 |
| Tabla 29: Análisis de las secciones del árbol de entrada.....                     | 71 |
| Tabla 30: Reacciones en los apoyos del árbol intermedio.....                      | 76 |
| Tabla 31: Análisis de las secciones del árbol intermedio.....                     | 76 |
| Tabla 32: Reacciones en los apoyos del árbol de salida.....                       | 81 |
| Tabla 33: Análisis de las secciones del árbol de salida.....                      | 81 |
| Tabla 34: Reacciones en los apoyos del árbol de entrada.....                      | 86 |
| Tabla 35: Análisis de las secciones del árbol de entrada.....                     | 86 |
| Tabla 36: Reacciones en los apoyos del árbol intermedio.....                      | 91 |
| Tabla 37: Análisis de las secciones del árbol intermedio.....                     | 91 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 38: Reacciones en los apoyos del árbol de salida.....  | 96  |
| Tabla 39: Análisis de las secciones del árbol de salida.....   | 96  |
| Tabla 40: Resultados de la deflexión para el árbol de entrada en giro horario.....                           | 101 |
| Tabla 41: Resultados de la deflexión para el árbol de entrada en giro antihorario.....                       | 101 |
| Tabla 42: Resultados de la deflexión para el árbol intermedio en giro horario.....                           | 102 |
| Tabla 43: Resultados de la deflexión para el árbol intermedio en giro antihorario.....                       | 102 |
| Tabla 44: Resultados de la deflexión para el árbol de salida en giro horario.....                            | 102 |
| Tabla 45: Resultados de la deflexión para el árbol de salida en giro antihorario.....                        | 103 |
| Tabla 46: Factores de seguridad para las secciones críticas del árbol de entrada en sentido horario.....     | 106 |
| Tabla 47: Diámetro mínimo de la sección del árbol de entrada en sentido horario.....                         | 106 |
| Tabla 48: Factores de seguridad para las secciones críticas del árbol de entrada en sentido antihorario..... | 107 |
| Tabla 49: Diámetro mínimo de la sección del árbol de entrada en sentido antihorario.....                     | 107 |
| Tabla 50: Factores de seguridad para las secciones críticas del árbol intermedio en sentido horario.....     | 108 |
| Tabla 51: Diámetro mínimo de la sección del árbol intermedio en sentido horario.....                         | 109 |
| Tabla 52: Factores de seguridad para las secciones críticas del árbol intermedio en sentido antihorario..... | 109 |
| Tabla 53: Diámetro mínimo de la sección del árbol intermedio en sentido antihorario.....                     | 109 |
| Tabla 54: Factores de seguridad para las secciones críticas del árbol de salida en sentido horario.....      | 110 |
| Tabla 55: Diámetro mínimo de la sección del árbol de salida en sentido horario.....                          | 111 |
| Tabla 56: Factores de seguridad para las secciones críticas del árbol de salida en sentido antihorario.....  | 111 |
| Tabla 57: Diámetro mínimo de la sección del árbol de salida en sentido antihorario.....                      | 111 |
| Tabla 58: Fuerza equivalente de los rodamientos seleccionados.....   | 116 |
| Tabla 59: Resultados para la vida nominal de los rodamientos.....  | 117 |
| Tabla 60: Duración de vida recomendada para reductores de velocidad.....                                     | 118 |



# I. MEMORIA DESCRIPTIVA



## I.1. INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente trabajo final de grado es el de diseñar y calcular un reductor de velocidad de dos etapas, que será utilizado para realizar un determinado proceso industrial, y podrá ser incorporado en cualquier tipo de maquinaria, ya que se emplearán medidas normalizadas.

El reductor estará conectado a un motor eléctrico en el árbol de entrada, y a la maquinaria industrial correspondiente en el árbol de salida, mediante acoplamientos elásticos que garanticen la correcta unión y alineación entre elementos. La transmisión de potencia o par, se realizará mediante chavetas rectangulares paralelas en ambos casos. En la siguiente figura puede observarse un esquema básico de un reductor de velocidad con los elementos básicos de funcionamiento:

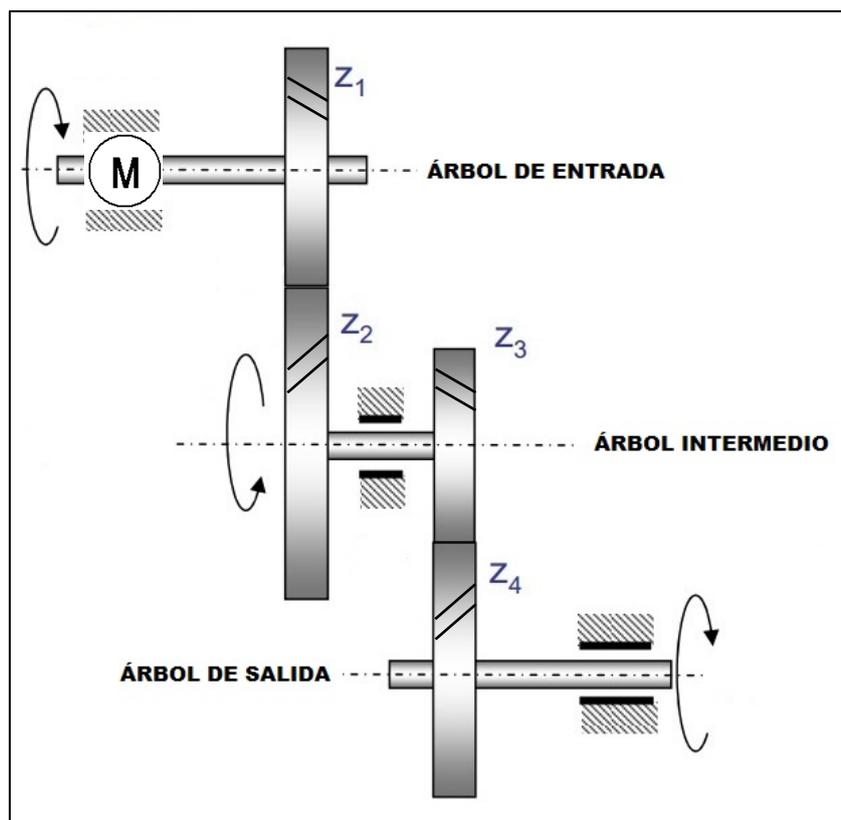


Figura 1: Esquema cinemático del reductor de velocidad.

### I.1.1. ANTECEDENTES

En el mercado actual, pueden encontrarse diferentes tipos de reductores de velocidad, dependiendo de la finalidad de su utilización. Por otro lado, también existen multiplicadores de velocidad, que tienen la función de aumentar la velocidad, y por tanto reducir el par a la salida de los mismos.

Los principales tipos de reductores y su campo de aplicación son los siguientes:

- Reductor planetario. Compuesto por hasta tres engranajes satélites, utilizado para transmisiones automáticas de gran precisión y fiabilidad.



*Figura 2: Reductor de velocidad con engranajes planetarios.*

- Reductor de engranajes rectos. Los engranajes se sitúan montados sobre ejes paralelos y es utilizado para transmitir movimiento entre árboles cercanos. Probablemente es el más común, para transmitir gran cantidad de potencia y una relación de velocidad constante y estable. Resulta más económico que el reductor de engranajes helicoidales, pero genera un alto nivel de ruido.



Figura 3: Reductor de velocidad con engranajes rectos.

- Reductor de engranajes helicoidales. Los engranajes se sitúan montados sobre ejes paralelos o cruzados generalmente a  $90^\circ$ . Opera de una forma más suave y silenciosa que el reductor de engranajes rectos. Por otro lado, son más duraderos e ideales para aplicaciones de elevada carga. Como los esfuerzos se distribuyen sobre varios ejes, se genera un menor desgaste global de los componentes.



Figura 4: Reductor de velocidad con engranajes helicoidales.

- Reductor sinfín corona. La corona y el tornillo sinfín se sitúan cruzados a  $90^\circ$ . Operan sobre un ratio de reducción de velocidad elevado, ya que no necesitan la aplicación de varios engranajes reductores. Por un lado, precisan de un tamaño más reducido, ya que evitan la utilización de trenes de engranajes, pero por otro lado, la fricción del deslizamiento provoca elevadas temperaturas y debido a que no es un mecanismo de precisión, se suele perder tiempo entre ciclos de funcionamiento.



Figura 5: Reductor de velocidad con tornillo sinfín y corona.

### I.1.1.1. NECESIDADES Y CONDICIONES

La potencia  $P$  que transmitirá el reductor de velocidad es de 76 kW, y procederá de un motor eléctrico trifásico de jaula de ardilla, conectado mediante un acoplamiento elástico, que girará a  $1100 \pm 5\%$  rpm.

Se garantizará una velocidad uniforme y constante a la salida del reductor de  $154 \pm 5\%$  rpm, y consecuentemente un par en el eje de salida del reductor de  $4500 \pm 2\%$  Nm.

Empleando la siguiente expresión, se determina la relación de transmisión total necesaria de  $i = 7.1$ , que será desarrollada más ampliamente en el capítulo de cálculos (II), ya que está compuesta por dos relaciones de transmisión correspondientes a cada pareja de engranajes.

$$i_{\text{total}} = \frac{\omega_{\text{entrada}}}{\omega_{\text{salida}}}$$

El reductor de velocidad se encontrará en unas condiciones ambientales de temperatura de trabajo de  $22,5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Debido al proceso industrial que estará desarrollando el reductor cuando esté acoplado a la maquinaria, éste se encontrará sometido a un ambiente de trabajo libre de polvo o residuos en suspensión.

Por otro lado, el motor eléctrico proporcionará una carga uniforme y generará bajas vibraciones en la transmisión.

La maquinaria industrial que será accionada por el reductor de velocidad, generará choques ligeros o moderados cuando realice su actividad.

Atendiendo a los condicionantes en lo que al diseño del reductor se refiere, el tamaño del mismo será lo más compacto posible, con el fin de reducir el volumen y el coste de los materiales de fabricación.

En lo que respecta al mantenimiento, el primer cambio de aceite del cárter será realizado tras las primeras 600 horas de funcionamiento, y en lo sucesivo, el aceite será reemplazado cada 4000 horas de funcionamiento.

Los rodamientos serán reemplazados en su totalidad cada 35000 horas de funcionamiento, independientemente del estado de desgaste de los mismos, respetando las indicaciones del fabricante.

El presupuesto del reductor deberá ser lo más ajustado posible, sin descuidar la confiabilidad global de los elementos, que será del 99%.

### **I.1.1.2. SOLUCIONES ALTERNATIVAS**

Debido a que los requerimientos de par y velocidad para realizar determinados procesos industriales son muy relativos, resulta difícil que los motores eléctricos cumplan con dichas necesidades, sin la utilización de un sistema mecánico que sea capaz de regular la velocidad que éstos proporcionan.

A continuación, se analizarán los diversos mecanismos que pueden ofrecer una solución para reducir la velocidad proporcionada por el motor eléctrico, aumentando de este modo el par, para accionar la maquinaria industrial.

### I.1.1.2.1. TRANSMISIONES POR CORREAS

Éste tipo de transmisión, está dentro del grupo de las transmisiones por rozamiento de contacto flexible, abarcando toda la gama de correas planas y trapezoidales.

Pueden utilizarse tanto en árboles paralelos como cruzados, aunque en el último caso, el desgaste de las correas resulta elevado.

Las transmisiones por correas, poseen un rendimiento comprendido entre el 95% y 98%, ofreciendo unos rangos de relaciones de transmisión que oscilan entre  $i = 6$ , e  $i = 15$ , dependiendo de la utilización de rodillos tensores para la obtención de la mayor relación de transmisión.

Las correas trapezoidales, poseen una capacidad de transmisión tres veces superior a las correas planas, ofreciendo un deslizamiento casi nulo y un rendimiento global que puede llegar hasta el 98%.

Este tipo de correas solamente puede utilizarse para relaciones de transmisión menores a 10 y velocidades de funcionamiento que no superen los 50 m/s.

Las correas dentadas, pertenecen al grupo de las transmisiones flexibles por engranaje, y poseen características parecidas a las cadenas salvo por algunas diferencias.

Por un lado, son capaces de operar bajo temperaturas ambientales de hasta 80 °C y a velocidades de hasta 60 m/s, pero por otro lado, necesitan un mayor espacio, generan un mayor nivel de ruido y son menos adecuadas para cargas con impactos, ya que son transmisoras de vibraciones que provengan de los árboles que conectan.

Las principales ventajas que presentan las correas son:

- Bajo coste respecto a otras transmisiones.
- Reducido nivel de ruido.
- Absorción elástica frente a choques o sobrecargas de funcionamiento.

Los principales inconvenientes que presentan las correas son:

- Relación de transmisión inexacta debido al deslizamiento, dependiendo de la carga que soporte.
- Sobrecarga en los rodamientos de fijación por la necesidad de tensión previa, provocando un desgaste prematuro de los mismos.
- Duración limitada, supeditada al ambiente en el que se encuentre operando.

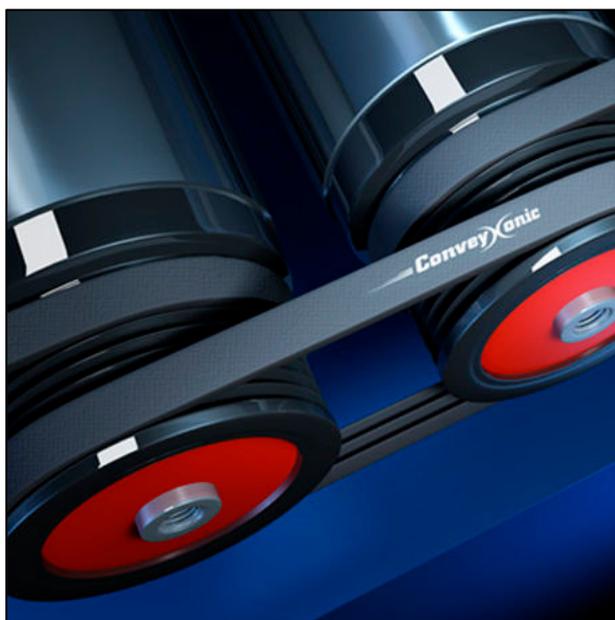


Figura 6: Transmisión accionada por correas planas.

#### I.1.1.2.2. TRANSMISIONES POR CADENAS

Éste tipo de transmisión, se encuentra dentro del grupo de las transmisiones por engrane de contacto flexible, y se caracteriza principalmente por la unión de dos o más ruedas dentadas o piñones por medio de una cadena.

Las transmisiones por cadenas solamente pueden utilizarse en árboles paralelos, generalmente cuando la distancia entre ejes es elevada.

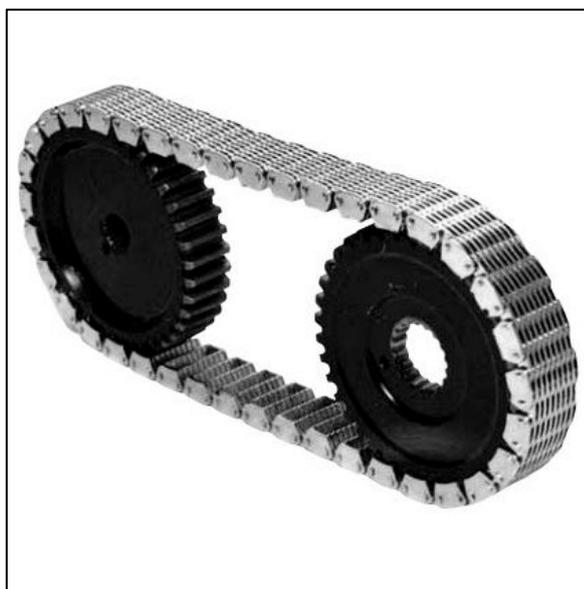
Por un lado, pueden llegar a alcanzar una relación de transmisión de hasta 6, obteniendo un rendimiento que podría llegar hasta el 98%.

Las principales ventajas que presentan las cadenas son:

- Relación de transmisión constante.
- Operan en ambientes agresivos sin necesidad de lubricación constante.
- Pueden accionarse múltiples piñones con una sola cadena.
- Reducido coste de fabricación.

Los principales inconvenientes que presentan las cadenas son:

- Poseen una duración limitada y no trabajan elásticamente.
- Presenta limitaciones de potencia y velocidad máxima de funcionamiento.
- Necesitan amplios espacios y protección frente a partículas en suspensión.



*Figura 7: Transmisión accionada por cadena.*

### **I.1.1.2.3. TRANSMISIONES POR ENGRANAJES**

Las transmisiones por engranajes cilíndricos, resultan las más comunes y utilizadas debido a la gran variedad de relaciones de transmisión que poseen.

Éstas pueden alcanzar en determinadas circunstancias valores de hasta  $i = 20$ , con un rendimiento en cada etapa de transmisión que puede oscilar entre el 96% y 99%.

Los engranajes cilíndricos con dentado recto, por una parte, resultan más económicos de fabricar y es más sencillo su cálculo, pero por otra parte, generan un alto nivel de ruido así como un alto nivel de vibraciones en las transmisiones.



*Figura 8: Engranajes cilíndricos con dentado recto.*

Los engranajes cónicos, generalmente son utilizados en ejes que se cortan en algún punto, y poseen una relación de transmisión que puede llegar hasta  $i = 6$ .

También existen este tipo de engranajes con el dentado en espiral cuando se requiere una aplicación de cargas elevadas.



*Figura 9: Engranajes de tipo cónico.*

Las transmisiones compuestas por un tornillo sinfín y una corona, se utilizan normalmente para árboles que se cruzan, y tienen un rango de relación de transmisión que oscila entre  $i = 1$  y más de  $i = 100$  por etapa. El rendimiento de estas transmisiones, puede variar del 45% al 97%, disminuyendo cuanto más se aumente la relación de transmisión.



Figura 10: Transmisión formada por corona y tornillo sinfín.

Los engranajes cilíndricos con dentado helicoidal, generalmente son utilizados para realizar un funcionamiento silencioso y más preciso que con el resto de engranajes cilíndricos.

Por un lado, este tipo de engranajes transmiten movimiento prácticamente sin aportar vibraciones, pero por otro lado, transmiten a los árboles cargas radiales y axiales que deben tenerse en cuenta al realizar el cálculo de los mismos.

Las principales ventajas que presentan los engranajes son:

- Transmiten una relación de transmisión constante que no depende de la carga aplicada.
- Fiabilidad, duración y dimensiones reducidas.
- Alto rendimiento con reducido mantenimiento.
- Gran capacidad para soportar sobrecargas.

Los principales inconvenientes que presentan los engranajes son:

- Coste elevado de fabricación
- Alto nivel de ruido a excepción de los de dentado helicoidal.
- Obligación del uso de acoplamiento elásticos para absorber choques y posibles vibraciones.



*Figura 11: Engranajes cilíndricos con dentado helicoidal.*

### I.1.2. JUSTIFICACIÓN

La solución final adoptada para el diseño del reductor de velocidad, ha sido la transmisión de contacto directo por engranajes cilíndricos con dentado helicoidal.

Se ha escogido este tipo de transmisión como la mejor solución a adoptar, debido a que cumple totalmente los requisitos y necesidades que se desean abordar en el diseño del reductor.

Este tipo de engranajes garantizan la relación de transmisión y par necesarios, tienen un elevado rendimiento, un mantenimiento muy reducido y se transmite un movimiento de forma suave y uniforme, carente apenas de vibraciones.

Otro de los motivos por los que se ha escogido esta solución, es la configuración compacta que se puede construir con este tipo de engranajes al posicionarlos en el interior de la caja reductora, y el bajo nivel de ruido que genera este tipo de transmisión.

## I.2. OBJETIVOS

### I.2.1. OBJETIVOS GENERALES

El objetivo del presente trabajo es el de diseñar y calcular un reductor de velocidad de dos etapas, que será utilizado para realizar un determinado proceso relacionado con la industria alimentaria, y podrá ser incorporado en cualquier tipo de maquinaria, ya que se emplearán medidas normalizadas.

Por un lado, el reductor aumentará el par en el árbol de salida, que será el que accione directamente la maquinaria industrial correspondiente, la cual necesita un par mayor del que proporciona directamente el motor eléctrico. Y, por otro lado, se reducirá la velocidad nominal de accionamiento que proviene del motor eléctrico, ya que ésta sería excesiva para aplicarla directamente sobre la maquinaria industrial que se desea accionar.

### I.2.2. OBJETIVOS PARTICULARES

Como principales objetivos, se puede destacar la consecución de una transmisión de alto rendimiento, con una relación de transmisión de  $i = 7.1$  lo más exacta posible, ya que se desea un aporte de par y velocidad constante y uniforme para realizar el proceso industrial para el cual está destinado el reductor de velocidad.

Concretamente, por una parte, se desea aumentar el par proporcionado por el motor eléctrico de 633,8 Nm hasta 4500 Nm, y por otra parte, se desea reducir la velocidad de accionamiento de 1100 rpm hasta 154 rpm.

Por otro lado, se requiere de una transmisión silenciosa y suave, que no aporte vibraciones en exceso al resto de los elementos.

Otro de los principales objetivos, es la obtención de un reductor de velocidad lo más compacto y competitivo posible, frente a otros reductores comerciales existentes en el mercado, optimizando de este modo el espacio de montaje de los componentes alojados en la carcasa del reductor.

Por tanto, se pretende desarrollar un reductor de velocidad polivalente y adaptable, que esté destinado a realizar múltiples aplicaciones en el ámbito industrial.

## I.3. DESARROLLO DEL TRABAJO

### I.3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL REDUCTOR

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, se utilizarán en las dos etapas de reducción, dos trenes de engranajes cilíndricos con dentado helicoidal.

A pesar de poder realizarse la reducción en una sola etapa, siendo la relación de transmisión máxima para este tipo de engranajes de  $i_{\max} = 8$ , se escoge realizarlo en dos etapas, con la finalidad de reducir de este modo el tamaño de los engranajes.

El reductor de velocidad estará compuesto por dos etapas de engranajes cilíndricos con dentado helicoidal, que tendrá una relación de transmisión de  $i = 7.1$ .

En la parte superior, el árbol de entrada del reductor, será accionado por un motor eléctrico que aportará 76 kW de potencia, y una velocidad nominal de 1100 rpm.

En la parte inferior, el árbol de salida del reductor, transmitirá un par constante de 4500 Nm, y una velocidad de 154 rpm a la maquinaria que realizará el proceso industrial.

La siguiente figura, muestra la disposición que tendrán los principales elementos que componen el reductor de velocidad.

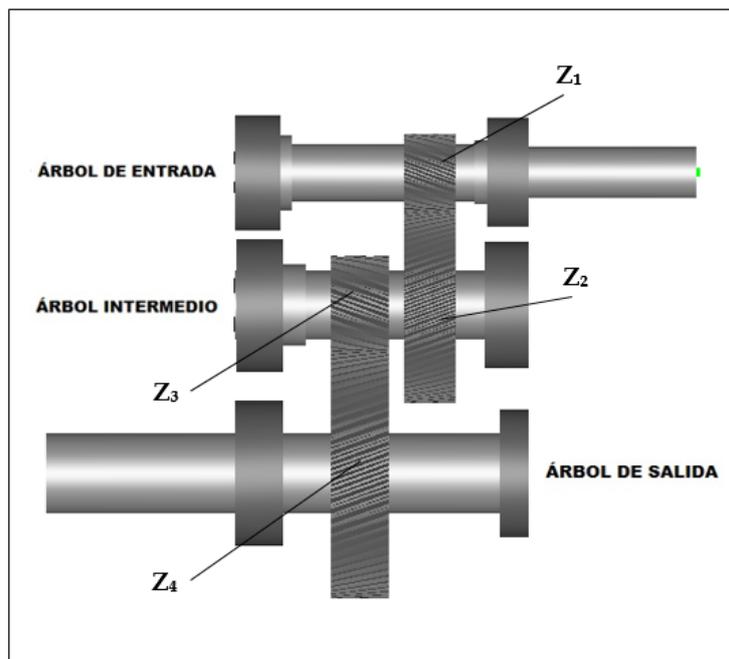


Figura 12: Configuración del reductor de velocidad

Por un lado, el reductor aumentará el par en el árbol de salida, que será el que accione directamente la maquinaria industrial correspondiente, la cual necesita un par mayor del que proporciona directamente el motor eléctrico.

Y, por otro lado, se reducirá la velocidad nominal de accionamiento que proviene del motor eléctrico, ya que ésta sería excesiva para aplicarla directamente sobre la maquinaria industrial que se desea accionar.

Los cuatro engranajes helicoidales, estarán posicionados sobre tres árboles paralelos entre sí, fijados radialmente mediante chavetas planas paralelas y axialmente mediante casquillos y cambios de sección, que a su vez también se utilizarán de fijación para los rodamientos.

El tipo de rodamientos que se utilizarán para soportar los tres árboles, será de rodillos cónicos, ya que esta clase de rodamientos soporta unas cargas elevadas a altas velocidades y lo más importante, son los que mejor absorben cargas axiales generadas por los engranajes helicoidales.

La lubricación de los diferentes elementos que se componen el reductor de velocidad, se realizará por barboteo, de tal manera que el lubricante cubra como máximo hasta el punto medio de los engranajes situados en el interior.

Con el fin de impedir la pérdida de lubricante, o la posible entrada de partículas en suspensión dentro del reductor, se utilizarán retenes elásticos de goma situados tanto en el árbol de entrada como en el árbol de salida, protegidos y fijados con las tapas exteriores de cierre.

Situados en ambas tapas de cierre, se emplearán juntas de estanqueidad para líquidos, que deberán reponerse si están deterioradas cuando se realice el mantenimiento y cambio de lubricante.

En la parte superior de la caja reductora, se encontrará una tapa atornillada, que será utilizada para realizar el montaje de los elementos que componen el reductor de velocidad, así como un tapón roscado para introducir el aceite necesario para la lubricación de los engranajes.

Para revisar periódicamente el nivel de lubricante de la carcasa, se dispondrá de un visor regulado transparente en uno de los laterales del reductor, así como un tapón roscado para realizar el vaciado de aceite.

### I.3.2. DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LOS COMPONENTES

Para comenzar, se describirán las dos etapas de reducción por separado, detallando cada uno de los elementos que las componen.

La primera etapa, está formada por dos engranajes cilíndricos con dentado helicoidal, situados en el árbol de entrada (piñón) y en el árbol intermedio (rueda) respectivamente. Respecto al diseño de los engranajes, se ha basado principalmente en dimensionamiento previo de los árboles, ya que, una vez conocidas sus dimensiones, es posible pasar a la determinación del diámetro primitivo tanto del piñón como de la rueda, pudiendo de este modo establecer un número determinado de dientes y un módulo normalizado.

Posteriormente, se realizarán los cálculos necesarios que determinen completamente las dimensiones de todos los elementos, y que garantizarán completamente su integridad para un determinado número de horas de funcionamiento.

El piñón del árbol de entrada o  $Z_1$ , ha sido mecanizado en el propio árbol, ya que de este modo se evita tanto la utilización de elementos de fijación axial, así como elementos de fijación radial, evitando crear de este modo innecesarios concentradores de tensiones, y por otro lado, facilitando el montaje y desmontaje del reductor.

Debido a que el piñón se encuentra mecanizado en el árbol de entrada, ambos elementos estarán compuestos del mismo material.

Del mismo modo, ocurre con el piñón mecanizado en el árbol intermedio o  $Z_3$ , perteneciente a la segunda etapa.

El material utilizado para la fabricación de los piñones de las dos etapas, y por tanto del árbol de entrada y del árbol intermedio, ha sido un acero aleado bonificado, es decir, templado y revenido.

El acero utilizado ha sido 34CrMo4 según la norma DIN o F 1250 según la norma UNE, debido a sus propiedades mecánicas, que se muestran en la siguiente tabla:

| <b>Acero Bonificado 34CrMo4</b>      |                 |                     |                   |
|--------------------------------------|-----------------|---------------------|-------------------|
| <b>Módulo elástico</b>               | E               | $2,1 \cdot 10^{11}$ | N/m <sup>2</sup>  |
| <b>Coefficiente de Poisson</b>       | $\nu$           | 0,28                |                   |
| <b>Densidad</b>                      | $\rho$          | 7800                | Kg/m <sup>3</sup> |
| <b>Límite de rotura</b>              | S <sub>u</sub>  | $9 \cdot 10^8$      | N/m <sup>2</sup>  |
| <b>Límite elástico</b>               | S <sub>y</sub>  | $6,5 \cdot 10^8$    | N/m <sup>2</sup>  |
| <b>Dureza Brinell</b>                | HB              | 360                 |                   |
| <b>Tensión de contacto</b>           | S <sub>HL</sub> | 845                 | N/mm <sup>2</sup> |
| <b>Límite de resistencia nominal</b> | S <sub>FL</sub> | 340                 | N/mm <sup>2</sup> |

Tabla 1: Propiedades mecánicas del acero 34CrMo4.

Por otro lado, el material utilizado para la fabricación de las ruedas de las dos etapas del reductor, ha sido un acero aleado de cementación, concretamente 20MnCr5 según la norma DIN o F 150 D según la norma UNE, debido a sus características mecánicas que se representan en la siguiente tabla:

| <b>Acero Cementado 20MnCr5</b>       |                 |                     |                   |
|--------------------------------------|-----------------|---------------------|-------------------|
| <b>Módulo elástico</b>               | E               | $2,1 \cdot 10^{11}$ | N/m <sup>2</sup>  |
| <b>Coefficiente de Poisson</b>       | $\nu$           | 0,28                |                   |
| <b>Densidad</b>                      | $\rho$          | 7800                | Kg/m <sup>3</sup> |
| <b>Límite de rotura</b>              | S <sub>u</sub>  | $11 \cdot 10^8$     | N/m <sup>2</sup>  |
| <b>Límite elástico</b>               | S <sub>y</sub>  | $7,5 \cdot 10^8$    | N/m <sup>2</sup>  |
| <b>Dureza Brinell</b>                | HB              | 800                 |                   |
| <b>Tensión de contacto</b>           | S <sub>HL</sub> | 1500                | N/mm <sup>2</sup> |
| <b>Límite de resistencia nominal</b> | S <sub>FL</sub> | 461                 | N/mm <sup>2</sup> |

Tabla 2: Propiedades mecánicas del acero 20CrMo4.

El material utilizado para la fabricación del árbol de salida, ha sido un acero aleado al carbono denominado por la norma DIN Ck 45 o por la norma UNE F 1140, cuyas características mecánicas se muestran en la siguiente tabla:

| <b>Acero al Carbono Ck 45</b>        |                 |                      |                   |
|--------------------------------------|-----------------|----------------------|-------------------|
| <b>Módulo elástico</b>               | E               | $1,93 \cdot 10^{11}$ | N/m <sup>2</sup>  |
| <b>Coefficiente de Poisson</b>       | $\nu$           | 0,29                 |                   |
| <b>Densidad</b>                      | $\rho$          | 7850                 | Kg/m <sup>3</sup> |
| <b>Límite de rotura</b>              | S <sub>u</sub>  | $6,4 \cdot 10^8$     | N/m <sup>2</sup>  |
| <b>Límite elástico</b>               | S <sub>y</sub>  | $5,85 \cdot 10^8$    | N/m <sup>2</sup>  |
| <b>Dureza Brinell</b>                | HB              | 250                  |                   |
| <b>Tensión de contacto</b>           | S <sub>HL</sub> | 385                  | N/mm <sup>2</sup> |
| <b>Límite de resistencia nominal</b> | S <sub>FL</sub> | 461                  | N/mm <sup>2</sup> |

Tabla 3: Propiedades mecánicas del acero Ck 45.

Las características de los materiales utilizados pueden consultarse con más detalle en el ANEXO 1.

Ambas etapas poseen relaciones de transmisión iguales  $i = 2,664$ , como se explicará posteriormente en el apartado de cálculos.

A continuación, se recogen en una tabla las características geométricas más relevantes de los engranajes componentes de la primera etapa del reductor de velocidad:

| <b>Primera etapa</b>                  |            |        |         |
|---------------------------------------|------------|--------|---------|
| <b>Módulo de los engranajes</b>       | $m_n$      | 2      |         |
| <b>Relación de transmisión</b>        | i          | 2,664  |         |
| <b>Ángulo de presión normal</b>       | $\alpha_n$ | 20°    |         |
| <b>Ángulo de inclinación</b>          | $\beta$    | 21°    |         |
| <b>Número de dientes del piñón</b>    | $z_1$      | 29     | dientes |
| <b>Número de dientes de la rueda</b>  | $z_2$      | 77     | dientes |
| <b>Diámetro primitivo del piñón</b>   | $d_1$      | 61,72  | mm      |
| <b>Diámetro primitivo de la rueda</b> | $d_2$      | 163,88 | mm      |
| <b>Distancia entre centros</b>        | $a_1$      | 115    | mm      |
| <b>Anchura de los engranajes</b>      | b          | 45     | mm      |

Tabla 4: Características de la primera etapa de reducción.

En la segunda etapa, el piñón o  $Z_3$ , se encuentra mecanizado en el árbol intermedio, y la rueda o  $Z_4$ , se encuentra situada en el árbol de salida.

En la siguiente tabla se muestran las características más importantes de ambos engranajes:

| <b>Segunda etapa</b>                  |            |        |         |
|---------------------------------------|------------|--------|---------|
| <b>Módulo de los engranajes</b>       | $m_n$      | 3      |         |
| <b>Relación de transmisión</b>        | $i$        | 2,680  |         |
| <b>Ángulo de presión normal</b>       | $\alpha_n$ | 20°    |         |
| <b>Ángulo de inclinación</b>          | $\beta$    | 21°    |         |
| <b>Número de dientes del piñón</b>    | $z_1$      | 25     | dientes |
| <b>Número de dientes de la rueda</b>  | $z_2$      | 67     | dientes |
| <b>Diámetro primitivo del piñón</b>   | $d_1$      | 79,01  | mm      |
| <b>Diámetro primitivo de la rueda</b> | $d_2$      | 210,70 | mm      |
| <b>Distancia entre centros</b>        | $a_1$      | 146    | mm      |
| <b>Anchura de los engranajes</b>      | $b$        | 50     | mm      |

Tabla 5: Características de la segunda etapa de reducción.

Respecto a los árboles, serán diseñados para cumplir con una serie de requisitos mecánicos, relativos a la rigidez torsional, la deflexión lateral y a la fatiga.

El árbol de entrada, estará conectado mediante un acoplamiento elástico a un motor eléctrico, que le transmitirá una velocidad de 1100 rpm y un par de 633,8 Nm.

Por un lado, se encuentra fijado por dos rodamientos de rodillos cónicos de una hilera en los extremos, y por otro lado, tiene mecanizado en un extremo un chavetero y una rosca interior para realizar la unión con el motor eléctrico.

Tras cumplir con los requisitos necesarios, y realizar los correspondientes cálculos explicados en profundidad en el apartado siguiente, se determina que el diámetro necesario que deberá tener el árbol de entrada será de 45 mm.

En el árbol intermedio, se produce una rotación de 412,91 rpm, desarrollándose un par de 1689,12 Nm.

Se encuentra soportado por dos rodamientos de rodillos cónicos, situados en cada uno de los extremos del árbol, que se encargarán de absorber los esfuerzos producidos por los engranajes, cuando el reductor se encuentre en funcionamiento.

También, se ha mecanizado un chavetero para proporcionar fijación radial al engranaje  $Z_2$  de la primera etapa.

El diámetro necesario que deberá tener el árbol intermedio, será de 60 mm.

Por último, en el árbol de salida, se produce una rotación de 155,36 rpm, desarrollándose un par de 4500 Nm, el cuál es uno de los principales objetivos de este trabajo.

Éste árbol, se encuentra fijado por dos rodamientos de rodillos cónicos de una hilera situados en los extremos del mismo.

En uno de los extremos, tiene mecanizado un chavetero para transmitir movimiento y par a la maquinaria industrial que se desea accionar, y en la parte central, tiene mecanizado otro chavetero que se utilizará para fijar radialmente el engranaje  $Z_4$  de la segunda etapa.

Para la selección de los rodamientos, se han tenido en cuenta las solicitaciones que derivan del funcionamiento de un reductor que posee engranajes helicoidales.

Por este motivo, se han utilizado rodamientos cónicos de una hilera de la marca "SKF", ya que este tipo de rodamientos son capaces de absorber tanto fuerzas radiales como tangenciales provocadas por este tipo de engranajes en concreto.

Por otro lado, se han tenido en cuenta la capacidad de carga dinámica requerida por condiciones de vida útil, la confiabilidad, la temperatura de trabajo y la velocidad de giro.

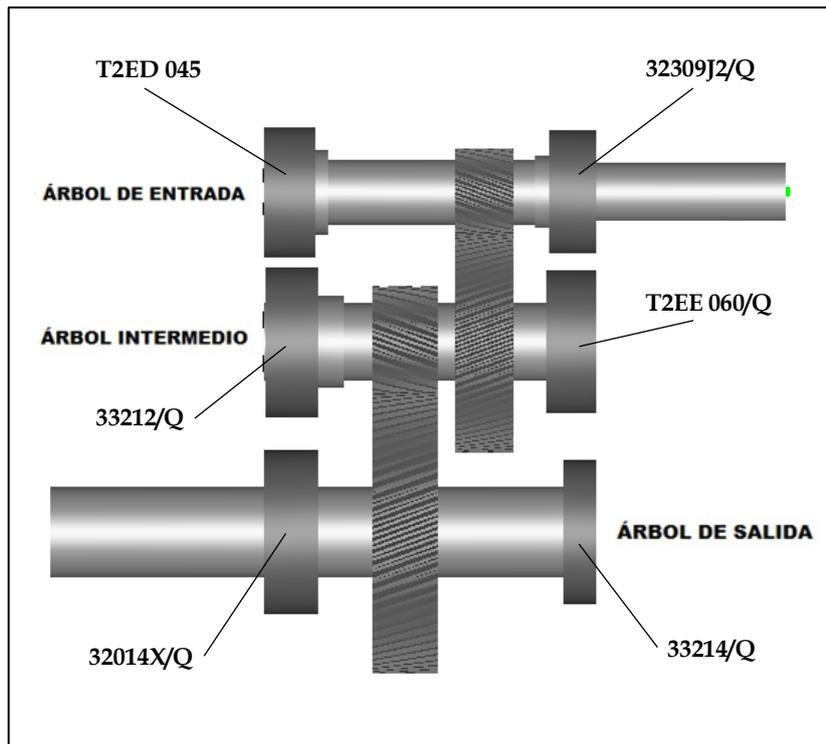


Figura 13: Posicionamiento de los rodamientos en los árboles.

A continuación, se muestra una relación de los rodamientos utilizados:

| Árbol      | Posición  | Modelo     | Tipo             |
|------------|-----------|------------|------------------|
| Entrada    | Izquierda | T2ED 045   | Rodillos cónicos |
|            | Derecha   | 32309J2/Q  |                  |
| Intermedio | Izquierda | 33212/Q    |                  |
|            | Derecha   | T2EE 060/Q |                  |
| Salida     | Izquierda | 32014X/Q   |                  |
|            | Derecha   | 33214/Q    |                  |

Tabla 6: Relación de rodamientos utilizados en el reductor de velocidad.

Las características principales de los rodamientos seleccionados son las siguientes:

| <b>RODAMIENTO SKF T2ED 045</b>     |        |
|------------------------------------|--------|
| Ancho b (mm)                       | 35     |
| Diámetro menor d (mm)              | 45     |
| Diámetro mayor D (mm)              | 95     |
| Carga Dinámica C (kN)              | 147    |
| Carga estática C <sub>0</sub> (kN) | 186    |
| Carga límite de fatiga (kN)        | 20,8   |
| Situación en el extremo            | Fijo   |
| Tipo de lubricación                | Aceite |

Tabla 7: Características del rodamiento izquierdo del árbol de entrada.

| <b>RODAMIENTO SKF 32309J2/Q</b>    |        |
|------------------------------------|--------|
| Ancho b (mm)                       | 36     |
| Diámetro menor d (mm)              | 45     |
| Diámetro mayor D (mm)              | 100    |
| Carga Dinámica C (kN)              | 140    |
| Carga estática C <sub>0</sub> (kN) | 170    |
| Carga límite de fatiga (kN)        | 20,4   |
| Situación en el extremo            | Libre  |
| Tipo de lubricación                | Aceite |

Tabla 8: Características del rodamiento derecho del árbol de entrada.

| <b>RODAMIENTO SKF 33212/Q</b>      |        |
|------------------------------------|--------|
| Ancho b (mm)                       | 38     |
| Diámetro menor d (mm)              | 60     |
| Diámetro mayor D (mm)              | 110    |
| Carga Dinámica C (kN)              | 168    |
| Carga estática C <sub>0</sub> (kN) | 236    |
| Carga límite de fatiga (kN)        | 26,5   |
| Situación en el extremo            | Fijo   |
| Tipo de lubricación                | Aceite |

Tabla 9: Características del rodamiento izquierdo del árbol intermedio.

| <b>RODAMIENTO SKF T2EE 060/Q</b>   |        |
|------------------------------------|--------|
| Ancho b (mm)                       | 39     |
| Diámetro menor d (mm)              | 60     |
| Diámetro mayor D (mm)              | 115    |
| Carga Dinámica C (kN)              | 194    |
| Carga estática C <sub>0</sub> (kN) | 260    |
| Carga límite de fatiga (kN)        | 30     |
| Situación en el extremo            | Libre  |
| Tipo de lubricación                | Aceite |

Tabla 10: Características del rodamiento derecho del árbol intermedio.

| <b>RODAMIENTO SKF 32014X/Q</b>     |        |
|------------------------------------|--------|
| Ancho b (mm)                       | 25     |
| Diámetro menor d (mm)              | 70     |
| Diámetro mayor D (mm)              | 110    |
| Carga Dinámica C (kN)              | 101    |
| Carga estática C <sub>0</sub> (kN) | 153    |
| Carga límite de fatiga (kN)        | 17,3   |
| Situación en el extremo            | Libre  |
| Tipo de lubricación                | Aceite |

Tabla 11: Características del rodamiento izquierdo del árbol de salida.

| <b>RODAMIENTO SKF 33214/Q</b>      |        |
|------------------------------------|--------|
| Ancho b (mm)                       | 41     |
| Diámetro menor d (mm)              | 70     |
| Diámetro mayor D (mm)              | 125    |
| Carga Dinámica C (kN)              | 205    |
| Carga estática C <sub>0</sub> (kN) | 285    |
| Carga límite de fatiga (kN)        | 32,5   |
| Situación en el extremo            | Fijo   |
| Tipo de lubricación                | Aceite |

Tabla 12: Características del rodamiento derecho del árbol de salida.

Con el fin de realizar un tipo de fijación radial o torsional, se han utilizado chavetas paralelas planas del tipo DIN 6885, acorde con la norma UNE 17102-1:1967.

El principal inconveniente de la utilización de este método de fijación, es el concentrador de tensiones que se crea en el árbol y que obliga en ciertas ocasiones a sobredimensionar los diámetros de los árboles.

Normalmente, para calcular la longitud de una chaveta, se suele mecanizar una longitud de 1,25 veces el diámetro del eje, pero finalmente se deben escoger las medidas normalizadas establecidas en el ANEXO 5, tanto para chavetas como para chaveteros.

A continuación, se muestra una relación de las chavetas de la empresa "OPAC", utilizadas en los respectivos árboles:

| Características             |    | Eje de entrada | Eje intermedio | Eje de salida |     |
|-----------------------------|----|----------------|----------------|---------------|-----|
| Diámetro del eje (mm)       | D  | 45             | 60             | 68            | 79  |
| Ancho de la chaveta (mm)    | b  | 14             | 18             | 20            | 22  |
| Alto de la chaveta (mm)     | h  | 9              | 11             | 12            | 14  |
| Profundidad en eje (mm)     | h1 | 5,6            | 7,1            | 7,6           | 9,1 |
| Profundidad en cubo (mm)    | h2 | 3,9            | 4,5            | 4,4           | 4,9 |
| Longitud de la chaveta (mm) | l  | 70             | 45             | 125           | 50  |

Tabla 33: Características de las chavetas planas paralelas DIN 6885.

Para garantizar una fijación axial fiable de los elementos, se han utilizado casquillos cilíndricos para fijar el engranaje  $Z_2$  del árbol intermedio, que también servirán de fijación axial para el rodamiento izquierdo, así como para fijar el engranaje  $Z_4$  situado en el árbol de salida y su respectivo rodamiento derecho.

Se han utilizado casquillos sinterizados, debido a que poseen unas mejores propiedades mecánicas y ofrecen un nivel de deslizamiento óptimo.

A continuación, se detalla una relación de casquillos del proveedor de suministros “Krapm”, utilizados en el reductor:

| Características        |   | Eje intermedio | Eje de salida |
|------------------------|---|----------------|---------------|
| Diámetro interior (mm) | d | 60             | 79            |
| Diámetro exterior (mm) | D | 75             | 95            |
| Longitud (mm)          | L | 21,5           | 35            |

Tabla 44: Características de los casquillos cilíndricos sinterizados.

También, se han utilizado retenes que garanticen la estanqueidad de la caja reductora y que eviten que el lubricante pueda salir al exterior. Por otro lado, estos elementos evitan que las posibles partículas en suspensión ambientales puedan introducirse en la transmisión, acortando la vida de algunos de los elementos mecánicos.

Se ha dispuesto un retén de elastómero en los árboles de entrada y de salida, paralelos a los rodamientos, y sujetos por las tapas de cierre laterales. Concretamente se ha escogido el tipo “A NBR”, que es capaz de absorber la expansión térmica provocada por la fricción de elementos y porque es más eficaz para sellar medios líquidos y gaseosos.

A continuación, se muestran los retenes del proveedor “Juntas Besma” utilizados:

| Características        |   | Eje de entrada | Eje de salida |
|------------------------|---|----------------|---------------|
| Diámetro interior (mm) | d | 45             | 68            |
| Diámetro exterior (mm) | D | 52             | 94            |
| Altura (mm)            | h | 4              | 9             |

Tabla 55: Características de los retenes elastómeros de tipo A NBR.

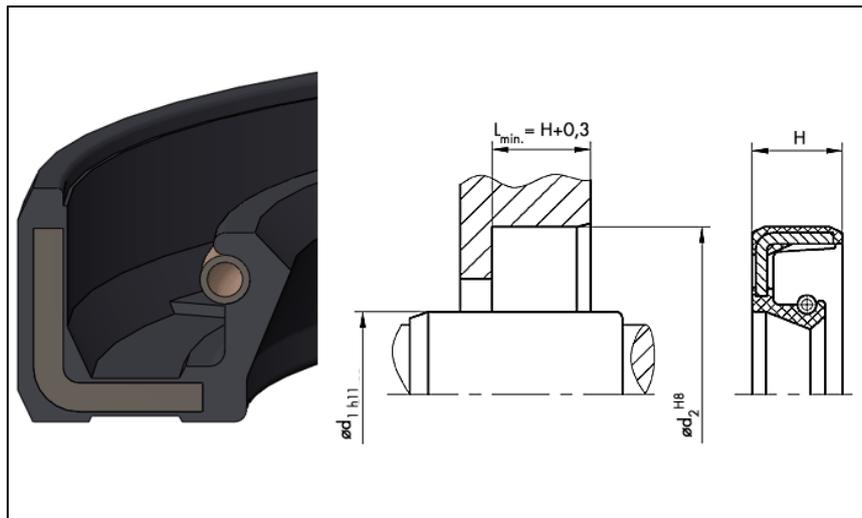


Figura 14: Características del retén elastómero tipo A NBR.

Por otro lado, con el fin de poder supervisar en todo momento el nivel de lubricante existente en la caja reductora, se ha dispuesto un visor roscado en un lateral, para poder comprobar que el nivel de aceite es el correcto.

La mirilla de nivel de aceite está compuesta por una carcasa de poliamida termoplástica y un reflector de plástico transparente, capaz de resistir temperaturas de hasta 90 °C. En la parte roscada, posee una junta plana sin asbesto, que garantiza la total estanqueidad, y un reflector blanco para facilitar la comprobación del nivel de lubricante.

Concretamente, el visor tendrá una rosca de 51 mm y 26 mm de profundidad, y será provisto por la empresa “Norelem”.



Figura 15: Mirillas de nivel de aceite de poliamida termoplástica.

Para poder vaciar el lubricante después de un número determinado de horas de funcionamiento, se ha realizado un agujero roscado en la base de la carcasa del reductor, para poder vaciar completamente el aceite, y se ha dispuesto un tapón roscado de acero provisto de una junta tórica de NBR, de 19 mm de diámetro y 16 mm de longitud con una rosca Gas de  $\frac{1}{4}$ .



Figura 16: Tornillos tapón de acero con hexágono interior y junta NBR.

En la tapa superior, se ha dotado de la misma rosca mecanizada en la base, para ubicar un tapón de llenado de las mismas características, sin la necesidad de desmontar toda la tapa superior.

Las tapas laterales, tienen la misión de ofrecer soporte y sujeción a los rodamientos ubicados en los extremos de los árboles, así como a los retenes, situados paralelamente a los rodamientos. Dichas tapas, se fijarán atornilladas a la carcasa del reductor.

En la parte superior, se dispondrá de una tapa atornillada, que se utilizará para realizar el montaje de los elementos, ya que solamente con las tapas de cierre laterales no existiría suficiente espacio para realizar el montaje.

El material que será utilizado para fabricar las tapas de cierre, será el mismo que se utilizará para la fabricación de la carcasa.

Por último, la carcasa del reductor de velocidad, es la encargada de soportar los árboles y de absorber los esfuerzos que éstos producen, provocados por los engranajes helicoidales. Por este motivo, ha de estar fabricado de un material que sea lo suficientemente resistente como para resistir dichos esfuerzos, por eso se ha utilizado una fundición nodular ferrítica GG-25 (UNE 36-111 FG-25), que presenta unas características mecánicas notablemente superiores a las de la fundición gris.

En la siguiente tabla pueden observarse las características mecánicas del material seleccionado:

| <b>GG-25</b>                   |                |                   |                   |
|--------------------------------|----------------|-------------------|-------------------|
| <b>Módulo elástico</b>         | E              | $1 \cdot 10^{11}$ | N/m <sup>2</sup>  |
| <b>Coefficiente de Poisson</b> | $\nu$          | 0,26              |                   |
| <b>Densidad</b>                | $\rho$         | 7200              | Kg/m <sup>3</sup> |
| <b>Límite de rotura</b>        | S <sub>u</sub> | $2,5 \cdot 10^8$  | N/m <sup>2</sup>  |
| <b>Límite elástico</b>         | S <sub>y</sub> | $1,6 \cdot 10^8$  | N/m <sup>2</sup>  |
| <b>Dureza Brinell</b>          | HB             | 220               |                   |
| <b>Porcentaje de Carbono</b>   | C              | 3,8               | %                 |
| <b>Porcentaje de Silicio</b>   | Si             | 2,8               | %                 |
| <b>Porcentaje de Manganeso</b> | Mn             | 0,45              | %                 |

Tabla 66: Características mecánicas de la fundición nodular ferrítica GG-25

La lubricación, resulta fundamental para el correcto funcionamiento de toda maquinaria que esté compuesta por elementos mecánicos de contacto, como engranajes, o de rotación, como árboles y rodamientos.

Si no se produce una correcta lubricación entre elementos, puede llegar a darse el fenómeno denominado gripado, entre otros, que consiste en el bloqueo de dos cuerpos metálicos debido a la fusión superficial del material provocada por la elevada temperatura causada por la fricción entre ambas superficies.

El lubricante que se utilizará para garantizar el correcto funcionamiento del reductor de velocidad, será el aceite mineral ISO VG 460 (6A) del fabricante "Bardahl", un lubricante muy común utilizado para reductores y maquinaria similar, debido a que posee un índice de viscosidad y un coeficiente de fricción muy elevado, y a que también posee un alto nivel de estabilidad térmica, así como un bajo punto de congelación frente a bajas temperaturas de funcionamiento.

La lubricación se realizará por barboteo, llenándose la carcasa del reductor hasta la mitad aproximadamente, asegurando la inmersión de al menos la mitad de los engranajes.

Por otro lado, los casquillos y los rodamientos, quedarán lubricados al igual que los engranajes por barboteo.

Las características técnicas y propiedades del lubricante utilizado pueden consultarse en el ANEXO 4.



## II. CÁLCULOS



## II.1. INTRODUCCIÓN

En este apartado, se realizarán y justificarán los cálculos realizados para diseñar todos los elementos fundamentales que compondrán el reductor de velocidad.

Para el cálculo de los árboles por deflexión torsional, se determinarán las secciones mínimas que deberá tener cada árbol, y se analizarán todas las secciones mediante el cálculo a fatiga, y mediante el cálculo de la deflexión de cada árbol.

Cuando se realice el dimensionado de los rodamientos, se comprobará que la deflexión angular no exceda el límite establecido para el tipo de rodamientos utilizado, así como el número de horas de vida nominal.

Debido a que el reductor de velocidad funcionará en sentido horario y antihorario, los cálculos se realizarán consecuentemente para ambos sentidos de giro.

## II.2. DATOS DE PARTIDA

Los valores que se conocen para realizar el cálculo del reductor de velocidad son los siguientes:

|                             |              |
|-----------------------------|--------------|
| Relación de transmisión (i) | 7,1 ± 5%     |
| Par a la salida (Nm)        | 4500         |
| Número de etapas            | 2            |
| Velocidad de entrada (rpm)  | 1100         |
| Tipo de engranajes          | Helicoidales |

Tabla 17: Valores iniciales para realizar los cálculos.

Como primer cálculo, se determinará la velocidad en el árbol de salida. Esta velocidad, se obtendrá realizando el cociente entre la velocidad de entrada y la relación de transmisión final:

$$\omega_{\text{salida}} = \frac{\omega_{\text{entrada}}}{i_{\text{total}}} = \frac{1100 \text{ rpm}}{7,1} = 154,93 \text{ rpm} = 16,22 \text{ rad/s}$$

Tras conocer la velocidad de salida, se obtendrá la potencia máxima que podrá ofrecer el reductor de velocidad:

$$P = \omega_{salida} \cdot T_{salida} = 16,22 \cdot 4500 = 72,99 \text{ kW}$$

Tras conocer estos datos, ya pueden calcularse la velocidad y el par torsor que actuará en cada uno de los árboles:

$$\omega_{intermedio} = \frac{\omega_{entrada}}{i_{primera\ etapa}} = \frac{1100}{2,664} = 412,91 \text{ rpm}$$

$$T_{intermedio} = \frac{T_{salida}}{i_{primera\ etapa}} = \frac{4500}{2,664} = 1689,12 \text{ Nm}$$

$$T_{entrada} = \frac{T_{salida}}{i_{total}} = \frac{4500}{7,1} = 633,8 \text{ Nm}$$

A continuación, se recogen los resultados obtenidos para cada árbol:

| Árbol      | $\omega$ (rpm) | T (Nm)  |
|------------|----------------|---------|
| Entrada    | 1100           | 633,8   |
| Intermedio | 412,91         | 1689,12 |
| Salida     | 154,92         | 4500    |

Tabla 18: Velocidad y par torsor desarrollado por cada árbol.

## II.3. CÁLCULO DE ENGRANAJES

Como la reducción de velocidad se realizará en dos etapas, se procederá a determinar cuál será la relación de transmisión para cada una de las etapas:

$$i_{total} = i_{1-2} \cdot i_{3-4} ; i_{1-2} = i_{3-4} = \sqrt{7,1} = 2,664$$

Luego, se empleará la misma relación de transmisión para ambas etapas de reducción.

Como resulta difícil obtener una relación de transmisión exacta para ambas etapas, se considerará un error máximo del 5%, debiendo encontrarse cada relación de transmisión por etapa, dentro del siguiente intervalo:

- Relación de transmisión máxima por etapa: 2,797.
- Relación de transmisión mínima por etapa: 2,531.

De igual modo, también se considerará un error del 5% en la determinación de la velocidad del árbol de salida, ya que depende directamente de la relación de transmisión de cada etapa.

Por lo tanto, la velocidad en el árbol de salida deberá encontrarse dentro del siguiente intervalo:

- Velocidad máxima: 162,656 rpm.
- Velocidad mínima: 147,164 rpm.

Por lo tanto, las características de cada una de las etapas serán las siguientes:

|                                   | Primera etapa | Segunda etapa |
|-----------------------------------|---------------|---------------|
| <b>Velocidad de entrada (rpm)</b> | 1100          | 412,91        |
| <b>Velocidad de salida (rpm)</b>  | 412,91        | 154,92        |
| <b>Relación de velocidad (i)</b>  | 2,664         |               |

*Tabla 19: Características de las etapas de reducción.*

### II.3.1. CÁLCULO DE DIÁMETROS POR DEFLEXIÓN TORSIONAL

Para poder determinar el diámetro que tendrán los engranajes, primero debe realizarse el cálculo que determine el diámetro de los árboles donde irán alojados.

Uno de los factores más importantes para calcular la sección que deberán tener los árboles en el lugar donde se localizarán los engranajes, resulta ser la rigidez torsional, ya que la sección del árbol podrá reducirse en aquellas zonas donde no esté aplicándose un par torsor elevado.

Para realizar el cálculo de los diámetros mínimos que deberán tener los árboles, se utilizarán las siguientes expresiones obteniendo dos resultados, de los cuales se escogerá el que sea más restrictivo, teniendo en cuenta el diámetro comercial de los rodamientos:

$$\frac{\theta}{20d} = \frac{32T}{\pi d^4 G} \leq 1^\circ \quad ; \quad \frac{\theta}{L} = \frac{32T}{\pi d^4 G} \leq 1,5^\circ$$

Siendo:

G = Modulo de rigidez torsional, para el acero  $G = 8,1 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$

Para el árbol de entrada:

$$D_{\text{entrada}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 20T}{\pi \theta G}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 20 \cdot 633,8}{\pi \cdot 0,017 \cdot 8,1 \cdot 10^{10}}} \cdot 1000 = 44,431 \text{ mm}$$

$$D_{\text{entrada}} = \sqrt[4]{\frac{32T}{\pi \frac{\theta}{L} G}} = \sqrt[4]{\frac{32 \cdot 633,8}{\pi \cdot 0,026 \cdot 8,1 \cdot 10^{10}}} \cdot 1000 = 31,842 \text{ mm}$$

Por lo que se escoge un valor de 45 mm para el diámetro del árbol de entrada.

Para el árbol intermedio:

$$D_{\text{intermedio}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 20T}{\pi \theta G}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 20 \cdot 1689,12}{\pi \cdot 0,017 \cdot 8,1 \cdot 10^{10}}} \cdot 1000 = 59,987 \text{ mm}$$

$$D_{\text{intermedio}} = \sqrt[4]{\frac{32T}{\pi \frac{\theta}{L} G}} = \sqrt[4]{\frac{32 \cdot 1689,12}{\pi \cdot 0,026 \cdot 8,1 \cdot 10^{10}}} \cdot 1000 = 46,461 \text{ mm}$$

Por lo que se escoge un valor de 60 mm para el diámetro del árbol intermedio.

Finalmente, para el árbol de salida:

$$D_{\text{salida}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 20T}{\pi \theta G}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 20 \cdot 4500}{\pi \cdot 0,017 \cdot 8,1 \cdot 10^{10}}} \cdot 1000 = 67,317 \text{ mm}$$

$$D_{\text{salida}} = \sqrt[4]{\frac{32T}{\pi \frac{\theta}{L} G}} = \sqrt[4]{\frac{32 \cdot 4500}{\pi \cdot 0,026 \cdot 8,1 \cdot 10^{10}}} \cdot 1000 = 55,301 \text{ mm}$$

Por lo que se escoge un valor de 68 mm para el diámetro del árbol de salida.

### II.3.2. DIÁMETRO DE LOS ENGRANAJES

Una vez calculado el diámetro mínimo que deberán tener los árboles, se puede proceder a calcular la geometría de los engranajes.

Para determinar el diámetro que tendrán los engranajes helicoidales, hay que tener en cuenta tres factores: el diámetro del árbol donde estarán alojados el piñón o la rueda, el tamaño de la chaveta que fijará radialmente los engranajes y la distancia que dista entre el fondo del cubo del chavetero y el pie de diente del engranaje.

En la tabla que se muestra a continuación, se muestra una relación de las dimensiones de las chavetas utilizadas para cada uno de los engranajes helicoidales:

| Características          |    | Z <sub>2</sub> | Z <sub>4</sub> |
|--------------------------|----|----------------|----------------|
| Árbol                    |    | Intermedio     | Salida         |
| Diámetro del eje (mm)    | D  | 60             | 68             |
| Ancho de la chaveta (mm) | b  | 18             | 20             |
| Alto de la chaveta (mm)  | h  | 11             | 12             |
| Profundidad en eje (mm)  | h1 | 7              | 7,5            |
| Profundidad en cubo (mm) | h2 | 4,4            | 4,5            |

Tabla 20: Dimensiones de los chaveteros de los engranajes.

Para realizar una estimación del ancho que tendrán los dientes de los engranajes helicoidales, es necesario conocer la viscosidad cinemática del lubricante que será utilizado, ya que resultan ser factores dependientes uno del otro.

Por lo tanto, según la norma ISO 3448 que se basa en la clasificación de lubricantes industriales, se ha escogido el aceite mineral ISO VG 460, con una viscosidad cinemática que oscila entre 437 y 483 mm<sup>2</sup>/s trabajando a una temperatura de 40° C.

En el ANEXO 4, pueden consultarse las diferentes clases de lubricante con sus respectivas viscosidades cinemáticas para diferentes temperaturas de funcionamiento.

Con el fin de simplificar los cálculos y obtener datos de mayor precisión que se acerquen lo máximo posible a la realidad, se ha utilizado el software de diseño y simulación mecánico "KISSOFT" y "KISSYS" con sus respectivos módulos de dimensionado de árboles y transmisiones para engranajes helicoidales.

A pesar de haber utilizado dicho software de simulación y diseño, se explicará de manera detallada el método de cálculo utilizado para la obtención de los valores finales, que no dista demasiado del cálculo realizado de manera convencional con una hoja de cálculo.

Para comenzar, se calculará el diámetro mínimo que deberá tener el piñón de cada etapa, para poder determinar después tanto el modulo como el número de dientes.

$$d_{\text{mínimo piñón}} = d_{\text{eje}} + 2 \cdot (h_2 + L_{\text{seguridad}} + h_a)$$

Donde:

$d_{\text{eje}}$  = Diámetro del eje

$h_2$  = Profundidad del chavetero en el cubo

$L_{\text{seguridad}}$  = Distancia de seguridad a criterio del diseñador ( $2 \cdot m_n$ )

$h_a$  = Altura de addendum, ( $1,25 \cdot m_n$ ).

A continuación, se calculará el número mínimo de dientes que deberá tener el piñón de cada etapa de reducción según la norma UNE 17.102.h1, para posteriormente calcular el número de dientes de las respectivas ruedas a partir de la relación de transmisión de cada etapa y la distancia entre centros, utilizando las siguientes expresiones:

$$z_{\text{piñón}} = \frac{d_{\text{mínimo piñón}}}{m_{\text{etapa}}}$$

Donde se tomará el número entero inmediatamente superior, al número de dientes calculado.

$$z_{\text{rueda}} = z_{\text{piñón}} \cdot i_{\text{etapa}}$$

Donde en el caso de la rueda, se tomará el número entero más cercano al número de dientes obtenido tras realizar el cálculo.

$$i_{\text{etapa}} = \frac{z_{\text{rueda}}}{z_{\text{piñón}}}$$

$$D_{\text{centros}} = \frac{m_{\text{etapa}}}{2} \cdot (z_{\text{piñón}} + z_{\text{rueda}})$$

Para determinar el módulo que deberá tener cada etapa, ha de diferenciarse entre módulo normal, que hace referencia al diente, y módulo aparente, que hace referencia a la circunferencia que describe el engranaje.

La relación entre módulo normal y aparente será:

$$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta}$$

Para determinar el ángulo de presión normal y aparente se utilizará la siguiente expresión:

$$\text{tg} \alpha_t = \frac{\text{tg} \alpha_n}{\cos \beta}$$

El diámetro primitivo y el número mínimo de dientes para que no aparezca interferencia entre engranajes, se obtendrán mediante las siguientes expresiones:

$$d = m_t \cdot z \quad ; \quad z_{min} = \frac{2 \cdot \cos \beta}{\text{sen}^2 \alpha_t}$$

En la siguiente tabla, se muestra un resumen de los resultados obtenidos:

|            |        |
|------------|--------|
| $\beta$    | 21°    |
| $\alpha_n$ | 20°    |
| $\alpha_t$ | 21,17° |
| $Z_{min}$  | 14,38  |

Tabla 21: Parámetros de los engranajes para que no se produzca interferencia.

Por lo que se determina un número mínimo de dientes de 15, ya que resulta el entero superior.

Para la selección del módulo, por un lado se ha tenido en cuenta la distancia entre centros marcada por la carcasa donde se alojarán los árboles, y por otro lado, que los dientes de las parejas de engranajes que componen cada etapa no tengan divisores comunes, o tengan un número de dientes coprimo, para evitar de este modo que engranen siempre los mismos dientes, generando un mayor reparto y un desgaste menor en el engranaje.

Por otro lado, se escogerán aquellas parejas de engranajes que posean el número de recubrimiento más elevado, y cuya seguridad tanto en el pie del diente como en el flanco sea igual o superior a 1,1.

En las tablas que se muestran a continuación, puede observarse una relación de resultados obtenidos para ambas etapas de reducción.

Para la primera etapa:

| $m_n$ (mm) | $z_1$     | $z_2$     | $\epsilon$   | $i$          | $N_{pie}$    | $N_{flanco}$ | T (Nm)         | P (kW)       | $\eta$       |
|------------|-----------|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|--------------|--------------|
| 2          | 29        | 77        | 3.839        | 2.655        | 1.221        | 1.15         | 577,197        | 66.48        | 0.993        |
| 2          | 29        | 77        | 3.849        | 2.655        | 1.237        | 1.154        | 584,609        | 97.34        | 0.993        |
| <b>2</b>   | <b>29</b> | <b>77</b> | <b>3.857</b> | <b>2.665</b> | <b>1.255</b> | <b>1.158</b> | <b>593,140</b> | <b>68.32</b> | <b>0.992</b> |
| 2          | 30        | 79        | 4.1          | 2.633        | 1.448        | 1.17         | 684,518        | 77.85        | 0.991        |
| 2          | 30        | 79        | 4.087        | 2.633        | 1.437        | 1.165        | 679,290        | 78.24        | 0.991        |
| 2          | 30        | 79        | 4.07         | 2.633        | 1.413        | 1.16         | 667,994        | 76.94        | 0.991        |
| 2.5        | 23        | 61        | 3.254        | 2.652        | 1.534        | 1.138        | 724,858        | 83.49        | 0.991        |
| 2.5        | 23        | 61        | 3.244        | 2.652        | 1.507        | 1.134        | 712,144        | 82.03        | 0.991        |
| 3          | 20        | 53        | 3.21         | 2.65         | 2.134        | 1.132        | 847,256        | 97.59        | 0.987        |
| 3.5        | 17        | 45        | 2.887        | 2.647        | 2.345        | 1.135        | 852,199        | 98.16        | 0.986        |
| 3.5        | 17        | 45        | 2.866        | 2.647        | 2.28         | 1.127        | 840,711        | 98.84        | 0.985        |

Tabla 22: Resultados para la primera etapa de reducción.

Para la segunda etapa:

| $m_n$ (mm) | $z_1$     | $z_2$     | $\epsilon$   | $i$          | $N_{pie}$    | $N_{flanco}$ | T (Nm)         | P (kW)       | $\eta$       |
|------------|-----------|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|--------------|--------------|
| 1          | 75        | 200       | 7,155        | 2,676        | 0,399        | 0,962        | 490,57         | 21,28        | 0,995        |
| 1          | 75        | 200       | 7,142        | 2,676        | 0,397        | 0,958        | 488,68         | 21,26        | 0,995        |
| 1.25       | 60        | 160       | 6,048        | 2,667        | 0,493        | 0,957        | 606,35         | 26,32        | 0,994        |
| 1.25       | 60        | 160       | 6,032        | 2,667        | 0,49         | 0,952        | 602,27         | 26,12        | 0,994        |
| 2.25       | 33        | 88        | 3,944        | 2,667        | 0,82         | 0,933        | 1008,89        | 43,76        | 0,991        |
| 2.25       | 33        | 88        | 3,932        | 2,667        | 0,813        | 0,929        | 1000,48        | 43,41        | 0,991        |
| 2.5        | 30        | 80        | 3,783        | 2,667        | 0,979        | 0,932        | 1203,61        | 52,21        | 0,989        |
| 2.5        | 30        | 80        | 3,771        | 2,667        | 0,968        | 0,928        | 1190,95        | 51,66        | 0,989        |
| 2.5        | 30        | 80        | 3,757        | 2,667        | 0,956        | 0,924        | 1175,89        | 51,01        | 0,989        |
| <b>3</b>   | <b>25</b> | <b>67</b> | <b>3,382</b> | <b>2,680</b> | <b>1,170</b> | <b>1,107</b> | <b>1419,41</b> | <b>61,58</b> | <b>0,987</b> |
| 3.5        | 21        | 56        | 2,946        | 2,667        | 1,245        | 1,112        | 1431,32        | 62,09        | 0,988        |
| 3.5        | 21        | 56        | 2,922        | 2,667        | 1,214        | 1,104        | 1406,78        | 61,03        | 0,987        |
| 4          | 18        | 48        | 2,55         | 2,667        | 1,326        | 1,174        | 1316,76        | 57,12        | 0,987        |
| 5          | 15        | 40        | 2,535        | 2,667        | 1,77         | 1,184        | 1347,02        | 54,43        | 0,981        |
| 5          | 15        | 40        | 2,514        | 2,667        | 1,716        | 1,178        | 1327,27        | 57,58        | 0,98         |
| 6          | 12        | 32        | 2,095        | 2,667        | 1,818        | 1,151        | 1246,09        | 54,06        | 0,981        |
| 6          | 12        | 32        | 2,071        | 2,667        | 1,827        | 1,149        | 1240,02        | 53,79        | 0,98         |
| 6.25       | 12        | 32        | 2,237        | 2,667        | 1,906        | 1,141        | 1216,84        | 52,79        | 0,975        |

Tabla 23: Resultados para la segunda etapa de reducción.

El criterio de selección se ha fundamentado principalmente en el cumplimiento de los criterios anteriormente descritos, y en que ambas etapas tuvieran una relación de transmisión lo más próxima posible a  $i = 2,664$ .

Por otra parte, se ha escogido un módulo normalizado de utilización preferente para ambas etapas, según el ANEXO 20.

A continuación se muestra una tabla que recoge los resultados obtenidos para ambas etapas:

| Etapa   | Primera   | Segunda  |
|---|-----------|----------|
| Módulo de los engranajes ( $m_n$ )            | 2         | 3        |
| Distancia entre centros ( $\alpha_1$ )        | 115 mm    | 146 mm   |
| Ángulo de presión normal ( $\alpha_n$ )       | 20°       | 20°      |
| Ángulo de inclinación ( $\beta$ )             | 21°       | 21°      |
| Número de dientes del piñón ( $z_1$ )         | 29        | 25       |
| Número de dientes de la rueda ( $z_2$ )       | 77        | 67       |
| Diámetro primitivo del piñón ( $d_1$ )        | 61,72 mm  | 79,01 mm |
| Diámetro primitivo de la rueda ( $d_2$ )      | 163,88 mm | 210,7 mm |
| Relación de transmisión ( $i$ )               | 2,665     | 2,680    |
| Relación de transmisión total ( $i_{total}$ ) | 7,1422    |          |

Tabla 24: Resumen de las dos etapas de reducción.

Como puede observarse, la relación de transmisión total cumple con el objetivo propuesto inicialmente.

### II.3.3. ANCHO DE LOS ENGRANAJES

Para determinar el ancho que deberán tener los engranajes seleccionados anteriormente, se deberán tener en cuenta dos factores: la resistencia de los dientes a flexión, y la resistencia de los dientes debida al contacto superficial.

Para ambos casos, se realizará el cálculo de un modo iterativo con una hoja de cálculo, del cual se explicarán los principales factores que se han tenido en cuenta y las fórmulas utilizadas.

Por otro lado, es conveniente realizar la comprobación de que el ancho del diente utilizado esté comprendido entre 0,5 y 2 veces el diámetro primitivo del piñón de la etapa correspondiente.

Para realizar el cálculo de la presión superficial que tiene lugar en el dentado de los engranajes, se supone un contacto entre cilindros paralelos, de tal modo que pueden aplicarse las tensiones de "Hertz", obteniéndose de este modo el ancho de los engranajes:

$$X_H = \left( \frac{S_{HP}}{\sigma_H} \right)^2$$

$$\sigma_H = Z_H \cdot Z_E \cdot Z_\delta \cdot Z_\beta \cdot \sqrt{\frac{F_t}{b \cdot d_1} \cdot \frac{1+i}{i}} \cdot \sqrt{K_A} \cdot K_V \cdot K_{H\beta} \cdot H_{H\alpha}$$

Donde:

$Z_H$  = Coeficiente geométrico.

$Z_E$  = Coeficiente elástico.

$Z_\delta$  = Coeficiente de conducción.

$Z_\beta$  = Coeficiente de ángulo de hélice.

$K_A$  = Coeficiente de aplicación.

$K_V$  = Coeficiente dinámico.

$K_{H\beta}$  = Coeficiente de distribución de cargas longitudinal.

$K_{H\alpha}$  = Coeficiente de distribución de cargas transversal.

Para realizar el cálculo por fallo a flexión, se utiliza el método ISO, que se fundamenta en la aplicación de la componente tangencial de la carga en el extremo del dentado y en la aplicación de diferentes coeficientes de corrección, con el fin de obtener la máxima aproximación a la tensión real que soportará la base del dentado.

$$X_F = \frac{S_{FP}}{\sigma_F}$$

$$\sigma_F = \frac{F_t}{b \cdot m_n} \cdot Y_{F\alpha} \cdot Y_\delta \cdot Y_{S\alpha} \cdot Y_\beta \cdot Y_B \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\beta} \cdot K_{F\alpha}$$

Donde:

$Y_{F\alpha}$  = Coeficiente de forma.

$Y_\delta$  = Coeficiente de conducción.

$Y_{S\alpha}$  = Coeficiente de concentración de tensiones.

$Y_\beta$  = Factor de inclinación.

$K_A$  = Coeficiente de aplicación.

$K_V$  = Coeficiente dinámico.

$K_{F\beta}$  = Coeficiente de distribución de cargas longitudinal.

$K_{F\alpha}$  = Coeficiente de distribución de cargas transversal.

Tras realizar diversos cálculos iterativos mediante hoja de cálculo, introduciendo los valores obtenidos por el software "KISSOFT", y teniendo en cuenta las propiedades mecánicas del material seleccionado para la fabricación de los engranajes, se determina la anchura que tendrán los engranajes de ambas etapas de reducción.

Para la primera etapa:

| $b_0$ | $Z_\beta$ | $Z_E$ | $K_{F\beta}$ | $K_A F_t / b$ | $K_{F\alpha}$ | $K_{F\beta}$ | $K_V$ | $b$   |
|-------|-----------|-------|--------------|---------------|---------------|--------------|-------|-------|
| 68,42 | 1,45      | 0,78  | 1,316        | 11,28         | 1,245         | 1,211        | 1,211 | 39,85 |
| 39,85 | 0,74      | 0,81  | 1,176        | 22,00         | 1,245         | 1,211        | 1,220 | 41,09 |
| 41,09 | 0,72      | 0,81  | 1,172        | 22,76         | 1,245         | 1,211        | 1,221 | 44,52 |
| 44,52 | 0,72      | 0,81  | 1,173        | 22,66         | 1,245         | 1,211        | 1,220 | 44,76 |
| 44,76 | 0,72      | 0,81  | 1,173        | 22,67         | 1,245         | 1,211        | 1,220 | 44,76 |
| 44,76 | 0,72      | 0,81  | 1,173        | 22,67         | 1,245         | 1,211        | 1,220 | 44,76 |

Tabla 25: Resultados de la iteración para la primera etapa.

Para la segunda etapa:

| $b_0$ | $Z_\beta$ | $Z_\varepsilon$ | $K_{F\beta}$ | $K_{AF}/b$ | $K_{F\alpha}$ | $K_{F\beta}$ | $K_v$ | $b$   |
|-------|-----------|-----------------|--------------|------------|---------------|--------------|-------|-------|
| 72,65 | 1,96      | 0,77            | 1,322        | 31,19      | 1,092         | 1,079        | 1,079 | 50,33 |
| 54,52 | 1,53      | 0,77            | 1,247        | 39,86      | 1,092         | 1,079        | 1,079 | 50,19 |
| 50,32 | 1,45      | 0,77            | 1,234        | 42,24      | 1,092         | 1,079        | 1,079 | 49,21 |
| 49,21 | 1,43      | 0,77            | 1,232        | 42,69      | 1,092         | 1,079        | 1,079 | 49,18 |
| 49,18 | 1,43      | 0,77            | 1,232        | 42,77      | 1,092         | 1,079        | 1,079 | 49,12 |
| 49,12 | 1,43      | 0,77            | 1,232        | 42,78      | 1,092         | 1,079        | 1,079 | 49,07 |
| 49,07 | 1,43      | 0,77            | 1,232        | 42,78      | 1,092         | 1,079        | 1,079 | 49,07 |
| 49,07 | 1,43      | 0,77            | 1,232        | 42,78      | 1,092         | 1,079        | 1,079 | 49,07 |

Tabla 26: Resultados de la iteración para la segunda etapa.

Para determinar el ancho que tendrán los engranajes de cada etapa, se incrementan los valores obtenidos hasta el entero inmediatamente superior siendo de 45 mm para la primera etapa, y de 50 mm para la segunda etapa, para facilitar el diseño.

## II.4. DISEÑO DE LOS ÁRBOLES

En este apartado, se procederá a realizar un análisis completo de los esfuerzos que aparecen en cada uno de los árboles.

Por tanto, se han seleccionado las secciones críticas de cada uno de los árboles que componen el reductor de velocidad, para realizar un análisis tanto en sentido horario como en sentido anti horario de funcionamiento.

## II.4.1. ESQUEMA DE LOS ÁRBOLES Y FUNCIONAMIENTO

A continuación, se muestran las secciones de cada uno de los árboles que componen el reductor, para posteriormente realizar un análisis de cada una de ellas.

Para el árbol de entrada:

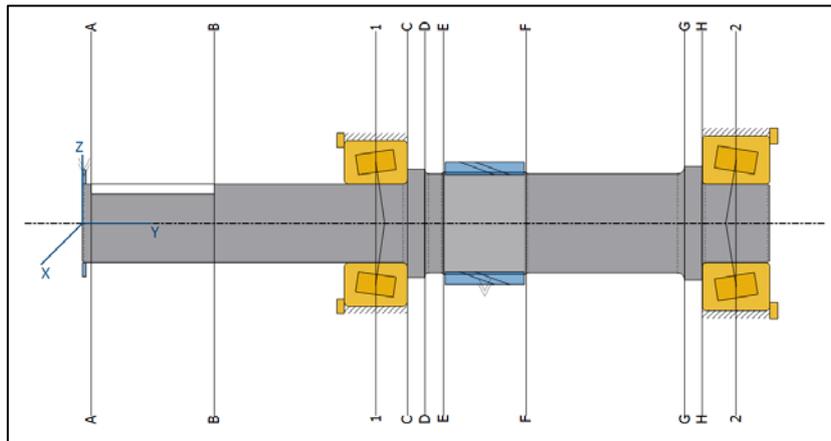


Figura 17: Secciones analizadas del árbol de entrada.

Para el árbol intermedio:

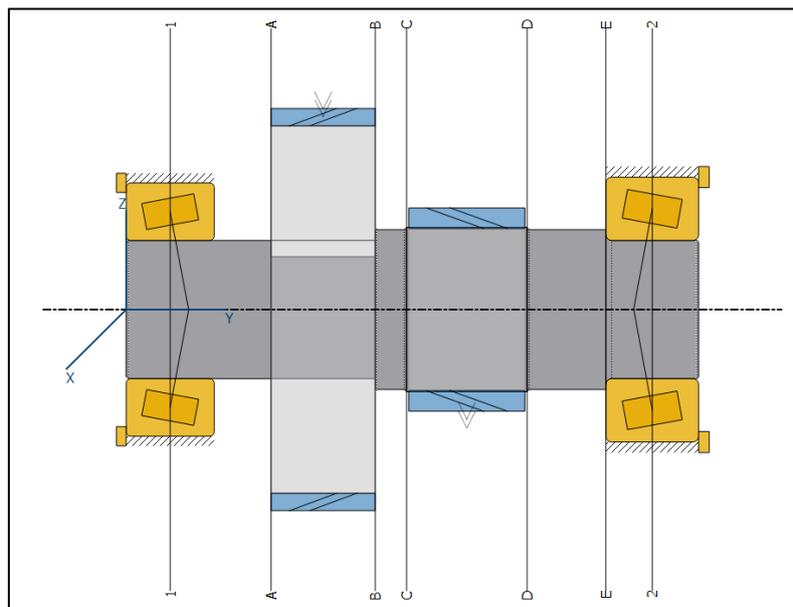


Figura 18: Secciones analizadas del árbol intermedio.

Para el árbol de salida:

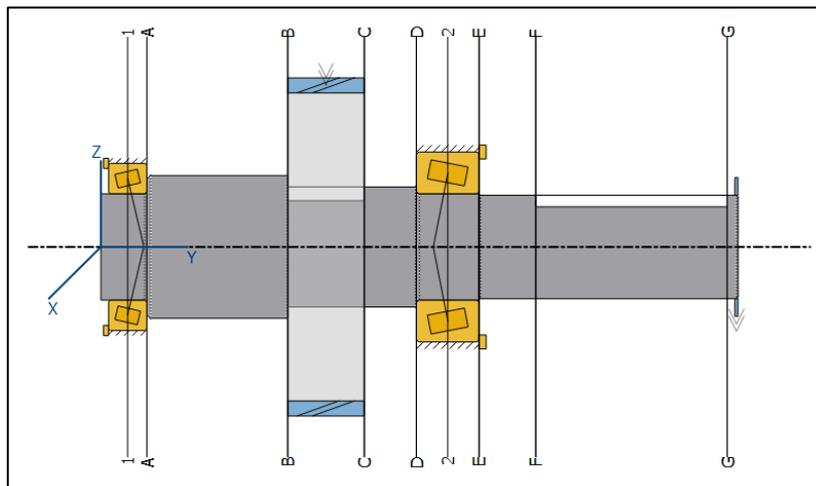


Figura 19: Secciones analizadas del árbol de salida.

Para obtener las fuerzas transmitidas por los engranajes helicoidales de las dos etapas, se emplearán las siguientes expresiones:

$$F_t = \frac{T_1}{\frac{d_1}{2}}$$

$$F_r = F_t \cdot \operatorname{tg} \alpha_t$$

$$F_a = F_t \cdot \operatorname{tg} \beta$$

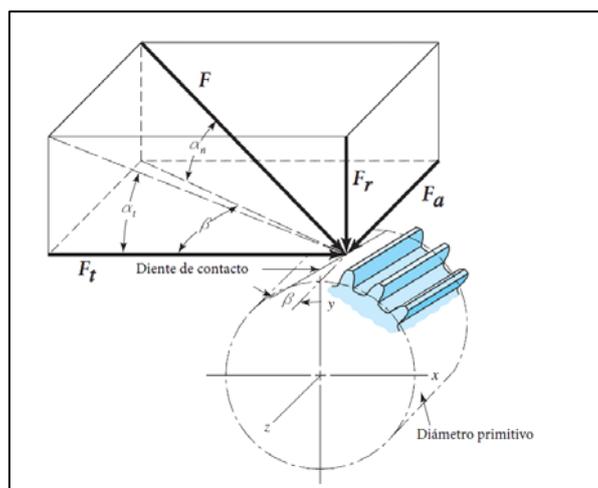


Figura 20: Fuerzas resultantes en engranajes helicoidales.

En la siguiente tabla, se recogen los resultados obtenidos para ambas etapas:

| Etapa   | Fuerza Tangencial (N) | Fuerza Radial (N) | Fuerza Axial (N) | Fuerza Resultante (N) |
|---------|-----------------------|-------------------|------------------|-----------------------|
| Primera | 21443                 | 8305,5            | 7804,6           | 24283,64              |
| Segunda | 43584,8               | 16881,7           | 15863,6          | 49358,69              |

Tabla 27: Componentes de la fuerza normal de contacto.

### II.4.1.1. FUERZAS EN SENTIDO HORARIO

En este apartado se calcularán las sollicitaciones en las secciones para cada uno de los árboles, cuando estén rotando en sentido horario.

Para realizar el cálculo de las sollicitaciones, se ha empleado un software de diseño y simulación, con el fin de obtener unos resultados lo más próximos a la realidad posibles.

En el árbol de entrada, las sollicitaciones serán las siguientes:

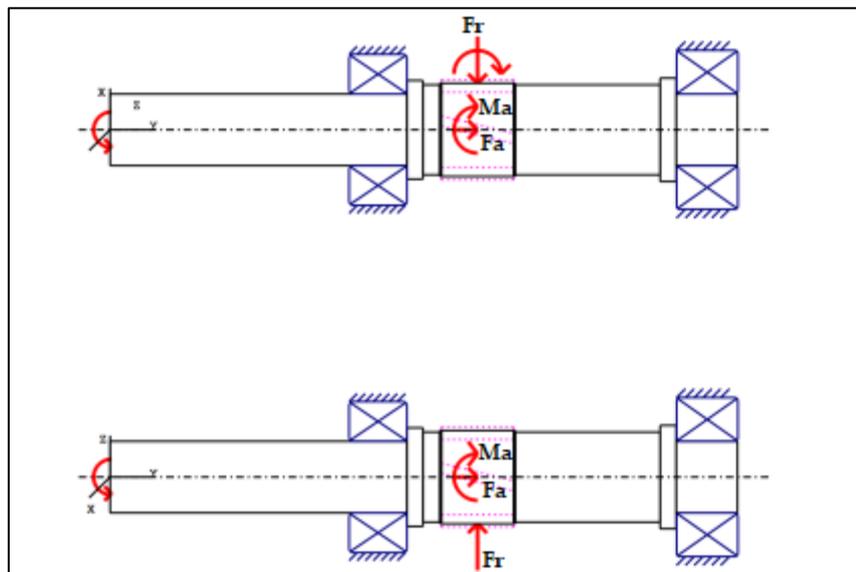


Figura 21: Sollicitaciones del eje de entrada.

A continuación, se muestran las reacciones en los apoyos:

|                              |    | Apoyo izquierdo | Apoyo derecho |
|------------------------------|----|-----------------|---------------|
| Reacción en el eje x (N)     | Rx | 5271            | 4023,5        |
| Reacción en el eje y (N)     | Ry | 4324            | -12129,1      |
| Reacción en el eje z (N)     | Rz | -14649          | -6384,6       |
| Fuerza resultante normal (N) | Fr | 15568           | 7546,7        |

Tabla 28: Reacciones en los apoyos del árbol de entrada.

En la siguiente tabla, pueden observarse los momentos flectores, momentos torsores y fuerzas axiales para cada una de las secciones estudiadas:

| Sección | Posición (mm) | M (Nm)  | T (Nm) | Fx (N)   | Fy (N)  | Fz (N)  | $\sigma$ (MPa) |
|---------|---------------|---------|--------|----------|---------|---------|----------------|
| A       | 5             | 0       | 658,5  | 0        | 0       | 0       | 63,745         |
| B       | 75            | 0       | 658,5  | 0        | 0       | 0       | 63,745         |
| 1       | 167           | 0       | 685,5  | 0        | 0       | 0       | 63,745         |
| C       | 185           | 204,119 | 658,5  | -4361,5  | -5276,8 | 15701,5 | 89,851         |
| D       | 195           | 361,134 | 658,5  | -4361,5  | -5276,8 | 15701,5 | 39,868         |
| E       | 205,5         | 526     | 658,5  | -4361,5  | -5276,8 | 15701,5 | 52,913         |
| F       | 252,5         | 831,96  | 0      | -12127,8 | 3971,7  | -6141,6 | 50,118         |
| G       | 342,74        | 171,95  | 0      | -12127,8 | 3971,7  | -6141,6 | 14,758         |
| H       | 352,74        | 98,811  | 0      | -12127,8 | 3971,7  | -6141,6 | 63,745         |
| 2       | 372           | 42,055  | 0      | -12127,8 | 3971,7  | -6141,6 | 16,603         |

Tabla 29: Análisis de las secciones del árbol de entrada.

A continuación, a parte los diagramas de solicitaciones para el árbol de entrada, se muestran también diagramas que representan el grado de utilización a lo largo del árbol, la deflexión y torsión angular, las tensiones de referencia según "Tresca" y "von Mises" y el diagrama de "Goodman".

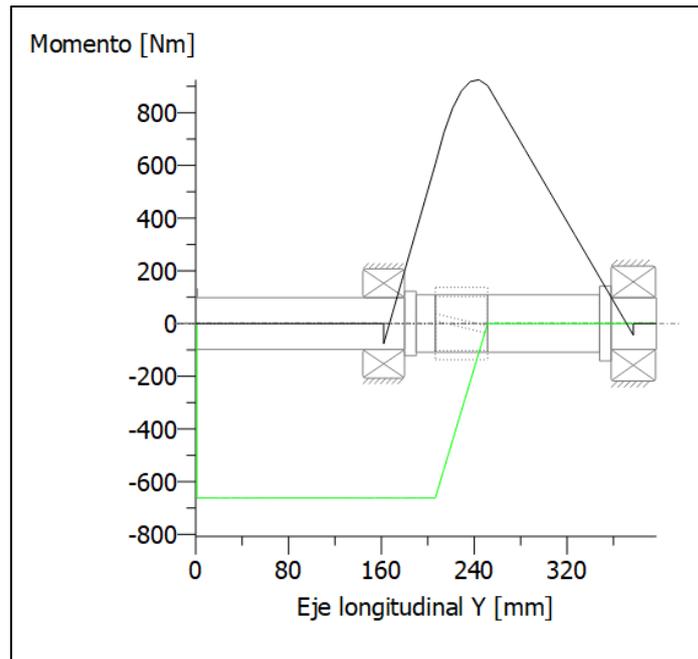


Figura 22: Diagrama de momentos flectores y torsores del árbol de entrada.

Este diagrama muestra los momentos flectores en negro y los torsores en verde.

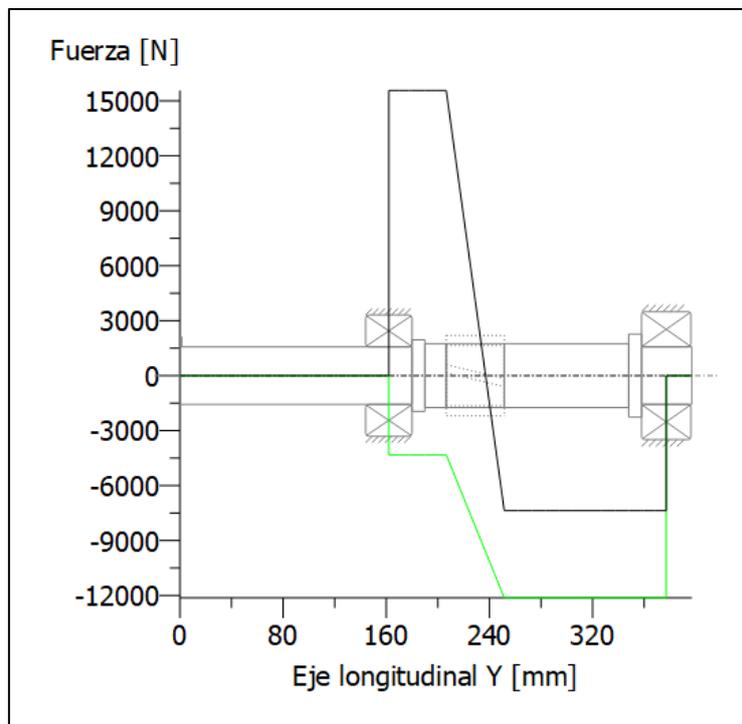


Figura 23: Diagrama de esfuerzos axiales del árbol de entrada.

En este diagrama puede observarse la fuerza axial en verde y la fuerza radial en negro.

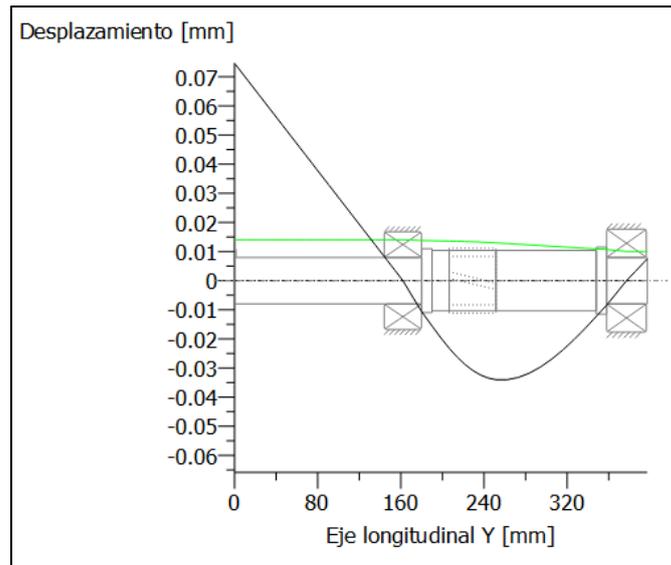


Figura 24: Diagrama de deflexión lineal del árbol de entrada.

En este diagrama puede observarse la deflexión lineal a lo largo del eje X en verde, y a lo largo del eje Y en negro, obteniéndose un valor máximo de 0,074 mm en la posición 0 mm.

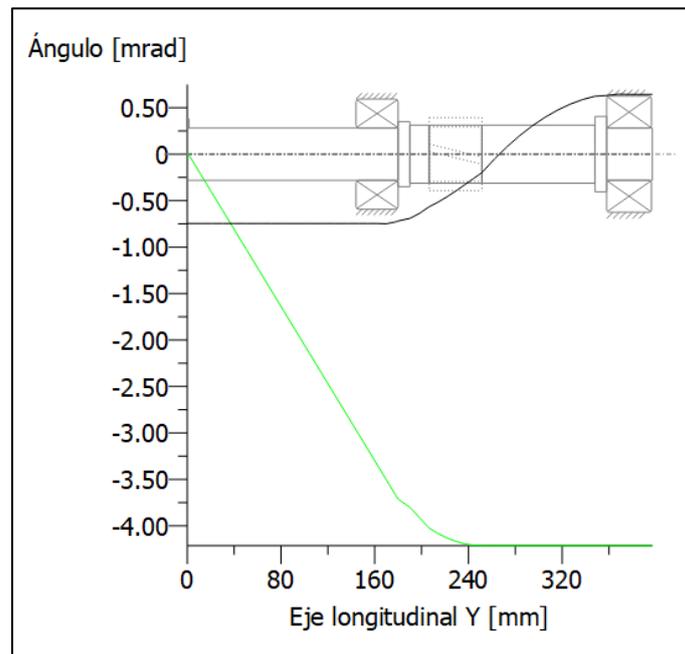


Figura 25: Diagrama de deflexión y torsión angular del árbol de entrada.

En este diagrama se representa en verde la deflexión y torsión angular axial, y en negro la deflexión y torsión radial.

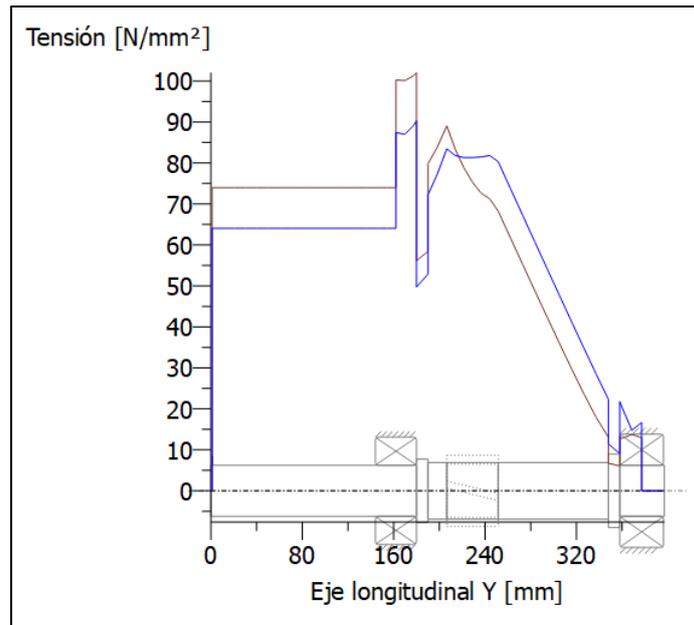


Figura 26: Diagrama de tensiones de referencia según "Tresca" y "von Mises" del árbol de entrada.

La tensión equivalente según "Tresca" se representa en morado, y la tensión equivalente según "von Mises" se representa en azul.

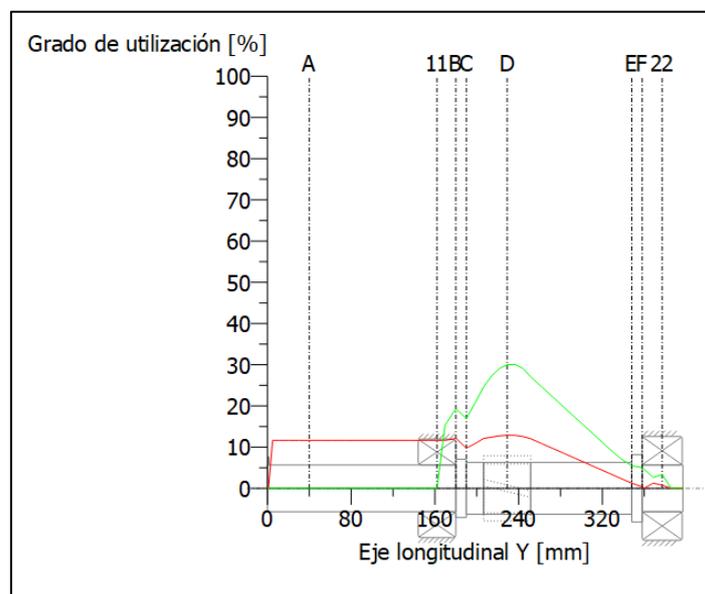


Figura 27: Diagrama de grado de utilización estático y de resistencia continua del árbol de entrada.

Puede observarse un grado de utilización para resistencia continua (verde) más elevado en la sección próxima al engranaje, y un grado de utilización estático (rojo) más elevado en otras secciones del árbol.

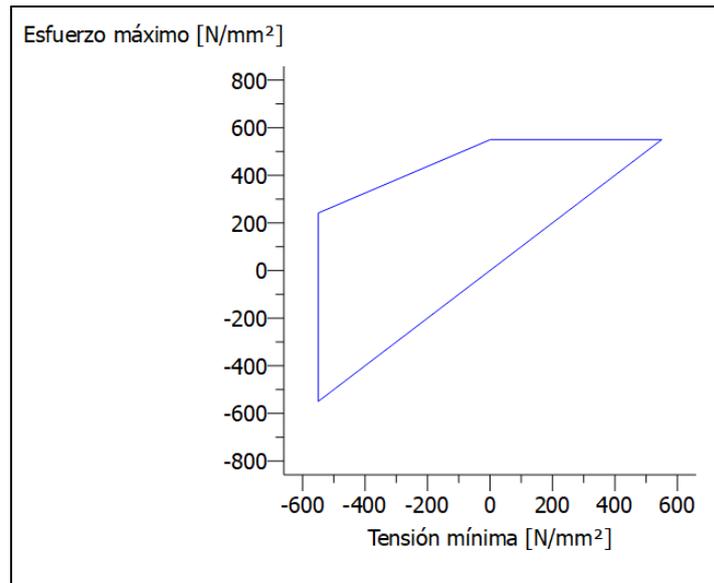


Figura 28: Diagrama de "Goodman" del árbol de entrada.

Diagrama que muestra las tensiones máxima y mínima que provocarían la rotura del material para un número determinado de ciclos.

Para el árbol intermedio, las solicitaciones serán las siguientes:

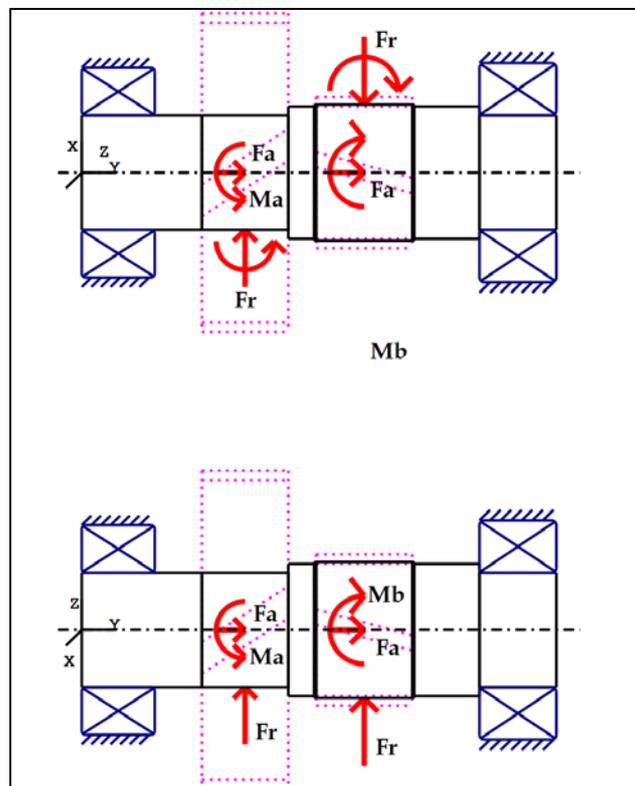


Figura 29: Solicitaciones del árbol intermedio.

A continuación, se muestran las reacciones en los apoyos:

|                              |    | Apoyo izquierdo | Apoyo derecho |
|------------------------------|----|-----------------|---------------|
| Reacción en el eje x (N)     | Rx | -75             | 7011          |
| Reacción en el eje y (N)     | Ry | 10503           | -33856        |
| Reacción en el eje z (N)     | Rz | -31508          | -32507        |
| Fuerza resultante normal (N) | Fr | 31508           | 33254         |

Tabla 30: Reacciones en los apoyos del árbol intermedio.

En la siguiente tabla, pueden observarse los momentos flectores, momentos torsores y fuerzas axiales para cada una de las secciones estudiadas:

| Sección | Posición (mm) | M (Nm)  | T (Nm)  | Fx (N)   | Fy (N)  | Fz (N)  | $\sigma$ (MPa) |
|---------|---------------|---------|---------|----------|---------|---------|----------------|
| 1       | 19            | 0       | 0       | 0        | 0       | 0       | 0              |
| A       | 62,5          | 1083,17 | 0       | -10170,7 | 256,5   | 30510,9 | 61,745         |
| B       | 107,5         | 2045,31 | 1713,46 | -17781,6 | -8807,1 | 9999,6  | 133,55         |
| C       | 121           | 2155,59 | 1713,46 | 17781,6  | -8807,1 | 9999,6  | 77,497         |
| D       | 173           | 1561,79 | 0       | -33409,3 | 7158    | -33189  | 55,561         |
| E       | 207           | 407,425 | 0       | -33409,3 | 7158    | -33189  | 25,727         |
| 2       | 227           | 271,617 | 0       | -33409,3 | 7158    | -33189  | 36,411         |

Tabla 311: Análisis de las secciones del árbol intermedio.

Los diagramas para el árbol intermedio son los siguientes:

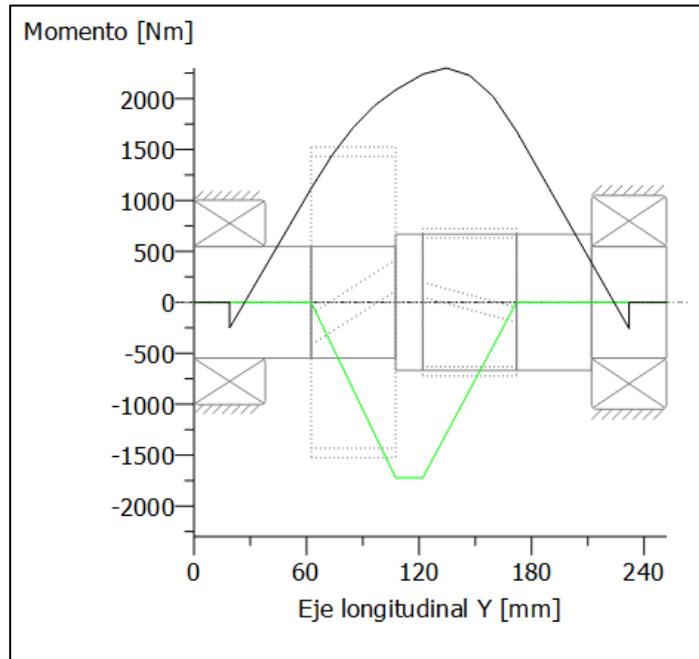


Figura 30: Diagrama de momentos flectores y torsores del árbol intermedio.

Este diagrama muestra los momentos flectores en negro y los torsores en verde.

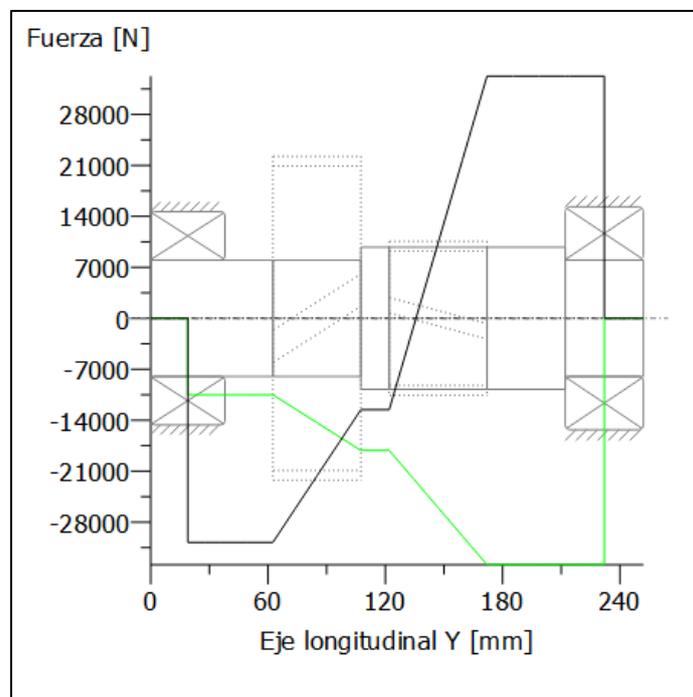


Figura 31: Diagrama de esfuerzos axiales del árbol intermedio.

En este diagrama puede observarse la fuerza axial en verde y la fuerza radial en negro.

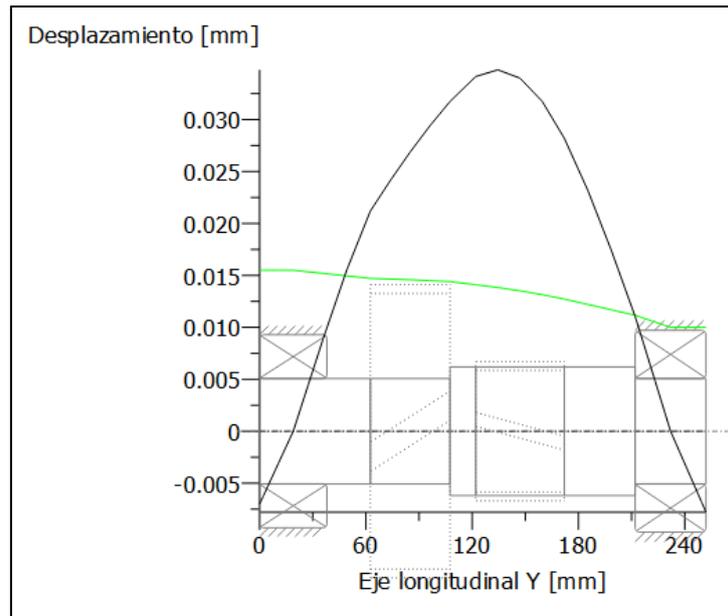


Figura 32: Diagrama de deflexión lineal del árbol intermedio.

En este diagrama puede observarse la deflexión lineal a lo largo del eje X en verde, y a lo largo del eje Y en negro, obteniéndose un valor máximo de 0,038 mm en la posición 134,5 mm.

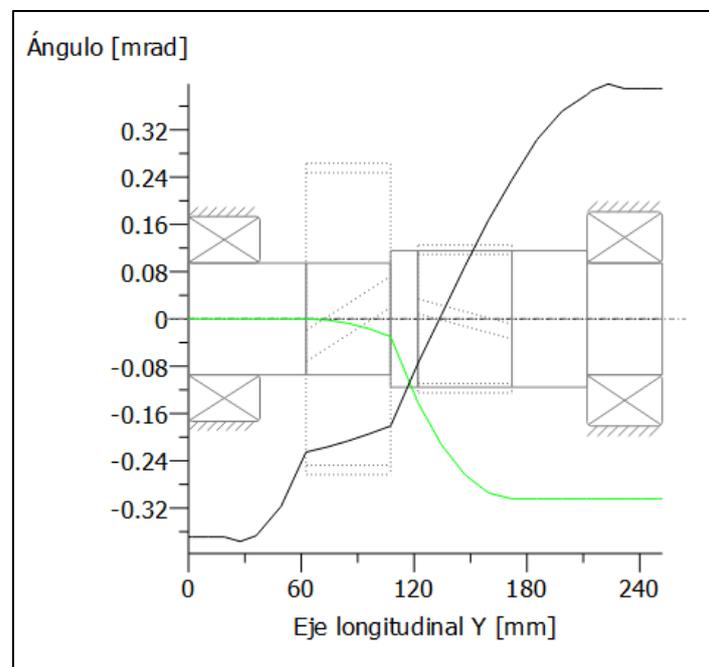


Figura 33: Diagrama de deflexión y torsión angular del árbol intermedio.

En este diagrama se representa en verde la deflexión y torsión angular axial, y en negro la deflexión y torsión radial.

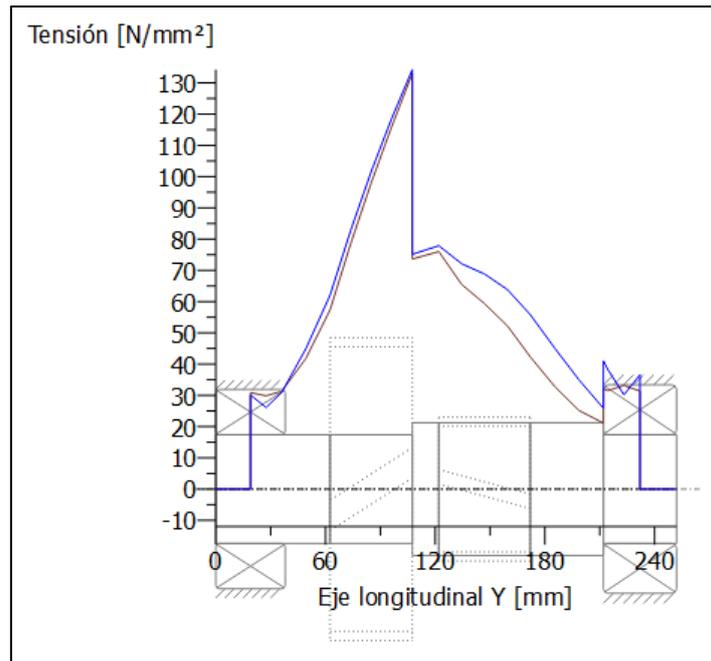


Figura 34: Diagrama de tensiones de referencia según "Tresca" y "von Mises" del árbol intermedio.

La tensión equivalente según "Tresca" se representa en morado, y la tensión equivalente según "von Mises" se representa en azul.

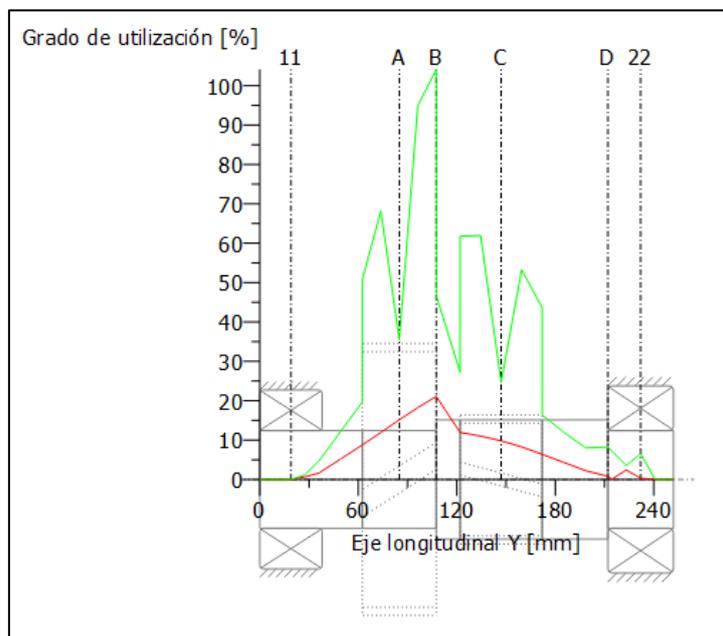


Figura 35: Diagrama de grado de utilización estático y de resistencia continua del árbol intermedio.

Puede observarse un grado de utilización para resistencia continua (verde) más elevado en la sección que ocupan los engranajes, y un grado de utilización estático (rojo) menos elevado en otras secciones del árbol.

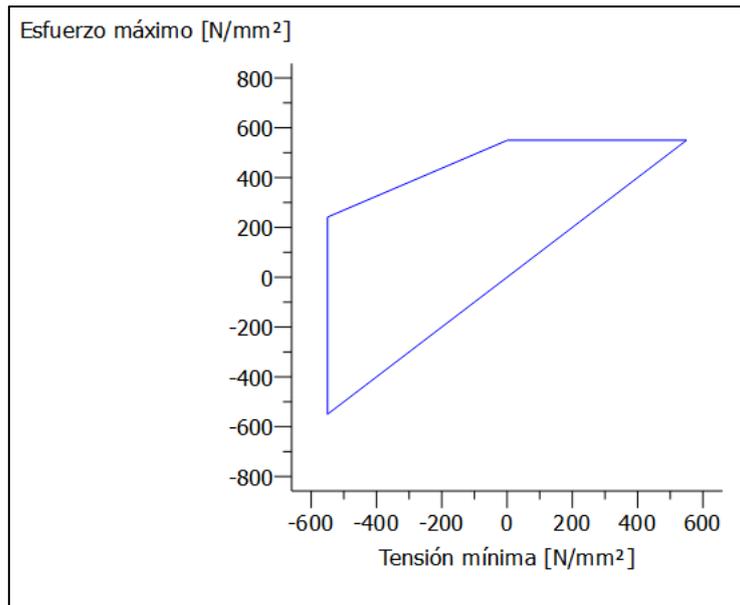


Figura 36: Diagrama de "Goodman" del árbol intermedio.

Diagrama que muestra las tensiones máxima y mínima que provocarían la rotura del material para un número determinado de ciclos.

Para el árbol de salida, las solicitaciones serán las siguientes:

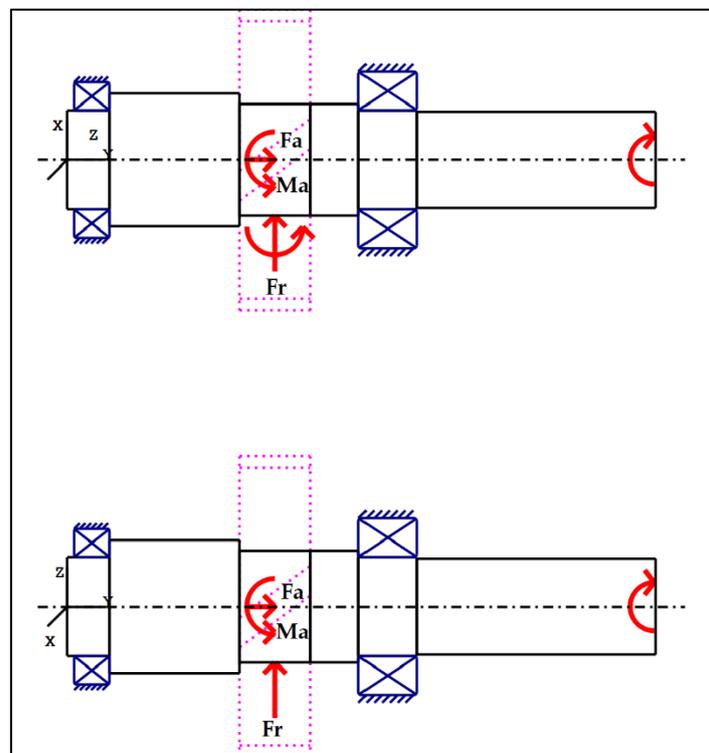


Figura 37: Solicitaciones del árbol de salida.

A continuación, se muestran las reacciones en los apoyos:

|                              |    | Apoyo izquierdo | Apoyo derecho |
|------------------------------|----|-----------------|---------------|
| Reacción en el eje x (N)     | Rx | 2298            | -18021        |
| Reacción en el eje y (N)     | Ry | 5784            | -21174        |
| Reacción en el eje z (N)     | Rz | -16030          | -26504        |
| Fuerza resultante normal (N) | Fr | 16194           | 32050         |

Tabla 32: Reacciones en los apoyos del árbol de salida.

En la siguiente tabla, pueden observarse los momentos flectores, momentos torsores y fuerzas axiales para cada una de las secciones estudiadas:

| Sección | Posición (mm) | M (Nm) | T (Nm)  | Fx (N)   | Fy (N)   | Fz (N)  | $\sigma$ (MPa) |
|---------|---------------|--------|---------|----------|----------|---------|----------------|
| 1       | 17,5          | 0      | 0       | 0        | 0        | 0       | 0              |
| A       | 30            | 31,855 | 0       | -5688,5  | -2821,1  | 15675,9 | 9,976          |
| B       | 122           | 1497,2 | 0       | -5688,5  | -2821,1  | 15675,9 | 24,71          |
| C       | 172           | 1458,9 | 4500,24 | -21003,6 | -18466,9 | -26649  | 102,544        |
| D       | 206           | 356,64 | 4500,24 | -21003,6 | -18466,9 | -26649  | 96,237         |
| 2       | 226,5         | 308,01 | 4500,24 | -21003,6 | -18466,9 | -26649  | 135,551        |
| E       | 247           | 0      | 4500,24 | 0        | 0        | 0       | 115,737        |
| F       | 284           | 0      | 4500,24 | 0        | 0        | 0       | 115,737        |
| G       | 409           | 0      | 4500,24 | 0        | 0        | 0       | 115,737        |

Tabla 33: Análisis de las secciones del árbol de salida.

Los diagramas para el árbol de salida son los siguientes:

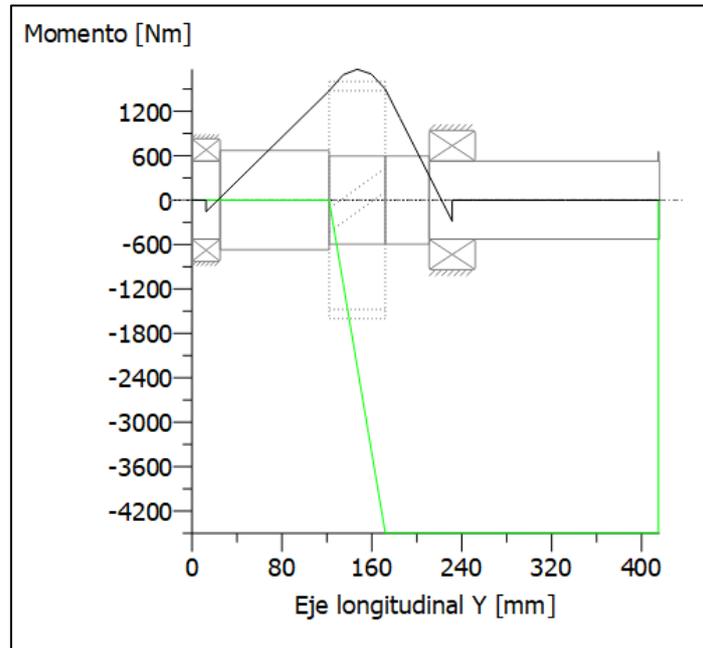


Figura 38: Diagrama de momentos flectores y torsores del árbol de salida.

Este diagrama muestra los momentos flectores en negro y los torsores en verde.

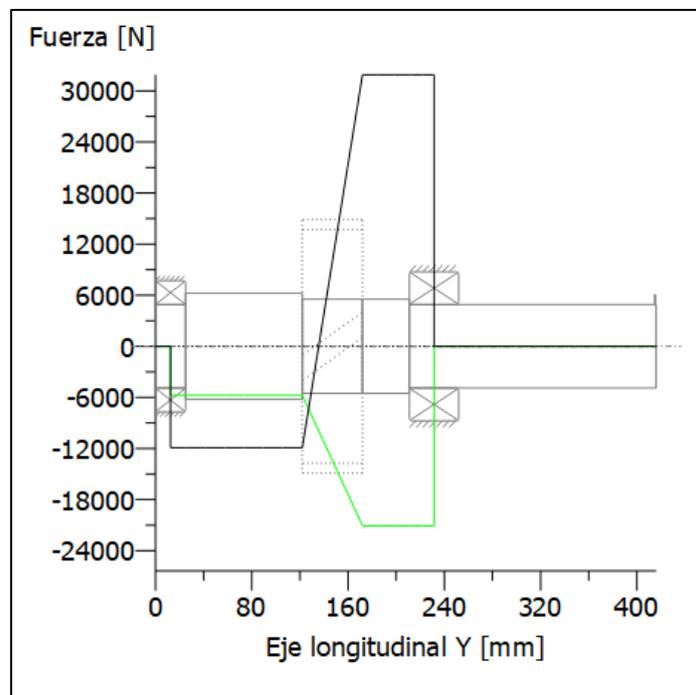


Figura 39: Diagrama de esfuerzos axiales del árbol de salida.

En este diagrama puede observarse la fuerza axial en verde y la fuerza radial en negro.

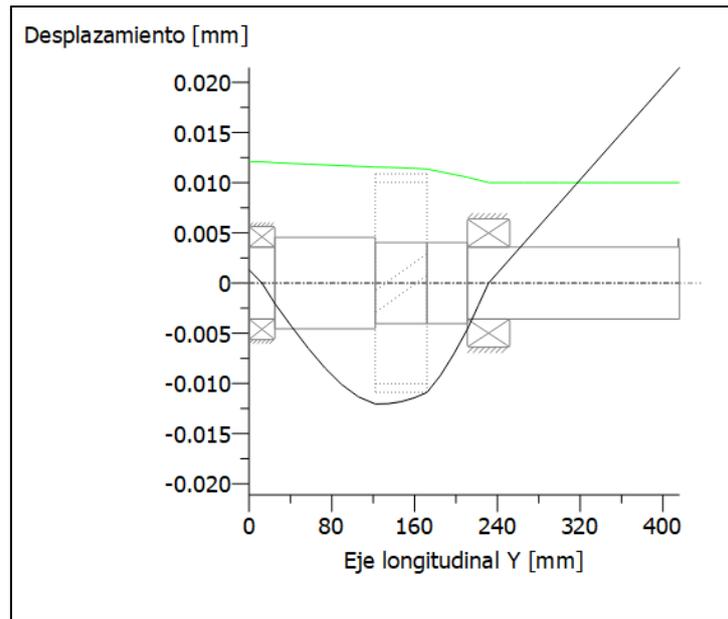


Figura 40: Diagrama de deflexión lineal del árbol de salida.

En este diagrama puede observarse la deflexión lineal a lo largo del eje X en verde, y a lo largo del eje Y en negro, obteniéndose un valor máximo de 0,022 mm en la posición 416 mm.

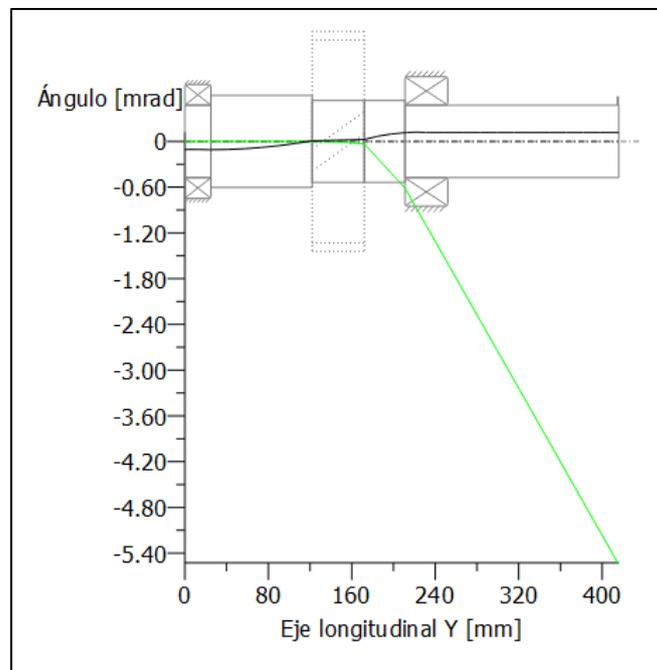


Figura 41: Diagrama de deflexión y torsión angular del árbol de salida.

En este diagrama se representa en verde la deflexión y torsión angular axial, y en negro la deflexión y torsión radial.

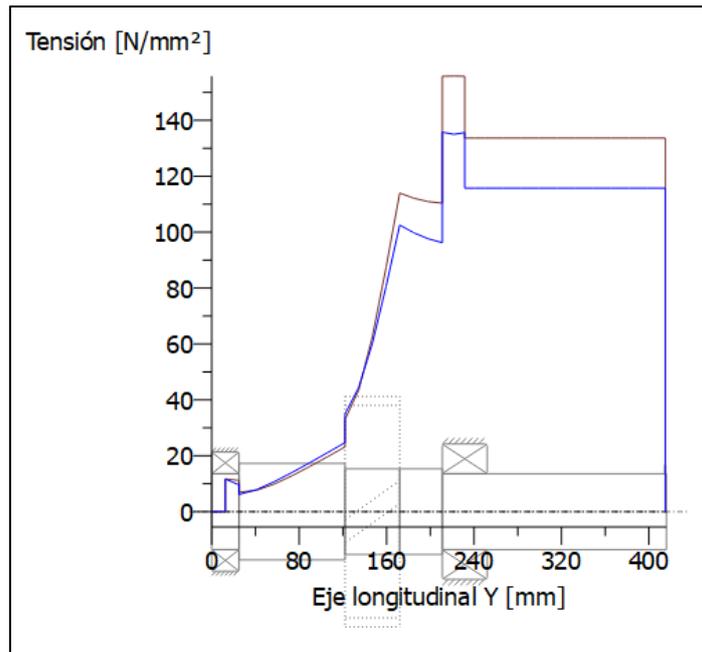


Figura 42: Diagrama de tensiones de referencia según "Tresca" y "von Mises" del árbol de salida.

La tensión equivalente según "Tresca" se representa en morado, y la tensión equivalente según "von Mises" se representa en azul.

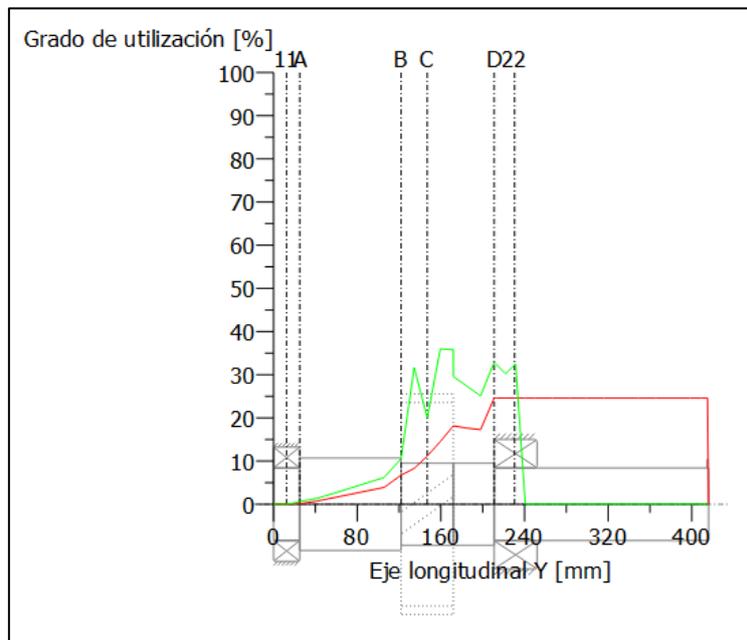


Figura 43: Diagrama de grado de utilización estático y de resistencia continua del árbol de salida.

Puede observarse un grado de utilización para resistencia continua (verde) más elevado en la sección que ocupa el engranaje, y un grado de utilización estático (rojo) más elevado en otras secciones del árbol.

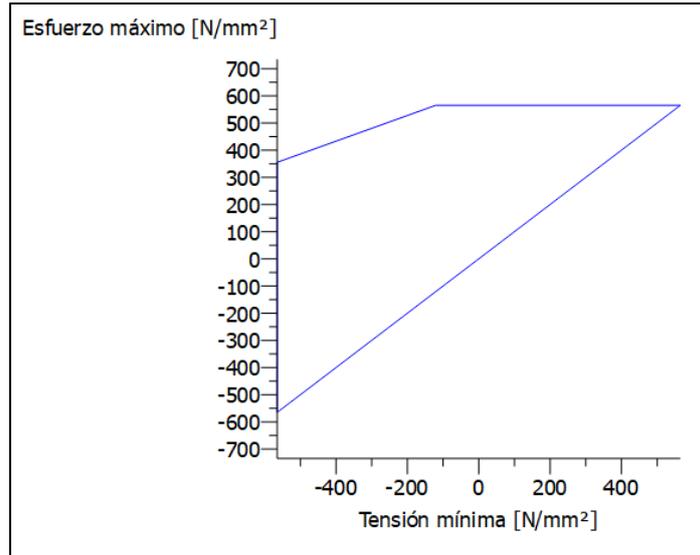


Figura 44: Diagrama de "Goodman" del árbol de salida.

Diagrama que muestra las tensiones máxima y mínima que provocarían la rotura del material para un número determinado de ciclos.

### II.4.1.2. FUERZAS EN SENTIDO ANTIHORARIO

En este apartado se calcularán las sollicitaciones en las secciones anteriormente expuestas para cada uno de los árboles, cuando estén rotando en sentido antihorario.

Para el árbol de entrada, las reacciones serán las siguientes:

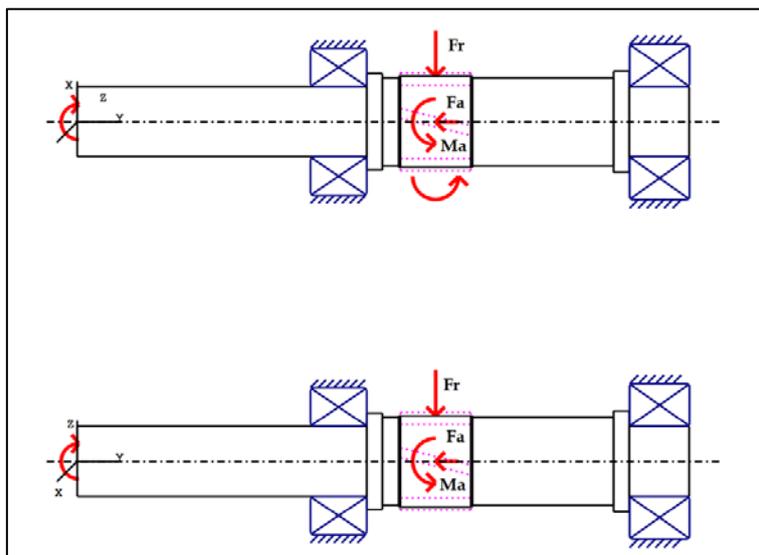


Figura 45: Sollicitaciones del árbol de entrada.

A continuación, se muestran las reacciones en los apoyos:

|                              |    | Apoyo izquierdo | Apoyo derecho |
|------------------------------|----|-----------------|---------------|
| Reacción en el eje x (N)     | Rx | 7637            | 1611          |
| Reacción en el eje y (N)     | Ry | 9694            | -1928         |
| Reacción en el eje z (N)     | Rz | 14577           | 6353          |
| Fuerza resultante normal (N) | Fr | 16456           | 6554          |

Tabla 34: Reacciones en los apoyos del árbol de entrada.

En la siguiente tabla, pueden observarse los momentos flectores, momentos torsores y fuerzas axiales para cada una de las secciones estudiadas:

| Sección | Posición (mm) | M (Nm)  | T (Nm) | Fx (N)  | Fy (N)  | Fz (N)   | $\sigma$ (MPa) |
|---------|---------------|---------|--------|---------|---------|----------|----------------|
| A       | 5             | 0       | 658,5  | 0       | 0       | 0        | 63,745         |
| B       | 75            | 0       | 658,5  | 0       | 0       | 0        | 63,745         |
| 1       | 167           | 0       | 685,5  | 0       | 0       | 0        | 63,745         |
| C       | 185           | 217,305 | 658,5  | -9622,6 | -7792,6 | -14788,3 | 92,636         |
| D       | 195           | 384,46  | 658,5  | -9622,6 | -7792,6 | -14788,3 | 41,737         |
| E       | 205,5         | 559,978 | 658,5  | -9622,6 | -7792,6 | -14788,3 | 55,993         |
| F       | 252,5         | 717,967 | 0      | -1856,4 | 1456    | 6141,6   | 40,585         |
| G       | 342,74        | 148,39  | 0      | -1856,4 | 1456    | 6141,6   | 10,107         |
| H       | 352,74        | 85,272  | 0      | -1856,4 | 1456    | 6141,6   | 5,938          |
| 2       | 372           | 36,292  | 0      | -1856,4 | 1456    | 6141,6   | 11             |

Tabla 35: Análisis de las secciones del árbol de entrada.

Los diagramas para el árbol de entrada son los siguientes:

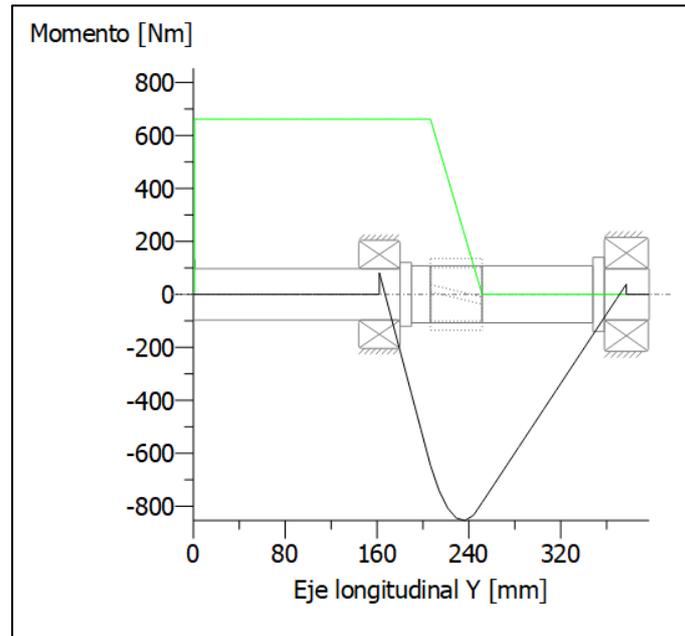


Figura 46: Diagrama de momentos flectores y torsores del árbol de entrada.

Este diagrama muestra los momentos flectores en negro y los torsores en verde.

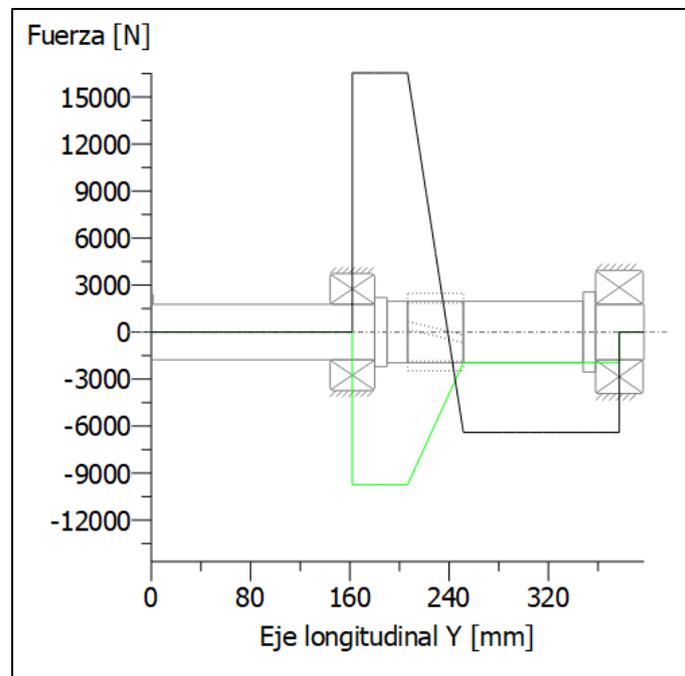


Figura 47: Diagrama de esfuerzos axiales del árbol de entrada.

En este diagrama puede observarse la fuerza axial en verde y la fuerza radial en negro.

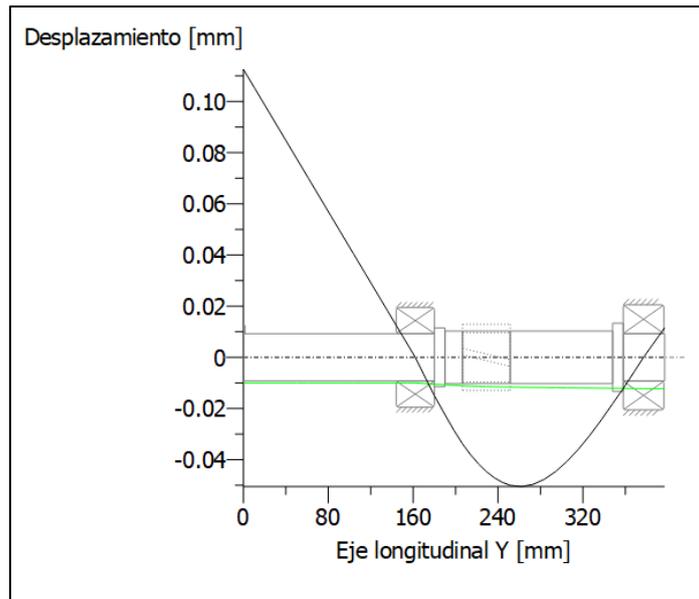


Figura 48: Diagrama de deflexión lineal del árbol de entrada.

En este diagrama puede observarse la deflexión lineal a lo largo del eje X en verde, y a lo largo del eje Y en negro, obteniéndose un valor máximo de 0,016 mm en la posición 0 mm.

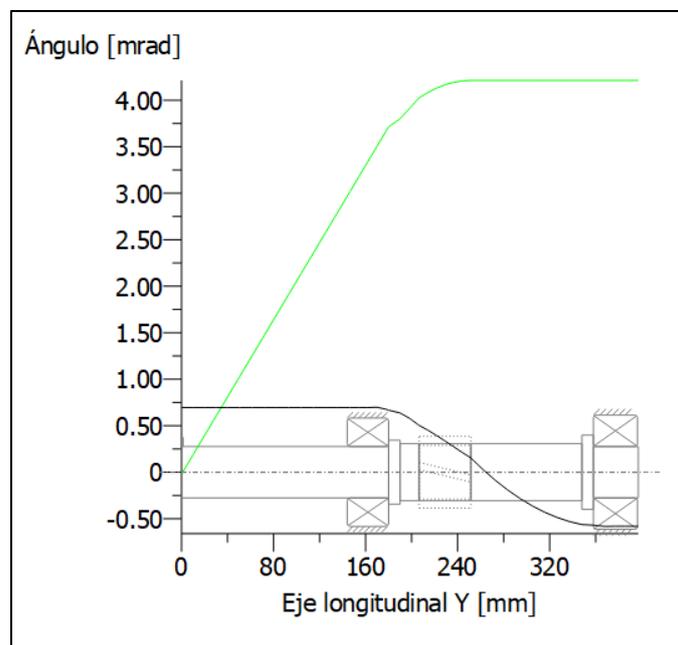


Figura 49: Diagrama de deflexión y torsión angular del árbol de entrada.

En este diagrama se representa en verde la deflexión y torsión angular axial, y en negro la deflexión y torsión radial.

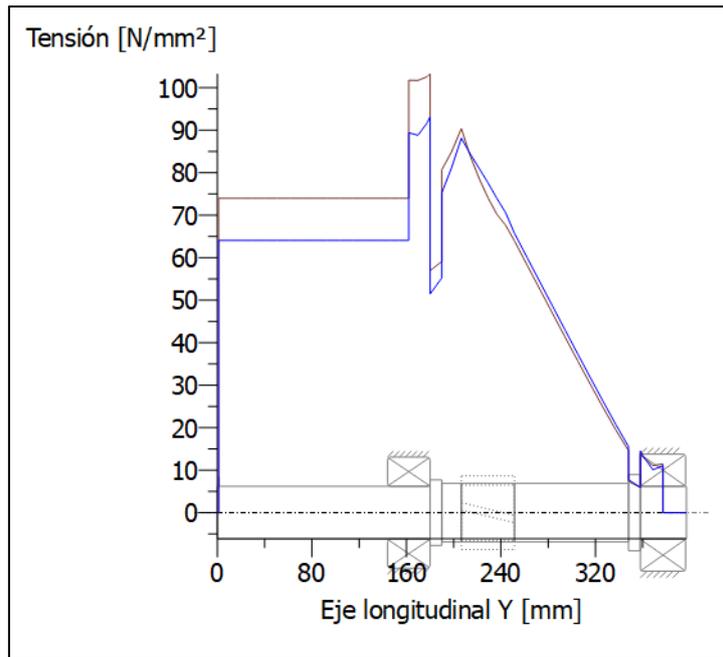


Figura 50: Diagrama de tensiones de referencia según "Tresca" y "von Mises" del árbol de entrada.

La tensión equivalente según "Tresca" se representa en morado, y la tensión equivalente según "von Mises" se representa en azul.

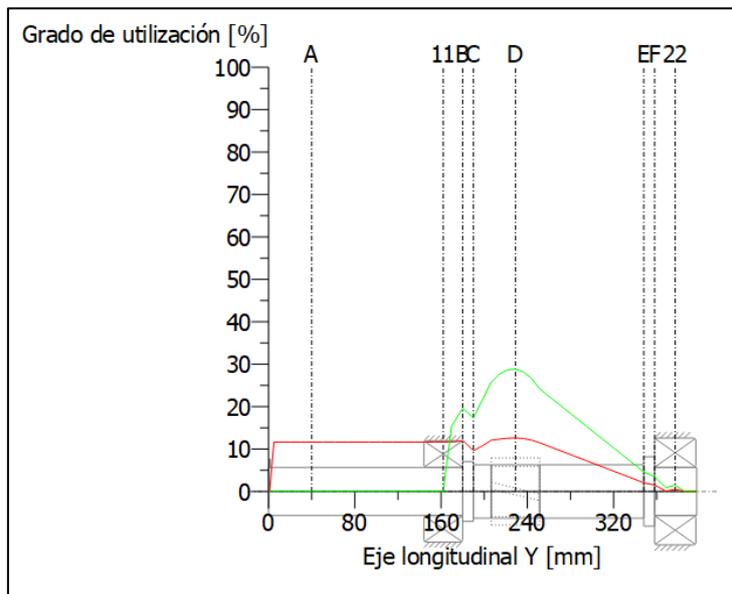


Figura 51: Diagrama de grado de utilización estático y de resistencia continua del árbol de entrada.

Puede observarse un grado de utilización para resistencia continua (verde) más elevado en la sección próxima al engranaje, y un grado de utilización estático (rojo) elevado en otras secciones del árbol.

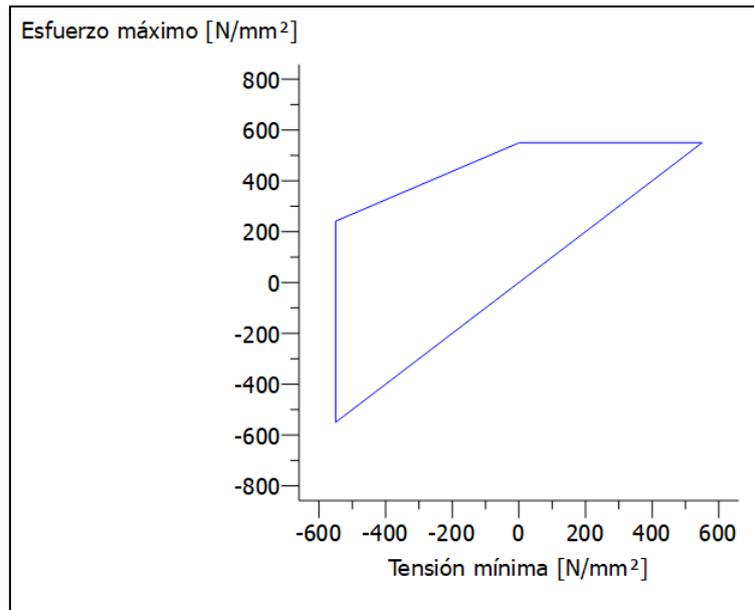


Figura 52: Diagrama de "Goodman" del árbol de entrada.

Diagrama que muestra las tensiones máxima y mínima que provocarían la rotura del material para un número determinado de ciclos.

Para el árbol intermedio, las solicitaciones serán las siguientes:

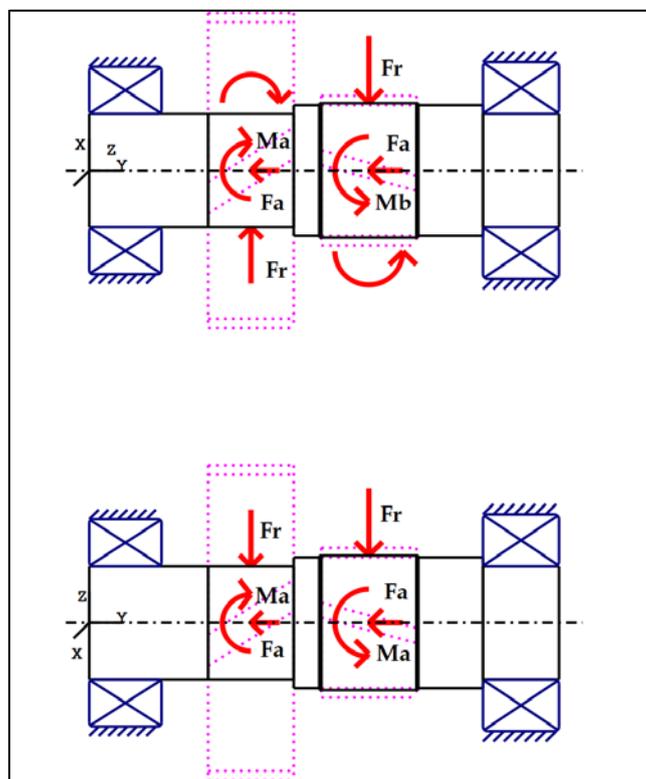


Figura 53: Solicitaciones para el árbol intermedio.

A continuación, se muestran las reacciones en los apoyos:

|                              |    | Apoyo izquierdo | Apoyo derecho |
|------------------------------|----|-----------------|---------------|
| Reacción en el eje x (N)     | Rx | -236            | 7172          |
| Reacción en el eje y (N)     | Ry | 32600           | -9247         |
| Reacción en el eje z (N)     | Rz | 31508           | 32288         |
| Fuerza resultante normal (N) | Fr | 31509           | 33288         |

Tabla 36: Reacciones en los apoyos del árbol intermedio.

En la siguiente tabla, pueden observarse los momentos flectores, momentos torsores y fuerzas axiales para cada una de las secciones estudiadas:

| Sección | Posición (mm) | M (Nm)  | T (Nm)  | Fx (N)   | Fy (N)  | Fz (N)   | $\sigma$ (MPa) |
|---------|---------------|---------|---------|----------|---------|----------|----------------|
| 1       | 19            | 0       | 0       | 0        | 0       | 0        | 0              |
| A       | 62,5          | 1083,23 | 0       | -32679,5 | 420,9   | -30510,9 | 68,898         |
| B       | 107,5         | 2151,25 | 1713,46 | -25068,6 | -8642,7 | -9999,6  | 139,636        |
| C       | 121           | 2320,84 | 1713,46 | -25068,6 | -8642,7 | -9999,6  | 82,435         |
| D       | 173           | 1563,41 | 0       | -9440,9  | 7322,4  | 33189    | 50,157         |
| E       | 207           | 407,84  | 0       | -9440,9  | 7322,4  | 33189    | 22,01          |
| 2       | 227           | 271,89  | 0       | -9440,9  | 7322,4  | 33189    | 31,306         |

Tabla 37: Análisis de las secciones del árbol intermedio.

Los diagramas para el árbol intermedio serán los siguientes:

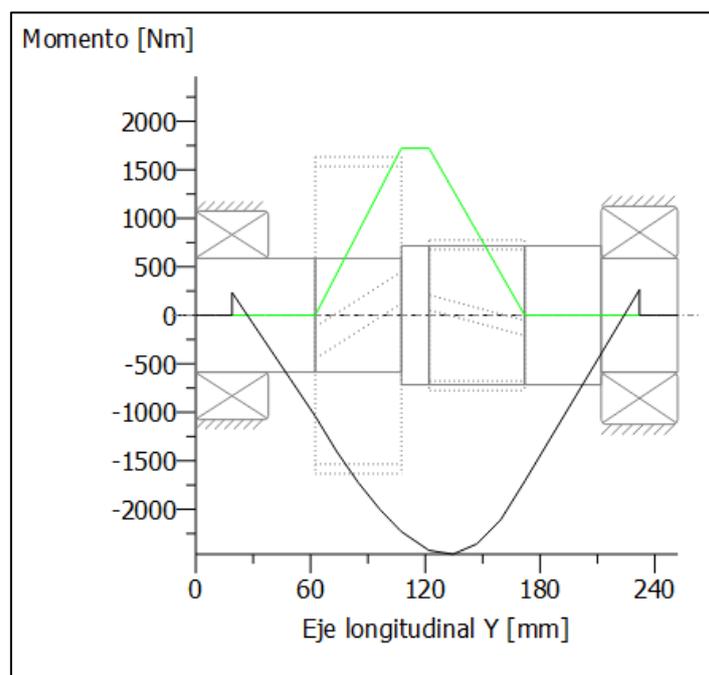


Figura 54: Diagrama de momentos flectores y torsores del árbol intermedio.

Este diagrama muestra los momentos flectores en negro y los torsores en verde.

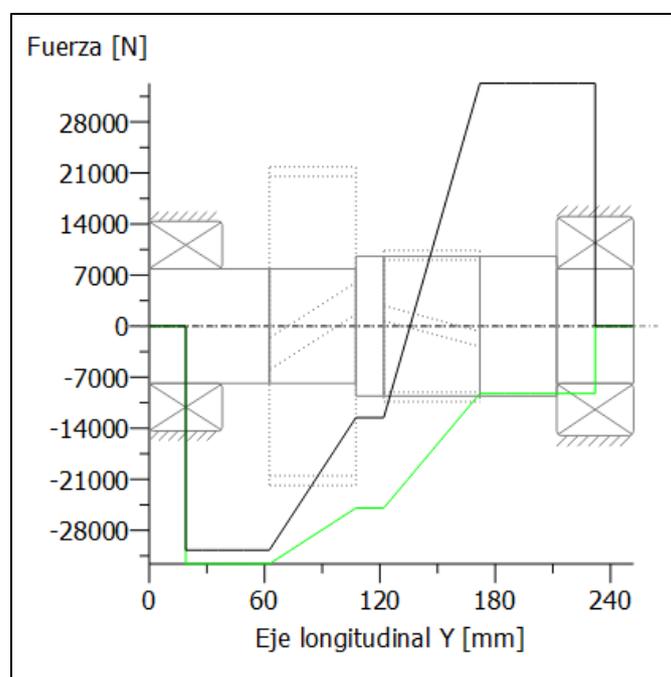


Figura 55: Diagrama de esfuerzos axiales del árbol intermedio.

En este diagrama puede observarse la fuerza axial en verde y la fuerza radial en negro.

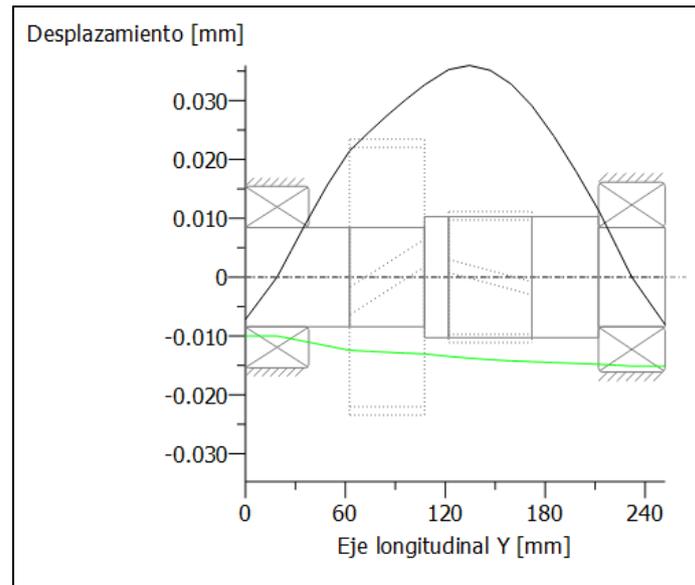


Figura 56: Diagrama de deflexión lineal del árbol intermedio.

En este diagrama puede observarse la deflexión lineal a lo largo del eje X en verde, y a lo largo del eje Y en negro, obteniéndose un valor máximo de 0,036 mm en la posición 134,5 mm.

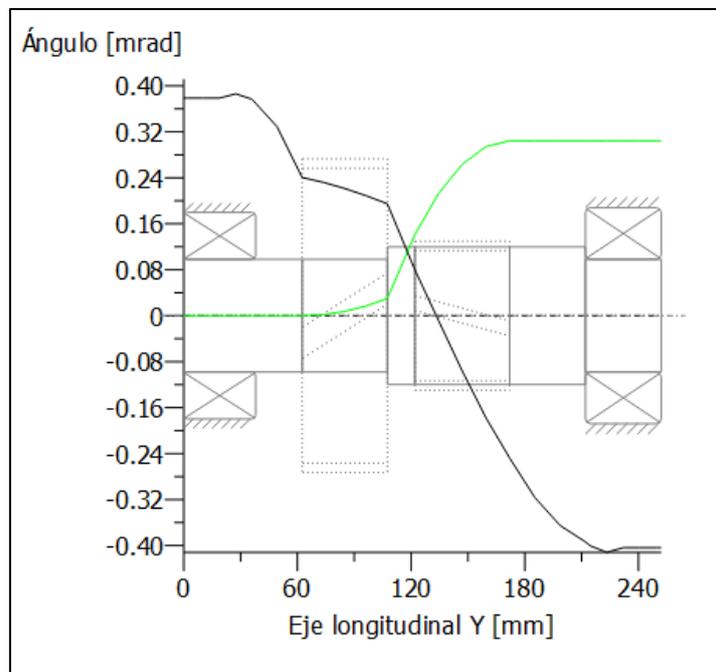


Figura 57: Diagrama de deflexión y torsión angular del árbol intermedio.

En este diagrama se representa en verde la deflexión y torsión angular axial, y en negro la deflexión y torsión radial.

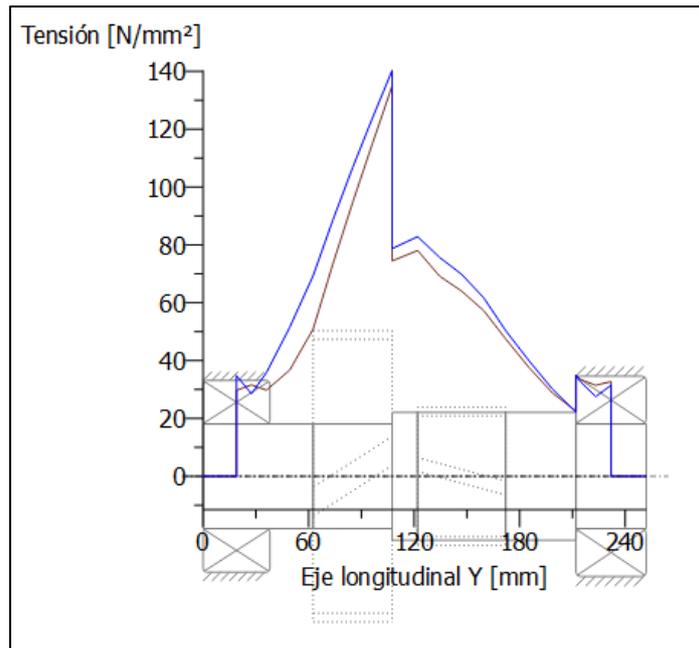


Figura 58: Diagrama de tensiones de referencia según "Tresca" y "von Mises" del árbol intermedio.

La tensión equivalente según "Tresca" se representa en morado, y la tensión equivalente según "von Mises" se representa en azul.

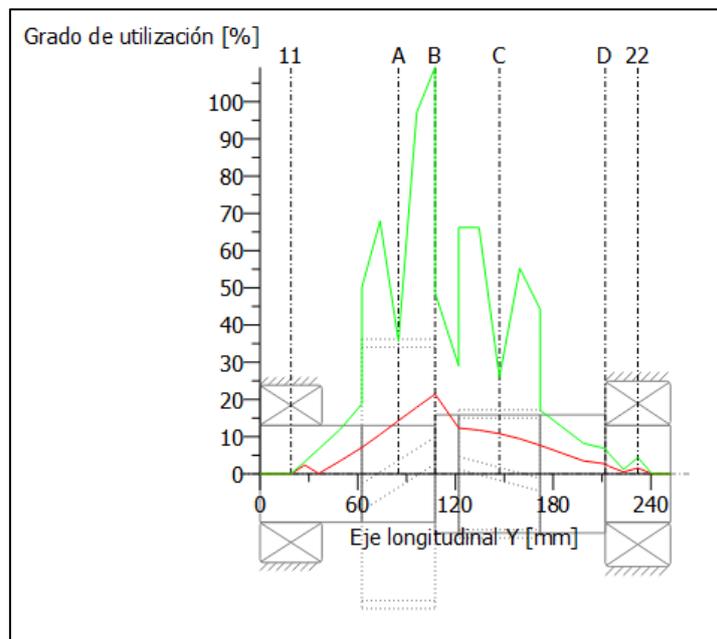


Figura 59: Diagrama de grado de utilización estático y de resistencia continua del árbol intermedio.

Puede observarse un grado de utilización para resistencia continua (verde) más elevado en la sección que ocupan los engranajes, y un grado de utilización estático (rojo) menos elevado en otras secciones del árbol.

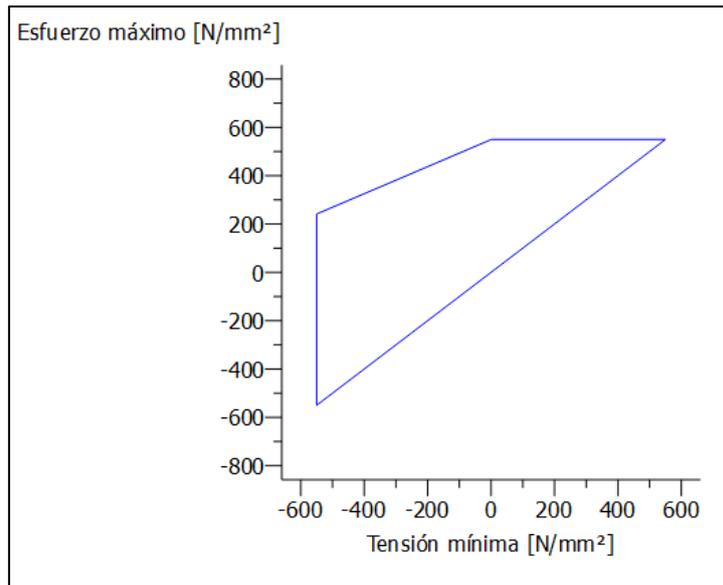


Figura 60: Diagrama de "Goodman" del árbol intermedio.

Diagrama que muestra las tensiones máxima y mínima que provocarían la rotura del material para un número determinado de ciclos.

Para el árbol de salida, las sollicitaciones serán las siguientes:

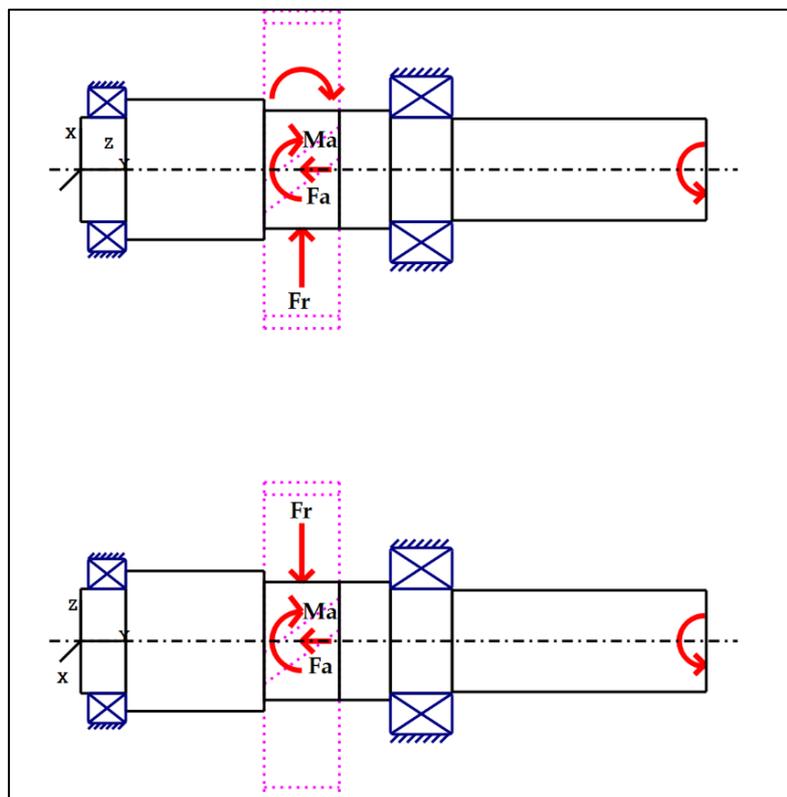


Figura 61: Sollicitaciones para el árbol de salida.

A continuación, se muestran las reacciones en los apoyos:

|                              |    | Apoyo izquierdo | Apoyo derecho |
|------------------------------|----|-----------------|---------------|
| Reacción en el eje x (N)     | Rx | -14080          | -1566         |
| Reacción en el eje y (N)     | Ry | 24122           | -8807         |
| Reacción en el eje z (N)     | Rz | 15952           | 26373         |
| Fuerza resultante normal (N) | Fr | 21276           | 26420         |

Tabla 38: Reacciones en los apoyos del árbol de salida.

En la siguiente tabla, pueden observarse los momentos flectores, momentos torsores y fuerzas axiales para cada una de las secciones estudiadas:

| Sección | Posición (mm) | M (Nm)  | T (Nm)  | Fx (N)   | Fy (N)  | Fz (N)   | $\sigma$ (MPa) |
|---------|---------------|---------|---------|----------|---------|----------|----------------|
| 1       | 17,5          | 0       | 0       | 0        | 0       | 0        | 0              |
| A       | 30            | 42,586  | 0       | -24207,7 | 14140,6 | -15675,9 | 14,823         |
| B       | 122           | 2001,55 | 0       | -24207,7 | 14140,6 | -15675,9 | 35,209         |
| C       | 172           | 1200,49 | 4500,24 | -8892,5  | -1235,2 | 26649    | 97,408         |
| D       | 206           | 293,45  | 4500,24 | -8892,5  | -1235,2 | 26649    | 93,29          |
| 2       | 226,5         | 253,43  | 4500,24 | -8892,5  | -1235,2 | 26649    | 131,895        |
| E       | 247           | 0       | 4500,24 | 0        | 0       | 0        | 115,737        |
| F       | 284           | 0       | 4500,24 | 0        | 0       | 0        | 115,737        |
| G       | 409           | 0       | 4500,24 | 0        | 0       | 0        | 115,737        |

Tabla 39: Análisis de las secciones del árbol de salida.

Los diagramas para el árbol de salida serán los siguientes:

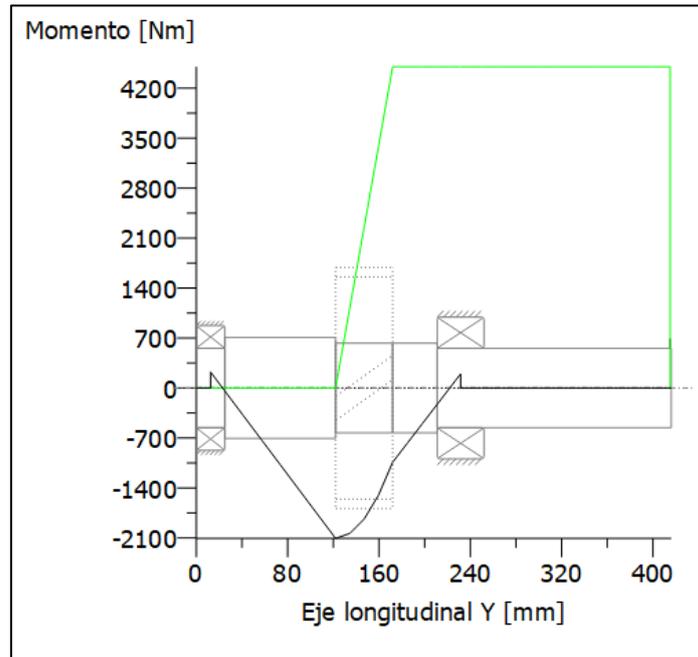


Figura 62: Diagrama de momentos flectores y torsores del árbol de salida.

Este diagrama muestra los momentos flectores en negro y los torsores en verde.

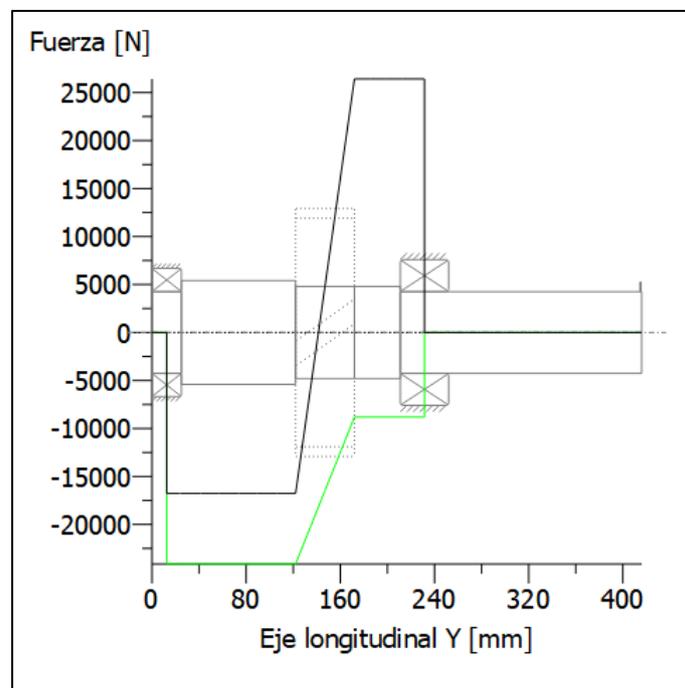


Figura 63: Diagrama de esfuerzos axiales del árbol de salida.

En este diagrama puede observarse la fuerza axial en verde y la fuerza radial en negro.

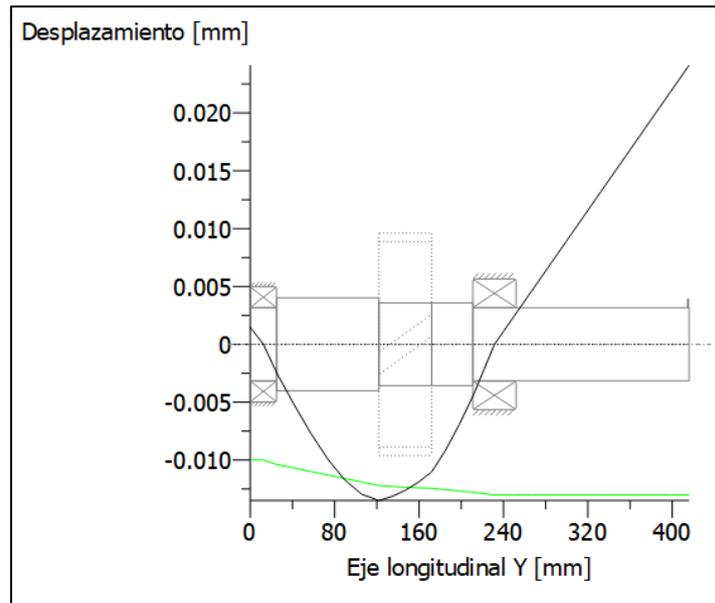


Figura 64: Diagrama de deflexión lineal del árbol de salida.

En este diagrama puede observarse la deflexión lineal a lo largo del eje X en verde, y a lo largo del eje Y en negro, obteniéndose un valor máximo de 0,028 mm en la posición 416 mm.

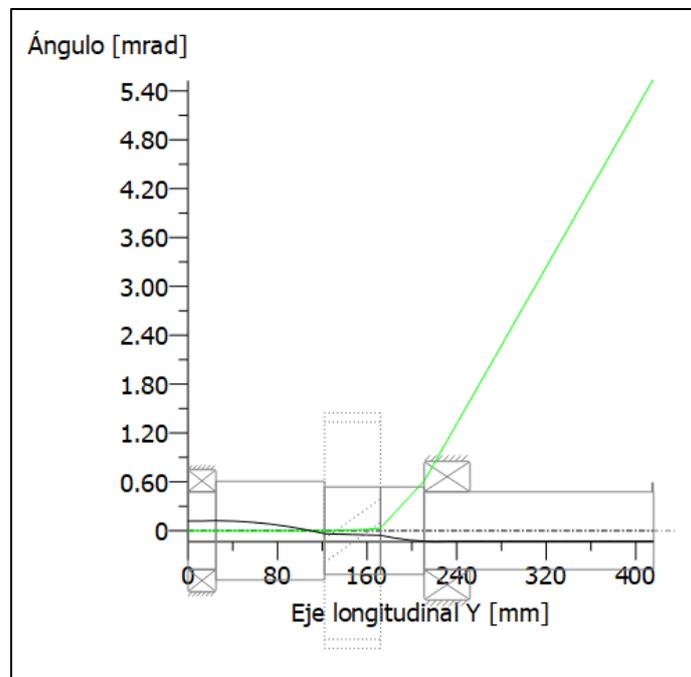


Figura 65: Diagrama de deflexión y torsión angular del árbol de salida.

En este diagrama se representa en verde la deflexión y torsión angular axial, y en negro la deflexión y torsión radial.

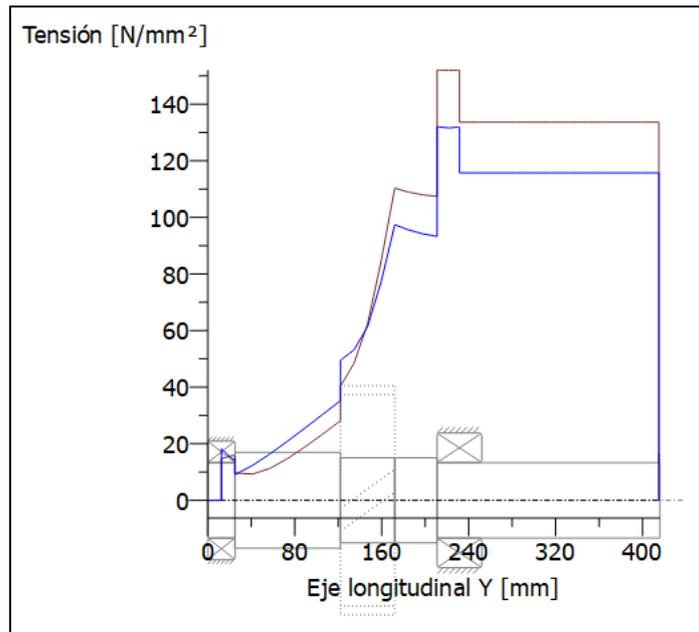


Figura 66: Diagrama de tensiones de referencia según "Tresca" y "von Mises" del árbol de salida.

La tensión equivalente según "Tresca" se representa en morado, y la tensión equivalente según "von Mises" se representa en azul.

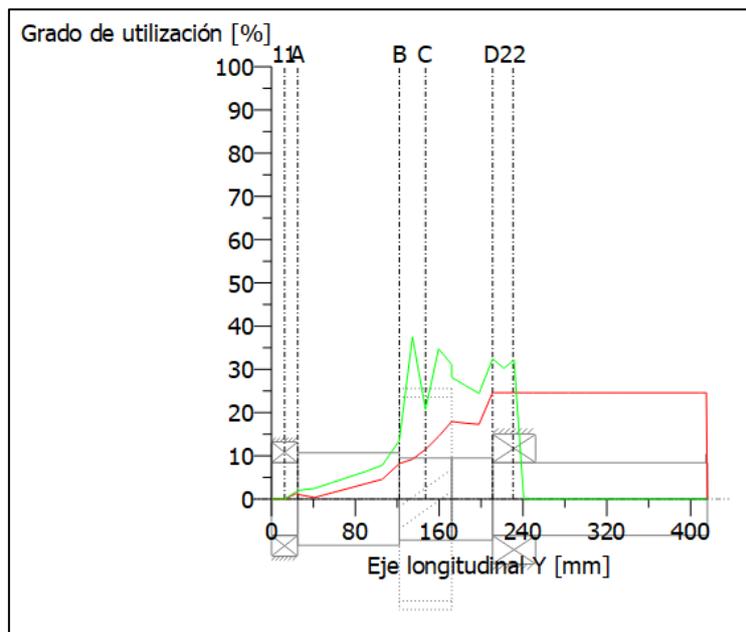


Figura 67: Diagrama de grado de utilización estático y de resistencia continua del árbol de salida.

Puede observarse un grado de utilización para resistencia continua (verde) más elevado en la sección que ocupa el engranaje, y un grado de utilización estático (rojo) más elevado en otras secciones del árbol.

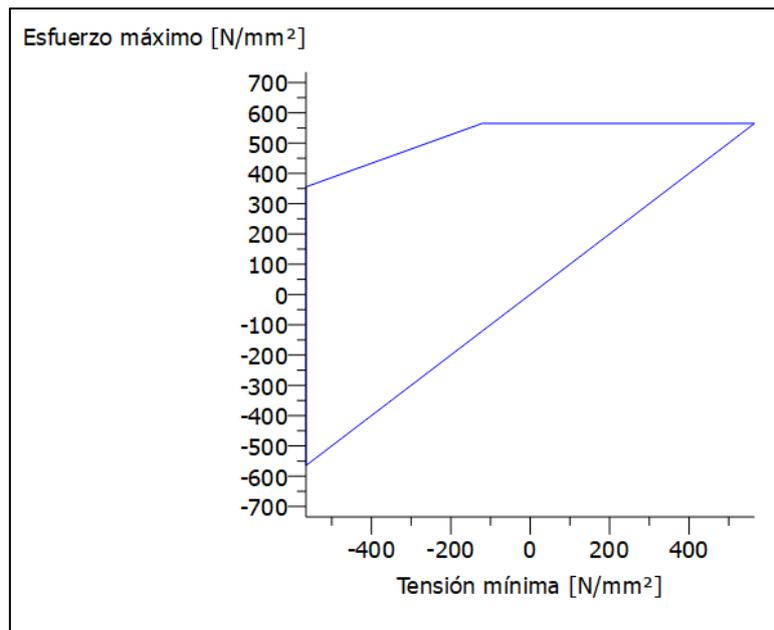


Figura 68: Diagrama de "Goodman" del árbol de salida.

Diagrama que muestra las tensiones máxima y mínima que provocarían la rotura del material para un número determinado de ciclos.

## II.4.2. CÁLCULO DE LA DEFLEXIÓN

En este apartado, se abordará el cálculo de uno de los factores más importantes en el diseño de árboles, como es la rigidez lateral.

La deflexión angular producida en los rodamientos, debe vigilarse ya que puede reducir considerablemente la vida de los mismos.

Normalmente este tipo de cálculo suele realizarse considerando los árboles como si de una viga biapoyada se tratase, y mediante la aplicación de fórmulas referentes a la resistencia de materiales. Pero, debido a que los árboles que se desean analizar son de sección variable, se utiliza el mismo software que para la realización de los cálculos de las solicitaciones, con el fin de simplificar los cálculos y obtener unos resultados con el mínimo nivel de error.

Los árboles deberán cumplir las siguientes condiciones basadas en el ANEXO 18:

- La deformación lateral por flexión será de 1mm/m como máximo.
- El desplazamiento máximo en engranajes helicoidales será de 0,02070 mm.
- La pendiente en rodamientos de rodillos cónicos no excederá de 0,8 mrad.

Para el árbol de entrada girando en sentido horario, se obtienen los siguientes resultados:

|  |        | <b>Posición<br/>(mm)</b> |
|--|--------|--------------------------|
| <b>Flexión máxima (mm)</b>                         | 0,075  | 0                        |
| <b>Desplazamiento máximo <math>z_1</math> (mm)</b> | 0,0134 | 229                      |
| <b>Pendiente angular Rod. Izq. (mrad)</b>          | 0,1182 | 162                      |
| <b>Pendiente angular Rod. Der. (mrad)</b>          | 0,1317 | 377,125                  |

*Tabla 40: Resultados de la deflexión para el árbol de entrada en giro horario.*

Cuando el árbol de entrada gira en sentido antihorario, se obtienen los siguientes resultados:

|  |        | <b>Posición<br/>(mm)</b> |
|--|--------|--------------------------|
| <b>Flexión máxima (mm)</b>                         | 0,070  | 0                        |
| <b>Desplazamiento máximo <math>z_1</math> (mm)</b> | 0,0113 | 229                      |
| <b>Pendiente angular Rod. Izq. (mrad)</b>          | 0,431  | 162                      |
| <b>Pendiente angular Rod. Der. (mrad)</b>          | 0,342  | 377,125                  |

*Tabla 41: Resultados de la deflexión para el árbol de entrada en giro antihorario.*

Para el árbol intermedio girando en sentido horario, se obtienen los siguientes resultados:

|  |        | <b>Posición<br/>(mm)</b> |
|--|--------|--------------------------|
| <b>Flexión máxima (mm)</b>                         | 0,035  | 134,5                    |
| <b>Desplazamiento máximo <math>z_2</math> (mm)</b> | 0,0146 | 85                       |
| <b>Desplazamiento máximo <math>z_3</math> (mm)</b> | 0,0135 | 147                      |
| <b>Pendiente angular Rod. Izq. (mrad)</b>          | 0,368  | 19                       |
| <b>Pendiente angular Rod. Der. (mrad)</b>          | 0,388  | 232                      |

Tabla 422: Resultados de la deflexión para el árbol intermedio en giro horario.

Cuando el árbol intermedio gira en sentido antihorario, se obtienen los siguientes resultados:

|  |        | <b>Posición<br/>(mm)</b> |
|--|--------|--------------------------|
| <b>Flexión máxima (mm)</b>                         | 0,036  | 134,5                    |
| <b>Desplazamiento máximo <math>z_2</math> (mm)</b> | 0,0128 | 85                       |
| <b>Desplazamiento máximo <math>z_3</math> (mm)</b> | 0,014  | 147                      |
| <b>Pendiente angular Rod. Izq. (mrad)</b>          | 0,377  | 19                       |
| <b>Pendiente angular Rod. Der. (mrad)</b>          | 0,402  | 232                      |

Tabla 43: Resultados de la deflexión para el árbol intermedio en giro antihorario.

Para el árbol de salida girando en sentido horario, se obtienen los siguientes resultados:

|  |        | <b>Posición<br/>(mm)</b> |
|--|--------|--------------------------|
| <b>Flexión máxima (mm)</b>                         | 0,021  | 416                      |
| <b>Desplazamiento máximo <math>z_4</math> (mm)</b> | 0,0115 | 147                      |
| <b>Pendiente angular Rod. Izq. (mrad)</b>          | 0,106  | 12,5                     |
| <b>Pendiente angular Rod. Der. (mrad)</b>          | 0,117  | 230,5                    |

Tabla 44: Resultados de la deflexión para el árbol de salida en giro horario.

Cuando el árbol de salida gira en sentido antihorario, se obtienen los siguientes resultados:

|  |        | <b>Posición<br/>(mm)</b> |
|--|--------|--------------------------|
| <b>Flexión máxima (mm)</b>                         | 0,024  | 416                      |
| <b>Desplazamiento máximo <math>z_4</math> (mm)</b> | 0,0124 | 147                      |
| <b>Pendiente angular Rod. Izq. (mrad)</b>          | 0,118  | 12,5                     |
| <b>Pendiente angular Rod. Der. (mrad)</b>          | 0,132  | 232,5                    |

*Tabla 45: Resultados de la deflexión para el árbol de salida en giro antihorario.*

Como puede observarse, los resultados obtenidos para ambos sentidos de giro, se encuentran dentro de los parámetros fijados inicialmente, y por lo tanto, son totalmente válidos.

### II.4.3. CÁLCULO A FATIGA

En este apartado, se tratará otro de los aspectos más importantes a la hora de diseñar elementos mecánicos, ya que influirá principalmente en la duración de los elementos que se diseñen, determinando de este modo su vida útil o el tiempo hasta la rotura.

En este caso, se analizarán las secciones más críticas de cada uno de los árboles, y por lo tanto las más susceptibles a sufrir un fallo, para determinar si el diámetro en dicha sección es el suficiente o se debe aumentar para evitar la rotura.

Para realizar el cálculo de los diámetros de las diferentes secciones a estudiar, se tendrán en cuenta los siguientes aspectos:

- Se realizará un diseño para vida infinita, es decir, se estimarán un número de  $10^6$  ciclos o más al tratarse de acero aleado.
- Se utilizará el criterio de “Söderberg” en lo relativo a las tensiones medias.
- Se considerarán los estados tensionales proporcionales para material dúctil.
- Se tomará un tipo de carga basado en la resistencia máxima, según el ANEXO 19.

Para realizar el cálculo del coeficiente de seguridad de las diferentes secciones, se utilizará la siguiente expresión:

$$N_e = \frac{S_u}{\frac{4 \cdot F_x}{\pi \cdot d^2} + \frac{S_u}{S_e} \cdot \frac{32}{\pi \cdot d^3} \cdot \sqrt{M_a^2}}$$

Donde:

$N_e$  = Coeficiente de seguridad.

$F_x$  = Fuerza axial (tracción).

$S_u$  = Límite de rotura del material.

$S_e$  = Límite de fatiga del material.

$M_a$  = Momento flector alternante.

$d$  = Diámetro de la sección.

Debido a que el límite de fatiga ( $S_e$ ) está en función de la geometría de los árboles, se realizará un proceso iterativo hasta hallar la solución.

Para aquellas secciones de los árboles donde no actúe ningún par torsor, se utilizará la siguiente expresión:

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot N \cdot M_a}{\pi \cdot S_e}}$$

Sin embargo, para aquellas secciones donde actúe el par torsor, debido a que dichos diámetros ya fueron calculados con anterioridad por el criterio de la rigidez torsional, se calculará el correspondiente coeficiente de seguridad para comprobar que resulta ser superior al indicado.

Para ello, se utilizará la siguiente expresión:

$$N_e = \frac{\pi \cdot S_y \cdot d^3}{32 \cdot \sqrt{\left(\frac{S_y}{S_e} M_a\right)^2 + T_m^2}}$$

Por lo que deberá determinarse el valor del momento flector alternante  $M_a$  y el par torsor medio  $T_m$  para cada una de las secciones de estudio.

Para obtener el valor del límite de fatiga, se empleará la siguiente expresión:

$$S_e = K_a \cdot K_b \cdot K_c \cdot K_d \cdot K_e \cdot \frac{1}{K_f} \cdot S'_e$$

Donde:

$K_a$  = Factor de superficie.

$K_b$  = Factor de tamaño.

$K_c$  = Factor de tipo de carga.

$K_d$  = Factor de temperatura.

$K_e$  = Factor de confiabilidad.

$K_f$  = Factor de límite.

En el cálculo del árbol de entrada, se estudiarán todas las secciones para determinar de este modo cuales resultarán ser las más susceptibles a sufrir un fallo por fatiga.

Con el fin de obtener resultados de una manera simplificada, y con un nivel mínimo de error, se ha utilizado una hoja de cálculo y el software "KISSOFT" para su obtención.

Cada uno de los factores es calculado por separado utilizando el ANEXO 10, 11, 12, 13, 14 y 15, para introducirlos en la hoja de cálculo.

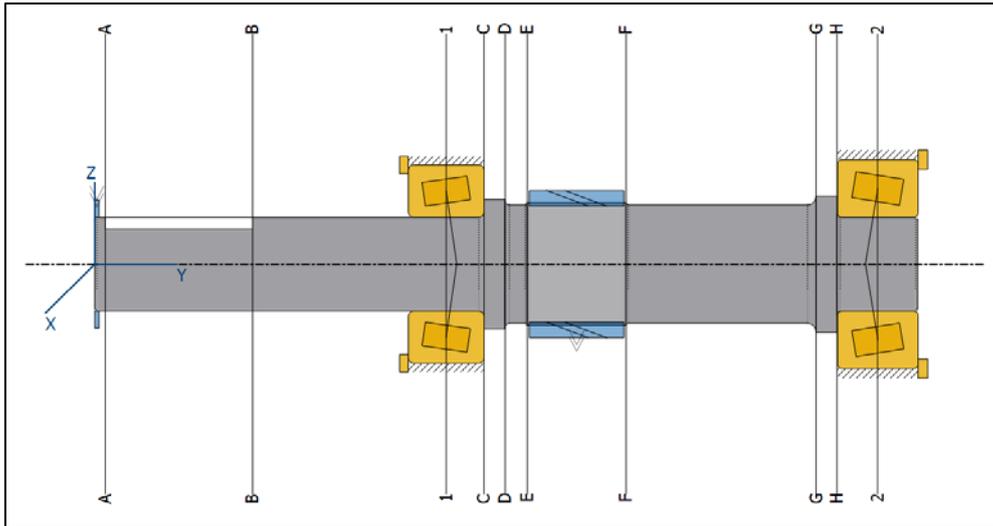


Figura 69: Secciones analizadas del árbol de entrada.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación, para ambos sentidos de giro.

Cuando el árbol de entrada está girando en sentido horario:

| Sección | M (Nm)  | F <sub>x</sub> (N) | d (mm) | K <sub>a</sub> | K <sub>b</sub> | K <sub>e</sub> | S' <sub>e</sub> (Mpa) | S <sub>e</sub> (Mpa) | N <sub>e</sub> |
|---------|---------|--------------------|--------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|----------------------|----------------|
| A       | 0       | 0                  | 45     | 0,88           | 0,88           | 0,814          | 326,2                 | 247,98               | 99,9           |
| B       | 0       | 0                  | 45     | 0,88           | 0,88           | 0,814          | 326,2                 | 247,98               | 99,9           |
| 1       | 0       | 0                  | 45     | 0,88           | 0,88           | 0,814          | 326,2                 | 247,98               | 99,9           |
| C       | 204,119 | -4361,5            | 45     | 0,88           | 0,88           | 0,814          | 326,2                 | 247,98               | 6,21           |
| D       | 361,134 | -4361,5            | 56,64  | 0,88           | 0,87           | 0,814          | 326,2                 | 247,98               | 10,30          |
| E       | 526     | -4361,5            | 56,64  | 0,88           | 0,87           | 0,814          | 326,2                 | 247,98               | 7,94           |
| F       | 831,96  | -12127,8           | 56,64  | 0,88           | 0,87           | 0,814          | 326,2                 | 247,98               | 6,99           |
| G       | 171,95  | -12127,8           | 56,64  | 0,88           | 0,87           | 0,814          | 326,2                 | 247,98               | 30,98          |
| H       | 98,811  | -12127,8           | 45     | 0,88           | 0,88           | 0,814          | 326,2                 | 247,98               | 23,98          |
| 2       | 42,055  | -12127,8           | 45     | 0,88           | 0,88           | 0,814          | 326,2                 | 247,98               | 36,32          |

Tabla 46: Factores de seguridad para las secciones críticas del árbol de entrada en sentido horario.

| Sección | M (Nm) | T (Nm) | d (mm) | K <sub>f</sub> | S <sub>e</sub> | K <sub>b</sub> | d <sub>min</sub> |
|---------|--------|--------|--------|----------------|----------------|----------------|------------------|
| A       | 0      | 658,5  | 45     | 2              | 247,98         | 0,88           | 21,73            |
| B       | 0      | 658,5  | 45     | 2              | 247,98         | 0,88           | 21,73            |
| 1       | 0      | 658,5  | 45     | 2              | 247,98         | 0,88           | 21,73            |

Tabla 47: Diámetro mínimo de la sección del árbol de entrada en sentido horario.

Cuando el árbol de entrada está girando en sentido antihorario:

| Sección | M (Nm)  | F <sub>x</sub> (N) | d (mm) | K <sub>a</sub> | K <sub>b</sub> | K <sub>e</sub> | S' <sub>e</sub> (Mpa) | S <sub>e</sub> (Mpa) | N <sub>e</sub> |
|---------|---------|--------------------|--------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|----------------------|----------------|
| A       | 0       | 0                  | 45     | 0,88           | 0,88           | 0,814          | 326,2                 | 247,98               | 99,9           |
| B       | 0       | 0                  | 45     | 0,88           | 0,88           | 0,814          | 326,2                 | 247,98               | 99,9           |
| 1       | 0       | 0                  | 45     | 0,88           | 0,88           | 0,814          | 326,2                 | 247,98               | 99,9           |
| C       | 217,305 | -9622,6            | 45     | 0,88           | 0,88           | 0,814          | 326,2                 | 247,98               | 6,12           |
| D       | 384,46  | -9622,6            | 56,64  | 0,88           | 0,87           | 0,814          | 326,2                 | 247,98               | 9,94           |
| E       | 559,978 | -9622,6            | 56,64  | 0,88           | 0,87           | 0,814          | 326,2                 | 247,98               | 7,59           |
| F       | 717,967 | -1856,4            | 56,64  | 0,88           | 0,87           | 0,814          | 326,2                 | 247,98               | 7,87           |
| G       | 148,39  | -1856,4            | 56,64  | 0,88           | 0,87           | 0,814          | 326,2                 | 247,98               | 38,97          |
| H       | 85,272  | -1856,4            | 45     | 0,88           | 0,88           | 0,814          | 326,2                 | 247,98               | 34,97          |
| 2       | 36,292  | -1856,4            | 45     | 0,88           | 0,88           | 0,814          | 326,2                 | 247,98               | 85,7           |

Tabla 48: Factores de seguridad para las secciones críticas del árbol de entrada en sentido antihorario.

| Sección | M (Nm) | T (Nm) | d (mm) | K <sub>f</sub> | S <sub>e</sub> | K <sub>b</sub> | d <sub>min</sub> |
|---------|--------|--------|--------|----------------|----------------|----------------|------------------|
| A       | 0      | 658,5  | 45     | 2              | 247,98         | 0,88           | 21,73            |
| B       | 0      | 658,5  | 45     | 2              | 247,98         | 0,88           | 21,73            |
| 1       | 0      | 658,5  | 45     | 2              | 247,98         | 0,88           | 21,73            |

Tabla 49: Diámetro mínimo de la sección del árbol de entrada en sentido antihorario.

Como puede observarse, se alcanza un factor de seguridad N<sub>e</sub> superior al necesario, y las secciones donde no existe momento flector, se encuentran por encima del diámetro mínimo, por lo que podemos afirmar que el árbol no fallará a fatiga por dichas secciones.

Por otro lado, las secciones que resultan ser más susceptibles al fallo por fatiga son las secciones C, E y F en ambos sentidos de giro.

Por lo tanto, podemos afirmar que todas las secciones tendrán una vida ilimitada, ya que superan el factor de seguridad N<sub>e</sub> necesario para cargas basadas en la resistencia máxima, obtenido del ANEXO 19.

En el cálculo del árbol intermedio, se estudiarán todas las secciones para determinar de este modo cuales resultarán ser las más susceptibles a sufrir un fallo por fatiga.

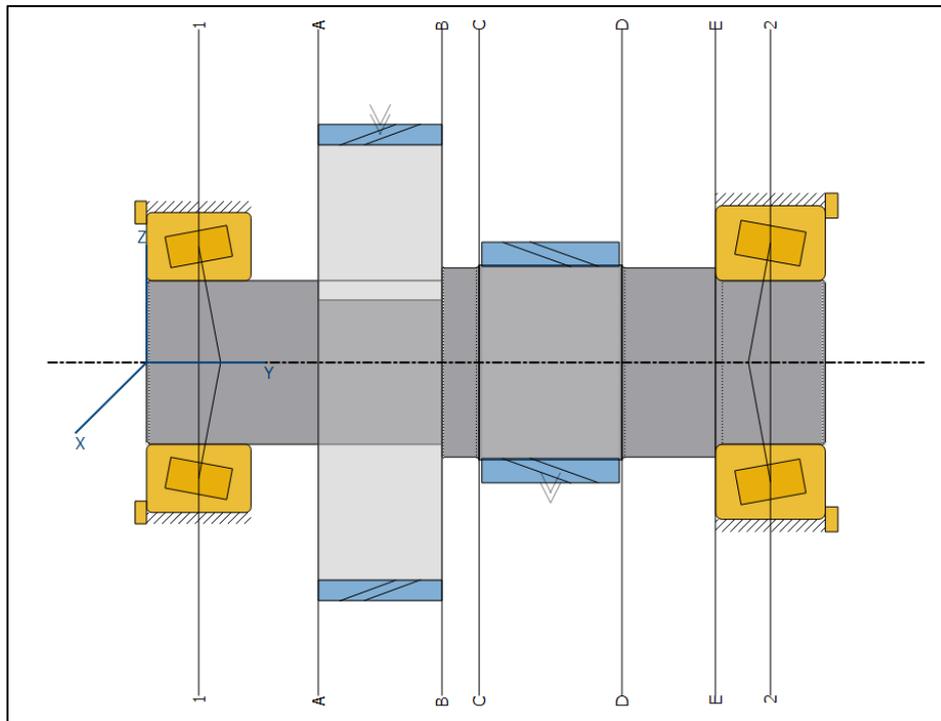


Figura 70: Secciones analizadas del árbol intermedio.

Cuando el árbol intermedio está girando en sentido horario:

| Sección | M (Nm)  | F <sub>x</sub> (N) | d (mm) | K <sub>a</sub> | K <sub>b</sub> | K <sub>c</sub> | S' <sub>e</sub> (Mpa) | S <sub>e</sub> (Mpa) | N <sub>e</sub> |
|---------|---------|--------------------|--------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|----------------------|----------------|
| 1       | 0       | 0                  | 60     | 0,88           | 0,86           | 0,81           | 326,2                 | 247,98               | 99,9           |
| A       | 1083,17 | -10170,7           | 60     | 0,88           | 0,86           | 0,81           | 326,2                 | 247,98               | 6,28           |
| B       | 2045,31 | -17781,6           | 60     | 0,88           | 0,86           | 0,81           | 326,2                 | 247,98               | 3,65           |
| C       | 2155,59 | 17781,6            | 69,39  | 0,88           | 0,85           | 0,81           | 326,2                 | 247,98               | 3,89           |
| D       | 1561,79 | -33409,3           | 69,39  | 0,88           | 0,85           | 0,81           | 326,2                 | 247,98               | 6,93           |
| E       | 407,425 | -33409,3           | 60     | 0,88           | 0,86           | 0,81           | 326,2                 | 247,98               | 14,43          |
| 2       | 271,617 | -33409,3           | 60     | 0,88           | 0,86           | 0,81           | 326,2                 | 247,98               | 18,18          |

Tabla 50: Factores de seguridad para las secciones críticas del árbol intermedio en sentido horario.

| Sección | M (Nm)  | T (Nm) | d (mm) | r/d   | D/d  | K <sub>t</sub> | K <sub>f</sub> | S <sub>e</sub> | K <sub>b</sub> | d <sub>min</sub> |
|---------|---------|--------|--------|-------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|
| A       | 1083,17 | 0      | 60     | 0,008 | 1,15 | 1,85           | 1              | 247,98         | 0,86           | 36,537           |
| D       | 1561,79 | 0      | 69,39  | 0,144 | 0,97 | 1,85           | 1              | 247,98         | 0,85           | 37,632           |
| E       | 407,425 | 0      | 60     | 0,041 | 1,15 | 1,85           | 1              | 247,98         | 0,86           | 36,227           |
| 2       | 271,617 | 0      | 60     | 0,041 | 1,15 | 1,85           | 1              | 247,98         | 0,86           | 35,875           |

Tabla 51: Diámetro mínimo de la sección del árbol intermedio en sentido horario.

Cuando el árbol intermedio está girando en sentido antihorario:

| Sección | M (Nm)  | F <sub>x</sub> (N) | d (mm) | K <sub>a</sub> | K <sub>b</sub> | K <sub>e</sub> | S' <sub>e</sub> (Mpa) | S <sub>e</sub> (Mpa) | N <sub>e</sub> |
|---------|---------|--------------------|--------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|----------------------|----------------|
| 1       | 0       | 0                  | 60     | 0,88           | 0,86           | 0,81           | 326,2                 | 247,98               | 99,9           |
| A       | 1083,23 | -32679,5           | 60     | 0,88           | 0,86           | 0,81           | 326,2                 | 247,98               | 6,62           |
| B       | 2151,25 | -25068,6           | 60     | 0,88           | 0,86           | 0,81           | 326,2                 | 247,98               | 3,54           |
| C       | 2320,84 | -25068,6           | 69,39  | 0,88           | 0,85           | 0,81           | 326,2                 | 247,98               | 3,66           |
| D       | 1563,41 | -9440,9            | 69,39  | 0,88           | 0,85           | 0,81           | 326,2                 | 247,98               | 6,63           |
| E       | 407,84  | -9440,9            | 60     | 0,88           | 0,86           | 0,81           | 326,2                 | 247,98               | 17,27          |
| 2       | 271,89  | -9440,9            | 60     | 0,88           | 0,86           | 0,81           | 326,2                 | 247,98               | 26,68          |

Tabla 52: Factores de seguridad para las secciones críticas del árbol intermedio en sentido antihorario.

| Sección | M (Nm)  | T (Nm) | d (mm) | r/d   | D/d  | K <sub>t</sub> | K <sub>f</sub> | S <sub>e</sub> | K <sub>b</sub> | d <sub>min</sub> |
|---------|---------|--------|--------|-------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|
| A       | 1083,17 | 0      | 60     | 0,008 | 1,15 | 1,85           | 1              | 247,98         | 0,86           | 36,537           |
| D       | 1561,79 | 0      | 69,39  | 0,144 | 0,97 | 1,85           | 1              | 247,98         | 0,85           | 37,632           |
| E       | 407,425 | 0      | 60     | 0,041 | 1,15 | 1,85           | 1              | 247,98         | 0,86           | 36,227           |
| 2       | 271,617 | 0      | 60     | 0,041 | 1,15 | 1,85           | 1              | 247,98         | 0,86           | 35,875           |

Tabla 53: Diámetro mínimo de la sección del árbol intermedio en sentido antihorario.

Como puede comprobarse tras observar los resultados obtenidos, se alcanza un factor de seguridad a fatiga N<sub>e</sub> superior al necesario, y la sección donde no existe momento torsor, se encuentra por encima del diámetro mínimo, por lo que podemos afirmar que el árbol no fallará a fatiga por dichas secciones.

Por otro lado, las secciones que resultan ser más susceptibles al fallo por fatiga resultan ser las secciones A, B, C y D en ambos sentidos de giro.

Por lo tanto, podemos afirmar que todas las secciones tendrán una vida ilimitada, ya que superan el factor de seguridad  $N_e$  necesario para cargas basadas en la resistencia máxima, obtenido del ANEXO 19.

En el cálculo del árbol de salida, se estudiarán todas las secciones para determinar de este modo cuales resultarán ser las más susceptibles a sufrir un fallo por fatiga.

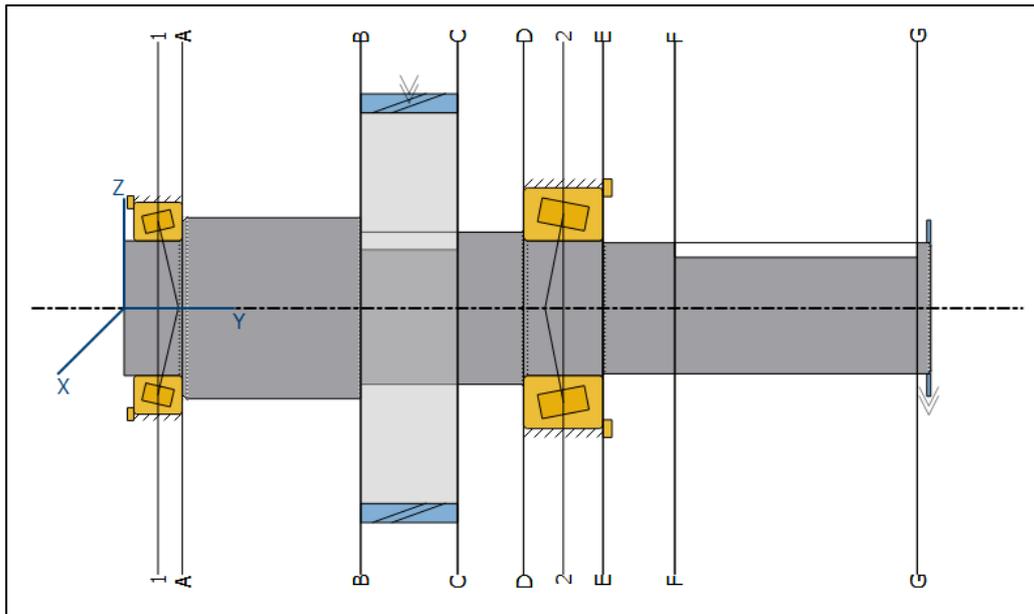


Figura 71: Secciones analizadas del árbol de salida.

Cuando el árbol de salida se encuentra girando en sentido horario:

| Sección | M (Nm) | $F_x$ (N) | d (mm) | $K_a$ | $K_b$ | $K_c$ | $S'_e$ (Mpa) | $S_e$ (Mpa) | $N_e$ |
|---------|--------|-----------|--------|-------|-------|-------|--------------|-------------|-------|
| 1       | 0      | 0         | 70     | 0,88  | 0,86  | 0,81  | 326,2        | 247,98      | 99,9  |
| A       | 31,855 | -5688,5   | 70     | 0,88  | 0,86  | 0,81  | 326,2        | 247,98      | 99,9  |
| B       | 1497,2 | -5688,5   | 79     | 0,88  | 0,86  | 0,81  | 326,2        | 247,98      | 12,2  |
| C       | 1458,9 | -21003,6  | 79     | 0,88  | 0,86  | 0,81  | 326,2        | 247,98      | 4,16  |
| D       | 356,64 | -21003,6  | 70     | 0,88  | 0,86  | 0,81  | 326,2        | 247,98      | 3,64  |
| 2       | 308,01 | -21003,6  | 70     | 0,88  | 0,86  | 0,81  | 326,2        | 247,98      | 3,69  |
| E       | 0      | 0         | 68     | 0,88  | 0,86  | 0,81  | 326,2        | 247,98      | 99,9  |
| F       | 0      | 0         | 68     | 0,88  | 0,86  | 0,81  | 247,98       | 247,98      | 99,9  |
| G       | 0      | 0         | 68     | 0,88  | 0,86  | 0,81  | 247,98       | 247,98      | 99,9  |

Tabla 54: Factores de seguridad para las secciones críticas del árbol de salida en sentido horario.

| Sección | M (Nm) | T (Nm)  | d (mm) | r/d  | D/d  | K <sub>t</sub> | K <sub>f</sub> | S <sub>e</sub> | K <sub>b</sub> | d <sub>min</sub> |
|---------|--------|---------|--------|------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|
| A       | 31,855 | 0       | 70     | 0,02 | 1,34 | 1,85           | 1              | 247,98         | 0,86           | 35,075           |
| B       | 1497,2 | 0       | 79     | 0,01 | 1,18 | 1,85           | 1              | 247,98         | 0,86           | 39,088           |
| E       | 0      | 4500,24 | 68     | -    | -    | -              | 1              | 247,98         | 0,86           | 37,41            |
| F       | 0      | 4500,24 | 68     | -    | -    | -              | 1              | 247,98         | 0,86           | 37,41            |
| G       | 0      | 4500,24 | 68     | -    | -    | -              | 1              | 247,98         | 0,86           | 37,41            |

Tabla 55: Diámetro mínimo de la sección del árbol de salida en sentido horario.

Cuando el árbol de salida se encuentra girando en sentido antihorario:

| Sección | M (Nm)  | F <sub>x</sub> (N) | d (mm) | K <sub>a</sub> | K <sub>b</sub> | K <sub>c</sub> | S' <sub>e</sub> (Mpa) | S <sub>e</sub> (Mpa) | N <sub>e</sub> |
|---------|---------|--------------------|--------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|----------------------|----------------|
| 1       | 0       | 0                  | 70     | 0,88           | 0,85           | 0,81           | 326,2                 | 247,98               | 99,9           |
| A       | 42,586  | 14140,6            | 70     | 0,88           | 0,85           | 0,81           | 326,2                 | 247,98               | 60,88          |
| B       | 2001,55 | 14140,6            | 79     | 0,88           | 0,84           | 0,81           | 326,2                 | 247,98               | 9,37           |
| C       | 1200,49 | -1235,2            | 79     | 0,88           | 0,84           | 0,81           | 326,2                 | 247,98               | 4,37           |
| D       | 293,45  | -1235,2            | 70     | 0,88           | 0,85           | 0,81           | 326,2                 | 247,98               | 3,70           |
| 2       | 253,43  | -1235,2            | 70     | 0,88           | 0,85           | 0,81           | 326,2                 | 247,98               | 3,73           |
| E       | 0       | 0                  | 68     | 0,88           | 0,85           | 0,81           | 326,2                 | 247,98               | 99,9           |
| F       | 0       | 0                  | 68     | 0,88           | 0,85           | 0,81           | 247,98                | 247,98               | 99,9           |
| G       | 0       | 0                  | 68     | 0,88           | 0,85           | 0,81           | 247,98                | 247,98               | 99,9           |

Tabla 56: Factores de seguridad para las secciones críticas del árbol de salida en sentido antihorario.

| Sección | M (Nm)  | T (Nm)  | d (mm) | r/d  | D/d  | K <sub>t</sub> | K <sub>f</sub> | S <sub>e</sub> | K <sub>b</sub> | d <sub>min</sub> |
|---------|---------|---------|--------|------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|
| A       | 42,586  | 0       | 70     | 0,02 | 1,34 | 1,85           | 1              | 247,98         | 0,85           | 34,739           |
| B       | 2001,55 | 0       | 79     | 0,01 | 1,18 | 1,85           | 1              | 247,98         | 0,84           | 39,167           |
| E       | 0       | 4500,24 | 68     | -    | -    | -              | 1              | 247,98         | 0,85           | 37,41            |
| F       | 0       | 4500,24 | 68     | -    | -    | -              | 1              | 247,98         | 0,85           | 37,41            |
| G       | 0       | 4500,24 | 68     | -    | -    | -              | 1              | 247,98         | 0,85           | 37,41            |

Tabla 57: Diámetro mínimo de la sección del árbol de salida en sentido antihorario.

Tras observar los resultados obtenidos, se alcanza un factor de seguridad  $N_e$  superior al necesario, y tanto las secciones donde no existe momento flector, como las secciones donde no existe par torsor, se encuentran por encima del diámetro mínimo, por lo que podemos afirmar que el árbol no fallará a fatiga por dichas secciones.

Por otro lado, las secciones que resultan ser más susceptibles al fallo por fatiga son las secciones B, C, D y 2 en ambos sentidos de giro.

Por lo tanto, podemos afirmar que todas las secciones tendrán una vida ilimitada, ya que superan el factor de seguridad  $N_e$  necesario para cargas basadas en la resistencia máxima, obtenido del ANEXO 19.

## II.5. VISCOSIDAD DEL LUBRICANTE

En este apartado, se determinará la viscosidad del lubricante utilizado utilizando el método "UNITED", el cual está indicado para engranajes paralelos que son accionados a velocidades medias o bajas.

Primero, ha de determinarse el factor K:

$$K = \frac{F_t}{bd_1} \cdot \frac{i+1}{i} \cdot K_A \quad ; \quad \frac{K}{V_t} \left( \frac{da}{m} \frac{N}{m} \right)$$

Siendo:

$F_t$  = Fuerza tangencial.

$b$  = Ancho del engranaje.

$d_1$  = Diámetro primitivo del engranaje.

$K$  = Coeficiente de aplicación.

Posteriormente, obtendremos la viscosidad cinemática a 38° C utilizando el siguiente diagrama:

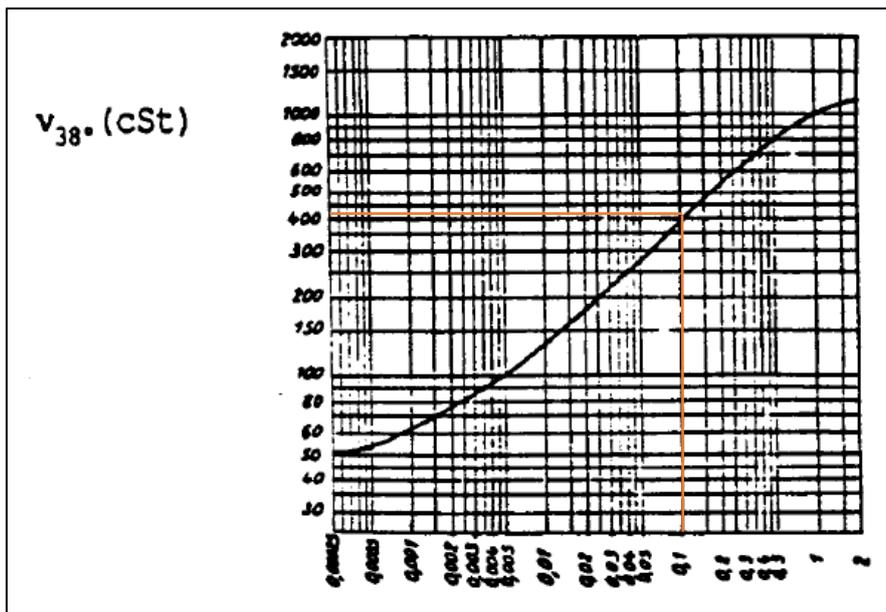


Figura 72: Diagrama de viscosidades cinemáticas.

Una vez conocida la viscosidad cinemática, elegimos el tipo lubricante que se utilizará, utilizando la siguiente tabla:

| CLASIFICACION I.S.O. DE VISCOSIDAD |  |  |        |
|------------------------------------|--|--|--------|
| GRADO I.S.O. DE VISCOSIDAD         | VISCOSIDAD CINEMATICA MEDIA cSt A 40,0°C | LIMITE DE LA VISCOSIDAD CINEMATICA EN cSt A 40,0°C |        |
|                                    |  | MINIMO   | MAXIMO |
| ISO VG 2                           | 2,2                                      | 1,98   | 2,42   |
| ISO VG 3                           | 3,2                                      | 2,83   | 3,52   |
| ISO VG 5                           | 4,6                                      | 4,14   | 5,06   |
| ISO VG 7                           | 6,8                                      | 6,12   | 7,48   |
| ISO VG 10                          | 10                                       | 9,00   | 11,0   |
| ISO VG 15                          | 15                                       | 13,0   | 16,0   |
| ISO VG 22                          | 22                                       | 19,8   | 24,2   |
| ISO VG 32                          | 32                                       | 28,8   | 35,2   |
| ISO VG 46                          | 46                                       | 41,4   | 50,6   |
| ISO VG 68                          | 68                                       | 61,2   | 74,8   |
| ISO VG 100                         | 100                                      | 90,0   | 110    |
| ISO VG 150                         | 150                                      | 135  | 165    |
| ISO VG 220                         | 220                                      | 198  | 242    |
| ISO VG 320                         | 320                                      | 288  | 352    |
| ISO VG 460                         | 460                                      | 414  | 506    |
| ISO VG 680                         | 680                                      | 612  | 748    |
| ISO VG 1000                        | 1000                                     | 900  | 1100   |
| ISO VG 1500                        | 1500                                     | 1350   | 1650   |

Figura 73: Clasificación ISO de viscosidad.

Por lo tanto, se utilizará un lubricante ISO VG 460, ya que es el que se encuentra dentro de los límites para el valor obtenido de la viscosidad cinemática.

## II.6. DIMENSIONADO DE RODAMIENTOS

En este apartado, se realizará el cálculo de la fuerza equivalente, así como el cálculo de la vida de los rodamientos, para justificar que los rodamientos elegidos cumplen con los requisitos establecidos con anterioridad, y son capaces de soportar los esfuerzos generados en los árboles.

Para ello, se ha consultado el catálogo online del proveedor de rodamientos “SKF”, para conocer la deflexión angular o giro permisible, y las características técnicas de cada rodamiento seleccionado.

Las características técnicas de cada rodamiento pueden ser consultadas en el ANEXO 3.

### II.6.1. SELECCIÓN DE RODAMIENTOS

El principal criterio que se ha tenido en cuenta para la selección del tipo de rodamientos que se utilizarán en los árboles del reductor de velocidad, ha sido el tipo de esfuerzos generados por los engranajes helicoidales, que son el principal elemento de transmisión.

Debido a que este tipo de engranajes generan cargas radiales y en mayor medida cargas axiales, se ha decidido escoger rodamientos de rodillos cónicos de una hilera del fabricante “SKF”, ya que este tipo de rodamientos son capaces de absorber tanto esfuerzos axiales como radiales.



Figura 74: Rodamientos de rodillos cónicos.

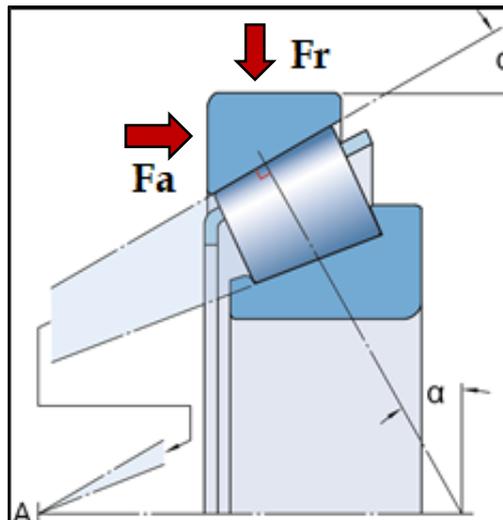


Figura 75: Fuerzas absorbidas por los rodamientos de rodillos cónicos.

Entre otras características, este tipo de rodamientos generan una baja fricción de rodadura, poseen una larga vida útil y resultan fáciles de desmontar, cuando deban realizarse tareas de mantenimiento o sustituir alguna parte desgastada.

## II.6.2. CÁLCULO DE LA FUERZA EQUIVALENTE

Cuando las fuerzas actúan sobre un rodamiento, éstas se reparten a través de sus elementos de rodadura, transmitiendo de este modo fuerzas normales a las superficies de contacto.

De este modo, para realizar el cálculo de la fuerza equivalente que actúa sobre un rodamiento, se utilizarán las siguientes expresiones:

$$\text{Si } \frac{F_a}{F_r} < e \Rightarrow F_{eq} = F_r \quad ; \quad \text{Si } \frac{F_a}{F_r} > e \Rightarrow F_{eq} = 0,4 \cdot F_r + Y \cdot F_a$$

Donde:

$F_r$  = Fuerza radial.

$F_a$  = Fuerza axial.

$e$  = Factor de cálculo.

$Y$  = Factor de fuerza axial.

Para determinar los factores de fuerza axial y de cálculo, se consulta el catálogo del fabricante.

Para calcular el empuje axial generado por la carga radial, se utiliza la siguiente expresión:

$$0,5 \cdot \frac{F_r}{Y}$$

A continuación, se muestra la fuerza equivalente para cada uno de los rodamientos seleccionados:

| Árbol      | Posición  | Modelo     | Dimensiones<br>(mm) | Fuerza eq.<br>(kN) | Fr<br>(kN) | Fa<br>(kN) |
|------------|-----------|------------|---------------------|--------------------|------------|------------|
| Entrada    | Izquierda | T2ED 045   | 45x95x36            | 15,6               | 16,71      | 7,76       |
|            | Derecha   | 32309J2/Q  | 45x100x38,25        | 16,3               | 6,31       | 7,76       |
| Intermedio | Izquierda | 33212/Q    | 60x110x38           | 47,8               | 30,51      | 23,23      |
|            | Derecha   | T2EE 060/Q | 60x115x40           | 33,4               | 33,98      | 23,23      |
| Salida     | Izquierda | 32014X/Q   | 70x110x25           | 16,6               | 21,29      | 15,31      |
|            | Derecha   | 33214/Q    | 70x125x41           | 36,1               | 26,67      | 15,31      |

Tabla 58: Fuerza equivalente de los rodamientos seleccionados.

### II.6.3. CÁLCULO DE LA VIDA DE LOS RODAMIENTOS

Para determinar el cálculo de la vida de los rodamientos utilizados, emplearemos las siguientes expresiones:

$$L = a_1 \cdot a_{SKF} \cdot L_{10} \quad ; \quad L_{10} = 10^6 \cdot \left(\frac{C}{F}\right)^q$$

Siendo:

$L_{10}$  = Cálculo de vida con probabilidad de fallo del 10%.

$C$  = Capacidad de carga dinámica básica.

$F$  = Fuerza equivalente.

$q = 10/3$  al ser rodillos cónicos.

$a_1$  = Factor de confiabilidad para 99%.

$a_{SKF}$  = Factor de modificación de la vida útil.

El cálculo de los factores se determina utilizando el catálogo del fabricante "SKF".

Por lo que se obtienen los siguientes resultados:

| Árbol      | Posición  | Modelo     | $F_{eq}$ (kN) | $C$ (kN) | $P_u$ (kN) | $e$  | $Y$ | $a_{SKF}$ | $L_{10h}$ |
|------------|-----------|------------|---------------|----------|------------|------|-----|-----------|-----------|
| Entrada    | Izquierda | T2ED 045   | 15,6          | 182      | 20,8       | 0,33 | 1,8 | 1         | 54600     |
|            | Derecha   | 32309J2/Q  | 16,3          | 173      | 20,4       | 0,35 | 1,7 | 1         | 39800     |
| Intermedio | Izquierda | 33212/Q    | 47,8          | 207      | 26,5       | 0,4  | 1,5 | 1         | 39800     |
|            | Derecha   | T2EE 060/Q | 33,4          | 239      | 30         | 0,33 | 1,8 | 1         | 36600     |
| Salida     | Izquierda | 32014X/Q   | 16,6          | 125      | 17,3       | 0,43 | 1,4 | 1         | 89400     |
|            | Derecha   | 33214/Q    | 36,1          | 247      | 32,5       | 0,4  | 1,5 | 1         | 65000     |

Tabla 59: Resultados para la vida nominal de los rodamientos.

Tras observar los resultados obtenidos, podemos determinar que los rodamientos seleccionados cumplen con los requisitos tanto de seguridad como de funcionamiento, ya que se tiene una capacidad de carga dinámica superior a la de funcionamiento, así como una carga límite a fatiga muy por encima de los valores de utilización.

Por otra parte, podemos afirmar que los rodamientos seleccionados tendrán una duración de más de 35000 horas de funcionamiento, por lo que también se cumple este requisito inicial.

Como podemos comprobar mediante la siguiente tabla, se supera la media de horas recomendadas para grandes reductores de velocidad con rodamientos de rodillos cónicos:

| Aplicación en                           | Duración recomendada en h |        |
|---|---------------------------|--------|
|   | Rod. de rodillos          |        |
|   | desde                     | hasta  |
| <b>Reductores universales</b>           | 5 000                     | 20 000 |
| <b>Motoreductores</b>                   | 5 000                     | 20 000 |
| <b>Grandes reductores estacionarios</b> | 20 000                    | 75 000 |

Tabla 60: Duración de vida recomendada para reductores de velocidad.

## II.6.4. MANTENIMIENTO Y SUSTITUCIÓN

Las operaciones de mantenimiento o sustitución, deberán ser realizadas por operarios expertos

Debido a que los rodamientos se encontrarán lubricados por el aceite de la carcasa del reductor, solamente se lubricarán con aceite del propio reductor, cuando se realice el montaje de los mismos.

Todos los rodamientos utilizados, deberán reemplazarse cada 35000 horas de uso, independientemente del nivel de desgaste existente, ya que, de reemplazar solo algunos rodamientos, no se garantizaría la vida nominal del conjunto.

El aceite deberá ser sustituido cada 4000 horas de funcionamiento, preferiblemente en caliente para agilizar el proceso de evacuación.

Los retenes y juntas deberán ser sustituidos cada 3000 horas de funcionamiento, y también deberá ser verificado el nivel de aceite para controlar posibles pérdidas eventuales.

## II.7. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

*Diseño de Máquinas: Ejercicios resueltos.* Ed. U.P.V. Sánchez caballero, Samuel; Pla Ferrando, Rafael; Montava Jordà, Sergi; Oliver Borrachero, Bernardo Antonio.

*Resistencia de Materiales.* Ed. U.P.V. Gasch Salvador, Manuel; Martín Concepción, Pedro; Galdón Ribes, José Luis.

Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales, Teoría y Diseño de Máquinas.

Roydisa. (s.f.) <https://www.roydisa.es>

Direct Industry. (s.f.) <http://www.directindustry.es>

Norelem. (s.f.) <https://www.norelem.com>

Kramp. (s.f.) <https://www.kramp.com>

Juntas Bisma. (s.f.) <http://www.juntasbisma.com>

Opac. (s.f.) <https://www.opac.net>

Igemeplas. (s.f.) <http://www.ingemeplas.com>

Bardahl. (s.f.) <https://www.bardahl.com>

Schaeffler. (s.f.) <https://medias.schaeffler.com>

SKF. (s.f.) <https://www.skf.com>

Thyssenkrupp. (s.f.) <http://www.grupothyssenkrupp.com/>

Lucefin. (s.f.) <http://www.lucefin.com/>

## II.8. CONCLUSIONES

Como principales conclusiones tras realizar este trabajo, se puede destacar la consecución de objetivos iniciales, ya que, tras observar los resultados obtenidos de los cálculos realizados, se ha realizado un dimensionado correcto, aunque algunas secciones de los árboles podrían estar sobredimensionadas debido a la geometría necesaria para fijar determinados elementos del reductor.

También se puede afirmar, que los rodamientos escogidos tienen una vida nominal bastante superior a la necesaria, por lo que se garantiza un correcto funcionamiento del reductor de velocidad para el número de horas de funcionamiento propuesto inicialmente.

Por otro lado, se ha obtenido un presupuesto bastante ajustado a la realidad, con un precio final que no resulta excesivo, pudiendo entrar en la competitividad con otros reductores del mercado.

Finalmente, y a nivel personal, la realización de este trabajo ha servido notablemente para reforzar conceptos de teoría diseño de máquinas aprendidos con anterioridad, y a la ampliación de otros conocimientos a nivel de cálculo, diseño y búsqueda de información.

# III. PLIEGO DE CONDICIONES



## III.1. INTRODUCCIÓN

Este documento, pretende establecer las especificaciones técnicas, facultativas y legales en las que se fundamentará la ejecución del presente proyecto, el cual estará acorde con la normativa vigente. Por lo tanto, una vez aceptado por la parte contratante, obliga a su cumplimiento y consecuentemente, deberán resolverse todas las cuestiones tanto de ejecución como rescisión de contrato que pudieran surgir durante el proceso de ejecución material.

De este modo, se expondrá la documentación necesaria para la fabricación del reductor de velocidad.

Si existiera algún caso en el que pudieran contradecirse datos establecidos en los planos, la memoria descriptiva o pliego de condiciones, prevalecería el de los dos últimos, y en caso de existir contradicción entre estos dos últimos, prevalecería lo expuesto en la memoria descriptiva.

## III.2. PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS

### III.2.1. MATERIALES

En este apartado, se detallarán los materiales utilizados para realizar la fabricación de cada uno de los elementos que componen el reductor de velocidad.

#### III.2.1.1. ENGRANAJES

El material que se utilizará para fabricar los engranajes será un acero de cementación, denominado según la norma DIN 20MnCr5 y por la norma UNE F 150, cuyas características pueden consultarse en el ANEXO 1.

Este material será utilizado para la fabricación de las ruedas de las dos etapas del reductor de velocidad.

Antes de comenzar con el proceso de ejecución material, se comprobarán los siguientes aspectos cuando el material sea recibido en el lugar de fabricación:

- Composición química y tratamiento térmico del acero.
- Límite elástico y resistencia a fluencia.
- Marcado CE.

### III.2.1.2. ÁRBOLES

El árbol de entrada y del árbol intermedio, estarán fabricados con el mismo material que los piñones de las dos etapas, ya que se encuentran tallados en los propios árboles a diferencia del árbol de salida, que estará fabricado con el material Ck 45 según la norma DIN o F 114 según la norma UNE.

Los piñones de los árboles de entrada e intermedio, tendrán un tratamiento térmico de cementación y un posterior rectificado.

Antes de comenzar con el proceso de ejecución material, se comprobarán los siguientes aspectos cuando el material sea recibido en el lugar de fabricación:

- Composición química.
- Límite elástico y resistencia a fluencia.
- Marcado CE.

### III.2.1.3. CARCASA Y TAPAS DE CIERRE

Tanto la carcasa del reductor de velocidad, como las tapas laterales y superior de cierre, estarán fabricadas con una fundición nodular ferrítica GG-25 según la norma UNE, cuyas propiedades y características mecánicas pueden consultarse en el ANEXO 2.

Antes de comenzar con el proceso de ejecución material, se comprobarán los siguientes aspectos cuando el material sea recibido en el lugar de fabricación:

- Composición química.
- Límite elástico y resistencia a fluencia.
- Marcado CE.

### III.2.2. CONDICIONES DE EJECUCIÓN

Para realizar la fabricación del árbol de entrada, se partirá de un cilindro de diámetro 70mm y 400 mm de longitud en bruto, y posteriormente se realizarán las siguientes operaciones de mecanizado en torno:

- Refrentado de los extremos del cilindro para dejar una longitud de 397 mm.
- Taladrado de diámetro 13,5 mm en el extremo izquierdo del cilindro.
- Cilindrado a 45 mm hasta el hombro del rodamiento izquierdo.
- Cilindrado a 67,37 mm para crear la sección donde se tallará el engranaje, el resto de la sección a 58,64 mm
- Cilindrado del asiento del rodamiento derecho a 45 mm
- Chaflán de 1 mm x45 ° en los extremos del cilindro.

En fresadora, se realizarán las siguientes operaciones:

- Fresado del chavetero izquierdo.
- Tallado de los dientes del piñón de la primera etapa.

Para realizar la fabricación del árbol intermedio, se partirá de un cilindro de diámetro 100mm y 255 mm de longitud en bruto, y posteriormente se realizarán las siguientes operaciones de mecanizado en torno:

- Refrentado de los extremos del cilindro para dejar una longitud de 252 mm.
- Cilindrado a 86,74 mm para crear la sección donde se tallará el engranaje y el resto a 60 mm.
- Cilindrado del hombro del rodamiento derecho a 60 mm
- Chaflán de 1x45 ° en los extremos del cilindro.

En fresadora, se realizarán las siguientes operaciones:

- Fresado del chavetero para la rueda.
- Tallado de los dientes del piñón de la segunda etapa.

Para realizar la fabricación del árbol de salida, se partirá de un cilindro de diámetro 75 mm y 420 mm de longitud en bruto, y posteriormente se realizarán las siguientes operaciones de mecanizado en torno:

- Refrentado de los extremos del cilindro para dejar una longitud de 415 mm
- Cilindrado a 89 mm de la parte central.
- Cilindrado a 79 mm para el asiento de la rueda y a 70 mm para los asientos de los rodamientos de los extremos.
- Taladrado de diámetro 19,5 mm en el extremo derecho del cilindro.
- Chaflán de  $1 \times 45^\circ$  en los extremos del cilindro.

En fresadora, se realizarán las siguientes operaciones:

- Fresado del chavetero izquierdo y derecho.

Para realizar la fabricación de la rueda de la primera etapa, se partirá de un cilindro de diámetro 180 mm y 50 mm de longitud en bruto, y posteriormente se realizarán las siguientes operaciones de mecanizado en torno:

- Refrentado de los extremos del cilindro.
- Cilindrado interior de 60 mm.
- Cilindrado exterior de 170,36 mm

En fresadora, se realizarán las siguientes operaciones:

- Tallado de los dientes de la rueda de la primera etapa.
- Ranurado del chavetero.

Para realizar la fabricación de la rueda de la segunda etapa, se partirá de un cilindro de diámetro 220 mm y 55 mm de longitud en bruto, y posteriormente se realizarán las siguientes operaciones de mecanizado en torno:

- Refrentado de los extremos del cilindro.
- Cilindrado interior de 70 mm.
- Cilindrado exterior de 217,21 mm

En fresadora, se realizarán las siguientes operaciones:

- Tallado de los dientes de la rueda de la segunda etapa.
- Ranurado del chavetero.

Para fabricar la carcasa del reductor de velocidad, se empleará el método de moldeo por arena, del mismo modo que para fabricar las tapas laterales y superior.

Posteriormente al moldeo, las caras de la carcasa serán mecanizadas, para ofrecer un mejor acabado, y se tendrá especial atención en los apoyos de los rodamientos, que deberán tener una tolerancia K6.

Finalmente, se realizará el taladrado y roscado de los alojamientos para la tornillería, así como para los tapones de llenado, vaciado y el visor de nivel de aceite.

### **III.2.3. CONDICIONES DE MONTAJE**

El montaje del reductor de velocidad se realizará de la siguiente manera:

Primero, se procederá a colocar las chavetas en los correspondientes chaveteros, para colocar las ruedas en su lugar. En el árbol intermedio y en el árbol de salida, se insertarán los casquillos para fijar axialmente las ruedas.

Posteriormente, se empezará por introducir en la carcasa el árbol intermedio, ya que posee dos engranajes, y de este modo se facilitará realizar el engrane con el resto de árboles. posteriormente, se colocarán los rodamientos en los extremos, asentándolos sobre los orificios de la carcasa.

Después, se procederá a introducir el árbol de entrada, haciendo coincidir el piñón con la rueda de la primera etapa hasta que ambos engranen. Luego se colocarán los rodamientos en los extremos, que se asentarán en la carcasa.

Por último, se introducirá el árbol de salida, realizando el mismo procedimiento que con el árbol de entrada, hasta conseguir que ambos engranen. Finalmente se introducirán los rodamientos sobre los asientos de la carcasa.

Una vez realizado este proceso, se colocarán y atornillarán las tapas laterales, que se encargarán de fijar totalmente los rodamientos. Posteriormente, se colocarán los retenes elásticos en los árboles de entrada y de salida, que quedarán enrasados en las respectivas tapas laterales.

Después, se colocarán las chavetas en los chaveteros de los árboles de entrada y de salida. Tras realizar el montaje, se comprobará que el mecanismo funciona correctamente.

Una vez comprobado que el reductor de velocidad está correctamente ensamblado, se procederá a atornillar el tapón de vaciado de aceite, así como el visor lateral, para posteriormente rellenar la cavidad con lubricante hasta el nivel recomendado.

Por último, se atornillarán la tapa superior y el tapón de llenado de aceite superior.

### **III.2.4. CONDICIONES DE EMBALAJE Y TRANSPORTE**

Todos los componentes que conforman el reductor de velocidad, deberán ser transportados en cajas rígidas por separado, debidamente protegidas en su interior con soportes colocados al efecto, y embalajes de plástico con etiquetas identificativas para cada componente.

### **III.3. PLIEGO DE CONDICIONES FACULTATIVAS**

#### **III.3.1. DERECHOS Y OBLIGACIONES DEL CONTRATISTA**

El contratista deberá dar constancia por escrito que la documentación aportada es clara y suficiente para la realización del proyecto. Tiene derecho de solicitar las aclaraciones si el proyecto lo requiere.

Deberá aportar un estudio sobre las medidas de seguridad e higiene que se deberán tomar durante el proyecto. Este plan será entregado a la dirección técnica, que será la encargada de aprobarlo.

El contratista tendrá la obligación de comunicar quien será la persona que será designada para su representación. Esta persona deberá ser un Titulado Superior. Además, tiene el deber de cumplir con sus obligaciones y por supuesto, de ser conocedor de la normativa vigente y cumplirla. No podrá ser representante del proyecto una persona que haya sido sancionada anteriormente por negligencia en el ejercicio de su profesión en el pasado.

El contratista tendrá el deber de supervisar que el personal a su cargo cumple con su trabajo correctamente y respetando siempre el plan de seguridad e higiene. Es importante que se asegure de que el personal que va a realizar cada trabajo está cualificado y acreditado para ejercer el trabajo que le ha sido asignado.

En contratista será quien disponga los medios necesarios para la realización del proyecto.

#### **III.3.2. DIRECCIÓN TÉCNICA**

El cliente será la persona responsable de designar la dirección técnica que le representará en el transcurso del proyecto. Será el máximo responsable del proyecto y deberá decidir y verificar el cumplimiento del comienzo del proyecto, el ritmo del proyecto y de la calidad exigida en todos los trabajos del proyecto.

### **III.3.3. LIBRO DE ÓRDENES**

El Libro de órdenes e incidencias, recogerá todas las modificaciones que se hayan realizado durante el transcurso del proyecto.

### **III.3.4. COMIENZO, RITMO, PLAZO Y CONDICIONES DE LA EJECUCIÓN DE LOS TRABAJOS**

Será el contratista quien dará comienzo a los trabajos de fabricación una vez todas las partes estén de acuerdo y el director técnico acepte el comienzo del proyecto.

Una vez que estén todas las partes de acuerdo y se haya fijado la fecha de comienzo se establecerá una fecha límite, que será fijada por el director técnico. Una vez que el contratista acepte dicho plazo, deberá cumplirlo, pudiendo ser cancelado el proyecto por el cliente si se excede de este límite. Los gastos del proyecto correrán a cargo del contratista por no haber cumplido con los plazos exigidos.

Durante el periodo de fabricación, se deberán fabricar o aprovisionar los distintos elementos que marca el proyecto para la realización del reductor de velocidad.

Durante el periodo de puesta a punto, se comprobará el ensamblaje del conjunto y se enumerarán los diferentes puntos del reductor de velocidad que puedan declinar en un fallo en las pruebas posteriores.

A lo largo del periodo de puesta en marcha, se comprobará el correcto funcionamiento del reductor de velocidad, verificando el cumplimiento de los requisitos exigidos. En caso de que aparezcan inconvenientes, se deberá localizar el foco del problema y repetir el protocolo dictado por el contratista.

Será responsabilidad del contratista asumir los costes de los fallos y modificaciones que se produzcan durante alguna de las partes.

### **III.3.5. TRABAJOS DEFECTUOSOS Y MODIFICACIONES**

El contratista estará obligado a utilizar los materiales que dicte el proyecto y a realizar los pasos marcados en este.

En el caso de posibles defectos, tienen la obligación de asumir sus costes y de realizar todas las modificaciones que sean necesarias para corregir estos defectos siempre que hayan sido bajo su responsabilidad.

### **III.3.6. RECEPCIÓN PROVISIONAL**

Una vez se haya verificado que la puesta en marcha ha sido satisfactoria, se procederá al envío del reductor de velocidad al cliente. Se confirmará un plazo de envío que únicamente puede excederse por alguna causa justificada. En el momento que el cliente reciba el reductor de velocidad, se extenderá un acta, finalizando la realización del proyecto y comenzando el periodo de garantía.

### **III.3.7. PERIODO DE GARANTÍA**

La duración de la garantía, será de dos años. Durante este tiempo el contratista tiene el deber de asumir las reparaciones que surjan por problemas de funcionamiento, siempre y cuando éstos no deriven de un mal mantenimiento o ejecución por parte del cliente.

### **III.3.8. RECEPCIÓN DEFINITIVA**

Una vez terminado el periodo de garantía, se dará por finalizado definitivamente el contrato entre el proyectista y el cliente.



## IV. PRESUPUESTO



## IV.1. INTRODUCCIÓN

En este apartado se procederá a realizar un presupuesto detallado de todos los componentes del reductor de velocidad contemplando los materiales de fabricación, la mano de obra y el tratamiento térmico de algunos de los componentes.

Primeramente, se realizará un cuadro de precios donde se expondrá el coste de la mano de obra, los materiales utilizados para la fabricación del reductor y el coste de la maquinaria utilizada.

Posteriormente, se realizarán las mediciones de los componentes, para poder realizar el presupuesto de ejecución material y el presupuesto base de contrata, para finalmente, obtener el presupuesto total.

Cabe destacar, que las mediciones de los elementos mecanizados, se han realizado con los materiales en bruto, ya que de este modo se realiza una estimación del precio más acorde a la realidad.

## IV.2. CUADRO DE PRECIOS

### IV.2.1. MANO DE OBRA

| Descripción        | Precio |     |
|--------------------|--------|-----|
| Oficial de primera | 16,7   | €/h |
| Oficial de segunda | 11,3   | €/h |

## IV.2.2. MATERIALES

| Descripción                         | Precio  |       |
|-------------------------------------|---------|-------|
|                                     |         |       |
| Acero 34CrMo4                       | 1,44    | €/kg  |
| Acero 20MnCr5                       | 0,7     | €/kg  |
| Acero Ck 45                         | 0,83    | €/kg  |
| Fundición Nodular GG-25             | 1,,67   | €/kg  |
| Chaveta Árbol de entrada 14x9x70    | 1,27    | €/ud. |
| Chaveta Árbol de salida 20x12x125   | 4,00    | €/ud. |
| Chaveta Árbol de salida 22x14x50    | 4,65    | €/ud. |
| Chaveta Árbol intermedio 18x11x45   | 1,90    | €/ud. |
| Rodamiento SKF T2ED 045             | 339,990 | €/ud. |
| Rodamiento SKF 32309J2/Q            | 109,830 | €/ud. |
| Rodamiento SKF 33212/Q              | 178,270 | €/ud. |
| Rodamiento SKF T2EE 060/Q           | 163,82  | €/ud. |
| Rodamiento SKF 32014X/Q             | 113,130 | €/ud. |
| Rodamiento SKF 33214/Q              | 127,33  | €/ud. |
| Tornillo DIN 933 M5x16              | 0,24    | €/ud. |
| Tornillo DIN 933 M12x25             | 0,54    | €/ud. |
| Casquillo Ø 75x60x21,5              | 0,7     | €/ud. |
| Casquillo Ø 95x79x35                | 0,8     | €/ud. |
| Moldeo y molde de la carcasa        | 70      | €/ud. |
| Lubricante ISO VG-460               | 6,31    | €/L   |
| Junta de estanqueidad tapa superior | 5,72    | €/ud. |
| Junta estanqueidad tapas laterales  | 4,83    | €/ud. |
| Retén elástico A NBR 52x45x4        | 1,17    | €/ud. |
| Retén elástico A NBR 94x68x9        | 2,67    | €/ud. |
| Tapón de llenado de lubricante M20  | 0,95    | €/ud. |
| Tapón de vaciado de lubricante M20  | 0,95    | €/ud. |
| Mirilla de nivel de lubricante      | 3,13    | €/ud. |

## IV.2.3. MAQUINARIA

| Descripción                     | Precio |     |
|---------------------------------|--------|-----|
|                                 |        |     |
| Torno                           | 25     | €/h |
| Fresadora                       | 30     | €/h |
| Rectificadora                   | 40     | €/h |
| Taladro y roscado de la carcasa | 20     | €/h |

### IV.3. MEDICIONES

| <b>Engranajes</b>         | <b>Unidades</b> |
|---------------------------|-----------------|
| Rueda de la primera etapa | 8,032           |
| Rueda de la segunda etapa | 14,508          |

| <b>Árboles</b>   | <b>Unidades</b> |
|------------------|-----------------|
| Árbol de entrada | 6,47            |
| Árbol intermedio | 6,662           |
| Árbol de salida  | 14,937          |

| <b>Chavetas</b>                   | <b>Unidades</b> |
|-----------------------------------|-----------------|
| Chaveta Árbol de entrada 14x9x70  | 1               |
| Chaveta Árbol de salida 20x12x125 | 1               |
| Chaveta Árbol de salida 22x14x50  | 1               |
| Chaveta Árbol intermedio 18x11x45 | 1               |

| <b>Casquillos</b>      | <b>Unidades</b> |
|------------------------|-----------------|
| Casquillo Ø 75x60x21,5 | 1               |
| Casquillo Ø 95x79x35   | 1               |

| <b>Rodamientos</b>        | <b>Unidades</b> |
|---------------------------|-----------------|
| Rodamiento SKF T2ED 045   | 1               |
| Rodamiento SKF 32309J2/Q  | 1               |
| Rodamiento SKF 33212/Q    | 1               |
| Rodamiento SKF T2EE 060/Q | 1               |
| Rodamiento SKF 32014X/Q   | 1               |
| Rodamiento SKF 33214/Q    | 1               |

| <b>Tapas de cierre</b> | <b>Unidades</b> |
|------------------------|-----------------|
| Tapa lateral izquierda | 5,138           |
| Tapa lateral derecha   | 5,138           |
| Tapa superior          | 1.353           |

| <b>Tapones</b>                     | <b>Unidades</b> |
|------------------------------------|-----------------|
| Tapón de llenado de lubricante M20 | 1               |
| Tapón de vaciado de lubricante M20 | 1               |

| <b>Tornillería</b>      | <b>Unidades</b> |
|-------------------------|-----------------|
| Tornillo DIN 933 M5x16  | 10              |
| Tornillo DIN 933 M12x25 | 32              |

| <b>Sellado</b>                      | <b>Unidades</b> |
|-------------------------------------|-----------------|
| Junta de estanqueidad tapa superior | 1               |
| Junta estanqueidad tapas laterales  | 2               |
| Retén elástico A NBR 52x45x4        | 1               |
| Retén elástico A NBR 94x68x9        | 1               |

| <b>Carcasa</b>                   | <b>Unidades</b> |
|----------------------------------|-----------------|
| Bloque del reductor de velocidad | 156,28          |

| <b>Lubricante</b>     | <b>Unidades</b> |
|-----------------------|-----------------|
| Lubricante ISO VG-460 | 14,6            |

## IV.4. PRECIOS DESCOMPUESTOS

| RUEDA DE LA PRIMERA ETAPA |          |          |                    |                  |
|---------------------------|----------|----------|--------------------|------------------|
| Descripción               | Unidades | Cantidad | Precio Parcial (€) | Precio Total (€) |
| Acero 20MnCr5             | Kg       | 8,032    | 0,7                | 5,62             |
| Torneado                  | h        | 0,6      | 25                 | 15,00            |
| Fresado                   | h        | 0,2      | 30                 | 6,00             |
| Taladrado                 | h        | 0,1      | 20                 | 2,00             |
| Rectificado               | h        | 0,2      | 40                 | 8,00             |
| <b>TOTAL</b>              |          |          |                    | <b>36,62</b>     |

| RUEDA DE LA SEGUNDA ETAPA |          |          |                    |                  |
|---------------------------|----------|----------|--------------------|------------------|
| Descripción               | Unidades | Cantidad | Precio Parcial (€) | Precio Total (€) |
| Acero 20MnCr5             | Kg       | 14,508   | 0,7                | 10,15            |
| Torneado                  | h        | 0,6      | 25                 | 15,00            |
| Fresado                   | h        | 0,2      | 30                 | 6,00             |
| Taladrado                 | h        | 0,1      | 20                 | 2,00             |
| Rectificado               | h        | 0,2      | 40                 | 8,00             |
| <b>TOTAL</b>              |          |          |                    | <b>41,15</b>     |

| ÁRBOL DE ENTRADA    |          |          |                    |                  |
|---------------------|----------|----------|--------------------|------------------|
| Descripción         | Unidades | Cantidad | Precio Parcial (€) | Precio Total (€) |
| Acero 34CrMo4       | Kg       | 6,47     | 1,44               | 9,32             |
| Torneado            | h        | 0,41     | 25                 | 10,25            |
| Fresado             | h        | 0,23     | 30                 | 6,90             |
| Taladrado y roscado | h        | 0,05     | 20                 | 1,00             |
| Rectificado         | h        | 0,7      | 40                 | 28,00            |
| <b>TOTAL</b>        |          |          |                    | <b>55,47</b>     |

| <b>ÁRBOL INTERMEDIO</b> |                 |                 |                           |                         |
|-------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-------------------------|
| <b>Descripción</b>      | <b>Unidades</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Precio Parcial (€)</b> | <b>Precio Total (€)</b> |
| Acero 34CrMo4           | Kg              | 6,662           | 1,44                      | 9,59                    |
| Torneado                | h               | 0,74            | 25                        | 18,50                   |
| Fresado                 | h               | 0,41            | 30                        | 12,30                   |
| Rectificado             | h               | 1,35            | 40                        | 54,00                   |
| <b>TOTAL</b>            |                 |                 |                           | <b>94,39</b>            |

| <b>ÁRBOL DE SALIDA</b> |                 |                 |                           |                         |
|------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-------------------------|
| <b>Descripción</b>     | <b>Unidades</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Precio Parcial (€)</b> | <b>Precio Total (€)</b> |
| Acero Ck 45            | Kg              | 14,937          | 0,83                      | 12,39                   |
| Torneado               | h               | 1,23            | 25                        | 30,75                   |
| Fresado                | h               | 0,75            | 30                        | 22,50                   |
| Taladrado y roscado    | h               | 0,05            | 20                        | 1,00                    |
| Rectificado            | h               | 1,86            | 40                        | 74,40                   |
| <b>TOTAL</b>           |                 |                 |                           | <b>141,34</b>           |

| <b>CARCASA DEL REDUCTOR</b>  |                 |                 |                           |                         |
|------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-------------------------|
| <b>Descripción</b>           | <b>Unidades</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Precio Parcial (€)</b> | <b>Precio Total (€)</b> |
| Fundición Nodular GG-25      | Kg              | 156,28          | 1,67                      | 260,99                  |
| Moldeo y molde de la carcasa | Ud.             | 1               | 85                        | 85,00                   |
| Fresado                      | h               | 2,5             | 30                        | 75,00                   |
| Taladrado y roscado          | h               | 1,8             | 20                        | 36,00                   |
| <b>TOTAL</b>                 |                 |                 |                           | <b>456,99</b>           |

| <b>TAPA LATERAL IZQUIERDA</b> |                 |                 |                           |                         |
|-------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-------------------------|
| <b>Descripción</b>            | <b>Unidades</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Precio Parcial (€)</b> | <b>Precio Total (€)</b> |
| Fundición Nodular GG-25       | Kg              | 5,138           | 1,67                      | 8,58                    |
| Moldeo y molde de la tapa     | Ud.             | 1               | 20                        | 20,00                   |
| Fresado                       | h               | 0,35            | 30                        | 10,50                   |
| Taladrado                     | h               | 0,2             | 20                        | 4,00                    |
| <b>TOTAL</b>                  |                 |                 |                           | <b>43,08</b>            |

| <b>TAPA LATERAL DERECHA</b>  |                 |                 |                           |                         |
|------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-------------------------|
| <b>Descripción</b>           | <b>Unidades</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Precio Parcial (€)</b> | <b>Precio Total (€)</b> |
| Fundición Nodular GG-25      | Kg              | 5,138           | 1,67                      | 8,58                    |
| Moldeo y molde de la carcasa | Ud.             | 1               | 20                        | 20,00                   |
| Fresado                      | h               | 0,35            | 30                        | 10,50                   |
| Taladrado                    | h               | 0,2             | 20                        | 4,00                    |
| <b>TOTAL</b>                 |                 |                 |                           | <b>43,08</b>            |

| <b>TAPA SUPERIOR</b>         |                 |                 |                           |                         |
|------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-------------------------|
| <b>Descripción</b>           | <b>Unidades</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Precio Parcial (€)</b> | <b>Precio Total (€)</b> |
| Fundición Nodular GG-25      | Kg              | 1,353           | 1,67                      | 2,26                    |
| Moldeo y molde de la carcasa | Ud.             | 1               | 20                        | 20,00                   |
| Fresado                      | h               | 0,35            | 30                        | 10,50                   |
| Taladrado y roscado          | h               | 0,35            | 20                        | 7,00                    |
| <b>TOTAL</b>                 |                 |                 |                           | <b>39,76</b>            |

| <b>TAPONES</b>                 |                 |                 |                           |                         |
|--------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-------------------------|
| <b>Descripción</b>             | <b>Unidades</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Precio Parcial (€)</b> | <b>Precio Total (€)</b> |
| Tapón de llenado de lubricante | Ud.             | 1               | 0,95                      | 0,95                    |
| Tapón de vaciado de lubricante | Ud.             | 1               | 0,95                      | 0,95                    |
| Visor de nivel de lubricante   | Ud.             | 1               | 3,13                      | 3,13                    |
| <b>TOTAL</b>                   |                 |                 |                           | <b>5,03</b>             |

| <b>RODAMIENTOS</b>        |                 |                 |                           |                         |
|---------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-------------------------|
| <b>Descripción</b>        | <b>Unidades</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Precio Parcial (€)</b> | <b>Precio Total (€)</b> |
| Rodamiento SKF T2ED 045   | Ud.             | 1               | 339,99                    | 339,99                  |
| Rodamiento SKF 32309J2/Q  | Ud.             | 1               | 109,83                    | 109,83                  |
| Rodamiento SKF 33212/Q    | Ud.             | 1               | 178,27                    | 178,27                  |
| Rodamiento SKF T2EE 060/Q | Ud.             | 1               | 163,82                    | 163,82                  |
| Rodamiento SKF 32014X/Q   | Ud.             | 1               | 113,13                    | 113,13                  |
| Rodamiento SKF 33214/Q    | Ud.             | 1               | 127,33                    | 127,33                  |
| <b>TOTAL</b>              |                 |                 |                           | <b>582,55</b>           |

| <b>TORNILLERÍA</b>      |                 |                 |                           |                         |
|-------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-------------------------|
| <b>Descripción</b>      | <b>Unidades</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Precio Parcial (€)</b> | <b>Precio Total (€)</b> |
| Tornillo DIN 933 M5x16  | Ud.             | 10              | 0,24                      | 2,40                    |
| Tornillo DIN 933 M12x25 | Ud.             | 32              | 0,54                      | 17,28                   |
| <b>TOTAL</b>            |                 |                 |                           | <b>19,68</b>            |

| <b>CASQUILLOS</b>      |                 |                 |                           |                         |
|------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-------------------------|
| <b>Descripción</b>     | <b>Unidades</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Precio Parcial (€)</b> | <b>Precio Total (€)</b> |
| Casquillo Ø 75x60x21,5 | Ud.             | 1               | 0,7                       | 0,70                    |
| Casquillo Ø 95x80x35   | Ud.             | 1               | 0,8                       | 0,80                    |
| <b>TOTAL</b>           |                 |                 |                           | <b>1,50</b>             |

| <b>CHAVETAS (UNE 17.102h1)</b>    |                 |                 |                           |                         |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-------------------------|
| <b>Descripción</b>                | <b>Unidades</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Precio Parcial (€)</b> | <b>Precio Total (€)</b> |
| Chaveta Árbol de entrada 14x9x70  | Ud.             | 1               | 1,27                      | 1,27                    |
| Chaveta Árbol de salida 20x12x125 | Ud.             | 1               | 4                         | 4,00                    |
| Chaveta Árbol de salida 22x14x50  | Ud.             | 1               | 4,65                      | 4,65                    |
| Chaveta Árbol intermedio 18x11x45 | Ud.             | 1               | 1,9                       | 1,90                    |
| <b>TOTAL</b>                      |                 |                 |                           | <b>11,82</b>            |

| <b>ELEMENTOS DE SELLADO</b>         |                 |                 |                           |                         |
|-------------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-------------------------|
| <b>Descripción</b>                  | <b>Unidades</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Precio Parcial (€)</b> | <b>Precio Total (€)</b> |
| Junta de estanqueidad tapa superior | Ud.             | 1               | 5,72                      | 5,72                    |
| Junta estanqueidad tapas laterales  | Ud.             | 2               | 4,83                      | 9,66                    |
| Retén elástico A NBR 52x45x4        | Ud.             | 1               | 1,17                      | 1,17                    |
| Retén elástico A NBR 85x70x7        | Ud.             | 1               | 2,67                      | 2,67                    |
| <b>TOTAL</b>                        |                 |                 |                           | <b>19,22</b>            |

| <b>LUBRICANTE</b>     |                 |                 |                           |                         |
|-----------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-------------------------|
| <b>Descripción</b>    | <b>Unidades</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Precio Parcial (€)</b> | <b>Precio Total (€)</b> |
| Lubricante ISO VG-460 | L               | 14,6            | 6,31                      | 92,13                   |
| <b>TOTAL</b>          |                 |                 |                           | <b>92,13</b>            |

## IV.5. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL

| Descripción                                    | Precio (€)     |
|--|----------------|
| ÁRBOLES  | 291,20         |
| ENGRANAJES                                     | 77,77          |
| CARCASA  | 456,99         |
| TAPAS DE CIERRE                                | 125,92         |
| TAPONES  | 5,03           |
| RODAMIENTOS                                    | 582,55         |
| CASQUILLOS                                     | 1,50           |
| TORNILLERÍA                                    | 19,68          |
| CHAVETAS (UNE 17,102h1)                        | 11,82          |
| ELEMENTOS DE SELLADO                           | 19,22          |
| LUBRICANTE                                     | 92,13          |
| <b>TOTAL PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL</b> | <b>1683,81</b> |

## IV.6. PRESUPUESTO BESE DE CONTRATA

| Descripción                               | Precio (€)     |
|---|----------------|
| Presupuesto de Ejecución Material         | 1683,81        |
| Gastos Generales (12%)                    | 202,05         |
| Beneficio Industrial (6%)                 | 101,03         |
| <b>TOTAL PRESUPUESTO BASE DE CONTRATA</b> | <b>1986,89</b> |

## IV.7. PRESUPUESTO TOTAL

| Descripción                  | Precio (€)     |
|------------------------------|----------------|
| Presupuesto Base de Contrata | 1986,89        |
| IVA (Tipo General 21%)       | 317,90         |
| <b>TOTAL PRESUPUESTO</b>     | <b>2304,79</b> |

El coste total del reductor de velocidad es de **DOS MIL TRESCIENTOS CUATRO Y SETENTA Y NUEVE CÉNTIMOS DE EURO.**



# V. NORMATIVA



A continuación, se expondrá brevemente el proceso de obtención del marcado CE para el reductor de velocidad.

Para obtener el marcado CE, se categorizará al reductor de velocidad como una cuasi máquina, por lo que se deberá presentar la documentación técnica correspondiente al Anexo VII, parte B (Instrucciones de montaje Anexo VI) referente a la obtención del marcado CE.

Posteriormente, se deberá recibir la declaración CE de conformidad descrita en el Anexo II, parte 1, sección A de la normativa vigente.

Finalmente se obtendrá el marcado CE correspondiente al artículo 16, Anexo III.

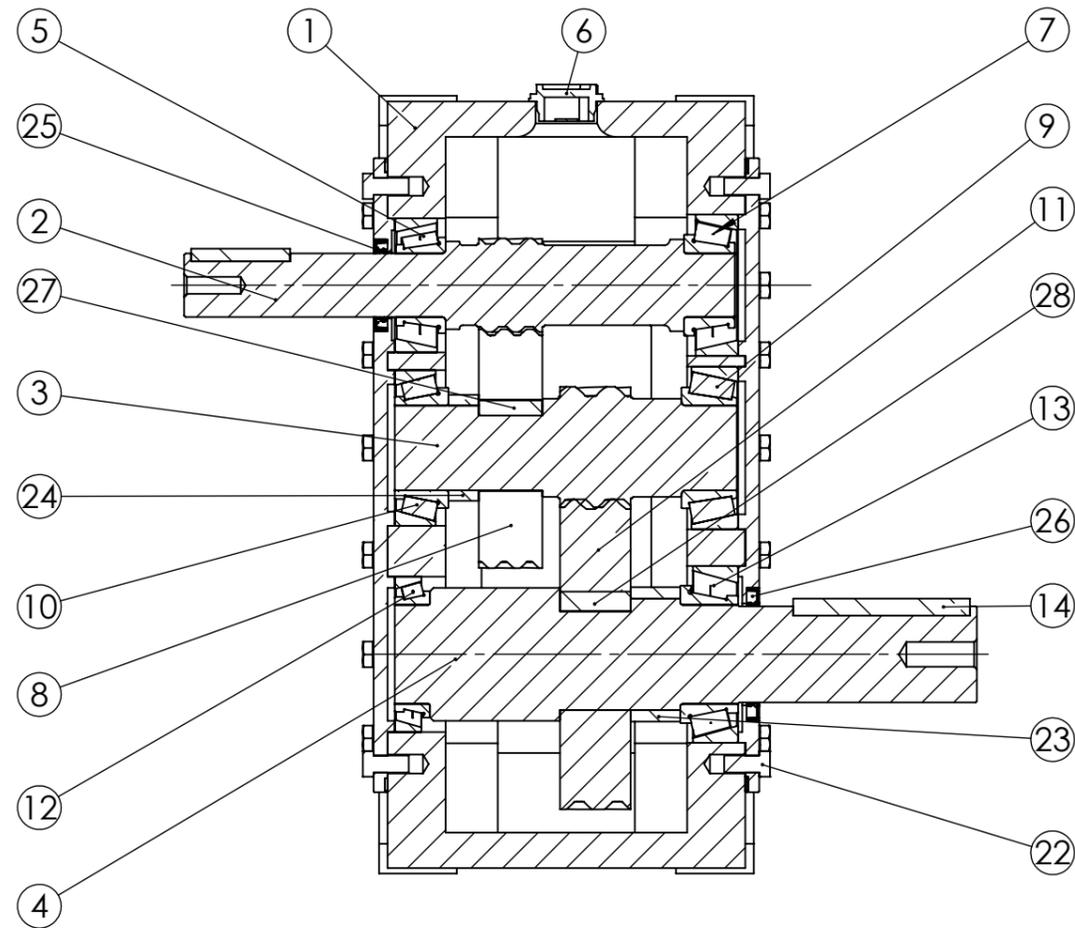
La normativa utilizada a lo largo del trabajo se expone a continuación:

- Artículo 16 y el anexo III de la Directiva de máquinas, artículo 2, apartado 20, y el artículo 30 del Reglamento (CE) nº 765/2008-99.
- Reglamento (CE) nº 765/2008.
- UNE-EN 10027, (Aceros).
- UNE-EN 36003, (Fundiciones).
- UNE 18048, (Precisión de engranajes cilíndricos).
- ISO 3448, (Viscosidad del lubricante).
- UNE 18018, (Árboles).
- UNE 18037 y ISO 281, (Rodamientos).
- UNE 17102-1, (Chavetas).
- UNE-EN ISO 4017:2011, (Tornillería).
- UNE 1120, ISO 286 y UNE 1037, (Acotación).
- UNE-EN ISO 14159:2008, (Seguridad de las máquinas).

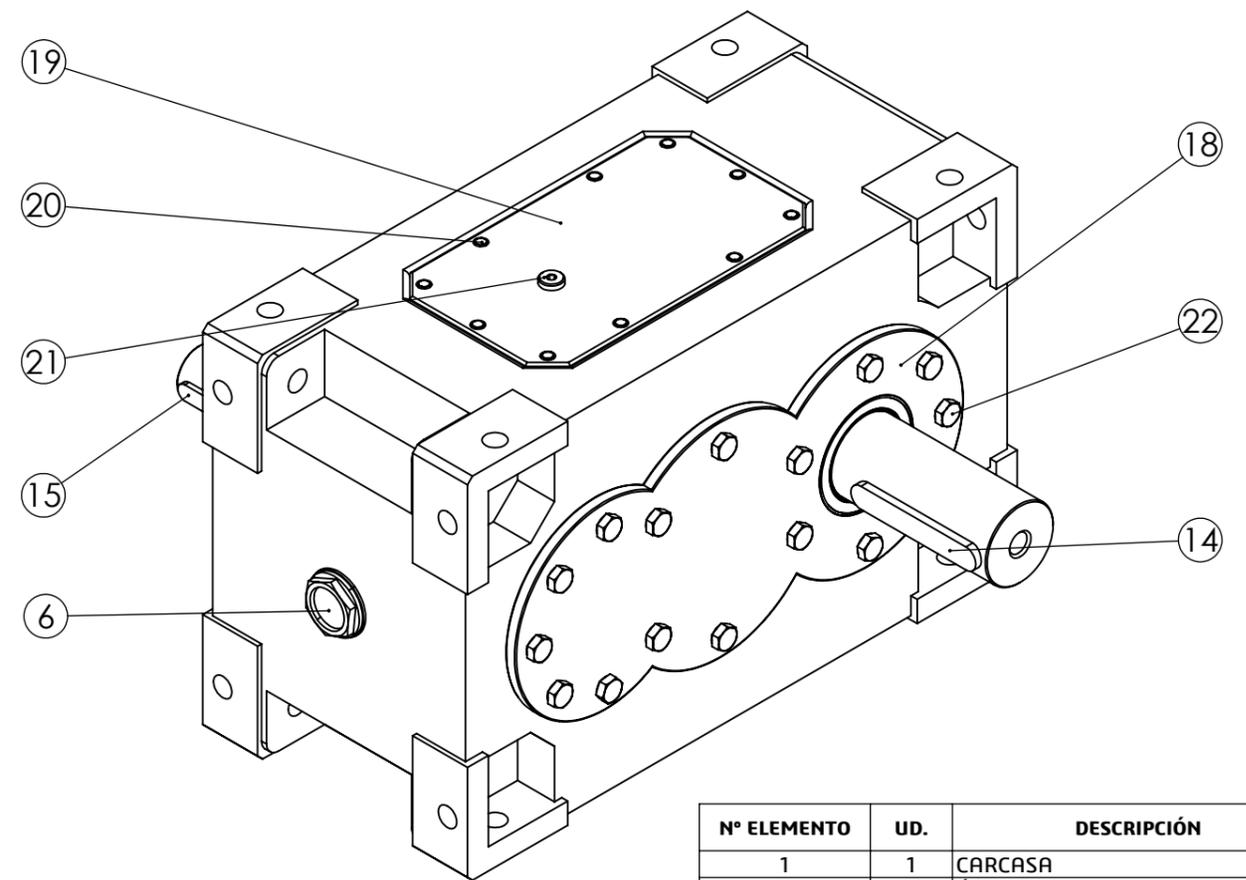
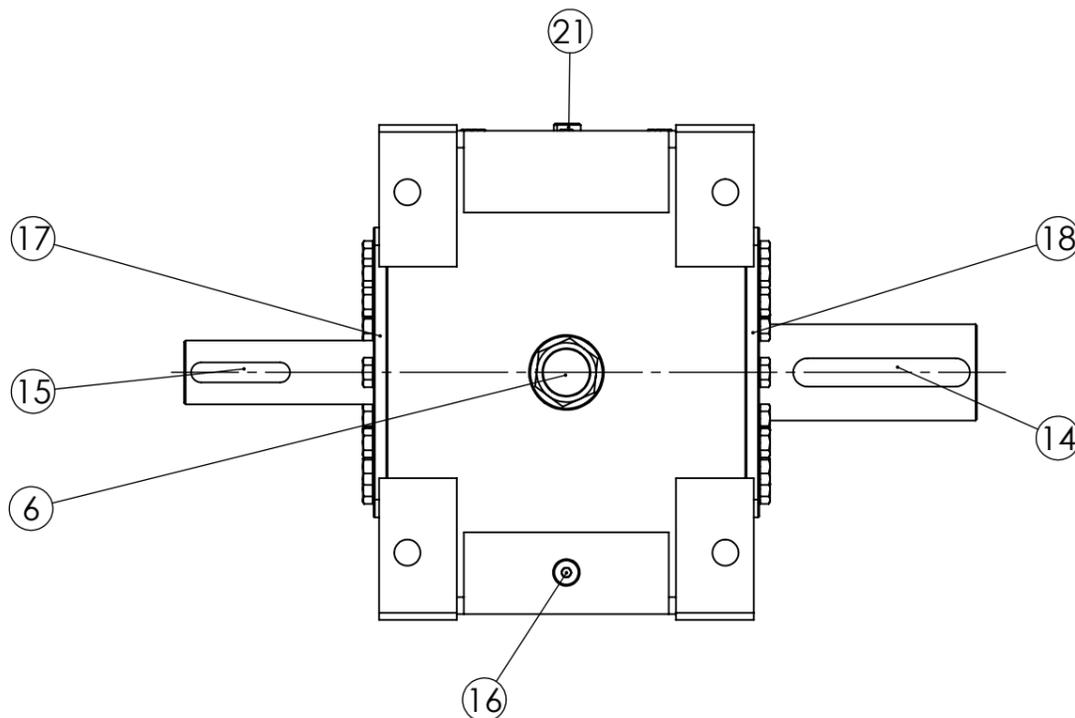


# VI. PLANOS



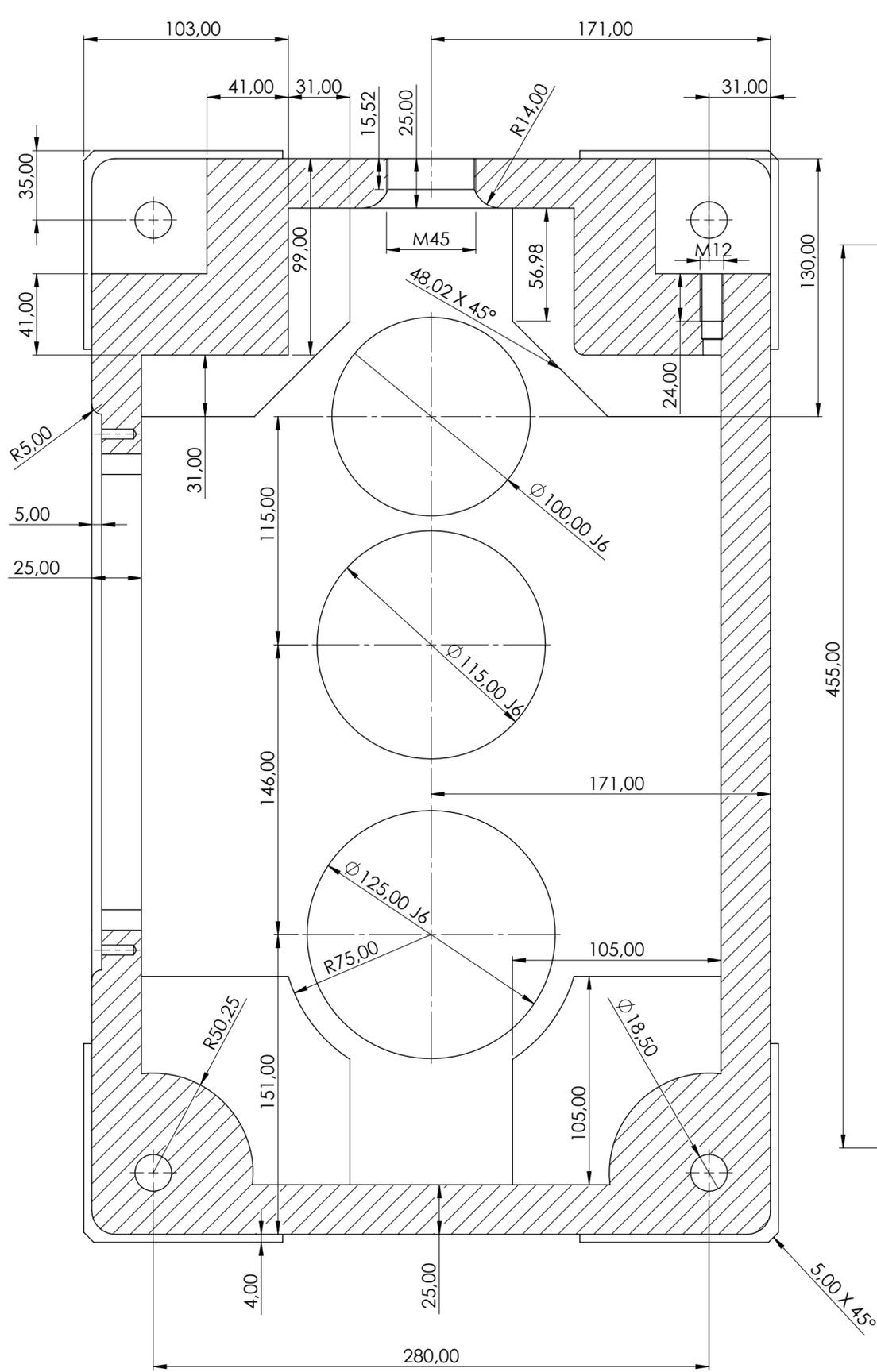


SECCIÓN A-A

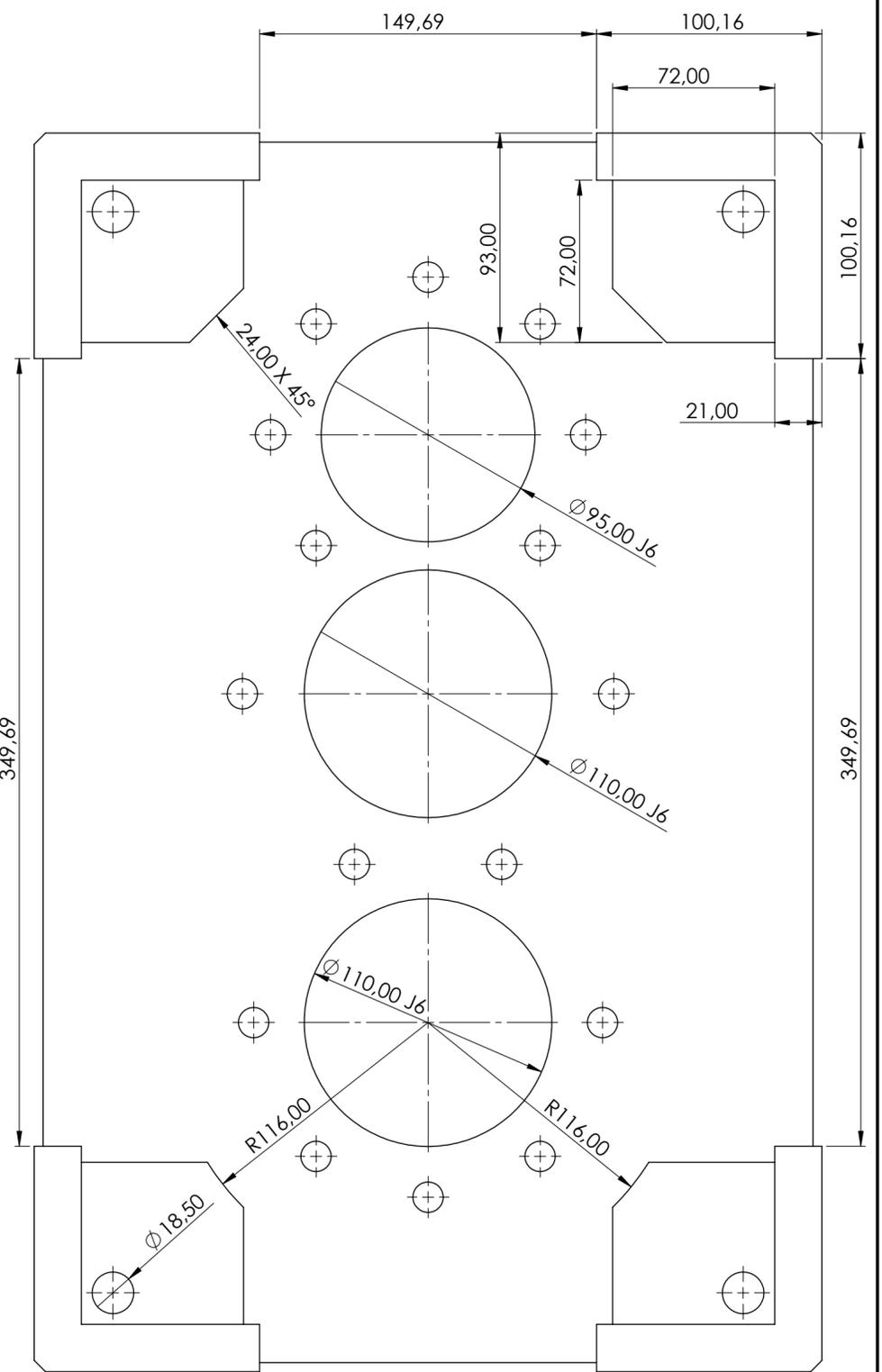
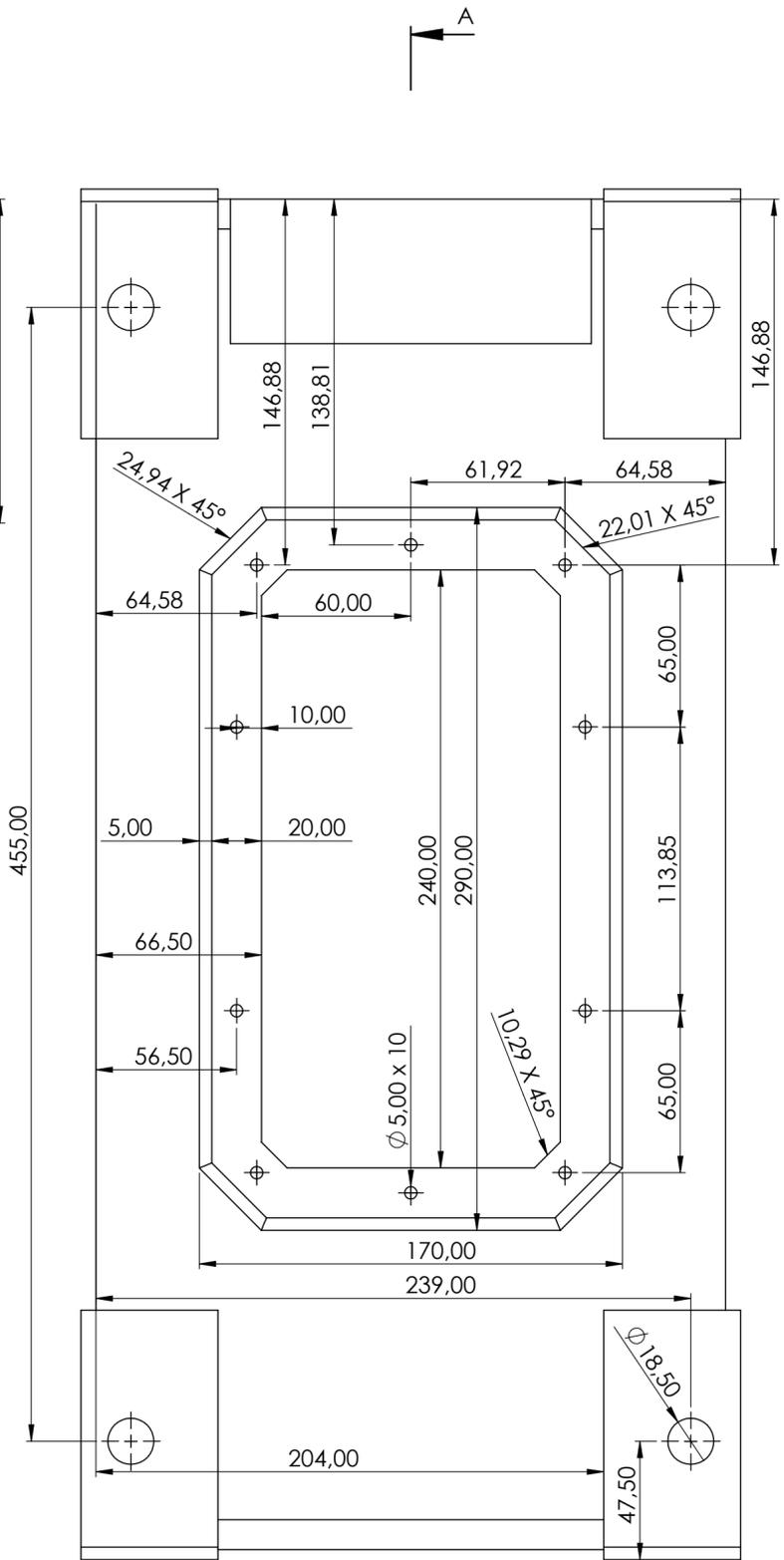


| Nº ELEMENTO | UD. | DESCRIPCIÓN                |
|-------------|-----|----------------------------|
| 1           | 1   | CARCASA                    |
| 2           | 1   | ÁRBOL DE ENTRADA           |
| 3           | 1   | ÁRBOL INTERMEDIO           |
| 4           | 1   | ÁRBOL DE SALIDA            |
| 5           | 1   | RODAMIENTO SKF T2ED 045    |
| 6           | 1   | MIRILLA DE NIVEL DE ACEITE |
| 7           | 1   | RODAMIENTO SKF 32309J2/Q   |
| 8           | 1   | ENGRANAJE 2                |
| 9           | 1   | RODAMIENTO SKF T2EE 060/Q  |
| 10          | 1   | RODAMIENTO SKF 33212/Q     |
| 11          | 1   | ENGRANAJE 4                |
| 12          | 1   | RODAMIENTO SKF 32014X/Q    |
| 13          | 1   | RODAMIENTO SKF 33214/Q     |
| 14          | 1   | CHAVETA ÁRBOL DE SALIDA    |
| 15          | 1   | CHAVETA ÁRBOL DE ENTRADA   |
| 16          | 1   | TAPÓN DE VACIADO           |
| 17          | 1   | TAPA DE CIERRE IZQUIERDA   |
| 18          | 1   | TAPA DE CIERRE DERECHA     |
| 19          | 1   | TAPA DE CIERRE SUPERIOR    |
| 20          | 10  | TORNILLO M5X16             |
| 21          | 1   | TAPÓN DE LLENADO           |
| 22          | 32  | TORNILLO M12X25            |
| 23          | 1   | CASQUILLO Ø 75x60x19,5     |
| 24          | 1   | CASQUILLO Ø 95x80x34       |
| 25          | 1   | RETÉN ELÁSTICO 52x45x4     |
| 26          | 1   | RETÉN ELÁSTICO 94x68x9     |
| 27          | 1   | CHAVETA ENGRANAJE 2        |
| 28          | 1   | CHAVETA ENGRANAJE 4        |

|  |   |   |
|--|---|---|
|  <b>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</b> | DIBUJADO POR:<br><b>ENRIQUE MORO VALDEZATE</b>                            | <b>TRABAJO FIN DE GRADO</b><br>DISEÑO Y CÁLCULO DE UN REDUCTOR DE VELOCIDAD CON RELACIÓN DE TRANSMISIÓN 7.1 Y PAR MÁXIMA A LA SALIDA DE 4500 Nm |
|  | REVISADO POR:<br><b>PATRICIA LIMIÑANA GREGORI<br/>SERGI MONTAVA JORDÀ</b> |   |
| ESCALA:<br><b>1:5</b><br>FORMATO A3  | PLANO:<br><b>CONJUNTO</b>   | Nº DE PLANO:<br><b>VI.01</b><br>FECHA: 7/11/2018  |



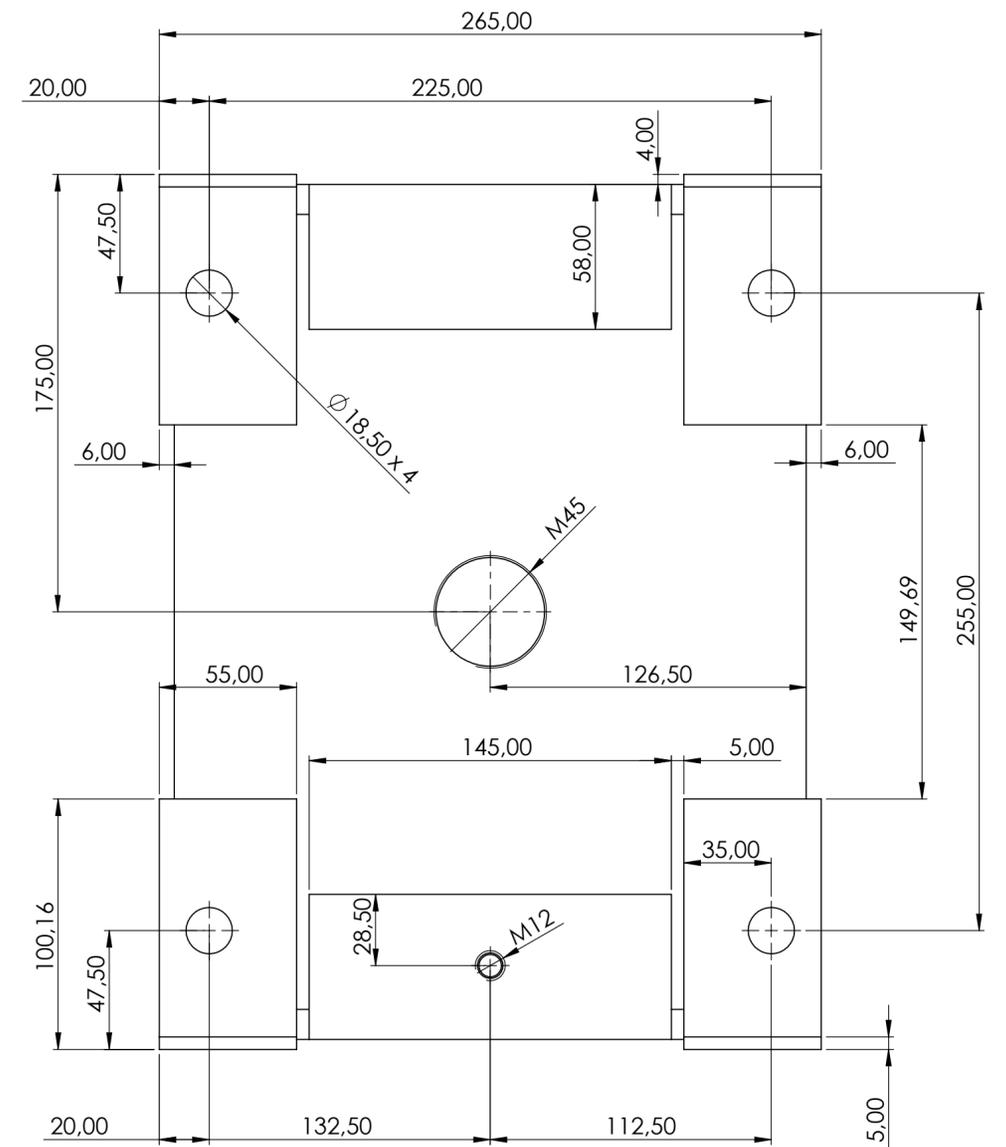
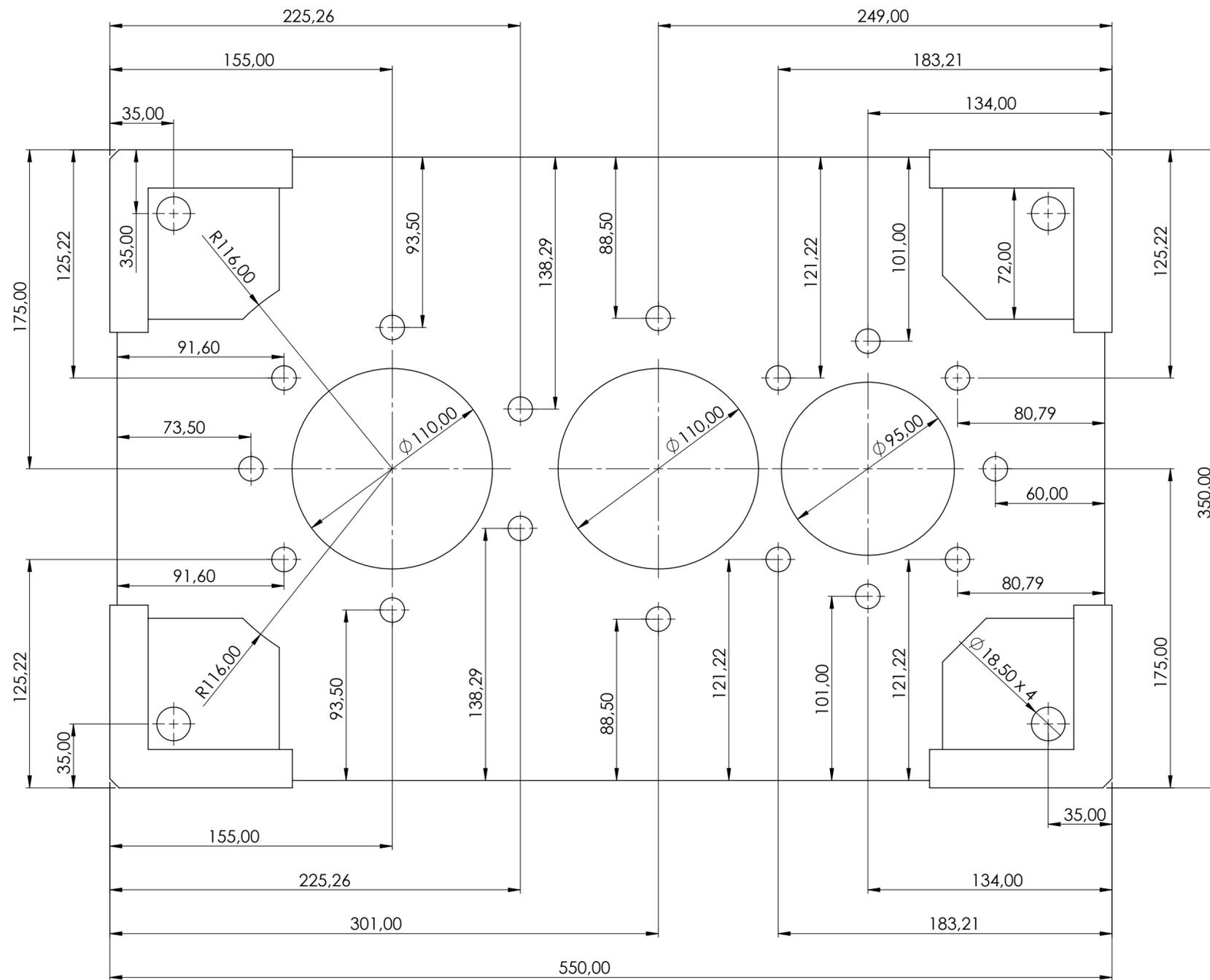
SECCIÓN A-A  
ESCALA 1 : 2



MATERIAL: GG-25  
TOLERANCIAS GENERALES: Js11  
PESO: 156,28kg

|   |  |  |
|---|--|--|
|  UNIVERSITAT<br>POLITÈCNICA<br>DE VALÈNCIA | DIBUJADO POR: ENRIQUE MORO VALDEZATE                           | TRABAJO FIN DE GRADO   |
|   | REVISADO POR: PATRICIA LIMIÑANA GREGORI<br>SERGI MONTAVA JORDÀ | DISEÑO Y CÁLCULO DE UN REDUCTOR DE VELOCIDAD<br>CON RELACIÓN DE TRANSMISIÓN 7.1 Y PAR MÁXIMA A<br>LA SALIDA DE 4500 Nm |
| ESCALA: 1:2<br>FORMATO: A2  | PLANO:   | Nº DE PLANO:<br><b>VI.01.01-1</b><br>FECHA: 7/11/2018  |

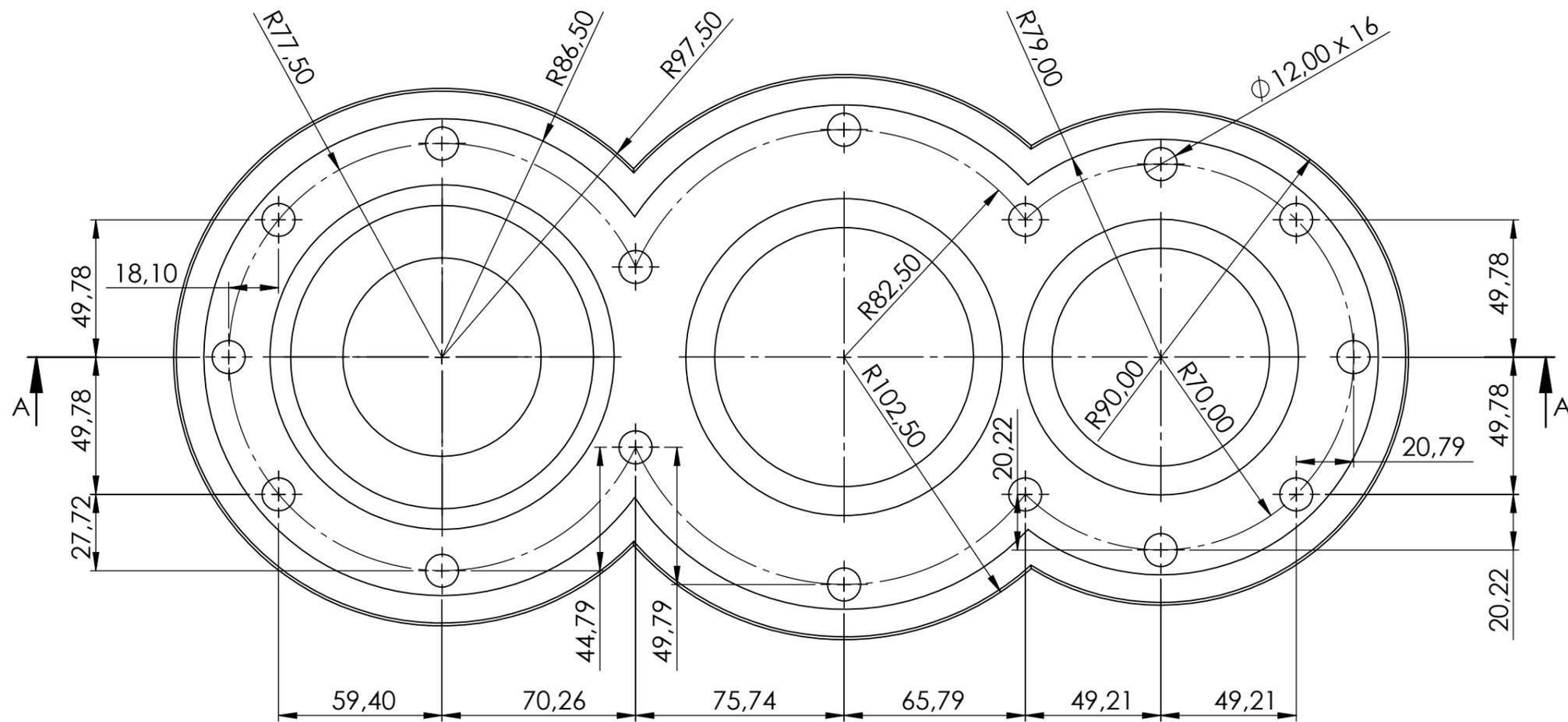
**CARCASA**



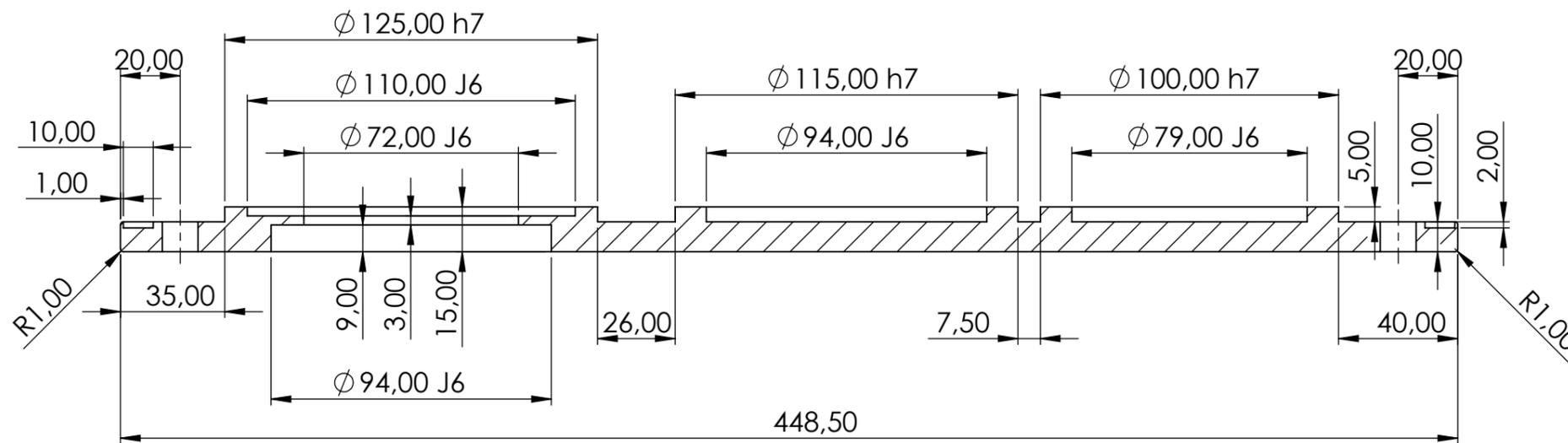
MATERIAL: GG-25  
 TOLERANCIAS GENERALES: Js11  
 PESO: 156,28kg

|   |  |  |
|---|--|--|
|  UNIVERSITAT<br>POLITÈCNICA<br>DE VALÈNCIA | DIBUJADO POR: ENRIQUE MORO VALDEZATE                           | TRABAJO FIN DE GRADO   |
|   | REVISADO POR: PATRICIA LIMIÑANA GREGORI<br>SERGI MONTAVA JORDÀ | DISEÑO Y CÁLCULO DE UN REDUCTOR DE VELOCIDAD<br>CON RELACIÓN DE TRANSMISIÓN 7.1 Y PAR MÁXIMA A<br>LA SALIDA DE 4500 Nm |
| ESCALA:<br><b>1:2</b>   | PLANO:<br><b>CARCASA</b>                                       | Nº DE PLANO:<br><b>VI.01.01-2</b>  |
| FORMATO A2  | FECHA:<br>7/11/2018  |  |





SECCIÓN A-A  
ESCALA 1 : 2



MATERIAL: GG-25  
TOLERANCIAS GENERALES: Js11  
PESO: 5,138kg



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

DIBUJADO POR: ENRIQUE MORO VALDEZATE  
REVISADO POR: PATRICIA LIMIÑANA GREGORI  
SERGI MONTAVA JORDÀ

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO Y CÁLCULO DE UN REDUCTOR DE VELOCIDAD  
CON RELACIÓN DE TRANSMISIÓN 7.1 Y PAR MÁXIMA A  
LA SALIDA DE 4500 Nm

ESCALA:

1:2

FORMATO A3

PLANO:

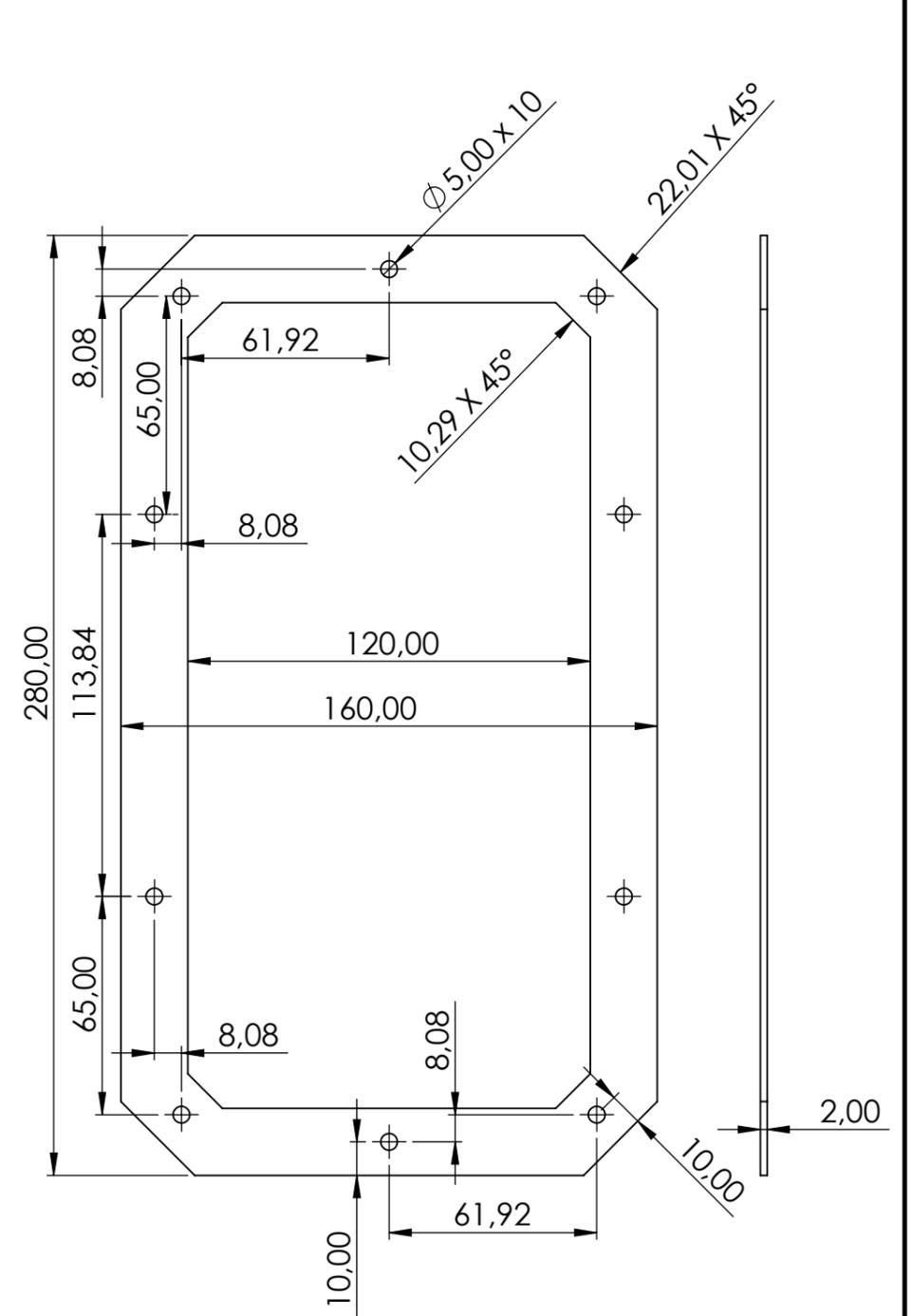
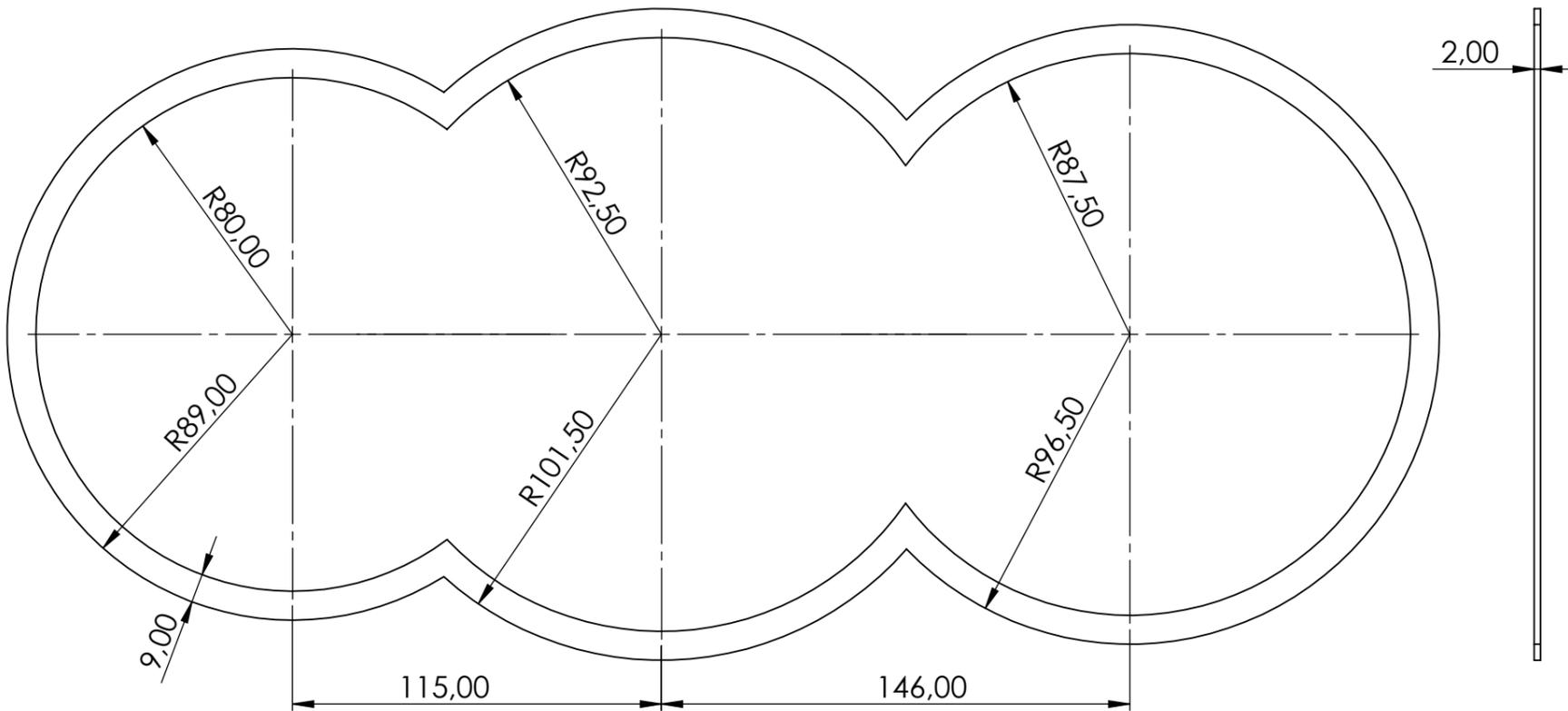
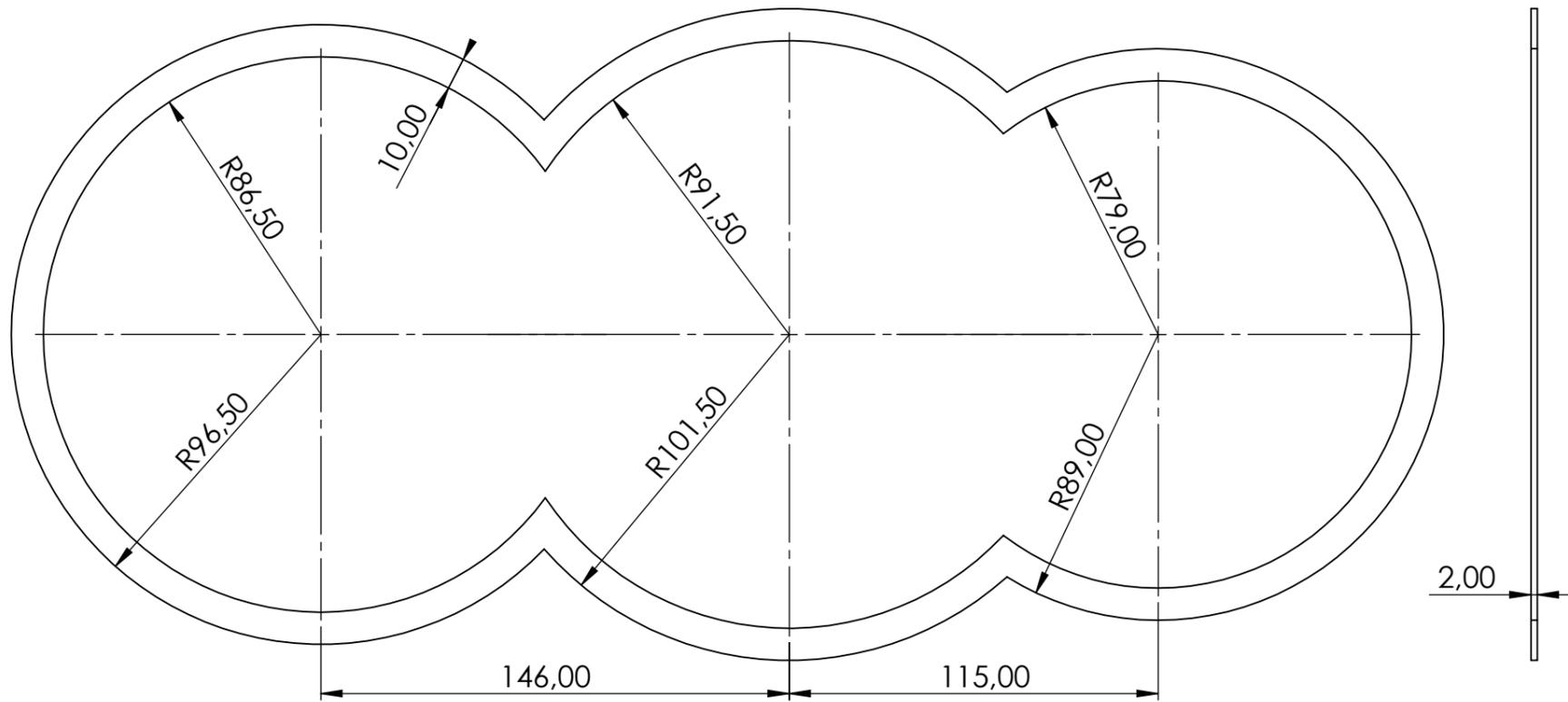
TAPA LATERAL DERECHA

Nº DE PLANO:

VI.01.03

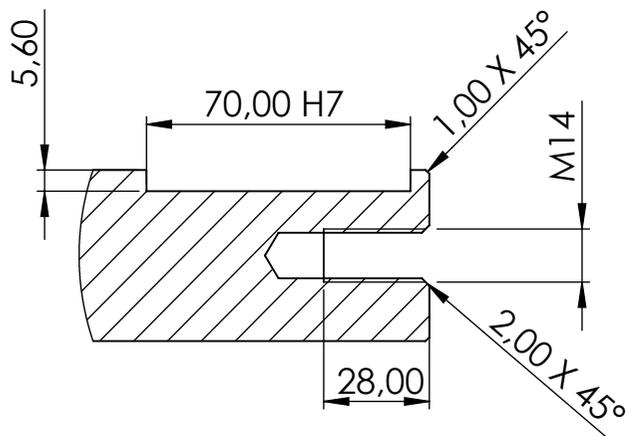
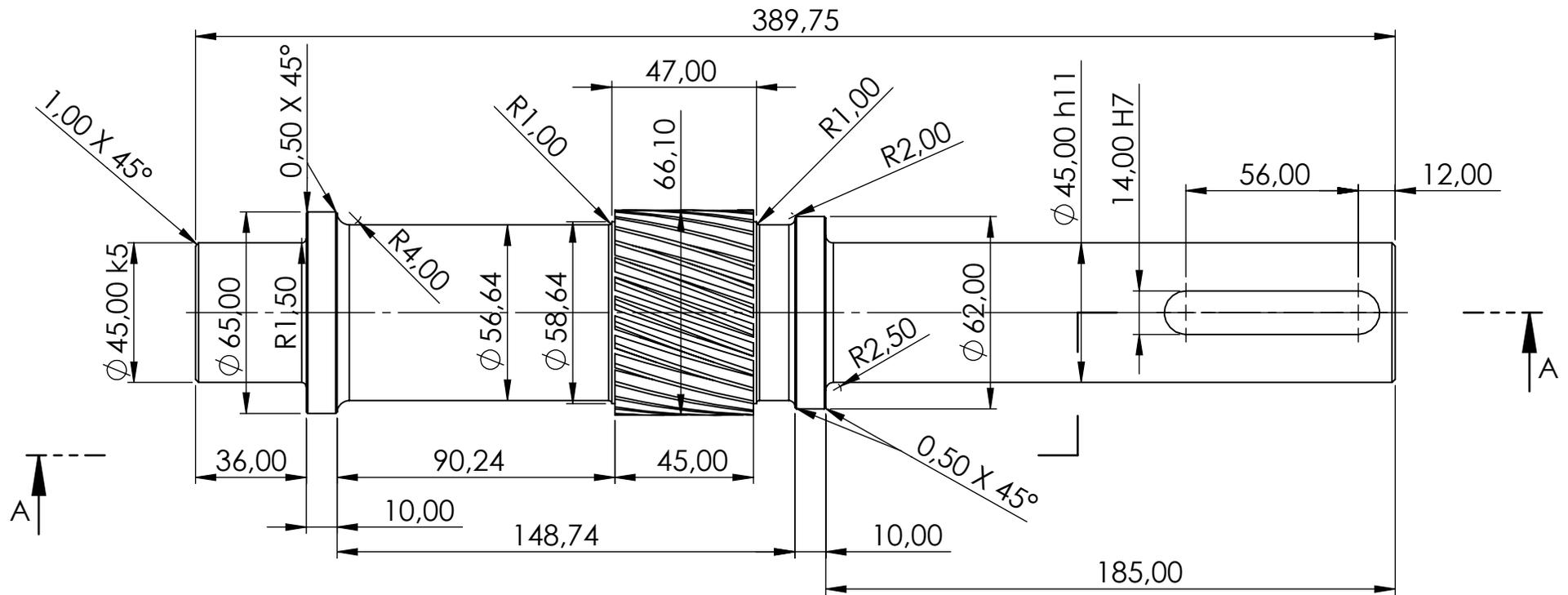
FECHA: 3/11/2018





MATERIAL: NBR  
 TOLERANCIAS GENERALES: Js11  
 PESO: 0,073kg

|   |   |   |
|---|---|---|
|  UNIVERSITAT<br>POLITÈCNICA<br>DE VALÈNCIA | DIBUJADO POR:<br><b>ENRIQUE MORO VALDEZATE</b>                                  | <b>TRABAJO FIN DE GRADO</b><br>DISEÑO Y CÁLCULO DE UN REDUCTOR DE VELOCIDAD<br>CON RELACIÓN DE TRANSMISIÓN 7.1 Y PAR MÁXIMA A<br>LA SALIDA DE 4500 Nm |
|   | REVISADO POR:<br><b>PATRICIA LIMIÑANA GREGORI</b><br><b>SERGI MONTAVA JORDÀ</b> |   |
| ESCALA:<br><b>1:2</b><br>FORMATO A3   | PLANO:<br><b>JUNTAS DE SELLADO</b>  | Nº DE PLANO:<br><b>VI.01.05</b><br>FECHA: 7/11/2018   |



DETALLE A  
ESCALA 1 : 2

MATERIAL: 34CrMo4  
 TRATAMIENTO TÉRMICO: CEMENTADO  
 TOLERANCIAS GENERALES: Js11  
 PESO: 6,47kg

|                    |       |
|--------------------|-------|
| MÓDULO NORMAL      | 2     |
| NÚMERO DE DIENTES  | 29    |
| ÁNGULO DE PRESIÓN  | 20°   |
| ÁNGULO DE HÉLICE   | 21°   |
| DIÁMETRO PRIMITIVO | 61,72 |



UNIVERSITAT  
POLITÀCNICA  
DE VALÈNCIA

DIBUJADO POR: ENRIQUE MORO VALDEZATE

REVISADO POR: PATRICIA LIMIANANA GREGORI  
SERGI MONTAVA JORDÀ

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO Y CÁLCULO DE UN REDUCTOR DE VELOCIDAD  
CON RELACIÓN DE TRANSMISIÓN 7.1 Y PAR MÁXIMA A  
LA SALIDA DE 4500 Nm

ESCALA:

1:2

FORMATO A4

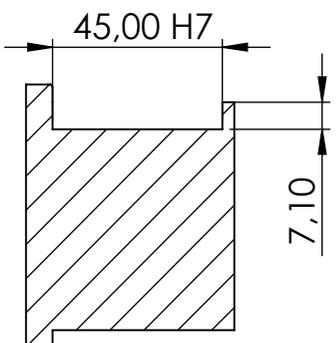
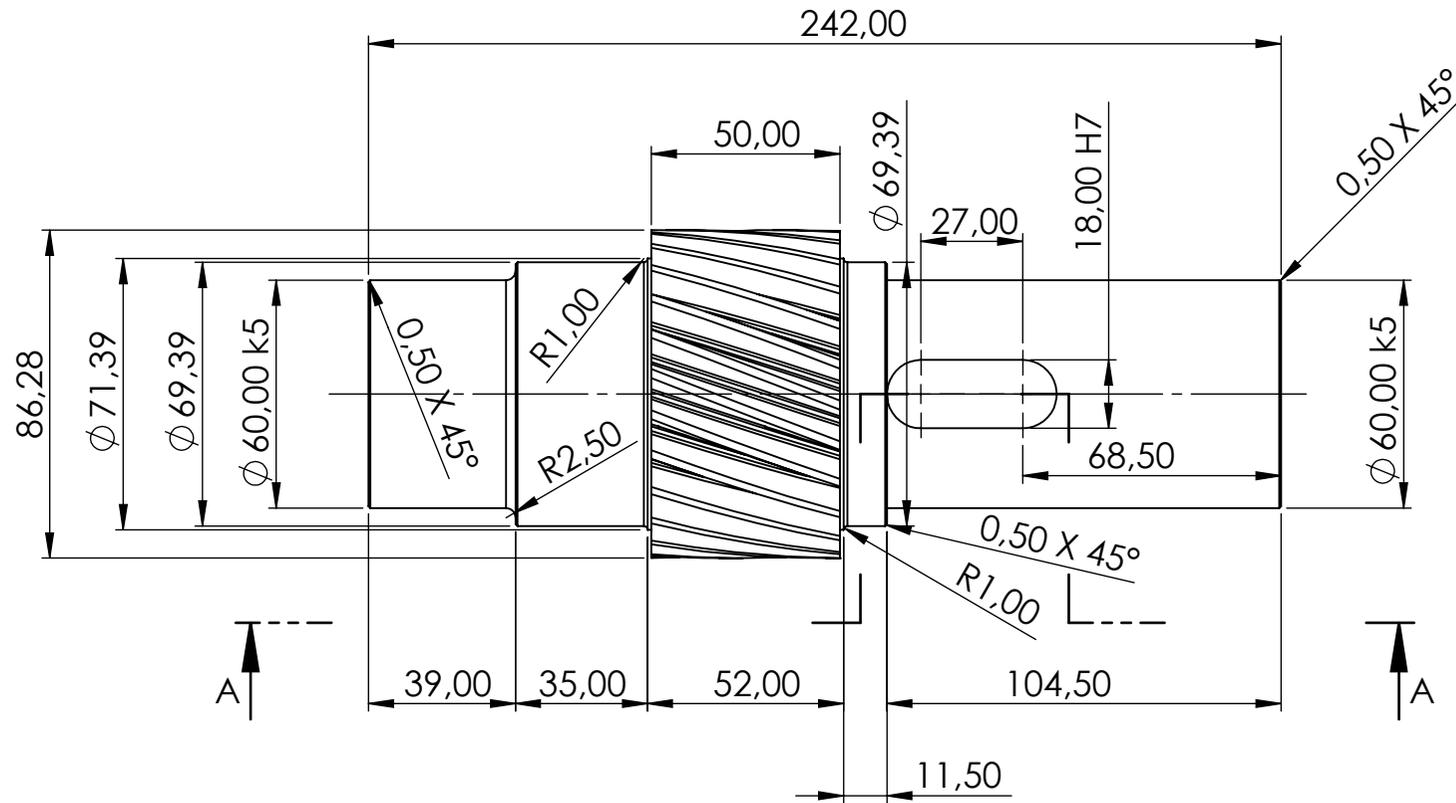
PLANO:

ÁRBOL DE ENTRADA

Nº DE PLANO:

VI.01.06

FECHA: 7/11/2018

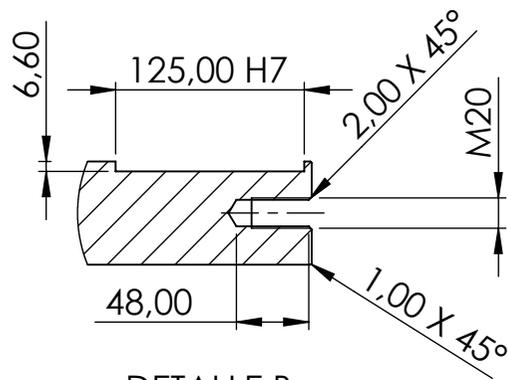
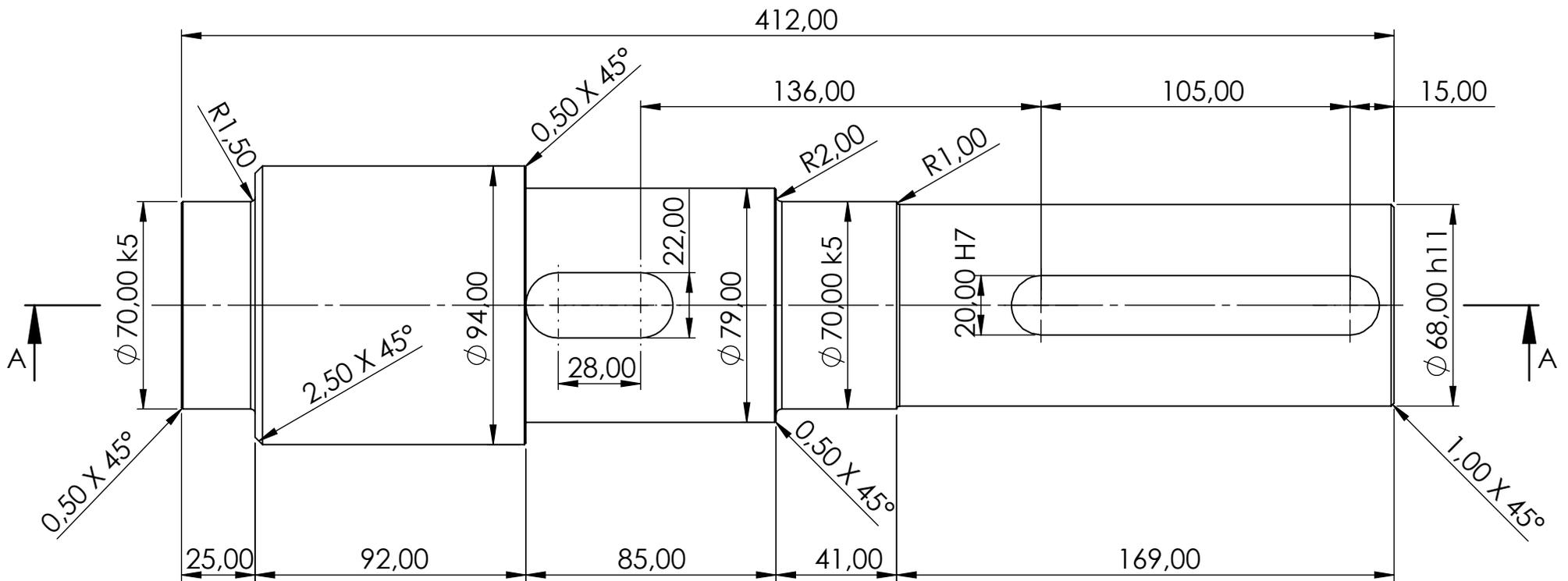


SECCIÓN A-A  
ESCALA 1 : 2

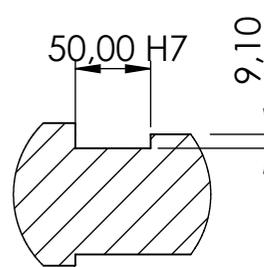
MATERIAL: 34CrMo4  
 TRATAMIENTO TÉRMICO: CEMENTADO  
 TOLERANCIAS GENERALES: Js11  
 PESO: 6,662kg

|                    |       |
|--------------------|-------|
| MÓDULO NORMAL      | 3     |
| NÚMERO DE DIENTES  | 25    |
| ÁNGULO DE PRESIÓN  | 20°   |
| ÁNGULO DE HÉLICE   | 21°   |
| DIÁMETRO PRIMITIVO | 79,01 |

|  |   |   |
|--|---|---|
|  <b>UNIVERSITAT<br/>POLITÈCNICA<br/>DE VALÈNCIA</b> | DIBUJADO POR:<br><b>ENRIQUE MORO VALDEZATE</b>                            | <b>TRABAJO FIN DE GRADO</b><br>DISEÑO Y CÁLCULO DE UN REDUCTOR DE VELOCIDAD<br>CON RELACIÓN DE TRANSMISIÓN 7.1 Y PAR MÁXIMA A<br>LA SALIDA DE 4500 Nm |
|  | REVISADO POR:<br><b>PATRICIA LIMIÑANA GREGORI<br/>SERGI MONTAVA JORDÀ</b> |   |
| ESCALA:<br><b>1:2</b><br>FORMATO A4  | PLANO:<br><b>ÁRBOL INTERMEDIO</b>   | Nº DE PLANO:<br><b>VI.01.07</b><br>FECHA: 7/11/2018   |



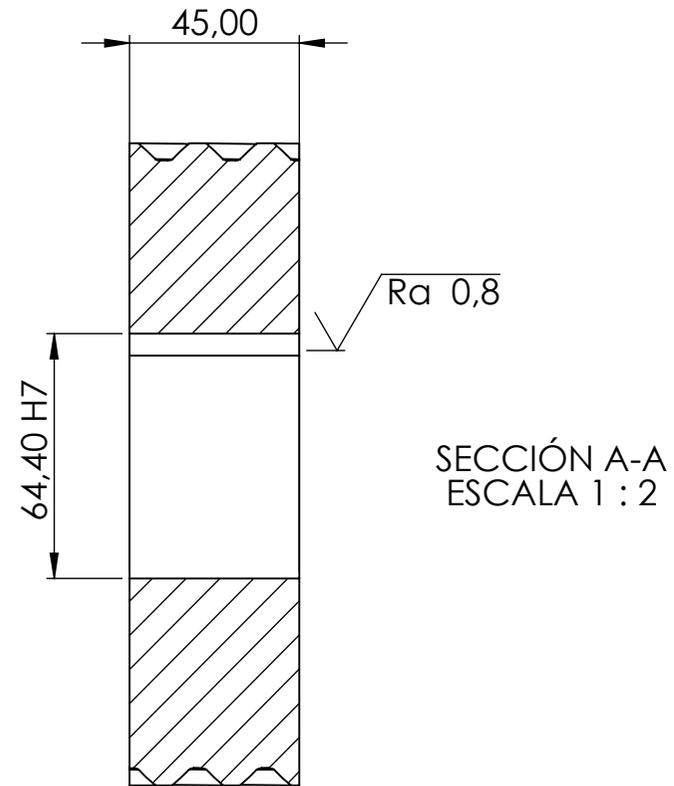
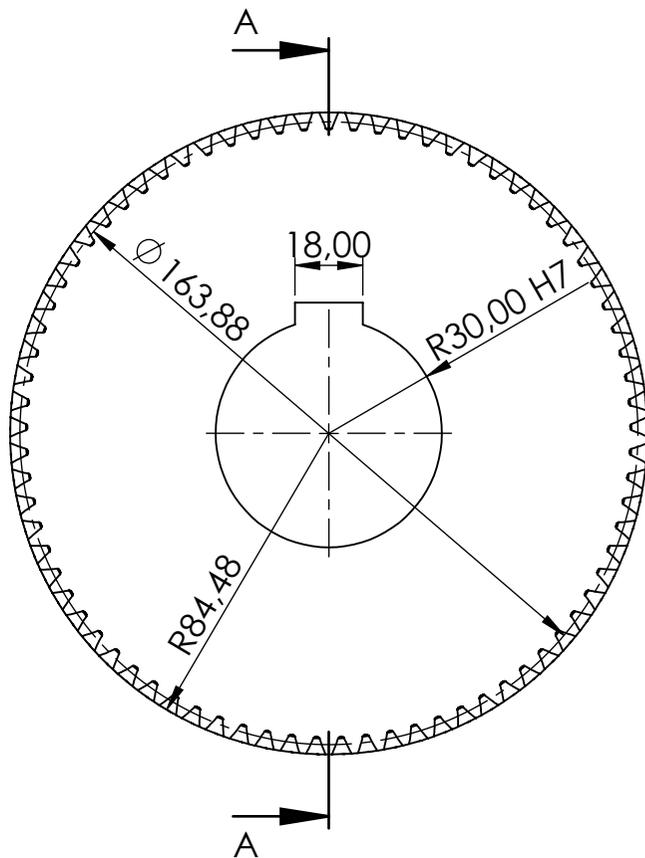
DETALLE B  
ESCALA 1:5



DETALLE C  
ESCALA 1:5

MATERIAL: Ck 45  
 TRATAMIENTO TÉRMICO: BONIFICADO  
 TOLERANCIAS GENERALES: Js11  
 PESO: 14,937kg

|  |  |   |
|--|--|---|
| <br>UNIVERSITAT<br>POLITÈCNICA<br>DE VALÈNCIA | DIBUJADO POR:<br><b>ENRIQUE MORO VALDEZATE</b>                                     | <b>TRABAJO FIN DE GRADO</b><br>DISEÑO Y CÁLCULO DE UN REDUCTOR DE VELOCIDAD<br>CON RELACIÓN DE TRANSMISIÓN 7.1 Y PAR MÁXIMA A<br>LA SALIDA DE 4500 Nm |
|  | REVISADO POR:<br><b>PATRICIA LIMINANA GREGORI<br/>         SERGI MONTAVA JORDÀ</b> |   |
| ESCALA:<br><b>1:2</b><br>FORMATO A4  | PLANO:<br><b>ÁRBOL DE SALIDA</b>   | Nº DE PLANO:<br><b>VI.01.08</b><br>FECHA: 7/11/2018   |



MATERIAL: 20MnCr5  
 TRATAMIENTO TÉRMICO: CEMENTADO  
 TOLERANCIAS GENERALES: Js11  
 PESO: 8,032kg

|                    |        |
|--------------------|--------|
| MÓDULO NORMAL      | 2      |
| NÚMERO DE DIENTES  | 77     |
| ÁNGULO DE PRESIÓN  | 20°    |
| ÁNGULO DE HÉLICE   | 21°    |
| DIÁMETRO PRIMITIVO | 163,88 |



UNIVERSITAT  
 POLITÈCNICA  
 DE VALÈNCIA

DIBUJADO POR: ENRIQUE MORO VALDEZATE

REVISADO POR: PATRICIA LIMIÑANA GREGORI  
 SERGI MONTAVA JORDÀ

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO Y CÁLCULO DE UN REDUCTOR DE VELOCIDAD  
 CON RELACIÓN DE TRANSMISIÓN 7.1 Y PAR MÁXIMA A  
 LA SALIDA DE 4500 Nm

ESCALA:

**1:2**

FORMATO A4

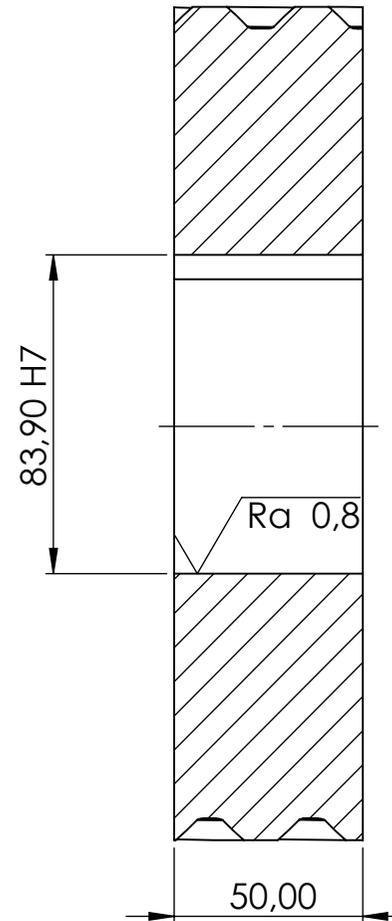
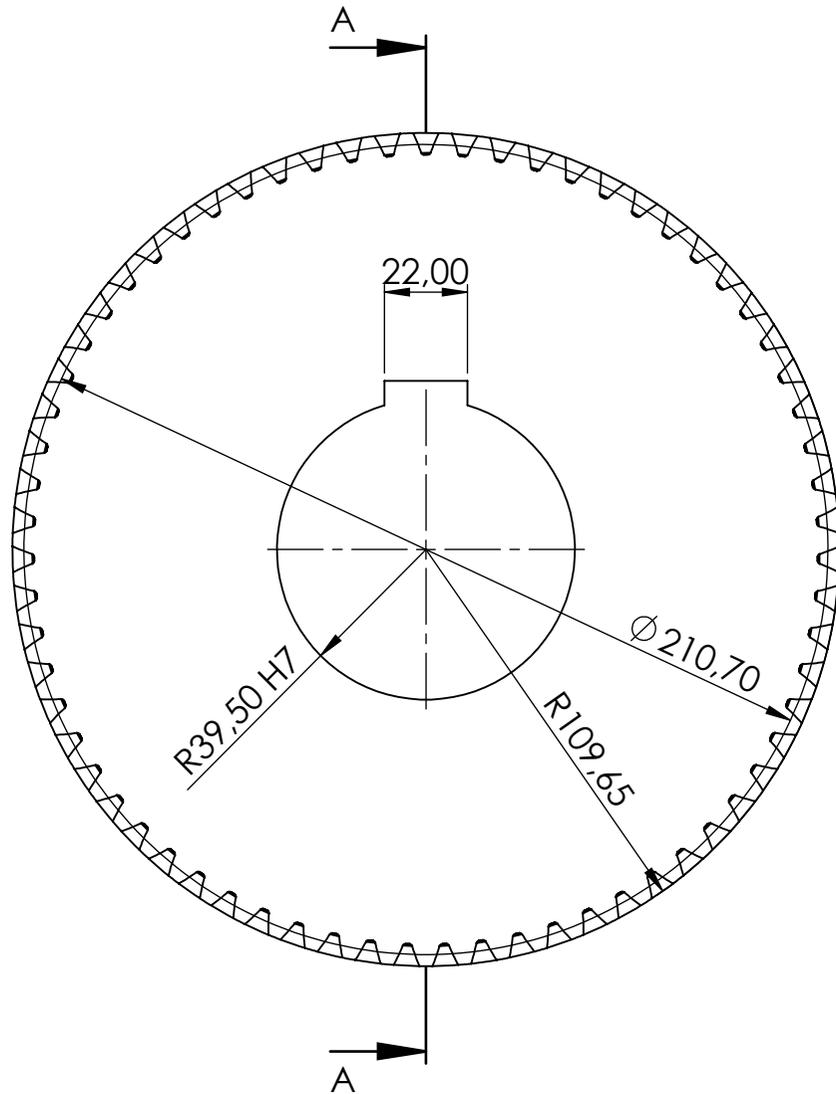
PLANO:

**ENGRANAJE 2**

Nº DE PLANO:

**VI.01.09**

FECHA: 7/11/2018



SECCIÓN A-A  
ESCALA 1 : 2

|                    |       |
|--------------------|-------|
| MÓDULO NORMAL      | 3     |
| NÚMERO DE DIENTES  | 67    |
| ÁNGULO DE PRESIÓN  | 20°   |
| ÁNGULO DE HÉLICE   | 21°   |
| DIÁMETRO PRIMITIVO | 210,7 |

MATERIAL: 20MnCr5  
 TRATAMIENTO TÉRMICO: CEMENTADO  
 TOLERANCIAS GENERALES: Js11  
 PESO: 14,508kg



UNIVERSITAT  
 POLITÈCNICA  
 DE VALÈNCIA

DIBUJADO POR: ENRIQUE MORO VALDEZATE

REVISADO POR: PATRICIA LIMIÑANA GREGORI  
 SERGI MONTAVA JORDÀ

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO Y CÁLCULO DE UN REDUCTOR DE VELOCIDAD  
 CON RELACIÓN DE TRANSMISIÓN 7.1 Y PAR MÁXIMA A  
 LA SALIDA DE 4500 Nm

ESCALA:

**1:2**

FORMATO A4

PLANO:

**ENGRANAJE 4**

Nº DE PLANO:

**VI.01.10**

FECHA: 7/11/2018

## VII. ANEXOS





| Quality                | 20MnCr5        |  | Case-hardening Steel |  |  |  |  |  |  |
|------------------------|----------------|--|----------------------|--|--|--|--|--|--|
| According to standards | EN 10084: 2008 |  |                      |  |  |  |  |  |  |
| Number                 | 1.7147         |  |                      |  |  |  |  |  |  |



TECHNICAL CARD  
GRUPPO LUCEFIN  
REVISION 2014  
ALL RIGHTS RESERVED  
Lucefin Steel

| Chemical composition   |                |                     |                  |                  |                     |                                |
|--|----------------|---------------------|------------------|------------------|---------------------|--------------------------------|
| C%   | Si%<br>max     | Mn%                 | P%<br>max        | S%<br>max        | Cr%                 |                                |
| 0,17-0,22<br>± 0.02  | 0,40<br>+ 0.03 | 1,10-1,40<br>± 0.05 | 0,025<br>+ 0.005 | 0,035<br>+ 0.005 | 1,00-1,30<br>± 0.05 | Product deviations are allowed |
| 20MnCr5 N° 1.7149 S% 0.020-0.040 permissible deviation on the product ± 0.005%<br>On request, this steel grade may be supplied with addition of lead (Pb) 0.15-0.35% |                |                     |                  |                  |                     |                                |

| Temperature °C   |  |   |                             |   |                                     |   |
|--|--|---|-----------------------------|---|-------------------------------------|---|
| Hot-forming  | Normalizing<br>+N                          | Core hardening  | Carbonitriding              | Carburizing   | Hardening<br>carburizing surf.      | Str-reliev.<br>+SR                                |
| 1150-850   | 860-880<br>air<br>(HB 140-201)             | 860-890<br>oil-polymer<br>salt bath   | 750-930<br>gas              | 880-980   | 810-840<br>oil-polymer<br>salt bath | 150<br>200  |
| Soft<br>annealing +A   | Isothermal<br>annealing +I                 | Spheroidizing<br>+AC  | End quench<br>Hardenability | Pre-heating welding   |                                     | Stress-relieving<br>after welding                 |
| 650-700<br>furnace cooling   | 860 furnace<br>cooling to<br>650, then air | 720-740 furnace<br>cooling to 670,<br>pause,<br>cooling to 300,<br>then air | 870<br>water                | welding must be carried out on the annealed state<br>and before carburizing |                                     | 600 furnace cooling                               |
|  |  |   |                             | 150-350<br>Ac1  | 830<br>Ac3                          | Ms + core<br>** carburizing surface<br>390* 200** |
| (HB max 217)   | (HB 170-217)                               | (HB 152-201)  |                             | As-rolled +AR   |                                     | Stress-relieving +SR<br>600-620                   |
| Transformation annealing +FP<br>950-1000 quick cooling to 620-650, stop according to<br>the thickness of the material, then air (HB 152-201) |  |   |                             | (HB max 230)  |                                     |   |

| Mechanical properties   |  |                        |      |        |         |                      |
|---|--|------------------------|------|--------|---------|----------------------|
| Hot-rolled values obtained on test blanks after core hardening + stress-relieving UNI 7846: 1978. Use only as reference |  |                        |      |        |         |                      |
| size<br>mm  | Testing at room temperature (longitudinal) |                        |      |        |         |                      |
| test blanks   | R  | Rp 0.2                 | A%   | Kcu    | HB      |                      |
|   | N/mm <sup>2</sup>                          | N/mm <sup>2</sup> min. | min. | J min. |         |                      |
| 11  | 1230-1570                                  | 930                    | 7    | 17.5   | 363-438 |                      |
| 30  | 930-1230                                   | 690                    | 8    | 20     | 278-363 | for information only |
| 63  | 780-1080                                   | 540                    | 9    | 25     | 232-327 | for information only |

| Table of tempering values obtained at room temperature on rounds of Ø 10 mm after quenching at 870 °C in oil |                   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| HB   | 426               | 426  | 421  | 415  | 409  | 395  | 381  | 362  | 336  | 294  | 261  | 240  | 224  |      |      |
| HRC  | 45.5              | 45.5 | 45   | 45   | 44.5 | 44   | 42.5 | 41   | 39   | 36   | 31   | 26.5 | 22.5 |      |      |
| R  | N/mm <sup>2</sup> | 1500 | 1500 | 1490 | 1480 | 1460 | 1430 | 1370 | 1300 | 1210 | 1100 | 980  | 875  | 795  | 740  |
| Rp 0.2   | N/mm <sup>2</sup> | 1060 | 1140 | 1190 | 1230 | 1240 | 1240 | 1220 | 1180 | 1090 | 960  | 850  | 750  | 670  | 600  |
| A  | %                 | 11.5 | 11.9 | 12.0 | 12.0 | 11.9 | 11.8 | 11.9 | 12.2 | 12.8 | 14.0 | 16.0 | 18.8 | 21.8 | 23.2 |
| C  | %                 | 48   | 49   | 50   | 52   | 53   | 55   | 56   | 58   | 60   | 62   | 64   | 67   | 70   | 72   |
| Kv   | J                 | 38   | 40   | 40   | 40   | 38   | 38   | 32   | 34   | 75   | 75   | 100  | 128  | 145  | 155  |
| HRC carburizing  |                   | 64.5 | 64   | 63   | 60.5 | 59   | 57   |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Tempering at °C  |                   | 50   | 100  | 150  | 200  | 250  | 300  | 350  | 400  | 450  | 500  | 550  | 600  | 650  | 700  |

ANEXO 1

**CK 45 (2 C45)**

Equivalences DIN: CK 45 W.N.: 1.1191 AISI: 1045

**Chemical composition**

| %C   | %Si   | %Mn  | %Ni   | %Cr   | %Mo   | %S   | %P     |
|------|-------|------|-------|-------|-------|------|--------|
| 0.42 | -     | 0.50 | -     | -     | -     | 0.02 | -      |
| 0.50 | ≤0.40 | 0.80 | ≤0.40 | ≤0.40 | ≤0.10 | 0.04 | ≤0.035 |

|                              |                         |
|------------------------------|-------------------------|
| <b>Delivery State</b>        | Without heat treatment. |
| <b>Delivery Hardness</b>     | 207 HB max.             |
| <b>Identification Colors</b> | Blue – Yellow – Green   |
| <b>Format</b>                | Round bars and plates   |

**Properties**

Better than steel domestic production due to better quality control. Usable steel: treated, annealed or hardened superficially.

**Applications**

Start-up ring gear, sprockets, light load drive shafts, transmission axles, bolts, nuts, hooks, pins, fastener pins, dowel pins, wedges, keys, washers, diet set, bolts.

**Welding**

Weldable under procedure.

Any queries contact the Technical Department of SOLDEX S.A.

**Mechanical Properties**

|                            |         |
|----------------------------|---------|
| Tensile Strength, Rm       | 640 Mpa |
| Yield Point, Rp 0,2        | 340 Mpa |
| Area reduction, Z          | 40%     |
| Elongation, A <sub>5</sub> | 20%     |

**Heat treatment**

| Hardening temperature (°C) | Cooling media | Annealing temperature (°C) |
|----------------------------|---------------|----------------------------|
| 820 - 860                  | Water, Oil    | 650 - 700                  |

**Physical Properties**

| Temperature                              | 20°C | 200°C | 400°C |
|--|------|-------|-------|
| Density kg/m <sup>3</sup>                | 7870 | 7820  | 4450  |
| Thermal expansion (10 <sup>-6</sup> /°C) | -    | 12    | 13,5  |
| Modulus of Elasticity Gpa                | 195  | 193   | 177   |
| Thermal Conductivity W/m <sup>2</sup> °C | -    | 40    | 41    |

## ANEXO 1

## ANEXO 2: FUNDICIÓN NODULAR

|           | Fundición gris | Fundición Nodular |
|-----------|----------------|-------------------|
| <b>C</b>  | 2,80 a 3,80%   | 3,40 a 3,80%      |
| <b>Si</b> | 1,40 a 3,00%   | 2,30 a 2,80%      |
| <b>Mn</b> | 0,40 a 0,90%   | 0,06 a 0,45%      |
| <b>P</b>  | 0,09 a 0,40%   | < 0,10%           |
| <b>S</b>  | 0,04 a 0,10%   | < 0,03%           |

|  | Fundición gris | Fundición Nodular |
|--|----------------|-------------------|
| Resistencia a la tracción kg/mm <sup>2</sup>   | 25-30          | 50-65             |
| Resistencia a la compresión kg/mm <sup>2</sup> | 100-130        | 100-130           |
| Resistencia al cizallamiento                   | 0,9 RT         | 1,1-1,2 RT        |
| Resistencia a la flexión kg/mm <sup>2</sup>    | 30-50          | 80-90             |
| Resistencia probeta entallada                  | débil          | 3.-10             |
| Resistencia eléctrica MΩ/cm <sup>2</sup>       | 60-90          | 50-60             |
| Modulo elasticidad                             | 12000          | 18000             |
| Limite elasticidad kg/mm <sup>2</sup>          | -              | 32-42             |
| Alargamiento a la rotura                       | inf a 1 %      | 7-18 %            |

|  | Fundición gris         | Fundición Nodular |
|--|------------------------|-------------------|
| Limite de fatiga a la torsión kg/mm <sup>2</sup> | 12 – 17                | 20-36             |
| Peso específico kg/dm <sup>3</sup>               | 7,2                    | 7,2               |
| Dureza HB  | 160-220                | 170-220           |
| Conduct. térmica cal/cm/seg °C                   | 0,11                   | 0,09              |
| Coefficiente de dilatación 10-6°C                | 13                     | 12                |
| Fuerza coercitiva (OE)                           | 5.- 10                 | 5.-7              |
| Coefficiente de Rozamiento                       |                        |                   |
| - 32kg/cm <sup>2</sup> (fundición acero)         | 0,1                    | 0,12              |
| - 60kg/cm <sup>2</sup> (fundición acero)         | 0,14                   | 0,16              |
| Temperatura temple °C aceite                     | 850-900                | 850-900           |
| Temperatura revenido                             | como fundición clásica |                   |

### ANEXO 2

# ANEXO 3: RODAMIENTOS SKF

**T2ED 045**  
Popular item  
SKF Explorer

---

Dimension series 2ED

**Dimensions**

|                  |          |    |
|------------------|----------|----|
| d                | 45       | mm |
| D                | 95       | mm |
| T                | 36       | mm |
| d <sub>1</sub>   | ≈ 68.7   | mm |
| B                | 35       | mm |
| C                | 30       | mm |
| r <sub>1,2</sub> | min. 2.5 | mm |
| r <sub>3,4</sub> | min. 2.5 | mm |
| a                | 23.434   | mm |

---

**Abutment dimensions**

|                |          |    |
|----------------|----------|----|
| d <sub>a</sub> | max. 55  | mm |
| d <sub>b</sub> | min. 56  | mm |
| D <sub>a</sub> | min. 80  | mm |
| D <sub>a</sub> | max. 85  | mm |
| D <sub>b</sub> | min. 89  | mm |
| C <sub>a</sub> | min. 6   | mm |
| C <sub>b</sub> | min. 6   | mm |
| r <sub>a</sub> | max. 2.5 | mm |
| r <sub>b</sub> | max. 2.5 | mm |

---

**Calculation data**

|                           |                |      |       |
|---------------------------|----------------|------|-------|
| Basic dynamic load rating | C              | 182  | kN    |
| Basic static load rating  | C <sub>0</sub> | 186  | kN    |
| Fatigue load limit        | P <sub>u</sub> | 20.8 | kN    |
| Reference speed           |                | 6000 | r/min |
| Limiting speed            |                | 7000 | r/min |
| Calculation factor        | e              | 0.33 |       |

---

|                    |                |     |  |
|--------------------|----------------|-----|--|
| Calculation factor | Y              | 1.8 |  |
| Calculation factor | Y <sub>0</sub> | 1   |  |

---

**Mass**

|              |      |    |
|--------------|------|----|
| Mass bearing | 1.22 | kg |
|--------------|------|----|

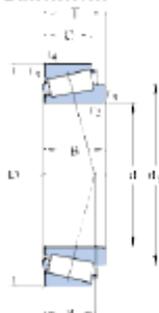
**SKF**

**32309**  
Popular item  
SKF Explorer

Dimension series 2FD

---

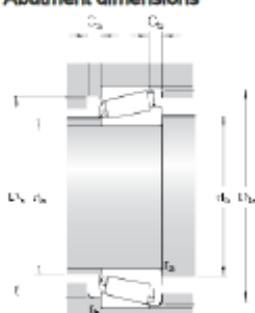
**Dimensions**



|                  |          |    |
|------------------|----------|----|
| d                | 45       | mm |
| D                | 100      | mm |
| T                | 38.25    | mm |
| d <sub>1</sub>   | ≈ 71.1   | mm |
| B                | 36       | mm |
| C                | 30       | mm |
| r <sub>1,2</sub> | min. 2   | mm |
| r <sub>3,4</sub> | min. 1.5 | mm |
| a                | 24.712   | mm |

---

**Abutment dimensions**



|                |          |    |
|----------------|----------|----|
| d <sub>a</sub> | max. 57  | mm |
| d <sub>b</sub> | min. 55  | mm |
| D <sub>a</sub> | min. 82  | mm |
| D <sub>a</sub> | max. 92  | mm |
| D <sub>b</sub> | min. 93  | mm |
| C <sub>a</sub> | min. 4   | mm |
| C <sub>b</sub> | min. 8   | mm |
| r <sub>a</sub> | max. 2   | mm |
| r <sub>b</sub> | max. 1.5 | mm |

---

**Calculation data**

|                           |                |      |       |
|---------------------------|----------------|------|-------|
| Basic dynamic load rating | C              | 173  | kN    |
| Basic static load rating  | C <sub>0</sub> | 170  | kN    |
| Fatigue load limit        | P <sub>u</sub> | 20.4 | kN    |
| Reference speed           |                | 5300 | r/min |
| Limiting speed            |                | 7000 | r/min |
| Calculation factor        | e              | 0.35 |       |

---

|                    |                |     |  |
|--------------------|----------------|-----|--|
| Calculation factor | Y              | 1.7 |  |
| Calculation factor | Y <sub>0</sub> | 0.9 |  |

---

**Mass**

|              |      |    |
|--------------|------|----|
| Mass bearing | 1.39 | kg |
|--------------|------|----|

ANEXO 3

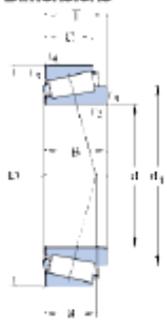
**SKF**

**T2EE 060**  
 Popular item  
 SKF Explorer

---

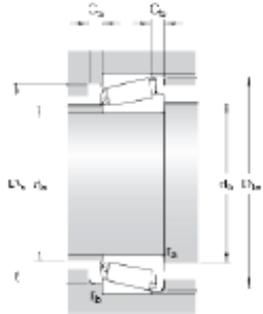
Dimension series 2EE

**Dimensions**



|                  |          |    |
|------------------|----------|----|
| d                | 60       | mm |
| D                | 115      | mm |
| T                | 40       | mm |
| d <sub>1</sub>   | ≈ 85.6   | mm |
| B                | 39       | mm |
| C                | 33       | mm |
| r <sub>1,2</sub> | min. 2.5 | mm |
| r <sub>3,4</sub> | min. 2.5 | mm |
| a                | 27.638   | mm |

**Abutment dimensions**



|                |            |    |
|----------------|------------|----|
| d <sub>a</sub> | max. 70    | mm |
| d <sub>b</sub> | min. 71.5  | mm |
| D <sub>a</sub> | min. 98    | mm |
| D <sub>a</sub> | max. 104.5 | mm |
| D <sub>b</sub> | min. 109   | mm |
| C <sub>a</sub> | min. 6     | mm |
| C <sub>b</sub> | min. 7     | mm |
| r <sub>a</sub> | max. 2.5   | mm |
| r <sub>b</sub> | max. 2.5   | mm |

**Calculation data**

|                           |                |      |       |
|---------------------------|----------------|------|-------|
| Basic dynamic load rating | C              | 239  | kN    |
| Basic static load rating  | C <sub>0</sub> | 260  | kN    |
| Fatigue load limit        | P <sub>u</sub> | 30   | kN    |
| Reference speed           |                | 4800 | r/min |
| Limiting speed            |                | 5600 | r/min |
| Calculation factor        | e              | 0.33 |       |

---

|                    |                |     |  |
|--------------------|----------------|-----|--|
| Calculation factor | Y              | 1.8 |  |
| Calculation factor | Y <sub>0</sub> | 1   |  |

**Mass**

|              |      |    |
|--------------|------|----|
| Mass bearing | 1.85 | kg |
|--------------|------|----|

ANEXO 3

**33212**  
Popular item  
SKF Explorer

---

Dimension series

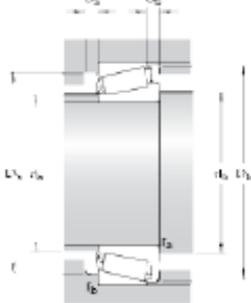
3EE

**Dimensions**



|                  |          |    |
|------------------|----------|----|
| d                | 60       | mm |
| D                | 110      | mm |
| T                | 38       | mm |
| d <sub>1</sub>   | ≈ 85.3   | mm |
| B                | 38       | mm |
| C                | 29       | mm |
| r <sub>1,2</sub> | min. 2   | mm |
| r <sub>3,4</sub> | min. 1.5 | mm |
| a                | 27.314   | mm |

**Abutment dimensions**



|                |           |    |
|----------------|-----------|----|
| d <sub>a</sub> | max. 69   | mm |
| d <sub>b</sub> | min. 70.5 | mm |
| D <sub>a</sub> | min. 93   | mm |
| D <sub>a</sub> | max. 102  | mm |
| D <sub>b</sub> | min. 105  | mm |
| C <sub>a</sub> | min. 6    | mm |
| C <sub>b</sub> | min. 9    | mm |
| r <sub>a</sub> | max. 2    | mm |
| r <sub>b</sub> | max. 1.5  | mm |

**Calculation data**

|                           |                |      |       |
|---------------------------|----------------|------|-------|
| Basic dynamic load rating | C              | 207  | kN    |
| Basic static load rating  | C <sub>0</sub> | 236  | kN    |
| Fatigue load limit        | P <sub>u</sub> | 26.5 | kN    |
| Reference speed           |                | 4500 | r/min |
| Limiting speed            |                | 6000 | r/min |
| Calculation factor        | e              | 0.4  |       |
| Calculation factor        | Y              | 1.5  |       |
| Calculation factor        | Y <sub>0</sub> | 0.8  |       |

**Mass**

|              |      |    |
|--------------|------|----|
| Mass bearing | 1.55 | kg |
|--------------|------|----|

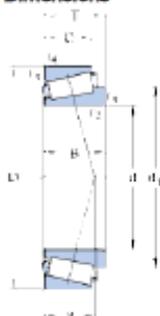


**33214**

Popular item  
SKF Explorer

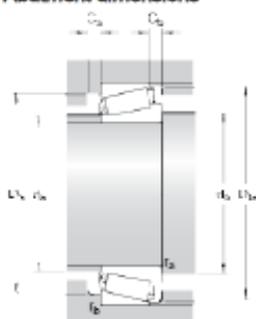
|                  |     |  |  |
|------------------|-----|--|--|
| Dimension series | 3EE |  |  |
|------------------|-----|--|--|

**Dimensions**



|                  |          |    |
|------------------|----------|----|
| d                | 70       | mm |
| D                | 125      | mm |
| T                | 41       | mm |
| d <sub>1</sub>   | ≈ 97.4   | mm |
| B                | 41       | mm |
| C                | 32       | mm |
| r <sub>1,2</sub> | min. 2   | mm |
| r <sub>3,4</sub> | min. 1.5 | mm |
| a                | 30.421   | mm |

**Abutment dimensions**



|                  |            |    |
|------------------|------------|----|
| d <sub>a</sub>   | max. 80    | mm |
| d <sub>b</sub>   | min. 80.5  | mm |
| D <sub>a</sub>   | min. 107   | mm |
| D <sub>a</sub> ' | max. 116.5 | mm |
| D <sub>b</sub>   | min. 120   | mm |
| C <sub>a</sub>   | min. 6     | mm |
| C <sub>b</sub>   | min. 9     | mm |
| r <sub>a</sub>   | max. 2     | mm |
| r <sub>b</sub>   | max. 1.5   | mm |

**Calculation data**

|                           |                |      |       |
|---------------------------|----------------|------|-------|
| Basic dynamic load rating | C              | 247  | kN    |
| Basic static load rating  | C <sub>0</sub> | 285  | kN    |
| Fatigue load limit        | P <sub>u</sub> | 32.5 | kN    |
| Reference speed           |                | 3800 | r/min |
| Limiting speed            |                | 5000 | r/min |
| Calculation factor        | e              | 0.4  |       |
| Calculation factor        | Y              | 1.5  |       |
| Calculation factor        | Y <sub>0</sub> | 0.8  |       |

**Mass**

|              |      |    |
|--------------|------|----|
| Mass bearing | 2.09 | kg |
|--------------|------|----|

ANEXO 3



**32014 X**  
 Popular item  
 SKF Explorer

Dimension series

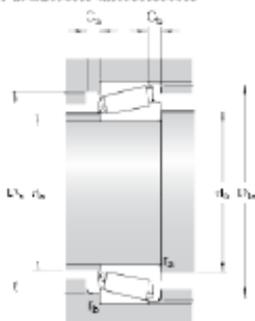
4CC

**Dimensions**



|                  |          |    |
|------------------|----------|----|
| d                | 70       | mm |
| D                | 110      | mm |
| T                | 25       | mm |
| d <sub>1</sub>   | ≈ 89.95  | mm |
| B                | 25       | mm |
| C                | 19       | mm |
| r <sub>1,2</sub> | min. 1.5 | mm |
| r <sub>3,4</sub> | min. 1.5 | mm |
| a                | 23.42    | mm |

**Abutment dimensions**



|                |            |    |
|----------------|------------|----|
| d <sub>a</sub> | max. 78    | mm |
| d <sub>b</sub> | min. 79.5  | mm |
| D <sub>a</sub> | min. 98    | mm |
| D <sub>a</sub> | max. 101.5 | mm |
| D <sub>b</sub> | min. 105   | mm |
| C <sub>a</sub> | min. 5     | mm |
| C <sub>b</sub> | min. 6     | mm |
| r <sub>a</sub> | max. 1.5   | mm |
| r <sub>b</sub> | max. 1.5   | mm |

**Calculation data**

|                           |                |      |       |
|---------------------------|----------------|------|-------|
| Basic dynamic load rating | C              | 125  | kN    |
| Basic static load rating  | C <sub>0</sub> | 153  | kN    |
| Fatigue load limit        | P <sub>u</sub> | 17.3 | kN    |
| Reference speed           |                | 4500 | r/min |
| Limiting speed            |                | 5600 | r/min |
| Calculation factor        | e              | 0.43 |       |
| Calculation factor        | Y              | 1.4  |       |
| Calculation factor        | Y <sub>0</sub> | 0.8  |       |

**Mass**

|              |      |    |
|--------------|------|----|
| Mass bearing | 0.85 | kg |
|--------------|------|----|

# ANEXO 4: LUBRICANTE ISO VG 460



**Bardahl® Maxlub MR EP ISO VG 460 ( 6A )**  
Lubricante para Engranajes Industriales

**DESCRIPCIÓN.**

Bardahl® Maxlub MR EP ISO VG 460 ( 6A ) son aceites lubricantes elaborados con aceites básicos vírgenes de tipo parafínico y aditivos a base de fósforo y azufre para proporcionar propiedades de extrema presión que pueden ser utilizados en la lubricación de sistemas con engranes industriales rectos, cónicos, helicoidales y de tipo sinfin corona, que soportan altas cargas y/o cargas de choque así como altas temperaturas. Aceite para engranes industriales, para trabajar en condiciones críticas de operación, con propiedades de extrema presión, separación de agua, antifricción, antiherrumbre, antioxidante y antiespumante. Los aceites terminados deben cumplir con los requerimientos de la especificación AGMA 9005-D94 (250.04).

**PROPIEDADES Y BENEFICIOS.**

- Excelentes propiedades de Extrema Presión proporcionando una mayor vida de los engranes gracias su gran capacidad para soportar cargas.
- Alta protección contra el desgaste, el rayado y la escoriación de los engranes.
- Buena resistencia a la formación de espuma asegurando una efectiva lubricación y una operación libre de problemas.
- Buena estabilidad térmica y a la oxidación reduciendo costos por cambios frecuentes de lubricante.
- Buena protección contra la herrumbre y la corrosión brindando una excelente protección a todos los componentes del equipo.
- No afecta a los metales de cojinetes y engranes.
- Excelente protección contra la formación de lodos, y otros depósitos dañinos.

**APLICACIÓN.**

- Cajas de Engranajes.
- Moto reductores.
- Reductores.
- Variadores de Velocidad.
- Recomendado en aquellos mecanismos, donde el fabricante requiera un lubricante con propiedades de Extrema Presión (EP).
- Su aplicación puede ser mediante sistemas de baño de aceite, salpique, circulación forzada y niebla.

**ESPECIFICACIONES Y/O APROBACIONES.**

- AGMA 250.04
- U.S. Steel 224
- David Brown S1.53.101 (E)
- DIN 51517 Parte 3

**SALUD Y SEGURIDAD.**

Bardahl® Maxlub MR EP ISO VG 460 ( 6A ) no produce efectos nocivos cuando se utiliza en las aplicaciones recomendadas, y se respetan unas adecuadas prácticas de seguridad e higiene en el trabajo. No contamine, no tire el aceite usado al alcantarillado. Para mayores detalles consulte la Hoja de Seguridad del Producto.

**PRESENTACIONES.**



**CARACTERÍSTICAS.**

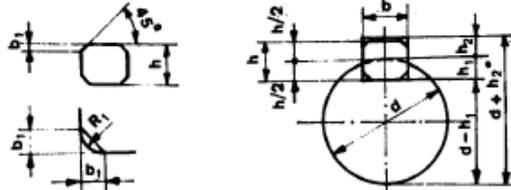
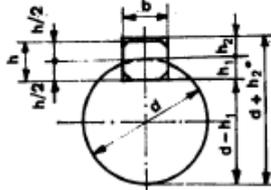
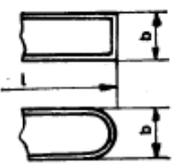
| CARACTERÍSTICAS   | MÉTODO ASTM | ESPECIFICACIONES |
|---|-------------|------------------|
| Grado   |             | 460              |
| Apariencia  | Visual      | Brillante        |
| Temperatura de escurrimiento, °C, Máx.                          | D 97-87     | -9               |
| Temperatura de inflamación, °C, Mín.                            | D 92-85     | 235              |
| Viscosidad a 40°C, mm <sup>2</sup> /s, (cSt)                    | D 445-88    | 437/483          |
| Viscosidad a 100°C, mm <sup>2</sup> /s, (cSt), Típ.             | D 445-88    | 29.2             |
| Índice de viscosidad, Mín.                                      | D 2270-86   | 90               |
| Extrema presión Timken ft, Mín.                                 | D 2782-82   | 60               |
| Corrosividad al cobre 3 h a 100°C, Máx.                         | D 130-88    | 1b               |
| Prevención a la herrumbre                                       |             |                  |
| Agua destilada  | D 665-83    | Pasa             |
| Demulsibilidad a 82°C tiempo para reducirla a 3 mL, (min), Máx. | D 1401-84   | 30               |
| Características de espumación                                   |             |                  |
| Tendencia-Estabilidad, mL, Máx.                                 |             |                  |
| Secuencia I   | D 892       | 75-10            |
| Secuencia II  | D 892       | 75-10            |
| Secuencia III   | D 892       | 75-10            |

Nota: Las propiedades físicas del producto son actuales a la fecha de publicación de esta ficha técnica.  
Estas propiedades son determinadas promediando los datos reales del lote suministrado por las plantas de fabricación sobre un periodo de tiempo. Estos datos físicos no pueden ser garantizados idénticos a los productos en cualquier momento específico.  
Los datos suministrados en esta publicación son presentados como guía para los usuarios de productos Bardahl. Consulte a su representante para la información más reciente.  
Fecha de emisión: 2/08/2011 - 4:10 p.m. Fecha de revisión: 3/08/2011 Nivel de revisión:01 INGC-MKT-F-004 Rev. 01 Licitudon

**Ficha Técnica**

**www.bardahl.com.mx**

# ANEXO 5: CHAVETAS PARALELAS

| Pasadores y chavetas         |                                       | CHAVETAS PARALELAS<br>SERIE NORMAL  |                                 |   |                              |   |                          | TABLA 18 . 13      |                           |      |                              |      |      |      |
|------------------------------|---------------------------------------|---|---------------------------------|---|------------------------------|---|--------------------------|--------------------|---------------------------|------|------------------------------|------|------|------|
| Dimensiones en mm.           |                                       |  |                                 |  |                              |  |                          | (De UNE 17.102 h1) |                           |      |                              |      |      |      |
|                              |                                       | CHAVETA   |                                 |   |                              |   |                          |                    |                           |      |                              |      |      |      |
| Sección<br><i>b x h</i>      | Ancho <i>b</i>                        |   | Altura <i>h</i>                 |   | Chaflán <i>b<sub>1</sub></i> |   | Longitud <i>l</i>        |                    |                           |      |                              |      |      |      |
|                              | Nominal                               | Toler. h9   | Nominal                         | Toler. h9 y h11   | Mínima                       | Máximo  | De...                    | ...a               |                           |      |                              |      |      |      |
| 4 x 4                        | 4                                     | 0   | 4                               | 0   | 0,16                         | 0,25  | 8                        | 45                 |                           |      |                              |      |      |      |
| 5 x 5                        | 5                                     | -0,030  | 5                               | -0,030  | 0,25                         | 0,40  | 10                       | 56                 |                           |      |                              |      |      |      |
| 6 x 6                        | 6                                     | -0,036  | 6                               | -0,036  | 0,25                         | 0,40  | 14                       | 70                 |                           |      |                              |      |      |      |
| 8 x 7                        | 8                                     | 0   | 7                               | 0   | 0,25                         | 0,40  | 18                       | 90                 |                           |      |                              |      |      |      |
| 10 x 8                       | 10                                    | -0,043  | 8                               | 0   | 0,40                         | 0,60  | 22                       | 110                |                           |      |                              |      |      |      |
| 12 x 8                       | 12                                    | 0   | 8                               | 0   | 0,40                         | 0,60  | 28                       | 140                |                           |      |                              |      |      |      |
| 14 x 9                       | 14                                    | 0   | 9                               | -0,090  | 0,40                         | 0,60  | 36                       | 160                |                           |      |                              |      |      |      |
| 16 x 10                      | 16                                    | -0,043  | 10                              | 0   | 0,40                         | 0,60  | 45                       | 180                |                           |      |                              |      |      |      |
| 18 x 11                      | 18                                    | 0   | 11                              | 0   | 0,40                         | 0,60  | 50                       | 200                |                           |      |                              |      |      |      |
| 20 x 12                      | 20                                    | 0   | 12                              | 0   | 0,40                         | 0,80  | 56                       | 220                |                           |      |                              |      |      |      |
| 22 x 14                      | 22                                    | 0   | 14                              | 0   | 0,60                         | 0,80  | 63                       | 250                |                           |      |                              |      |      |      |
| 25 x 14                      | 25                                    | -0,052  | 14                              | -0,110  | 0,60                         | 0,80  | 70                       | 280                |                           |      |                              |      |      |      |
| 28 x 16                      | 28                                    | 0   | 16                              | 0   | 0,60                         | 0,80  | 80                       | 320                |                           |      |                              |      |      |      |
| 32 x 18                      | 32                                    | 0   | 18                              | 0   | 0,60                         | 0,80  | 90                       | 360                |                           |      |                              |      |      |      |
| 36 x 20                      | 36                                    | 0   | 20                              | 0   | 0,60                         | 1,20  | 100                      | 400                |                           |      |                              |      |      |      |
| 40 x 22                      | 40                                    | -0,062  | 22                              | 0   | 1,00                         | 1,20  | -                        | -                  |                           |      |                              |      |      |      |
| 45 x 25                      | 45                                    | 0   | 25                              | 0,130   | 1,00                         | 1,20  | -                        | -                  |                           |      |                              |      |      |      |
| 50 x 28                      | 50                                    | 0   | 28                              | 0   | 1,00                         | 1,20  | -                        | -                  |                           |      |                              |      |      |      |
| 56 x 32                      | 56                                    | 0   | 32                              | 0   | 1,00                         | 2,00  | -                        | -                  |                           |      |                              |      |      |      |
| 63 x 32                      | 63                                    | 0   | 32                              | 0   | 1,60                         | 2,00  | -                        | -                  |                           |      |                              |      |      |      |
| 70 x 36                      | 70                                    | -0,074  | 36                              | 0   | 1,60                         | 2,00  | -                        | -                  |                           |      |                              |      |      |      |
| 80 x 40                      | 80                                    | 0   | 40                              | -0,160  | 2,50                         | 3,00  | -                        | -                  |                           |      |                              |      |      |      |
| 90 x 45                      | 90                                    | 0   | 45                              | 0   | 2,50                         | 3,00  | -                        | -                  |                           |      |                              |      |      |      |
| 100 x 50                     | 100                                   | -0,087  | 50                              | 0   | 2,50                         | 3,00  | -                        | -                  |                           |      |                              |      |      |      |
| CHAVETERO                    |                                       |   |                                 |   |                              |   |                          |                    |                           |      |                              |      |      |      |
| Diámetro del eje<br><i>d</i> | Sección de la chaveta<br><i>b x h</i> | Ancho <i>b</i> , tolerancia   |                                 |   |                              |   | Profundidad              |                    |                           |      | Chaflán <i>R<sub>1</sub></i> |      |      |      |
|                              |                                       | Nominal   | Clase de ajuste del enchavetado |   |                              |   | Eje <i>h<sub>1</sub></i> |                    | Cubo <i>h<sub>2</sub></i> |      | Mín.                         | Máx. |      |      |
|                              |                                       |   | Libre                           | Normal  | Ajustado                     | Nominal   | Toler.                   | Nominal            | Toler.                    |      |                              |      |      |      |
| Más de                       | hasta                                 | Eje h9  | Cubo D10                        | Eje N9  | Cubo Js 9                    | Eje y cubo p9   |                          |                    |                           |      |                              |      |      |      |
| 10                           | 12                                    | 4 x 4   | 4                               | +0,030  | +0,078                       | 0   | ±0,015                   | -0,012             | 2,5                       | +0,1 | 1,8                          | +0,1 | 0,08 | 0,16 |
| 12                           | 17                                    | 5 x 5   | 5                               | 0   | +0,030                       | -0,030  | ±0,015                   | -0,042             | 3                         | 0    | 2,3                          | 0    | 0,16 | 0,25 |
| 17                           | 22                                    | 6 x 6   | 6                               | 0   | 0                            | 0   | ±0,015                   | 0                  | 3,5                       | 0    | 2,8                          | 0    | 0,16 | 0,25 |
| 22                           | 30                                    | 8 x 7   | 8                               | +0,036  | +0,098                       | 0   | ±0,018                   | -0,015             | 4                         |      | 3,3                          |      | 0,16 | 0,25 |
| 30                           | 38                                    | 10 x 8  | 10                              | 0   | +0,040                       | -0,036  | ±0,018                   | -0,051             | 5                         |      | 3,3                          |      | 0,25 | 0,40 |
| 38                           | 44                                    | 12 x 8  | 12                              | 0   | 0                            | 0   | ±0,018                   | 0                  | 5                         |      | 3,3                          |      | 0,25 | 0,40 |
| 44                           | 50                                    | 14 x 9  | 14                              | +0,043  | +0,120                       | 0   | ±0,0215                  | -0,018             | 5,5                       |      | 3,8                          |      | 0,25 | 0,40 |
| 50                           | 58                                    | 16 x 10   | 16                              | 0   | +0,050                       | -0,043  | ±0,0215                  | -0,061             | 6                         |      | 4,3                          |      | 0,25 | 0,40 |
| 58                           | 65                                    | 18 x 11   | 18                              | 0   | 0                            | 0   | ±0,0215                  | 0                  | 7                         | +0,2 | 4,4                          | +0,2 | 0,25 | 0,40 |
| 65                           | 75                                    | 20 x 12   | 20                              | 0   | 0                            | 0   | ±0,0215                  | 0                  | 7,5                       | 0    | 4,9                          | 0    | 0,40 | 0,60 |
| 75                           | 85                                    | 22 x 14   | 22                              | +0,052  | +0,149                       | 0   | ±0,026                   | -0,022             | 9                         |      | 5,4                          |      | 0,40 | 0,60 |
| 85                           | 95                                    | 25 x 14   | 25                              | 0   | +0,065                       | -0,052  | ±0,026                   | -0,074             | 9                         |      | 5,4                          |      | 0,40 | 0,60 |
| 95                           | 110                                   | 28 x 16   | 28                              | 0   | 0                            | 0   | ±0,026                   | 0                  | 10                        |      | 6,4                          |      | 0,40 | 0,60 |
| 110                          | 130                                   | 32 x 18   | 32                              | 0   | 0                            | 0   | ±0,026                   | 0                  | 11                        |      | 7,4                          |      | 0,40 | 0,60 |
| 130                          | 150                                   | 36 x 20   | 36                              | +0,062  | +0,180                       | 0   | ±0,031                   | -0,026             | 12                        |      | 8,4                          |      | 0,70 | 1,00 |
| 150                          | 170                                   | 40 x 22   | 40                              | 0   | +0,080                       | -0,062  | ±0,031                   | -0,088             | 13                        |      | 9,4                          |      | 0,70 | 1,00 |
| 170                          | 200                                   | 45 x 25   | 45                              | 0   | 0                            | 0   | ±0,031                   | 0                  | 15                        |      | 10,4                         |      | 0,70 | 1,00 |
| 200                          | 230                                   | 50 x 28   | 50                              | 0   | 0                            | 0   | ±0,031                   | 0                  | 17                        |      | 11,4                         |      | 0,70 | 1,00 |
| 230                          | 260                                   | 56 x 32   | 56                              | 0   | 0                            | 0   | ±0,031                   | 0                  | 20                        | +0,3 | 12,4                         | +0,3 | 0,70 | 1,00 |
| 260                          | 290                                   | 63 x 32   | 63                              | +0,074  | +0,220                       | 0   | ±0,037                   | -0,032             | 20                        | 0    | 12,4                         | 0    | 1,20 | 1,60 |
| 290                          | 330                                   | 70 x 36   | 70                              | 0   | +0,100                       | -0,074  | ±0,037                   | -0,106             | 22                        |      | 14,4                         |      | 1,20 | 1,60 |
| 330                          | 380                                   | 80 x 40   | 80                              | 0   | 0                            | 0   | ±0,037                   | 0                  | 25                        |      | 15,4                         |      | 2,00 | 2,50 |
| 380                          | 440                                   | 90 x 45   | 90                              | +0,087  | +0,260                       | 0   | ±0,0435                  | -0,037             | 28                        |      | 17,4                         |      | 2,00 | 2,50 |
| 400                          | 500                                   | 100 x 50  | 100                             | 0   | +0,120                       | -0,087  | ±0,0435                  | -0,124             | 31                        |      | 19,5                         |      | 2,00 | 2,50 |

ANEXO 5

Diseño y cálculo de un reductor de velocidad de dos etapas con relación de transmisión 7.1 y par máximo a la salida de 4500 Nm

# ANEXO 6: TORNILLERÍA

| → Rosca normal, serie 1 |         |         |                      |                      |         |     |                                   |                                   |
|-------------------------|---------|---------|----------------------|----------------------|---------|-----|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Rosca                   | d<br>mm | P<br>mm | d <sub>1</sub><br>mm | d <sub>2</sub><br>mm | R<br>mm | d/R | A <sub>1</sub><br>mm <sup>2</sup> | A <sub>2</sub><br>mm <sup>2</sup> |
| M 3                     | 3       | 0,5     | 2,675                | 2,387                | 0,072   | 42  | 4,48                              | 5,09                              |
| M 4                     | 4       | 0,7     | 3,545                | 3,141                | 0,101   | 40  | 7,75                              | 8,78                              |
| M 5                     | 5       | 0,8     | 4,480                | 4,019                | 0,115   | 43  | 12,7                              | 14,2                              |
| M 6                     | 6       | 1,0     | 5,350                | 4,773                | 0,144   | 42  | 17,9                              | 20,1                              |
| M 8                     | 8       | 1,25    | 7,188                | 6,466                | 0,180   | 44  | 32,8                              | 36,6                              |
| M 10                    | 10      | 1,5     | 9,026                | 8,160                | 0,217   | 46  | 52,3                              | 58,0                              |
| M 12                    | 12      | 1,75    | 10,863               | 9,853                | 0,253   | 47  | 76,3                              | 84,3                              |
| M 16                    | 16      | 2,0     | 14,701               | 13,546               | 0,289   | 55  | 144                               | 157                               |
| M 20                    | 20      | 2,5     | 18,376               | 16,933               | 0,361   | 55  | 225                               | 245                               |
| M 24                    | 24      | 3,0     | 22,051               | 20,319               | 0,433   | 56  | 324                               | 353                               |
| M 30                    | 30      | 3,5     | 27,727               | 25,706               | 0,505   | 59  | 519                               | 561                               |
| M 36                    | 36      | 4,0     | 33,402               | 31,093               | 0,577   | 62  | 759                               | 817                               |
| M 42                    | 42      | 4,5     | 39,077               | 36,479               | 0,650   | 65  | 1045                              | 1121                              |
| M 48                    | 48      | 5,0     | 44,752               | 41,866               | 0,722   | 66  | 1377                              | 1473                              |
| M 56                    | 56      | 5,5     | 52,428               | 49,252               | 0,794   | 71  | 1906                              | 2030                              |
| M 64                    | 64      | 6,0     | 60,103               | 56,639               | 0,866   | 74  | 2520                              | 2676                              |

| Rosca fina, serie 1 |    |      |        |        |       |     |      |      |
|---------------------|----|------|--------|--------|-------|-----|------|------|
| M 8×1               | 8  | 1,0  | 7,350  | 6,773  | 0,144 | 56  | 36,0 | 39,2 |
| M 10×0,75           | 10 | 0,75 | 9,513  | 9,080  | 0,108 | 92  | 64,7 | 67,9 |
| M 10×1              | 10 | 1,0  | 9,350  | 8,773  | 0,144 | 70  | 60,5 | 64,5 |
| M 10×1,25           | 10 | 1,25 | 9,188  | 8,466  | 0,180 | 56  | 56,3 | 61,2 |
| M 12×1              | 12 | 1,0  | 11,350 | 10,773 | 0,144 | 83  | 91,1 | 96,1 |
| M 12×1,25           | 12 | 1,25 | 11,188 | 10,466 | 0,180 | 67  | 86,1 | 92,1 |
| M 12×1,5            | 12 | 1,5  | 11,026 | 10,160 | 0,217 | 55  | 81,1 | 88,1 |
| M 16×1              | 16 | 1,0  | 15,350 | 14,773 | 0,144 | 111 | 171  | 178  |
| M 16×1,5            | 16 | 1,5  | 15,026 | 14,160 | 0,217 | 74  | 157  | 167  |
| M 20×1              | 20 | 1,0  | 19,350 | 18,773 | 0,144 | 139 | 277  | 285  |
| M 20×1,5            | 20 | 1,5  | 19,026 | 18,160 | 0,217 | 92  | 259  | 271  |
| M 20×2              | 20 | 2,0  | 18,701 | 17,546 | 0,289 | 69  | 242  | 258  |
| M 24×1,5            | 24 | 1,5  | 23,026 | 22,160 | 0,217 | 110 | 366  | 401  |
| M 24×2              | 24 | 2,0  | 22,701 | 21,546 | 0,289 | 83  | 365  | 384  |
| M 30×1,5            | 30 | 1,5  | 29,026 | 28,160 | 0,217 | 138 | 623  | 642  |
| M 30×2              | 30 | 2,0  | 28,701 | 27,546 | 0,289 | 104 | 596  | 621  |
| M 36×1,5            | 36 | 1,5  | 35,026 | 34,160 | 0,217 | 166 | 917  | 940  |
| M 36×2              | 36 | 2,0  | 34,701 | 33,546 | 0,289 | 125 | 884  | 914  |
| M 36×3              | 36 | 3,0  | 34,051 | 32,319 | 0,433 | 83  | 821  | 865  |
| M 42×1,5            | 42 | 1,5  | 41,026 | 40,160 | 0,217 | 193 | 1267 | 1294 |
| M 42×2              | 42 | 2,0  | 40,701 | 39,546 | 0,289 | 145 | 1229 | 1264 |
| M 42×3              | 42 | 3,0  | 40,051 | 38,319 | 0,433 | 97  | 1153 | 1206 |
| M 48×1,5            | 48 | 1,5  | 47,026 | 46,160 | 0,217 | 221 | 1674 | 1705 |
| M 48×2              | 48 | 2,0  | 46,701 | 45,546 | 0,289 | 166 | 1630 | 1671 |
| M 48×3              | 48 | 3,0  | 46,051 | 44,319 | 0,433 | 111 | 1543 | 1604 |
| M 56×1,5            | 56 | 1,5  | 55,026 | 54,160 | 0,217 | 258 | 2304 | 2341 |
| M 56×2              | 56 | 2,0  | 54,701 | 53,546 | 0,289 | 194 | 2252 | 2301 |
| M 56×4              | 56 | 4,0  | 53,402 | 51,093 | 0,577 | 97  | 2050 | 2144 |
| M 64×1,5            | 64 | 1,5  | 63,026 | 62,160 | 0,217 | 295 | 3035 | 3077 |
| M 64×2              | 64 | 2,0  | 62,701 | 61,546 | 0,289 | 221 | 2976 | 3033 |
| M 64×4              | 64 | 4,0  | 61,402 | 59,093 | 0,577 | 111 | 2743 | 2851 |
| M 72×1,5            | 72 | 1,5  | 71,026 | 70,160 | 0,217 | 330 | 3867 | 3914 |
| M 72×2              | 72 | 2,0  | 70,701 | 69,546 | 0,289 | 249 | 3800 | 3862 |
| M 72×4              | 72 | 4,0  | 69,402 | 67,093 | 0,577 | 125 | 3536 | 3659 |
| M 72×6              | 72 | 6,0  | 68,103 | 64,639 | 0,866 | 83  | 3282 | 3460 |

ANEXO 6

## ANEXO 7: DUREZA BRINELL PARA MATERIALES

| MATERIAL<br>(tabla iso 6336-5)   | Denominación  | $S_u$ (N/mm <sup>2</sup> )                              |   | Dureza superficial  |
|--|---|---|---|---|
|  |   | min - max   | $S_y$ (N/mm <sup>2</sup> )<br>min - max |   |
| Fundiciones grises (GG)<br>UNE EN 1561:2012  | GJL-200<br>GJL-250<br>GJL-350   | 200 - 300<br>250 - 350<br>350 - 450                     | -<br>-<br>-                             | HB (150-230)<br>HB (170-250)<br>HB (210-275)<br>HB 150-275  |
| Fundiciones maleables<br>de corazón negro (GTS)<br>UNE EN 1562:2012  | GJMB-500-5<br>GJMB-550-4<br>GJMB-600-3<br>GJMB-650-2                                    | 500 -<br>550 -<br>600 -<br>650 -                        | 300 -<br>340 -<br>390 -<br>430 -        | HB (165-215)<br>HB (180-230)<br>HB (195-245)<br>HB (210-260)<br>HB 135-250                                  |
| Fundiciones con grafito<br>esferoidal (nodular o<br>dúctil) (GGG)<br>UNE-EN1563:2012   | GJS-400-15<br>GJS-600-3<br>GJS-800-2  | 400 -<br>600 -<br>800 -                                 | 250 -<br>380 -<br>480 -                 | HB (150-180)<br>HB (210-250)<br>HB (260-300)<br>HB 175-300  |
| Acero moldeado<br>no aleado (St cast)<br>UNE-EN10293:2006  | GE240<br>GE300  | 450 - 600<br>520 - 670                                  | 240 -<br>300 -                          | HB 140 - HV 152<br>HB 175 - HV 200<br>HB 140-210  |
| Acero no aleado forjado<br>(St)  | C25<br>C35<br>C45   | 400<br>580<br>680                                       | 280<br>380<br>430                       | HB 140 - HV 141<br>HB 180 - HV 182<br>HB 207 - HV 210<br>HB 110-210   |
| Acero no aleado<br>forjado, templado y<br>revenido (V) UNE-<br>EN10083-2:2008  | C25<br>C35  | 570<br>600 - 750  | 430<br>430 - 520                        | HB 168 - HV 170<br>HB 212 - HV 216<br>HV 135-210<br>HV 115-215  |
| Aceros aleados<br>templados y revenidos<br>(V)<br>UNE-EN10083-3:2008   | 20NiCrMoS2-2<br>20MnCr5<br>34CrMo4<br>42CrMo4<br>34NiCrMo16                             | 850<br>980<br>1000 - 1200<br>1100 - 1300<br>1230 - 1420 | 580<br>735<br>800<br>950<br>1030        | HB 255 - HV 267<br>HB 302 - HV 317<br>HB 310 - HV 326<br>HB 321 - HV 337<br>HB 352 - HV 368<br>HV 200 - 390 |
| Acero moldeado no<br>aleado templado (V<br>cast)   |   |   |   | HV 130-215  |
| Acero moldeado aleado<br>templado (V cast)   | G35CrMo4<br>G42CrMo4  | 750-980<br>800-1025                                     | 650<br>700                              | HB 290 - HV 305<br>HB 305 - HV 320<br>HV 200-360  |
| Acero forjado de<br>cementación. (Eh) UNE-<br>EN10084:2010   | 20MnCr5<br>20NiCrMoS2-2 F1522<br>15 NiCr13 (F-1540)<br>14NiCrMo13 F 1560                | 980<br>850<br>950<br>1300                               | 735<br>600<br>750<br>1100               | HV 720<br>HV 600<br>HV 700<br>HV 740<br>HV 600-800  |
| Acero forjado o<br>moldeado, endurecido<br>superficialmente a la<br>llama o por inducción<br>(IF)                              | C45<br>37Cr4 F-1201<br>42CrMo4  | 1034<br>1150<br>1300                                    | 786<br><br>1200                         | HB 525 - HV 560<br>HV 550 - 610<br>HB 515 - HV 615<br>HV 485-615  |
| Acero forjado de<br>nitruración(NT), acero<br>templado de<br>nitruración(NV), acero<br>de nitruración (NT)UNE-<br>EN10085:2001 | 42CrMo4<br>24CrMo13-6 F 1711<br>31CrMoV9 F 1721<br>41 CrAlMo7-10 F 1741<br>34CrAlNi7-10 | 1450<br>1100<br>1000<br>950 - 1150<br>900-1100          | 900<br>800<br>750<br>680                | HV 700<br>HV 700<br>HV 850 - 950<br>HV 850 - 950<br>NT HV 650-900<br>NV HV 450-650                          |
| Acero forjado de<br>nitrocarburoización (NV)   |   |   |   | HV 300-650  |

## ANEXO 7

## ANEXO 8: COEFICIENTES DE TENSIÓN LÍMITE A FLEXIÓN

Fallo a flexión  $S_{FL}$ :

| Material   | Calidad | A     | B   | Dureza min | Dureza max |
|--|---------|-------|-----|------------|------------|
| Aceros al carbono forjados no aleados (normalizados)                             | ML/MQ   | 0,455 | 69  | HB 110     | HB210      |
|  | ME      | 0,386 | 147 | HB 110     | HB210      |
| Acero al carbono moldeado no aleado (fundido)                                    | ML/MQ   | 0,313 | 62  | HB 140     | HB210      |
|  | ME      | 0,254 | 137 | HB 140     | HB210      |
| Fundición maleable de corazón negro  | ML/MQ   | 0,345 | 77  | HB 135     | HB250      |
|  | ME      | 0,403 | 128 | HB 175     | HB250      |
| Fundición con grafito esferoidal   | ML/MQ   | 0,350 | 119 | HB 175     | HB300      |
|  | ME      | 0,380 | 134 | HB 200     | HB300      |
| Fundición gris   | ML/MQ   | 0,256 | 8   | HB 150     | HB240      |
|  | ME      | 0,200 | 53  | HB 175     | HB275      |
| Acero al carbono (no aleado) forjado, templado y revenido                        | ML      | 0,250 | 108 | HV 115     | HV215      |
|  | MQ      | 0,240 | 163 | HV 115     | HV215      |
|  | ME      | 0,283 | 202 | HV 115     | HV215      |
| Aceros aleados forjado, templado y revenido                                      | ML      | 0,423 | 104 | HV 200     | HV360      |
|  | MQ      | 0,425 | 187 | HV 200     | HV360      |
|  | ME      | 0,358 | 231 | HV 200     | HV390      |
| Acero al carbono moldeado, templado.   | ML/MQ   | 0,224 | 117 | HB 130     | HB215      |
|  | ME      | 0,286 | 167 | HB 130     | HB215      |
| Acero aleado moldeado templado   | ML/MQ   | 0,364 | 161 | HB 200     | HB360      |
|  | ME      | 0,356 | 186 | HB 200     | HB360      |
| Acero forjado de cementación   | ML      | 0     | 312 | HV 600     | HV800      |
|  | MQ      | 0     | 461 | HV 660     | HV800      |
|  | ME      | 0     | 525 | HV 660     | HV800      |
| Acero forjado o moldeado, endurecido superficialmente a la llama o por inducción | ML      | 0,305 | 76  | HV 485     | HV615      |
|  | MQ      | 0,138 | 290 | HV 500     | HV570      |
|  |         | 0     | 369 | HV 570     | HV615      |
|  | ME      | 0,271 | 237 | HV 500     | HV615      |
| Aceros de nitruración forjados   | ML      | 0     | 270 | HV 650     | HV900      |
|  | MQ      | 0     | 420 | HV 650     | HV900      |
|  | ME      | 0     | 468 | HV 650     | HV900      |
| Aceros de nitruración templados  | ML      | 0     | 258 | HV 450     | HV 650     |
|  | MQ      | 0     | 363 | HV 450     | HV 650     |
|  | ME      | 0     | 432 | HV 450     | HV 650     |
| Aceros forjado de nitrocarburoización  | ML      | 0     | 224 | HV 300     | HV 650     |
|  | MQ      | 0,653 | 94  | HV 300     | HV 450     |
|  | ME      | 0     | 388 | HV 450     | HV 650     |

## ANEXO 8

## ANEXO 9: COEFICIENTES DE TENSION LÍMITE A FALLO SUPERFICIAL

Fallo superficial  $S_{HL}$ :

| Material   | Calidad | A     | B    | Dureza min | Dureza max |
|--|---------|-------|------|------------|------------|
| Aceros al carbono forjados no aleados (normalizados)                             | ML/MQ   | 1,000 | 190  | HB 110     | HB210      |
|  | ME      | 1,520 | 250  | HB 110     | HB210      |
| Acero al carbono moldeado no aleado (fundido)                                    | ML/MQ   | 0,986 | 131  | HB 140     | HB210      |
|  | ME      | 1,143 | 237  | HB 140     | HB210      |
| Fundición maleable de corazón negro  | ML/MQ   | 1,371 | 143  | HB 135     | HB250      |
|  | ME      | 1,333 | 267  | HB 175     | HB250      |
| Fundición con grafito esferoidal   | ML/MQ   | 1,434 | 211  | HB 175     | HB300      |
|  | ME      | 1,500 | 250  | HB 200     | HB300      |
| Fundición gris   | ML/MQ   | 1,033 | 132  | HB 150     | HB240      |
|  | ME      | 1,465 | 122  | HB 175     | HB275      |
| Acero al carbono (no aleado) forjado, templado y revenido                        | ML      | 0,963 | 283  | HV 135     | HV210      |
|  | MQ      | 0,925 | 360  | HV 135     | HV210      |
|  | ME      | 0,838 | 432  | HV 135     | HV210      |
| Aceros aleados forjado, templado y revenido                                      | ML      | 1,313 | 188  | HV 200     | HV360      |
|  | MQ      | 1,313 | 373  | HV 200     | HV360      |
|  | ME      | 2,213 | 260  | HV 200     | HV390      |
| Acero al carbono moldeado, templado.   | ML/MQ   | 0,831 | 300  | HB 130     | HB215      |
|  | ME      | 0,951 | 345  | HB 130     | HB215      |
| Acero aleado moldeado templado   | ML/MQ   | 1,276 | 298  | HB 200     | HB360      |
|  | ME      | 1,350 | 356  | HB 200     | HB360      |
| Acero forjado de cementación   | ML      | 0     | 1300 | HV 600     | HV800      |
|  | MQ      | 0     | 1500 | HV 660     | HV800      |
|  | ME      | 0     | 1650 | HV 660     | HV800      |
| Acero forjado o moldeado, endurecido superficialmente a la llama o por inducción | ML      | 0,740 | 602  | HV 485     | HV615      |
|  | MQ      | 0,541 | 882  | HV 500     | HV615      |
|  | ME      | 0,505 | 1013 | HV 500     | HV615      |
| Aceros de nitruración forjados   | ML      | 0     | 1125 | HV 650     | HV900      |
|  | MQ      | 0     | 1250 | HV 650     | HV900      |
|  | ME      | 0     | 1450 | HV 650     | HV900      |
| Aceros de nitruración templados  | ML      | 0     | 788  | HV 450     | HV 650     |
|  | MQ      | 0     | 998  | HV 450     | HV 650     |
|  | ME      | 0     | 1217 | HV 450     | HV 650     |
| Aceros forjado de nitrocarburoización  | ML      | 0     | 650  | HV 300     | HV 650     |
|  | MQ      | 1,167 | 425  | HV 300     | HV 450     |
|  | ME      | 0     | 950  | HV 450     | HV 650     |

ANEXO 9

## ANEXO 10: COEFICIENTE DE APLICACIÓN $K_A$

| Características de la máquina motriz | Características de la máquina arrastrada |                 |                   |                 |
|--------------------------------------|--|-----------------|-------------------|-----------------|
|                                      | Uniforme                                 | Choques ligeros | Choques moderados | Choques fuertes |
| Uniforme                             | 1,00                                     | 1,25            | 1.50              | 1,75            |
| Choques ligeros                      | 1,10                                     | 1,35            | 1.60              | 1,85            |
| Choques moderados                    | 1,25                                     | 1,50            | 1.75              | 2,00            |
| Choques fuertes                      | 1,50                                     | 1,75            | 2,00              | 2,25 o mayor    |

ANEXO 10

## ANEXO 11: FACTOR DE SUPERFICIE $K_A$

| ACABADO SUPERFICIAL           | Factor a (MPa) | Exponente b |
|-------------------------------|----------------|-------------|
| Rectificado                   | 1.58           | -0.085      |
| Mecanizado o laminado en frío | 4.51           | -0.265      |
| Laminado en caliente          | 57.7           | -0.718      |
| Forjado                       | 272.0          | -0.995      |

ANEXO 11

## ANEXO 12: FACTOR DE TAMAÑO $K_B$

$$K_b = \left( \frac{d}{7.62} \right)^{-0.11333} \quad 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm}$$

$$K_b = 0.75 \quad d > 51 \text{ mm}$$

ANEXO 12

## ANEXO 13: FACTOR DE CARGA $K_C$

$K_c = 0.8$  si existe carga axial

$K_c = 1$  si existe carga a flexión

$K_c = 0.577$  si existe torsión y esfuerzo cortante

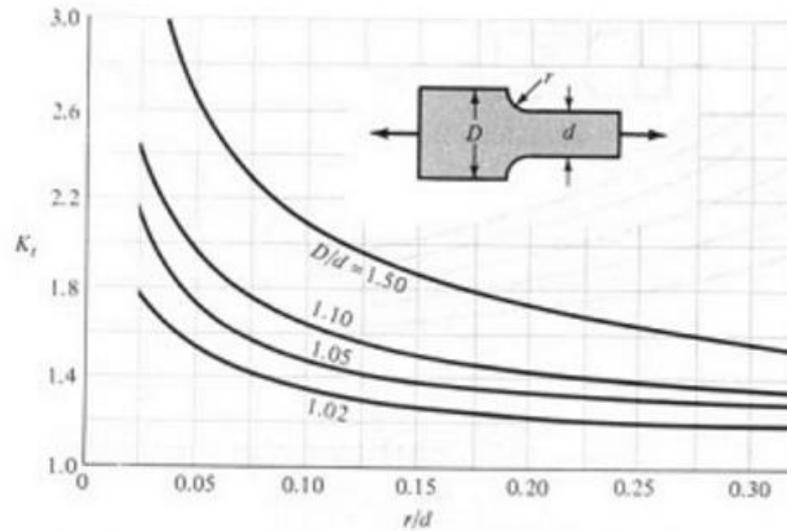
ANEXO 13

## ANEXO 14: FACTOR DE CONFIABILIDAD $K_E$

|                             |     |       |       |       |       |        |
|-----------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|--------|
| <b>Confiabilidad</b>        | 0.5 | 0.9   | 0.95  | 0.99  | 0.999 | 0.9999 |
| <b>Factor de corrección</b> | 1.0 | 0.897 | 0.868 | 0.814 | 0.753 | 0.702  |

ANEXO 14

## ANEXO 15: COEFICIENTE DE CONCENTRADOR DE TENSIONES $K_T$



ANEXO 15

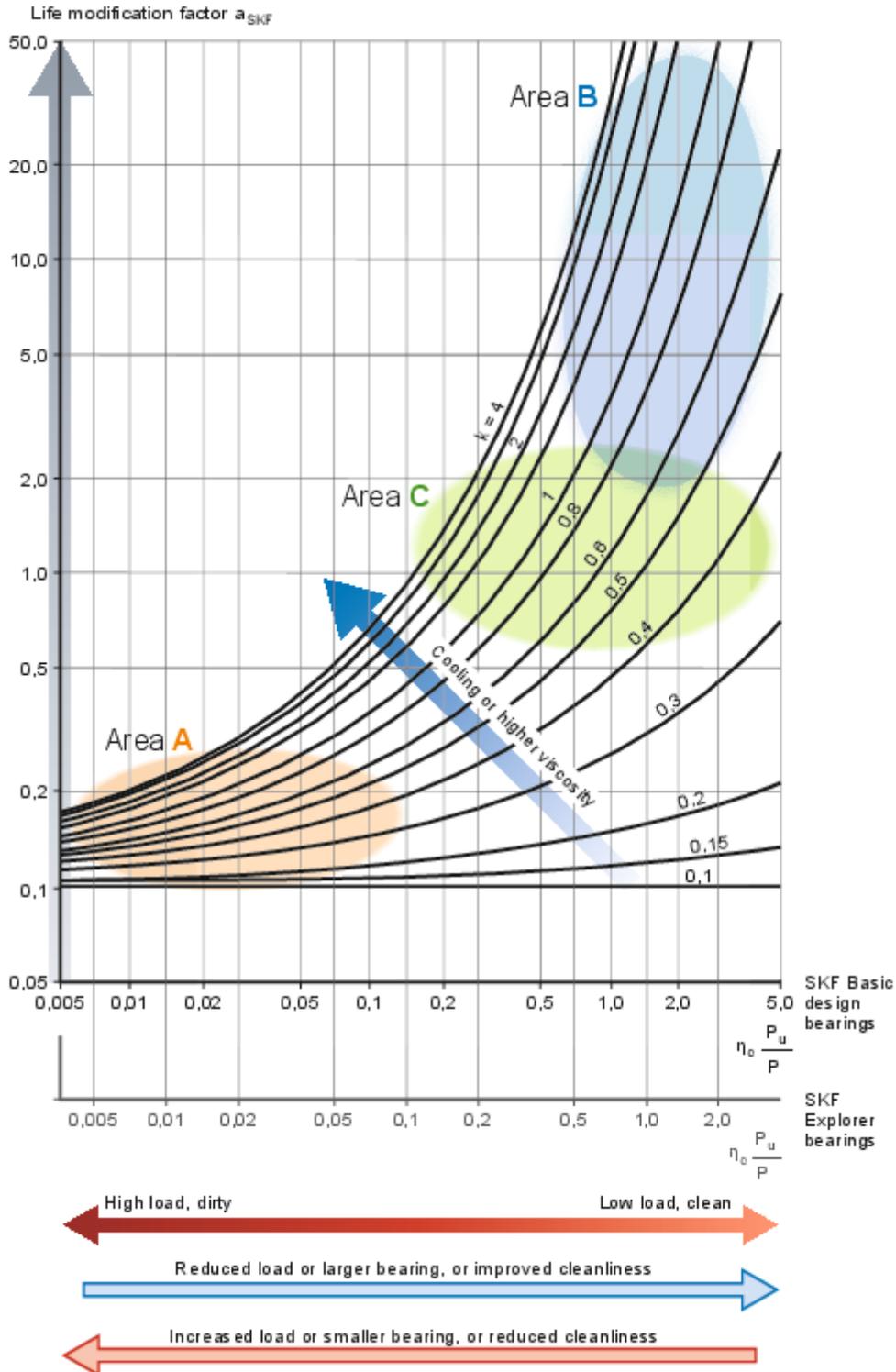
## ANEXO 16: FACTOR DE CONFIABILIDAD $a_1$

| Fiabilidad<br>% | $a_1$ |
|-----------------|-------|
| 90              | 1     |
| 95              | 0.64  |
| 96              | 0.55  |
| 97              | 0.47  |
| 98              | 0.37  |
| 99              | 0.25  |
| 99.2            | 0.22  |
| 99.4            | 0.19  |
| 99.6            | 0.16  |
| 99.8            | 0.12  |
| 99.9            | 0.093 |
| 99.92           | 0.087 |
| 99.94           | 0.080 |
| 99.95           | 0.077 |

ANEXO 16

# ANEXO 17: FACTOR DE MODIFICACIÓN DE LA VIDA ÚTIL $a_{SKF}$

$$L_{nm} = a_1 a_{SKF} L_{10} = a_1 a_{SKF} \left(\frac{C}{P}\right)^p$$



ANEXO 17

## ANEXO 18: DEFORMACIONES PERMISIBLES DE ÁRBOLES

| Deformación                                | Aplicación | Deformación permisible*  |   |
|--|------------|--|---|
| Deflexión (debida a flexión)               | y          | Deflexión máxima en árboles que soportan ruedas dentadas       | $[y] = (0.0002...0.0003)L$ , donde $L$ es la distancia entre apoyos |
|  |            | En el sitio de asiento de ruedas dentadas cilíndricas          | $[y] = (0.01...0.03)m$ , donde $m$ es el módulo de la transmisión   |
|  |            | En el sitio de asiento de ruedas dentadas cónicas e hipoidales | $[y] = (0.005...0.007)m$ , donde $m$ es el módulo de la transmisión |
|  |            | Deflexión máxima en los árboles de los motores asíncronos      | $[y] = 0.1h$ , donde $h$ es la holgura entre el rotor y el estator  |
|  |            | Deflexión máxima en árboles de ventiladores                    | $[y] = (0.0003...0.0005)D$ , donde $D$ es el diámetro del rotor     |
| Deflexión angular (debida a flexión)       | $\varphi$  | En el sitio de asiento de ruedas dentadas                      | $[\varphi] = 0.001$ rad   |
|  |            | En un cojinete   | $[\varphi] = 0.001$ rad   |
|  |            | En el asiento de rodamientos de bolas                          | $[\varphi] = 0.01$ rad  |
|  |            | En el asiento de rodamientos de rodillos cilíndricos           | $[\varphi] = 0.0025$ rad  |
|  |            | En el asiento de rodamientos cónicos                           | $[\varphi] = 0.0016$ rad  |
|  |            | En el asiento de rodamientos esféricos                         | $[\varphi] = 0.05$ rad  |
| Ángulo de torsión (por unidad de longitud) | $\theta/L$ | Grúas desplazables y portátiles                                | $[\theta/L] = 0.0045...0.006$ rad/m                                 |
|  |            | Husillos de tornos y taladros                                  | $[\theta/L] = 0.00175$ rad/m  |
|  |            | Árboles medios de destinación general                          | $[\theta/L] = 0.009$ rad/m  |
|  |            | Árboles de cardanes de vehículos ( $d = 30...50$ mm)           | $[\theta/L] = 0.005...0.007$ rad/m                                  |

\* Otras recomendaciones<sup>[6]</sup> indican que:  $y \leq 0.005$  in en los asientos de ruedas dentadas;  $\varphi_1 + \varphi_2 < 0.03^\circ$ , donde  $\varphi_1$  y  $\varphi_2$  son las deflexiones angulares de un par de ruedas dentadas engranando; y que  $y$  en cojinetes de contacto deslizante debe ser menor que el espesor de la película de aceite.

\* El módulo,  $m$ , de una transmisión por ruedas dentadas es un parámetro que define el tamaño de los dientes.

## ANEXO 19: TABLA DE FACTORES DE SEGURIDAD

| TIPO O CLASE DE CARGA                                  | ACERO, METALES DÚCTILES          |  | HIERRO FUNDIDO, METALES FRÁGILES | MADERA DE CONSTRUCCIÓN |
|--|----------------------------------|--|----------------------------------|------------------------|
|  | Basado en la resistencia máxima* | Basado en la resistencia de fluencia** | Basado en la resistencia máxima* |                        |
| Carga muerta o Carga variable bajo análisis por fatiga | 3 – 4                            | 1.5 - 2                                | 5 – 6                            | 7                      |

Las siguientes recomendaciones **NO** se deben adoptar si se hace análisis por fatiga

|   |         |       |         |    |
|---|---------|-------|---------|----|
| Repetida en una dirección, gradual (choque suave) | 6       | 3     | 7 – 8   | 10 |
| Repetida invertida, gradual (choque medio)        | 8       | 4     | 10 – 12 | 15 |
| Choque fuerte                                     | 10 – 15 | 5 – 7 | 15 – 20 | 20 |

\* Resistencia máxima se refiere a  $S_u$ ,  $S_{uc}$  o  $S_{us}$  (dependiendo de si el esfuerzo es de tracción, de compresión o cortante)

\*\* Resistencia de fluencia se refiere a  $S_y$ ,  $S_{yc}$  o  $S_{ys}$  (dependiendo de si el esfuerzo es de tracción, de compresión o cortante)

## ANEXO 20: TABLA DE MÓDULOS NORMALIZADOS

| Módulo<br>m<br>mm | Diametral<br>Pitch P<br>1/inch |
|-------------------|--------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------|--------------------------------|
| 0,12              | 200                            | )0,75(            | 32                             | (3,25)            |                                | 12                | 2,25                           |
| )0,14(            | 180                            | 0,8               |                                | )3,5(             | 7                              | )14(              | 2                              |
|                   | 160                            | )0,85(            |                                | (3,75)            |                                | 16                | 1,75                           |
| 0,16              |                                | 0,9               | 28                             | 4                 | 6                              | 20                | 1,5                            |
| )0,18(            | 140                            | )0,95(            |                                | (4,25)            |                                | )18(              |                                |
| 0,2               |                                | 1                 | 24                             | )4,5(             | 5,5                            | 20                | 1,25                           |
| )0,22(            | 120                            | )1,125(           |                                | (4,75)            |                                | )22(              |                                |
| 0,25              |                                | 1,25              | 20                             | 5                 | 5                              | 25                | 1                              |
| )0,28(            | 100                            | )1,375(           |                                | (5,25)            |                                | (27)              |                                |
| 0,3               |                                | 1,5               | 18                             | )5,5(             | 4,5                            | )28(              | 0,875                          |
| )0,35(            | 80                             | )1,75(            |                                | (5,75)            |                                | (30)              |                                |
| 0,4               |                                | 2                 | 14                             | 6                 | 4                              | 32                | 0,75                           |
| )0,45(            | 64                             |                   | 12                             | (6,5)             |                                | )36(              |                                |
| 0,5               |                                | )2,25(            |                                | )7(               | 3,5                            | (39)              |                                |
| )0,55(            | 48                             | 2,5               | 11                             | 8                 | 3                              | 40                | 0,625                          |
| 0,6               |                                |                   | 10                             | )8(               |                                | (42)              |                                |
| )0,65(            | 40                             | )2,75(            |                                | 10                | 2,75                           | )45(              |                                |
| 0,7               |                                | 3                 | 9                              |                   | 2,5                            | 50                | 0,5                            |
|                   | 36                             |                   | 8                              | )11(              |                                |                   |                                |

**Serie I:** Sin paréntesis. Serie preferente.

**Serie II:** > <

**Serie III:** ( ) Serie especial. A evitar. Sólo casos especiales.

