



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA**

**CARRERA MECÁNICA**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO  
MOTORREDUCTOR APLICANDO METODOLOGÍA QFD PARA  
LA INDUSTRIA NACIONAL”**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO MECÁNICO**

**AUTORES:**

**JUAN ENRIQUE AGUIRRE HERRERA**

**JAVIER EDUARDO HIDALGO VITERI**

Riobamba – Ecuador

2022



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA**

**CARRERA MECÁNICA**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO  
MOTORREDUCTOR APLICANDO METODOLOGÍA QFD PARA  
LA INDUSTRIA NACIONAL”**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO MECÁNICO**

**AUTORES: JUAN ENRIQUE AGUIRRE HERRERA**

**JAVIER EDUARDO HIDALGO VITERI**

**DIRECTOR: Ing. JORGE ISAÍAS CAICEDO REYES**

Riobamba – Ecuador

2022

**© 2022, Juan Enrique Aguirre Herrera, Javier Eduardo Hidalgo Viteri**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho del Autor.

Nosotros, Juan Enrique Aguirre Herrera y Javier Eduardo Hidalgo Viteri, declaramos que el presente trabajo de integración curricular es de nuestra autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de integración curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 07 de julio de 2022



**Juan Enrique Aguirre Herrera**

**0604182451**



**Javier Eduardo Hidalgo Viteri**

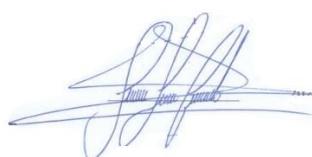
**0604148353**

# ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

## FACULTAD DE MECÁNICA

### CARRERA MECÁNICA

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto Técnico, **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO MOTORREDUCTOR APLICANDO METODOLOGÍA QFD PARA LA INDUSTRIA NACIONAL**, realizado por los señores: **JUAN ENRIQUE AGUIRRE HERRERA** y **JAVIER EDUARDO HIDALGO VITERI**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

|                                                                                          | FIRMA                                                                                | FECHA      |
|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Ing. Edwin Fernando Viteri Núñez<br><b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>                       |  | 2022-09-12 |
| Ing. Jorge Isafías Caicedo Reyes<br><b>DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b> |  | 2022-09-12 |
| Ing. Sócrates Miguel Aquino Arroba<br><b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>                        |  | 2022-09-12 |

## **DEDICATORIA**

A mis padres, hermanos y familiares quienes han sido mi motivación principal para perseguir mis sueños hoy les dedico este trabajo de titulación.

Juan

A todos quienes me apoyaron.

Javier

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por las innumerables bendiciones que ha puesto en mi vida. Agradezco a mis padres por su inagotable esfuerzo por siempre darme todo lo que necesito, por sus enseñanzas y sobre todo por criarme con amor. Finalmente, agradezco a todos los que hicieron posible este trabajo de titulación.

Juan

Gracias a mi pequeña familia.

Javier

## TABLA DE CONTENIDO

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| INDICE DE TABLAS.....   | ix    |
| INDICE DE FIGURAS.....  | xi    |
| INDICE DE GRÁFICOS..... | xv    |
| INDICE DE ANEXOS.....   | xvi   |
| RESUMEN.....            | xvii  |
| SUMMARY.....            | xviii |
| INTRODUCCIÓN.....       | 1     |

### CAPÍTULO I

|                                            |   |
|--------------------------------------------|---|
| 1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA.....           | 2 |
| 1.1. Antecedentes.....                     | 2 |
| 1.2. Delimitación.....                     | 3 |
| 1.2.1. <i>Delimitación espacial</i> .....  | 3 |
| 1.2.2. <i>Delimitación sectorial</i> ..... | 3 |
| 1.3. Formulación del problema.....         | 4 |
| 1.4. Objetivos.....                        | 4 |
| 1.4.1. <i>Objetivo general</i> .....       | 4 |
| 1.4.2. <i>Objetivos específicos</i> .....  | 5 |

### CAPÍTULO II

|                                                       |   |
|-------------------------------------------------------|---|
| 2. REVISIÓN DE LITERATURA Y FUNDAMENTOS TEÓRICOS..... | 6 |
| 2.1. Equipo motorreductor.....                        | 6 |
| 2.1.1. <i>Reductores de ejes paralelos</i> .....      | 6 |
| 2.1.2. <i>Reductores de ejes cónicos</i> .....        | 6 |
| 2.1.3. <i>Reductores planetarios</i> .....            | 6 |
| 2.2. Metodología QFD.....                             | 7 |
| 2.3. Metodología del diseño.....                      | 7 |
| 2.3.1. <i>Planificación del producto</i> .....        | 7 |
| 2.3.2. <i>Diseño conceptual</i> .....                 | 8 |
| 2.3.3. <i>Diseño de materialización</i> .....         | 8 |
| 2.3.3.1. <i>Protocolo de pruebas</i> .....            | 8 |
| 2.3.4. <i>Diseño de detalle</i> .....                 | 9 |
| 2.4. AGMA.....                                        | 9 |

|               |                                                                                |           |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>2.4.1.</b> | <b><i>Normativas para el diseño de engranajes según ANSI-AGMA</i></b> .....    | <b>9</b>  |
| 2.4.1.1.      | <i>ANSI-AGMA 2001-D04</i> .....                                                | 9         |
| 2.4.1.2.      | <i>ANSI-AGMA 2003-B97</i> .....                                                | 10        |
| 2.4.1.3.      | <i>ANSI-AGMA 6034-B92</i> .....                                                | 10        |
| 2.4.1.4.      | <i>ANSI-AGMA 6022-C93</i> .....                                                | 10        |
| <b>2.4.2.</b> | <b><i>Materiales para la construcción según ANSI-AGMA</i></b> .....            | <b>10</b> |
| 2.4.2.1.      | <i>Materiales utilizados para la construcción de engranes</i> .....            | 10        |
| 2.4.2.2.      | <i>Aleaciones de bronce para la construcción de coronas helicoidales</i> ..... | 11        |
| <b>2.5.</b>   | <b>Metodología CAD-CAM-CAE</b> .....                                           | <b>11</b> |
| 2.5.1.        | <i>CAD</i> .....                                                               | 11        |
| 2.5.2.        | <i>CAM</i> .....                                                               | 12        |
| 2.5.2.1.      | <i>Maquinas herramientas con CNC</i> .....                                     | 12        |
| 2.5.3.        | <i>CAE</i> .....                                                               | 13        |
| 2.5.3.1.      | <i>Método del elemento finito</i> .....                                        | 13        |
| <b>2.6.</b>   | <b>Fundiciones</b> .....                                                       | <b>14</b> |
| 2.6.1.        | <i>Fundición de aluminio</i> .....                                             | 14        |
| 2.6.1.1.      | <i>Procesos de moldeo</i> .....                                                | 14        |
| 2.6.1.2.      | <i>Composiciones de aleaciones de aluminio de fundición</i> .....              | 15        |
| <b>2.7.</b>   | <b>Tratamientos térmicos</b> .....                                             | <b>17</b> |
| 2.7.1.        | <i>Etapas del tratamiento térmico</i> .....                                    | 17        |
| 2.7.2.        | <i>Tipos de tratamientos térmicos</i> .....                                    | 18        |
| 2.7.2.1.      | <i>Recocido</i> .....                                                          | 18        |
| 2.7.2.2.      | <i>Temple</i> .....                                                            | 18        |
| 2.7.2.3.      | <i>Revenido</i> .....                                                          | 19        |

### **CAPÍTULO III**

|           |                                      |           |
|-----------|--------------------------------------|-----------|
| <b>3.</b> | <b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....      | <b>20</b> |
| 3.1.      | <b>Metodología del diseño</b> .....  | <b>20</b> |
| 3.2.      | <b>Definición del producto</b> ..... | <b>20</b> |
| 3.2.1.    | <i>Voz del usuario</i> .....         | 20        |
| 3.2.2.    | <i>Análisis de competencia</i> ..... | 21        |
| 3.2.2.1.  | <i>ECUA-RED</i> .....                | 21        |
| 3.2.2.2.  | <i>Morse Borg-Warner</i> .....       | 21        |
| 3.2.3.    | <i>Voz del ingeniero</i> .....       | 22        |
| 3.2.4.    | <i>Casa de la calidad</i> .....      | 23        |
| 3.2.4.1.  | <i>Correlaciones</i> .....           | 23        |
| 3.2.4.2.  | <i>Evaluación técnica</i> .....      | 23        |
| 3.2.4.3.  | <i>Compromisos técnicos</i> .....    | 24        |

|                 |                                                                                                    |            |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>3.3.</b>     | <b>Diseño conceptual</b> .....                                                                     | <b>27</b>  |
| <b>3.3.1.</b>   | <b>Análisis funcional</b> .....                                                                    | <b>27</b>  |
| <b>3.3.1.1.</b> | <i>Nivel 0</i> .....                                                                               | <b>27</b>  |
| <b>3.3.1.2.</b> | <i>Nivel 1</i> .....                                                                               | <b>28</b>  |
| <b>3.3.2.</b>   | <b>Matriz Morfológica</b> .....                                                                    | <b>29</b>  |
| <b>3.3.2.1.</b> | <i>Alternativa 1</i> .....                                                                         | <b>30</b>  |
| <b>3.3.2.2.</b> | <i>Alternativa 2</i> .....                                                                         | <b>30</b>  |
| <b>3.3.2.3.</b> | <i>Alternativa 3</i> .....                                                                         | <b>31</b>  |
| <b>3.3.3.</b>   | <b>Método ordinal corregido de criterios ponderados</b> .....                                      | <b>31</b>  |
| <b>3.3.3.1.</b> | <b>Criterios de valoración de las alternativas</b> .....                                           | <b>31</b>  |
| <b>3.3.3.2.</b> | <i>Evaluación de los pesos específicos de las diferentes alternativas para cada criterio</i><br>32 |            |
| <b>3.4.</b>     | <b>Diseño de materialización</b> .....                                                             | <b>34</b>  |
| <b>3.4.1.</b>   | <i>Generación del modelo 3D mediante software</i> .....                                            | <b>34</b>  |
| <b>3.4.2.</b>   | <i>Procesos de manufactura</i> .....                                                               | <b>35</b>  |
| <b>3.5.</b>     | <b>Diseño de detalle</b> .....                                                                     | <b>35</b>  |
| <b>3.5.1.</b>   | <i>Diseño de engranajes de tornillo sinfín-corona</i> .....                                        | <b>35</b>  |
| <b>3.5.1.1.</b> | <i>AGMA 6022-C93</i> .....                                                                         | <b>35</b>  |
| <b>3.5.1.2.</b> | <i>AGMA 6034-B92</i> .....                                                                         | <b>42</b>  |
| <b>3.5.2.</b>   | <i>Diseño de ejes</i> .....                                                                        | <b>50</b>  |
| <b>3.5.2.1.</b> | <i>Diseño del eje del tornillo sinfín aplicando AGMA 6022-C93</i> .....                            | <b>51</b>  |
| <b>3.5.2.2.</b> | <i>Diseño del eje de la corona aplicando ASME B106.1M</i> .....                                    | <b>57</b>  |
| <b>3.5.3.</b>   | <i>Selección de rodamientos</i> .....                                                              | <b>64</b>  |
| <b>3.5.3.1.</b> | <i>Rodamientos para eje de la corona helicoidal</i> .....                                          | <b>64</b>  |
| <b>3.5.3.2.</b> | <i>Rodamientos para el eje del tornillo sinfín</i> .....                                           | <b>69</b>  |
| <b>3.5.4.</b>   | <i>Selección de anillos retenedores</i> .....                                                      | <b>71</b>  |
| <b>3.5.4.1.</b> | <i>Anillos para eje de la corona helicoidal</i> .....                                              | <b>72</b>  |
| <b>3.6.</b>     | <b>Validación mediante software ANSYS</b> .....                                                    | <b>73</b>  |
| <b>3.6.1.</b>   | <i>Corona helicoidal</i> .....                                                                     | <b>73</b>  |
| <b>3.6.2.</b>   | <i>Eje de la corona helicoidal</i> .....                                                           | <b>78</b>  |
| <b>3.6.3.</b>   | <i>Tornillo sinfín</i> .....                                                                       | <b>84</b>  |
| <b>3.6.4.</b>   | <i>Carcasa</i> .....                                                                               | <b>90</b>  |
| <b>3.7.</b>     | <b>Construcción y montaje del equipo motorreductor</b> .....                                       | <b>96</b>  |
| <b>3.8.</b>     | <b>Construcción y montaje del banco de pruebas</b> .....                                           | <b>102</b> |
| <b>3.9.</b>     | <b>Protocolo de pruebas</b> .....                                                                  | <b>107</b> |
| <b>3.9.1.</b>   | <i>Primera etapa: régimen bajo de trabajo</i> .....                                                | <b>108</b> |
| <b>3.9.2.</b>   | <i>Segunda etapa: régimen medio de trabajo</i> .....                                               | <b>109</b> |
| <b>3.9.3.</b>   | <i>Tercera etapa: régimen alto de trabajo</i> .....                                                | <b>111</b> |
| <b>3.9.4.</b>   | <i>Presión y amperaje de sobrecalentamiento</i> .....                                              | <b>112</b> |

|                |                                       |            |
|----------------|---------------------------------------|------------|
| <b>3.10.</b>   | <b>Análisis de costos .....</b>       | <b>114</b> |
| <b>3.10.1.</b> | <b><i>Costos directos</i> .....</b>   | <b>114</b> |
| <b>3.10.2.</b> | <b><i>Costos indirectos</i> .....</b> | <b>117</b> |
| <b>3.10.3.</b> | <b><i>Costo total</i> .....</b>       | <b>117</b> |

## **CAPÍTULO IV**

|               |                                                 |            |
|---------------|-------------------------------------------------|------------|
| <b>4.</b>     | <b>RESULTADOS.....</b>                          | <b>118</b> |
| <b>4.1.</b>   | <b>Validación mediante CAE.....</b>             | <b>118</b> |
| <b>4.1.1.</b> | <b><i>Corona helicoidal</i> .....</b>           | <b>118</b> |
| <b>4.1.2.</b> | <b><i>Eje de la corona helicoidal</i> .....</b> | <b>121</b> |
| <b>4.1.3.</b> | <b><i>Tornillo de sinfín</i> .....</b>          | <b>124</b> |
| <b>4.1.4.</b> | <b><i>Carcasa</i> .....</b>                     | <b>127</b> |
| <b>4.2.</b>   | <b>Resultados del protocolo de pruebas.....</b> | <b>129</b> |

|  |                          |            |
|--|--------------------------|------------|
|  | <b>CONCLUSIONES.....</b> | <b>134</b> |
|--|--------------------------|------------|

|  |                             |            |
|--|-----------------------------|------------|
|  | <b>RECOMENDACIONES.....</b> | <b>136</b> |
|--|-----------------------------|------------|

## **BIBLIOGRAFÍA**

## **ANEXOS**

## ÍNDICE DE TABLAS

|                    |                                                                                                      |    |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1-2:</b>  | Propiedades mecánicas y aplicaciones típicas de las aleaciones de aluminio para fundición.....       | 16 |
| <b>Tabla 2-2:</b>  | Grupos de aleación de aluminio fundido.....                                                          | 17 |
| <b>Tabla 1-3:</b>  | Requerimientos del cliente.....                                                                      | 20 |
| <b>Tabla 2-3:</b>  | Análisis de competencia de equipos motorreductores.....                                              | 22 |
| <b>Tabla 3-3:</b>  | Parámetros técnicos.....                                                                             | 23 |
| <b>Tabla 4-3:</b>  | Parámetros técnicos.....                                                                             | 26 |
| <b>Tabla 5-3:</b>  | Criterios de valoración de las alternativas.....                                                     | 32 |
| <b>Tabla 6-3:</b>  | Evaluación del peso específico del criterio “dimensiones”.....                                       | 33 |
| <b>Tabla 7-3:</b>  | Evaluación del peso específico del criterio “costo”.....                                             | 33 |
| <b>Tabla 8-3:</b>  | Evaluación del peso específico del criterio “relación de transmisión”.....                           | 33 |
| <b>Tabla 9-3:</b>  | Evaluación del peso específico del criterio “tiempo de vida útil”.....                               | 34 |
| <b>Tabla 10-3:</b> | Evaluación del peso específico del criterio “potencia de salida”.....                                | 34 |
| <b>Tabla 11-3:</b> | Evaluación de la prioridad de las alternativas.....                                                  | 34 |
| <b>Tabla 12-3:</b> | Datos de diseño de la caja motorreductora.....                                                       | 36 |
| <b>Tabla 13-3:</b> | Número mínimo de dientes de la corona sugerido para diseños habituales....                           | 37 |
| <b>Tabla 14-3:</b> | Ángulo mayor de avance asociado con un ángulo de presión norma de engrane tornillo sinfn-corona..... | 39 |
| <b>Tabla 15-3:</b> | Propiedades mecánicas de la aleación de bronce SAE 64.....                                           | 49 |
| <b>Tabla 16-3:</b> | Propiedades mecánicas del acero AISI 1045.....                                                       | 55 |
| <b>Tabla 17-3:</b> | Dimensiones de la cuña eje del tornillo sinfn.....                                                   | 57 |
| <b>Tabla 18-3:</b> | Momentos y Torques medios y amplitud del eje de la corona.....                                       | 62 |
| <b>Tabla 19-3:</b> | Deformaciones en el eje de la corona del sinfn.....                                                  | 63 |
| <b>Tabla 20-3:</b> | Dimensiones de la cuña eje de la corona.....                                                         | 66 |
| <b>Tabla 21-3:</b> | Confiabilidad rodamientos.....                                                                       | 67 |
| <b>Tabla 22-3:</b> | Geometría de rodamiento A en el eje de corona helicoidal.....                                        | 69 |
| <b>Tabla 23-3:</b> | Geometría de rodamiento A en el eje del tornillo sinfn.....                                          | 72 |
| <b>Tabla 24-3:</b> | Geometría de rodamiento A en el eje del tornillo sinfn.....                                          | 72 |
| <b>Tabla 25-3:</b> | Geometría de rodamiento C en el eje de corona helicoidal.....                                        | 73 |
| <b>Tabla 26-3:</b> | Geometría anillos de fijación de la corona helicoidal.....                                           | 75 |
| <b>Tabla 27-3:</b> | Propiedades físicas y mecánicas de la corona helicoidal.....                                         | 76 |
| <b>Tabla 28-3:</b> | Propiedades físicas y mecánicas del eje de la corona helicoidal.....                                 | 82 |
| <b>Tabla 29-3:</b> | Propiedades físicas y mecánicas del tornillo sin fin.....                                            | 88 |
| <b>Tabla 30-3:</b> | Propiedades físicas y mecánicas de la carcasa del motorreductor .....                                | 94 |

|                    |                                           |     |
|--------------------|-------------------------------------------|-----|
| <b>Tabla 31-3:</b> | Subsistemas del equipo motorreductor..... | 119 |
| <b>Tabla 32-3:</b> | Costos de materiales e insumos.....       | 120 |
| <b>Tabla 33-3:</b> | Costos de mano de obra.....               | 121 |
| <b>Tabla 34-3:</b> | Costos de máquinas y herramientas.....    | 121 |
| <b>Tabla 35-3:</b> | Costos directos totales.....              | 121 |
| <b>Tabla 36-3:</b> | Costos indirectos.....                    | 122 |
| <b>Tabla 37-3:</b> | Costos totales.....                       | 122 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                     |                                                                                               |    |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1-2:</b>  | Tablero de control del torno Gsk 980 TDb.....                                                 | 13 |
| <b>Figura 2-2:</b>  | Tablero de control de la fresadora FANUC 0iMF.....                                            | 13 |
| <b>Figura 3-2:</b>  | Generadora de engranajes.....                                                                 | 13 |
| <b>Figura 4-2:</b>  | Pasos en la construcción de un molde sencillo de arena para hacer un<br>vaciado en arena..... | 15 |
| <b>Figura 1-3:</b>  | Casa de la Calidad.....                                                                       | 25 |
| <b>Figura 2-3:</b>  | Análisis funcional nivel 0.....                                                               | 27 |
| <b>Figura 3-3:</b>  | Análisis funcional nivel 1.....                                                               | 28 |
| <b>Figura 4-3:</b>  | Matriz morfológica.....                                                                       | 29 |
| <b>Figura 5-3:</b>  | Alternativa 1 de equipo motorreductor.....                                                    | 30 |
| <b>Figura 6-3:</b>  | Alternativa 2 de equipo motorreductor.....                                                    | 31 |
| <b>Figura 7-3:</b>  | Alternativa 3 de equipo motorreductor.....                                                    | 31 |
| <b>Figura 8-3:</b>  | Factor de materiales Cs para distancias de centro menores a 76 mm.....                        | 43 |
| <b>Figura 9-3:</b>  | Factor de corrección de relación Cm para relaciones de 3 a 19,9.....                          | 44 |
| <b>Figura 10-3:</b> | Factor de velocidades en el rango de 0 a 30 m/s.....                                          | 44 |
| <b>Figura 11-3:</b> | Factor de servicio para engranajes de tornillos sinfín-corona.....                            | 47 |
| <b>Figura 12-3:</b> | Factor de fricción para velocidades de deslizamiento entre 0 y 30 m/s.....                    | 48 |
| <b>Figura 13-3:</b> | Análisis de fuerzas del conjunto reductor.....                                                | 51 |
| <b>Figura 14-3:</b> | Diagrama para el cálculo de reacciones en los apoyos.....                                     | 53 |
| <b>Figura 15-3:</b> | Diagrama de cuerpo libre del eje del tornillo sinfín.....                                     | 56 |
| <b>Figura 16-3:</b> | Cuña para el eje del tornillo sinfín.....                                                     | 57 |
| <b>Figura 17-3:</b> | Diagrama de cuerpo libre del eje de la corona.....                                            | 59 |
| <b>Figura 18-3:</b> | Diagrama de momentos flectores en el plano YZ.....                                            | 60 |
| <b>Figura 19-3:</b> | Diagrama de momentos flectores en el plano XZ.....                                            | 61 |
| <b>Figura 20-3:</b> | Comprobación de velocidades crítica y de operación para el eje de la<br>corona.....           | 65 |
| <b>Figura 21-3:</b> | Cuña para el eje de la corona.....                                                            | 66 |
| <b>Figura 22-3:</b> | Rodamiento rígido de bolas.....                                                               | 69 |
| <b>Figura 23-3:</b> | Rodamiento rígido de bolas.....                                                               | 71 |
| <b>Figura 24-3:</b> | Rodamiento rígido de bolas.....                                                               | 72 |
| <b>Figura 25-3:</b> | Rodamiento rígido de bolas.....                                                               | 73 |
| <b>Figura 26-3:</b> | Anillos de fijación.....                                                                      | 74 |
| <b>Figura 27-3:</b> | Especificación para anillos retenedores DIN 472.....                                          | 74 |
| <b>Figura 28-3:</b> | Corona helicoidal seccionada con SpaceClaim.....                                              | 75 |

|                     |                                                                                           |     |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 29-3:</b> | Interfaz de ingreso de las propiedades de la corona helicoidal en el software ANSYS.....  | 76  |
| <b>Figura 30-3:</b> | Fuerza equivalente aplicada en la cara del diente.....                                    | 77  |
| <b>Figura 31-3:</b> | Restricción de frontera en el sólido seccionado.....                                      | 78  |
| <b>Figura 32-3:</b> | Calidad de malla en la corona seccionada.....                                             | 79  |
| <b>Figura 33-3:</b> | Métrica de malla de ANSYS 2020 R1.....                                                    | 79  |
| <b>Figura 34-3:</b> | Métrica de elementos versus número de elementos.....                                      | 80  |
| <b>Figura 35-3:</b> | Parametrización de variables.....                                                         | 81  |
| <b>Figura 36-3:</b> | Análisis de convergencia.....                                                             | 81  |
| <b>Figura 37-3:</b> | Eje de la corona.....                                                                     | 82  |
| <b>Figura 38-3:</b> | Aplicación de fuerzas y momentos equivalentes en el eje de la corona.....                 | 83  |
| <b>Figura 39-3:</b> | Restricciones de frontera para el eje de la corona.....                                   | 84  |
| <b>Figura 40-3:</b> | Calidad de malla del eje de la corona.....                                                | 85  |
| <b>Figura 41-3:</b> | Métrica de malla de ANSYS 2020 R1.....                                                    | 85  |
| <b>Figura 42-3:</b> | Métrica de elementos versus número de elementos.....                                      | 86  |
| <b>Figura 43-3:</b> | Parametrización de variables.....                                                         | 86  |
| <b>Figura 44-3:</b> | Análisis de convergencia.....                                                             | 87  |
| <b>Figura 45-3:</b> | Tornillo sin fin.....                                                                     | 88  |
| <b>Figura 46-3:</b> | Aplicación de fuerzas y momento en el tornillo sin fin.....                               | 89  |
| <b>Figura 47-3:</b> | Restricciones de frontera para el tornillo sin fin.....                                   | 90  |
| <b>Figura 48-3:</b> | Calidad de malla del tornillo sin fin.....                                                | 91  |
| <b>Figura 49-3:</b> | Métrica de malla de ANSYS 2020 R1 del tornillo sin fin.....                               | 91  |
| <b>Figura 50-3:</b> | Métrica de elementos versus número de elementos del tornillo sin fin.....                 | 92  |
| <b>Figura 51-3:</b> | Parametrización de variables del tornillo sin fin.....                                    | 92  |
| <b>Figura 52-3:</b> | Análisis de convergencia tamaño del elemento vs esfuerzo máximo del tronillo sin fin..... | 93  |
| <b>Figura 53-3:</b> | Carcasa.....                                                                              | 94  |
| <b>Figura 54-3:</b> | Análisis de la carcasa.....                                                               | 95  |
| <b>Figura 55-3:</b> | Análisis de las cargas soportadas por la caja.....                                        | 96  |
| <b>Figura 56-3:</b> | Presión interna del aceite en la caja.....                                                | 97  |
| <b>Figura 57-3:</b> | Calidad de malla de la caja.....                                                          | 98  |
| <b>Figura 58-3:</b> | Calidad mínima de malla de la caja.....                                                   | 98  |
| <b>Figura 59-3:</b> | Métrica de elementos versus número de elementos de la malla.....                          | 99  |
| <b>Figura 60-3:</b> | Convergencia de elementos de la malla.....                                                | 99  |
| <b>Figura 61-3:</b> | Análisis de convergencia tamaño del elemento vs esfuerzo máximo de la caja.....           | 100 |

|                     |                                                                                        |     |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 62-3:</b> | Impresión 3D de la carcasa.....                                                        | 100 |
| <b>Figura 63-3:</b> | Carcasa rectificada de aluminio 1100.....                                              | 101 |
| <b>Figura 64-3:</b> | Carcasa empernada.....                                                                 | 102 |
| <b>Figura 65-3:</b> | Tornillo sinfín de acero AISI 1045.....                                                | 102 |
| <b>Figura 66-3:</b> | Diagrama hierro-carbono del acero.....                                                 | 103 |
| <b>Figura 67-3:</b> | Diagrama del tiempo óptimo de temple.....                                              | 104 |
| <b>Figura 68-3:</b> | Corona helicoidal con garganta, hecha de bronce SAE 64.....                            | 105 |
| <b>Figura 69-3:</b> | Montaje de la corona helicoidal en el eje de acero AISI 1018.....                      | 105 |
| <b>Figura 70-3:</b> | Componentes de la caja reductora antes del montaje.....                                | 106 |
| <b>Figura 71-3:</b> | Montaje del tornillo sinfín y del eje de la corona helicoidal.....                     | 106 |
| <b>Figura 72-3:</b> | Caja reductora.....                                                                    | 107 |
| <b>Figura 73-3:</b> | Mordaza de freno.....                                                                  | 107 |
| <b>Figura 74-3:</b> | Pastilla de freno para motocicleta G1054.....                                          | 108 |
| <b>Figura 75-3:</b> | Sistema hidráulico para freno.....                                                     | 108 |
| <b>Figura 76-3:</b> | Motor eléctrico WEG de 1 HP.....                                                       | 109 |
| <b>Figura 77-3:</b> | Banda PIX-x set A27 / 13x686 Li.....                                                   | 109 |
| <b>Figura 78-3:</b> | Disco de freno.....                                                                    | 110 |
| <b>Figura 79-3:</b> | Mesa del banco de pruebas.....                                                         | 110 |
| <b>Figura 80-3:</b> | Motor, caja reductora y sistema de freno montados en la mesa del banco de pruebas..... | 111 |
| <b>Figura 81-3:</b> | Montaje del tornillo regulador y del medidor de nivel de líquido de freno....          | 111 |
| <b>Figura 82-3:</b> | Equipo motorreductor montado en el banco de pruebas.....                               | 112 |
| <b>Figura 83-3:</b> | Registro de temperatura transcurridas 6 horas- Etapa 1.....                            | 113 |
| <b>Figura 84-3:</b> | Registro de temperatura transcurridas 12 horas- Etapa 1.....                           | 113 |
| <b>Figura 85-3:</b> | Registro de temperatura transcurridas 24 horas- Etapa 1.....                           | 114 |
| <b>Figura 86-3:</b> | Registro de temperatura transcurridas 6 horas- Etapa 2.....                            | 115 |
| <b>Figura 87-3:</b> | Registro de temperatura transcurridas 12 horas- Etapa 2.....                           | 115 |
| <b>Figura 88-3:</b> | Registro de temperatura transcurridas 24 horas- Etapa 2.....                           | 116 |
| <b>Figura 89-3:</b> | Registro de temperatura transcurridas 6 horas- Etapa 3.....                            | 116 |
| <b>Figura 90-3:</b> | Registro de temperatura transcurridas 12 horas- Etapa 3.....                           | 117 |
| <b>Figura 91-3:</b> | Registro de temperatura transcurridas 24 horas- Etapa 3.....                           | 117 |
| <b>Figura 92-3:</b> | Rango de presión de sobrecalentamiento.....                                            | 118 |
| <b>Figura 93-3:</b> | Amperaje de sobrecalentamiento.....                                                    | 118 |
| <b>Figura 1-4:</b>  | Deformación máxima en el diente de la corona.....                                      | 123 |
| <b>Figura 2-4:</b>  | Análisis CAE en el diente de la corona.....                                            | 124 |
| <b>Figura 3-4:</b>  | Análisis CAE con el factor de seguridad en el diente de la corona.....                 | 124 |

|                     |                                                                     |     |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 4-4:</b>  | Análisis de fatiga en el diente de la corona.....                   | 125 |
| <b>Figura 5-4:</b>  | Análisis CAE con el factor de seguridad en la corona.....           | 126 |
| <b>Figura 6-4:</b>  | Análisis CAE en el eje.....                                         | 126 |
| <b>Figura 7-4:</b>  | Análisis de resistencia en el eje.....                              | 127 |
| <b>Figura 8-4:</b>  | Análisis de resistencia con el factor de seguridad en el eje.....   | 128 |
| <b>Figura 9-4:</b>  | Análisis CAE de la fatiga en el eje.....                            | 128 |
| <b>Figura 10-4:</b> | Análisis CAE de la fatiga con el factor de seguridad en el eje..... | 129 |
| <b>Figura 11-4:</b> | Análisis CAE de la deformación máxima en el eje de acero.....       | 130 |
| <b>Figura 12-4:</b> | Análisis CAE del esfuerzo equivalente en el eje de acero.....       | 131 |
| <b>Figura 13-4:</b> | Análisis CAE de la fatiga en el eje de acero.....                   | 131 |
| <b>Figura 14-4:</b> | Análisis CAE del factor de seguridad mínimo en el eje de acero..... | 132 |
| <b>Figura 15-4:</b> | Análisis CAE de la deformación máxima de la carcasa.....            | 133 |
| <b>Figura 16-4:</b> | Análisis CAE de los esfuerzos a los que se somete a la caja.....    | 133 |
| <b>Figura 17-4:</b> | Análisis CAE de la vida finita de los elementos de la caja.....     | 134 |

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

|                     |                                                               |     |
|---------------------|---------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Gráfico 1-4:</b> | Temperatura en función del tiempo, etapa 1.....               | 135 |
| <b>Gráfico 2-4:</b> | Temperatura en función del tiempo, etapa 2.....               | 136 |
| <b>Gráfico 3-4:</b> | Temperatura en función del tiempo, etapa 3.....               | 137 |
| <b>Gráfico 4-4:</b> | Temperatura en función del tiempo, comparativa de etapas..... | 137 |

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

- ANEXO A:** ENCUESTAS PRELIMINARES PARA DETERMINAR EL NICHOS DE MERCADO DE LA CAJA MOTOREDUCTORA
- ANEXO B:** RECOPIACIÓN FOTOGRÁFICA DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE LA CAJA REDUCTORA
- ANEXO C:** MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL EQUIPO MOTORREDUCTOR
- ANEXO D:** PLANOS AS BUILT

## RESUMEN

El presente proyecto técnico tuvo como objetivo diseñar y construir un equipo motorreductor aplicando la metodología QFD. Después de recopilar información de varias referencias bibliográficas y aplicar encuestas a personal relacionado con equipos motorreductores se establecieron los parámetros principales de diseño, los cuales se priorizaron mediante el método ordinal corregido de criterios ponderados, obteniendo así una única solución en cuanto al diseño de materialización y detalle de acuerdo con los requerimientos establecidos en la voz del usuario. Para el diseño de detalle del conjunto reductor se aplicaron las normas AGMA 6034 B92 y AGMA 6022 C93 para la corona y el tornillo sinfín respectivamente. Para el diseño de detalle de los ejes se aplicó la norma ASME B106.1M. El resto de los elementos mecánicos fueron diseñados mediante la teoría impartida para el diseño de elementos de máquina de autores reconocidos y ampliamente utilizados en el nivel superior de educación. Se aplicó ingeniería asistida por computadora CAE mediante el software Ansys 2020 R1 para validar los resultados de resistencia y deformación obtenidos mediante los métodos de diseño tradicional en los distintos componentes del equipo motorreductor. Se diseñó y construyó un banco de pruebas capaz de someter el equipo motorreductor a cargas de trabajo con el objetivo de verificar el correcto funcionamiento de este además de su resistencia y fiabilidad. Se halló que la presión óptima de frenado para un tiempo de trabajo de 8 horas diarias es de 20 psi. Después de realizar el análisis de costos pertinente se identificó la posibilidad de competir con los productos del mercado local, dando apertura a estudios futuros relacionados con la producción de equipos motorreductores en el país. Es recomendable continuar con el estudio del motorreductor empleando diferentes materiales en la construcción, tratamientos térmicos o procesos de manufactura para reducir el costo de producción.

**Palabras clave:** <MOTORREDUCTOR> <METODOLOGÍA QFD> <INGENIERÍA ASISTIDA POR COMPUTADORA (CAE)> <BANCO DE PRUEBAS> <ANSYS (SOFTWARE)>.

1651-DBRA-UTP-2022



## SUMMARY

This technical project aimed to design and build a geared motor unit applying the QFD methodology. After collecting information from several bibliographical references and applying surveys to personnel related to gear motor equipment, the main design parameters were established. They were prioritized through the corrected ordinal method of weighted criteria, thus obtaining a single solution in terms of materialization design and detail according to the requirements established in the user's voice. For the detailed design of the reducer assembly, the AGMA 6034 B92 and AGMA 6022 C93 standards were applied for the crown and the endless screw, respectively. For the detailed design of the shafts, the ASME B106.1M standard was applied. The rest of the mechanical elements were designed using the theory taught for the design of machine elements by well-known and widely used authors at the higher level of education. CAE computer-aided engineering was applied using the Ansys 2020 R1 software to validate the strength and deformation results obtained through traditional design methods in the different components of the gear motor equipment. A test bench capable of subjecting the geared motor unit to workloads was designed and built to verify its correct operation and its resistance and reliability. The optimal brake pressure was found for a working time of 8 hours per day is 20 psi. After carrying out the pertinent cost analysis, the possibility of competing with the local market products was identified, opening up future studies related to the production of motor-reducer equipment in the country. Therefore, it is advisable to continue studying the geared motor using different materials in construction, heat treatments, or manufacturing processes to reduce the cost of production.

**Keywords:** <GEARMOTOR> <QFD METHODOLOGY> <COMPUTER AIDED ENGINEERING (CAE)> <TEST BENCH> <ANSYS (SOFTWARE)>.



Lcda. Sandra Leticia Guijarro P. Mgs  
C.I.: 0603366113

## INTRODUCCIÓN

Un reductor de velocidad es una pieza mecánica clave en la producción industrial, ya que estas están presentes en toda la maquinaria disponible para los procesos de manufactura y se extiende desde la industria destinada a la producción de vehículos y maquinaria agrícola hasta procesos industriales para la producción de medicamentos, por lo que la presencia de reductores de velocidad es fundamental para los procesos industriales. (González Gómez, 2008).

La principal función de los reductores es el cuidado de los engranajes para mantenerlos en una operación confiable libre de problemas e imprevistos durante largos años en todas las máquinas de potencia que trabajen en altas revoluciones desde 900 [r.p.m] en adelante; además de que como su nombre lo indica es utilizado para reducir su velocidad de manera segura y eficiente sin sacrificar potencia, lo que aporta a alargar la vida útil de la maquinaria utilizada trayendo consigo un mejor rendimiento de los procesos industriales, ya que disminuye la inversión por adquisición de nueva maquinaria así como también reduce los costos y tiempos por mantenimiento en las empresas. (González Gómez, 2008).

A la principal función de las maquinas reductoras se suman las tareas de minimizar el desgaste en engranes y partes en movimiento adyacentes, reducir fricción y en consecuencia requerimientos de energía, actuar como enfriador y disipador de calor, prevenir la corrosión, reducir ruido, vibración y cargas de impacto entre engranes y mantener lejos a los agentes contaminantes; todas estas características hacen a los motorreductores una pieza fundamental en el normal funcionamiento de la maquinaria industrial. (Tornero, 2015).

Para el correcto mecanizado y construcción los reductores son diseñados a base de engranajes, mecanismos circulares y dentados con geometrías especiales de acuerdo con su tamaño y la función en cada motor. Sin la correcta fabricación de los motorreductores, las máquinas pueden presentar fallas y deficiencias en su funcionamiento. La presencia de ruidos y recalentamientos pueden ser aspectos que dependan de estos mecanismos, de allí la importancia del control de calidad; además de que se debe enfatizar la correcta construcción de los motorreductores, para lo cual se deben emplear equipos de alta precisión (Tornero, 2015); por lo que en la presente investigación se busca diseñar y construir motorreductores con una alta precisión y costos bajos de producción para que se pueda producir estas piezas en serie, lo que beneficiaría al sector industrial de la provincia de Chimborazo y que se podrá escalar a nivel nacional mejorando la economía nacional.

## CAPÍTULO I

### 1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

#### 1.1. Antecedentes

En el sistema económico mundial, América Latina no desempeñaba un papel protagonista, de hecho, la tarea específica era la de producir alimentos y materias primas para los grandes centros industriales. Es decir, no había espacio para la industrialización, sin embargo, acontecimientos históricos como las guerras mundiales y las crisis económicas, han dado una luz a los países de América Latina, mostrándoles el camino de la actividad industrial. Es en este marco de crecimiento industrial en los países latinos, como Ecuador, que la mejora de equipos de máquina es indispensable, al respecto Prebisch sostiene que una de las condiciones primordiales para que el desarrollo industrial cumpla con el fin social de elevar el nivel de vida, es disponer de los mejores equipos de maquinaria e instrumentos. (Prebisch, 2012 págs. 21-24).

En la transición de una economía basada en la producción de materia prima a una basada en la actividad industrial, se requieren varios equipos de maquinaria como motores, cajas de reducción, motocultores, cosechadoras, etc. Resulta indispensable que estos equipos tengan una calidad de primera, sin embargo, esto no ocurre con los equipos que se producen en Ecuador debido a que se usan procesos de diseño empíricos, los cuales no aplican metodologías comprobadas como QFD o SixSigma. (Correa, 2018 págs. 40-72).

En el Reino Unido, según (Martins y Aspinwall, 2001), los beneficios de uso del QFD estarían vinculados con el desarrollo de nuevos productos y se manifestarían en menores costos, tiempos y número de defectos. Lo cual pone en evidencia que la implementación de metodologías para el desarrollo de productos tiene efectos positivos en cuanto a términos de calidad y costos.

En el campo industrial existen varias aplicaciones donde el uso de un motor, de cualquier tipo, es necesario para realizar un proceso o brindar algún servicio, estas aplicaciones requieren el aprovechamiento del trabajo generado por el motor en condiciones específicas, es decir funcionan a distintas velocidades y con distintos tipos de carga, para ello se implementa el diseño y aplicación de una caja reductora, ya que resulta difícil adquirir varios motores que cumplan con los requerimientos de la máquina en cuestión, recalcando que las condiciones que brinda el motor inicialmente se deben transformar para obtener las condiciones finales requeridas en el proceso. (Lasheras, 1981 págs. 820-825).

Las cajas reductoras son una solución ingenieril que transforman estas condiciones iniciales, mediante la aplicación de sistemas compuestos por varios engranes, ya sean rectos, cónicos, helicoidales o tornillos sin fin, estos elementos se encuentran apoyados sobre ejes sólidos diseñados específicamente para resistir las fuerzas y velocidades que genera este sistema, a su vez estos ejes se encuentran apoyados sobre rodamientos que de igual manera deben ser seleccionados específicamente para el tipo de cargas a la que está sometido el eje. (Shackelford, 2014 págs. 405-406).

Finalmente, todo está montado en una carcasa que se recomienda esté cerrada al ambiente, ya que esta contendrá el lubricante necesario para la refrigeración de los elementos antes mencionados, los cuales generan calor por el rozamiento que se genera en el choque de los elementos móviles, los ejes se ensamblarán en la carcasa con la ayuda de acoples que serán elegidos de forma adecuada para el correcto funcionamiento de todo el sistema en conjunto. (Shackelford, 2014 págs. 406-407).

## **1.2. Delimitación**

### ***1.2.1. Delimitación espacial***

La presente investigación servirá para la producción de piezas motorreductores en la provincia de Chimborazo; por lo que, a priori estableceremos que los límites espaciales de la investigación serán los sitios en los que se pueda realizar la producción, venta y aplicación de estas piezas en la provincia. Además de que como espacio físico la investigación hará base en la ESPOCH, en donde se realizaron los cálculos y la propuesta del diseño de la caja motorreductora.

### ***1.2.2. Delimitación sectorial***

La presente investigación tendrá aplicación en los sectores productivos de la provincia de Chimborazo, por lo que principalmente se busca que se pueda comercializar en los sectores dedicados a la manufactura y a los sectores agroindustriales que son los más representativos en la economía de la provincia, por lo que el diseño de la caja motorreductora será acoplado para el normal funcionamiento de la maquinaria necesaria para producción en los sectores antes mencionados; para lograr hacer más competitivo este sector, además de encontrar un nicho ideal para la comercialización de este prototipo.

### **1.3. Formulación del problema**

El desarrollo de la industria en la zona centro del país ha creado un nicho de mercado para empresas que se dedican a la construcción de equipos mecánicos, enmarcando esta problemática dichas empresas han encaminado su producción enfocándose en la agroindustria y en la industria metalúrgica. (Monge, 2019).

En la actualidad los equipos mecánicos logran facilitar y realizar de manera más eficiente una tarea, teniendo en cuenta que la mayoría de la maquinaria mecánica emplea un motor eléctrico como fuente de entrada de potencia, sin embargo, existen mayores requerimientos para diferentes procesos como la velocidad angular de salida o el torque disponible, por lo cual se ve la necesidad de emplear motorreductores para cumplir con los parámetros de diseño y trabajo. (Capello, 2013 págs. 40-42)

Esto ha incitado que las empresas recurran a motorreductores de producción nacional, en los cuales el diseño se los realiza sin aplicar una metodología adecuada de diseño y que a su vez la construcción se hace de manera empírica sin criterios de ingeniería, esto provoca que varias empresas recurran a la importación de motorreductores de países como Colombia, Perú o China, obteniendo como resultado que la industria ecuatoriana quede por fuera en la competencia contra dichos países. (Monge, 2019, págs. 123-128).

Consecuentemente la producción de equipos motorreductores es un proceso que se debe implementar en la industria ecuatoriana. Para llevar a cabo con éxito esta transición entre una producción artesanal y una producción con bases en la ingeniería es fundamental crear un prototipo de equipo motorreductor diseñado mediante la metodología QFD, misma que ayudara a garantizar la calidad del producto a su vez que este sea fácil de reproducir y que su costo de producción pueda competir con los valores que se maneja en el mercado actual, con productos nacionales e importados.

### **1.4. Objetivos**

#### ***1.4.1. Objetivo general***

Diseñar y construir un equipo motorreductor aplicando metodología QFD para la industria ecuatoriana.

#### ***1.4.2. Objetivos específicos***

- Aplicar la metodología QFD para satisfacer los requerimientos de diseño del grupo reductor según la normativa AGMA.
- Generar el prototipo del motorreductor mediante CAD-CAM-CAE.
- Generar la carcasa del equipo motorreductor mediante una fundición de aluminio.
- Construir el grupo reductor y aplicar el tratamiento térmico más adecuado.
- Construir un banco de pruebas para medir la potencia consumida y temperatura del equipo motorreductor.

## CAPÍTULO II

### 2. REVISIÓN DE LITERATURA Y FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 2.1. Equipo motorreductor

Según (Budynas, 2012, págs. 201-208), un motorreductor es una máquina compacta que junta un reductor de velocidad y un motor eléctrico el cual sirve para controlar la velocidad de un equipo mecánico de forma automática, en la industria existen varios tipos de motorreductores los cuales se enlistan a continuación.

##### 2.1.1. *Reductores de ejes paralelos*

Se transmite la potencia en línea recta, esto debido a que el eje de entrada está posicionado en la misma dirección que el eje de salida su principal ventaja es que presentan alta resistencia a las fuerzas radiales. (Budynas, 2012, págs. 201-208).

##### 2.1.2. *Reductores de ejes cónicos*

Son aquellos donde el eje de entrada y el eje de salida están perpendiculares uno con el otro, la mayor ventaja de este tipo de reductores es que permite una gran reducción de velocidad con pocas etapas. (BorgWarner, 2021 págs. 208-221).

##### 2.1.3. *Reductores planetarios*

Son reductores en donde la transmisión de potencia se da de forma coaxial esto quiere decir que la velocidad del eje de entrada se transmite a un engranaje anular y es transformada por tres o más ruedas planetarias, este tipo de reductores presentan tres etapas (BorgWarner, 2021 págs. 208-221):

- Sol o engrane central
- Portaplanetas o carriel
- Corona o anillo exterior

## 2.2. Metodología QFD

La metodología QFD se define como el despliegue de la función de la calidad por sus siglas en inglés (Quality Function Deployment), lo cual hace referencia a una metodología para diseño que define el producto de forma muy consistente y acorta los tiempos de desarrollo de este. (Budynas, 2012, págs. 201-208).

Tiene como objetivo traducir las demandas de un cliente en especificaciones técnicas donde la información que se obtiene mediante encuestas, entrevistas y formularios la cual permite acceder a clientes potenciales y mediante una muestra de datos la cual se procesa de manera estadística saber los requerimientos que el cliente necesita obtener de un determinado producto. La metodología QFD se la divide en 4 etapas (Budynas, 2012, págs. 201-208):

- **Planificación del producto:** Traduce las demandas de los clientes en especificaciones técnicas que debe tener un determinado producto.
- **Despliegue de componentes:** Convierte las especificaciones del producto en particularidades de los componentes.
- **Planificación del proceso:** Traduce los detalles de los componentes en características del proceso de manufactura.
- **Planificación de la producción:** traduce las demandas del proceso de manufactura en la planificación de la producción. (Zaidi, 2015 págs. 132-133).

## 2.3. Metodología del diseño

El desarrollo de un producto o equipo mecánico se lo puede realizar utilizando el proceso de diseño que consta de 4 etapas mismas que se describen a continuación. (Zaidi, 2015 págs. 132-133).

### 2.3.1. Planificación del producto

La planificación del producto tiene como objetivo traducir las demandas o requerimientos de los clientes en especificaciones técnicas de un cierto producto, esta se desarrolla mediante la casa de la calidad, de esta manera se obtiene como resultado las características básicas que un producto tendrá en función de los clientes potenciales. (Zaidi, 2015 págs. 132-133).

La casa de calidad se utiliza para identificar las posibles correlaciones que puede existir entre los requerimientos del usuario y las especificaciones técnicas de los ingenieros, a continuación, se enlistan los pasos para realizar la casa de la calidad. (Zaidi, 2015 págs. 159-160).

- Voz del usuario
- Análisis de competitividad
- Voz del ingeniero
- Correlaciones
- Evaluación técnica
- Compromisos técnicos

### ***2.3.2. Diseño conceptual***

Después de definir las características técnicas del producto, se debe realizar el análisis conceptual, mismo que se realiza basado en la estructura funcional del equipo. (Correa, 2018 págs. 1087-1090).

Del análisis funcional el grupo de ingenieros a cargo del proyecto decide la definición del diseño conceptual, puesto que pueden elegir entre la estructura funcional del equipo o una estructura modular, en cualquiera de los dos casos se genera posibles soluciones, ya sea para el equipo completo o para cada módulo, finalmente se evalúan y se seleccionan las mejores alternativas de diseño. (Correa, 2018 págs. 1087-1090).

### ***2.3.3. Diseño de materialización***

Esta etapa del diseño tiene como objetivo generar los planos de conjunto de la alternativa seleccionada y determinar los procesos de manufactura más adecuados. (Zaidi, 2015 págs. 20-27).

#### ***2.3.3.1. Protocolo de pruebas***

El ensayo es uno de los pasos fundamentales en el diseño de materialización donde las empresas dedican importantes recursos humanos, materiales y equipos.

Para realizar este protocolo de pruebas hay que tomar en consideración los siguientes aspectos (Zaidi, 2015 págs. 20-27):

- Definición de los objetivos de prueba.
- Diseño del ensayo.
- Preparación del prototipo y del banco de pruebas.
- Interpretación y validación de los resultados. (Correa, 2018).

#### **2.3.4. *Diseño de detalle***

La última etapa del proceso de diseño, en este se entregan los planos de detalle de cada componente del equipo final, así como también los documentos de fabricación. (Correa, 2018 págs. 1098-2010).

### **2.4. AGMA**

La Asociación Estadounidense de Fabricantes de Engranajes, AGMA por sus siglas en inglés, corresponde a una asociación de consultores, empresas y académicos voluntarios que poseen un interés enfocado en el diseño, aplicación y fabricación de engranajes, acoplamientos y sus distintos componentes y equipos destinados a la transmisión de potencia. (Stott, 2021 págs. 309-406).

Su año de fundación es 1916, la organización AGMA lleva a cabo programas y brinda servicios en la industria de engranajes, impulsada por los miembros y el mercado. Hoy en día, AGMA cuenta con más de 495 empresas miembros de la organización. Entre estas empresas existen fabricantes de engranajes de distintas partes del mundo como Estados Unidos, México y Canadá, sumando alrededor de 30 países con intereses en la fabricación y producción de engranajes. (Stott, 2021 págs. 309-406).

La organización AGMA actualmente está acreditada por la American National Standards Institute ANSI, para redactar cada una de las normas estadounidenses acerca de engranajes. (Stott, 2021 págs. 309-406).

#### **2.4.1. *Normativas para el diseño de engranajes según ANSI-AGMA***

##### **2.4.1.1. *ANSI-AGMA 2001-D04***

La normativa ANSI-AGMA 2001-D04: Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth, es una normativa que describe las diferentes fórmulas y coeficientes para el diseño de engranajes rectos y helicoidales de perfil de evolvente considerando la resistencia a la flexión y al desgaste. (ANSI-AGMA, 2004 págs. 2005-2008).

#### *2.4.1.2. ANSI-AGMA 2003-B97*

La normativa ANSI-AGMA 2003-B97: Rating the Pitting Resistance and Bending Strength of Generated Straight Bevel, Zerol Bevel, and Spiral Bevel Gear Teeth, describe el proceso de diseño para engranajes cónicos rectos, cónicos helicoidales y cónicos con espiral considerando la resistencia a la flexión y el desgaste. (ANSI-AGMA, 2004 págs. 2025-2028).

#### *2.4.1.3. ANSI-AGMA 6034-B92*

La normativa ANSI-AGMA 6034-B92: Practice for Enclosed Cylindrical Wormgear Speed Reducers and Gearmotors, se aplica a la clasificación y el diseño de reductores de velocidad y motorreductores de engranajes helicoidales cilíndricos que tengan ejes de salidas solidos o huecos y reducciones de una o varias etapas que no sobrepasen los 3600 rpm. (ANSI-AGMA, 2004 págs. 2025-2028).

#### *2.4.1.4. ANSI-AGMA 6022-C93*

La normativa ANSI-AGMA 6022-C93: Design Manual for Cylindrical Wormgearing, describe una amplia gama de parámetros para el diseño geométrico y criterios de resistencia a la flexión y al desgaste para tornillos sin fin cilíndricos de paso fino y paso grueso. (ANSI-AGMA, 2004 págs. 2025-2028).

### ***2.4.2. Materiales para la construcción según ANSI-AGMA***

La normativa ANSI-AGMA 2004-B98: Gear Materials and Heat Treatment Manual, describe un listado de materiales y tratamientos térmicos utilizados para la construcción de las partes de un equipo reductor. (ANSI-AGMA, 2004 págs. 2025-2028).

#### *2.4.2.1. Materiales utilizados para la construcción de engranes*

Según (ANSI-AGMA, 2004 págs. 9-10), para la construcción de engranes rectos, helicoidales y cónicos se deben utilizar aceros de bajo carbono como el AISI 1020 o el AISI 1045 y aceros bonificados como el AISI 4320 o el AISI 9310 debido a la fácil maquinabilidad que tienen estos materiales, también menciona que la dureza superficial luego de realizar un tratamiento térmico debe estar entre los 24 a 30 HRc.

#### *2.4.2.2. Aleaciones de bronce para la construcción de coronas helicoidales*

(ANSI-AGMA, 2004 págs. 19-20), clasifica las aleaciones de bronce en 4 grupos para la construcción de coronas helicoidales utilizadas en conjuntos reductores de tornillo sin fin, estas son:

- **Bronce fosfórico:** Presenta altas propiedades tribológicas, excelente resistencia al desgaste y a la corrosión, se emplea en la construcción de ruedas helicoidales, cojinetes y accesorios marinos, el más común es el SAE 65 o SAE C90700 que alcanza una dureza de hasta 90 HRc.
- **Bronce al manganeso:** Posee una dureza comparada con la de un acero fundido y recocido, presenta buena resistencia al desgaste, pero baja resistencia a la corrosión y escasas propiedades tribológicas.
- **Bronce al aluminio:** Son similares a los bronce al manganeso, pero más livianos y alcanzan propiedades mecánicas mayores con un tratamiento térmico, presenta una alta resistencia al desgaste y a la corrosión, tienen buenas propiedades tribológicas, su mayor aplicación está en la construcción de coronas helicoidales para reductores de tornillos sin fin, el más común es el SAE 40 o UNS C95500, alcanzan una dureza de hasta 60HRc.
- **Bronce al silicio:** Los bronce al silicio se usan comúnmente en engranajes con carga ligera para aplicaciones eléctricas debido a su bajo costo y a su ausencia de propiedades magnéticas.  
(ANSI-AGMA, 2004 págs. 2025-2028).

## **2.5. Metodología CAD-CAM-CAE**

### **2.5.1. CAD**

La terminología CAD descende del acrónimo en inglés Computer Aided Design, mismo que se traduce como dibujo asistido por computadora es la aplicación de software y hardware al proceso de diseño. (Valencia, 2016 págs. 15-20).

Por lo general un diseño o modelo se realiza con anterioridad para manufactura o analizar los objetos, por lo cual un sistema CAD es siempre necesario para realizar el CAM y el CAE, por esto en la mayoría de los casos se habla de CAD-CAM-CAE, aunque en ocasiones el sistema CAD abarca estas

tres definiciones. En la actualidad ningún proceso industrial masivo ya sea de producción o de diseño se lo realiza sin la implementación del CAD. (Valencia, 2016 págs. 15-20).

## 2.5.2. CAM

También denominada fabricación asistida por computadora combina el software de control numérico con las maquinas herramientas de control numérico (CNC), para manufacturar un producto. (Masip, 2010 págs. 15-20).

### 2.5.2.1. Maquinas herramientas con CNC

Los sistemas de manufactura actuales han evolucionado gracias a los conocidos CNC (Control numérico computacional), debido a las grandes prestaciones y ventajas que le sacan a las maquinas herramientas convencionales, a continuación, se enlistan algunas de las maquinas herramientas con las cuales se va a realizar la manufactura del grupo reductor (Masip, 2010 págs. 15-20):

- Tono Gsk 980 TDb



**Figura 1-2:** Tablero de control del torno Gsk 980 TDb.  
**Fuente:** (Tornero, 2015 pág. 49).

- Fresadora FANUC 0iMF



**Figura 2-2:** Tablero de control de la fresadora FANUC 0iMF.  
**Fuente:** (Tornero, 2015 págs. 50-51).

- Generadora de engranajes



**Figura 3-2:** Generadora de engranajes.  
**Fuente:** (Tornero, 2015 págs. 20-21)

### 2.5.3. CAE

La ingeniería asistida por computadora (computer-aided engineering), busca dar solución a problemas de ingeniería complejos, simulando elementos mecánicos sometidos a las cargas y condiciones de diseño obteniendo como resultado la resistencia mecánica del material, la fatiga, el límite de tensión y el coeficiente de seguridad, mediante programas computacionales que utilicen el método del elemento finito. (Zienkiewicz, 2018 págs. 26-27).

#### 2.5.3.1. Método del elemento finito

También conocido como MEF, es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales, utilizados en diversos problemas de ingeniería y física, la solución de estas ecuaciones diferenciales es aproximada y obtenida en pequeños sectores que conforman el dominio del sistema. (Zienkiewicz, 2018 págs. 40-41).

## **2.6. Fundiciones**

La fundición es un proceso de fabricación de partes metálicas mediante el vertido de metal fundido en un molde vaciado, generalmente hecho de arena. La fundición tiene un principio fácil de entender: el metal se funde, se vacía en un molde y se deja enfriar, sin embargo, hay diversos factores que influyen si se desea obtener una operación óptima de fundición. (Castro, 2009 pág. 12).

Las fundiciones o coladas, en la mayoría de los proyectos de diseño y construcción, conforman la parte fundamental de las máquinas, debido a que la fundición permite obtener, sin grandes dificultades partes de maquinaria de distintas formas y tamaños. (Capello, 2013 pág. 3).

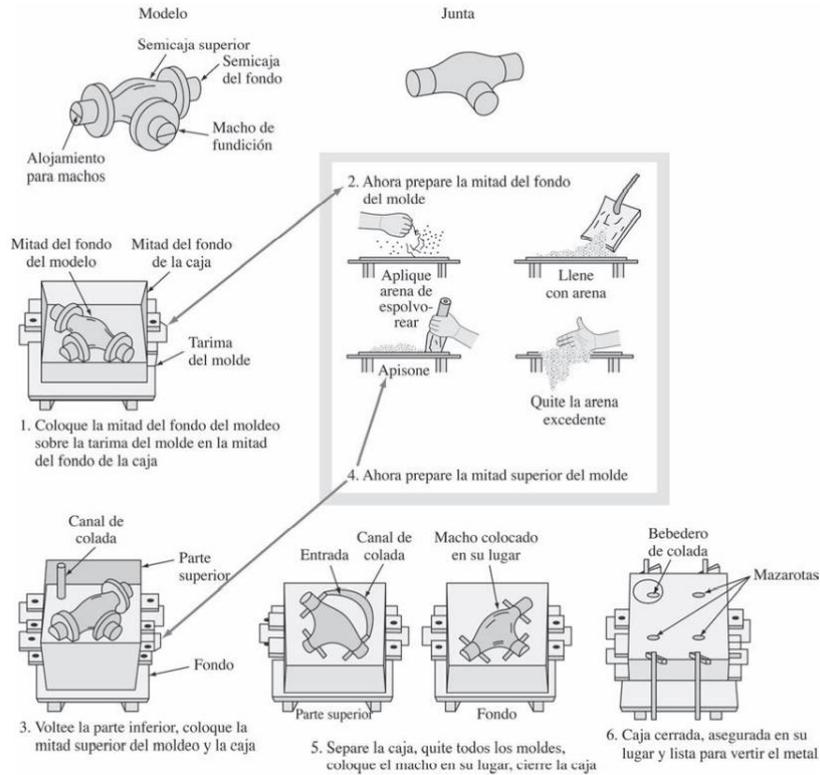
### **2.6.1. Fundición de aluminio**

#### *2.6.1.1. Procesos de moldeo*

Las aleaciones de aluminio generalmente son moldeadas mediante alguno de los procesos principales: modelo en arena, moldeo permanente y fundido de matrices. El modelo en arena es el más versátil y fácil de aplicar entre los procesos de fundición de aluminio. Este proceso normalmente se elige para la producción de cantidades pequeñas de vaciados idénticos, moldeos dificultosos con núcleos complejos, vaciados grandes y fundiciones estructurales. (Smith, y otros, 2006 pág. 416)

Los procesos de fundición que se llevan a cabo mediante vaciado en moldes permanentes con la misma aleación y forma poseen una estructura de grano más fina, debido a que la velocidad de enfriamiento es más rápida en moldes permanentes y presentan resistencias mayores que los vaciados realizados en moldes de arena. (Smith, y otros, 2006 pág. 416)

Cuando se utilizan procesos de fundición mediante fundido de matrices, la velocidad de producción aumenta considerablemente, ya que se pueden fundir partes idénticas a velocidades de vaciado máximas, vertiendo la colada en los moldes de metal bajo presiones considerables. Entre las ventajas más destacables de la fundición mediante matrices son las tolerancias dimensionales de las piezas fundidas, ya que estas pueden mantenerse con mayor precisión que con cualquier otro proceso de fundición. (Smith, y otros, 2006 pág. 217)



**Figura 4-2:** Pasos en la construcción de un molde sencillo de arena para hacer un vaciado en arena.

Fuente: (Smith, y otros, 2006 pág. 417).

### 2.6.1.2. Composiciones de aleaciones de aluminio de fundición

Algunas de las propiedades que se han obtenido con el desarrollo de aleaciones de aluminio son la solidez, ductilidad y resistencia a la corrosión, además de cualidades distintivas en la colada como fluidez y facilidad de vertido. Por lo que, es fácil intuir que las composiciones químicas varían mucho respecto a las que tienen las aleaciones de aluminio forjado. En la tabla 1-2 se muestran las propiedades mecánicas, composiciones químicas y algunas aplicaciones para las aleaciones de aluminio para fundición más comunes. (Smith, y otros, 2006 pág. 414)

**Tabla 1-2:** Propiedades mecánicas y aplicaciones típicas de las aleaciones de aluminio para fundición

| Número de aleación            | Composición química (% en peso) | Estado                  | Resistencia a la tensión |            | Límite elástico |            | Elongación (%) | Aplicaciones típicas                                                     |
|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------|--------------------------|------------|-----------------|------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------|
|                               |                                 |                         | ksi                      | MPa        | ksi             | MPa        |                |                                                                          |
| <b>Aleaciones para fundir</b> |                                 |                         |                          |            |                 |            |                |                                                                          |
| 355.0                         | 5 Si, 1.2 Cu,<br>0.5 Mg         | Moldeo en arena (-T6)   | 32                       | 220 (mín.) | 20              | 138 (mín.) | 2.0            | Alojamiento de bombas, accesorios aeronáuticos, cárter de motores        |
|                               |                                 | Moldeo permanente (-T6) | 37                       | 285 (mín.) | ...             | ...        | 1.5            |                                                                          |
| 356.0                         | 7 Si, 0.3 Mg                    | Moldeo en arena (-T6)   | 30                       | 207 (mín.) | 20              | 138 (mín.) | 3              | Cajas de transmisión, alojamientos de ejes de camiones, ruedas de camión |
|                               |                                 | Moldeo permanente (-T6) | 33                       | 229 (mín.) | 22              | 152 (mín.) | 3              |                                                                          |
| 332.0                         | 9.5 Si, 3 Cu,<br>1.0 Mg         | Moldeo permanente (-T6) | 31                       | 214 (mín.) |                 |            |                | Pistones automotrices                                                    |
| 413.0                         | 12 Si, 2 Fe                     | Fundido de matrices     | 43                       | 297 (mín.) | 21              | 145 (mín.) | 2.5            | Vaciado de piezas grandes y complejas                                    |

**Fuente:** (Smith, y otros, 2006 pág. 414)

**Nota:** El número de aleación corresponde a la designación otorgada por la Aluminum Association. T6= solución tratada térmicamente y luego envejecida de manera artificial.

Según la Aluminum Association, sistema que clasifica las aleaciones de aluminio en Estados Unidos, estas se agrupan según los principales elementos contenidos en la aleación, utilizando un número de cuatro dígitos, como se muestra en la tabla 2-2. (Smith, y otros, 2006 pág. 418)

**Tabla 2-2:** Grupos de aleación de aluminio fundido

|                                                                                  |       |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Aluminio, 99% como mínimo o mas                                                  | 1xx.x |
| <b>Aleaciones de aluminio agrupadas según los principales elementos aleados:</b> |       |
| Cobre                                                                            | 2xx.x |
| Silicio con cobre y/o magnesio agregado                                          | 3xx.x |
| Silicio                                                                          | 4xx.x |
| magnesio                                                                         | 5xx.x |
| Zinc                                                                             | 7xx.x |
| Estaño                                                                           | 8xx.x |
| Otros elementos                                                                  | 9xx.x |
| Series no utilizadas                                                             | 6xx.x |

Fuente: (Smith, y otros, 2006 pág. 418)

## 2.7. Tratamientos térmicos

El Tratamiento Térmico involucra varios procesos de calentamiento y enfriamiento para efectuar cambios estructurales en un material, los cuales modifican sus propiedades mecánicas. El objetivo de los tratamientos térmicos es proporcionar a los materiales unas propiedades específicas adecuadas para su conformación o uso final. No modifican la composición química de los materiales, pero si otros factores tales como los constituyentes estructurales y la granulometría, y como consecuencia las propiedades mecánicas. (Díaz, 2018, págs. 109-117).

En algunos casos, el tratamiento se aplica antes del proceso de formado (recocido para ablandar el metal y ayudar a formarlo más fácilmente mientras se encuentra caliente). En otros casos, se usa para aliviar los efectos del endurecimiento por deformación. Finalmente, se puede realizar al final de la secuencia de manufactura para lograr resistencia y dureza. (Díaz, 2018, págs. 109-117).

### 2.7.1. Etapas del tratamiento térmico

Un tratamiento térmico consta de tres etapas que se presentan a continuación (Díaz, 2018, págs. 109-117):

- Calentamiento hasta la temperatura fijada: La elevación de temperatura debe ser uniforme en la pieza.

- Permanencia a la temperatura fijada: Su fin es la completa transformación del constituyente estructural de partida. Puede considerarse suficiente una permanencia de unos 2 minutos por milímetro de espesor.
- Enfriamiento: Este enfriamiento tiene que ser rigurosamente controlado en función del tipo de tratamiento que se realice.

## 2.7.2. Tipos de tratamientos térmicos

### 2.7.2.1. Recocido

Es un tratamiento térmico que normalmente consiste en calentar un material metálico a temperatura elevada durante largo tiempo, con objeto de bajar la densidad de dislocaciones y, de esta manera, impartir ductilidad. El Recocido se realiza principalmente para (Díaz, 2018, págs. 109-117):

- Alterar la estructura del material para obtener las propiedades mecánicas deseadas, ablandando el metal y mejorando su maquinabilidad.
- Recristalizar los metales trabajados en frío.
- Aliviar los esfuerzos residuales.

Las operaciones de recocido se ejecutan algunas veces con el único propósito de aliviar los esfuerzos residuales en la pieza de trabajo causadas por los procesos de formado previo. Se debe tener en cuenta que el recocido no proporciona generalmente las características más adecuadas para la utilización del acero. Por lo general, al material se le realiza un tratamiento posterior con el objetivo de obtener las características óptimas deseadas. (Díaz, 2018, págs. 109-117).

### 2.7.2.2. Temple

El Temple es un tratamiento térmico que tiene por objetivo aumentar la dureza y resistencia mecánica del material, transformando toda la masa en Austenita con el calentamiento y después, por medio de un enfriamiento brusco (con aceites, agua o salmuera), se convierte en Martensita, que es el constituyente duro típico de los aceros templados. (Díaz, 2018, págs. 109-117).

En el temple, es muy importante la fase de enfriamiento y la velocidad alta del mismo, además, la temperatura para el calentamiento óptimo debe ser siempre superior a la crítica para poder obtener de esta forma la Martensita, existen varios tipos de Temple, clasificados en función del resultado que se quiera obtener y en función de la propiedad que presentan casi todos los aceros, llamada Templabilidad (capacidad a la penetración del temple), que a su vez depende, fundamentalmente, del diámetro o espesor de la pieza y de la calidad del acero. (Díaz, 2018, págs. 109-117).

### *2.7.2.3. Revenido*

El Revenido es un tratamiento complementario del Temple, que generalmente prosigue a éste, después del temple, los aceros suelen quedar demasiados duros y frágiles para los usos a los cuales están destinados. Lo anterior se puede corregir con el proceso de revenido, que disminuye la dureza y la fragilidad excesiva, sin perder demasiada tenacidad. (Díaz, 2018, págs. 109-117).

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Metodología del diseño

Como se planteó en los objetivos del presente proyecto técnico, para el diseño del equipo motorreductor se aplicó la metodología QFD, por tanto, es necesario definir el producto que se desea desarrollar. Como herramienta de recolección de datos se emplea la encuesta, la cual fue aplicada a un grupo de 30 personas relacionadas con equipos motorreductores y de donde se obtuvieron los requerimientos del cliente.

#### 3.2. Definición del producto

El equipo motorreductor debe presentar todas las características solicitadas por el cliente, mismas que son útiles para establecer los parámetros técnicos ingenieriles con el fin de obtener un producto totalmente desarrollado capaz de competir en el mercado local e internacional.

##### 3.2.1. Voz del usuario

Después de encuestar a 30 personas que conocen sobre equipos motorreductores o trabajan con estos, se determinaron las siguientes necesidades del cliente, enlistadas en la tabla 1-3:

**Tabla 1-3:** Requerimientos del cliente

| Clasificación       | Tipo de demanda | Requerimientos del cliente   |
|---------------------|-----------------|------------------------------|
| Capacidad operativa | B               | Ejes no paralelos            |
|                     | B               | Alta reducción de velocidad  |
|                     | O               | Motor de baja potencia       |
| Funcionalidad       | E               | Materiales livianos          |
|                     | B               | Acople fácil al motor        |
|                     | E               | Fácil de montar              |
| Costos              | E               | Bajo costo del motorreductor |
| Durabilidad         | E               | Alta duración del producto   |
|                     | E               | Producto confiable           |
| Estética            | O               | Buena apariencia             |

**Realizado por:** (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

**Nota:** El tipo de demanda corresponde a tres clasificaciones donde B=Básico, O=Unidimensional y E=Estimulante.

### **3.2.2. Análisis de competencia**

De acuerdo con el estudio de mercado realizado en la ciudad de Riobamba se determinó que existen dos clases principales de equipos motorreductores, los de producción nacional y los de producción extranjera. Para realizar el análisis de competencia se escogió una marca nacional, ECUA-RED, y una marca extranjera, Morse Borg-Warner.

#### **3.2.2.1. ECUA-RED**

ECUA-RED es una empresa ecuatoriana ubicada en la provincia de Pichincha en la ciudad de Quito que se dedica a la construcción de cajas reductoras, poleas y todo tipo de función en aluminio, su producto principal son los reductores cuyas características se describen a continuación:

- Dimensiones: 200x100x200 mm
- Peso: 2.5 kg
- Potencia del motor: 0.5 HP
- Relación de transmisión: 1:20
- Costo: \$220
- Mecanismo de entrada de potencia: Polea-Correa
- Velocidad angular del motor: 1750 RPM
- Procedencia: Ecuador

#### **3.2.2.2. Morse Borg-Warner**

Morse Borg-Warner es una empresa estadounidense que se encuentra ubicada en la ciudad de Denver del estado de Colorado que se dedica a la innovación de alternativas de propulsión híbrida de vehículos con más de 130 años de experiencia (BorgWarner, 2021).

Entre sus actividades principales se destaca la producción de equipos motorreductores diseñados con la normativa AGMA como el que se describe a continuación (BorgWarner, 2021):

- Dimensiones: 250x120x160 mm
- Peso: 4 kg
- Potencia del motor: 0.5 HP
- Relación de transmisión: 1:10

- Costo: \$350
- Mecanismo de entrada de potencia: Chavetero-Chaveta
- Velocidad angular del motor: 1750 RPM
- Procedencia: USA

En la tabla 2-3 se resumen los datos más importantes recolectados en el análisis de competencia:

**Tabla 2-3:** Análisis de competencia de equipos motorreductores

| Marca                                      | ECUA-RED                                                                           | Morse Borg-Warner                                                                   |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Gráfico                                    |  |  |
| Dimensiones                                | 200x100x200 mm                                                                     | 250x120x160 mm                                                                      |
| Peso                                       | 2.5 kg                                                                             | 4 kg                                                                                |
| Potencia del motor                         | 0.5 HP                                                                             | 0.5 HP                                                                              |
| Relación de transmisión                    | 1:20                                                                               | 1:10                                                                                |
| Costo                                      | \$220                                                                              | \$350                                                                               |
| Mecanismos de entrada y salida de potencia | Polea-Correa                                                                       | Chavetero-Chaveta                                                                   |
| Velocidad angular del motor                | 1750 RPM                                                                           | 1750 RPM                                                                            |
| Procedencia                                | Ecuador                                                                            | USA                                                                                 |

Fuente: (BorgWarner, 2021 págs. 121-127).

### 3.2.3. Voz del ingeniero

Después de analizar las demandas por parte de los posibles usuarios del equipo motorreductor, se transforman dichas necesidades a términos técnicos con el objetivo de dar una solución con criterios ingenieriles a las demandas planteadas. Después de especificar los parámetros técnicos se asigna un valor de referencia correspondiente, este proceso se detalla en la tabla 3-3:

**Tabla 3-3:** Parámetros técnicos

| <b>Parámetro técnico</b>         | <b>Valor de referencia</b>   |
|----------------------------------|------------------------------|
| Ejes que no se intersecan        | Ejes a 90°                   |
| Relación de transmisión          | 1:20                         |
| Costo del equipo                 | \$350                        |
| Peso máximo del equipo           | 5 kg                         |
| Tiempo de vida útil              | 20000 horas                  |
| Potencia de entrada              | 0.5 HP                       |
| Dimensiones                      | 150x150x100 mm               |
| Mecanismo de entrada de potencia | Polea-Correa                 |
| Diseño mediante normativa        | AGMA                         |
| Versatilidad                     | Entorno con espacio reducido |

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

### **3.2.4. Casa de la calidad**

#### **3.2.4.1. Correlaciones**

Se logra relacionar los requerimientos del cliente con las especificaciones técnicas mediante 4 niveles de relación:

- Fuerte.
- Mediana.
- Débil.
- Ningún tipo de relación.

En palabras más precisas logra computar el grado de cumplimiento de la demanda con la característica técnica escogida. (Zaidi, 2015 págs. 15-20).

#### **3.2.4.2. Evaluación técnica**

(Zaidi, 2015 págs. 15-20), define que la evaluación técnica consiste en evaluar la incidencia de cada característica técnica dentro del producto, donde previamente se debe determinar la importancia de cada una mediante la siguiente fórmula.

$$Imp = \sum I_d * S_{dt} \quad Ec. 1$$

Donde:

Imp: Importancia.

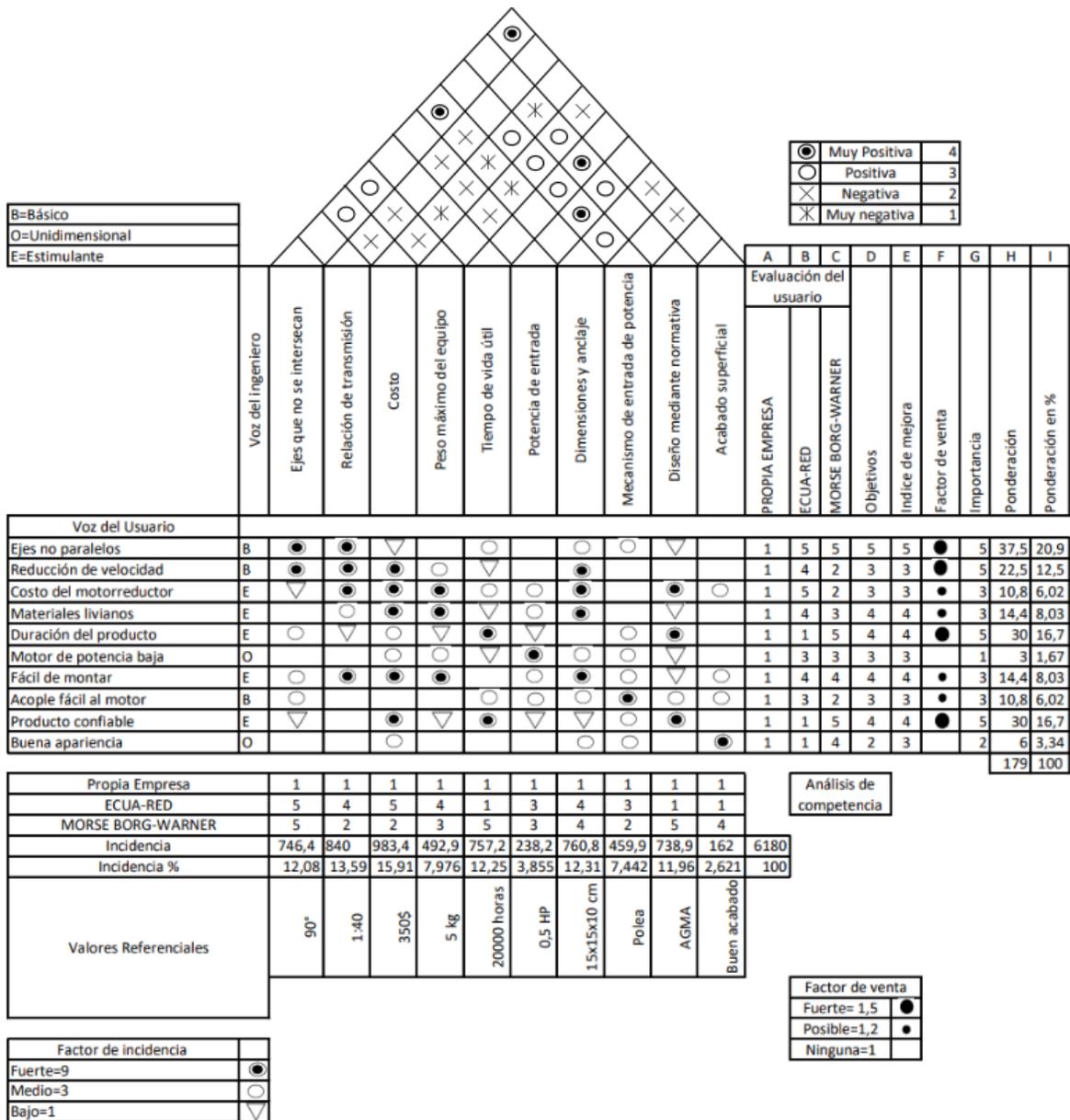
I<sub>d</sub>: Incidencia de la característica técnica.

S<sub>dt</sub>: Valor de ponderación.

### 3.2.4.3. *Compromisos técnicos*

Son aquellos que se sitúan en el techo de la casa de la calidad, sirve para determinar las correlaciones que existen entre las diferentes especificaciones técnicas donde se tiene 3 casos de interacción:

- **Correlación positiva:** Establece que si se mejora una característica técnica otra también mejorara.
- **Correlación negativa:** Establece que si una característica técnica mejora otra se ve afectada empeorando.
- **Sin correlación:** Es donde no existe ninguna influencia de una característica técnica sobre otra. (Correa, 2018 págs. 85-90).



**Figura 1-3:** Casa de la Calidad

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

Después de realizar un análisis de la casa de la calidad se determinó la importancia de los parámetros técnicos que satisfacen las necesidades de los posibles usuarios, a continuación, se enlistan dichos parámetros en orden de importancia:

- Costo
- Relación de transmisión
- Dimensiones y anclaje

- Tiempo de vida útil
- Ejes a 90°
- Diseño mediante normativa
- Peso máximo del equipo
- Potencia de entrada
- Acabado superficial

Obteniendo así las especificaciones técnicas que se describen en la tabla 4-3.

**Tabla 4-3:** Parámetros técnicos

|                                                       |                                       |                                            |     |                                                                        |
|-------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------|-----|------------------------------------------------------------------------|
| <b>Empresa:</b> Grupo de integración curricular       | <b>Producto:</b> Equipo Motorreductor | <b>Fecha Inicial:</b> 18/11/2021           |     |                                                                        |
| <b>Diseñadores:</b><br>Juan Aguirre<br>Javier Hidalgo |                                       | <b>Fecha de culminación:</b><br>01/02/2022 |     |                                                                        |
| Concepto                                              | Fecha                                 | Propone                                    | R/D | Descripción                                                            |
| Costo                                                 | 15/12/2021                            | C                                          | D   | El precio del equipo motorreductor no debe superar los \$350           |
| Relación de transmisión                               | 15/12/2021                            | D                                          | R   | La relación de transmisión es de 1:20                                  |
| Dimensiones y anclaje                                 | 15/12/2021                            | C                                          | R   | El equipo debe ser fácil de transportar e instalar                     |
| Ejes a 90°                                            | 15/12/2021                            | C                                          | R   | Los ejes no deben ser paralelos y no se deben intersecar               |
| Diseño mediante normativa                             | 15/12/2021                            | D                                          | R   | El equipo motorreductor debe estar diseñado mediante la normativa AGMA |
| Peso máximo del equipo                                | 15/12/2021                            | C                                          | D   | El equipo motorreductor no debe sobrepasar los 7 kg                    |
| Potencia de entrada                                   | 15/12/2021                            | D                                          | R   | La potencia de entrada debe ser de 0,5 HP                              |

|                                                                                                                                               |            |   |   |                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|---|---|----------------------------------------------------------|
| Acabado superficial                                                                                                                           | 15/12/2021 | D | R | El equipo motorreductor debe estar pintado y rectificado |
| Propone: M=Márquetin, C=Cliente, D=Diseñadores, P=Producción, F=Fabricación, R/D: R=Requerimiento, D=Deseo, MR=Modificación de Requerimientos |            |   |   |                                                          |

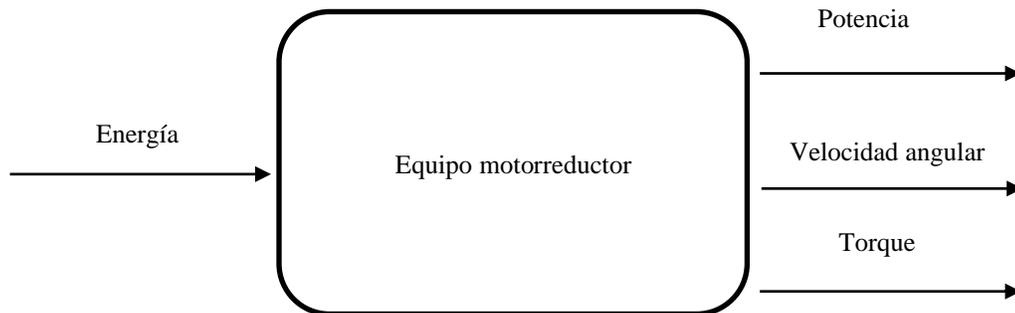
Realizado por: Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022

### 3.3. Diseño conceptual

Una vez que las especificaciones técnicas han sido determinadas se realiza el diseño conceptual del producto. Esta etapa comprende las fases de análisis funcional, matriz morfológica, generación de alternativas y su respectiva evaluación.

#### 3.3.1. Análisis funcional

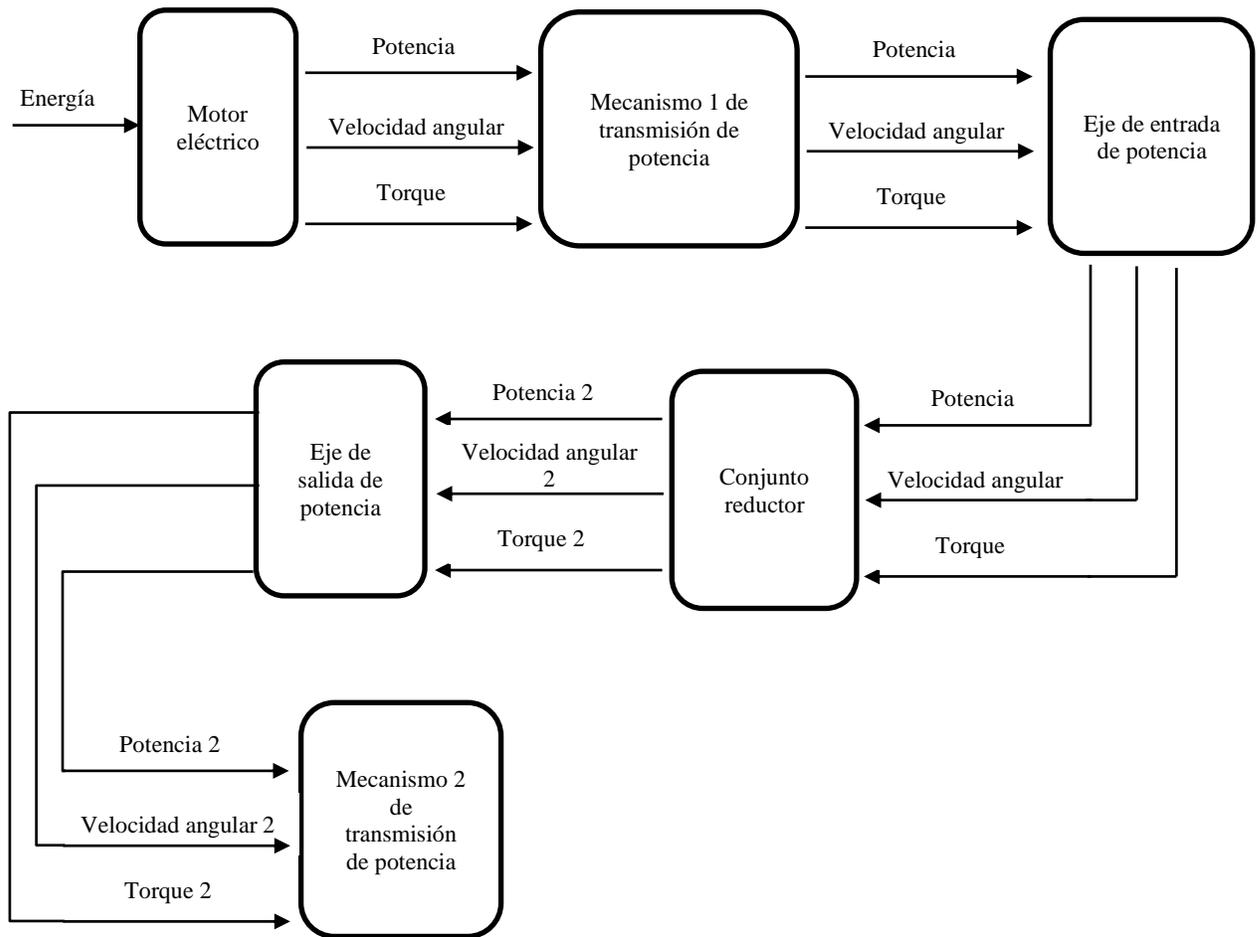
##### 3.3.1.1. Nivel 0



**Figura 2-3:** Análisis funcional nivel 0

Realizado por: Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022

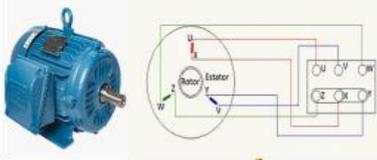
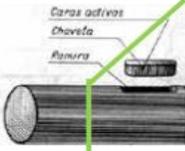
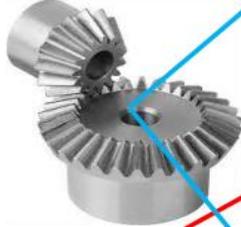
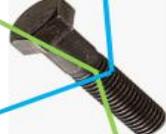
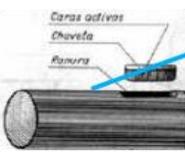
3.3.1.2. Nivel 1



**Figura 3-3:** Análisis funcional nivel 1

Realizado por: Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022

### 3.3.2. Matriz Morfológica

| Función                                | Componente                                                                          |                                                                                      |                                                                                       |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Motor eléctrico                        |    |                                                                                      |     |
|                                        | Monofásico                                                                          |                                                                                      | Trifásico                                                                             |
| Mecanismo 1 de transmisión de potencia |    |    |    |
|                                        | Chavetero-Chaveta                                                                   | Polea-Correa                                                                         | Catalina-Cadena                                                                       |
| Conjunto reductor                      |    |    |    |
|                                        | Ruedas helicoidales                                                                 | Ruedas cónicas                                                                       | Tornillo sinfin-corona                                                                |
| Carcasa                                |  |                                                                                      |  |
|                                        | Fundición de aluminio                                                               |                                                                                      | Fundición de acero                                                                    |
| Pernos de carcasa                      |  |                                                                                      |  |
|                                        | Tipo Allen                                                                          |                                                                                      | Cabeza hexagonal                                                                      |
| Mecanismo 2 de transmisión de potencia |  |  |  |
|                                        | Chavetero-Chaveta<br>Alternativa 1                                                  | Polea-Correa<br>Alternativa 2                                                        | Catalina-Cadena<br>Alternativa 3                                                      |

**Figura 4-3:** Matriz morfológica  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

### 3.3.2.1. Alternativa 1

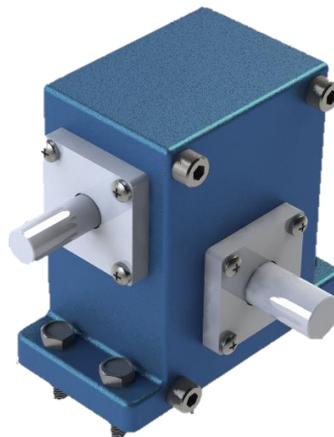
Motor eléctrico trifásico, mecanismo de entrada de potencia de catalina y cadena, conjunto reductor de ruedas cónicas, carcasa hecha de fundición de acero, pernos de la carcasa de tipo cabeza hexagonal, mecanismo de salida de potencia de chavetero y chaveta.



**Figura 5-3:** Alternativa 1 de equipo motorreductor  
Realizado por: Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022

### 3.3.2.2. Alternativa 2

Motor eléctrico monofásico, mecanismo de entrada de potencia de polea y correa, conjunto reductor de tornillo sinfín-corona, carcasa hecha de fundición de aluminio, pernos de la carcasa de tipo Allen, mecanismo de salida de potencia de polea y correa.



**Figura 6-3:** Alternativa 2 de equipo motorreductor  
Realizado por: Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022

### 3.3.2.3. Alternativa 3

Motor eléctrico monofásico, mecanismo de entrada de potencia de chavetero y chaveta, conjunto reductor de ruedas helicoidales, carcasa hecha de fundición de aluminio, pernos de la carcasa de tipo cabeza hexagonal, mecanismo de salida de potencia de catalina y cadena.



**Figura 7-3:** Alternativa 3 de equipo motorreductor  
Realizado por: Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022

### 3.3.3. Método ordinal corregido de criterios ponderados

Se asigna un valor de 1 si el criterio de las filas es superior que el de las columnas, 0.5 si el criterio de las filas es equivalente al de las columnas y 0 si el criterio de las filas es inferior al de las columnas.

#### 3.3.3.1. Criterios de valoración de las alternativas

- **Dimensiones:** Corresponde a las dimensiones máximas que debe tener el equipo motorreductor.
- **Costo:** Es el desembolso económico que se realiza para la producción del equipo motorreductor, incluye compra de insumos, pago de la mano de obra, gastos de producción, gastos administrativos, entre otros.

- **Relación de transmisión:** Es la reducción de velocidad que se logra obtener a través de la aplicación del conjunto reductor expresada mediante una relación, permite incrementar el torque de salida a medida que disminuye la velocidad de entrada.
- **Tiempo de vida útil:** Hace referencia al tiempo máximo que el equipo motorreductor puede funcionar en condiciones óptimas.
- **Potencia de salida:** Corresponde a la potencia que entrega el equipo motorreductor en el eje de salida.

Los criterios mencionados tienen el siguiente orden de importancia:

Relación de transmisión > Dimensiones > Costo = Tiempo de vida útil > Potencia de salida

**Tabla 5-3:** Criterios de valoración de las alternativas

| Criterio                | Dimensiones | Costo | Relación de transmisión | Tiempo de vida útil | Potencia de salida | $\Sigma+1$ | Ponderación |
|-------------------------|-------------|-------|-------------------------|---------------------|--------------------|------------|-------------|
| Dimensiones             |             | 1     | 0                       | 1                   | 1                  | 4          | 0.267       |
| Costo                   | 0           |       | 0                       | 0.5                 | 1                  | 2.5        | 0.167       |
| Relación de transmisión | 1           | 1     |                         | 1                   | 1                  | 5          | 0.333       |
| Tiempo de vida útil     | 0           | 0.5   | 0                       |                     | 1                  | 2.5        | 0.167       |
| Potencia de salida      | 0           | 0     | 0                       | 0                   |                    | 1          | 0.067       |
|                         |             |       |                         |                     | Suma               | 15         | 1           |

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

### 3.3.3.2. Evaluación de los pesos específicos de las diferentes alternativas para cada criterio

En el criterio “dimensiones” se tiene el siguiente orden de peso específico de las alternativas:

Alternativa 2 > Alternativa 3 > Alternativa 1

**Tabla 6-3:** Evaluación del peso específico del criterio “dimensiones”

| Dimensiones   | Alternativa 1 | Alternativa 2 | Alternativa 3 | $\Sigma+1$ | Ponderación |
|---------------|---------------|---------------|---------------|------------|-------------|
| Alternativa 1 |               | 0             | 0             | 1          | 0.167       |
| Alternativa 2 | 1             |               | 1             | 3          | 0.500       |
| Alternativa 3 | 1             | 0             |               | 2          | 0.333       |
|               |               |               | Suma          | 6          | 1           |

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

En el criterio “costo” se tiene el siguiente orden de peso específico de las alternativas:

Alternativa 2 = Alternativa 3 > Alternativa 1

**Tabla 7-3:** Evaluación del peso específico del criterio “costo”

| Costo         | Alternativa 1 | Alternativa 2 | Alternativa 3 | $\Sigma+1$ | Ponderación |
|---------------|---------------|---------------|---------------|------------|-------------|
| Alternativa 1 |               | 0             | 0             | 1          | 0.167       |
| Alternativa 2 | 1             |               | 0.5           | 2.5        | 0.417       |
| Alternativa 3 | 1             | 0.5           |               | 2.5        | 0.417       |
|               |               |               | Suma          | 6          | 1           |

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

En el criterio “relación de transmisión” se tiene el siguiente orden de peso específico de las alternativas:

Alternativa 2 > Alternativa 3 = Alternativa 1

**Tabla 8-3:** Evaluación del peso específico del criterio “relación de transmisión”

| Relación de transmisión | Alternativa 1 | Alternativa 2 | Alternativa 3 | $\Sigma+1$ | Ponderación |
|-------------------------|---------------|---------------|---------------|------------|-------------|
| Alternativa 1           |               | 0             | 0.5           | 1.5        | 0.250       |
| Alternativa 2           | 1             |               | 1             | 3          | 0.500       |
| Alternativa 3           | 0.5           | 0             |               | 1.5        | 0.250       |
|                         |               |               | Suma          | 6          | 1           |

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

En el criterio “tiempo de vida útil” se tiene el siguiente orden de peso específico de las alternativas:

Alternativa 1 = Alternativa 3 > Alternativa 2

**Tabla 9-3:** Evaluación del peso específico del criterio “tiempo de vida útil”

| Tiempo de vida útil | Alternativa 1 | Alternativa 2 | Alternativa 3 | $\Sigma+1$ | Ponderación |
|---------------------|---------------|---------------|---------------|------------|-------------|
| Alternativa 1       |               | 1             | 0.5           | 2.5        | 0.417       |
| Alternativa 2       | 0             |               | 0             | 1          | 0.167       |
| Alternativa 3       | 0.5           | 1             |               | 2.5        | 0.417       |
|                     |               |               | Suma          | 6          | 1           |

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

En el criterio “potencia de salida” se tiene el siguiente orden de peso específico de las alternativas:

Alternativa 1 = Alternativa 3 > Alternativa 2

**Tabla 10-3:** Evaluación del peso específico del criterio “potencia de salida”

| Potencia de salida | Alternativa 1 | Alternativa 2 | Alternativa 3 | $\Sigma+1$ | Ponderación |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|------------|-------------|
| Alternativa 1      |               | 1             | 0.5           | 2.5        | 0.417       |
| Alternativa 2      | 0             |               | 0             | 1          | 0.167       |
| Alternativa 3      | 0.5           | 1             |               | 2.5        | 0.417       |
|                    |               |               | Suma          | 6          | 1           |

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

**Tabla 11-3:** Evaluación de la prioridad de las alternativas

| Criterio      | Dimensiones | Costo  | Relación de transmisión | Tiempo de vida útil | Potencia de salida | $\Sigma$ | Prioridad |
|---------------|-------------|--------|-------------------------|---------------------|--------------------|----------|-----------|
| Alternativa 1 | 0.0444      | 0.0278 | 0.0833                  | 0.0694              | 0.0278             | 0.2528   | 3         |
| Alternativa 2 | 0.1333      | 0.0694 | 0.1667                  | 0.0278              | 0.0111             | 0.4083   | 1         |
| Alternativa 3 | 0.0889      | 0.0694 | 0.0833                  | 0.0694              | 0.0278             | 0.3389   | 2         |

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

De acuerdo con este método la solución adecuada según el orden de importancia de los criterios especificados anteriormente es la alternativa 2: Motor eléctrico monofásico, mecanismo de entrada de potencia de polea y correa, conjunto reductor de tornillo sinfín-corona, carcasa hecha de fundición de aluminio, pernos de la carcasa de tipo Allen, mecanismo de salida de potencia de polea y correa.

### 3.4. Diseño de materialización

Esta etapa del diseño tiene como objetivo generar los planos de conjunto de la alternativa seleccionada y determinar los procesos de manufactura más adecuados; lo cual incluirá el diseño abstracto de la pieza, además de los cálculos necesarios para la construcción de la pieza y la simulación de los resultados obtenidos luego del proceso de construcción de la pieza, esto asegura que la calidad del producto se cumpla, además de que las características de las piezas sean las adecuadas para su aplicación.

#### 3.4.1. Generación del modelo 3D mediante software

En este paso se generan los planos de construcción correspondientes a la alternativa con mayor prioridad, los cuales se encuentran adjuntos en el Anexo 1.

### **3.4.2. Procesos de manufactura**

**Impresión 3D de los moldes para la carcasa:** El primer proceso de manufactura que se utiliza es la impresión 3D, mediante este proceso se generan los moldes que posteriormente serán usados en la fundición de la carcasa.

**Mecanizado del eje de la corona:** El proceso de construcción continúa con el eje que soporta a la corona helicoidal, la manufactura de este componente se realiza mediante el mecanizado por torno.

**Fundición para la carcasa:** Después de obtener los moldes mediante impresión 3D, el proceso de manufactura que se aplica es la fundición, en el caso específico de la carcasa del equipo motorreductor se utiliza aluminio 1100 el cual tiene 99% en peso mínimo de aluminio y 0.12% en peso de cobre.

**Mecanizado de la corona helicoidal:** La corona helicoidal se construye mediante el fresado y el cabezal divisor. En este proceso de manufactura se utiliza bronce SAE 64.

**Mecanizado del tornillo sinfín:** El tornillo sinfín se construye mediante el proceso de manufactura de torneado, el material usado en el tornillo sinfín es acero AISI 1045.

**Mecanizado de tapas:** Las tapas de los ejes del equipo motorreductor se manufacturan mediante la fresadora, usando una broca de igual diámetro al requerido para la salida de los ejes se realizan las perforaciones respectivas en cada tapa.

## **3.5. Diseño de detalle**

### **3.5.1. Diseño de engranajes de tornillo sinfín-corona**

#### **3.5.1.1. AGMA 6022-C93**

- **Cálculos geométricos:**

En la tabla 12-3 se enlistan los principales datos de diseño:

**Tabla 12-3:** Datos de diseño de la caja motorreductora

|                           |                               |
|---------------------------|-------------------------------|
| $H_i = 0.5 \text{ HP}$    | $m = 1.5 \text{ mm}$          |
| $m_G = 20$                | $\phi_n = 20^\circ$           |
| $n_W = 1750 \text{ RPM}$  | $n_d = 1$                     |
| $N_W = 2 \text{ hileras}$ | <i>tornillo sinfín con TT</i> |

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

Se calcula el número de dientes en la corona helicoidal:

$$\frac{N_G}{N_W} = m_G$$

$$N_G = m_G N_W = 20 \cdot 2 = 40 \text{ dientes}$$

Donde:

$N_W =$  número de hileras del tornillo sinfín

$N_G =$  número de dientes de la corona

$m_G =$  relación de transmisión

Se cumple con el número mínimo de dientes de la corona sugerido en la norma:

**Tabla 5-3:** Número mínimo de dientes de la corona sugerido para diseños habituales.

| <b>For normal pressure angle of:</b> | <b>Minimum number of wormgear teeth<br/>(customary designs)</b> |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 14-1/2°                              | 40                                                              |
| 17-1/2°                              | 27                                                              |
| 20°                                  | 21                                                              |
| 22-1/2°                              | 17                                                              |
| 25°                                  | 14                                                              |
| 27-1/2°                              | 12                                                              |
| 30°                                  | 10                                                              |

Fuente: (ANSI-AGMA, 1993 pág. 10)

Se procede con el cálculo del Paso diametral transversal, paso axial, avance y diámetro de la corona:

$$P_t = \frac{1}{m} = \frac{1}{1.5} = 0.667 \text{ dientes/mm}$$

$$p_x = p_t = \frac{\pi}{P_t} = \frac{\pi}{0.667} = 4.712 \text{ mm}$$

Se cumple con  $p_x > 4.064 \text{ mm}$  para usar AGMA 6034

$$L = p_x N_W = 4.712 \cdot 2 = 9.425 \text{ mm}$$

$$D_G = \frac{m_G N_W}{P_t} = \frac{20 \cdot 2}{0.667} = 60 \text{ mm}$$

Donde:

$P_t =$  Paso diametral transversal [dientes/mm]

$m =$  Módulo de la corona [mm]

$p_x =$  Paso circular axial del tornillo sinfín [mm]

$p_t =$  Paso circular transversal axial de la corona [mm]

$L =$  Avance [mm]

$D_G =$  Diámetro primitivo de la corona [mm]

Para el cálculo de la distancia entre centros y el diámetro del tornillo sinfín se utiliza un método iterativo en el cual se asume el diámetro del tornillo y se verifica si está dentro del rango permitido de acuerdo con lo que dictamina AGMA 6022-C93.

En la primera iteración escogemos:

$$d_w = 10 \text{ mm}$$

Se calcula la distancia entre centros y se verifica que el diámetro del tornillo cupla con el rango:

$$C = \frac{D_G + d_w}{2} = \frac{60 + 10}{2} = 35 \text{ mm}$$

$$\frac{C^{0.875}}{2} = 11.221 \text{ mm}$$

$$\frac{C^{0.875}}{1.07} = 20.974 \text{ mm}$$

$$\frac{C^{0.875}}{2} \leq d_w \leq \frac{C^{0.875}}{1.07}$$

Se puede apreciar que no se cumple con el rango indicado, por lo que, se realiza otra iteración, en la cual se escoge:

$$d_w = 24 \text{ mm}$$

Se calcula la distancia entre centros y se verifica que el diámetro del tornillo cupla con el rango:

$$C = \frac{D_G + d_w}{2} = \frac{60 + 24}{2} = 42 \text{ mm}$$
$$\frac{C^{0.875}}{2} = 13.162 \text{ mm}$$
$$\frac{C^{0.875}}{1.07} = 24.601 \text{ mm}$$
$$\frac{C^{0.875}}{2} \leq d_w \leq \frac{C^{0.875}}{1.07}$$

Donde:

$D = \text{Distancia entre centros [mm]}$

Se puede apreciar que, si se cumple con el rango indicado, por lo que, el diámetro del tornillo sinfín asumido es correcto.

El siguiente paso es calcular el ángulo de avance, el cual corresponde a la siguiente formula:

$$\lambda = \tan^{-1} \left( \frac{L}{\pi d_w} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{9.425}{\pi \cdot 24} \right) = 7.125^\circ$$

Donde:

$\lambda = \text{Ángulo de avance del tornillo sinfín [grados]}$

$d_w = \text{Diámetro primitivo del tornillo sinfín [mm]}$

El ángulo de avance cumple con el máximo valor asociado con un ángulo de presión norma de engrane tornillo sinfín-corona como se muestra en la tabla 14-3.

**Tabla 6-3:** Ángulo mayor de avance asociado con un ángulo de presión norma de engrane tornillo sinfín-corona.

| $\phi_n$ | Angulo máximo de avance $\lambda$ |
|----------|-----------------------------------|
| 14.5°    | 16°                               |
| 20°      | 25°                               |
| 25°      | 35°                               |
| 30°      | 45°                               |

Fuente: (Budynas, y otros, 2012 pág. 784)

A continuación, se calculan el adendum, dedendum y la profundidad total del diente de la corona helicoidal:

$$a = \frac{p_x}{\pi} = 0.3183p_x = 0.3183 \cdot 4.712 = 1.5 \text{ mm}$$

$$b = \frac{1.157p_x}{\pi} = 0.3683p_x = 0.3683 \cdot 4.712 = 1.736 \text{ mm}$$

$$h_t = \frac{2.157p_x}{\pi} = 0.6866p_x = 0.6866 \cdot 4.712 = 3.236 \text{ mm}$$

Donde:

$a = \text{Adendum [mm]}$

$b = \text{Dedendum [mm]}$

$h_t = \text{Profundidad total [mm]}$

A continuación, se calculan los diámetros de raíz y exteriores del tornillo sinfín y la corona, además del diámetro de garganta de la corona y la holgura:

$$d_o = d_w + 2a = 24 + 2 \cdot 1.5 = 27 \text{ mm}$$

$$d_r = d_w - 2b = 24 - 2 \cdot 1.736 = 20.529 \text{ mm}$$

$$D_t = D_G + 2a = 60 + 2 \cdot 1.5 = 63 \text{ mm}$$

$$D_o = D_t + a = 63 + 1.5 = 64.5 \text{ mm}$$

$$D_r = D_G - 2b = 60 - 2 \cdot 1.736 = 56.529 \text{ mm}$$

$$c = b - a = 1.736 - 1.5 = 0.236 \text{ mm}$$

Donde:

$d_o = \text{Diámetro exterior del tornillo sinfín [mm]}$

$d_r = \text{Diámetro de raíz del tornillo sinfín [mm]}$

$D_t = \text{Diámetro de garganta de la corona [mm]}$

$D_0 =$  Diámetro exterior de la corona [mm]

$D_r =$  Diámetro de raíz de la corona [mm]

$c =$  Holgura [mm]

Finalmente se realizan los cálculos del ancho de cara máximo del tornillo sinfín y el ancho de cara de la corona:

$$F_{W \text{ máx}} = 2\sqrt{2D_G a} = 2\sqrt{2 \cdot 60 \cdot 1.5} = 26.832 \text{ mm}$$

$$F_G = 2/3 d_m = 0.667 \cdot 24 = 16 \text{ mm} \quad \text{Para } p_x > 4.064 \text{ mm}$$

Donde:

$F_{W \text{ máx}} =$  Ancho de cara máximo del tornillo sinfín [mm]

$F_G =$  Ancho de cara máximo de la corona [mm]

$d_m =$  Diámetro medio del tornillo sinfín [mm]

- **Análisis cinemático:**

La velocidad angular de salida de la caja reductora se calcula al despejar de la ecuación de relación de transmisión de la siguiente manera:

$$m_G = \frac{n_W}{n_G}$$

$$n_G = \frac{n_W}{m_G} = \frac{1750}{20}$$

$$n_G = 87.5 \text{ RPM}$$

Donde:

$m_G:$  Relación de transmisión

$n_G:$  Velocidad angular de la corona [rpm]

$n_W:$  Velocidad angular del sinfín [rpm]

La normativa AGMA-6034-B92 describe que la velocidad en la corona se calcula con la siguiente fórmula:

$$V_G = \frac{\pi d_G n_G}{12}$$

$$V_G = \frac{\pi \cdot \frac{60}{25.4} \cdot 87.5}{12} = 54.112 \text{ pies/min}$$

Donde:

$V_G$ : Velocidad lineal de la corona [pies/min]

$d_G$ : Diametro de paso de la corona [plg]

$n_G$ : Velocidad angular de la corona [rpm]

La normativa AGMA-6034-B92 describe que el sinfín tiene dos velocidades, una velocidad lineal y una velocidad de deslizamiento que depende del ángulo de avance, las ecuaciones se describen a continuación.

$$V_W = \frac{\pi d_W n_W}{12}$$

$$V_W = \frac{\pi \cdot \frac{24}{25.4} \cdot 1750}{12} = 432.897 \text{ pies/min}$$

Donde:

$V_W$ : Velocidad lineal del sinfin [pies/min]

$d_G$ : Diametro de paso del sinfin [plg]

$n_G$ : Velocidad angular del sinfin [rpm]

La velocidad de deslizamiento se calcula mediante:

$$V_S = \frac{V_W}{\cos \lambda}$$

$$V_S = \frac{432.897}{\cos(7.125^\circ)} = 436.266 \text{ pies/min}$$

Donde:

$V_W$ : Velocidad lineal del sinfin [pies/min]

$V_S$ : Velocidad de deslizamiento del sinfin [pies/min]

$\lambda$ : Ángulo de avance [grados]

### 3.5.1.2. AGMA 6034-B92

- **Cálculo de las cargas tangenciales:**

La carga tangencial permisible en la corona del sinfín se calcula mediante:

$$W_{G\ perm}^t = \frac{C_s D_m^{0.8} F_e C_m C_v}{75.948}$$

Donde:

$W_{G\ perm}^t$  = Fuerza tangencial permisible en la corona [N]

$C_s$  = Factor de materiales

$D_m$  = Diametro medio de la corona [mm]

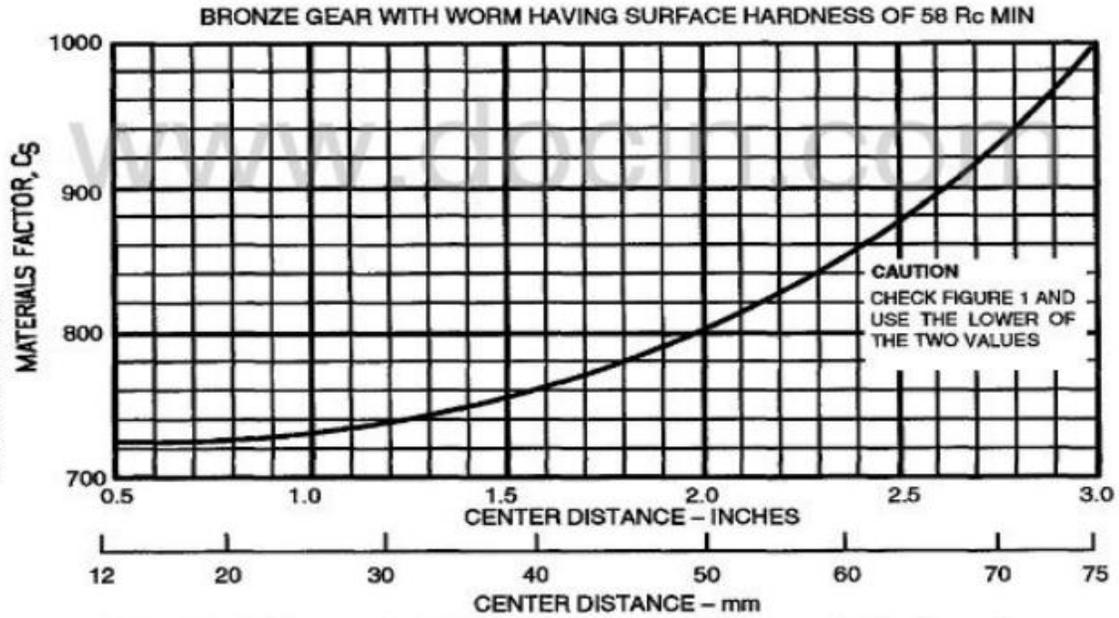
$F_e$  = Ancho de cara efectivo de la corona [mm]

$C_m$  = Factor de corrección de relación

$C_v$  = Factor de velocidades

Los términos  $C_s$ ,  $C_m$  y  $C_v$  son el factor de materiales, factor de corrección de relación y el factor de velocidades respectivamente, los mismos que se calculan mediante las gráficas que proporciona la norma AGMA 6034-B92, sin embargo, se usarás las fórmulas obtenidas del anexo C de la norma ya que proporcionan mayor precisión en los cálculos. El diámetro medio de la corona y del tornillo sinfín son iguales a los diámetros primitivos de la corona y del sinfín respectivamente, cuando se realiza el diseño de estos con proporciones habituales, lo cual es el caso del presente diseño. El ancho de cara efectivo de la corona es el ancho de cara real sin exceder 0.67 del diámetro medio del sinfín.

El factor de los materiales se calcula mediante:



**Figura 8-3:** Factor de materiales  $C_s$  para distancias de centro menores a 76 mm.  
Fuente: (ANSI-AGMA, 1992 pág. 4)

Según (ANSI-AGMA, 1992 pág. 33) para engranajes enfriados en la fundición, en unidades inglesas:

$$C_s = 720 + 10.37 \left( \frac{C}{25.4} \right)^3 \quad \text{para } C \leq 76 \text{ mm}$$

$$C_s = 766.884$$

El factor de corrección de relación se calcula mediante:

**Table 2 - Ratio correction factors,  $C_m$**

| Ratio range ( $m_G$ ) | $C_m$ for ratios 3 to 19.9 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                       | 0                          | 0.1   | 0.2   | 0.3   | 0.4   | 0.5   | 0.6   | 0.7   | 0.8   | 0.9   |
| 3-3.9                 | 0.500                      | 0.511 | 0.522 | 0.532 | 0.543 | 0.554 | 0.562 | 0.570 | 0.577 | 0.585 |
| 4-4.9                 | 0.593                      | 0.598 | 0.604 | 0.609 | 0.615 | 0.620 | 0.625 | 0.630 | 0.635 | 0.640 |
| 5-5.9                 | 0.645                      | 0.649 | 0.652 | 0.656 | 0.659 | 0.663 | 0.666 | 0.669 | 0.673 | 0.676 |
| 6-6.9                 | 0.679                      | 0.682 | 0.685 | 0.688 | 0.691 | 0.694 | 0.696 | 0.699 | 0.701 | 0.704 |
| 7-7.9                 | 0.706                      | 0.708 | 0.710 | 0.711 | 0.713 | 0.715 | 0.717 | 0.719 | 0.720 | 0.722 |
| 8-8.9                 | 0.724                      | 0.726 | 0.728 | 0.730 | 0.732 | 0.734 | 0.736 | 0.738 | 0.740 | 0.742 |
| 9-9.9                 | 0.744                      | 0.746 | 0.747 | 0.749 | 0.750 | 0.752 | 0.754 | 0.755 | 0.757 | 0.758 |
| 10-10.9               | 0.760                      | 0.761 | 0.763 | 0.764 | 0.765 | 0.767 | 0.768 | 0.769 | 0.770 | 0.782 |
| 11-11.9               | 0.773                      | 0.774 | 0.775 | 0.776 | 0.777 | 0.778 | 0.779 | 0.780 | 0.781 | 0.782 |
| 12-12.9               | 0.783                      | 0.784 | 0.785 | 0.786 | 0.787 | 0.788 | 0.788 | 0.789 | 0.790 | 0.791 |
| 13-13.9               | 0.792                      | 0.793 | 0.794 | 0.795 | 0.795 | 0.796 | 0.796 | 0.797 | 0.798 | 0.798 |
| 14-14.9               | 0.799                      | 0.800 | 0.800 | 0.801 | 0.801 | 0.802 | 0.803 | 0.803 | 0.804 | 0.804 |
| 15-15.9               | 0.805                      | 0.805 | 0.806 | 0.806 | 0.807 | 0.807 | 0.807 | 0.807 | 0.808 | 0.808 |
| 16-16.9               | 0.809                      | 0.809 | 0.810 | 0.810 | 0.811 | 0.811 | 0.811 | 0.811 | 0.812 | 0.812 |
| 17-17.9               | 0.813                      | 0.813 | 0.814 | 0.814 | 0.814 | 0.814 | 0.815 | 0.815 | 0.815 | 0.815 |
| 18-18.9               | 0.816                      | 0.816 | 0.816 | 0.817 | 0.817 | 0.817 | 0.817 | 0.817 | 0.818 | 0.818 |
| 19-19.9               | 0.818                      | 0.818 | 0.818 | 0.818 | 0.819 | 0.819 | 0.819 | 0.819 | 0.820 | 0.820 |

**Figura 9-3:** Factor de corrección de relación  $C_m$  para relaciones de 3 a 19,9  
Fuente: (ANSI-AGMA, 1992 pág. 6)

Según (ANSI-AGMA, 1992 pág. 33) para relaciones entre 3 y 20 se tiene:

$$C_m = 0.02\sqrt{-m_G^2 + 40m_G - 76} + 0.46 \quad 3 < m_G \leq 20$$

$$C_m = 0.02\sqrt{-20^2 + 40 \cdot 20 - 76} + 0.46 = 0.82$$

El factor de velocidades se calcula mediante:

Table 4 – Metric velocity factors,  $C_v$

| Velocity range (m/s) | $C_v$ for velocities 0 – 30 m/s |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|----------------------|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                      | 0                               | 0.1    | 0.2    | 0.3    | 0.4    | 0.5    | 0.6    | 0.7    | 0.8    | 0.9    |
| 0-0.9                | 0.6500                          | 0.6412 | 0.6256 | 0.6130 | 0.6010 | 0.5890 | 0.5770 | 0.5652 | 0.5530 | 0.5408 |
| 1.0-1.9              | 0.5300                          | 0.5185 | 0.5078 | 0.4970 | 0.4854 | 0.4747 | 0.4640 | 0.4540 | 0.4437 | 0.4340 |
| 2.0-2.9              | 0.4240                          | 0.4150 | 0.4050 | 0.3962 | 0.3886 | 0.3809 | 0.3730 | 0.3650 | 0.3570 | 0.3501 |
| 3.0-3.9              | 0.3435                          | 0.3368 | 0.3300 | 0.3230 | 0.3180 | 0.3130 | 0.3083 | 0.3033 | 0.2984 | 0.2945 |
| 4.0-4.9              | 0.2915                          | 0.2876 | 0.2843 | 0.2807 | 0.2774 | 0.2744 | 0.2714 | 0.2685 | 0.2655 | 0.2631 |
| 5.0-5.9              | 0.2602                          | 0.2576 | 0.2546 | 0.2517 | 0.2497 | 0.2467 | 0.2448 | 0.2428 | 0.2408 | 0.2389 |
| 6.0-6.9              | 0.2369                          | 0.2349 | 0.2330 | 0.2310 | 0.2290 | 0.2270 | 0.2251 | 0.2231 | 0.2211 | 0.2202 |
| 7.0-7.9              | 0.2182                          | 0.2162 | 0.2143 | 0.2130 | 0.2113 | 0.2100 | 0.2084 | 0.2064 | 0.2045 | 0.2025 |
| 8.0-8.9              | 0.2020                          | 0.2000 | 0.1990 | 0.1978 | 0.1966 | 0.1950 | 0.1940 | 0.1927 | 0.1918 | 0.1900 |
| 9.0-9.9              | 0.1888                          | 0.1879 | 0.1860 | 0.1850 | 0.1840 | 0.1830 | 0.1820 | 0.1801 | 0.1791 | 0.1781 |
| 10.0-10.9            | 0.1770                          | 0.1760 | 0.1742 | 0.1732 | 0.1723 | 0.1720 | 0.1703 | 0.1694 | 0.1684 | 0.1674 |
| 11.0-11.9            | 0.1665                          | 0.1655 | 0.1645 | 0.1636 | 0.1620 | 0.1616 | 0.1607 | 0.1597 | 0.1587 | 0.1580 |
| 12.0-12.9            | 0.1578                          | 0.1568 | 0.1558 | 0.1549 | 0.1540 | 0.1539 | 0.1530 | 0.1520 | 0.1510 | 0.1500 |

**Figura 10-3:** Factor de velocidades en el rango de 0 a 30 m/s.

Fuente: (ANSI-AGMA, 1992 pág. 10)

Según (ANSI-AGMA, 1992 pág. 33) para velocidades  $V_s$  entre 0 y 700 pies /min se tiene:

$$C_v = 0.659e^{-0.0011V_s} \quad 0 < V_s \leq 700 \text{ pies}/\text{min}$$

$$C_v = 0.659 \cdot e^{-0.0011 \cdot 436.266} = 0.4078$$

Obteniendo la carga tangencial permisible en la corona:

$$W_G^t \text{ perm} = \frac{766.884 \cdot 60^{0.8} \cdot 16 \cdot 0.82 \cdot 0.4078}{75.948} = 1428.384 \text{ N}$$

La carga tangencial de trabajo en la corona se calcula según la siguiente ecuación:

$$W_G^t = \frac{33000 n_d H_0 K_a}{V_G \eta}$$

Donde:

$W_G^t$  = Carga tangencial de trabajo en la corona [lbf]

$n_d$  = Factor de diseño

$H_0 = \text{Potencia de salida [Hp]}$

$K_a = \text{Factor de aplicación}$

$\eta = \text{eficiencia}$

La eficiencia se calcula con la siguiente ecuación, dependiendo de si el movimiento es controlado por el tornillo sinfín o por la corona helicoidal:

$$\eta_W = \frac{\cos \phi_n - \mu \tan \lambda}{\cos \phi_n + \mu \cot \lambda}$$

$$\eta_G = \frac{\cos \phi_n - \mu \cot \lambda}{\cos \phi_n + \mu \tan \lambda}$$

Donde:

$\eta_W = \text{Eficiencia cuando el tornillo sinfín controla el movimiento}$

$\eta_G = \text{Eficiencia cuando la corona controla el movimiento}$

Para determinar si el tornillo sinfín controla el movimiento se debe cumplir la siguiente expresión:

$$\mu_{estat} < \cos \phi_n \tan \lambda$$

$$0.0309 < \cos(20^\circ) \cdot \tan(7.125^\circ)$$

$$0.0309 < 0.1175$$

Al cumplirse esta expresión se debe usar la ecuación de eficiencia para movimiento controlado por el tornillo sinfín, obteniendo:

$$\eta_W = \eta = \frac{\cos(20^\circ) - 0.0309 \cdot \tan(7.125^\circ)}{\cos(20^\circ) + 0.0309 \cdot \cot(7.125^\circ)} = 0.7885$$

La potencia de salida se obtiene al despejar la siguiente formula:

$$\eta = \frac{H_0}{H_i}$$

Donde:

$H_0 = \text{Potencia de salida [HP]}$

$H_i = \text{Potencia de entrada [HP]}$

Resultando:

$$H_0 = \eta \cdot H_i$$

$$H_0 = 0.7885 \cdot 0.5 = 0.3942 \text{ HP}$$

El factor de diseño se debe escoger mediante un consenso entre el cliente y el manufacturero, para el diseño del presente trabajo académico se tomará el siguiente valor:

$$n_d = 1$$

El factor de aplicación se selecciona de acuerdo con lo que muestra la figura 8-3 (extracto de la tabla A.3) especificada en el anexo A de la norma AGMA 6034-B92

**Table A.3 – Service factors for wormgears**  
(Service factors shown apply only if electric or hydraulic motors are used. For single or multi-cylinder engines, see table A.2 for conversion.)

| Application                   | Service factors       |                    |                       |
|-------------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
|                               | Up to 3 hours per day | 3–10 hours per day | Over 10 hours per day |
| Agitators (Mixers)            |                       |                    |                       |
| Pure liquids                  | ---                   | 1.00               | 1.25                  |
| Liquids and solids            | 1.00                  | 1.25               | 1.50                  |
| Liquids – variable density    | 1.00                  | 1.25               | 1.50                  |
| Blowers                       |                       |                    |                       |
| Centrifugal                   | 1.00                  | 1.25               | ---                   |
| Lobe                          | 1.00                  | 1.25               | 1.50                  |
| Vane                          | ---                   | 1.00               | 1.25                  |
| Brewing and distilling        |                       |                    |                       |
| Bottling machinery            | ---                   | 1.00               | 1.25                  |
| Brew kettles, continuous duty | ---                   | 1.00               | 1.25                  |
| Cookers – continuous duty     | ---                   | 1.00               | 1.25                  |
| Mash tubs – continuous duty   | ---                   | 1.00               | 1.25                  |
| Scale hopper, frequent starts | 1.00                  | 1.25               | 1.50                  |

**Figura 11-3:** Factor de servicio para engranajes de tornillos sinfín-corona  
Fuente: (ANSI-AGMA, 1992 pág. 23)

Debido a que la aplicación de la caja reductora de tornillo sinfín-corona es un agitador de líquidos puros que trabaja de 3 a 10 horas diarias se obtiene el siguiente factor de aplicación:

$$K_a = 1$$

Por lo que la carga tangencial de trabajo en la corona resulta:

$$W_G^t = \frac{33000 \cdot 1 \cdot 0.3942 \cdot 1}{54.112 \cdot 0.7885} = 304.923 \text{ lbf} \rightarrow 1356.363 \text{ N}$$

Según AGMA 6034-B92 la carga tangente en la corona es la que rige el diseño, debido a que antes del equipo falle por flexión, falla por desgaste. Por tanto, basta con comparar la carga tangencial de trabajo con la carga tangencial permisible en la corona para determinar si el diseño resiste. Es decir, el diseño debe cumplir con la siguiente condición:

$$W_G^t < W_{G\text{ perm}}^t$$

$$1356.363\text{ N} < 1428.384\text{ N}$$

Se puede apreciar que la carga tangencial permisible es mayor que la carga tangencial de trabajo, por lo que el diseño resiste.

Finalmente, según AGMA 6034-B92 se deben realizar los cálculos correspondientes a la fuerza de fricción, y el esfuerzo de flexión en un diente de la corona mediante la adaptación de Buckingham de la ecuación de Lewis. La fuerza de fricción se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$W_f = \frac{\mu W_G^t}{\mu \operatorname{sen} \lambda - \cos \lambda \cos \phi_n}$$

Donde:

$W_f =$  Fuerza de fricción [N]

$\mu =$  coeficiente de fricción

$\phi_n =$  Ángulo de presión normal [grados]

El factor de fricción se calcula mediante:

**Table 6 – Coefficient of friction,  $\mu$  (metric)**

| Velocity range (m/s) | $\mu$ for velocities 0 – 30 m/s |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|----------------------|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                      | 0                               | 0.1    | 0.2    | 0.3    | 0.4    | 0.5    | 0.6    | 0.7    | 0.8    | 0.9    |
| 0.0–0.9              | 0.1500                          | 0.0803 | 0.0694 | 0.0623 | 0.0583 | 0.0543 | 0.0521 | 0.0500 | 0.0480 | 0.0459 |
| 1.0–1.9              | 0.0438                          | 0.0423 | 0.0410 | 0.0396 | 0.0382 | 0.0369 | 0.0359 | 0.0352 | 0.0344 | 0.0336 |
| 2.0–2.9              | 0.0329                          | 0.0322 | 0.0316 | 0.0309 | 0.0304 | 0.0297 | 0.0293 | 0.0289 | 0.0286 | 0.0280 |
| 3.0–3.9              | 0.0276                          | 0.0272 | 0.0268 | 0.0265 | 0.0261 | 0.0257 | 0.0254 | 0.0251 | 0.0248 | 0.0245 |
| 4.0–4.9              | 0.0242                          | 0.0239 | 0.0236 | 0.0234 | 0.0232 | 0.0229 | 0.0226 | 0.0224 | 0.0223 | 0.0221 |
| 5.0–5.9              | 0.0219                          | 0.0217 | 0.0215 | 0.0214 | 0.0212 | 0.0210 | 0.0209 | 0.0207 | 0.0205 | 0.0203 |
| 6.0–6.9              | 0.0202                          | 0.0200 | 0.0199 | 0.0197 | 0.0196 | 0.0194 | 0.0193 | 0.0192 | 0.0190 | 0.0189 |
| 7.0–7.9              | 0.0187                          | 0.0186 | 0.0185 | 0.0184 | 0.0183 | 0.0182 | 0.0181 | 0.0179 | 0.0178 | 0.0177 |
| 8.0–8.9              | 0.0178                          | 0.0175 | 0.0174 | 0.0173 | 0.0173 | 0.0172 | 0.0172 | 0.0170 | 0.0169 | 0.0169 |
| 9.0–9.9              | 0.0169                          | 0.0168 | 0.0166 | 0.0166 | 0.0164 | 0.0164 | 0.0164 | 0.0163 | 0.0162 | 0.0162 |
| 10.0–10.9            | 0.0161                          | 0.0160 | 0.0159 | 0.0159 | 0.0159 | 0.0158 | 0.0158 | 0.0156 | 0.0156 | 0.0156 |
| 11.0–11.9            | 0.0155                          | 0.0154 | 0.0154 | 0.0153 | 0.0153 | 0.0152 | 0.0151 | 0.0151 | 0.0150 | 0.0150 |
| 12.0–12.9            | 0.0149                          | 0.0149 | 0.0149 | 0.0148 | 0.0148 | 0.0147 | 0.0147 | 0.0147 | 0.0146 | 0.0146 |
| 13.0–13.9            | 0.0146                          | 0.0146 | 0.0146 | 0.0145 | 0.0145 | 0.0144 | 0.0144 | 0.0144 | 0.0144 | 0.0144 |
| 14.0–14.9            | 0.0143                          | 0.0143 | 0.0143 | 0.0142 | 0.0142 | 0.0142 | 0.0142 | 0.0142 | 0.0141 | 0.0141 |

**Figura 12-3:** Factor de fricción para velocidades de deslizamiento entre 0 y 30 m/s

Fuente: (ANSI-AGMA, 1992 pág. 13)

$$\mu = 0.103 \exp(-0.110V_s^{0.450}) + 0.012 \quad V_s > 10 \text{ pie/min}$$

$$\mu = 0.103 \exp(-0.110 \cdot 436.266^{0.450}) + 0.012 = 0.0309$$

Obteniendo:

$$W_f = \frac{0.0309 \cdot 1356.363}{0.0309 \cdot \text{sen}(7.125^\circ) - \cos(7.125^\circ) \cos(20^\circ)} = -45.138 \text{ N}$$

Debido a que los dientes del tornillo sinfín son intrínsecamente mucho más fuertes que los dientes de la corona, no se consideran. Los dientes de las coronas helicoidales son cortos y gruesos sobre los bordes de la cara, además son curvados y más delgados a medio plano. Buckingham adaptó la ecuación de Lewis para este caso (Budynas, y otros, 2012 pág. 782):

$$\sigma_a = \frac{W_G^t}{p_n F_e y}$$

Donde:

$\sigma_a$  = Esfuerzo de flexión en un diente de la corona [MPa]

$p_n$  = Paso circular normal de la corona [mm]

$y$  = Factor de forma de Lewis relacionado con el paso circular

$$p_n = \frac{\pi}{P_n} = \frac{\pi}{P_t / \cos \lambda}$$

$$p_n = \frac{\pi}{0.667 / \cos(7.125^\circ)} = 4.676 \text{ mm}$$

$$y = 0.125 \quad \text{para } \phi_n = 20^\circ$$

Obteniendo:

$$\sigma_a = \frac{1356.363}{4.676 \cdot 16 \cdot 0.125} = 145.035 \text{ MPa}$$

Este esfuerzo se debe comparar con el esfuerzo de fluencia del material de la corona, el cual debe ser mayor o de lo contrario los dientes de la corona fallarían por esfuerzo de flexión. El material que se seleccionó para la aplicación del siguiente trabajo es el bronce ya que tiene buena resistencia al desgaste, a la corrosión y posee buenas propiedades antifriccionantes. Se usará la aleación de bronce SAE 64, cuyas propiedades se enlistan en la tabla 15-3:

**Tabla 7-3:** Propiedades mecánicas de la aleación de bronce SAE 64

| <b>Esfuerzo de Fluencia [MPa]</b> | <b>Alargamiento en 2 pulgadas [%]</b> | <b>Dureza Brinell</b> | <b>Densidad [g/cm<sup>3</sup>]</b> |
|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|------------------------------------|
| 150                               | 8-13                                  | 70-84                 | 9.00                               |

Fuente: (BÖHLER, 2007 pág. 1)

Al comparar el  $S_y$  del material con el esfuerzo de flexión en el diente de la corona, comprobamos que es mayor, por tanto, si resiste.

$$S_y > \sigma_a$$
$$150 \text{ MPa} > 145.035 \text{ MPa}$$

- **Cálculo del peso de la corona:**

El peso de la corona se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$P = mg$$

Donde:

$$P = \text{Peso [N]}$$

$$m = \text{Masa [kg]}$$

$$g = \text{Gravedad [m/s}^2\text{]}$$

Para calcular la masa de la corona se usará la densidad del material:

$$m = \rho V$$

Donde:

$$V = \text{Volumen [cm}^3\text{]}$$

$$\rho = \text{Densidad [g/cm}^3\text{]}$$

Finalmente se sabe que el volumen de la corona se obtiene al multiplicar el área circular usando el diámetro primitivo por el ancho de cara, obteniendo:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 6^2}{4} = 28.274 \text{ cm}^2$$
$$V = AF_G = 28.274 \cdot 1.6 = 45.239 \text{ cm}^3$$

Como resultado de reemplazar el volumen en la fórmula de masa se obtiene:

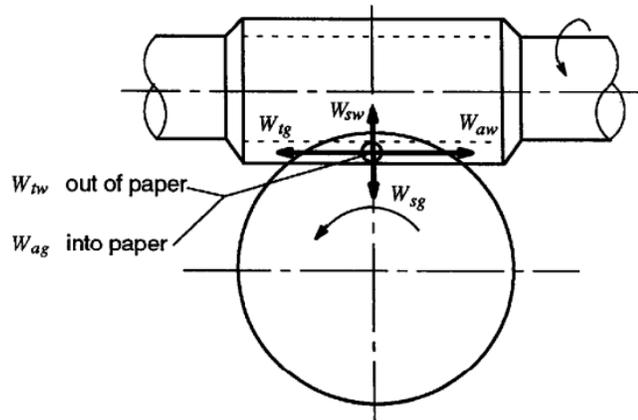
$$m = 9 \cdot 45.239 = 407.151 \text{ g} \rightarrow 0.407 \text{ kg}$$

El peso de la corona, por tanto, es:

$$P = 0.407 \cdot 9.81 = 3.994 \text{ N}$$

### 3.5.2. Diseño de ejes

Para diseñar los ejes del tornillo sinfín y de la corona helicoidal se deben transportar las cargas que se producen en los hilos del tornillo y en los dientes de la corona respectivamente, por lo cual se debe determinar el análisis de fuerzas correspondiente al conjunto reductor.



**Figura 13-3:** Análisis de fuerzas del conjunto reductor

Fuente: (ANSI-AGMA, 1993 pág. 27)

Cabe destacar que algunas de las fuerzas correspondientes al análisis ya fueron calculadas para el diseño de la corona según AGMA 6034-B92, por lo que se obviarán en estos cálculos, simplemente se anotará su valor. Además, es importante notar que las fuerzas que se presentan en la corona son las mismas del tornillo sinfín, pero cambian sus direcciones y planos de acción, el análisis de fuerzas resulta:

- **Fuerza axial de la corona**

La fuerza axial en la corona es la misma que la fuerza tangencial en el tornillo sin fin, pero en sentidos opuestos.

$$W_{ag} = W_{tg} \frac{\cos \phi_n \operatorname{sen} \lambda + f \cos \lambda}{\cos \phi_n \cos \lambda - f \operatorname{sen} \lambda} = -W_{tw}$$

Donde:

$W_{tg}$ : Fuerza tangencial de la corona [N]

$\phi_n$ : Ángulo de presión normal

$f$ : Factor de fricción

$\lambda$ : Ángulo de avance

$$W_{ag} = -W_{tw} = 215.034 \text{ N}$$

- **Fuerza radial de la corona**

$$W_{sg} = \frac{W_{tg} \tan \phi_n}{\cos \lambda} = -W_{sw}$$

Donde:

$W_{tg}$ : Fuerza tangencial de la corona [N]

$\phi_n$ : Ángulo de presión normal

$\lambda$ : Ángulo de avance

$$W_{sg} = -W_{sw} = 497.518 \text{ N}$$

- **Fuerza tangencial de la corona**

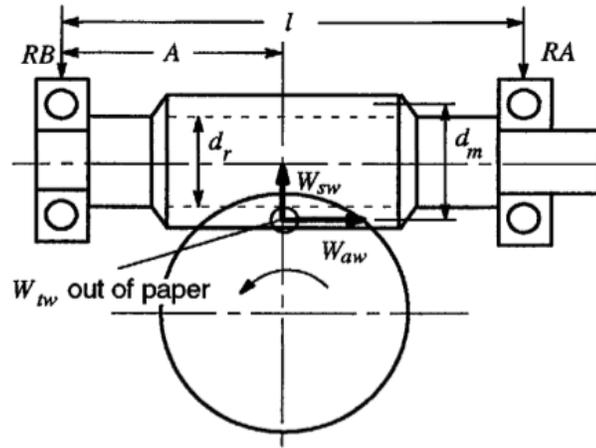
$$W_{tg} = -W_{aw} = 1356.363 \text{ N}$$

### 3.5.2.1. Diseño del eje del tornillo sin fin aplicando AGMA 6022-C93

- **Criterio de resistencia**

El diseño del tornillo sin fin se realizó utilizando la norma AGMA 6022-C93 la cual es un manual de diseño para tornillos sin fin cilíndricos, esta normativa considera tanto el diseño geométrico como la resistencia mecánica y las deformaciones que debe tener un tornillo sin fin, a continuación, se describe el proceso de diseño según la normativa AGMA.

- **Cálculo de las reacciones**



**Figura 14-3:** Diagrama para el cálculo de reacciones en los apoyos  
Fuente: (ANSI-AGMA, 1993 pág. 28)

La norma AGMA-6022-D93 menciona que el cálculo de las reacciones en los soportes del sinfín se lo calcula mediante las siguientes ecuaciones:

$$RA = \sqrt{\left(\frac{W_{sw} A}{l} + \frac{W_{aw} d}{2l}\right)^2 + \left(\frac{W_{tw} A}{l}\right)^2}$$

$$RA = \sqrt{\left(\frac{111.846 \cdot 40/25.4}{80/25.4} + \frac{304.923 \cdot 20.529/25.4}{2 \cdot 80/25.4}\right)^2 + \left(\frac{48.342 \cdot 40/25.4}{80/25.4}\right)^2}$$

$$RA = 104.496 \text{ lbf} \rightarrow 464.819 \text{ N}$$

Donde:

*RA*: Reacción en el apoyo izquierdo [lbf]

*W<sub>sw</sub>*: Fuerza radial del sinfín [lbf]

*W<sub>aw</sub>*: Fuerza axial del sinfín [lbf]

*W<sub>tw</sub>*: Fuerza tangencial del sinfín [lbf]

*A*: Distancia del apoyo al punto de contacto con la corona[in]

*l*: Distancia entre apoyos [in]

*d*: Diametro de paso [in]

$$RB = \sqrt{\left(\frac{W_{sw} (l - A)}{l} + \frac{W_{aw} d}{2l}\right)^2 + \left(\frac{W_{tw} (l - A)}{l}\right)^2}$$

Debido a que la distancia del apoyo al punto de contacto con la corona es la mitad de la distancia entre apoyos, se obtiene:

$$RB = \sqrt{\left(\frac{111.846 \cdot 40/25.4}{80/25.4} + \frac{304.923 \cdot 20.529/25.4}{2 \cdot 80/25.4}\right)^2 + \left(\frac{48.342 \cdot 40/25.4}{80/25.4}\right)^2}$$

$$RB = 104.496 \text{ lbf} \rightarrow 464.819 \text{ N}$$

*RB: Reacción en el apoyo derecho [lbf]*

- **Esfuerzo de flexión en el sinfín**

Una vez que se conocen las reacciones en los rodamientos se puede considerar que el diámetro de paso del sinfín es igual al diámetro de raíz para encontrar el momento flector al cual está sometido el sinfín, de la siguiente manera:

$$M = RB (A)$$

$$M = 464.819 \cdot 40 = 18592.801 \text{ N} - \text{mm}$$

Donde se debe escoger el valor mayor entre ambos momentos de esta manera se calcula el esfuerzo a flexión que está sometido el sinfín:

$$\sigma_f = \frac{32 M}{\pi d_r^3}$$

$$\sigma_f = \frac{32 \cdot 18592.801}{\pi \cdot 20.529^3} = 21.890 \text{ MPa}$$

Donde:

$\sigma_f$ : Esfuerzo de flexión [MPa]

$M$ : Momento flector [N - mm]

$d_r$  : Diametro de raiz del sinfin [mm]

La normativa AGMA-6022-C93 describe que el valor del esfuerzo a flexión debe ser menor que el 17% del  $S_{ut}$ , para un funcionamiento de torque normal, y menor que el 75% del  $S_y$ , cuando se aplique el máxima torque, del material con el cual se va a construir el sinfín. Estos valores incluyen los concentradores de esfuerzos tanto para flexión como para torsión presentes en el área roscada del sinfín, también menciona que si estos valores exceden los porcentajes del  $S_{ut}$  y del  $S_y$  se debe incrementar el diámetro de raíz del sinfín o disminuir el ángulo de presión normal. El material que se seleccionó para la aplicación del siguiente trabajo es el acero AISI 1045 cuyas propiedades se enlistan en la tabla 16-3:

**Tabla 8-3:** Propiedades mecánicas del acero AISI 1045

| <b>Esfuerzo de Fluencia [MPa]</b> | <b>Esfuerzo de Tracción [MPa]</b> | <b>Dureza Brinell</b> | <b>Densidad [g/cm<sup>3</sup>]</b> |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|------------------------------------|
| 343                               | 640                               | 163                   | 7.85                               |

Fuente: (BÖHLER, 2007 pág. 1)

Por lo que, se puede comprobar que:

$$\sigma_f < 0.75 S_y$$

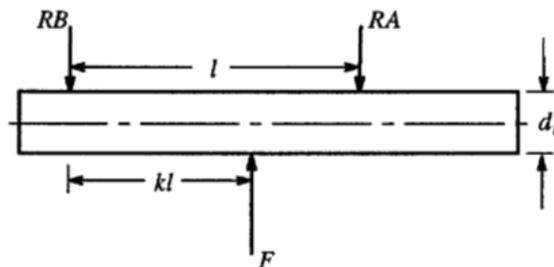
$$21.890 < 257.25 \text{ MPa}$$

$$\sigma_f < 0.17 S_{ut}$$

$$21.890 < 108.8 \text{ MPa}$$

- **Criterio de Rigidez**

Se debe calcular la fuerza a la cual está sometida el tornillo sin fin.



**Figura 15-3:** Diagrama de cuerpo libre del eje del tornillo sin fin

Fuente: (ANSI-AGMA, 1993 pág. 28)

$$F = RA + RB$$

$$F = 464.819 + 464.819 = 929.638 \text{ N}$$

Donde:

$F$ : Fuerza equivalente de las cargas [N]

$RA$ : Reacción en el rodamiento derecho [N]

$RB$ : Reacción en el rodamiento izquierdo [N]

También se debe calcular un factor  $k$  el cual es la locación de la carga puntual  $F$ .

$$k = \frac{RA}{F} = \frac{464.819}{929.638}$$
$$k = 0.5$$

Para la deflexión el AGMA 6022-C93 emplea la ecuación mostrada a continuación:

$$y = \frac{929.638 \cdot 80^3}{3 \cdot 206850 \cdot 8718.239} (1 - 0.5) \left( \frac{2}{3} \cdot 0.5 - \frac{1}{3} \cdot 0.5^2 \right)^{\frac{3}{2}}$$
$$y = 0.0055 \text{ mm}$$

Donde:

$y$ : Deflexión del sinfin [mm]

$l$ : Distancia entre rodamientos [mm]

$E$ : Modulo de elasticidad  $\left[ \frac{N}{mm^2} \right]$

$$I = \frac{\pi \cdot r^4}{4}$$
$$I = \frac{\pi \cdot 20.529^4}{64} = 8718.239 \text{ mm}^4$$

$I$ : Momento de inercia [mm<sup>4</sup>]

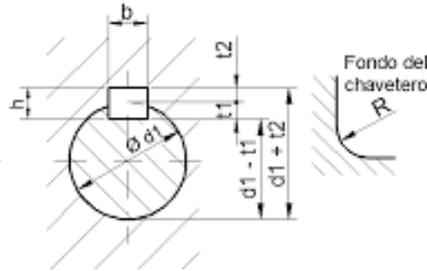
$d_r$ : Diametro de raiz [mm]

La norma AGMA 6022-C93 determina que la deflexión máxima de un tornillo sinfin no debe exceder el valor de  $0.005\sqrt{px}$  cuando se calcula en pulgadas y el valor de  $0.025\sqrt{px}$  cuando se trabaja en mm de esta manera se determina la deflexión máxima que puede tener el tornillo sin fin.

$$y < 0.025\sqrt{px}$$
$$y < 0.025\sqrt{4.713}$$
$$0.0055 < 0.0543 \text{ mm}$$

- **Cuña del eje del tornillo sinfín**

El diseño de la cuña para los ejes está basado en la norma DIN 6885-1, a continuación, se enlistan las dimensiones obtenidas:



**Figura 16-3:** Cuña para el eje del tornillo sinfín  
Fuente: (DIN 6885-1 pág. 2)

**Tabla 9-3:** Dimensiones de la cuña eje del tornillo sinfín

| Cota     | Valor | Unidades |
|----------|-------|----------|
| d        | 15    | mm       |
| b        | 5     | mm       |
| h        | 5     | mm       |
| t1       | 3     | mm       |
| t2       | 2     | mm       |
| Longitud | 15    | mm       |

Fuente: (DIN 6885-1 pág. 2)

- **Verificación al corte**

El material seleccionado para la cuña es AISI 1020 HR, al esfuerzo de corte se obtiene el siguiente factor de seguridad:

$$\frac{2T}{dbl} = \frac{S_{sy}}{n_s}$$

$$\frac{2(2580.413)}{(15 \cdot 5 \cdot 15)} = \frac{220}{2 \cdot n_s}$$

$$n_s = 23.979$$

- **Verificación a compresión**

El factor de seguridad para el esfuerzo de compresión resulta:

$$\frac{4T}{dlh} = \frac{S_y}{n_c}$$

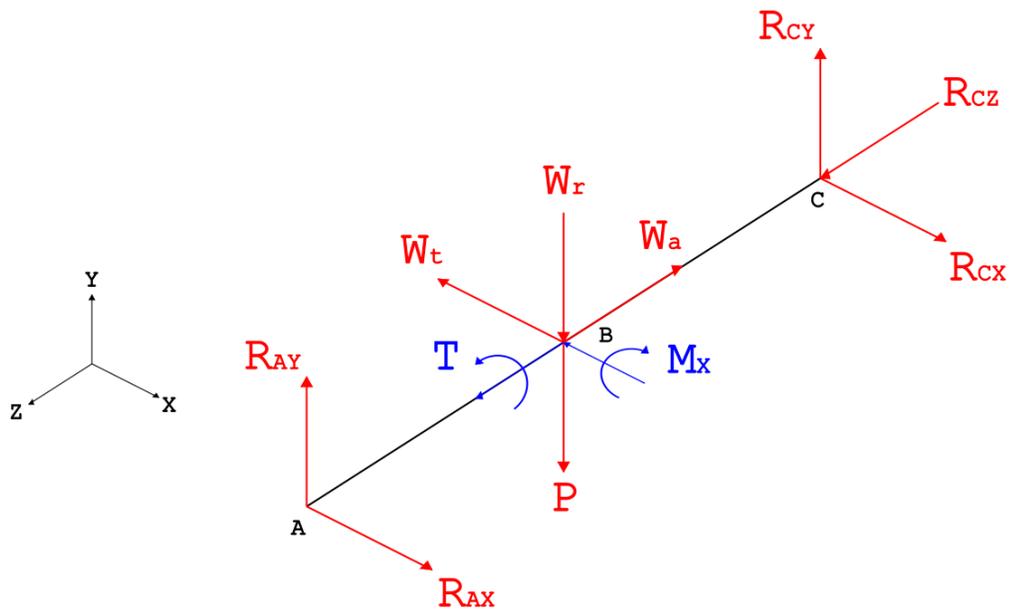
$$\frac{4(2580.413)}{(15 \cdot 15 \cdot 5)} = \frac{220}{n_c}$$

$$n_c = 23.979$$

### 3.5.2.2. Diseño del eje de la corona aplicando ASME B106.1M

- **Criterio de resistencia**

Las fuerzas producidas en el eje de la corona permiten determinar el siguiente diagrama de cuerpo libre, se procede a calcular las reacciones en los apoyos.



**Figura 17-3:** Diagrama de cuerpo libre del eje de la corona

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

Las reacciones en el plano y-z son:

$$\sum M_A = 0$$

$$R_{cy} = \frac{M_x + W_r(L/2) + P(L/2)}{L}$$

$$R_{cy} = \frac{6451.033 + 497.518(48/2) + 3.994(48/2)}{48} = 385.152 \text{ N}$$

$$\sum F_y = 0$$

$$R_{ay} = W_r + P - R_{cy}$$

$$R_{ay} = 497.518 + 3.994 - 385.152 = 116.359 \text{ N}$$

Las reacciones en el plano x-z son:

$$\sum M_A = 0$$

$$R_{cx} = \frac{W_t(L/2)}{L}$$

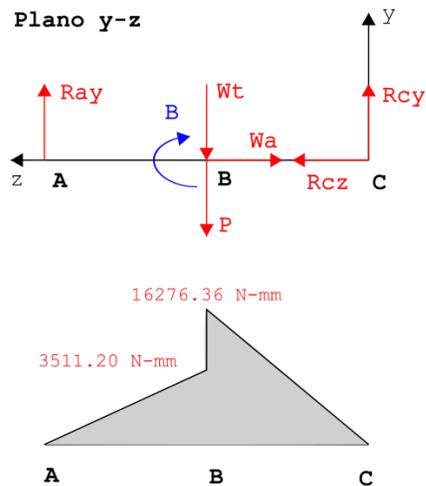
$$R_{cx} = \frac{1356.363(48/2)}{48} = 678.182 \text{ N}$$

$$\sum F_x = 0$$

$$R_{ax} = W_t - R_{cx}$$

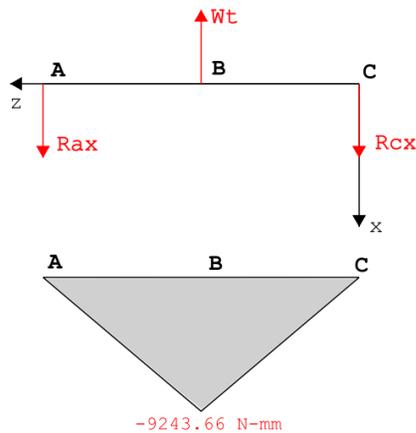
$$R_{ax} = 1356.363 - 678.182 = 678.182 \text{ N}$$

Por lo que, se obtienen los siguientes diagramas de momentos flectores para cada plano correspondiente:



**Figura 18-3:** Diagrama de momentos flectores en el plano YZ  
 Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

Plano x-z



**Figura 19-3:** Diagrama de momentos flectores en el plano XZ  
 Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

Al analizar el punto crítico del eje se puede comprobar que se encuentra en la mitad de este, por tanto, se calcula el momento resultante y el par torsor para dicho punto.

$$M_f = \sqrt{M_{1-1}^2 + M_{2-2}^2}$$

$$M_f = \sqrt{(9243.66)^2 + (16276.36)^2}$$

$$M_f = 18718.043 \text{ N} - \text{mm}$$

$$T = 40690.895 \text{ N} - \text{mm}$$

$$d = \left\{ \frac{16 n}{\pi} \left[ 4 \left( \frac{k_f \cdot M_a}{S_e} \right)^2 + 3 \left( \frac{k_{fs} \cdot T_a}{S_e} \right)^2 + 4 \left( \frac{k_f \cdot M_m}{S_y} \right)^2 + 3 \left( \frac{k_{fs} \cdot T_m}{S_y} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/3}$$

Para una primera iteración se han asumido los siguientes valores:

$$k_f = 1.6$$

$$k_{fs} = 1.4$$

$$k = 0.6$$

Debido a que el momento flector que se obtuvo es generado por la rotación del eje, este se transforma en un momento flector amplitud ya que el esfuerzo de flexión es totalmente invertido. Por otro lado,

el momento de torsión es constante durante el giro del eje, por lo que, es un momento de torsión medio.

**Tabla 10-3:** Momentos y Torques medios y amplitud del eje de la corona

| Variable       | Valor     |
|----------------|-----------|
| $M_a [N - mm]$ | 18718.043 |
| $M_m [N - mm]$ | 0         |
| $T_a [N - mm]$ | 0         |
| $T_m [N - mm]$ | 40690.895 |

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

Para el cálculo del límite de fatiga se hace uso de la formula siguiente:

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_g \cdot S_e'$$

$$S_e' = 0.5 S_{ut}$$

Los siguientes valores corresponden a un acero AISI 1018 HR.

$$S_y = 220 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} = 400 \text{ MPa}$$

Reemplazando se tiene:

$$S_e' = 0.5 \cdot 400 = 200 \text{ MPa}$$

$$S_e = 0.6 \cdot S_e'$$

$$S_e = 0.6 \cdot 200 = 120 \text{ MPa}$$

Utilizando la fórmula propuesta por la normativa ASME B106.1M:

$$d = \left\{ \frac{16(1.5)}{\pi} \left[ 4 \left( \frac{1,6(18718.043)}{120} \right)^2 + 3 \left( \frac{1,4(40690.895)}{220} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/3}$$

$$d = 17.243 \text{ mm}$$

Normalizando

$$d = 20 \text{ mm}$$

- **Criterio de Rigidez**

Se aplicará el siguiente rango para determinar la deflexión máxima que soporta un árbol con una corona helicoidal:

$$[y] = (0.0002 - 0.003)L$$

Por lo que se obtiene un rango de:

$$[y] = (0.01 - 0.144) \text{ mm}$$

Para encontrar la deflexión máxima en el eje de transmisión se utiliza el software SAP 2000. Se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 19-3:** Deformaciones en el eje de la corona del sinfín

| <b>Deformaciones en el eje de la corona del sinfín</b> |                |        |                                               |        |
|--------------------------------------------------------|----------------|--------|-----------------------------------------------|--------|
| <b>Deflexiones en el punto B del eje</b>               | <b>XZ [mm]</b> | 0.0006 | <b>Deflexión total <math>\rho</math> [mm]</b> | 0.0413 |
|                                                        | <b>XY [mm]</b> | 0.0293 |                                               |        |
|                                                        | <b>YZ [mm]</b> | 0.0291 |                                               |        |

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

Como la deformación total está dentro del rango, se cumple con el criterio de deformaciones:

$$0.01 \text{ mm} \leq \rho \leq 0.0144 \text{ mm}$$

$$0.01 \text{ mm} \leq 0.0413 \text{ mm} \leq 0.0144 \text{ mm}$$

- **Criterio de velocidad crítica**

En el análisis de resonancia se hace uso de los criterios de Rayleigh-Ritz y Dunkerley, donde se obtiene un rango de velocidad rotacional en el cual el eje entra en resonancia, por tanto, para cumplir con este análisis se debe asegurar que la velocidad angular del árbol esta fuera del rango obtenido.

- **Rayleigh-Ritz**

$$n_c = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g (W_1 \cdot \delta_1 + W_2 \cdot \delta_2 + \dots + W_n \cdot \delta_n)}{W_1 \cdot \delta_1^2 + W_2 \cdot \delta_2^2 + \dots + W_n \cdot \delta_n^2}}$$

El eje de la corona helicoidal posee un solo elemento que causa carga muerta, la deformación total obtenida debido a esta carga muerta en B es:  $\delta_1 = 0.0413 \text{ mm}$

Reemplazando los valores, se tiene:

$$n_c = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{9.81 \cdot [0.407 \cdot (0.0413/1000)]}{0.407 \cdot (0.0413/1000)^2}} = 4654.048 \text{ RPM}$$

- **Dunkerley**

$$\frac{1}{n_c^2} = \frac{1}{n_1^2} + \frac{1}{n_2^2} + \dots + \frac{1}{n_n^2}$$

Donde:

$$n_i = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta_i}}$$

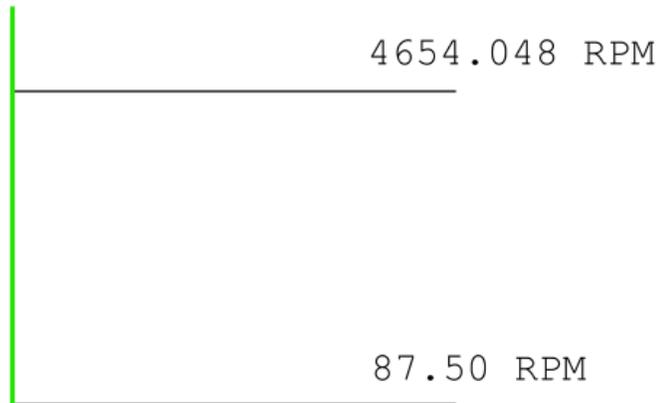
Debido a que el eje de la corona únicamente posee un elemento con carga muerta, las deformaciones  $\delta_1$  y  $\delta_{11}$  son las mismas, reemplazando valores se obtiene:

Peso del engranaje helicoidal:

$$n_1 = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{9.81}{0.0413/1000}} = 4654.048 \text{ RPM}$$

Reemplazando los valores, se obtiene como resultado:

$$\frac{1}{n_c^2} = \frac{1}{(4654.048)^2} = 4654.048 \text{ RPM}$$



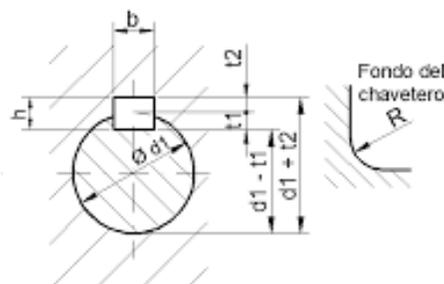
**Figura 20-3:** Comprobación de velocidades crítica y de operación para el eje de la corona

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

Al comparar los valores el rango de velocidades angulares que causan resonancia y la velocidad angular a la que trabaja el eje, se puede concluir que el eje experimentara el fenómeno de la resonancia.

- **Cuña del eje de la corona**

El diseño de la cuña para los ejes está basado en la norma DIN 6885-1, a continuación, se enlistan las dimensiones obtenidas:



**Figura 21-3:** Cuña para el eje de la corona  
Fuente: (DIN 6885-1 pág. 2)

**Tabla 20-3:** Dimensiones de la cuña eje de la corona

| Cota     | Valor | Unidades |
|----------|-------|----------|
| d        | 20    | mm       |
| b        | 6     | mm       |
| h        | 6     | mm       |
| t1       | 3.6   | mm       |
| t2       | 2.4   | mm       |
| Longitud | 16    | mm       |

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

- **Factor de seguridad a corte**

El material seleccionado para la cuña es AISI 1020 HR, al esfuerzo de corte se obtiene el siguiente factor de seguridad:

$$\frac{2T}{dbl} = \frac{S_{sy}}{n_s}$$
$$\frac{2(40690.895)}{(20 \cdot 6 \cdot 16)} = \frac{220}{2 \cdot n_s}$$
$$n_s = 2.595$$

- **Factor de seguridad a compresión**

El factor de seguridad para el esfuerzo de compresión resulta:

$$\frac{4T}{dlh} = \frac{S_y}{n_c}$$
$$\frac{4(40690.895)}{(20 \cdot 13 \cdot 6)} = \frac{220}{n_c}$$
$$n_c = 2.595$$

### 3.5.3. Selección de rodamientos

#### 3.5.3.1. Rodamientos para eje de la corona helicoidal

- **Selección del Rodamiento en A**

*Chequeo a carga dinámica para el rodamiento A fijo.*

$$C' = \frac{f_h}{f_n} \cdot P$$

Se trabajará con una confiabilidad del 90%, por tanto:

**Tabla 11-3:** Confiabilidad rodamientos

| Confiabilidad | a1   | L   |
|---------------|------|-----|
| 90            | 1    | L10 |
| 95            | 0.62 | L5  |
| 96            | 0.53 | L4  |
| 97            | 0.44 | L3  |
| 98            | 0.33 | L2  |
| 99            | 0.21 | L1  |

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

Los rodamientos para ubicar corresponden a rígidos de bolas, por lo tanto:

$$f_h = \left(\frac{L_{10}}{500}\right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{1 \cdot 20000}{500}\right)^{\frac{1}{3}} = 3.42$$

El tiempo en horas de funcionamiento, se define según la maquinaria a la cual se va a montar el rodamiento. En el caso de los reductores dado que son maquinas previstas para 8 horas de servicio, no totalmente utilizadas se utiliza un valor en el intervalo:

$$L_h = [16000 - 24000] \text{ horas}$$

El factor de velocidad se lo define mediante la expresión:

$$f_n = \left(\frac{33.3}{n}\right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{33.3}{87.5}\right)^{\frac{1}{3}} = 0.725$$

Las cargas que soportan los rodamientos son las reacciones producto de las fuerzas. Para el caso de la corona helicoidal se obtuvieron los siguientes valores:

$$F_r = 779.918 \text{ N}$$

$$F_a = 215.034 \text{ N}$$

La carga radial equivalente se calcula mediante la expresión:

$$P_r = X \cdot F_r + Y \cdot F_a$$

Del catálogo NTN se obtienen los siguientes valores para rodamientos rígidos de bolas 6004 tipo abierto:

$$\frac{f_o \cdot F_a}{C_{or}} = \frac{13.9 \cdot 215.034 \text{ N}}{5050 \text{ N}} = 0.592$$

$$e = 0.249$$

$$\frac{F_a}{F_r} = 0.276 > e$$

$$X = 0.56$$

$$Y = 1.789$$

$$P_r = (0.56 \cdot 779.918) + (1.789 \cdot 215.034) = 821.451 \text{ N}$$

$$P_r = 0.821 \text{ KN}$$

Calculando la capacidad de carga requerida:

$$C' = \frac{3.42}{0.725} \cdot (0.821) = 3.877 \text{ KN}$$

Se compara con el catálogo y se admite el rodamiento:

$$C' < Cr$$

$$3.877 \text{ KN} < 9.40 \text{ KN}$$

### ***Chequeo a carga estática para el rodamiento A fijo***

El chequeo estático se lo realiza de igual manera tomando en cuenta las siguientes constantes:

$$f_s = 1.5$$

$$P_o = 0.6 \cdot F_r + 0.5 \cdot F_a$$

$$P_o = (0.6 \cdot 779.918) + (0.5 \cdot 215.034) = 575.468 \text{ N}$$

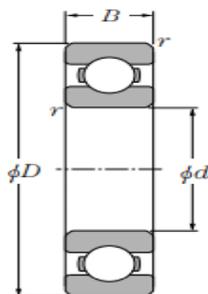
Como  $P_o < F_r$  se usa  $P_o = F_r$ , obteniendo:

$$C_o' = f_s \cdot P_o = 1.5 \cdot 779.918 = 1169.878 \text{ N} = 1.170 \text{ KN}$$

$$C_o' < C_{or}$$

$$1.170 \text{ KN} < 5.05 \text{ KN}$$

Por lo tanto, se selecciona un rodamiento rígido de bolas 6004 tipo abierto:



**Figura 22-3:** Rodamiento rígido de bolas

Fuente: (NTN corporation, 2004 págs. B-8)

**Tabla 22-3:** Geometría de rodamiento A en el eje de corona helicoidal

| Designación | Valor | Unidades |
|-------------|-------|----------|
| d           | 20    | mm       |
| D           | 42    | mm       |
| B           | 12    | mm       |
| r           | 0.6   | mm       |
| Cr          | 9.40  | KN       |
| Cor         | 5.05  | KN       |

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

- **Selección del Rodamiento en C**

*Chequeo a carga dinámica para el rodamiento C flotante*

$$C' = \frac{f_h}{f_n} * P$$

$$L_h = 20\ 000 \text{ horas}$$

$$f_n = \left(\frac{33.3}{n}\right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{33.3}{87.5}\right)^{\frac{1}{3}} = 0.725$$

Para el caso del lado C se obtuvo:

$$F_r = 688.091 \text{ N}$$

$$F_a = 0$$

$$C' = \frac{3.42}{0.725} \cdot (688.091) = 3.247 \text{ KN}$$

Del catálogo NTN se obtienen los siguientes valores para rodamientos rígidos de bolas, una vez seleccionado el rodamiento 6004:

$$\frac{f_o * F_a}{C_{or}} = 0$$

$$e = 0$$

$$\frac{F_a}{F_r} = e$$

$$X = 1$$

$$Y = 0$$

$$C' < Cr$$

$$3.247 \text{ KN} < 9.40 \text{ KN}$$

### ***Chequeo a carga estática para el rodamiento B flotante***

El chequeo estático se lo realiza de igual manera tomando en cuenta las siguientes constantes:

$$f_s = 1.5$$

$$P_o = 0.6 \cdot F_r + 0.5 \cdot F_a$$

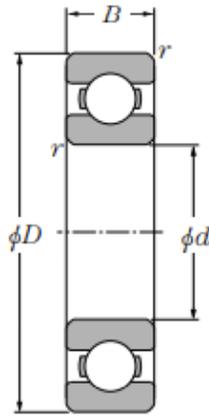
$$P_o = (0.6 \cdot 688.091) = 412.855 \text{ N}$$

$$C_o' = f_s \cdot P_o = 1.5 \cdot 688.091 = 1032.137 \text{ N} = 1.032 \text{ KN}$$

$$C_o' < C_{or}$$

$$1.032 \text{ KN} < 5.05 \text{ KN}$$

Por lo tanto, se selecciona un rodamiento rígido de bolas 6004 tipo abierto:



**Figura 23-3:** Rodamiento rígido de bolas  
**Fuente:** (NTN corporation, 2004 págs. B-8)

**Tabla 23-3:** Geometría de rodamiento C del eje de la corona helicoidal

| Designación | Valor | Unidades |
|-------------|-------|----------|
| d           | 20    | mm       |
| D           | 42    | mm       |
| B           | 12    | mm       |
| r           | 0.6   | mm       |
| Cr          | 9.40  | KN       |
| Cor         | 5.05  | KN       |

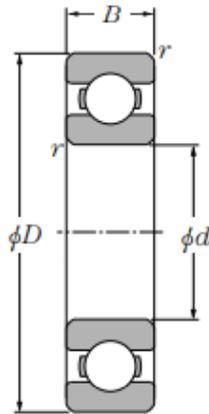
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

### 3.5.3.2. Rodamientos para el eje del tornillo sinfín

Los rodamientos del eje del tornillo sinfín que se obtuvieron, siguiendo la misma metodología usada para la selección de rodamientos en el eje de la corona helicoidal, son los siguientes:

- **Selección del Rodamiento en A**

El rodamiento seleccionado en A es el NTN rígido de bolas 6004 tipo abierto:



**Figura 24-3:** Rodamiento rígido de bolas  
**Fuente:** (NTN corporation, 2004 págs. B-8)

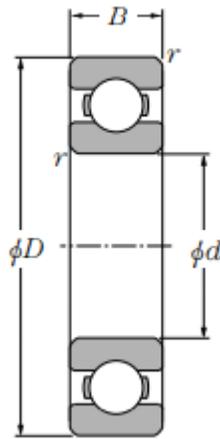
**Tabla 12-3:** Geometría de rodamiento A en el eje del tornillo sinfín

| Designación | Valor | Unidades |
|-------------|-------|----------|
| d           | 20    | mm       |
| D           | 42    | mm       |
| B           | 12    | mm       |
| r           | 0.6   | mm       |
| Cr          | 9.40  | KN       |
| Cor         | 5.05  | KN       |

**Realizado por:** (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

- **Selección del Rodamiento en C**

El rodamiento seleccionado en C es el NTN rígido de bolas 6004 tipo abierto:



**Figura 25-3:** Rodamiento rígido de bolas  
**Fuente:** (NTN corporation, 2004 págs. B-8)

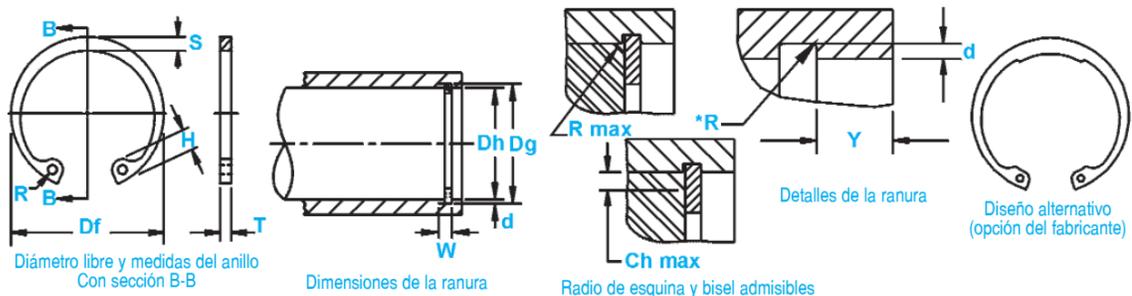
**Tabla 25-3:** Geometría de rodamiento C en el eje de corona helicoidal

| Designación | Valor | Unidades |
|-------------|-------|----------|
| d           | 20    | mm       |
| D           | 42    | mm       |
| B           | 12    | mm       |
| r           | 0.6   | mm       |
| Cr          | 9.40  | KN       |
| Cor         | 5.05  | KN       |

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

### 3.5.4. Selección de anillos retenedores

Para fijar los engranes al eje será necesario anillos retenedores. En este caso, es necesario colocar dos anillos retenedores en el engrane helicoidal, puesto que no hay ningún tope generado por el eje escalonado, los anillos para la corona que se seleccionan de acuerdo con la norma DIN 472 son:



**Figura 26-3:** Anillos de fijación  
**Fuente:** (DIN 472 pág. 26)

| No. de Anillo | CARCASA   |      | TAMANO DE RANURA |        |        |              | TAMANO Y PESO DEL ANILLO |             |       |                |        |                      | DATOS SUPLEMENTARIOS |                       |       |                  |                        |                        |                              |                         |
|---------------|-----------|------|------------------|--------|--------|--------------|--------------------------|-------------|-------|----------------|--------|----------------------|----------------------|-----------------------|-------|------------------|------------------------|------------------------|------------------------------|-------------------------|
|               | Dia. (mm) |      | DIAMETRO         |        | ANCHUR | PRO-FUNDIDAD |                          | ESPESOR *** |       | DIAMETRO LIBRE |        | ALTURA de la OREJETA | SECCION MAX.         | DIAMETRO DEL AGUJERO. | PESO  | MARGEN DEL BORDE | CARGA DE EMPUJE Anillo | CARGA DE EMPUJE Ranura | Radio y bisel Rad./admisible | Carga máx. c/ R/Ch Máx. |
|               | Dh        | Dg   | Tol.             | W Min. | d      | T            | Tol.                     | Df          | Tol.  | H Max.         | S Ref. | R Min.               | kg/1000              | Y Min.                | Pr kN | Pg kN            | R/Ch Max.              | P'r kN                 |                              |                         |
| DHO-8         | 8         | 8,4  | +0,09            | 0,90   | 0,20   | 0,80         | -0,05                    | 8,7         |       | 2,4            | 1,1    | 1,0                  | 0,10                 | 0,6                   | 2,0   | 0,86             | 0,5                    | 1,5                    |                              |                         |
| DHO-9         | 9         | 9,4  |                  | 0,90   | 0,20   | 0,80         |                          | 9,8         |       | 2,5            | 1,3    | 1,0                  | 0,13                 | 0,6                   | 2,0   | 0,96             | 0,5                    | 1,5                    |                              |                         |
| DHO-10        | 10        | 10,4 |                  | 1,10   | 0,20   | 1,00         |                          | 10,8        | +0,36 | 3,2            | 1,4    | 1,2                  | 0,26                 | 0,6                   | 4,0   | 1,08             | 0,5                    | 2,2                    |                              |                         |
| DHO-11        | 11        | 11,4 |                  | 1,10   | 0,20   | 1,00         |                          | 11,8        | -0,10 | 3,3            | 1,5    | 1,2                  | 0,31                 | 0,6                   | 4,0   | 1,17             | 0,5                    | 2,3                    |                              |                         |
| DHO-12        | 12        | 12,5 |                  | 1,10   | 0,25   | 1,00         |                          | 13,0        |       | 3,4            | 1,7    | 1,5                  | 0,37                 | 0,8                   | 4,0   | 1,60             | 0,5                    | 2,3                    |                              |                         |
| DHO-13        | 13        | 13,6 | +0,11            | 1,10   | 0,30   | 1,00         |                          | 14,1        |       | 3,6            | 1,8    | 1,5                  | 0,42                 | 0,9                   | 4,2   | 2,10             | 0,5                    | 2,3                    |                              |                         |
| DHO-14        | 14        | 14,6 |                  | 1,10   | 0,30   | 1,00         |                          | 15,1        |       | 3,7            | 1,8    | 1,7                  | 0,52                 | 0,9                   | 4,5   | 2,25             | 0,5                    | 2,3                    |                              |                         |
| DHO-15        | 15        | 15,7 |                  | 1,10   | 0,35   | 1,00         |                          | 16,2        |       | 3,7            | 2,0    | 1,7                  | 0,56                 | 1,1                   | 5,0   | 2,80             | 0,5                    | 2,3                    |                              |                         |
| DHO-16        | 16        | 16,8 |                  | 1,10   | 0,40   | 1,00         |                          | 17,3        |       | 3,8            | 2,0    | 1,7                  | 0,60                 | 1,2                   | 5,5   | 3,40             | 1,0                    | 2,6                    |                              |                         |
| DHO-17        | 17        | 17,8 |                  | 1,10   | 0,40   | 1,00         |                          | 18,3        |       | 3,9            | 2,1    | 1,7                  | 0,65                 | 1,2                   | 6,0   | 3,60             | 1,0                    | 2,5                    |                              |                         |
| DHO-18        | 18        | 19,0 |                  | 1,10   | 0,50   | 1,00         |                          | 19,5        |       | 4,1            | 2,2    | 2,0                  | 0,74                 | 1,5                   | 6,5   | 4,80             | 1,0                    | 2,6                    |                              |                         |
| DHO-19        | 19        | 20,0 |                  | 1,10   | 0,50   | 1,00         |                          | 20,5        |       | 4,1            | 2,2    | 2,0                  | 0,83                 | 1,5                   | 6,8   | 5,10             | 1,0                    | 2,6                    |                              |                         |
| DHO-20        | 20        | 21,0 | +0,13            | 1,10   | 0,50   | 1,00         |                          | 21,5        | +0,42 | 4,1            | 2,3    | 2,0                  | 0,90                 | 1,5                   | 7,2   | 5,40             | 1,0                    | 2,6                    |                              |                         |
| DHO-21        | 21        | 22,0 |                  | 1,10   | 0,50   | 1,00         |                          | 22,5        | -0,13 | 4,2            | 2,4    | 2,0                  | 1,00                 | 1,5                   | 7,6   | 5,70             | 1,0                    | 2,6                    |                              |                         |
| DHO-22        | 22        | 23,0 |                  | 1,10   | 0,50   | 1,00         |                          | 23,5        |       | 4,2            | 2,5    | 2,0                  | 1,10                 | 1,5                   | 8,0   | 5,90             | 1,0                    | 2,7                    |                              |                         |
| DHO-23        | 23        | 24,1 |                  | 1,30   | 0,55   | 1,20         |                          | 24,6        |       | 4,2            | 2,5    | 2,0                  | 1,34                 | 1,7                   | 8,0   | 6,80             | 1,0                    | 4,6                    |                              |                         |
| DHO-24        | 24        | 25,2 |                  | 1,30   | 0,60   | 1,20         |                          | 25,9        |       | 4,4            | 2,6    | 2,0                  | 1,42                 | 1,8                   | 13,9  | 7,70             | 1,0                    | 4,6                    |                              |                         |
| DHO-25        | 25        | 26,2 |                  | 1,30   | 0,60   | 1,20         |                          | 26,9        | +0,42 | 4,5            | 2,7    | 2,0                  | 1,50                 | 1,8                   | 14,6  | 8,00             | 1,0                    | 4,7                    |                              |                         |

**Figura 27-3:** Especificación para anillos retenedores DIN 472

Fuente: (DIN 472 pág. 26)

### 3.5.4.1. Anillos para eje de la corona helicoidal

Se dispone de un diámetro interior de 25 mm, por lo que el anillo a seleccionar es DHO-25, con la siguiente geometría:

**Tabla 13-3:** Geometría anillos de fijación de la corona helicoidal

| Tamaño de Ranura |        | Tamaño y peso del anillo |         |        |                             | Detalles de la ranura |            | Carga de empuje [kN]           |                                  |
|------------------|--------|--------------------------|---------|--------|-----------------------------|-----------------------|------------|--------------------------------|----------------------------------|
| Dg [mm]          | W [mm] | d [mm]                   | Df [mm] | T [mm] | Peso por 1000 unidades [kg] | Y [mm]                | R min [mm] | Factor de seguridad del anillo | Factor de seguridad de la ranura |
| 26.2             | 1.3    | 0.6                      | 26.9    | 1.2    | 1.5                         | 1.8                   | 2.0        | 14.6                           | 8                                |

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

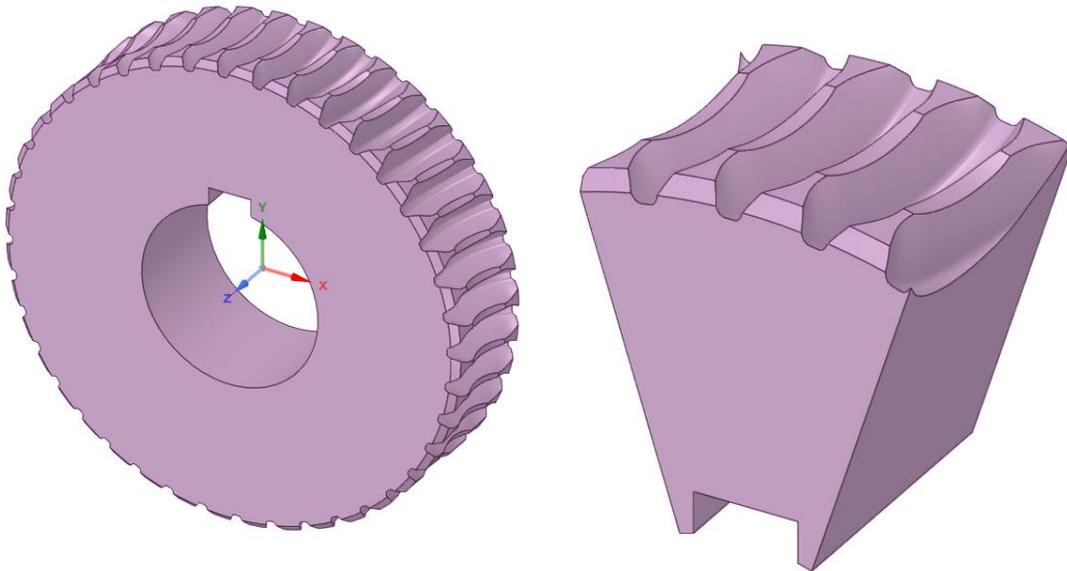
### 3.6. Validación mediante software ANSYS

#### 3.6.1. Corona helicoidal

##### Preproceso:

- **Geometría**

Se importa la geometría al software ANSYS, específicamente al módulo SpaceClaim, en donde, se realizan modificaciones que permitan simplificar la geometría de la corona helicoidal. Debido al costo computacional que implica analizar la corona completa se cortó el elemento de tal manera que el análisis sea ejecutado únicamente en una pequeña porción del sólido.



**Figura 28-3:** Corona helicoidal seccionada con SpaceClaim

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

- **Materiales**

Se determina el material del cual está hecho la corona helicoidal, y a continuación se enlistan algunas de sus propiedades:

**Tabla 14-3:** Propiedades físicas y mecánicas de la corona helicoidal

| Material                | SAE 64 |                   |
|-------------------------|--------|-------------------|
| Densidad                | 9.00   | g/cm <sup>3</sup> |
| Módulo de Young         | 79000  | MPa               |
| Coefficiente de Poisson | 0.33   |                   |
| Esfuerzo de Tracción    | 250    | MPa               |
| Esfuerza de Compresión  | 250    | MPa               |
| Esfuerzo de Fluencia    | 150    | MPa               |

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

|    | A                          | B          | C    | D | E |
|----|----------------------------|------------|------|---|---|
| 1  | Property                   | Value      | Unit |   |   |
| 2  | Material Field Variables   | Table      |      |   |   |
| 3  | Isotropic Elasticity       |            |      |   |   |
| 4  | Derive from                | Young's... |      |   |   |
| 5  | Young's Modulus            | 79000      | MPa  |   |   |
| 6  | Poisson's Ratio            | 0.33       |      |   |   |
| 7  | Bulk Modulus               | 7.7451E+10 | Pa   |   |   |
| 8  | Shear Modulus              | 2.9699E+10 | Pa   |   |   |
| 9  | Tensile Yield Strength     | 150        | MPa  |   |   |
| 10 | Compressive Yield Strength | 150        | MPa  |   |   |
| 11 | Tensile Ultimate Strength  | 250        | MPa  |   |   |

**Figura 29-3:** Interfaz de ingreso de las propiedades de la corona helicoidal en el software ANSYS

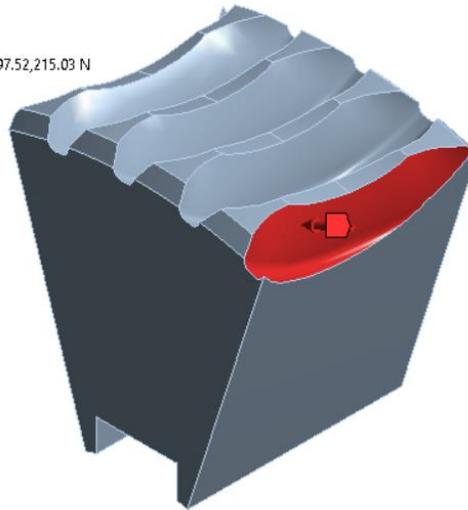
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

De acuerdo con la figura 29-3 se ingresan las propiedades del material correspondiente a la corona helicoidal en el software Ansys 2020 R1

- **Fuerzas**

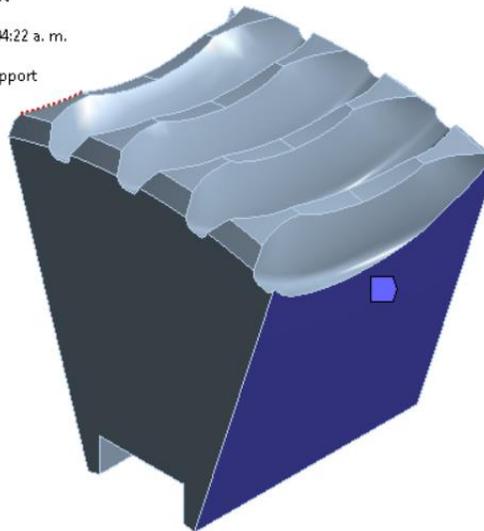
Se determinan las fuerzas a las que están sometidos los dientes de la corona helicoidal, y además se deben establecer los soportes adecuados para simular el esfuerzo que experimenta la corona helicoidal. Debido a que se realizó un corte del sólido original se establecen soportes de tipo “Fixed” en las áreas de seccionadas y se introduce una fuerza con las componentes respectivas de las cargas tangencial, radial y axial presentes en la cara del diente de la corona

**A: Static Structural**  
Force  
Time: 1. s  
06/04/2022 04:21 a. m.  
Force: 1460.6 N  
Components: -1356.4,-497.52,215.03 N



**Figura 30-3:** Fuerza equivalente aplicada en la cara del diente  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

**A: Static Structural**  
Fixed Support  
Time: 1. s  
06/04/2022 04:22 a. m.  
Fixed Support

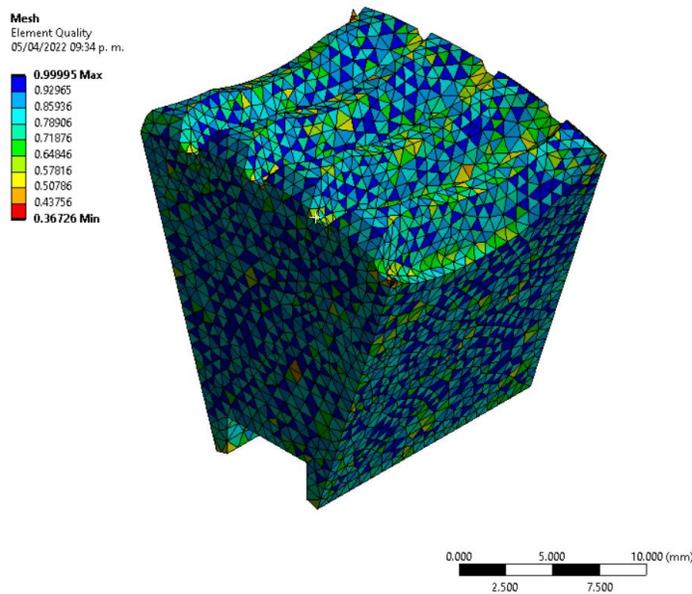


**Figura 31-3:** Restricción de frontera en el sólido seccionado  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

**Proceso:**

- **Mallado**

El proceso de mallado incluye distintos métodos que pueden ser controladores globales o locales, en el mallado de la corona helicoidal únicamente se utilizó un componente “Body Sizing” que permite determinar el tamaño de los elementos del cuerpo, inicialmente se tomó el valor de 0.8 mm, sin embargo, este valor será parametrizado posteriormente con el objetivo de realizar un análisis de convergencia en el postproceso.

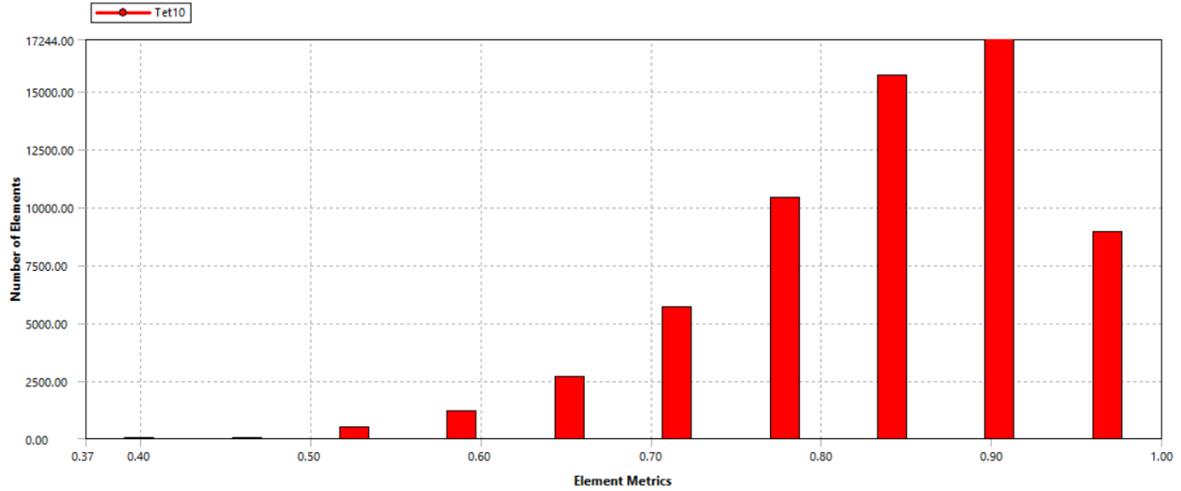


**Figura 32-3:** Calidad de malla en la corona seccionada  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

Utilizando la métrica de malla llamada “Element Quality” se identifica que la calidad mínima de malla es 0.367 lo cual supera con holgura la calidad mínima requerida. Además, se obtuvo un promedio de calidad de malla de 0.840 lo cual es un valor muy aceptable.

| Mesh Metric                                 | Element Quality |
|---------------------------------------------|-----------------|
| <input type="checkbox"/> Min                | 0.36726         |
| <input type="checkbox"/> Max                | 0.99995         |
| <input type="checkbox"/> Average            | 0.8404          |
| <input type="checkbox"/> Standard Deviation | 9.3229e-002     |

**Figura 33-3:** Métrica de malla de ANSYS 2020 R1  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)



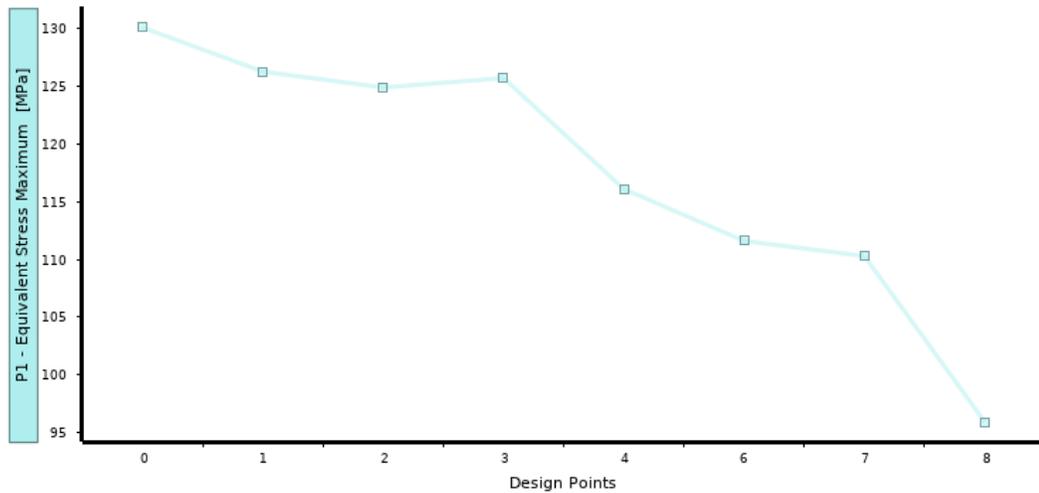
**Figura 34-3:** Métrica de elementos versus número de elementos  
**Realizado por:** (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

**Postproceso:**

Una vez finalizado el proceso de mallado el cual debe tener una calidad mínima de 0.20 y promedio de al menos 0.75 se procede con el análisis de convergencia, lo cual, permite que los resultados obtenidos mediante el software de elementos finitos sea lo más aproximado a la realidad posible. Para lo cual, después de haber parametrizado como dato de entrada el tamaño de elemento en el mallado y como datos de salida el esfuerzo máximo de Von Mises y el factor de seguridad a carga estática, se observa que a partir del primer punto de diseño al tercero se obtiene una convergencia de resultados. Por tanto, se escoge como tamaño de elemento definitivo en el mallado 1 mm, es decir, el primer punto de diseño.

| Table of Design Points |                |                               |                                |                            |
|------------------------|----------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
|                        | A              | B                             | C                              | D                          |
| 1                      | Name           | P2 - Body Sizing Element Size | P1 - Equivalent Stress Maximum | P3 - Safety Factor Minimum |
| 2                      | Units          | mm                            | MPa                            |                            |
| 3                      | DP 0           | 0.85                          | 130.11                         | 1.1529                     |
| 4                      | DP 1 (Current) | 1                             | 126.29                         | 1.1878                     |
| 5                      | DP 2           | 1.5                           | 124.91                         | 1.2008                     |
| 6                      | DP 3           | 1.55                          | 125.73                         | 1.1931                     |
| 7                      | DP 4           | 2                             | 116.11                         | 1.2918                     |
| 8                      | DP 6           | 2.5                           | 111.61                         | 1.344                      |
| 9                      | DP 7           | 3                             | 110.3                          | 1.3599                     |
| 10                     | DP 8           | 3.5                           | 95.929                         | 1.5637                     |
| *                      |                |                               |                                |                            |

**Figura 35-3:** Parametrización de variables  
**Realizado por:** (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)



**Figura 36-3:** Análisis de convergencia  
 Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

### 3.6.2. Eje de la corona helicoidal

#### Preproceso:

- **Geometría**

Se importa la geometría al software ANSYS, específicamente al módulo SpaceClaim, en donde, se realizan modificaciones que permitan simplificar el proceso de mallado del eje de la corona. Debido a que se plantea usar un método de barrido para el mallado es necesario dividir al sólido en varias partes, sin embargo, como se trata de un mismo elemento se utilizará la herramienta “share topology” para obtener los efectos deseados en el comportamiento del análisis mediante el método de elementos finitos.



**Figura 36-3:** Eje de la corona  
**Realizado por:** (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

- **Materiales**

Se determina el material del cual está hecho el eje de la corona helicoidal, y a continuación se enlistan algunas de sus propiedades:

**Tabla 28-3:** Propiedades físicas y mecánicas del eje de la corona helicoidal

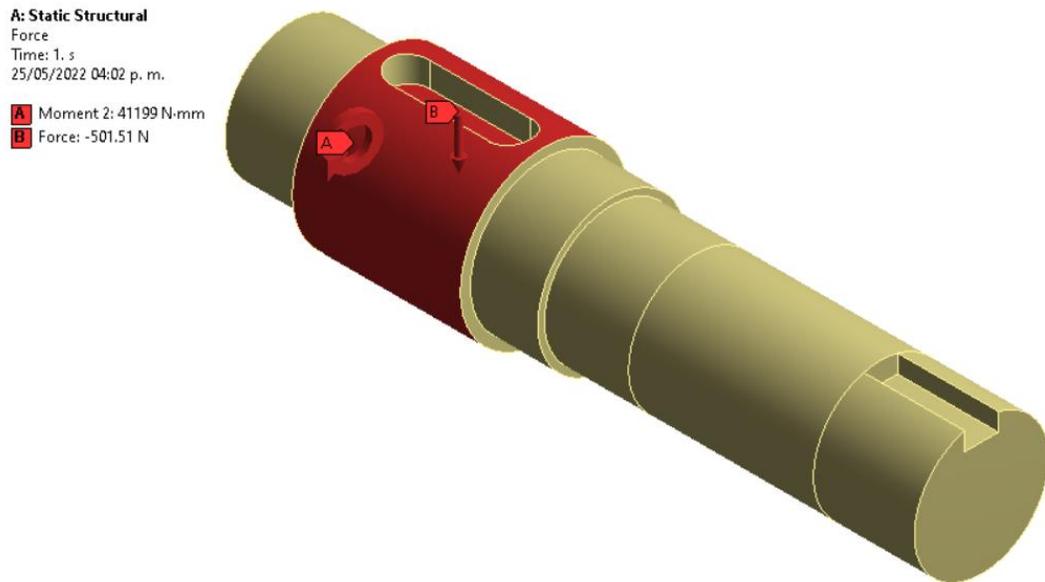
| <b>Material</b>                | <b>AISI 1018 HR</b> |                   |
|--------------------------------|---------------------|-------------------|
| <b>Densidad</b>                | 7.90                | g/cm <sup>3</sup> |
| <b>Módulo de Young</b>         | 210                 | GPa               |
| <b>Coefficiente de Poisson</b> | 0.29                |                   |
| <b>Esfuerzo de Tracción</b>    | 400                 | MPa               |
| <b>Esfuerzo de Compresión</b>  | 400                 | MPa               |
| <b>Esfuerzo de Fluencia</b>    | 220                 | MPa               |

**Realizado por:** (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

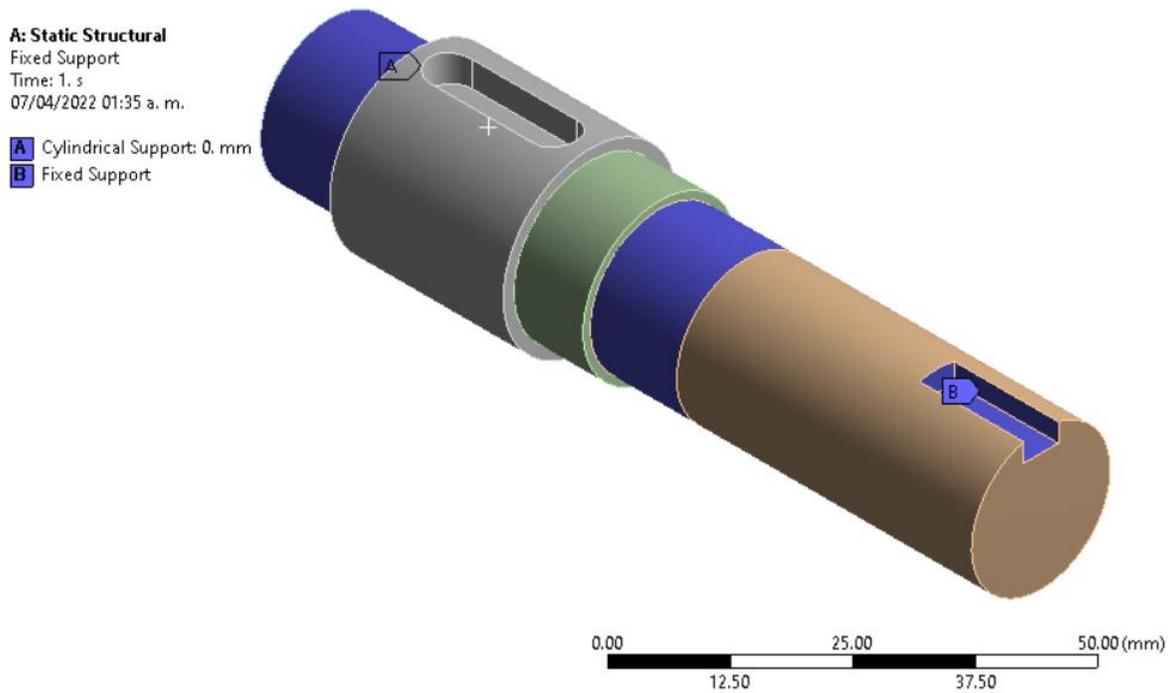
De acuerdo con la figura 37-3 se ingresan las propiedades del material correspondiente al eje de la corona helicoidal en el software Ansys 2020 R1

- **Fuerzas**

Se ingresan los valores de momento y fuerza que experimenta el eje de la corona, para lo cual, se han utilizado dos momentos que corresponden al torque y el momento del plano y-z respectivamente, además de la carga radial. Para los rodamientos se han utilizado soportes del tipo “Cylindrical” y un soporte tipo “Fixed” en el chavetero de salida de potencia, lo cual simula el estado de máximo esfuerzo que puede experimentar el eje.



**Figura 37-3:** Aplicación de fuerzas y momentos equivalentes en el eje de la corona  
**Realizado por:** (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

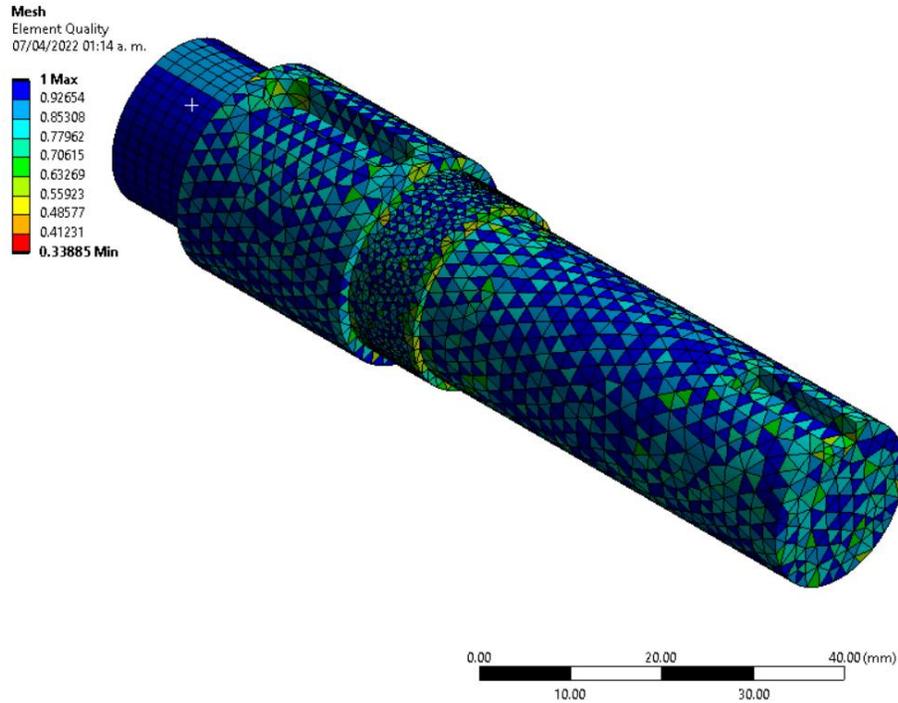


**Figura 38-3:** Restricciones de frontera para el eje de la corona  
 Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

**Proceso:**

- **Mallado**

El proceso de mallado incluye distintos métodos que pueden ser controladores globales o locales, en el mallado del eje de la corona además de controladores de tipo “Edge Sizing” se utilizó un componente “Body Sizing” que permite determinar el tamaño de los elementos del cuerpo, inicialmente se tomó el valor de 2 mm, sin embargo, este valor será parametrizado posteriormente con el objetivo de realizar un análisis de convergencia en el postproceso.

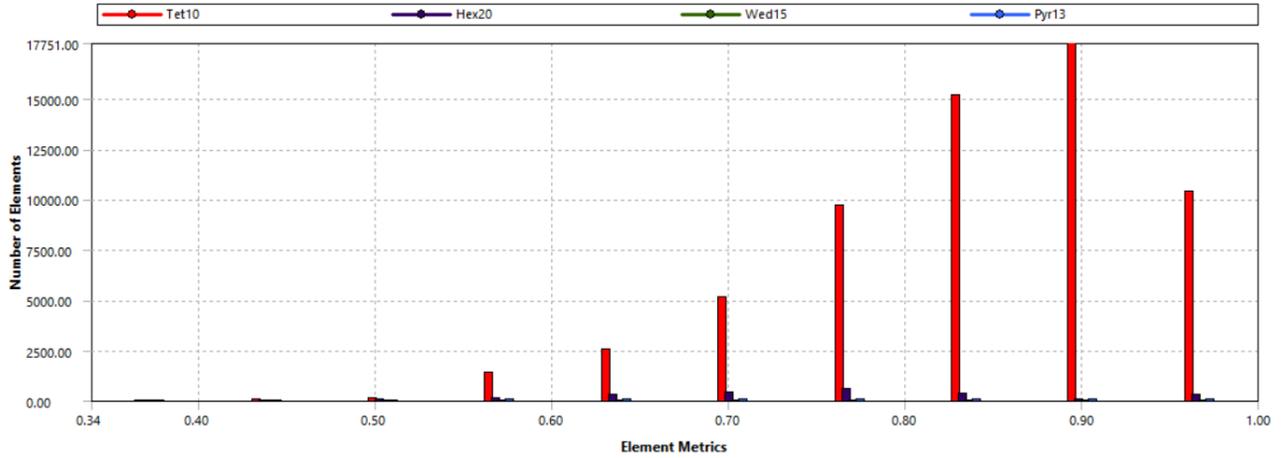


**Figura 39-3:** Calidad de malla del eje de la corona  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

Utilizando la métrica de malla llamada “Element Quality” se identifica que la calidad mínima de malla es 0.339 lo cual supera con holgura la calidad mínima requerida. Además, se obtuvo un promedio de calidad de malla de 0.836 lo cual es un valor muy aceptable.

| Mesh Metric                                 | Element Quality |
|---------------------------------------------|-----------------|
| <input type="checkbox"/> Min                | 0.33885         |
| <input type="checkbox"/> Max                | 1.              |
| <input type="checkbox"/> Average            | 0.8365          |
| <input type="checkbox"/> Standard Deviation | 9.9687e-002     |

**Figura 40-3:** Métrica de malla de ANSYS 2020 R1  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)



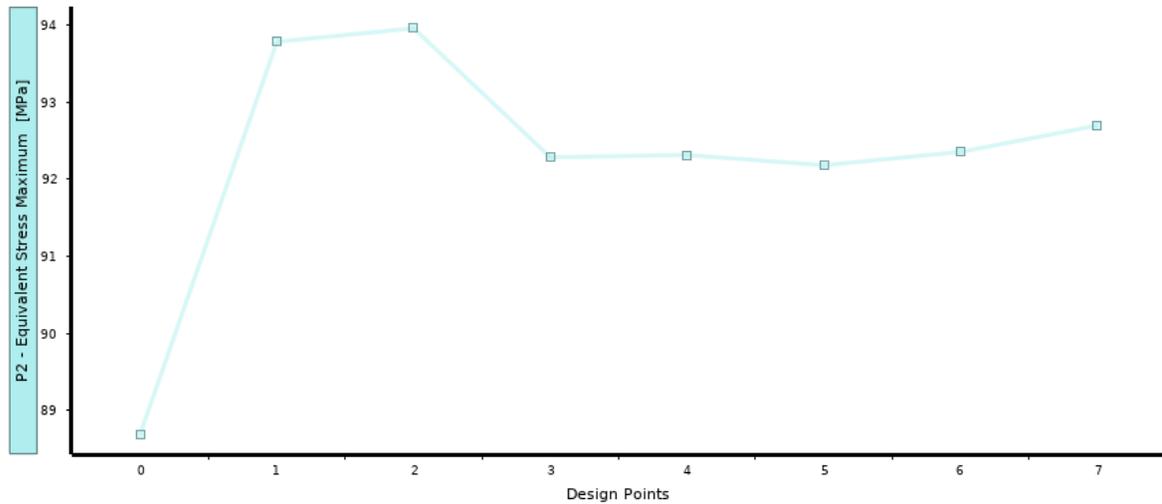
**Figura 41-3:** Métrica de elementos versus número de elementos  
 Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

**Postproceso:**

Una vez finalizado el proceso de mallado el cual debe tener una calidad mínima de 0.20 y promedio de al menos 0.75 se procede con el análisis de convergencia, lo cual, permite que los resultados obtenidos mediante el software de elementos finitos sea lo más aproximado a la realidad posible. Para lo cual, después de haber parametrizado como dato de entrada el tamaño de elemento en el mallado y como datos de salida el esfuerzo máximo de Von Mises y el factor de seguridad a carga estática, se observa que a partir del tercer punto de diseño al séptimo se obtiene una convergencia de resultados. Por tanto, se escoge como tamaño de elemento definitivo en el mallado 1.85 mm, es decir, el cuarto punto de diseño.

| Table of Design Points |                |                               |                                |                            |
|------------------------|----------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
|                        | A              | B                             | C                              | D                          |
| 1                      | Name           | P1 - Body Sizing Element Size | P2 - Equivalent Stress Maximum | P3 - Safety Factor Minimum |
| 2                      | Units          | mm                            | MPa                            |                            |
| 3                      | DP 0 (Current) | 2                             | 88.693                         | 2.8187                     |
| 4                      | DP 1           | 1.9                           | 93.784                         | 2.6657                     |
| 5                      | DP 2           | 1.88                          | 93.96                          | 2.6607                     |
| 6                      | DP 3           | 1.86                          | 92.285                         | 2.709                      |
| 7                      | DP 4           | 1.85                          | 92.315                         | 2.7081                     |
| 8                      | DP 5           | 1.82                          | 92.182                         | 2.712                      |
| 9                      | DP 6           | 1.81                          | 92.355                         | 2.7069                     |
| 10                     | DP 7           | 1.8                           | 92.697                         | 2.697                      |
| *                      |                |                               |                                |                            |

**Figura 42-3:** Parametrización de variables  
 Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)



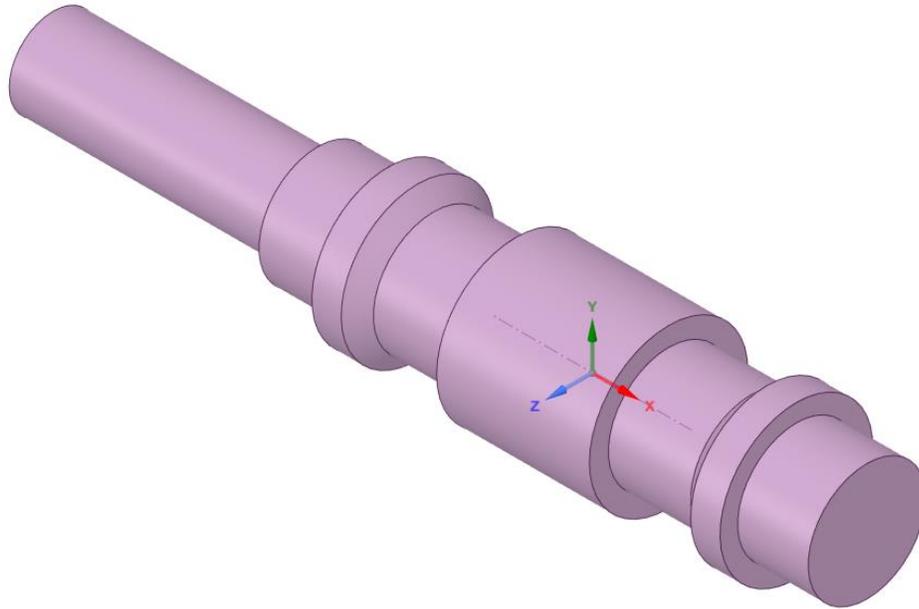
**Figura 43-3:** Análisis de convergencia  
 Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

### 3.6.3. Tornillo sin fin

#### Preproceso:

- **Geometría**

Se importa la geometría al software ANSYS, específicamente al módulo SpaceClaim, como se aprecia en la figura 45-3 se simplificó la geometría del tornillo sin fin eliminando la parte de la rosca para poder obtener un análisis más simple, llevando a un costo computacional menor, dejando el eje con el diámetro exterior en donde se colocaron las distintas fuerzas a las que está sometido el elemento.



**Figura 44-3:** Tornillo sin fin.  
 Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

- **Materiales**

La tabla 29-3 describe las propiedades mecánicas del material que se utilizó para la simulación del tornillo sin fin.

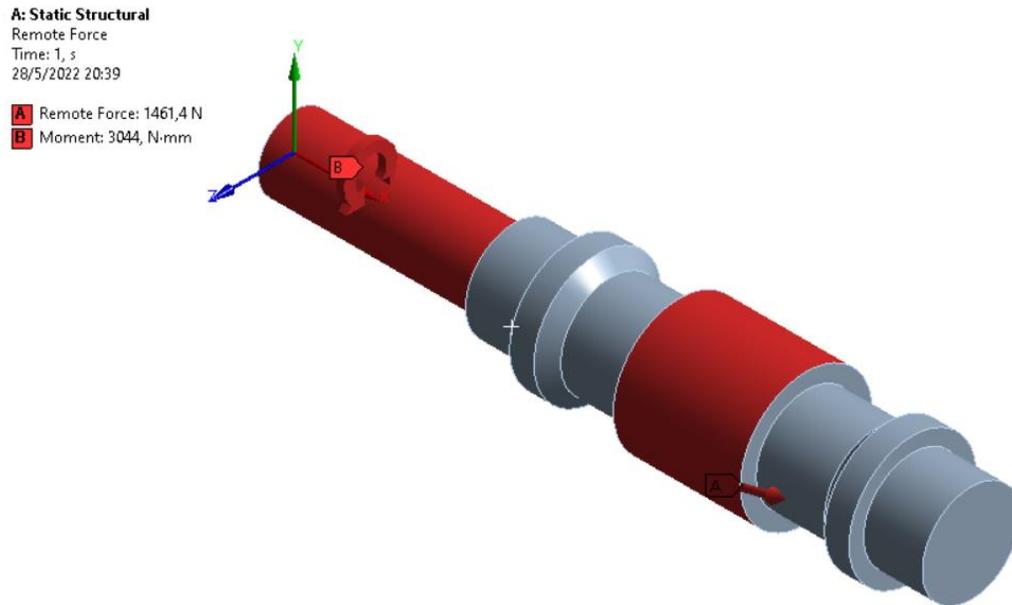
**Tabla 29-3:** Propiedades físicas y mecánicas del tornillo sin fin.

| <b>Material</b>                | <b>AISI 1045 HR</b> |                   |
|--------------------------------|---------------------|-------------------|
| <b>Densidad</b>                | 7.90                | g/cm <sup>3</sup> |
| <b>Módulo de Young</b>         | 210                 | GPa               |
| <b>Coefficiente de Poisson</b> | 0.29                |                   |
| <b>Esfuerzo de Tracción</b>    | 310                 | MPa               |
| <b>Esfuerzo de Compresión</b>  | 310                 | MPa               |
| <b>Esfuerzo de Fluencia</b>    | 565                 | MPa               |

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

- **Fuerzas**

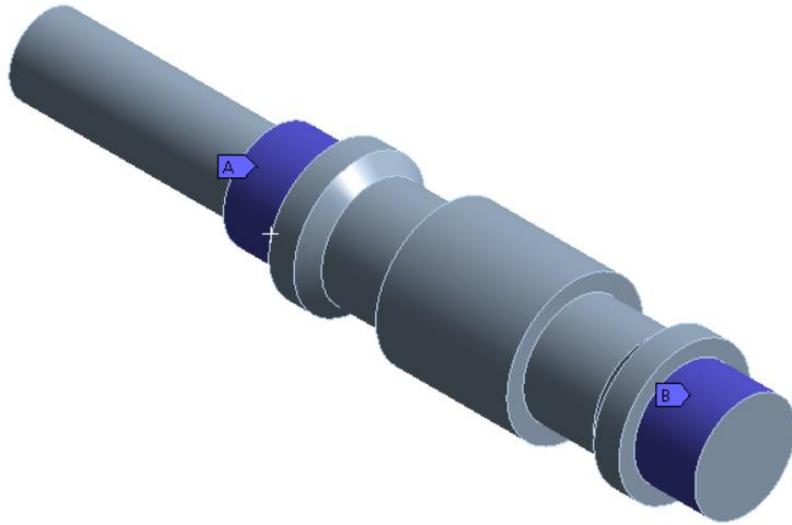
Se ingresan los valores de momento y fuerza que experimenta el tornillo sin fin, para lo cual, se utilizó una fuerza remota ubicada en el extremo de la cara del tornillo sin fin, las mismas que son la fuerza axial, radial y tangencial que se calcularon previamente en el diseño de materialización. Para los rodamientos se han utilizado soportes del tipo “Cylindrical” y un momento de entrada el cual corresponde al motor.



**Figura 45-3:** Aplicación de fuerzas y momento en el tornillo sin fin.  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

**A: Static Structural**  
Cylindrical Support 2  
Time: 1, s  
28/5/2022 20:40

**A** Cylindrical Support: 0, mm  
**B** Cylindrical Support 2: 0, mm

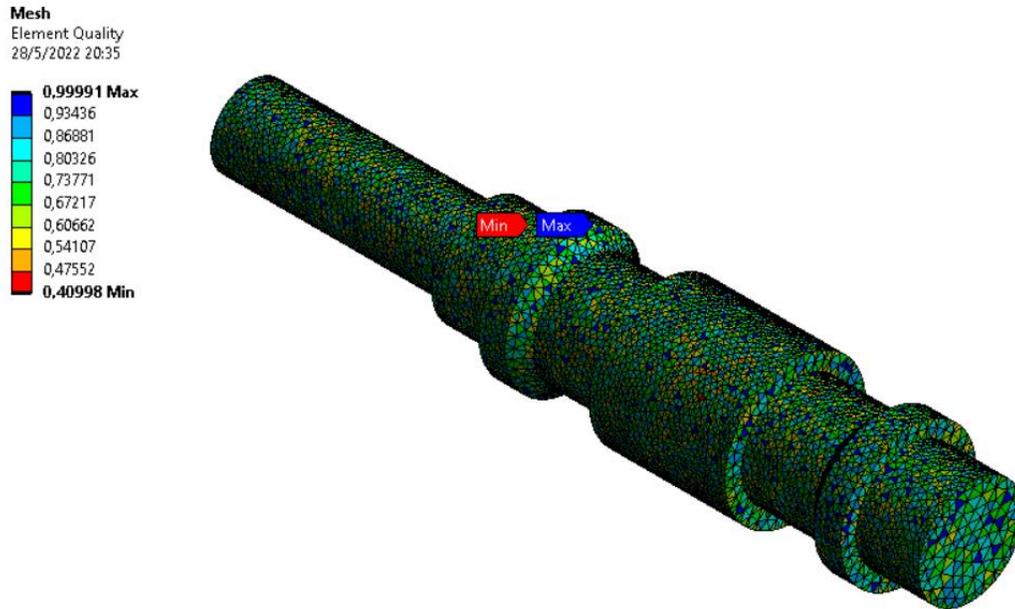


**Figura 46-3:** Restricciones de frontera para el tornillo sin fin  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

#### **Proceso:**

- **Mallado**

Como se muestra en la figura 47-3 el proceso de mallado incluyó distintos métodos que pueden ser controladores globales o locales, en el mallado del tornillo sin fin se incluyó el controlador “Body Sizing” que permite determinar el tamaño de los elementos del cuerpo, inicialmente se tomó el valor de 1 mm, sin embargo, este valor será parametrizado posteriormente con el objetivo de realizar un análisis de convergencia en el postproceso.

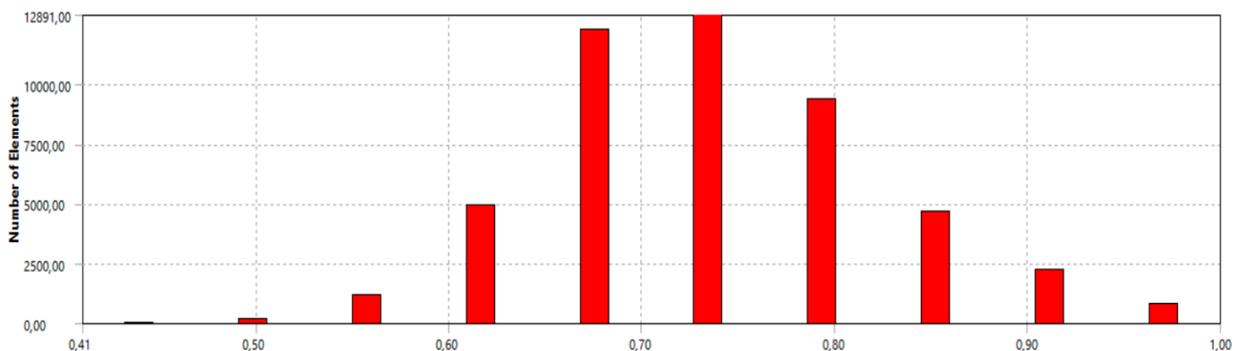


**Figura 47-3:** Calidad de malla del tornillo sin fin  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

Utilizando la métrica de malla llamada “Element Quality” se identifica que la calidad mínima de malla es 0.41 lo cual supera con holgura la calidad mínima requerida. Además, se obtuvo un promedio de calidad de malla de 0.73 lo cual es un valor muy aceptable.

| Mesh Metric                                 | Element Quality |
|---------------------------------------------|-----------------|
| <input type="checkbox"/> Min                | 0,40998         |
| <input type="checkbox"/> Max                | 0,99991         |
| <input type="checkbox"/> Average            | 0,73742         |
| <input type="checkbox"/> Standard Deviation | 8,5523e-002     |

**Figura 48-3:** Métrica de malla de ANSYS 2020 R1 del tornillo sin fin  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)



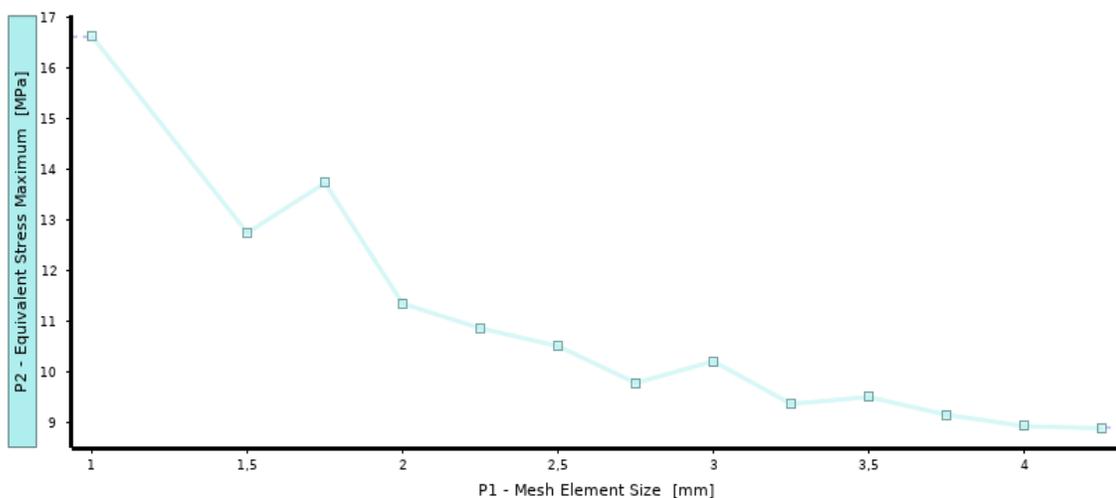
**Figura 49-3:** Métrica de elementos versus número de elementos del tornillo sin fin  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

## Postproceso:

Una vez finalizado el proceso de mallado se parametrizo el tamaño del elemento y los resultados mostrados como el esfuerzo equivalente de Von-Misses y el factor de seguridad mínimo, como se muestra en la figura 50-3 se obtuvo una convergencia entre el punto de diseño 3 al 7, con esto se escogió un tamaño de elemento de 2 para los resultados finales.

| Table of Design Points |                |                        |                                |                            |
|------------------------|----------------|------------------------|--------------------------------|----------------------------|
|                        | A              | B                      | C                              | D                          |
| 1                      | Name           | P1 - Mesh Element Size | P2 - Equivalent Stress Maximum | P3 - Safety Factor Minimum |
| 2                      | Units          | mm                     | MPa                            |                            |
| 3                      | DP 0 (Current) | 1                      | 16,628                         | 3,1105                     |
| 4                      | DP 1           | 1,5                    | 12,746                         | 4,0578                     |
| 5                      | DP 2           | 1,75                   | 13,731                         | 3,7667                     |
| 6                      | DP 3           | 2                      | 11,346                         | 4,5583                     |
| 7                      | DP 4           | 2,25                   | 10,862                         | 4,7614                     |
| 8                      | DP 5           | 2,5                    | 10,509                         | 4,9216                     |
| 9                      | DP 6           | 2,75                   | 9,7816                         | 5,2875                     |
| 10                     | DP 7           | 3                      | 10,21                          | 5,0654                     |
| 11                     | DP 8           | 3,25                   | 9,3679                         | 5,521                      |
| 12                     | DP 9           | 3,5                    | 9,5047                         | 5,4415                     |
| 13                     | DP 10          | 3,75                   | 9,1537                         | 5,6502                     |
| 14                     | DP 11          | 4                      | 8,9297                         | 5,7919                     |
| 15                     | DP 12          | 4,25                   | 8,8877                         | 5,8193                     |

**Figura 50-3:** Parametrización de variables del tornillo sin fin  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)



**Figura 51-3:** Análisis de convergencia tamaño del elemento vs esfuerzo máximo del tronillo sin fin.

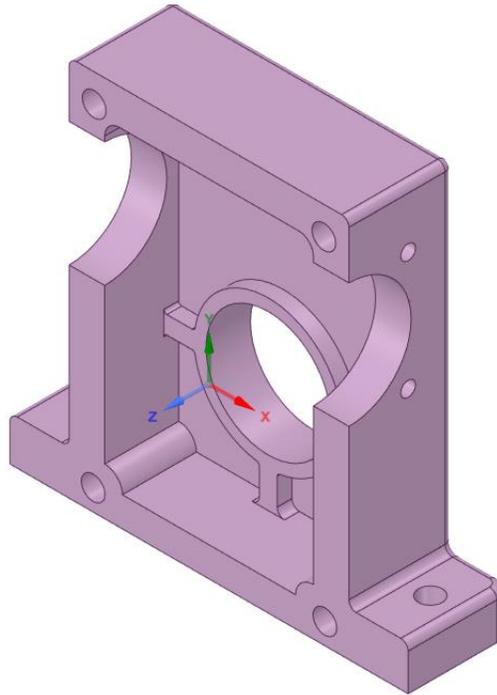
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

### 3.6.4. Carcasa

#### Preproceso:

- **Geometría**

Como se aprecia en la figura 52-3 se muestra la simplificación de la geometría de la carcasa, el proceso consistió en eliminar las curvaturas internas de la carcasa mismas que se diseñaron con el fin de no tener problemas al momento de desmoldar la arena de la fundición.



**Figura 53-3:** Carcasa.

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

- **Materiales**

La tabla 30-3 describe las propiedades mecánicas del material que se utilizó para la simulación de la carcasa.

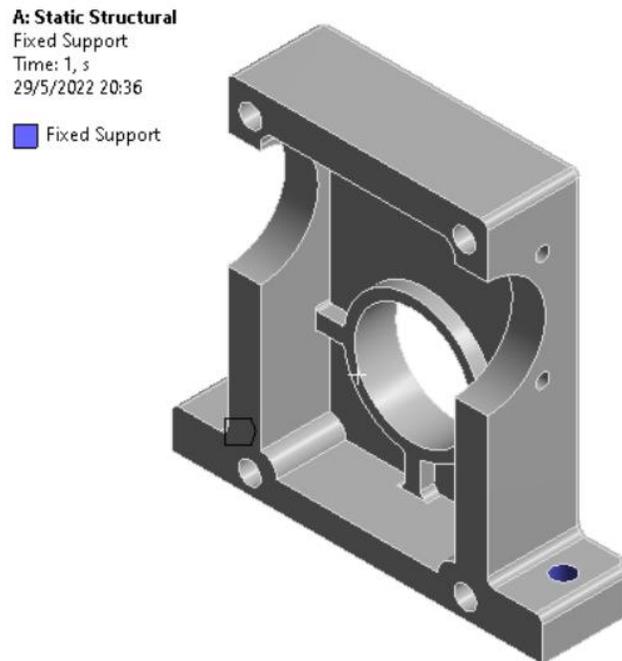
**Tabla 30-3:** Propiedades físicas y mecánicas de la carcasa del motorreductor

| Material                | Aleación de aluminio 1100 |                   |
|-------------------------|---------------------------|-------------------|
| Densidad                | 2.7                       | g/cm <sup>3</sup> |
| Módulo de Young         | 71                        | GPa               |
| Coefficiente de Poisson | 0.33                      |                   |
| Esfuerzo de Tracción    | 280                       | MPa               |
| Esfuerza de Compresión  | 280                       | MPa               |
| Esfuerzo de Fluencia    | 310                       | MPa               |

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

- **Fuerzas**

Como se muestra en la figura 54-3 las restricciones se utilizaron para el análisis de la carcasa son un soporte fijo en las caras donde van los pernos que sujetan la caja reductora, así como en la parte inferior que es donde se asienta la caja reductora con la base del banco de pruebas.

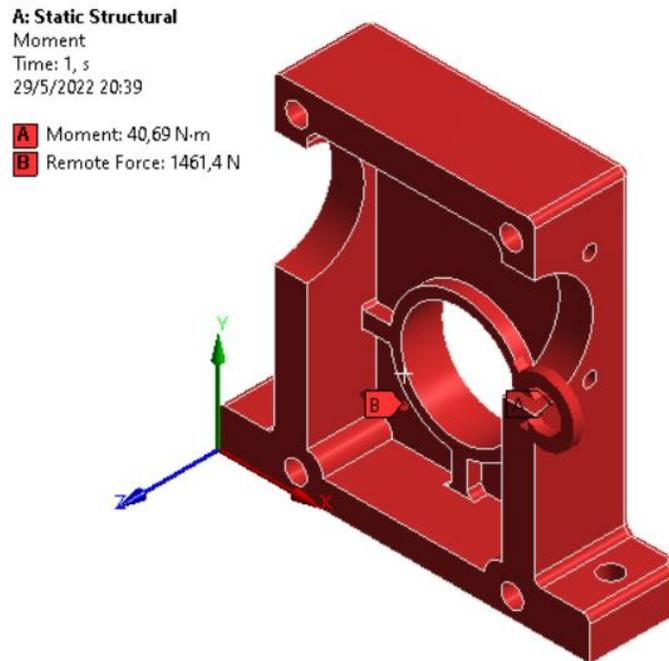


**Figura 54-4:** Análisis de la carcasa

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

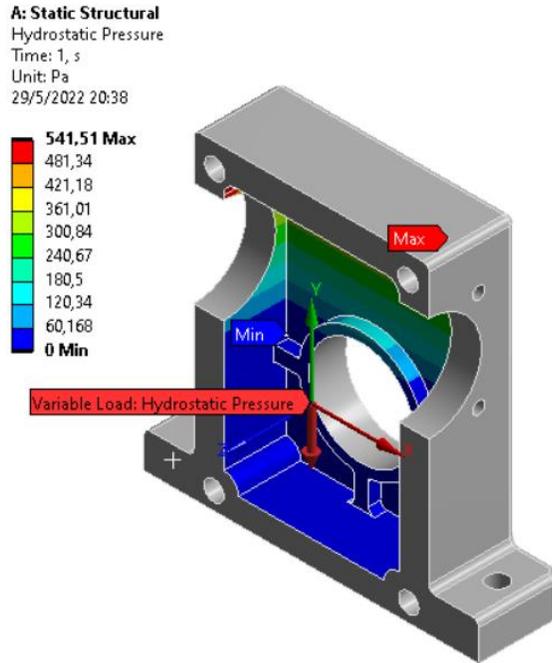
La figura 55-4 muestra las cargas que se aplicaron en la carcasa para el respectivo análisis, en este se tomó como una fuerza remota a todas las generadas por la corona y el tornillo sin fin la cual tiene un

valor de 1461 N, así como el momento que se genera descrito en el diseño de detalle el cual tiene un valor de 40,69 Nm.



**Figura 55-4:** Análisis de las cargas soportadas por la caja  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

La figura 56-4 describe la presión interna del aceite generada en la carcasa cuando el mecanismo reductor entra en acción, en este caso se la describió como una presión hidrostática en la cual se utilizó la densidad del aceite SAE 80W90 que es de  $920 \frac{kg}{m^3}$ , obteniendo un valor máximo de presión de 541 MPa.

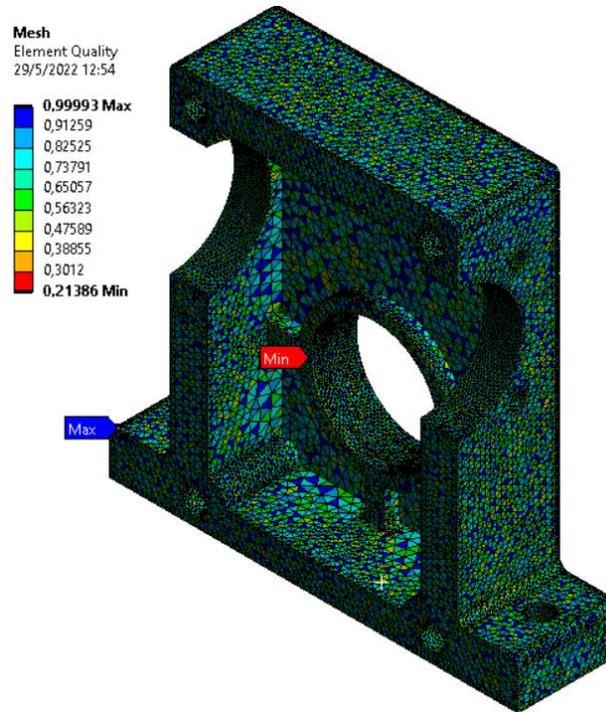


**Figura 56-4:** Presión interna del aceite en la caja  
 Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

**Proceso:**

- **Mallado**

Como se muestra en la figura 57-4 el proceso de mallado incluyó distintos métodos que pueden ser controladores globales o locales, en el mallado de la carcasa de la caja reductora se incluyó el controlador “Body Sizing” que permite determinar el tamaño de los elementos del cuerpo, inicialmente se tomó el valor de 2 mm, sin embargo, este valor será parametrizado posteriormente con el objetivo de realizar un análisis de convergencia en el postproceso.

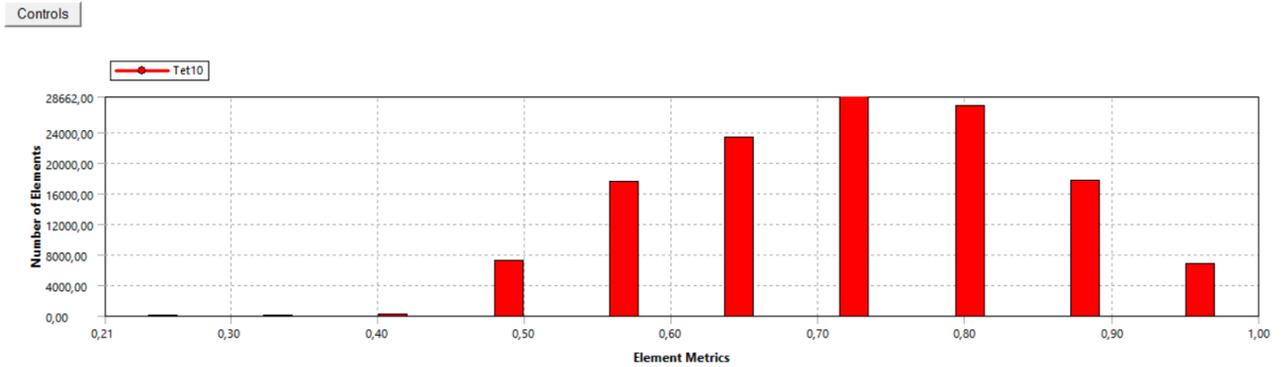


**Figura 57-3:** Calidad de malla de la caja  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

Como se muestra en la figura 58-3 se obtuvo una calidad de malla mínima de 0,21 y un promedio de 0,72 con lo cual se estuvo dentro de los parámetros establecidos para la simulación estructural.

| Mesh Metric                                 | Element Quality |
|---------------------------------------------|-----------------|
| <input type="checkbox"/> Min                | 0,21386         |
| <input type="checkbox"/> Max                | 0,99993         |
| <input type="checkbox"/> Average            | 0,72708         |
| <input type="checkbox"/> Standard Deviation | 0,12073         |

**Figura 58-3:** Calidad mínima de malla de la caja  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)



**Figura 52-3:** Métrica de elementos versus número de elementos de la malla  
 Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

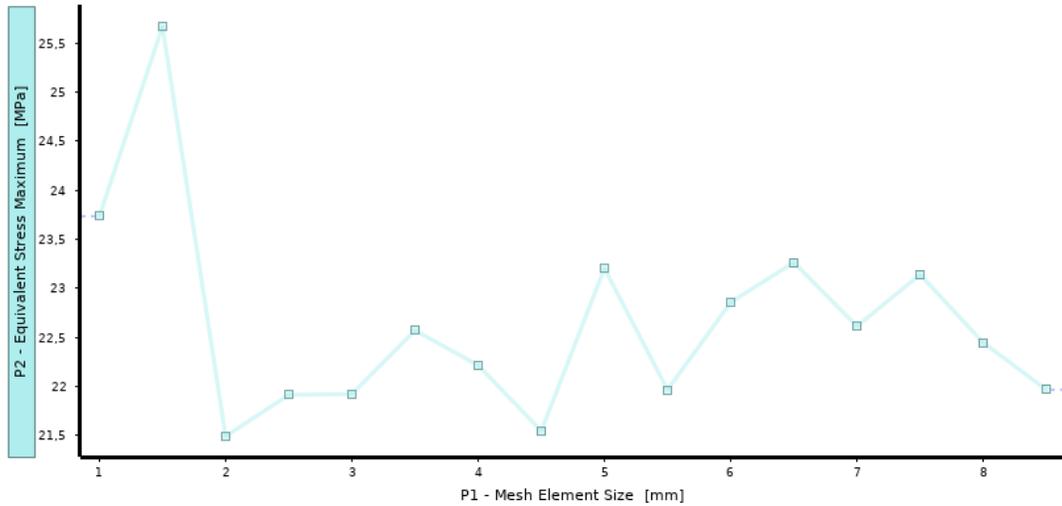
**Postproceso:**

Como se observa en la figura 59-3 se analizó 15 puntos de diseño para encontrar la convergencia, entre los puntos de diseño 2-8 se ve un cambio de 1 MPa en el esfuerzo con esto se determinó que la convergencia se logró con un tamaño de malla de 3 mm.

| Table of Design Points |                |                        |                                |                                     |               |      |
|------------------------|----------------|------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|---------------|------|
|                        | A              | B                      | C                              | D                                   | E             | F    |
| 1                      | Name           | P1 - Mesh Element Size | P2 - Equivalent Stress Maximum | <input type="checkbox"/> Ret...     | Retained Data | Note |
| 2                      | Units          | mm                     | MPa                            |                                     |               |      |
| 3                      | DP 0 (Current) | 1                      | 23,734                         | <input checked="" type="checkbox"/> | ✓             |      |
| 4                      | DP 1           | 1,5                    | 25,667                         | <input type="checkbox"/>            |               |      |
| 5                      | DP 2           | 2                      | 21,491                         | <input type="checkbox"/>            |               |      |
| 6                      | DP 3           | 2,5                    | 21,912                         | <input type="checkbox"/>            |               |      |
| 7                      | DP 4           | 3                      | 21,922                         | <input type="checkbox"/>            |               |      |
| 8                      | DP 5           | 3,5                    | 22,57                          | <input type="checkbox"/>            |               |      |
| 9                      | DP 6           | 4                      | 22,215                         | <input type="checkbox"/>            |               |      |
| 10                     | DP 7           | 4,5                    | 21,545                         | <input type="checkbox"/>            |               |      |
| 11                     | DP 8           | 5                      | 23,202                         | <input type="checkbox"/>            |               |      |
| 12                     | DP 9           | 5,5                    | 21,965                         | <input type="checkbox"/>            |               |      |
| 13                     | DP 10          | 6                      | 22,856                         | <input type="checkbox"/>            |               |      |
| 14                     | DP 11          | 6,5                    | 23,263                         | <input type="checkbox"/>            |               |      |
| 15                     | DP 12          | 7                      | 22,612                         | <input type="checkbox"/>            |               |      |
| 16                     | DP 13          | 7,5                    | 23,139                         | <input type="checkbox"/>            |               |      |
| 17                     | DP 14          | 8                      | 22,445                         | <input type="checkbox"/>            |               |      |
| 18                     | DP 15          | 8,5                    | 21,965                         | <input type="checkbox"/>            |               |      |

**Figura 60-3:** Convergencia de elementos de la malla  
 Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

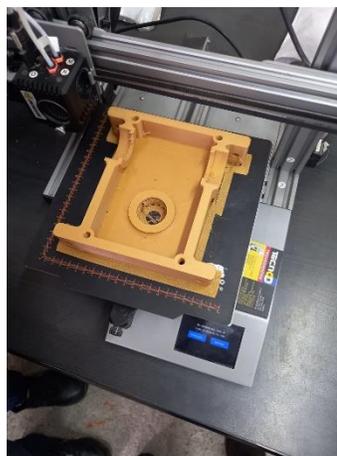
La figura 60-3 muestra la convergencia que se obtuvo al realizar el análisis del tamaño de malla frente al esfuerzo equivalente máximo se puede utilizar cualquier tamaño de malla de 2 a 4 mm.



**Figura 61-3:** Análisis de convergencia tamaño del elemento vs esfuerzo máximo de la caja.  
 Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

### 3.7. Construcción y montaje del equipo motorreductor

El proceso de construcción, tal como se especificó en el diseño de materialización, empezó con la impresión 3D de los moldes que serán usados en la fundición de aluminio para la carcasa del equipo. El material que se utilizó es filamento de plástico ABS.



**Figura 62-3:** Impresión 3D de la carcasa  
 Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

Después de modelar e imprimir en 3D los moldes de plástico ABS, se procedió con la fundición de aluminio 1100 para la carcasa, el tipo de fundición usado en este paso fue por moldes de arena.

Posteriormente a la fundición se realizó un proceso de rectificado en las carcasas de aluminio para obtener un mejor acabado superficial y cumplir con las tolerancias requeridas.



**Figura 63-3:** Carcasa rectificada de aluminio 1100  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

Una vez finalizado el rectificado individual de las carcasas se requirió empernarlas y rectificar los agujeros de los rodamientos. Los pernos que fueron utilizados para la carcasa, tal como se especificó en la casa de la calidad fueron de tipo Allen, lo cual permitió dar un acabado exterior más elegante al equipo motorreductor.



**Figura 64-3:** Carcasa empernada  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

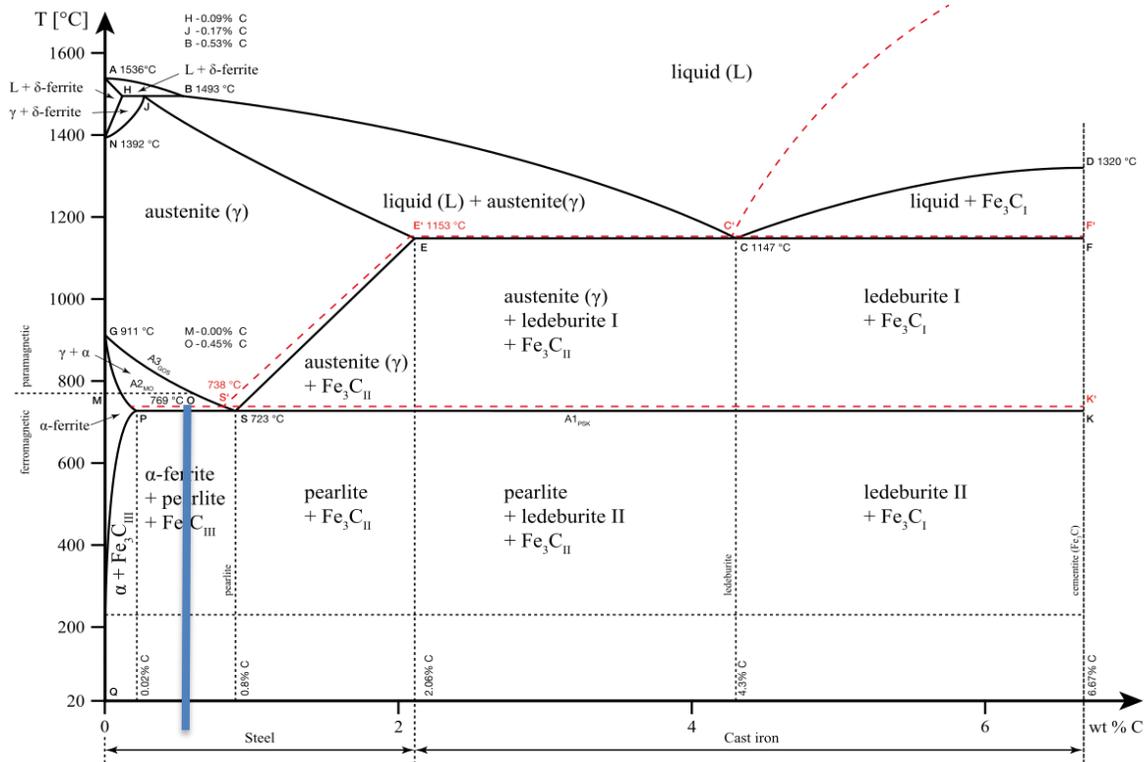
El siguiente componente en ser manufacturado fue el tornillo sin fin, para este proceso se utilizó un torno, se escogió el paso para el tornillo sin fin que se determinó en los cálculos de diseño y se empleó la herramienta de roscado. El material usado para el tornillo sin fin fue acero AISI 1045.



**Figura 65-3:** Tornillo sin fin de acero AISI 1045  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

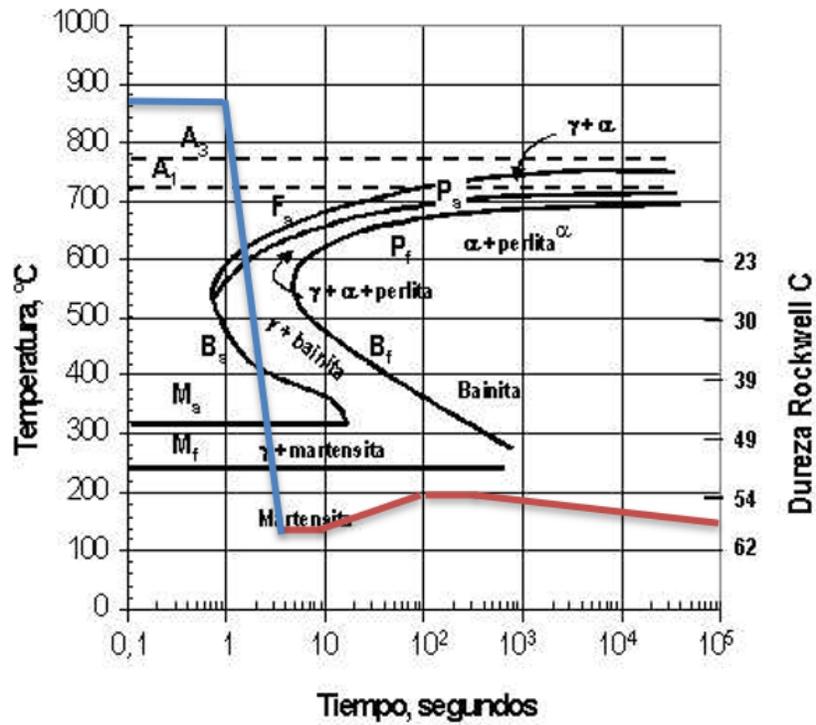
Como paso último paso para la construcción del tornillo sin fin se aplicó un tratamiento térmico en el elemento, como se describió en el capítulo 2 la norma AGMA 6092-C93 recomienda que la dureza del tornillo sin fin debe ser como mínima 55 HRC para cumplir con los parámetros de diseño de resistencia al desgaste, por lo cual se realizó un temple en el elemento.

La figura 66-3 muestra el diagrama hierro-carbono del acero, para realizar el temple en el tornillo sin fin se debe alcanzar temperaturas superiores a las de austenización del acero AISI 1045, utilizando la figura 67-3 se determinó que el tiempo óptimo de temple son 3 segundos con lo cual se obtuvo una dureza de 62 RHC, posteriormente se realizó un revenido de 3 horas a 200 °C para aliviar la tensión en el acero y alcanzar los 58 HRC.



**Figura 66-3:** Diagrama hierro-carbono del acero

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)



**Figura 67-3:** Diagrama del tiempo óptimo de temple

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

Posteriormente a haber seleccionado el número de dientes de acuerdo con los datos obtenidos en el diseño de elementos, la corona helicoidal se manufacturó con un cabezal divisor y una fresadora. El material del cual se construyó la corona fue el bronce SAE 64, fue importante realizar el vaciado de garganta en la corona, ya que este procedimiento permitió un mejor acople entre el tornillo sinfín y la corona mejorando la eficacia del equipo ya que el área de contacto aumentó notablemente.



**Figura 68-3:** Corona helicoidal con garganta, hecha de bronce SAE 64  
**Realizado por:** (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

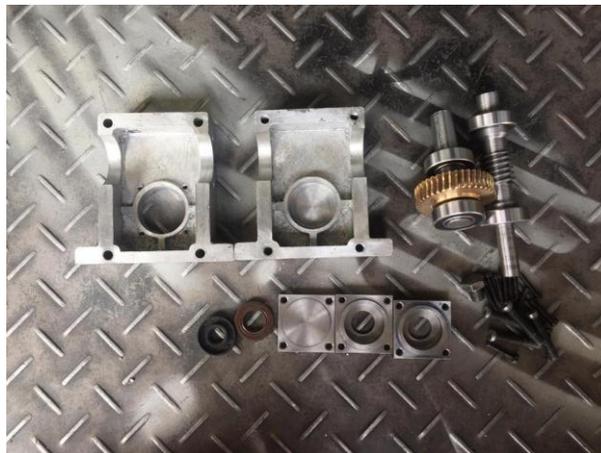
Como se muestra en la figura 69-3, el montaje de los rodamientos previamente seleccionados y de la corona helicoidal se lo realizó con los debidos ajustes tanto en el chavetero como en el eje que sostiene a la corona helicoidal. Se utilizó también la fresadora para realizar los orificios en las tapas de los ejes. Las tolerancias de los orificios en donde encajan los rodamientos fueron determinadas en la planimetría del equipo motorreductor.



**Figura 69-3:** Montaje de la corona helicoidal en el eje de acero AISI 1018

**Realizado por:** (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

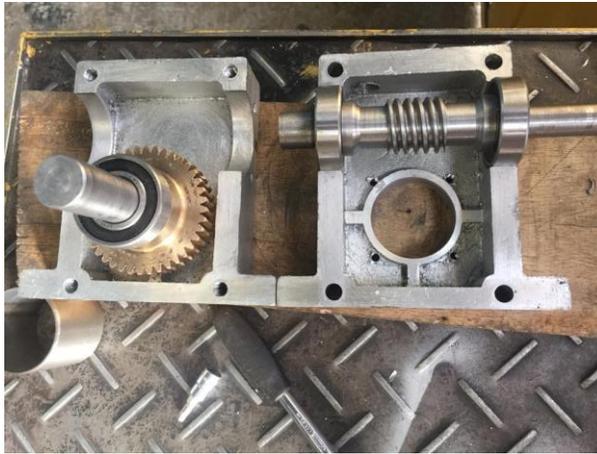
Después de montar la corona y sus rodamientos en el respectivo eje que la sostiene, además de los rodamientos del tornillo sinfín, se procedió con el montaje completo de la caja reductora. Todos los componentes que fueron utilizados en este procedimiento se muestran en la figura 70-3.



**Figura 70-3:** Componentes de la caja reductora antes del montaje

**Realizado por:** (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

El procedimiento final del montaje de la caja reductora comenzó con la ubicación del eje de la corona y del tornillo sinfín en sus respectivos puestos como se muestra en la figura 71-3, de acuerdo con lo determinado en el diseño conceptual. Debido al ajuste generado por las tolerancias bajas, este paso se llevó a cabo con especial cuidado de no dañar los componentes mencionados.



**Figura 71-3:** Montaje del tornillo sinfín y del eje de la corona helicoidal  
**Realizado por:** (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

La parte final de este procedimiento comprende la colocación de las tapas de los ejes, el tapón de aceite y los pernos de acuerdo con el diseño conceptual. Este paso requirió del uso de herramientas adecuadas tales como llaves de ajuste, silicona para sellado en metal, etc. Cabe mencionar que al momento de sellar el equipo motorreductor antes de ubicar los pernos se utilizó silicona gris. La figura 72-3 muestra la caja reductora ensamblada por completo.



**Figura 72-3:** Caja reductora  
**Realizado por:** (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

### 3.8. Construcción y montaje del banco de pruebas

La construcción y montaje del banco de pruebas para el equipo motorreductor empezó con la adquisición de los insumos necesarios para este procedimiento, la figura 73-3 muestra la mordaza de freno que se utilizó en la construcción del banco de pruebas.



**Figura 73-3:** Mordaza de freno  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

El siguiente componente que se adquirió fue la pastilla de freno G1054 la cual es el modelo estándar para frenos de motocicletas, dicho elemento se muestra en la figura 74-3.



**Figura 74-3:** Pastilla de freno para motocicleta G1054  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

Debido a que el sistema de freno que se utilizó en el banco de pruebas es de tipo hidráulico el siguiente elemento que se adquirió fue el tornillo regulador con manguera, el cual permite variar la presión con la que se frena al disco acoplado al motorreductor. La figura 75-3 muestra el sistema de tornillo regulador y manguera.



**Figura 75-3:** Sistema hidráulico para freno  
**Realizado por:** (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

El motor que se utilizó en el banco de pruebas para el equipo motorreductor se muestra en la figura 76-3. Dicho elemento corresponde a un motor WEG monofásico de 1 HP con una velocidad angular nominal de 1750 RPM.



**Figura 76-3:** Motor eléctrico WEG de 1 HP  
**Realizado por:** (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

Tal como se determinó en el diseño de detalle la banda requerida para la transmisión de potencia corresponde a una de 27 pulgadas tipo A, la cual se puede observar en la figura 77-3. Cabe destacar que la banda seleccionada corresponde únicamente a la entrada de potencia, puesto que, el tipo de banda resultante para la salida de potencia dependerá de la aplicación que se desee dar al equipo motorreductor y las RPM que se requieran. Por lo antes mencionado, se puede apreciar que el sistema de salida en el banco de pruebas es un eje chaveteado y acoplado al disco de freno.



**Figura 77-3:** Banda PIX-x set A27 / 13x686 Li  
**Realizado por:** (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

El disco de freno que se usó en el banco de pruebas se muestra en la figura 78-3. El disco posee un sistema de seguridad que permite el fallo de componentes internos del mismo antes que el fallo del eje al cual se encuentra acoplado en caso de un sobreesfuerzo del sistema.



**Figura 78-3:** Disco de freno  
**Realizado por:** (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

La mesa del banco de pruebas corresponde a una plancha metálica cuadrada soldada a un marco hecho de tira metálica, las patas de la mesa corresponden a ángulos de acero. Este elemento sirve como soporte de los distintos componentes que tiene el banco de pruebas, la mesa metálica se muestra en la figura 79-3.



**Figura 79-3:** Mesa del banco de pruebas  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

El proceso de montaje del banco de pruebas comenzó con la ubicación del motor eléctrico, la caja reductora y una chapa metálica que sirve de soporte para el sistema de freno y el manómetro. Las poleas de aluminio fueron acopladas al motor y al tornillo sinfín de la caja reductora respectivamente, respetando la distancia máxima entre centros que pueden tener para la banda A27 seleccionada. Los elementos instalados en este paso se muestran en la figura 80-3.



**Figura 80-3:** Motor, caja reductora y sistema de freno montados en la mesa del banco de pruebas  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

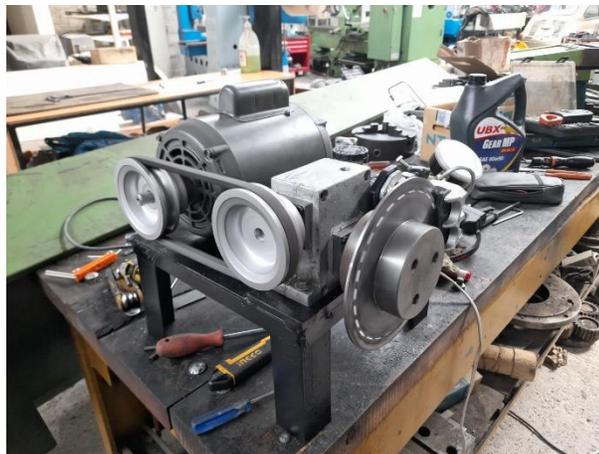
El siguiente paso en el montaje del banco de pruebas fue la colocación del medidor de nivel de líquido de freno y el tornillo regulador, tal como se puede apreciar en la figura 81-3. El líquido de freno que se utilizó para el banco de pruebas corresponde a un SAE J1703, el cual es un líquido de freno para motocicletas y se conoce en el mercado como DOT4.



**Figura 81-3:** Montaje del tornillo regulador y del medidor de nivel de líquido de freno

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

El último elemento que fue colocado en el banco de pruebas fue la banda A27, con este paso quedó completo el montaje del equipo motorreductor en el banco de pruebas, como se muestra en la figura 82-3.



**Figura 82-3:** Equipo motorreductor montado en el banco de pruebas

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

### 3.9. Protocolo de pruebas

El protocolo de pruebas se realizó a lo largo de tres etapas, las cuales se caracterizan por ser de régimen bajo, régimen medio y régimen alto de trabajo. Es decir, en la primera etapa se usó una potencia por debajo de la mitad de la potencia nominal, en la segunda etapa se usó como potencia de trabajo la mitad de la potencia nominal y en la tercera etapa se usó como potencia de trabajo toda la

potencia nominal del motor eléctrico. Antes de empezar las distintas etapas del protocolo de pruebas se vertió aceite lubricante SAE 80W90 en cada etapa respectivamente, este proceso además de mantener el aceite nuevo para cada etapa permite observar el desgaste que existe en los componentes internos de la caja reductora, como se muestra en el anexo 2.

Al hacer trabajar al equipo motorreductor en las distintas etapas se tomó la temperatura que alcanzaban sus componentes después de haber transcurrido 6 horas, 12 horas y 24 horas para cada régimen respectivamente. Finalmente se comprobó la presión máxima de frenado del disco antes de que el equipo se sobrecaliente y el amperaje en el que ocurre este fenómeno.

### ***3.9.1. Primera etapa: régimen bajo de trabajo***

Una vez encendido el motor con una presión de frenado moderada, por tanto, con régimen bajo de trabajo, se registró la primera temperatura al cabo de 6 horas. El registro del pirómetro marcó 31.6 °C, como se muestra en la figura 83-3.



**Figura 83-3:** Registro de temperatura transcurridas 6 horas- Etapa 1  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

El siguiente registro de temperatura trabajando con régimen bajo se realizó después de 12 horas, la temperatura apenas varió marcando en el pirómetro 32.4 °C, como se observa en la figura 84-3.



**Figura 84-3:** Registro de temperatura transcurridas 12 horas- Etapa 1  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

Después de 24 horas se registró la última temperatura trabajando con régimen bajo, como muestra la figura 85-3, el pirómetro marcó 49.4°C.



**Figura 85-3:** Registro de temperatura transcurridas 24 horas- Etapa 1  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

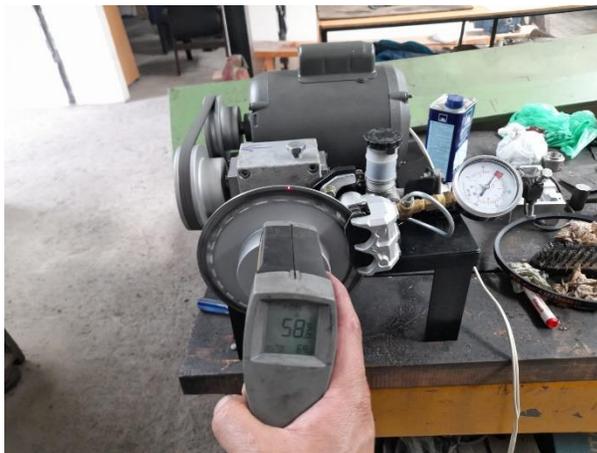
### **3.9.2. Segunda etapa: régimen medio de trabajo**

En la segunda etapa se realizaron nuevamente tres registros de temperatura, el primer registro con régimen de trabajo medio fue de 58.4 °C después de 6 horas, como se indica en la figura 86-3.



**Figura 86-3:** Registro de temperatura transcurridas 6 horas- Etapa 2  
**Realizado por:** (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

El siguiente registro de temperatura en la segunda etapa se llevó a cabo después de 12 horas de trabajo con régimen medio, el pirómetro marcó una temperatura de 58.6 °C, como se puede apreciar en la figura 87-3. Se puede apreciar que no existió un cambio significativo de temperatura, lo cual puede ser consecuencia del cambio de aceite lubricante para el inicio de cada etapa.



**Figura 87-3:** Registro de temperatura transcurridas 12 horas- Etapa 2  
**Realizado por:** (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

El ultimo registro de temperatura de la segunda etapa del protocolo de pruebas marcó 60.4 °C en el pirómetro, como se muestra en la figura 88-3, nuevamente se observó un ligero cambio en el registro de temperatura.



**Figura 88-3:** Registro de temperatura transcurridas 24 horas- Etapa 2  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

### 3.9.3. Tercera etapa: régimen alto de trabajo

El primer registro de temperatura de la tercera etapa del protocolo de pruebas marcó 78.4 °C, de acuerdo con lo que muestra la imagen 89-3.



**Figura 89-3:** Registro de temperatura transcurridas 6 horas- Etapa 3  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

El segundo registro de la tercera etapa del protocolo de pruebas marcó en el pirómetro 84.8 °C, después de 12 horas de trabajo del equipo con régimen alto, como se observa en la figura 90-3.



**Figura 90-3:** Registro de temperatura transcurridas 12 horas- Etapa 3  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

El ultimo registro de temperatura del pirómetro en la tercera etapa de trabajo marcó 87.4 °C, según se observa en la figura 93-3, después de 24 horas de régimen alto.



**Figura 91-3:** Registro de temperatura transcurridas 24 horas- Etapa 3  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

#### ***3.9.4. Presión y amperaje de sobrecalentamiento***

La temperatura máxima alcanzada en el equipo motorreductor ocurrió a una presión y a un amperaje determinado, por lo que, es importante determinar con precisión el valor o el rango de valores para presión de frenado y amperaje en los que ocurre el mencionado fenómeno.

La figura 92-3 muestra el rango de presión en el que el equipo motorreductor alcanzó la temperatura máxima, la presión varía entre 34 y 40 psi cuando se alcanza una temperatura superior a los 85 °C.



**Figura 92-3:** Rango de presión de sobrecalentamiento  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

Por otro lado, el amperaje que se marcó la pinza amperimétrica cuando el equipo motorreductor está en su pico de temperatura es de 10.1 A, según muestra la figura 93-3.



**Figura 93-3:** Amperaje de sobrecalentamiento  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

### 3.10. Análisis de costos

El análisis de costos realizado para el equipo motorreductor contempla por separado cada uno de los subsistemas que conforman el resultado final, los costos considerados en este análisis son costos directos e indirectos.

**Tabla 31-3:** Subsistemas del equipo motorreductor

| <b>Subsistema</b> | <b>Descripción</b>  |
|-------------------|---------------------|
| 1                 | Entrada de potencia |
| 2                 | Conjunto reductor   |
| 3                 | Salida de potencia  |
| 4                 | Banco de pruebas    |

**Realizado por:** (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

#### 3.10.1. Costos directos

Los costos directos comprenden todos los egresos que una empresa o compañía puede enlazar con un objeto de coste de manera fácil, dicho objeto puede ser un producto, sector o proyecto. Esta definición contempla ítems como equipos, costo por mano de obra, programas computacionales y materia prima. Por ejemplo, en la fabricación del equipo motorreductor se requirió primordialmente de bronce, acero, aluminio, pernos, motor eléctrico, etc. Y mano de obra calificada para la construcción del equipo motorreductor. (Arline, 2015 pág. 1)

En la tabla 31-3 se muestran el precio, la cantidad y el tipo de los materiales que se usaron en la construcción del equipo motorreductor:

**Tabla 32-3:** Costos de materiales e insumos

| <b>Descripción</b>                                                                | <b>Unidad</b> | <b>Precio Unitario<br/>[USD]</b> | <b>Cantidad</b>   | <b>Total [USD]</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------------------------------|-------------------|--------------------|
| Rodamiento rígido de bolas tipo abierto 6004                                      | U             | 1.50                             | 4                 | 6.00               |
| Retenedor de aceite<br>Ø <sub>eje</sub> 15 mm Ø <sub>ext</sub> 35 mm altura 7 mm  | U             | 1.50                             | 1                 | 1.50               |
| Retenedor de aceite<br>Ø <sub>eje</sub> 20 mm Ø <sub>ext</sub> 35 mm altura 10 mm | U             | 1.50                             | 1                 | 1.50               |
| Perno M5x25                                                                       | U             | 0.20                             | 12                | 2.40               |
| Silicona gris                                                                     | U             | 2.70                             | 1                 | 2.70               |
| Polea/Aluminio P 1C-4"                                                            | U             | 4.00                             | 2                 | 8.00               |
| UBX Gear MP 80W90 GL-5                                                            | U             | 21.50                            | 1                 | 21.50              |
| Banda tipo A 27"                                                                  | U             | 2.50                             | 1                 | 2.50               |
| Motor WEG 1 HP                                                                    | U             | 138.00                           | 1                 | 138.00             |
| Disco de freno hidráulico                                                         | U             | 50.00                            | 1                 | 50.00              |
| Mordaza                                                                           | U             | 12.00                            | 1                 | 12.00              |
| Acero AISI 1018<br>Ø= 1 1/4"                                                      | Kg            | 2.902                            | 0.80              | 2.32               |
| Acero AISI 1045<br>Ø= 32 mm                                                       | Kg            | 4.42                             | 1.12              | 4.95               |
| Bronce SAE 64<br>Ø= 3"                                                            | Kg            | 18.30                            | 1.142             | 20.90              |
| Manómetro Winters                                                                 | U             | 15.00                            | 1                 | 15.00              |
|                                                                                   |               |                                  | <b>Subtotal 1</b> | <b>289.27</b>      |

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

**Tabla 33-3:** Costos de mano de obra

| <b>Descripción</b>     | <b>Costo/hora [USD]</b> | <b>Cantidad [h]</b> | <b>Total [USD]</b> |
|------------------------|-------------------------|---------------------|--------------------|
| Tornero                | 2.80                    | 34                  | 95.20              |
| Metal mecánico         | 4.98                    | 18                  | 89.64              |
| Tallador de engranajes | 6                       | 2.5                 | 15.00              |
| Soldador               | 8.75                    | 20                  | 175.00             |
| <b>Subtotal 2</b>      |                         |                     | <b>374.84</b>      |

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

**Tabla 34-3:** Costos de máquinas y herramientas

| <b>Descripción</b>   | <b>Costo/hora [USD]</b> | <b>Cantidad [h]</b> | <b>Total [USD]</b> |
|----------------------|-------------------------|---------------------|--------------------|
| Torno                | 1.50                    | 18                  | 27.00              |
| Fresadora            | 2.00                    | 41.5                | 83.00              |
| Horno                | 2.23                    | 18                  | 40.14              |
| Moldes de arena      | 1.82                    | 11                  | 20.02              |
| Impresora 3D         | 1.50                    | 20                  | 30.00              |
| Soldadora de arco    | 2.65                    | 20                  | 53.00              |
| Pulidora             | 9.97                    | 3                   | 29.91              |
| Herramientas menores | 1.88                    | 12.5                | 23.50              |
| <b>Subtotal 3</b>    |                         |                     | <b>306.57</b>      |

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

**Tabla 35-3:** Costos directos totales

| <b>Descripción</b>      | <b>Costo [USD]</b> |
|-------------------------|--------------------|
| Materiales e insumos    | 289.27             |
| Mano de obra            | 374.84             |
| Máquinas y herramientas | 306.57             |
| Transporte              | 20.00              |
| <b>Total</b>            | <b>990.68</b>      |

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

### 3.10.2. Costos indirectos

A diferencia de los costos directos, los indirectos van más allá de los costos relacionados con la fabricación de un producto específico, abarcan el costo de sostener el proyecto en sí. Se computan después de que todos los costos directos han sido calculados. Se engloban en costos indirectos los materiales y suministros requeridos para las operaciones del día a día del proyecto, entre estos ítems se destacan el alquiler de equipos, consumo de electricidad, consumo de gas, útiles de limpieza, etc.

**Tabla 36-3:** Costos indirectos

| <b>Costos de ingeniería</b> | <b>Unidad</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Precio Unitario [USD]</b> | <b>Total [USD]</b> |
|-----------------------------|---------------|-----------------|------------------------------|--------------------|
| Diseño                      | Horas         | 30              | 7.00                         | 210.00             |
|                             |               |                 | <b>Total</b>                 | <b>210.00</b>      |

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

### 3.10.3. Costo total

**Tabla 37-3:** Costos totales

| <b>Descripción</b> | <b>Costos [USD]</b> |
|--------------------|---------------------|
| Costos directos    | 990.68              |
| Costos indirectos  | 210.00              |
| <b>Total</b>       | <b>1200.68</b>      |

Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

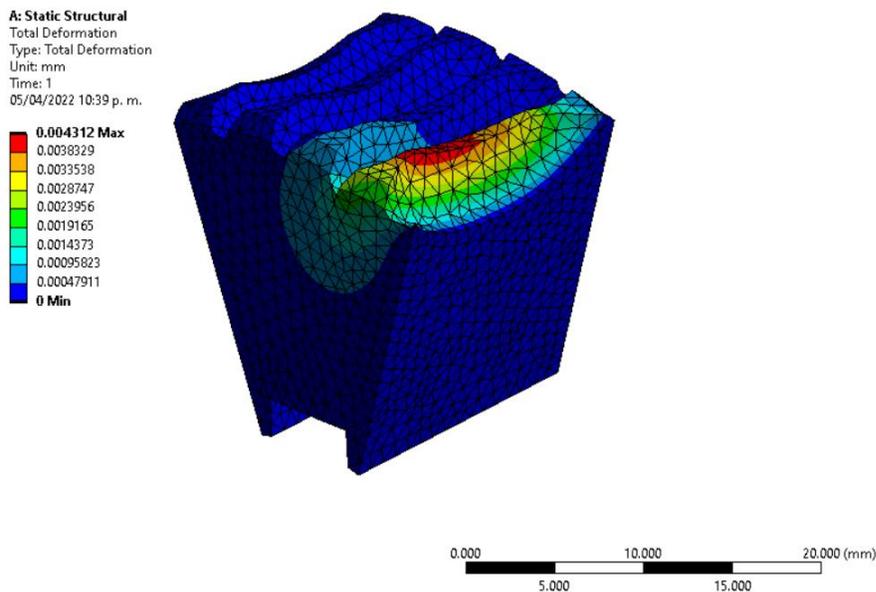
## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS

#### 4.1. Validación mediante CAE

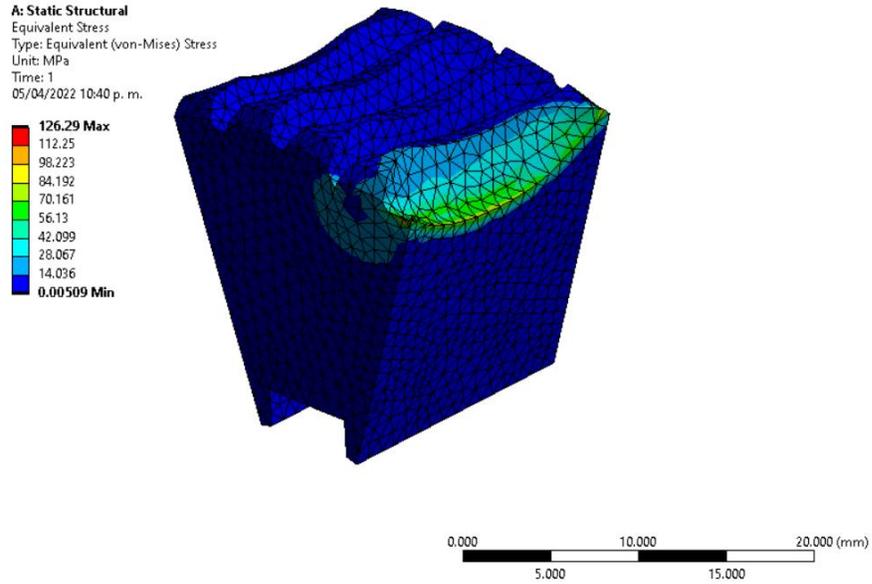
##### 4.1.1. Corona helicoidal

Mediante el software de elementos finitos Ansys 2020 R1 se determinó que la deformación máxima en un diente de la corona helicoidal de bronce SAE 64 es 0.004 mm, lo cual es un valor bastante pequeño, sin embargo, es aceptable ya que los elementos de transmisión de potencia deben ser muy precisos y, por tanto, deben tender a no deformarse en exceso.



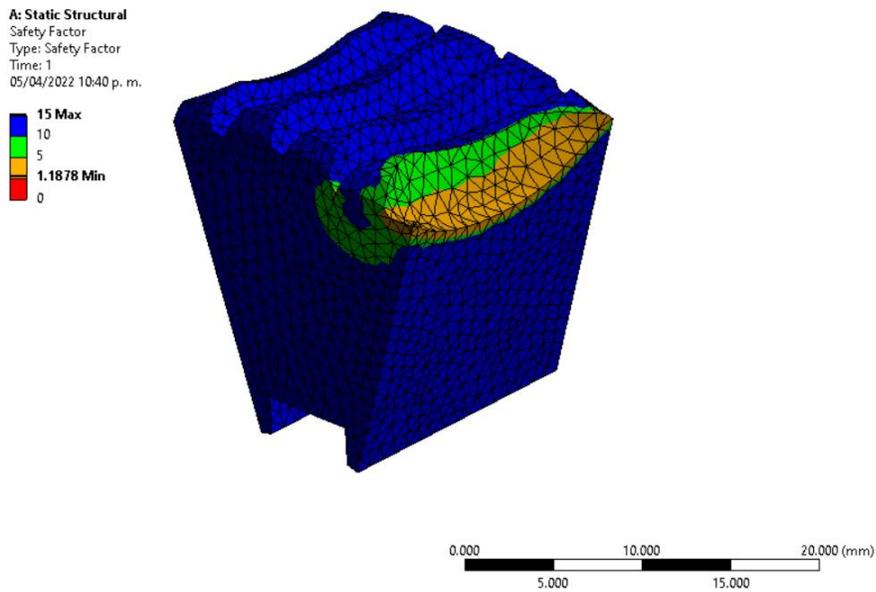
**Figura 1-4:** Deformación máxima en el diente de la corona  
**Realizado por:** (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

De acuerdo con el análisis de resistencia realizado en Ansys, se observa que el esfuerzo equivalente de Von Mises máximo que experimenta el diente de la corona es 126.29 MPa, este valor se aproxima bastante, al valor calculado mediante el método ofrecido por la normativa AGMA. Además, se puede apreciar que dicho esfuerzo se presenta en la base del diente, es decir, el esfuerzo de flexión generado por la carga tangencial en el diente de la corona es el más crítico.



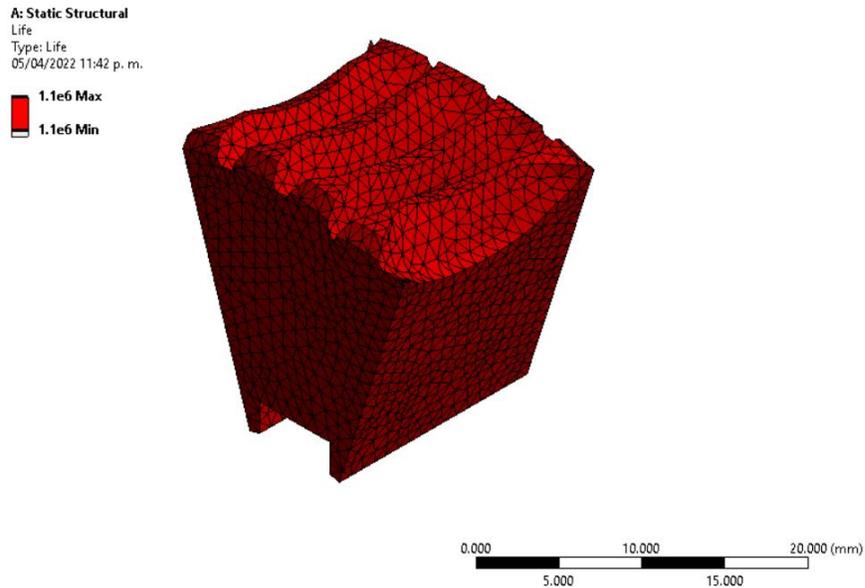
**Figura 2-4:** Análisis CAE en el diente de la corona  
 Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

El factor de seguridad mínimo que se obtuvo para carga estática de acuerdo con el análisis CAE es de 1.188, en otras palabras, el diente de la corona helicoidal no falla por esfuerzos de fluencia. Este factor de seguridad comprende toda el área inferior o base del diente, en donde se comprobó que los esfuerzos son máximos.



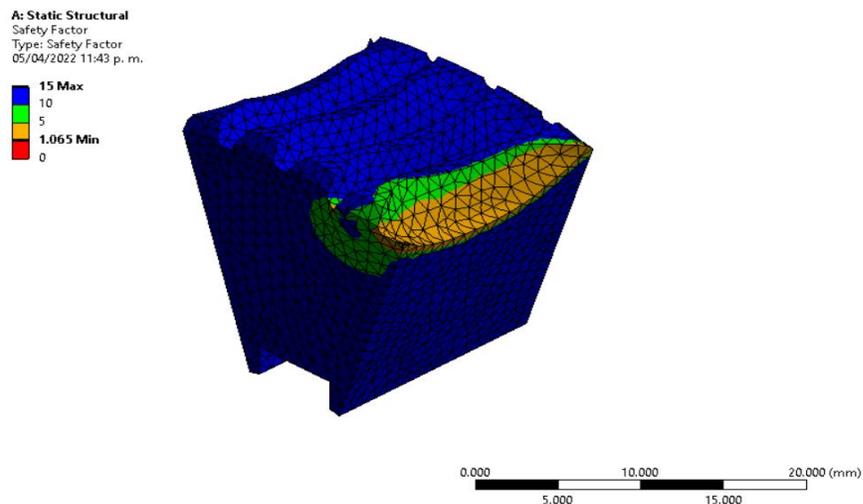
**Figura 3-4:** Análisis CAE con el factor de seguridad en el diente de la corona  
 Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

Finalmente se realizó un análisis de fatiga para el diente de la corona estudiado, en dicho análisis se utilizó el criterio de Soderberg con un factor de Marín de 0.6. Se determinó que el diente de la corona no falla por fatiga y por tanto, tiene vida infinita.



**Figura 4-4:** Análisis de fatiga en el diente de la corona  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

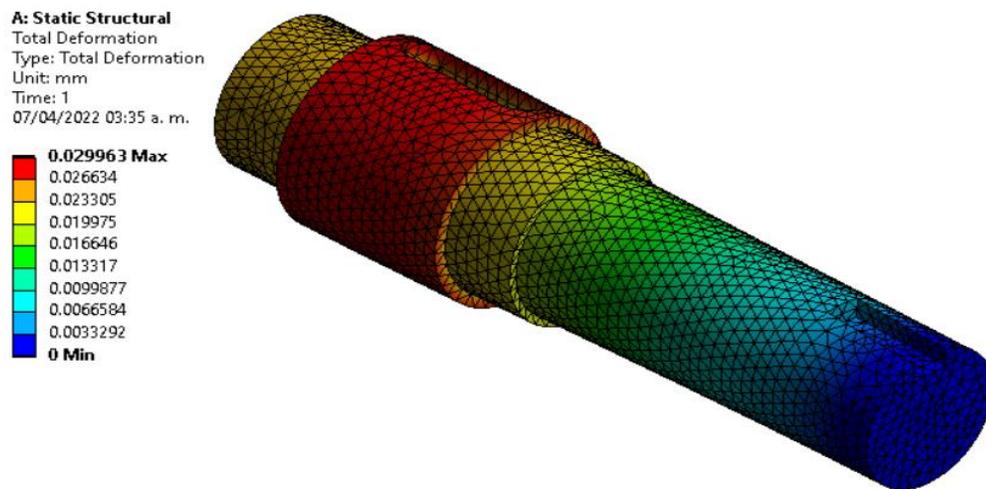
El factor de seguridad mínimo que se obtuvo en el análisis de fatiga es de 1.06, por lo que, se validan los valores obtenidos mediante los métodos de diseño ofrecidos por la normativa AGMA para la corona helicoidal.



**Figura 5-4:** Análisis CAE con el factor de seguridad en la corona  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

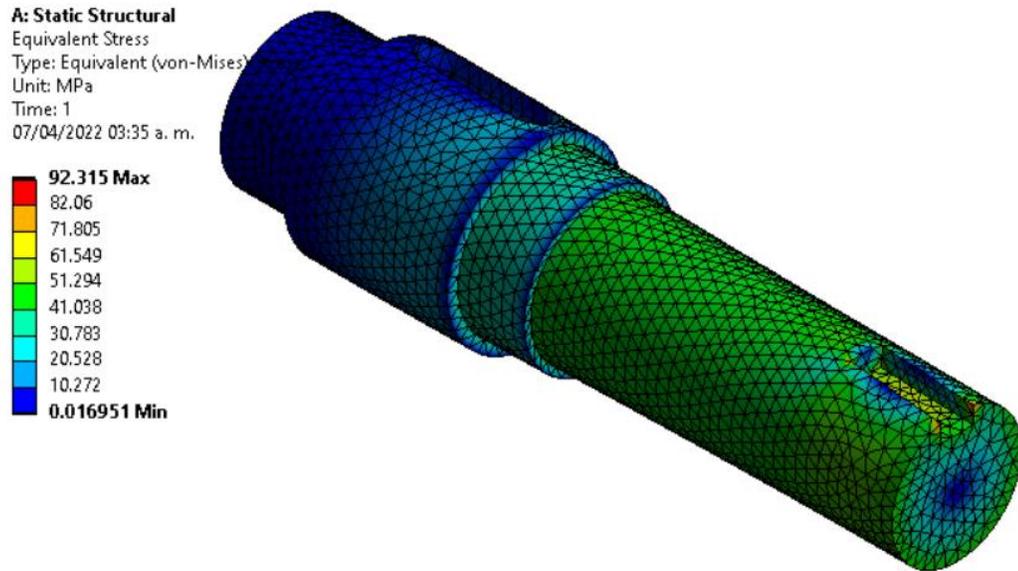
#### 4.1.2. Eje de la corona helicoidal

Mediante el software de elementos finitos Ansys 2020 R1 se determinó que la deformación máxima en el eje de acero AISI 1018 HR es 0.03 mm, dicho valor es muy parecido al encontrado en el análisis de deformaciones realizado en el diseño de detalle. Por lo tanto, se puede inferir que los resultados han sido validados mediante el método de elementos finitos.



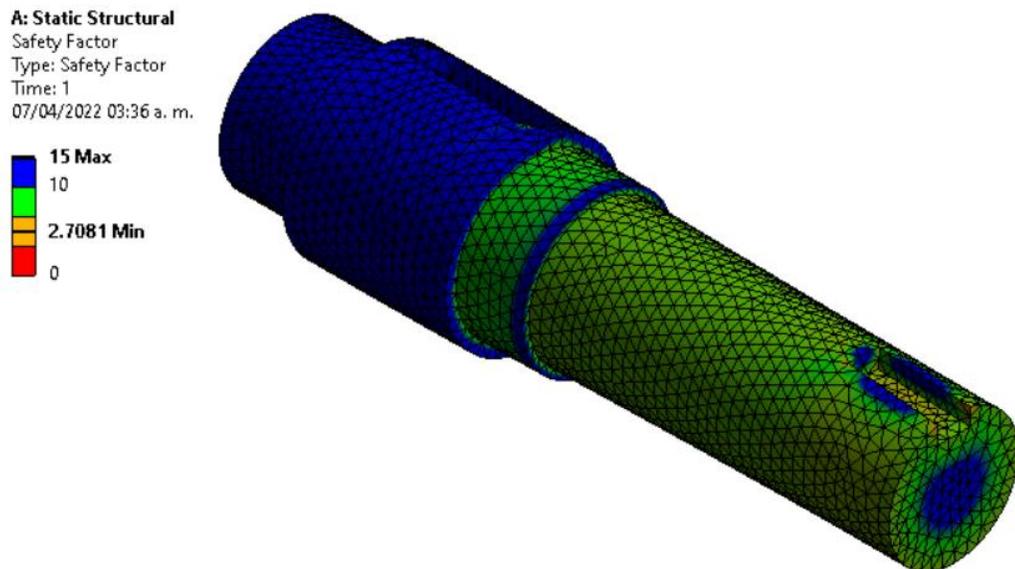
**Figura 6-4:** Análisis CAE en el eje  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

De acuerdo con el análisis de resistencia realizado en ANSYS, se observó que el esfuerzo equivalente de Von Mises máximo que experimenta el eje de transmisión es 92.315 MPa, y se encuentra localizado en el chavetero de salida de potencia, esto puede deberse principalmente a los concentradores de esfuerzos generados que supone mecanizar el chavetero en el eje.



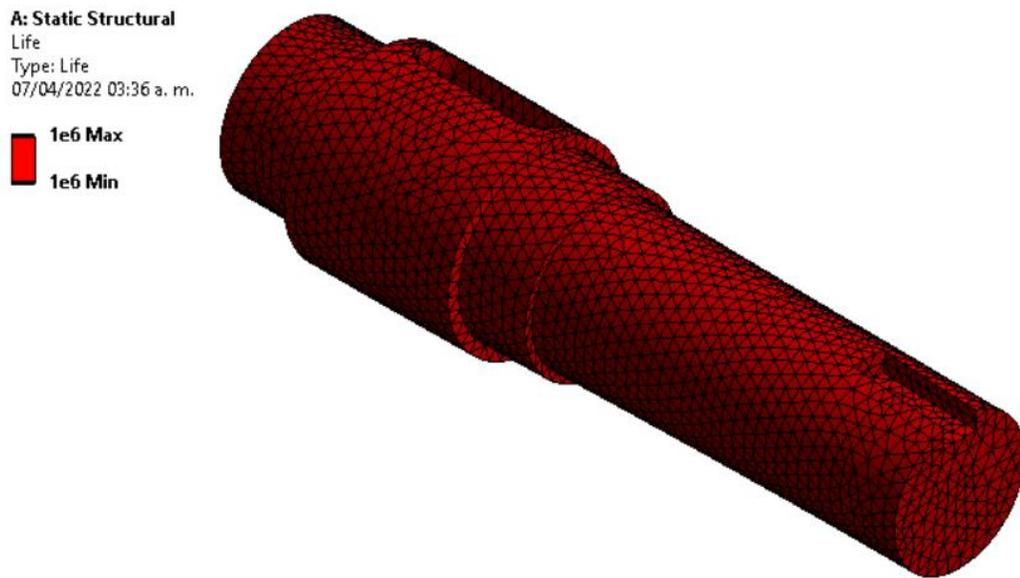
**Figura 7-4:** Análisis de resistencia en el eje  
 Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

El factor de seguridad mínimo que se obtuvo para carga estática de acuerdo con el análisis CAE es de 2.708, en otras palabras, el eje de acero AISI 1018 HR no falla por esfuerzos de fluencia. Este factor de seguridad comprende toda el área inferior o base del chavetero en la salida de potencia, en donde se comprobó que los esfuerzos son máximos.



**Figura 8-4:** Análisis de resistencia con el factor de seguridad en el eje  
 Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

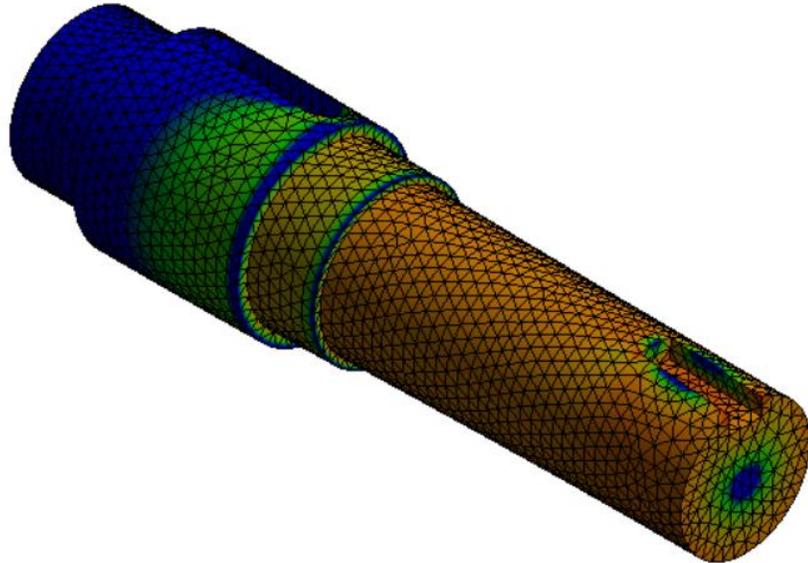
Finalmente se realizó un análisis de fatiga para el eje de la corona estudiado, en dicho análisis se utilizó el criterio de Soderberg con un factor de Marín de 0.6. Se determinó que el eje de la corona no falla por fatiga y, por tanto, tiene vida infinita.



**Figura 9-4:** Análisis CAE de la fatiga en el eje  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

El factor de seguridad mínimo que se obtuvo en el análisis de fatiga es de 1.29, por lo que, se validan los valores obtenidos mediante los métodos de diseño ofrecidos por la normativa ASME B106.1 M para el eje de transmisión de potencia.

**A: Static Structural**  
Safety Factor  
Type: Safety Factor  
07/04/2022 03:36 a. m.

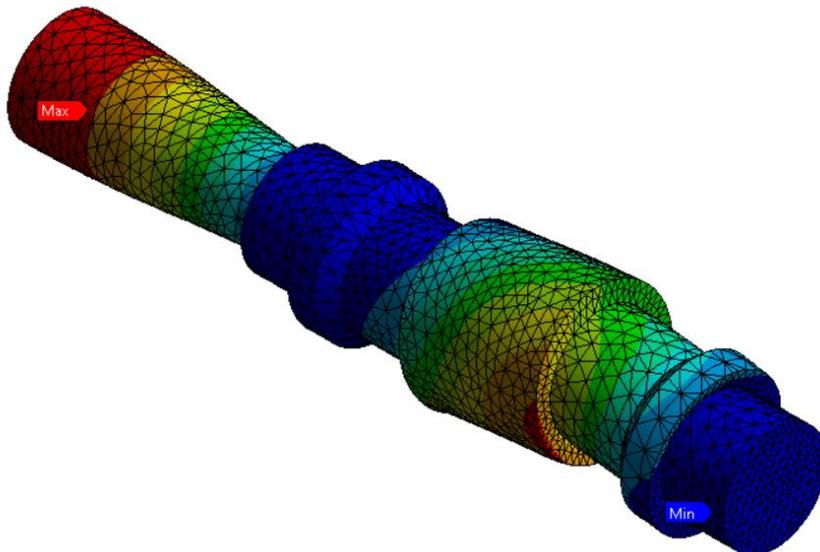
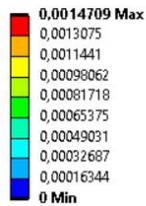


**Figura 10-4:** Análisis CAE de la fatiga con el factor de seguridad en el eje  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

#### 4.1.3. Tornillo de sinfín

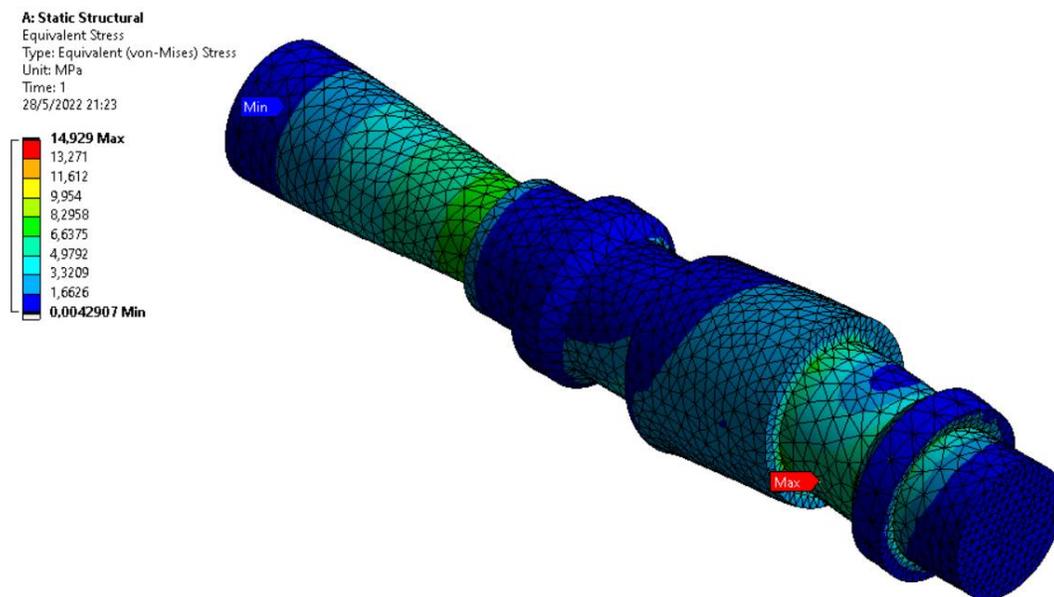
Mediante el software de elementos finitos ANSYS 2020 R1 se determinó que la deformación máxima en el eje de acero AISI 1045 es 0.0015 mm como se muestra en la figura 9-4, dicho valor varia en un porcentaje del 27% al calculado en el diseño de detalle por lo que se puede inferir que la comprobación mediante elementos finitos es correcta.

**A: Static Structural**  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1  
28/5/2022 21:15



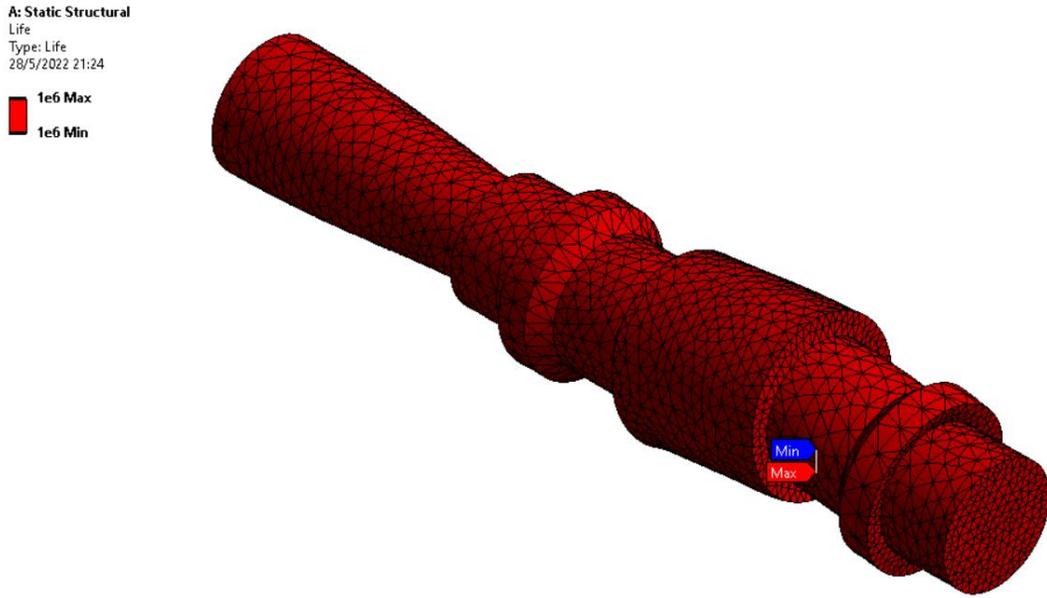
**Figura 11-4:** Análisis CAE de la deformación máxima en el eje de acero  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

De acuerdo con el análisis de resistencia realizado en Ansys, como se muestra en la figura 12-4 se observa que el esfuerzo equivalente de Von Mises máximo que experimenta el tornillo sin fin es 15 MPa, dicho valor varía en un porcentaje del 30% al calculado en el diseño de detalle por lo que se puede inferir que la comprobación mediante elementos finitos es correcta y se encuentra localizado en la parte de la rosca, esto se debe principalmente a que las fuerzas que experimenta este elemento están localizadas en este punto.



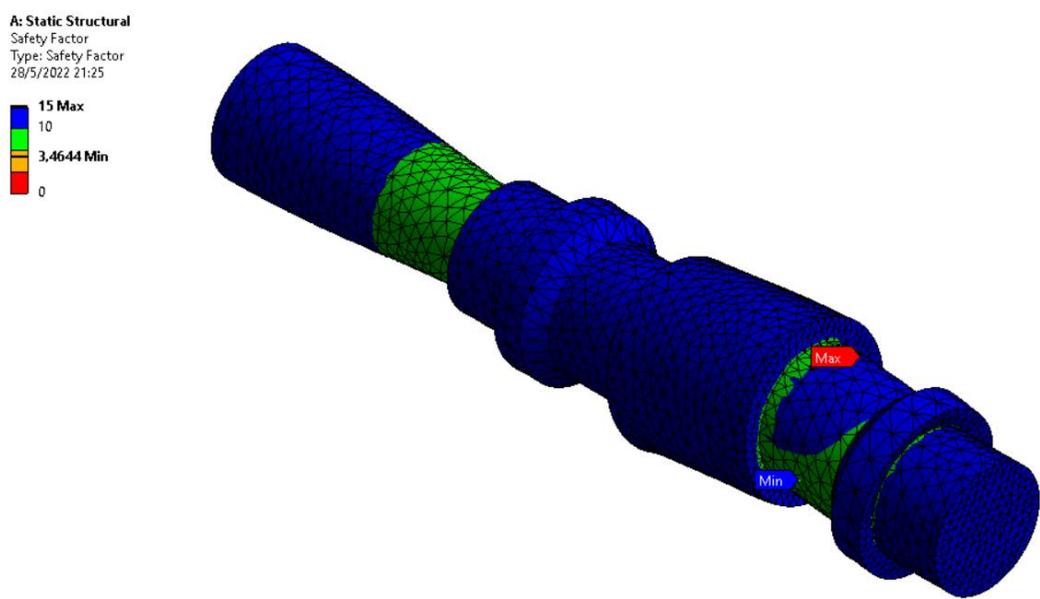
**Figura 12-4:** Análisis CAE del esfuerzo equivalente en el eje de acero  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

Finalmente se realizó un análisis de fatiga para el tornillo sin fin, en dicho análisis se utilizó el criterio de Soderberg con un factor de Marín de 0.6. Se determinó que el tornillo sin fin no falla por fatiga y, por tanto, tiene vida infinita.



**Figura 13-4:** Análisis CAE de la fatiga en el eje de acero  
 Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

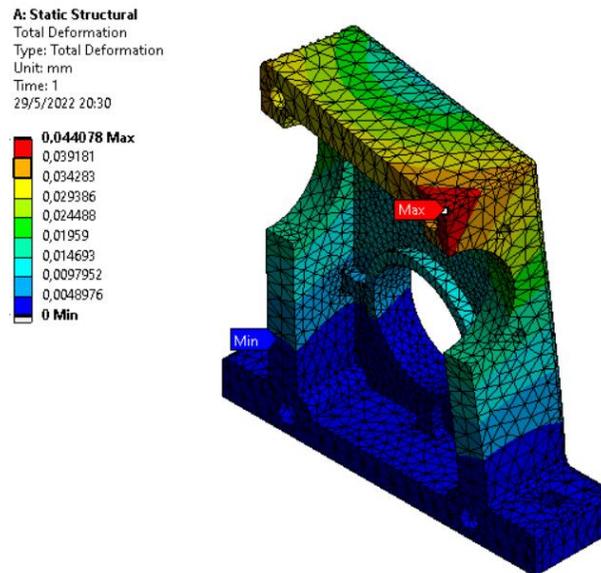
El factor de seguridad mínimo que se obtuvo en el análisis de fatiga es de 3.46, por lo que, se valida que el tornillo sin fin no va a fallar a fatiga.



**Figura 14-4:** Análisis CAE del factor de seguridad mínimo en el eje de acero  
 Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

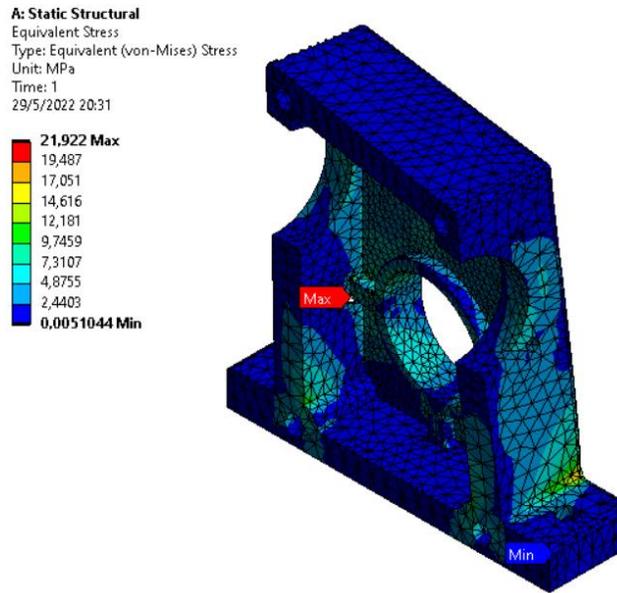
#### 4.1.4. Carcasa

La figura 13-4 muestra la deformación máxima que experimenta la carcasa de la caja reductora, con un valor máximo de 0,044 mm, se define por tanto que el elemento tendrá una integridad estructural aceptable ya que no supera las deformaciones máximas para las cuales está diseñado.



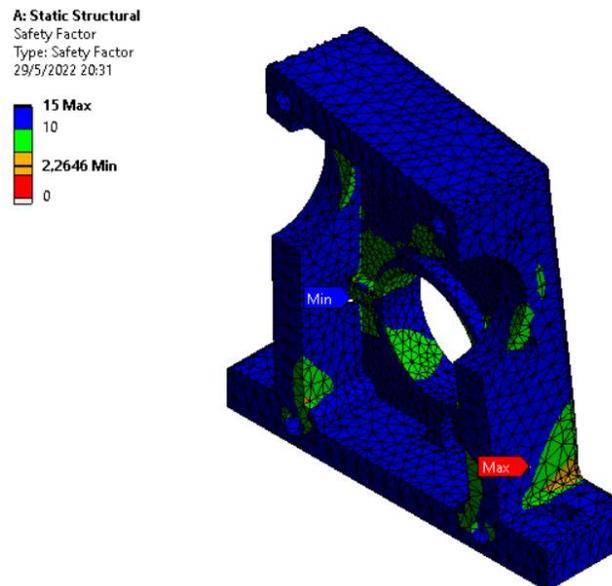
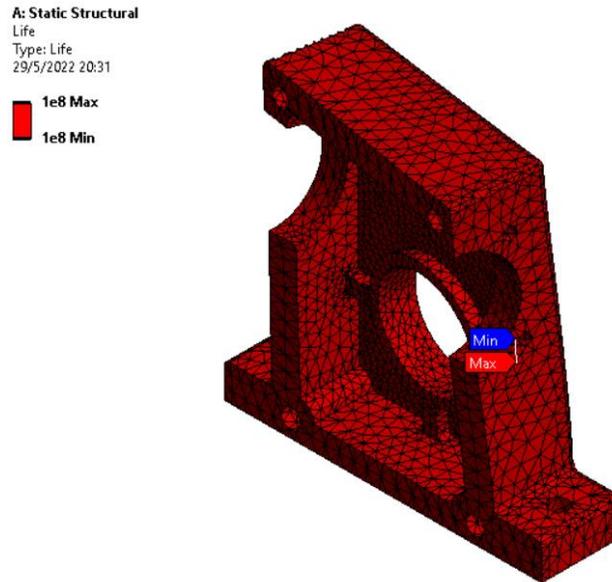
**Figura 15-4:** Análisis CAE de la deformación máxima de la carcasa  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

Como se muestra en la figura 16-4 los esfuerzos a los cuales está sometida la carcasa tienen un valor máximo de 22 MPa, y un valor mínimo de 0,005 MPa, con esto se define que no se supera el límite de fluencia del material que se utilizó para la construcción de la carcasa de aluminio descrito en la tabla 21-3 por lo cual se asegura la integridad estructural del elemento.



**Figura 16-4:** Análisis CAE de los esfuerzos a los que se somete a la caja  
 Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

Como se muestra en la figura 17-4 la carcasa de la caja reductora tiene una vida infinita cuando se analiza el elemento a fatiga superando el millón de ciclos de carga, con lo cual se define que tiene un factor de seguridad mayor a 1 como se observa en la figura 18-4 el valor de factor de seguridad es de 2,4 demostrando así que el elemento está diseñado para resistir cargas cíclicas totalmente reversibles.

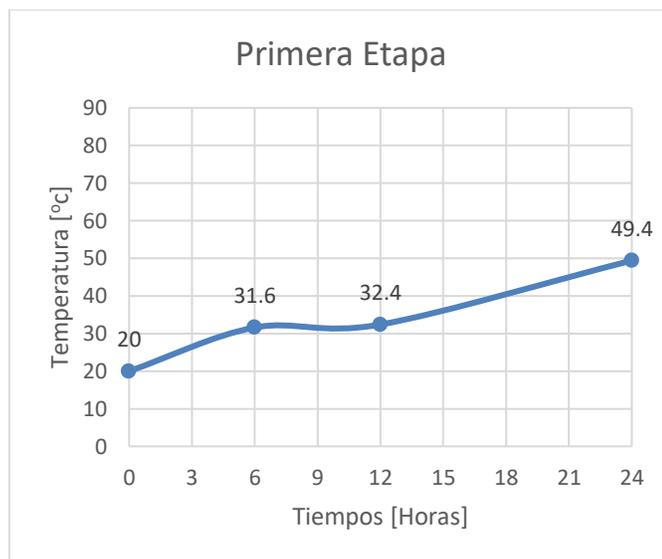


**Figura 17-4:** Análisis CAE de la vida finita de los elementos de la caja  
 Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

#### 4.2. Resultados del protocolo de pruebas

Como se explicó en el capítulo anterior, el protocolo de pruebas se llevó a cabo en tres etapas. En la primera etapa se observó que la temperatura en función de la velocidad tiende a aumentar con el tiempo, sin dar indicios de estabilizarse. Esto quiere decir que, trabajando durante 24 horas seguidas con régimen bajo el equipo motorreductor aun no llega, ni se aproxima, a la temperatura máxima debido al contacto de sus componentes internos, por tanto, se puede inferir que con un régimen bajo

de trabajo el equipo puede funcionar por más de 24 horas sin presentar ningún problema o aumento excesivo de temperatura. De hecho, como se muestra en el gráfico 1-4, la temperatura máxima que alcanzó el equipo después de 24 horas es 49.4 °C, un valor que se encuentra muy por debajo de la temperatura máxima de trabajo estimada en el capítulo anterior.



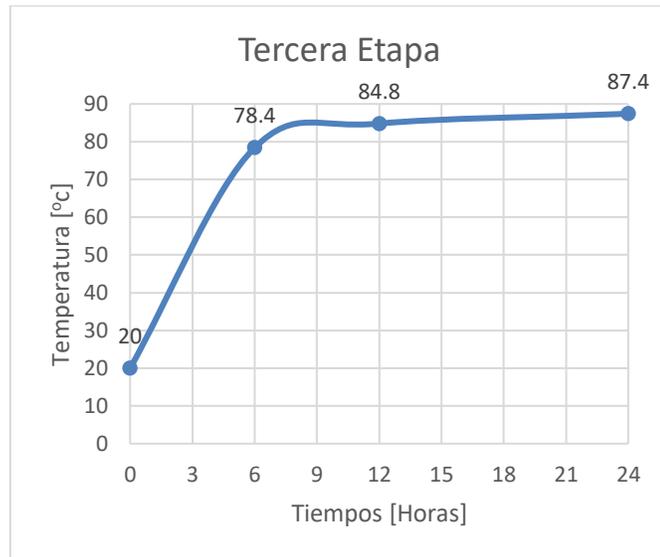
**Gráfico 1-4:** Temperatura en función del tiempo, etapa 1  
Realizado por: (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

En la segunda etapa de trabajo se encontraron resultados que describen un comportamiento significativamente diferente, la tendencia de aumento de temperatura se mantuvo durante las primeras 6 horas de trabajo, sin embargo, a partir de este punto el comportamiento de la temperatura comenzó a estabilizarse durante las siguientes 18 horas, obteniendo un aumento de 2 °C en este lapso. Dicha reacción del equipo motorreductor al régimen de trabajo medio puede sugerir que la temperatura no aumentará significativamente, ni alcanzará su valor máximo estimado en el diseño de detalle, incluso si se mantiene al motorreductor operativo por más de 24 horas. El gráfico 2-4 muestra el valor pico de temperatura que se obtuvo después de 24 horas de funcionamiento con régimen medio, es decir, con una presión de frenado de 20 psi.

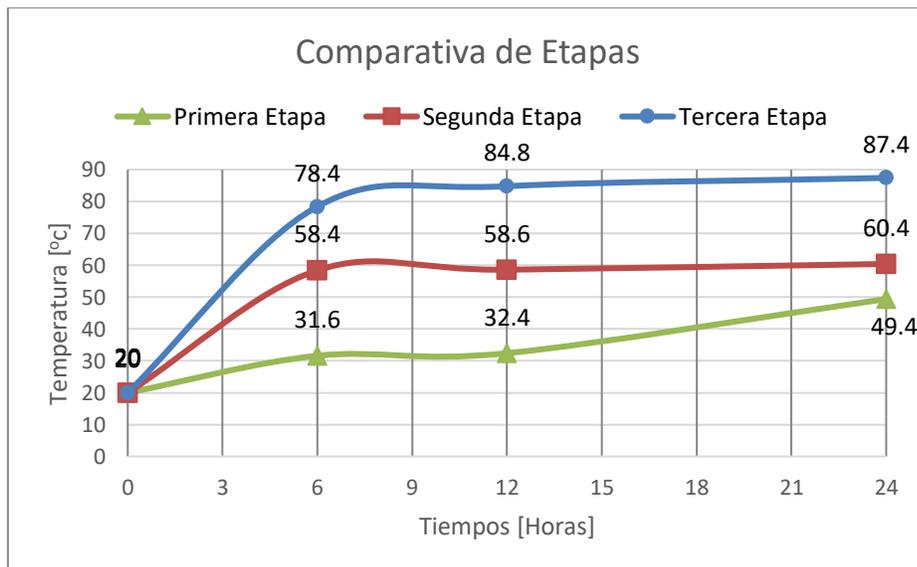


**Gráfico 2-4:** Temperatura en función del tiempo, etapa 2  
**Realizado por:** (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

La tercera etapa del protocolo de pruebas corresponde al régimen de trabajo alto, es decir, con presión de frenado de 40 psi. El comportamiento del equipo motorreductor frente al régimen de trabajo alto es muy parecido al obtenido en el régimen de trabajo medio, con la diferencia, de que las temperaturas aumentaron notablemente. En otras palabras, a partir de la sexta hora de trabajo la temperatura se estabilizó, mostrando un aumento de apenas 9 °C en 18 horas de trabajo. Sin embargo, los valores de temperatura que se registraron en el pirómetro aumentaron considerablemente respecto a las etapas anteriores, superando incluso la temperatura máxima prevista en los cálculos desarrollados en el capítulo anterior. Por lo que, se puede deducir que el equipo no está apto para trabajar con régimen alto por más de 12 horas, de acuerdo con lo que muestra el gráfico 3-4. Lo cual es una situación completamente normal, ya que el equipo motorreductor fue diseñado para trabajar en régimen medio por periodos de 8 horas por día.



**Gráfico 3-4:** Temperatura en función del tiempo, etapa 3  
**Realizado por:** (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)



**Gráfico 4-4:** Temperatura en función del tiempo, comparativa de etapas  
**Realizado por:** (Aguirre, J.; Hidalgo, J. 2022)

Para calcular la potencia consumida por el equipo motorreductor se utilizan los valores de valor eficaz tanto para el voltaje como para el amperaje medidos en el protocolo de pruebas. Por tanto, a los valores picos registrados con la pinza amperimétrica se les dividen para la raíz cuadrada de dos, obteniendo:

$$V_{RMS} = \frac{V_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}} = \frac{120}{\sqrt{2}} = 84.853 \text{ V}$$

$$I_{RMS} = \frac{I_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}} = \frac{10.1}{\sqrt{2}} = 7.142 \text{ A}$$

$$P_{consumida} = V_{RMS} \cdot I_{RMS} = 84.853 \cdot 7.142 = 606.02 \text{ W} \rightarrow 0.813 \text{ HP}$$

$$P_{perdida} = P_{nominal} - P_{consumida} = 1 - 0.813 = 0.187 \text{ HP}$$

Como se aprecia en los cálculos mostrados anteriormente, existe una diferencia entre la potencia nominal que entrega el motor y la potencia que es consumida por el motorreductor. Entre los principales factores que afectan en este cambio se pueden nombrar el contacto entre los componentes internos, lo cual genera calor, y el desgaste de estos, lo que ocasiona pérdida de eficiencia.

## CONCLUSIONES

- Este tipo de caja reductora es la mejor alternativa para el mercado nacional debido a su alta reducción de velocidad y dimensiones reducidas que al combinar esta metodología de diseño con la normativa AGMA se tiene como resultado un producto ideal para cualquier aplicación en el ámbito alimenticio o agroindustrial.
- Se utilizó el CAD para la generación de los planos de fabricación, se utilizó el CAM en la impresión 3D del molde de la carcasa de la caja reductora y todos los elementos del conjunto reductor fueron analizados y validados utilizando el CAE; por lo que la metodología CAD-CAM-CAE generó un modelo para la producción en serie de la caja reductora.
- El proceso para generar la carcasa del equipo motorreductor mediante fundición de aluminio se ejecutó exitosamente. Este proceso depende de principalmente tres factores, el primero corresponde al modelado 3D de los moldes, ya que deben llevar el sobre espesor adecuado y tener el mínimo posible de errores. El segundo factor corresponde al tipo de fundición que se quiera usar, para la carcasa de un equipo motorreductor el uso de moldes de arena es muy adecuado, y finalmente el resultado de la fundición depende del proceso de rectificado que se realiza después de obtener la carcasa.
- Se construyó adecuadamente el grupo reductor y se aplicó el tratamiento térmico óptimo para el tornillo sinfín, por lo que, se obtuvo una calidad idónea en los componentes internos del grupo reductor. El proceso depende básicamente de los procesos de manufactura que se escojan para cada elemento y de la generación correcta de los planos de construcción, puesto que, la exactitud de estos dictamina el producto final de los procesos de mecanizado y construcción. El tratamiento térmico aplicado corresponde al normalizado, con el cual se obtuvo una dureza Rockwell C de 58 en la superficie del tornillo sinfín, alcanzando el mínimo requerido por la norma ANSI-AGMA 6034 B92.
- Se llevó a cabo con éxito la construcción y el montaje del banco de pruebas, dispositivo en el cual se realizó el respectivo protocolo de pruebas para el equipo motorreductor. Entre los resultados más notables obtenidos mediante las pruebas de temperatura y potencia consumida, se pueden mencionar que el motorreductor puede trabajar por más de 24 horas seguidas en régimen medio de exigencia, lo cual se debe al factor de seguridad que aplica la

normativa ANSI-AGMA para el diseño de conjuntos reductores de tornillo sinfín-corona, y que debido al contacto entre los componentes internos y el calor generado por el mismo, se pierde alrededor de 18.7% de la potencia nominal del motor.

## RECOMENDACIONES

- Continuar con el estudio del conjunto reductor empleando diferentes materiales en la construcción, tratamientos térmicos o procesos de manufactura para reducir el costo de fabricación.
- Ampliar el protocolo de pruebas con la inclusión de varios estudios como el análisis de partículas para medir el desgaste en la corona helicoidal en los distintos regímenes de trabajo planteados.
- Cambiar el conjunto reductor por un tipo distinto, como ruedas helicoidales o cónicas, para comparar la eficiencia entre cada conjunto reductor que se desee utilizar y determinar el más óptimo.
- Realizar el diseño de disipadores de calor en la carcasa para mejorar la refrigeración del equipo motorreductor y aumentar el tiempo de trabajo seguro para el mismo.

## **BIBLIOGRAFÍA**

**ANSI-AGMA 2004-B98.** Gear Materials and Heat Treatment Manual.

**ANSI-AGMA 6034-B92.** Practice for Enclosed Cylindrical Wormgear Speed Reducers and Gearmotors.

**ANSI-AGMA 6022-C93.** Design Manual for Cylindrical Wormgearing.

**ARLINE, KATHERINE.** Direct Costs vs. Indirect Costs: What are they, and how are they different? [En línea] [Citado el: 29 de 01 de 2022.] Disponible en:

<https://www.businessnewsdaily.com/5498-direct-costs-indirect-costs.html>.

**BÖHLER.** Voestalpine One Step Ahead. [En línea] [Citado el: 02 de Febrero de 2022.] Disponible en: <https://www.bohlerperu.com/app/uploads/sites/138/2019/09/BRONCE-B-PB10.pdf>.

**BORGWARNER.** BorgWarner. [En línea] [Citado el: 08 de Febrero de 2022.] Disponible en:

<https://www.borgwarner.com/company>.

**BUDYNAS, RICHARD G. y NISBETT, J. KEITH.** Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. Novena ed. México, D.F. : McGRAW-HILL, 2012. págs. 779-788. ISBN 978-607-15-0771-6.

**CALLISTER, WILLIAM y RETHWISCH, DAVID G.** Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Novena ed. Barcelona : Editorial Reverté, 2016. págs. 50-60. ISBN 978-84-291-7251-5.

**CAPELLO, EDUARDO.** Tecnología de la Fundición. Segunda ed. Barcelona : GUSTAVO GILI, 2013. págs. 120-135. ISBN 978-84-252-0278-0.

**CASTRO, GUILLERMO.** Fundiciones. Buenos Aires : Departamento de Ingeniería Mecánica, 2009. págs. 20-35.

**CORREA, MOISÉS ESPINOZA.** Aplicación del método QFD para el diseño de un envase de geometría especial en el proceso de termoformado. España : D - Universidad de La Rioja, 2018. págs. 50-55.

**DIAZ, FELIPE.** Aceros, estructuras y tratamientos térmicos. CUAUTITLÁN : UNAM, 2018. págs. 34-38. Vol. 10.

**DIN 472.** Ring Retainers.

**DIN 6885-1.** Keyway, key details.

**GARAVITO, JULIO. FUNDICIÓN.** Segunda ed. Colombia : Escuela Colombia da Ingeniería, 2008. págs. 65-72.

**GONZÁLES GÓMEZ, SERGIO.** El gran libro de SolidWorks. Barcelona : Marcombo ediciones técnicas, 2008. págs. 15-22. ISBN 978-84-267-1458-9.

**LASHERAS, JOSE ESTEBAN.** Materiales Industriales. Zaragoza : Reverte, 1981. págs. 87-95.

- MASIP, RAFAEL FERRÉ.** Fabricación asistida por computadora CAM. Barcelona : Marcomobo, 2010. págs. 46-59. ISBN 978-84-267-0677-5.
- NTN CORPORATION.** Rodamiento de Bolas y Rodillos. s.l. : Departamento de Ingeniería NTN, 2004. págs. 118-120.
- PREBISCH, RAÚL.** El desarrollo económico de la América Latina y algunos de sus principales problemas. Naciones Unidas: CEPAL, 2012. págs. 8-11.
- REGAL REXNORD CORPORATION.** Regal Rexnord Creating a Better Tomorrow. [En línea] [Citado el: 08 de 02 de 2022.] Disponible en: <https://www.regalrexnord.com/products/gearing/right-angle-gearing/worm-reducers?f=brand%3dMorse%26PTS159%3d1%252f2%2520to%25203%252f4%2520HP%2520%2528%253c%25201%2529%26PTS87%3d10%253a1>.
- SHACKELFORD, JAMES F.** Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros. Madrid: Person Education, 2014. págs. 314-321.
- SMITH, WILLIAM y HASHEMI, JAVAD.** Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales. [trad.] Gabriel Nagore Cazáres y Pedro Alejandro Gonzáles. Cuarta. México, D.F. : McGRAW-HILL, 2006. págs. 456-472. ISBN 970-10-5638-8.
- STOTT, RANDY.** About AGMA. [En línea] [Citado el: 13 de Diciembre de 2021.] Disponible en: <https://www.agma.org/>.
- TORNERO, FRANCISCO.** Mecanizado por control numérico. Barcelona : Ediciones Ceysa, 2015. págs. 153-159. ISBN 978-84-15884-53-8.
- UNIVERSIDAD DE VALENCIA.** Open Course Ware. [En línea] [Citado el: 18 de 12 de 2016.] Disponible en: [http://ocw.uv.es/ingenieria-y-arquitectura/expresion-grafica/eg\\_tema\\_2.pdf](http://ocw.uv.es/ingenieria-y-arquitectura/expresion-grafica/eg_tema_2.pdf).
- ZAIDI, A.** QFD Despliegue de la función de la calidad. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, 2015. págs. 158-163.
- ZIENKIEWICZ, C. O.** El método de los elementos finitos. Barcelona : Reverté, 2018. págs. 82-86. ISBN 978-84-291-4894-7.

## ANEXOS

### ANEXO A: ENCUESTAS PRELIMINARES PARA DETERMINAR EL NICHOS DE MERCADO DE LA CAJA MOTORREDUCTORA

¿Qué tipo de engranajes escogería usted para la transmisión de potencia en un equipo motorreductor?

 Copiar

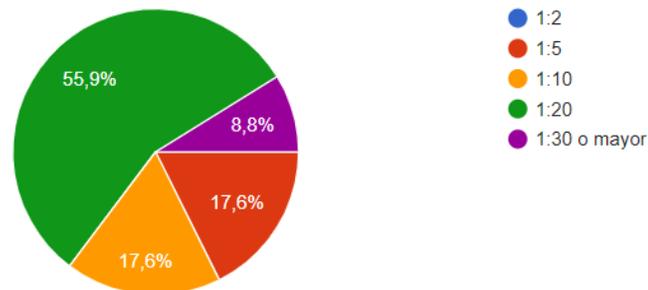
34 respuestas



¿Qué relación de velocidades desearía usted en un equipo motorreductor?

 Copiar

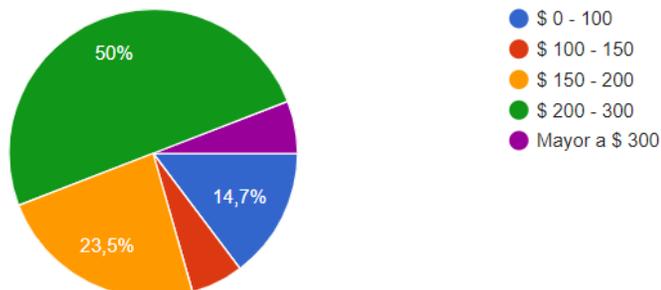
34 respuestas



¿Qué precio estaría usted dispuesto a pagar por un equipo motorreductor?

 Copiar

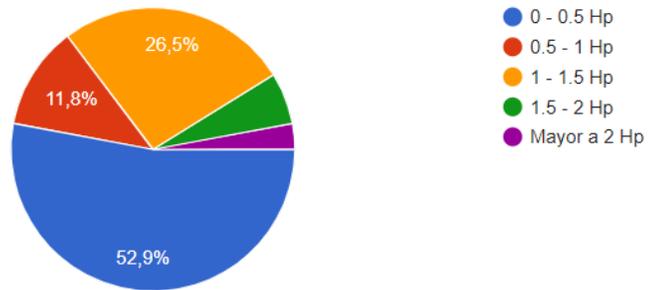
34 respuestas



¿Qué potencia de entrada desearía en un equipo motorreductor?

 Copiar

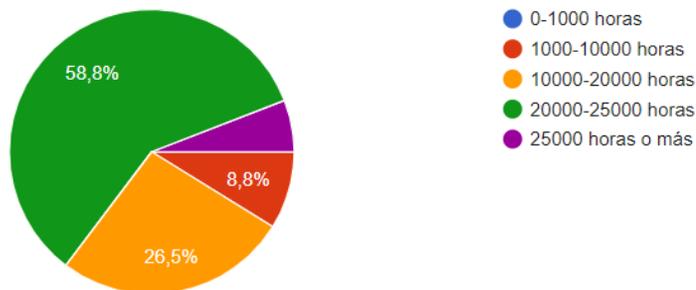
34 respuestas



Según su criterio: ¿Qué tiempo de vida útil es el adecuado para un equipo motorreductor?

 Copiar

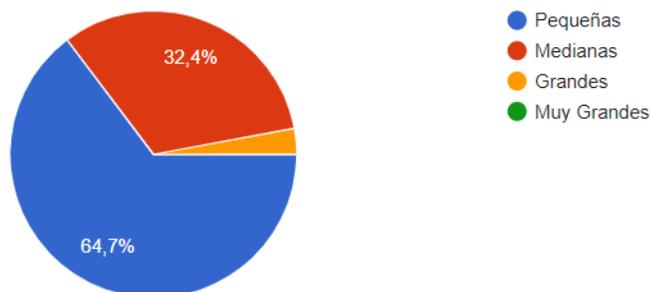
34 respuestas



Si usted adquiriese un equipo motorreductor desearía que las dimensiones del equipo sean:

 Copiar

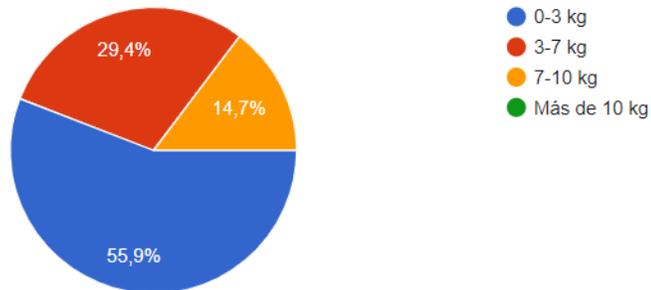
34 respuestas



Si usted adquiriese un equipo motorreductor ¿Cuál desearía que sea el peso del equipo?

 Copiar

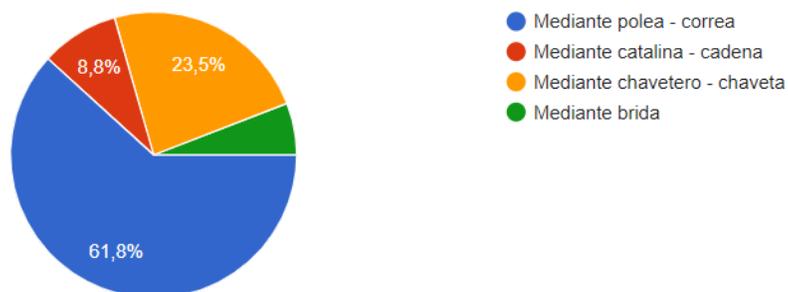
34 respuestas



¿Cuál de las siguientes opciones le gustaría para la entrada de potencia del equipo motorreductor?

 Copiar

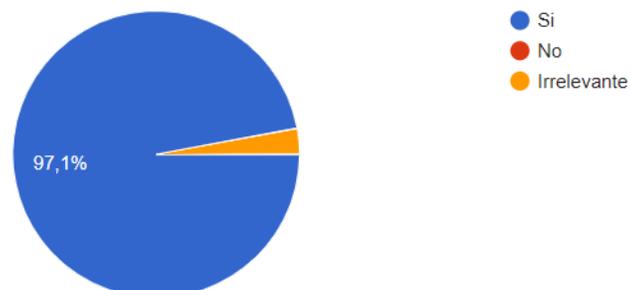
34 respuestas



¿Considera importante que el grupo reductor del equipo sea diseñado mediante normativa AGMA? Tomando en cuenta que el diseño mediante normativa garantiza la resistencia a la fatiga y al contacto del grupo reductor

 Copiar

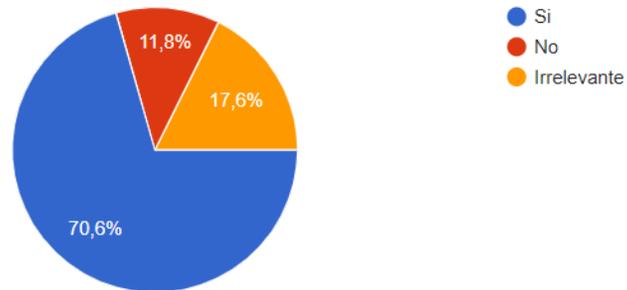
34 respuestas



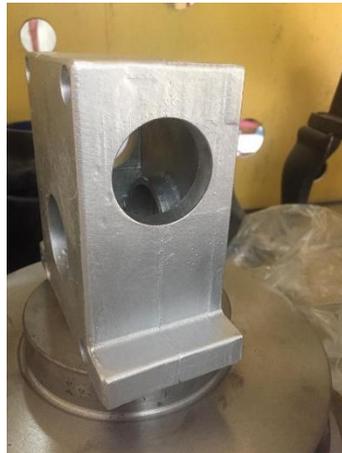
¿Considera importante la apariencia del equipo motorreductor al momento de realizar la compra?

 Copiar

34 respuestas



**ANEXO B: RECOPIACIÓN FOTOGRÁFICA DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE LA CAJA REDUCTORA**

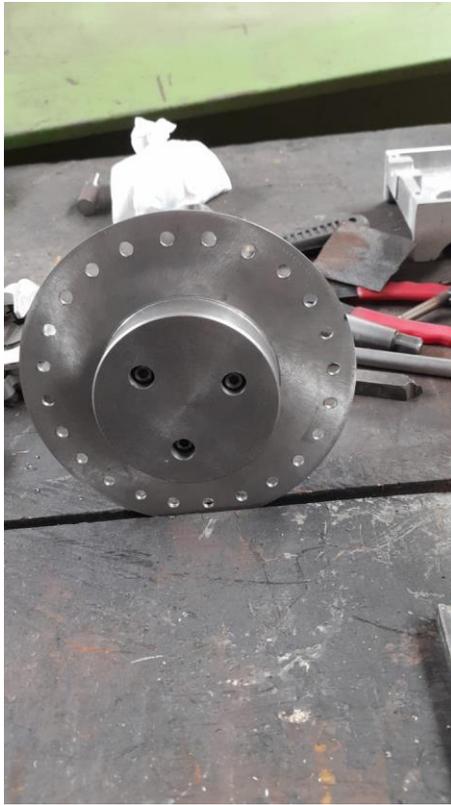














# Manual de operación y mantenimiento

## Equipo motorreductor

### **Operación**

La sección de operación es una referencia para el operador nuevo y un recordatorio para el experimentado. Esta sección incluye una explicación de los interruptores, controles de la máquina, etc.

Las fotografías e ilustraciones guían al operador a través de los procedimientos correctos de comprobación, arranque, operación y parada de la máquina.

Las técnicas de operación que se describen en esta publicación son básicas. La habilidad y la técnica las desarrolla el operador a medida que gana conocimientos de la maquina y sus capacidades.

### **Antes de operar**

En caso de que haya objetos cercanos al equipo aleje los mismos hasta una distancia segura, este atento de peligros tales como cables, instrumentos de medición, etc.

Compruebe que el equipo motorreductor esté ubicado en una superficie plana, para evitar vibraciones excesivas y daños en los componentes internos.

Asegúrese de que las conexiones estén en buen estado, en caso de encontrar cables dañados o rotos interrumpa la operación. Asegúrese de que el sistema de regulación de freno no esté en acción, de tal manera que el equipo no esté frenado antes de arrancar el motor.

Verifique que el tapón de entrada y salida de aceite esté colocado adecuadamente para evitar derramamiento de lubricante.

### **Operación de la máquina**

Conectar el equipo motorreductor a la fuente de alimentación de 110 voltios, esperar aproximadamente 2 minutos antes de usar el sistema de regulación de frenado, esto evitara que el impacto en los elementos mecánicos sea muy brusco.

Revisar el manómetro analógico instalado a medida que se utiliza el sistema de regulación de freno, para comprobar que no se sobrepase el valor de presión máxima en el disco de freno.

### **Presión de frenado**

Para accionar el sistema se usa un tornillo de potencia instalado en el paso de líquido de freno, de tal manera que al girar el tornillo en sentido horario la presión de frenado aumenta, con esto se obtienen tres regímenes de frenado los cuales corresponden a bajo (10 psi); medio (20 psi) y alto (40 psi).

La presión máxima de frenado está señalada en el manómetro analógico con una marca de color rojo para que el usuario tenga facilidad visual y no sobrepase esta presión al momento de regular el freno.

### **Parada del motor**

Una vez realizadas las pruebas de frenado, toma de temperatura y medición de amperaje eficaz se debe dejar correr a la maquina en vacío por aproximadamente 2 minutos, para que los componentes mecánicos se autolubriquen y enfríen antes de apagar el motor, evitando así una parada agresiva.

## **Mantenimiento**

La sección de mantenimiento es una guía para el cuidado del equipo. Las instrucciones, ilustradas paso por paso, están agrupadas por intervalos de servicio. Dichos intervalos de mantenimiento incluyen referencias a instrucciones detalladas que vienen a continuación.

### **Información sobre duración de los rodamientos**

Los rodamientos fueron seleccionados bajo el catálogo NTN, en donde, para una confiabilidad de 90% el rango de vida útil de los rodamientos va desde 16000 a 24000 horas. Por tanto, si se toma el valor medio de este rango los rodamientos seleccionados tienen que ser cambiados después de 20000 horas, si el régimen de trabajo no supera los 20 psi de presión de frenado.

### **Lubricante y capacidades de llenado**

El lubricante seleccionado corresponde a un SAE 80W90, dicho lubricante está diseñado específicamente para engranajes y cajas reductoras de velocidad. AGMA indica que se debe revisar el nivel del aceite cada 3 meses de trabajo y si es necesario reponerlo.

La capacidad de llenado de la caja de reducción es de 1 litro de aceite lubricante, el cambio total de aceite se realiza en caso de que el equipo haya permanecido parado por más de 5 meses, y se deben revisar los retenedores y el sellado del equipo.

### **Programa de intervalos de mantenimiento**

El programa de intervalos de mantenimiento consiste en la revisión de los componentes internos del equipo motorreductor, el cambio de aceite y retenedores. Este mantenimiento se debe realizar anualmente.

**ANEXO D: PLANOS AS BUILT**