



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA  
INDOAMÉRICA**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y TECNOLOGÍAS DE LA  
INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**TEMA:**

---

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA  
RENOVABLE POR MEDIO DE UNA CAJA MULTIPLICADORA PARA  
UNA PICO HIDROELÉCTRICA EN EL CANAL DE RIEGO AMBATO –  
HUACHI – PELILEO.**

---

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Industrial.

Modalidad Presencial.

**Autor(a)**

Mullo Coque Pablo Sebastián.

**Tutor(a)**

PhD. Manuel Ignacio Ayala Chauvin.

**AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL AUTOR PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TRABAJO DE TÍTULACIÓN**

Yo, Pablo Sebastian Mullo Coque, declaro ser autor del Trabajo de Titulación con el nombre “OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE POR MEDIO DE UNA CAJA MULTIPLICADORA PARA UNA PICO HIDROELÉCTRICA EN EL CANAL DE RIEGO AMBATO – HUACHI – PELILEO”, como requisito para optar al grado de Ingeniero Industrial y autorizo al Sistema de Bibliotecas de la Universidad Tecnológica Indoamérica, para que con fines netamente académicos divulgue esta obra a través del Repositorio Digital Institucional (RDI-UTI).

Los usuarios del RDI-UTI podrán consultar el contenido de este trabajo en las redes de información del país y del exterior, con las cuales la Universidad tenga convenios. La Universidad Tecnológica Indoamérica no se hace responsable por el plagio o copia del contenido parcial o total de este trabajo.

Del mismo modo, acepto que los Derechos de Autor, Morales y Patrimoniales, sobre esta obra, serán compartidos entre mi persona y la Universidad Tecnológica Indoamérica, y que no tramitaré la publicación de esta obra en ningún otro medio, sin autorización expresa de la misma. En caso de que exista el potencial de generación de beneficios económicos o patentes, producto de este trabajo, acepto que se deberán firmar convenios específicos adicionales, donde se acuerden los términos de adjudicación de dichos beneficios.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Ambato, a los 23 días del mes de septiembre de 2020, firmo conforme:

Autor: Pablo Sebastian Mullo Coque



Firma: .....

Número de Cédula: 0503772832

Dirección: Cotopaxi, Salcedo, Parroquia San Miguel, Barrio San Antonio.

Correo Electrónico: psmcoki@gmail.com

Teléfono: 032597448

## **APROBACIÓN DEL TUTOR**

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE POR MEDIO DE UNA CAJA MULTIPLICADORA PARA UNA PICO HIDROELÉCTRICA EN EL CANAL DE RIEGO AMBATO – HUACHI – PELILEO” presentado por Pablo Sebastian Mullo Coque, para optar por el Título de Ingeniero Industrial,

### **CERTIFICO**

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y considero que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del Tribunal Examinador que se designe.

Ambato, 23 de septiembre del 2020.



.....  
PhD. Manuel Ignacio Ayala Chauvin

## **DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD**

Quien suscribe, declaro que los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación, como requerimiento previo para la obtención del Título de Ingeniero Industrial, son absolutamente originales, auténticos y personales y de exclusiva responsabilidad legal y académica del autor

Ambato, 23 de septiembre 2020.



.....  
Pablo Sebastian Mullo Coque  
0503772832

## **APROBACIÓN TRIBUNAL**

El trabajo de Titulación, ha sido revisado, aprobado y autorizada su impresión y empastado, sobre el Tema: “OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE POR MEDIO DE UNA CAJA MULTIPLICADORA PARA UNA PICO HIDROELÉCTRICA EN EL CANAL DE RIEGO AMBATO – HUACHI – PELILEO, previo a la obtención del Título de Ingeniero Industrial, reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la sustentación del trabajo de titulación.

Ambato, 23 de septiembre del 2020.

.....  
Muzo Villacis Segundo Pedro  
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

.....  
Cumbajin Alferez Myriam Emperatriz  
VOCAL

.....  
Cruz Villacis Juan Serafin  
VOCAL

## **DEDICATORIA.**

Este trabajo de titulación va dedicado para mis padres quienes siempre supieron guiarme y apoyarme en todas las vicisitudes existentes en mi vida, al igual que para mis hermanos y resto de mi familia que con sus consejos ayudaron a formarme como persona de bien, así como también a una persona especial presente en mi vida durante 9 años.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a todos mis amigos que en el transcurso de la vida universitaria pudimos disfrutar de momentos malos como buenos especialmente al grupo amiguis.

## **AGRADECIMIENTO.**

Agradezco a Dios quien con su bendición permitió alcanzar esta meta tan  
anhelada.

De igual manera agradezco a la Universidad Tecnológica Indoamérica, en especial  
a la carrera de Ingeniería Industrial quienes con sus conocimientos y enseñanzas  
me formaron como un excelente profesional.

Finalmente quiero expresar mi más grande y sincero agradecimiento al PhD.  
Ignacio Ayala, principal colaborador durante todo este proceso de investigación,  
quien con su dirección, conocimiento y enseñanza permitió desarrollar este  
trabajo.

## **Índice de Contenido.**

AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL AUTOR PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TRABAJO DE TÍTULACIÓN .....	I
APROBACIÓN DEL TUTOR.....	II
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD.....	III
APROBACIÓN TRIBUNAL.....	IV
DEDICATORIA. ....	V
AGRADECIMIENTO.....	VI
Índice de Tablas. ....	IX
Índice de Gráficos. ....	XI
Índice de Imágenes.....	XIII
Índice de Anexos.....	XIV
Resumen Ejecutivo.....	XVI
Summary. ....	XVII
<b>CAPITULO I.....</b>	<b>- 1 -</b>
Introducción.....	- 1 -
Antecedentes.....	- 2 -
Justificación.....	- 3 -
Objetivos.....	- 4 -
Objetivo general:.....	- 4 -
Objetivos Específicos: .....	- 4 -
<b>CAPITULO II.....</b>	<b>- 5 -</b>
INGENIERÍA DEL PROYECTO .....	- 5 -
Diagnostico Actual: .....	- 5 -
Área de estudio. ....	- 8 -
Modelo operativo: .....	- 9 -



Desarrollo del modelo operativo: .....	11
<b>CAPITULO III.....</b>	<b>13</b>
PROPUESTA Y RESULTADOS ESPERADOS .....	13
El sistema de energía renovable: .....	13
Canal de riego: .....	13
Caracterización de la Mini turbina Michell – Banki: .....	14
Generador síncrono de imanes permanentes: .....	16
Sistemas de transmisión de potencia. ....	17
Presentación de la propuesta: .....	18
Diseño matemático de un mecanismo de multiplicación.....	18
Modelado virtual.....	62
Simulación. ....	63
Resumen: .....	104
Lubricación. ....	105
Cronograma de actividades: .....	105
Análisis de Costos. ....	107
<b>CAPITULO IV .....</b>	<b>108</b>
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	108
Conclusiones:.....	108
Recomendaciones: .....	109
<b>ANEXOS .....</b>	<b>110</b>
<b>Bibliografía. ....</b>	<b>155</b>

## Índice de Tablas.

<b>Tabla 1.</b> <i>Características de la Modelación de las Secciones Transversales del canal de riego.</i> .....	- 6 -
<b>Tabla 2.</b> <i>Actividades para Realizarse en la Investigación.</i> .....	- 9 -
<b>Tabla 3:</b> <i>Características de la Mini Turbina Michell – Banki.</i> .....	15
<b>Tabla 4.</b> <i>Datos del Generador Síncrono de Imanes Permanentes de Flujo Axial.</i> .....	16
<b>Tabla 5.</b> <i>Datos del Generador Síncrono de Imanes Permanentes del Flujo Radial.</i> .....	16
<b>Tabla 6:</b> <i>Comparación entre los tipos de engranes utilizados en las transmisiones.</i> .....	18
<b>Tabla 7.</b> <i>Cuadro de resumen</i> .....	29
<b>Tabla 8.</b> <i>Resistencia a la Fatiga Superficial Calculada, Seleccionada y Coeficiente de Seguridad.</i> .....	29
<b>Tabla 9.</b> <i>Resumen de los Valores Obtenidos para la Flecha 1.</i> .....	60
<b>Tabla 10.</b> <i>Resumen de los Valores Obtenidos para la Flecha 2.</i> .....	61
<b>Tabla 11.</b> <i>Resumen de los Valores Obtenidos para la Flecha 3.</i> .....	61
<b>Tabla 12.</b> <i>Factores de Seguridad Calculados y Esfuerzo máximos Obtenidos para cada Flecha.</i> .....	62
<b>Tabla 13.</b> <i>Datos del Material Acero AISI 1020.</i> .....	64
<b>Tabla 14.</b> <i>Limite Elástico del Material Acero Estructural.</i> .....	64
<b>Tabla 15.</b> <i>Resistencia a la Tracción del Material Acero Estructural.</i> .....	65
<b>Tabla 16.</b> <i>Resistencia a la Tracción del Material Acero Estructural.</i> .....	65
<b>Tabla 17.</b> <i>Datos del Mallado del Conjunto Utilizado en Todas las Simulaciones.</i> .....	65
<b>Tabla 18.</b> <i>Resultados Generales de la Simulación de Análisis Estructural Estático.</i> .....	68
<b>Tabla 19.</b> <i>Resultados de la Deformación Total.</i> .....	69
<b>Tabla 20.</b> <i>Resultados de la Tensión Elástica Equivalente.</i> .....	70
<b>Tabla 21.</b> <i>Resultados Obtenidos del Estrés Equivalente.</i> .....	72
<b>Tabla 22.</b> <i>Resultados Generales de la Simulación de Análisis Estructural Estático.</i> .....	73

<b>Tabla 23.</b> <i>Resultados de la Deformación Total.</i> .....	74
<b>Tabla 24.</b> <i>Resultados de la Tensión Elástica Equivalente.</i> .....	75
<b>Tabla 25.</b> <i>Resultados Obtenidos del Estrés Equivalente</i> .....	76
<b>Tabla 26.</b> <i>Resultados Generales de la Simulación de Análisis Transitorio.</i> .....	78
<b>Tabla 27.</b> <i>Resultados de la Deformación Total.</i> .....	79
<b>Tabla 28.</b> <i>Resultados del Estrés Equivalente.</i> .....	82
<b>Tabla 29.</b> <i>Resultados Generales de la Simulación de Respuesta Armónica.</i> .....	85
<b>Tabla 30.</b> <i>Niveles de Frecuencia Utilizados.</i> .....	86
<b>Tabla 31.</b> <i>Niveles de Frecuencia Utilizados.</i> .....	87
<b>Tabla 32.</b> <i>Resultados Generales de la Simulación Dinámica.</i> .....	91
<b>Tabla 33.</b> <i>Resultados Obtenidos de la Deformación Total.</i> .....	92
<b>Tabla 34.</b> <i>Resultados Obtenidos de la Estrés Equivalente.</i> .....	93
<b>Tabla 35.</b> <i>Resultados Obtenidos de la Máxima Tensión de Corte.</i> .....	94
<b>Tabla 36.</b> <i>Datos del Mallado Respectivo.</i> .....	97
<b>Tabla 37.</b> <i>Resultados Generales de la Simulación de Análisis Estructural Estático.</i> .....	98
<b>Tabla 38.</b> <i>Resultados Obtenidos de la Deformación Total.</i> .....	99
<b>Tabla 39.</b> <i>Resultados Obtenidos del Estrés Equivalente.</i> .....	99
<b>Tabla 40.</b> <i>Datos del Mallado Generado.</i> .....	101
<b>Tabla 41.</b> <i>Resultados Generales del análisis Estructural Estático de la flecha 2.</i> .....	102
<b>Tabla 42.</b> <i>Resultados de la Deformación Total Flecha 2.</i> .....	103
<b>Tabla 43.</b> <i>Resultados del Estrés Equivalente.</i> .....	103
<b>Tabla 44.</b> <i>Resumen del Análisis Estructural Engranés.</i> .....	104
<b>Tabla 45:</b> <i>Resumen del Análisis Transitorio por Trenes.</i> .....	104
<b>Tabla 46:</b> <i>Resumen del Análisis Armónico por Trenes.</i> .....	104
<b>Tabla 47:</b> <i>Resumen Dinámica Explícita por Trenes.</i> .....	104
<b>Tabla 48:</b> <i>Resumen del Análisis Estructural de las Flechas.</i> .....	104
<b>Tabla 51.</b> <i>Cronograma de Actividades.</i> .....	106
<b>Tabla 52.</b> <i>Análisis de Costo de los Componentes.</i> .....	107
<b>Tabla 53.</b> <i>Costo Total.</i> .....	107

## Índice de Gráficos.

<b>Gráfico 1:</b> Diagrama de Red de las Actividades Expuestas.....	- 9 -
<b>Gráfico 2:</b> Actividades a Realizarse en el Modelo Operativo.....	10
<b>Gráfico 3:</b> Diagrama Ilustrativo para el Análisis de los Engranés.....	19
<b>Gráfico 4:</b> Diagrama Ilustrativo para el Análisis de los Engranés.....	20
<b>Gráfico 5:</b> Diagrama de Fuerza Aplicada en el Eje sentido x-y.....	30
<b>Gráfico 6:</b> Diagrama de Fuerza Aplicada en el Eje sentido y-z.....	31
<b>Gráfico 7:</b> Diagrama Ilustrativo para el Análisis de Toque en las Flechas.....	31
<b>Gráfico 8:</b> Diagrama de las Áreas Generadas por la fuerza y reacciones en el sentido x-y. ....	32
<b>Gráfico 9:</b> Momento Flector Generado por la Fuerza y Reacciones en el sentido x-y.....	32
<b>Gráfico 10:</b> Diagrama de las Áreas Generadas por la fuerza y reacciones en el sentido y-z.....	33
<b>Gráfico 11:</b> Momento Flector Generado por la Fuerza y Reacciones en el sentido y-z.....	33
<b>Gráfico 12:</b> Diagrama de Fuerza Aplicada en el Eje sentido x-y.....	40
<b>Gráfico 13:</b> Diagrama de Fuerza Aplicada en el Eje sentido y-z.....	41
<b>Gráfico 14:</b> Diagrama de las Áreas Generadas por la fuerza y reacciones en el sentido x-y.....	42
<b>Gráfico 15:</b> Momento Flector Generado por la Fuerza y Reacciones en el sentido x-y. ....	42
<b>Gráfico 16:</b> Diagrama de las Áreas Generadas por la fuerza y reacciones en el sentido y-z.).....	43
<b>Gráfico 17:</b> Momento Flector Generado por la Fuerza y Reacciones en el sentido y-z.....	44
<b>Gráfico 18:</b> Diagrama de Fuerza Aplicada en el Eje sentido x-y.....	51
<b>Gráfico 19:</b> Diagrama de Fuerza Aplicada en el Eje sentido y-z.....	52
<b>Gráfico 20:</b> Diagrama de las Áreas Generadas por la fuerza y reacciones en el sentido x-y.....	52
<b>Gráfico 21:</b> Momento Flector Generado por la Fuerza y Reacciones en el sentido x-y. ....	53

<b>Gráfico 22:</b> Diagrama de las Áreas Generadas por la fuerza y reacciones en el sentido y-z. ....	53
<b>Gráfico 23:</b> Momento Flector Generado por la Fuerza y Reacciones en el sentido y-z. ....	54
<b>Gráfico 24:</b> Grafica de los Datos de la Deformación Total. ....	69
<b>Gráfico 25:</b> Grafica de los Datos de la Tensión Equivalente. ....	71
<b>Gráfico 26:</b> Grafica de los Datos del Estrés Equivalente.....	72
<b>Gráfico 27:</b> Grafica de los Datos de la Deformación Total. ....	74
<b>Gráfico 28:</b> Grafica de los Datos de la Tensión Equivalente.....	75
<b>Gráfico 29:</b> Grafica de los Datos del Estrés Equivalente.....	77
<b>Gráfico 30:</b> Grafica de los Datos de la Deformación Total. ....	81
<b>Gráfico 31:</b> Grafica de los Datos del Estrés Equivalente.....	83
<b>Gráfico 32:</b> Grafica de los Valores obtenidos en la Deformación Total Armónica. ....	86
<b>Gráfico 33:</b> Gráfica de los valores obtenidos en el Estrés Equivalente Armónico. ....	87
<b>Gráfico 34:</b> Grafica de las Frecuencias en el Engrane 2. ....	88
<b>Gráfico 35:</b> Grafica de las Frecuencias en el Engrane 3. ....	89
<b>Gráfico 36:</b> Grafica de la Deformación Total. ....	92
<b>Gráfico 37:</b> Grafica del Estrés Equivalente.....	94
<b>Gráfico 38:</b> Gráfica de la Máxima Tensión de Corte.....	95

## Índice de Imágenes.

<b>Imagen 1:</b> Características del Canal de Riego. ....	- 6 -
<b>Imagen 2:</b> Ficha Técnica de la mini – turbina Michell Banki.....	- 7 -
<b>Imagen 3:</b> Secciones del canal de riego. ....	13
<b>Imagen 4:</b> Modelo de la mini turbina Michell – Banki.....	15
<b>Imagen 5:</b> Caja Multiplicadora Ensamblada en SolidWorks. ....	62
<b>Imagen 6:</b> Ingreso del Ultimo Valor del Engrane y su Aproximada Velocidad. ....	63
<b>Imagen 7:</b> Valores Obtenidos de la Simulación.....	64
<b>Imagen 8:</b> Mallado del Conjunto. ....	67
<b>Imagen 9:</b> Deformación Total.....	69
<b>Imagen 10:</b> Tensión Elástica Equivalente.....	70
<b>Imagen 11:</b> Estrés Equivalente.....	71
<b>Imagen 12:</b> Deformación Total.....	74
<b>Imagen 13:</b> Tensión Elástica Equivalente.....	75
<b>Imagen 14:</b> Estrés Equivalente.....	76
<b>Imagen 15:</b> Deformación Total.....	79
<b>Imagen 16:</b> Estrés Equivalente.....	81
<b>Imagen 17:</b> Deformación Total.....	86
<b>Imagen 18:</b> Estrés Equivalente.....	87
<b>Imagen 19:</b> Deformación Total.....	92
<b>Imagen 20:</b> Estrés Equivalente.....	93
<b>Imagen 21:</b> Máxima Tensión de Corte.....	94
<b>Imagen 22:</b> Flecha con el Mallado Respectivo. ....	96
<b>Imagen 23:</b> Deformación Total Flecha 1. ....	99
<b>Imagen 24:</b> Estrés Equivalente Flecha 1.....	99
<b>Imagen 25:</b> Mallado de la Flecha 2.....	100
<b>Imagen 26:</b> Deformación Total Flecha 2. ....	103
<b>Imagen 27:</b> Estrés Equivalente Flecha 2.....	103

## Índice de Anexos.

<b>Anexo 1:</b> Constantes empíricas A, B y C de la ecuación 16, ancho de la cara F en pulgadas.....	110
<b>Anexo 2:</b> Coeficiente elástico.....	110
<b>Anexo 3:</b> Factor de ciclos de esfuerzos de resistencia a la picadura Zn. ....	110
<b>Anexo 4:</b> Factores geométricos j de engranes rectos.....	111
<b>Anexo 5:</b> Factor de ciclos de esfuerzo repetidamente aplicadas de resistencia a la flexión Yn.....	111
<b>Anexo 6:</b> Estimaciones de los Factores de Concentración de Esfuerzo. ....	112
<b>Anexo 7:</b> Resistencias Mínimas a la Tensión y a la Fluencia ASTM. ....	112
<b>Anexo 8:</b> Parámetros en el Factor Superficial de Marín.....	112
<b>Anexo 9:</b> Eje Redondo con Filete en el Hombro en Flexión.....	113
<b>Anexo 10:</b> Sensibilidad a la Muesca.....	113
<b>Anexo 11:</b> Eje Redondo con Filete en el Hombro en Torsión.....	114
<b>Anexo 12:</b> Sensibilidad a la Muesca de Materiales Sometidos a Torsión Inversa. .....	114
<b>Anexo 13:</b> Catalogo de Anillos de Retención.....	115
<b>Anexo 14:</b> Eje Redondo con Ranura de Fondo Plano en Flexión. ....	116
<b>Anexo 15:</b> Modelación de la Sección Transversal 1. ....	116
<b>Anexo 16:</b> Modelación de la Sección Transversal 2. ....	117
<b>Anexo 17:</b> Modelación de la Sección Transversal 3. ....	117
<b>Anexo 18:</b> Modelación de la Sección Transversal 4. ....	118
<b>Anexo 19:</b> Modelación de la Sección Transversal 5. ....	118
<b>Anexo 20:</b> Modelación de la Sección Transversal 6. ....	119
<b>Anexo 21:</b> Esquematización de las Secciones Transversales del Canal de Riego. .....	119
<b>Anexo 22:</b> Esquematización de las Secciones Transversales del Canal de Riego. .....	120
<b>Anexo 23:</b> Esquematización de las Secciones Transversales del Canal de Riego. .....	120
<b>Anexo 24:</b> Diagrama de Distribución de Velocidades – Sección 1.....	121
<b>Anexo 25:</b> Diagrama de Distribución de Velocidades – Sección 2.....	121

<b>Anexo 26:</b> Diagrama de Distribución de Velocidades – Sección 3.....	122
<b>Anexo 27:</b> Diagrama de Distribución de Velocidades – Sección 4.....	122
<b>Anexo 28:</b> Diagrama de Distribución de Velocidades – Sección 5.....	123
<b>Anexo 29:</b> Diagrama de Distribución de Velocidades – Sección 6.....	123
<b>Anexo 30:</b> Plano General del Ensamble .....	124
<b>Anexo 31:</b> Plano de la Carcasa. ....	125
<b>Anexo 32:</b> Plano de la Chaveta. ....	126
<b>Anexo 33:</b> Plano de la Flecha 2. ....	127
<b>Anexo 34:</b> Plano de la Polea.....	128
<b>Anexo 35:</b> Plano de la Flecha 1. ....	129
<b>Anexo 36:</b> Análisis de los Engranés N4 y N5 .....	149
<b>Anexo 37:</b> Análisis de la Flecha 3. ....	150
<b>Anexo 38:</b> Resistencia a la Fatiga por Contacto de Acero Completamente Endurecido. ....	151
<b>Anexo 39:</b> Numero de Esfuerzo de Flexión Permisible para Acero Completamente Endurecido. ....	151
<b>Anexo 40:</b> Nombre de los Símbolos Utilizados en el Cálculo de los Engranés. ....	153
<b>Anexo 41:</b> Nombre de los Símbolos Utilizados en el Cálculo de las Flechas....	154



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS DE LA**  
**INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN**  
**CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**TEMA:**

“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE POR MEDIO DE UNA CAJA MULTIPLICADORA PARA UNA PICO HIDROELÉCTRICA EN EL CANAL DE RIEGO AMBATO – HUACHI – PELILEO.”

Autor: Mullo Coque Pablo Sebastián.

Tutor: PhD. Manuel Ignacio Ayala Chauvin.

**Resumen Ejecutivo.**

En el presente trabajo se pretende optimizar el proceso de generación de una pico hidroeléctrica, mediante la implementación de una caja multiplicadora. La función de la caja multiplicadora es acondicionar la velocidad de rotación del rotor para adaptarla a los valores requeridos por el generador síncrono de imanes permanentes. El problema a solucionar es debido a que con las revoluciones normales (100 rpm) que ingresan a este generador produce baja potencia. El método aplicado se compone de las siguientes fases: caracterización de los recursos hidráulicos, en donde se determinó la potencia hidráulica explotable; el diseño conceptual y de detalle, en donde se determinaron las dimensiones y se generaron los planos de fabricación de la caja multiplicadora; y en la última fase se realizó la validación del diseño por medio de simulaciones virtuales en el Software de ANSYS del sistema que son comparables con los cálculos realizados. Con este sistema se logrará llegar a 625 revoluciones por minuto, con lo cual, se alcanzó la velocidad de rotación requerida por el generador de energía eléctrica de la pico hidroeléctrica. Además, se realizaron cálculos con 600 rpm con los dos tipos de generadores axial y radial logrando así obtener 1.6 kW y 2 kW respectivamente. Finalmente, la energía generada será destinada para la iluminación del canal y se beneficiará a la zona cercana al estudio, explotando de manera sostenible los recursos logrando así generar energía eléctrica renovable y de proximidad.

**Palabras Claves:** pico hidroeléctrica, multiplicador de revoluciones, energías renovables.

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS DE LA**  
**INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN**  
**CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**TOPIC:**

"OPTIMIZATION OF THE RENEWABLE ENERGY GENERATION PROCESSES THROUGH A MULTIPLIER BOX FOR A HYDROELECTRIC PEAK IN THE IRRIGATION CHANNEL AMBATO - HUACHI - PELILEO."

Author: Mullo Coque Pablo Sebastián.

Tutor: PhD. Manuel Ignacio Ayala Chauvin.

**Summary.**

The present work aims to optimize the generation process of a hydroelectric peak, through the implementation of a multiplier box. The function of the multiplier box is to condition the rotational speed of the rotor to adapt to the values required by the permanent magnet synchronous generator. The problem that needs to be solved is that, the generator receives the normal revolutions (100 rpm) however, this produces low power. The applied method is composed by the following phases: characterization of hydraulic resources, where the exploitable hydraulic power was determined; the conceptual and detailed design, where the dimensions were determined and the manufacturing plans for the multiplier box were generated; and in the last phase the design validation was carried out through virtual simulations in the ANSYS Software of the system that are compatible with the calculations performed. With this system, it will be possible to reach 625 revolutions per minute, which will allow for the rotational speed required by the electric power generator of the hydroelectric peak, to be reached. In addition, calculations were made with 600 rpm with the two types of axial and radial generators, thus achieving 1.6 kW and 2 kW respectively. Finally, the energy generated will be used to illuminate the channel and will benefit the area near the study, exploiting the resources in a sustainable way, thus generating renewable and local electricity.

**Keywords:** pico-hydro, revolution multiplier, renewable energy.

## **CAPITULO I**

### **Introducción.**

Frente al crecimiento de la economía y la industria a nivel mundial, el agotamiento de los combustibles fósiles es una realidad que se aumenta con el paso de los días. Según estadísticas del gobierno de los Estados Unidos el consumo de energía eléctrica, en 2003 fue de 14781 TW, en 2010 de 20000 TW y el pronóstico para el 2030 es de 30116 TW (Castillo García, 2017).

En Ecuador en el año 2017 se tiene un consumo de energía eléctrica de 19427.56 GW que corresponde a un consumo per capital de 1157.99 KW/habitantes («Consumo Anual Per Cápita – ARCONEL», 2017).

Sin duda alguna es necesario un cambio de matriz energética y comenzar con la implementación de sistemas de energía renovables amigables con el ambiente, que, por ende, nos ayudara con el manejo sostenibles del planeta tierra. Por esta razón, en la presente investigación se pretende mejorar el sistema de generación renovable de una pico hidroeléctrica en el canal de riego Ambato – Huachi – Pelileo. Este objetivo se logrará acondicionando las revoluciones a través del diseño y modelamiento de una caja multiplicadora para que en conjunto con la turbina y generador alcanzar 2 KW.

La característica principal de esta caja multiplicadora es acondicionar las revoluciones de salida, para así, lograr mejorar los parámetros de expulsión del generador.

Para analizar este problema, es necesario realizar un modelamiento matemático y un diseño conceptual que nos permita obtener la geometría, materiales y dimensiones que cumplan las condiciones de resistencia.

Además, esta investigación tiene como objetivo impulsar el uso de las energías renovables de proximidad. Para ello se cuenta con la guía y asesoramiento de la Universidad Tecnológica Indoamérica, del centro de investigación y la colaboración de la Universidad Técnica de Ambato.

Con los datos hidráulicos del canal de riego y con los parámetros técnicos de la turbina michell – banki; se procede a realizar una investigación de tipo técnica, con la utilización de recursos bibliográficos, como de recursos tecnológicos.

### **Antecedentes.**

La energía eléctrica con el paso de los años se ha convertido en algo fundamental para el ser humano y actualmente es la energía más sofisticada y que permite su transporte a lugares lejanos de forma eficaz y de costo mínimo (Schallenberg et al., 2008).

El sector energético es uno de los pilares fundamentales a nivel mundial, ya que es esencial para todas las actividades productivas y de consumo para el hogar (Vázquez, 2014), es por esto que con el agotamiento de los combustibles fósiles crea la necesidad del cambio a energías limpias que ayuden a contrarrestar el cambio climático que se vive hoy en día.

El sistema de energía renovable que se desea implementar es de bajas revoluciones es ahí donde nace la necesidad de incrementar las mismas mediante una caja multiplicadora que en conjunto con la mini turbina y el generador puedan suministrar la suficiente energía eléctrica para iluminar el canal de riego.

Por otro lado se cuenta con investigaciones de diseño de cajas multiplicadoras para aerogeneradores que nos servirá como guía en la cual se realiza una caja multiplicadora para un generador de 30 kW de capacidad, con el fin de aprovechar al máximo las rpm generadas por las palas de este conjunto, es así donde nace el diseño conceptual de esta caja que se desarrollara con engranes helicoidales (tipo planetarios), ya que el torque y momento que genera el sistema es alto, logrando así satisfacer las necesidades de diseño requeridas en esta caja (Contreras et al. 2018); al igual que diseño de caja multiplicadora para turbinas eólicas, en donde se detalla los dos tipos de cajas que se pueden utilizar en este tipo de conjuntos, así como también lo más relevante que es tipo de desgastes que pueden sufrir estos con el paso del tiempo de funcionamiento (Laureano Moya Rodríguez y Chagoyén

Méndez, 2012), por lo tanto dotando de información complementaria para el concepto de diseño de nuestra caja multiplicadora.

Para nuestra idea de diseño se tomó en consideración el diseño y simulación de una caja reductora de velocidad, que en teoría el funcionamiento contrario permite la multiplicación de la velocidad tangencial, es ahí donde nos ayuda esta investigación en donde se caracteriza paso a paso los factores y puntos de diseño que se debe tener en cuenta complementando así ideas y cuestiones a tener en cuenta, como el cambio de esfuerzos por el material escogido en los engranes (Esteban García, 2003).

### **Justificación.**

El sector energético a nivel mundial tiene una importancia trascendental y es fundamental para la economía, industria y vida diaria; es por esto que para el Ecuador es un tema de vital, ya que es necesario el cambio de matriz energética que ayude a minimizar el cambio climático que se ha producido en estos tiempos por el uso o quema de combustibles fósiles a nivel mundial y una de las soluciones es implementar sistemas de energía renovables.

El Ecuador un país mega diverso posee todos los recursos necesarios para poder implementar estos tipos de sistemas que benefician el cambio de la matriz energética del país, por lo tanto es aquí donde nace la **importancia** para este proyecto de investigación, debido a que se tiene los recursos hídricos, en este caso de un canal de riego con un caudal de  $0.9 \text{ m}^3/\text{s}$ , una mini – turbina Michell – Banki que genera 100 rpm y que en conjunto con el generador y la caja multiplicadora sea capaz de producir energía.

Con el avance de la tecnología y el agotamiento de las energías no renovables este proyecto tiene un **impacto** de gran importancia para seguir desarrollando investigaciones de mejoras y así lograr producir energía suficiente para el diario vivir.

Esta tesis tiene como objetivo principal diseñar un mecanismo de multiplicación de revoluciones para una pico hidroeléctrica de 2 KW, con el fin de reducir la

contaminación ambiental generada por energías no renovables y ayudar a los sectores estratégicos a obtener energía eléctrica.

Esto **beneficiara** al país con generación de energía limpia, al igual que a las personas que tengan cerca un afluente de agua capaz de generar parámetros similares que necesita este sistema, para lograr su funcionamiento adecuado y dejar a un lado a los generadores a combustión.

La caja multiplicadora es **factible** gracias a las investigaciones anteriores, caracterizando factores importantes para el desarrollo de este, y gracias a la ayuda del centro de investigaciones de la Universidad Tecnológica Indoamérica.

### **Objetivos.**

#### **Objetivo general:**

- Optimizar el proceso de generación de energía renovable por medio de una caja multiplicadora.

#### **Objetivos Específicos:**

- Caracterizar el recurso hidráulico para el proceso de generación de energía eléctrica.
- Diseñar un mecanismo de multiplicación para el sistema de generación de energía.
- Evaluar por medio de simulación la caja multiplicadora diseñada para el sistema de generación.

## **CAPITULO II**

### **INGENIERÍA DEL PROYECTO**

#### **Diagnóstico Actual:**

En la provincia de Tungurahua existe un canal de riego localizado en el sector de chiquihurco, denominado Ambato – Huachi – Pelileo el cual se analizó la posibilidad de instalar un sistema de energía renovable, para esto se realizó un estudio previo del recurso hidráulico del canal.

La mini – Turbina Michell – Banki se diseñó teniendo en cuenta los datos obtenidos del canal de riego, por lo tanto, se tiene parámetros de funcionamiento explicados en la Tabla 1.

El generador síncrono se realizó dos modelos y para obtener mayor eficiencia se decidió diseñar un sistema de multiplicación, por ende, este sistema tendrá mayor eficiencia en su funcionamiento.

La energía eléctrica producida por este sistema se podrá utilizar para iluminar el canal de riego o para diferentes tipos de sistemas eléctricos, por lo cual, se conseguirá ayudar a estos sectores vulnerables del país.

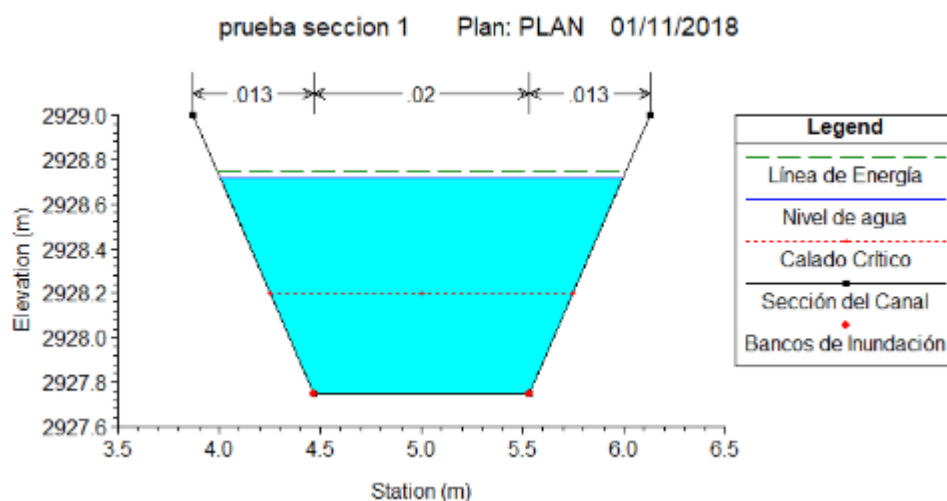
El canal de riego nos arrojado los siguientes parámetros para los diferentes óvalos:

**Tabla 1.** Características de la Modelación de las Secciones Transversales del canal de riego

Secciones 1-6						
Características Hidráulicas	Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 4	Sección 5	Sección 6
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	1,08	1,29	1,35	1,1	1,25	1,13
Altura del calado (m)	0,97	1,06	0,96	0,89	0,83	0,76
Coefficiente Manning Izquierda	0,013	0,015	0,013	0,013	0,02	0,025
Coefficiente Manning Central	0,02	0,021	0,017	0,03	0,035	0,038
Coefficiente Manning Derecho	0,013	0,015	0,013	0,013	0,02	0,025
Nivel de Agua (m)	0,96	1,06	0,98	0,89	0,84	0,76
Calado Crítico (m)	0,45	0,48	0,48	0,46	0,47	0,45
Línea de Energía (m)	1	1,09	1,02	0,93	0,89	0,82
Velocidad Total (m/s)	0,74	0,72	0,82	0,88	0,98	1
Número de Froude	0,28	0,26	0,31	0,32	0,38	0,41

Fuente: (JHOSELIN BUÑAY, 2018)

En anexo 15 – 20 se muestran las modelaciones de las secciones del canal



**Imagen 1:** Características del Canal de Riego.

Fuente: (JHOSELIN BUÑAY, 2018)

En la imagen 1 se muestra las líneas del nivel de agua, energía, con sus medidas respectivas; estas cambian según la sección del canal (ver anexo 15 – 20).



Este sistema de energías renovables utilizara una mini turbina previamente diseñada en investigaciones previas, de esta manera nos arroja los siguientes parámetros:

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO					
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA					
FICHA DE:	MÁQUINA	EQUIPO	X	SISTEMA	
		INGENIERÍA MECÁNICA			
		<div></div>			
CARACTERÍSTICAS GENERALES					
DIMENSIONES	916,5x726,9x237 mm				
PESO	33,35 kg				
REVOLUCIONES	110 rpm				
TORQUE	26 Nm				
POTENCIA	22,88 W				
DIÁMETRO DEL EJE	0.019 m				
CAUDAL	0.0936 m <sup>3</sup> /s				

*Imagen 2: Ficha Técnica de la mini – turbina Michell Banki.*

*Fuente:* (Lenin Ibañez, 2019)

En la imagen 2, se muestra las características de la mini turbina Michell – Banki previamente diseñada en estudios anteriores.

Existen dos tipos de generadores que se pueden utilizar, ya que se están realizando la investigación de cada uno de ellos.

### **Área de estudio.**

El área de estudio de la propuesta metodológica es:

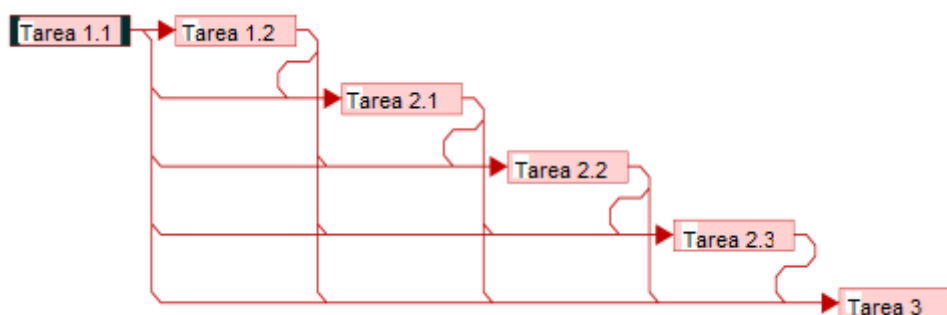
<b>Dominio:</b>	Diseño y Caracterización.
<b>Línea de investigación:</b>	Diseño, realización y caracterización de sistemas inteligentes, automáticos, semiautomáticos o manuales.
<b>Campo:</b>	Ingeniería Industrial
<b>Área:</b>	Gestión de Proyectos
<b>Aspectos:</b>	Diseño y optimización de sistemas de energías renovables.
<b>Descripción:</b>	Los sistemas que se toman en cuenta para esta línea de investigación incluyen todo sistema mecánico, electromecánico, secuencial, semiautomático, automático o inteligente que tenga componentes mecánicos, electrónicos o informáticos (al menos de uno de los tipos). Así, se consideran sistemas físicos o virtuales (software) para cualquier plataforma o estructura. El enfoque global de esta línea consiste en tomar en cuenta las necesidades reales identificadas en la sociedad, con miras a proponer soluciones innovadoras con un alto componente tecnológico y adaptado a la realidad del campo de utilización. Con este fin, la línea incluye todas las metodologías y campos de investigación necesarios para generar sistemas inteligentes o interactivos innovadores.
<b>Período de análisis:</b>	Enero del 2020 – Junio del 2020

### Modelo operativo:

**Tabla 2.** Actividades para Realizarse en la Investigación.

Número de tarea	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	Predecesoras
1.1	Caracterización de los parámetros del canal	20 días	vie 22/11/19	jue 19/12/19	
1.2	Caracterización de los parámetros de la mini turbina	18 días	vie 20/12/19	mar 14/1/20	1
2.1	Identificar los sistemas de transmisión	26 días	mié 15/1/20	mié 19/2/20	1;2
2.2	Desarrollo de los cálculos para la caja multiplicadora	20 días	jue 20/2/20	mié 18/3/20	1;2;3
2.3	Diseño de la caja multiplicadora	35 días	jue 19/3/20	mié 6/5/20	1;2;3;4
3	Simulación de la caja multiplicadora	28 días	jue 7/5/20	lun 15/6/20	1;2;3;4;5

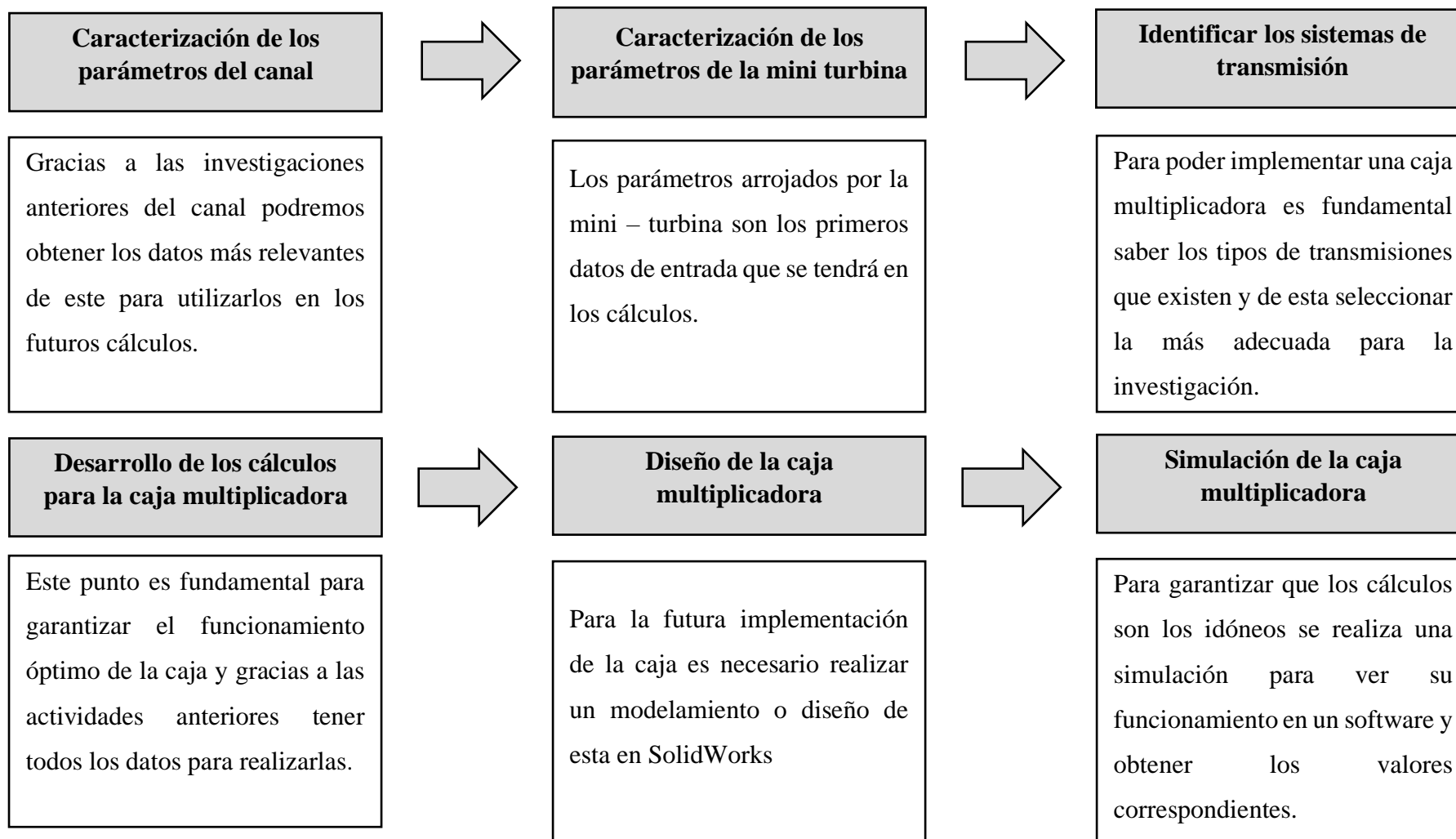
*Fuente:* (Mullo P, 2020)



**Gráfico 1:** Diagrama de Red de las Actividades Expuestas

*Fuente:* (Mullo P, 2020)

En el gráfico 1, se muestra un diagrama de red de las actividades a realizar en esta investigación.



*Gráfico 2: Actividades a Realizarse en el Modelo Operativo*

*Fuente: (Mullo P, 2020)*

En el gráfico 2, se caracteriza cada uno de los pasos realizados para la elaboración de esta investigación.

## **Desarrollo del modelo operativo:**

### **1. Caracterización de los parámetros del canal.**

Para poder caracterizar los parámetros del canal de riego se revisará la investigación previamente realizada del estudio del canal, por tanto, identificaremos los principales óvalos en los cuales se obtuvo datos como caudal, velocidad del agua, dimensiones del canal, etc.

Con estos datos obtenidos de la investigación anterior, nos arrojará resultados para poder seguir desarrollando las siguientes actividades planificadas en este proyecto de investigación.

### **2. Caracterización de los parámetros de la mini turbina**

Los parámetros de la mini – turbina, se caracterizarán realizando una revisión de la investigación previamente elaborada, consecuentemente se logrará obtener ya datos relevantes que serán utilizados en los cálculos futuros de la caja multiplicadora.

### **3. Caracterización de los parámetros de los generadores.**

La caracterización de los generadores se realizará de los dos modelos existentes de generadores para esta investigación, para después interpretar cuál de estos sería el más adecuado en el funcionamiento óptimo de este sistema.

### **4. Identificar los sistemas de transmisión.**

Una vez teniendo los datos necesarios de entrada del canal como de la mini – turbina, se realizará una investigación bibliográfica de los sistemas de transmisiones existentes, lo que significa que se logrará identificar cuál de estos es el más idóneo para el funcionamiento correcto del sistema de energía renovable.

### **5. Desarrollo de los cálculos para la caja multiplicadora**

Para proceder con los cálculos se revisará los parámetros obtenidos de las investigaciones pasadas, con esto se comenzará con el desarrollo de los cálculos de la caja multiplicadora, teniendo en cuenta coeficientes y materiales que sean próximos a la realidad de funcionamiento de este sistema de multiplicación.

### **6. Diseño de la caja multiplicadora**

En el diseño de la caja multiplicadora se tomará en cuenta los cálculos obtenidos. En el programa de SolidWorks se ingresará los engranajes de Toolbox, y proceder a realizar el ensamble virtual de cada uno de sus componentes en el programa antes mencionado, es necesario aclarar que para los cálculos se utilizaron medidas inglesas, ya que con estas medidas se trabajó los cálculos.

## **7. Simulación de la caja multiplicadora**

Para esta simulación será importante que el diseño se realice correctamente y poder simular con los factores reales, para saber cuál va a hacer el comportamiento de la caja multiplicadora y si tal vez es necesario generar algún cambio en los cálculos o en el diseño, por lo tanto, de esta manera obtener 600 rpm de salida, y así dar cumpliendo con los datos que necesita el generador síncrono de imanes permanentes, con el fin de implementar el sistema de energía renovable planeado en este canal.

Para la primera simulación de movimiento se utilizará Estudio de movimiento de SolidWorks, para después simular la transmisión y obtener resultados en el programa Gears Simulator, posteriormente se realizará un análisis de mallado, esfuerzos estáticos y dinámicos en el programa de Ansys.

## CAPÍTULO III

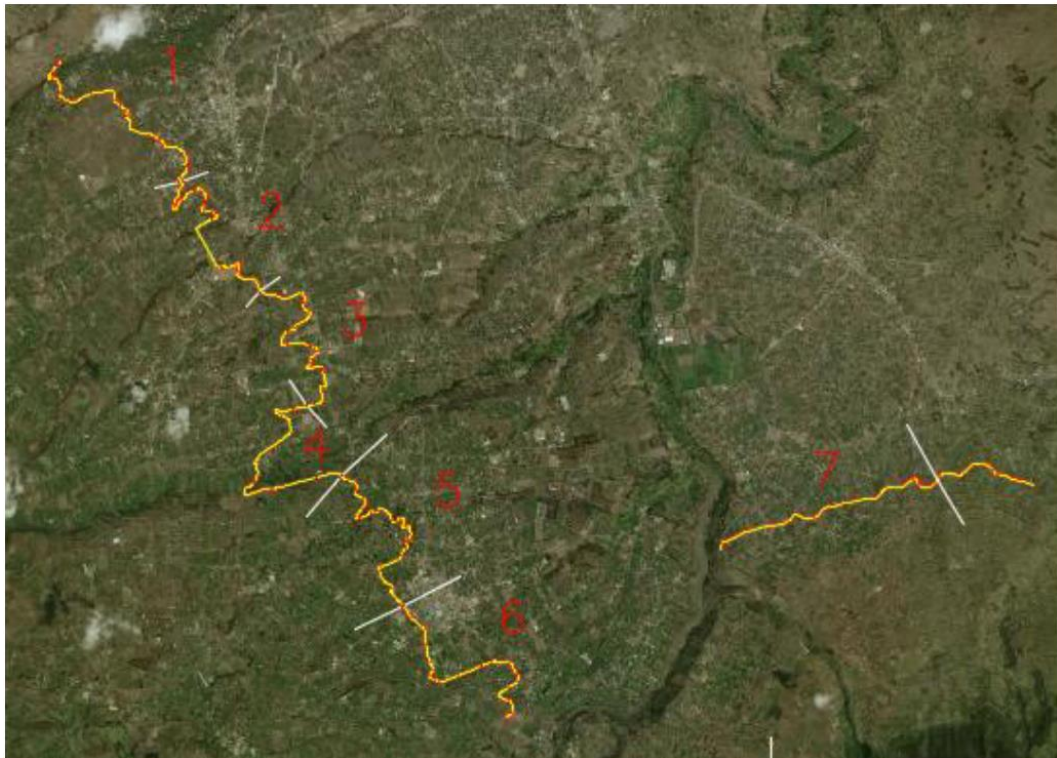
### PROPUESTA Y RESULTADOS ESPERADOS

#### **El sistema de energía renovable:**

Este sistema cuenta con un estudio tanto del canal de riego como del diseño y construcción de la mini – turbina, al igual que del generador; por lo que es necesario caracterizar cada uno de los parámetros más relevantes para el funcionamiento de este sistema que se describe a continuación:

#### **Canal de riego:**

El canal de riego recorre Ambato, Cevallos y Pelileo con una extensión total de 27 km, los cuales se dividieron en 7 secciones para el estudio realizado. Este canal es utilizado para abastecer de agua de riego por los sectores en los que circula (JHOSELIN BUÑAY, 2018).



*Imagen 3: Secciones del canal de riego.  
Fuente: (JHOSELIN BUÑAY, 2018)*

En la imagen 3, se muestra la extensión del canal que es de 27 km, y que está dividida en 7 secciones para este estudio.

El canal de riego tiene una forma trapezoidal, los tramos analizados están desde la abscisa 5+400 al 8+100, cuenta con una pendiente del tramo de 0.0017 (JHOSELIN BUÑAY, 2018), ver los anexos 21 – 23.

Para continuar con el estudio se realizó la medición de la velocidad media en las secciones antes expuestas, esta medición se realizó con un molinete el cual es un transistor de líquidos serie DMM-4000/PFT. La toma de datos se realizó aproximadamente a cada 500 metros.

Con los datos obtenidos se pudo obtener las curvas de distribución de velocidad, como se muestra en los anexos 15 – 20.

Como resultado se puede decir que la sección 3 en el área verde se alcanza una velocidad desde 1.76 hasta 1.98 m/s, en el cual se podría instalar este sistema de energía renovable.

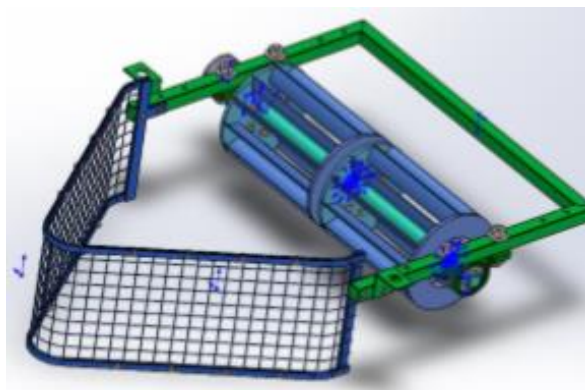
Se evidencia que en la sección 3 se tiene el mayor caudal de agua de 1.35 m<sup>3</sup>/s.

Al finalizar esta investigación del canal de riego se tiene valores promedios de la velocidad de 0.85 m/s y un caudal de 1.20 m<sup>3</sup>/s. Con los datos expuesto se puede continuar con la investigación para lo que es la mini turbina.

#### **Caracterización de la Mini turbina Michell – Banki:**

Para el estudio de esta mini turbina se hizo un análisis de las existentes y cuáles de estas serían apropiadas para este canal, llegando así a escoger una mini turbina Michell – Banki; al igual que se analizaron tres modelos posibles para el estudio, diseño y fabricación llegando así a tener el siguiente modelo.





**Imagen 4:** Modelo de la mini turbina Michell – Banki

**Fuente:** (Lenin Ibañez, 2019).

En la imagen 4, se muestra el diseño realizado en SolidWorks de la mini turbina que se utilizará en el sistema de energía renovable.

Se realizó su respectiva modelación matemática de sus componentes para proceder con el diseño, ensamble y fabricación de la mini turbina. Así se pudo obtener los siguientes resultados.

**Tabla 3:** Características de la Mini Turbina Michell – Banki.

**Características de la Mini Turbina Michell – Banki.**

<b>Dimensiones</b>	916.5x726.9x237 mm
<b>Peso</b>	33.35 kg
<b>Revoluciones</b>	110 rpm
<b>Torque</b>	26 N*m
<b>Potencia</b>	31.4 W
<b>Diámetro del Eje</b>	0.019 m
<b>Caudal</b>	0.0936m <sup>3</sup> /s

**Fuente:** (Lenin Ibañez, 2019)

Cabe recalcar que para los cálculos realizados para la caja multiplicadora se utilizó 100 rpm siendo esta un valor constante en las mediciones de campo.

### Generador síncrono de imanes permanentes:

Como se describió anteriormente este sistema cuenta con 2 tipos y para mejorar su funcionalidad se decidió incrementar una caja multiplicadora, para así lograr obtener mayor potencia eléctrica.

En si este es un sistema de energía renovable capaz de funcionar a bajos caudales; con este estudio y otros en el futuro se desea que pueda ser un sistema portable capaz de funcionar en cualquier afluente de agua, sin necesidad de alterar el mismo.

Generador Síncrono de Imanes Permanentes de Flujo Axial.

**Tabla 4.** *Datos del Generador Síncrono de Imanes Permanentes de Flujo Axial.*

Parámetro	Símbolo	Valor
Potencia nominal	$P_o$	1.6[Kw]
Velocidad nominal	N	600[rpm]
Pares de polos	P	12
Bobinas de estator numérico	$n_{Bobina}$	9
Diámetro exterior	$D_{el}$	215[mm]
Diámetro interior	$D_i$	35[mm]
Distancia de la brecha de aire	G	2[m]
Giros de bobina por fase	$T_{Ph}$	241
Giros de bobina por bobina	$T_{CPh}$	81
Densidad de flujo de espacio de aire	$B_{Ag}$	0.6[T]

*Fuente:* (Mullo P, 2020).

Generador Síncrono de Imanes Permanentes de Flujo Radial.

**Tabla 5.** *Datos del Generador Síncrono de Imanes Permanentes del Flujo Radial.*

Parámetro	Símbolo	Valor
Potencia nominal	$P_o$	2 [Kw]

Velocidad nominal	N	600[rpm]
Pares de polos	P	12
Bobinas de estator numérico	n <sub>Bobina</sub>	18
Diámetro exterior del rotor	D <sub>el</sub>	138.8[mm]
Diámetro exterior del estator	D <sub>i</sub>	222[mm]
Diámetro interior del estator	G	140[mm]

*Fuente: (Mullo P, 2020)*

### **Sistemas de transmisión de potencia.**

En términos técnicos tenemos que un reductor es un multiplicador de forma inversa y de esta manera se puede clasificar como opciones para diseño de un multiplicador de engranes como:

1. Engranes rectos: este tipo de engranes tiene una carga nominal de 3.50:1, los engranes rectos producen únicamente cargas radiales, por lo que nos ayuda a simplificar la selección de los rodamientos, esto genera mayor precisión en rodamientos y sellos. La producción de este tipo de engranes es más económica. Generar facilidad para acoplar con motor o eje de impulsión (Robert L. Mott, 2004).
2. Engranes helicoidales: este tipo de engranes son prácticas al igual que los engranes rectos. Similar a los engranes rectos para lineal con los ejes. En cuanto al tamaño podría ser menos, sin embrago este crearía cargas axiales de empuje, donde se debería acomodar en los rodamientos. Su costo es mayor (Robert L. Mott, 2004).
3. Engranes cónicos: este tipo de engranes producen un cambio en la dirección en ángulo recto. Son más difíciles de diseñar y armar (Robert L. Mott, 2004).
4. Transmisión de tornillo sinfín y corona: Al igual que los engranes cónicos este produce un cambio de dirección en ángulo recto. El calor generado puede causar problemas, con 25 HP y menora la eficiencia (Robert L. Mott, 2004).

**Tabla 6:** Comparación entre los tipos de engranes utilizados en las transmisiones.

Parámetros.	Engranes Rectos	Engranes Helicoidales.	Engranes Cónicos	Transmisión de Tornillo sin fin y corona.
<b>Cargas.</b>	Radiales	Axiales y Radiales	Axial, Radial y Normal	Axial, Radial y Normal
<b>Costo de fabricación.</b>	Medio	Alto	Alto	Alto
<b>Costo de compra por catálogo.</b>	Medio	Alto	Alto	Alto
<b>Dificultad en su resolución matemática.</b>	Media	Media	Alta	Alta
<b>Facilidad de acople con el eje de impulsión</b>	Fácil	Fácil	Medio	Medio

Fuente: (Robert L. Mott, 2004)

### Presentación de la propuesta:

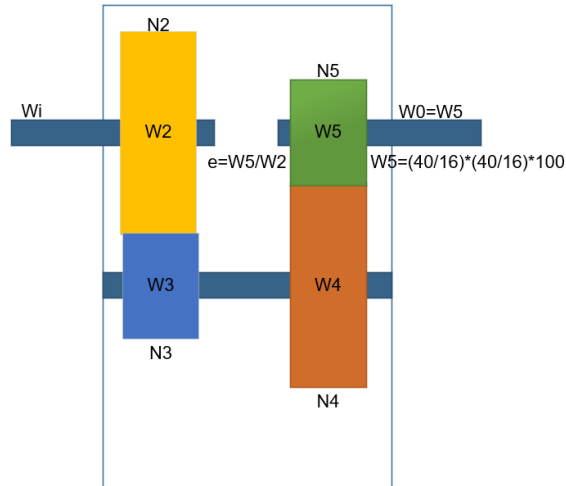
#### Diseño matemático de un mecanismo de multiplicación.

Para este sistema al observar la tabla 6 se decidió realizarlo con engranes rectos, ya que son menos costosos, son eficientes, tienen una relación razonable y se pueden alinear con el eje de impulsión o motor.

Desarrollo numérico:

Para este desarrollo se tomó en cuenta las fórmulas ya descritas en el diseño en ingeniería mecánica Shigley (Douglas y Monel, 2008).

Para el cálculo de los engranes los nombres de los símbolos utilizados se encuentra en el anexo 40.



**Gráfico 3:** Diagrama Ilustrativo para el Análisis de los Engranes.  
**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En el gráfico 3, se muestra los componentes de la caja multiplicador, también su simbología con la que se representara en toda esta investigación.

$$w_i = 100 \text{ rpm}$$

$$620 \text{ rpm} < w_0 < 650 \text{ rpm} \cong 635 \text{ rpm}$$

Valor del tren de engranes

$$e = \frac{w_5}{w_2} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$e = \frac{635}{100} = 6.35$$

$$e = \frac{N_2 N_4}{N_3 N_5} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\frac{N_2}{N_3} = \frac{N_4}{N_5} = \sqrt{6.35}$$

$$\frac{N_2}{N_3} = \frac{N_4}{N_5} = 2.5199$$

$$N_3 = N_5 = 16 \text{ dientes}$$

$$\frac{N_2}{N_3} = 2.5199$$

$$\frac{N_2}{16} = 2.5199$$

$$N_2 = 40.32$$

$$N_2 = N_4 = 40 \text{ dientes}$$

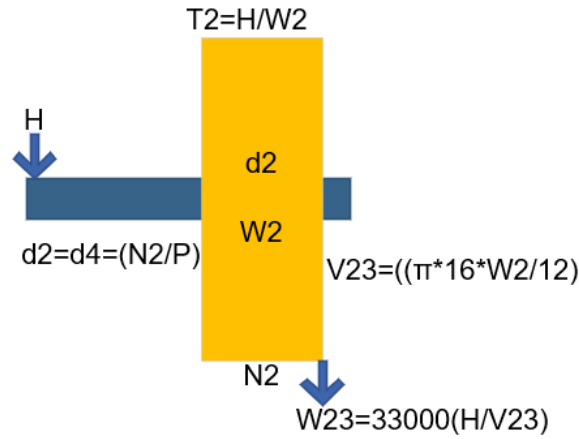
$$w_5 = \frac{40}{16} * \frac{40}{16} * 100 \text{ rpm}$$

$$w_5 = 625 \text{ rpm aceptable}$$

$$e = \frac{40}{16} * \frac{40}{16} = 6.25$$

$$w_3 = w_4 = \frac{40}{16} * 100 = 250 \text{ rpm}$$

Pares de torsión en cada segmento.



**Gráfico 4:** Diagrama Ilustrativo para el Análisis de los Engranes.  
Fuente: (Mullo P, 2020)

En el gráfico 4, se muestra el engrane N2, sus variables y valores que genera este.

$$H = T_2 w_2 = T_5 w_5$$

Ecuación 3

$$T_2 = \frac{H}{w_2}$$

$$T_2 = \frac{31.4 \text{ w}}{100 \text{ rpm}} * \left( \frac{0.73756 \text{ lbf} * \text{ft/s}}{1 \text{ w}} \right) * \left( \frac{1 \text{ rev}}{2\pi \text{ rad}} \right) * \left( \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right)$$

$$T_2 = 221.1558 \text{ lbf} * \text{ft}$$

$$T_3 = T_2 \frac{w_2}{w_3}$$

$$T_3 = 221.1558 \text{ lbf} * \text{ft} \frac{100 \text{ rpm}}{250 \text{ rpm}}$$

$$T_3 = 88.4623 \text{ lbf} * \text{ft}$$

$$T_5 = T_2 \frac{w_2}{w_5}$$

$$T_5 = 221.1558 \text{ lbf} * \text{ft} \frac{100 \text{ rpm}}{625 \text{ rpm}}$$

$$T_5 = 35.384 \text{ lbf} * ft$$

Paso diametral.

$$P_{min} = \frac{N_3 + \frac{N_2}{2} + \frac{N_5}{2} + 2}{\gamma - \text{holguras} - \text{espesores de la pared}}$$

Ecuación 4

$$P_{min} = \frac{16 + \frac{40}{2} + \frac{16}{2} + 2}{22 - 1.5}$$

$$P_{min} = 2.2439 \text{ dientes/in}$$

$$P = 2.25 \text{ dientes/in} \cong 2.5 \text{ dientes/in}$$

$$d_2 = d_4 = \frac{N_2}{P} = \frac{40}{2.5} = 16 \text{ in}$$

$$d_3 = d_5 = \frac{N_3}{P} = \frac{16}{2.5} = 6.4 \text{ in}$$

Velocidad de la línea de paso.

$$V_{23} = \frac{\pi * d_2 * w_2}{12}$$

Ecuación 5

$$V_{23} = \frac{\pi * 16 \text{ in} * 100 \text{ rpm}}{12}$$

$$V_{23} = 418.879 \text{ ft/min}$$

$$V_{45} = \frac{\pi * d_5 * w_5}{12}$$

$$V_{45} = \frac{\pi * 6.4 \text{ in} * 625 \text{ rpm}}{12}$$

$$V_{45} = 1047.1975 \text{ ft/min}$$

Cargas Transmitidas

$$W_{23}^t = 33000 \frac{H}{V_{23}}$$

Ecuación 6

$$31.4 * \left( \frac{0.00134 \text{ Hp}}{1w} \right) = 0.0421$$

$$W_{23}^t = 33000 \frac{0.0421 \text{ Hp}}{418.879 \text{ ft/min}}$$

$$W_{23}^t = 3.3167 \text{ lbf}$$

$$W_{45}^t = 33000 \frac{H}{V_{45}}$$

$$W_{45}^t = 33000 \frac{0.0421 \text{ Hp}}{1047.1975 \text{ ft/min}}$$

$$W_{45}^t = 1.3266 \text{ lbf}$$

Factor Geométrico.

$$I = \frac{\cos \Phi_t \sin \Phi_t}{2 m_N} * \frac{m_G}{m_G + 1}$$

Ecuación 7

$$I = \frac{\cos 20 \sin 20}{2 * 1} * \frac{1}{1 + 1}$$

$$I = 0.08034$$

Factor Dinámico Kv.

$$K_v = \left( \frac{A + \sqrt{V_{23}}}{A} \right)^B$$

Ecuación 8

$$Q_v = 7$$

$$A = 50 + 56 * (1 - B)$$

Ecuación 9

$$B = 0.25 * (12 - Q_v)^{2/3}$$

Ecuación 10

$$B = 0.25 * (12 - 0.7)^{2/3}$$

$$B = 0.731$$

$$A = 50 + 56 * (1 - 0.731)$$

$$A = 65.064$$

$$K_v = \left( \frac{65.064 + \sqrt{418.789 \text{ ft/min}}}{65.064} \right)^{0.731}$$

$$K_v = 1.2213 \text{ ft/min}$$

Ancho de cara.

$$F = 3 - 5 \left( \frac{\pi}{P} \right)$$

Ecuación 11

$$F = 3 \left( \frac{\pi}{2.5 \text{ in}} \right)$$

$$F = 3.76 \cong 3$$

Factor de la distribución de la carga.

$$K_m = C_{mf} = 1 + C_{mc} (C_{pf} * C_{pm} + C_{ma} * C_e)$$

Ecuación 12

$$C_{pf} = \frac{F}{10 * d} - 0.0375 + 0.0125 * F \quad 1 < F \leq 17 \text{ in}$$

Ecuación 13



$$C_{pf} = \frac{3 \text{ in}}{10 * 16 \text{ in}} - 0.0375 + 0.0125 * 3 \text{ in}$$

$$C_{pf} = 0.01875$$

$$C_{mc} = 1 \text{ para dientes sin coronar} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$C_{pm} = 1 \text{ para piñon montado separado} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$C_{ma} = A + B * F + (C * F)^2 \quad \text{Ecuación 16}$$

Para los valores de A, B, C, se escogió unidades comerciales cerradas; estos valores se consideraron para todos los engranes. Revisar anexo 1.

$$C_{ma} = 0.127 + 0.0158 * 3 + (-0.930 * 10^{-4} * 3)^2$$

$$C_{ma} = 0.1744$$

$$C_e = 1 \text{ para todas las otras condiciones.} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$K_m = C_{mf} = 1 + 1(0.01875 * 1 + 0.1744 * 1)$$

$$K_m = C_{mf} = 1.1931$$

Este valor se utilizará para el engrane 2 y 4 ya que son del mismo diámetro.

Para el valor de Cp se escogió acero obteniendo un valor de 2300 para las diferentes ecuaciones restantes en todos los engranes, ya que este valor representa el coeficiente elástico del acero. Revisar anexo 2.

$$K_0 = K_s = C_f = 1$$

$$\sigma_c = C_p * \sqrt{W * K_0 * K_v * K_s * \frac{K_m}{d_p * F} * \frac{C_f}{I}} \quad \text{Ecuación 18}$$

$$\sigma_c = 2300 * \sqrt{3.3167 * 1 * 1.2213 * 1 * \frac{1.1931}{16 * 3} * \frac{1}{0.08034}}$$

$$\sigma_c = 2574.8029 \text{ PSI}$$

Número de ciclos para la vida especificada.

$$L_2 = (12000 \text{ h}) * \left(\frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}}\right) * \left(\frac{100 \text{ rev}}{\text{min}}\right)$$

$$L_2 = 7.2 * 10^6 \text{ rev}$$

Desgaste del engrane 2.

Al analizar el anexo 3 se evidencia que el valor de Zn es igual a 1.05.

$$\sigma_{c perm} = \frac{S_C}{S_H} * \frac{Z_n C_H}{K_T K_R} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$K_R = K_T = C_H = 1$$

$$\sigma_{c perm} = \frac{S_C}{S_H} * \frac{Z_n C_H}{K_T K_R}$$

$$\sigma_{c perm} = \frac{S_C * Z_n}{S_H}$$

$$S_C = \frac{S_H * \sigma_{c perm}}{Z_N}$$

$$S_C = \frac{2574.8029 \text{ PSI} * 2}{1.05}$$

$$S_C = 4904.3865 \text{ PSI} \cong \text{Endurecido completamente grado 1 Revisar anexo 38 – 39.}$$

$$S_C = 322 \text{ HB} + 29100 \text{ PSI} \quad \text{Ecuación 20}$$

$$S_C = 93500 \text{ PSI}$$

$$n_C = \frac{\sigma_{c perm}}{\sigma_c} = \frac{S_C * Z_N}{\sigma_c} \quad \text{Ecuación 21}$$

$$n_C = \frac{93500 \text{ PSI} * 1.05}{2574.8029 \text{ PSI}}$$

$$n_C = 38.1291$$

Flexión del engrane 2.

Al ser un engrane de 40 dientes se tiene un valor de  $J = 0.38$ . Revisar anexo 4.

$$K_B = 1$$

$$K_0 = K_s = C_f = 1$$

$$\sigma = W * K_v * K_0 * K_s * \frac{P_d}{F} * \frac{K_m * K_B}{J} \quad \text{Ecuación 22}$$

$$\sigma = 3.3167 * 1 * 1.2213 * 1 * \frac{2.5}{3} * \frac{1.1931 * 1}{0.38}$$

$$\sigma = 10.5984 \text{ PSI}$$

Por el valor de L2 se puede identificar que YN equivale a 1.2. Revisar anexo 5.

$$S_t = 77.3 \text{ HB} + 12800 \text{ PSI} \quad \text{Ecuación 23}$$

$$S_t = 28260 \text{ PSI}$$

$$\sigma_{perm} = \frac{S_t}{S_F} * \frac{Y_N}{K_T * K_R} \quad \text{Ecuación 24}$$

$$\sigma_{perm} = S_t * Y_N$$

$$\sigma_{perm} = 28260 \text{ PSI} * 1.2$$

$$\sigma_{perm} = 33912 \text{ PSI}$$

$$n = \frac{\sigma_{c \text{ perm}}}{\sigma_c}$$

$$n = \frac{33912 \text{ PSI}}{10.5984 \text{ PSI}}$$

$$n = 3199.7282$$

Desgaste engrane 3.

Al analizar el anexo 4, con el número de dientes del engrane que es 16 se obtiene un valor de  $J = 0.27$

$$K_B = 1$$

El procedimiento para este engrane es el mismo que el anterior únicamente se calcula el valor de  $C_{pf}$  y  $K_m$  ya que este diámetro es diferente.

$$C_{pf} = \frac{3 \text{ in}}{10 * 6.4 \text{ in}} - 0.0375 + 0.0125 * 3 \text{ in}$$

$$C_{pf} = 0.4687$$

$$K_m = C_{mf} = 1 + 1(0.4687 * 1 + 0.1744 * 1)$$

$$K_m = C_{mf} = 1.6431$$

Este valor se utilizará para el engrane 3 y 5.

Número de ciclos para la vida especificada.

$$L_3 = (12000 \text{ h}) * \left(\frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}}\right) * \left(\frac{250 \text{ rev}}{\text{min}}\right)$$

$$L_3 = 1.8 * 10^8 \text{ rev}$$

Por el anexo 3 se obtiene un valor de  $Z_N = 0.9$

Por el anexo 5 se obtiene un valor de  $Y_N = 0.9$

$$\sigma_c = 2300 * \sqrt{3.3167 * 1 * 1.2213 * 1 * \frac{1.6431}{6.4 * 3} * \frac{1}{0.08034}}$$

$$\sigma_c = 4777.5757 \text{ PSI}$$

$$S_c = \frac{4777.5757 \text{ PSI} * 2}{0.9}$$

$$S_C = 10616.8349 \text{ PSI} \cong \text{Endurecido completamente grado 1}$$

$$S_C = 322 \text{ HB} + 29100 \text{ PSI}$$

$$S_C = 93500 \text{ PSI}$$

$$n_C = \frac{93500 \text{ PSI} * 0.9}{10616.8349 \text{ PSI}}$$

$$n_C = 8.8067$$

Flexión engrane 3.

$$K_0 = K_s = C_f = 1$$

$$\sigma = 3.3167 * 1 * 1.2213 * 1 * \frac{2.5}{3} * \frac{1.6431 * 1}{0.27}$$

$$\sigma = 20.5422 \text{ PSI}$$

$$S_t = 28260 \text{ PSI}$$

$$\sigma_{perm} = S_t * Y_N$$

$$\sigma_{perm} = 28260 \text{ PSI} * 0.9$$

$$\sigma_{perm} = 25434 \text{ PSI}$$

$$n = \frac{25434 \text{ PSI}}{20.5422 \text{ PSI}}$$

$$n = 1238.1341$$

Engrane 4.

Para este engrane es necesario volver a calcular otros valores ya que tanto su velocidad en la línea de paso y la carga transmitida son diferentes.

Por el anexo 3 se obtiene un valor de  $Z_N = 0.9$

Por el anexo 5 se obtiene un valor de  $Y_N = 0.9$

Por el anexo 4 se obtiene un valor de  $J = 0.38$

$$Q_v = 7$$

$$B = 0.25 * (12 - 0.7)^{2/3}$$

$$B = 0.731$$

$$A = 50 + 56 * (1 - 0.731)$$

$$A = 65.064$$

$$K_v = \left( \frac{65.064 + \sqrt{1047.1975 ft/min}}{65.064} \right)^{0.731}$$

$$K_v = 1.3432$$

Desgaste engrane 4.

$$\sigma_c = 2300 * \sqrt{1.3266 * 1 * 1.3234 * 1 * \frac{1.1931}{16 * 3} * \frac{1}{0.08034}}$$

$$\sigma_c = 1695.0998 \text{ PSI}$$

$$L_4 = (12000 \text{ h}) * \left( \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \right) * \left( \frac{250 \text{ rev}}{\text{min}} \right)$$

$$L_4 = 1.8 * 10^8 \text{ rev}$$

$$S_C = \frac{1695.0998 \text{ PSI} * 2}{0.9}$$

$$S_C = 3766.8885 \text{ PSI} \cong \text{Endurecido completamente grado 1}$$

$$S_C = 93500 \text{ PSI}$$

$$n_c = \frac{93500 \text{ PSI} * 0.9}{1695.0998 \text{ PSI}}$$

$$n_c = 49.6430$$

Flexión engrane 4.

$$K_0 = K_s = C_f = 1$$

$$\sigma = 1.3266 * 1 * 1.3432 * 1 * \frac{2.5}{3} * \frac{1.1931 * 1}{0.38}$$

$$\sigma = 4.6622 \text{ PSI}$$

$$S_t = 28260 \text{ PSI}$$

$$\sigma_{perm} = S_t * Y_N$$

$$\sigma_{perm} = 28260 \text{ PSI} * 0.9$$

$$\sigma_{perm} = 25434 \text{ PSI}$$

$$n = \frac{25434 \text{ PSI}}{4.6622 \text{ PSI}}$$

$$n = 5455.3644$$

Desgaste engrane 5.

Por el anexo 3 se obtiene un valor de  $Z_N = 0.9$

Por el anexo 5 se obtiene un valor de  $Y_N = 0.9$

Por el anexo 4 se obtiene un valor de  $J = 0.27$

$$L_5 = (12000 \text{ h}) * \left(\frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}}\right) * \left(\frac{625 \text{ rev}}{\text{min}}\right)$$

$$L_5 = 4.5 * 10^8 \text{ rev}$$

$$\sigma_c = 2300 * \sqrt{1.3266 * 1 * 1.3432 * 1 * \frac{1.6431}{6.4 * 3} * \frac{1}{0.08034}}$$

$$\sigma_c = 3168.7183 \text{ PSI}$$

$$S_C = \frac{3168.7183 \text{ PSI} * 2}{0.9}$$

$$S_C = 7041.5964 \text{ PSI} \cong \text{Endurecido completamente grado 1}$$

$$S_C = 93500 \text{ PSI}$$

$$n_c = \frac{93500 \text{ PSI} * 0.9}{3168.7183 \text{ PSI}}$$

$$n_c = 26.5564$$

Flexión engrane 5.

$$\sigma = 1.3266 * 1 * 1.3432 * 1 * \frac{2.5}{3} * \frac{1.6431 * 1}{0.27}$$

$$\sigma = 9.0364 \text{ PSI}$$

$$S_t = 28260 \text{ PSI}$$

$$\sigma_{perm} = S_t * Y_N$$

$$\sigma_{perm} = 28260 \text{ PSI} * 0.9$$

$$\sigma_{perm} = 25434 \text{ PSI}$$

$$n = \frac{25434 \text{ PSI}}{9.0364 \text{ PSI}}$$

$$n = 2814.6164$$

Resumen:

Todos los engranes utilizaran un  $P = 2.25 \text{ dientes/in}$

En los engrane se utilizará un material de acero completamente endurecido de grado 1 ya que el esfuerzo a que se sometía esta caja no es elevado.

En cuanto a las medidas de los engranes se descomponen de la siguiente manera:

**Tabla 7.** *Cuadro de resumen*

<b>Engrane</b>	<b>Diámetro (dp)</b>	<b>Ancho de cara</b>	<b>Paso Diametral</b>	<b># Dientes</b>
<b>Engrane 2</b>	16 in	3 in	2.5 dien/in	40
<b>Engrane 3</b>	6.4 in	3 in	2.5 dien/in	16
<b>Engrane 4</b>	16 in	3 in	2.5 dien/in	40
<b>Engrane 5</b>	6.4 in	3 in	2.5 dien/in	16

*Fuente: (Mullo P, 2020)*

Para seleccionar el ancho de la cara adecuado se verifico en catálogos de engranes donde se encontró un ancho de 3 in que satisfacía nuestras necesidades (Cotransa 2012).

**Tabla 8.** *Resistencia a la Fatiga Superficial Calculada, Seleccionada y Coeficiente de Seguridad.*

<b>Engrane</b>	<b>Resistencia a la fatiga superficial AGMA calculada (Sc)</b>	<b>Resistencia a la fatiga superficial AGMA seleccionada (Sc)</b>	<b>Coeficiente de seguridad en desgaste</b>	<b>Coeficiente de seguridad en flexión</b>
<b>Engrane 2</b>	4904.3865 PSI	93500 PSI	38.1291	3199.7282
<b>Engrane 3</b>	10616.8349 PSI	93500 PSI	8.8067	1238.1341
<b>Engrane 4</b>	3766.8885 PSI	93500 PSI	49.6430	5455.3644
<b>Engrane 5</b>	7041.5964 PSI	93500 PSI	26.5564	2814.6164

*Fuente: (Mullo P, 2020)*

Al comparar los valores arrojados en los cálculos de la fatiga superficial calculada y seleccionada se observa valores bajos en la calculada y alta en la seleccionada pese a que los valores del material seleccionado (acero endurecido completamente grado 1) son bajos y es por esto que los coeficientes de seguridad calculados son altos.

Una vez definido los valores necesarios de los engranes, se continua con el diseño de los ejes o flechas:

Para el diseño de las flechas se tomaron los tamaños que aconseja el libro de diseño en ingeniería mecánica que es una pulgada para cojinetes y 0.25 in para anillos de retención y como en cálculos anteriores se obtuvo el valor del ancho de cada engrane, se pudo tener el largo total de cada flecha.

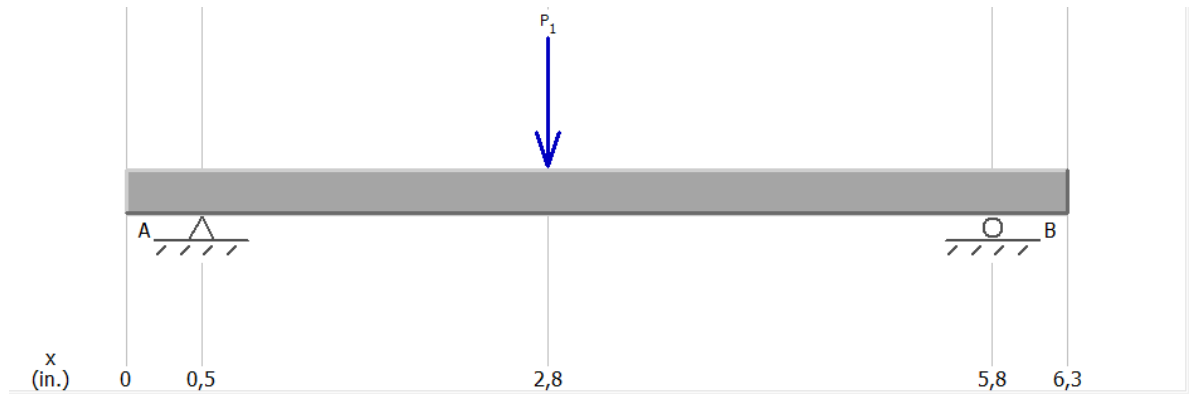
Flecha 1.

Para el cálculo de la flecha el nombre de los símbolos utilizados se encuentra en el anexo 41.

$$W_{23}^r = 1.2071 \text{ lbf}$$

$$W_{23}^t = 3.3167 \text{ lbf}$$

Para el cálculo de los esfuerzos y reacciones dentro de la flecha se utilizó el software de MDSolids.



**Gráfico 5:** Diagrama de Fuerza Aplicada en el Eje sentido x-y.

**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En el gráfico 5, se muestra un diagrama de fuerza aplicada en el eje 1 en el sentido X – Y, sacado del programa MDSolids.

$$\uparrow^+ \sum F_y = 0$$

$$R_{Ay} + R_{By} - W_{23}^r = 0$$

$$R_{Ay} = W_{23}^r - R_{By}$$

$$R_{Ay} = 1.2071 \text{ lbf} - 0.6323 \text{ lbf}$$

$$R_{Ay} = 0.5748 \text{ lbf}$$

$$\swarrow^+ \sum F_z = 0$$

$$R_{Az} + R_{Bz} - W_{23}^t = 0$$

$$R_{Az} = W_{23}^t - R_{Bz}$$

$$R_{Az} = 3.3167 \text{ lbf} - 1.7373 \text{ lbf}$$

$$R_{Az} = 1.5793 \text{ lbf}$$

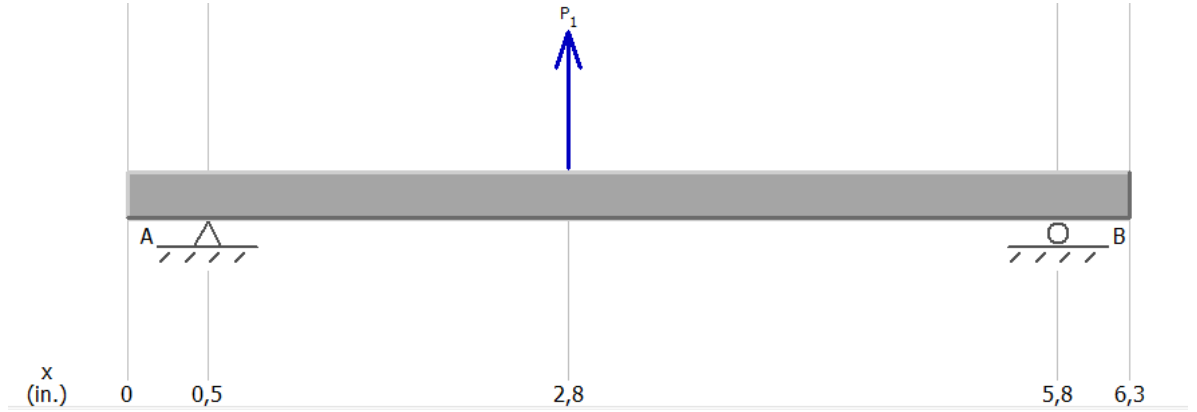
$$\curvearrowright^+ \sum M_{Ay} = 0$$

$$R_{By} \cdot 5.25 \text{ in} - W_{23}^r \cdot 2.75 \text{ in} = 0$$



$$R_{By} \cdot 5.25 \text{ in} - 1.2071 \text{ lbf} \cdot 2.75 \text{ in} = 0$$

$$R_{By} = 0.6323 \text{ lbf}$$



**Gráfico 6:** Diagrama de Fuerza Aplicada en el Eje sentido y-z.

**Fuente:** (Mullo P, 2020)

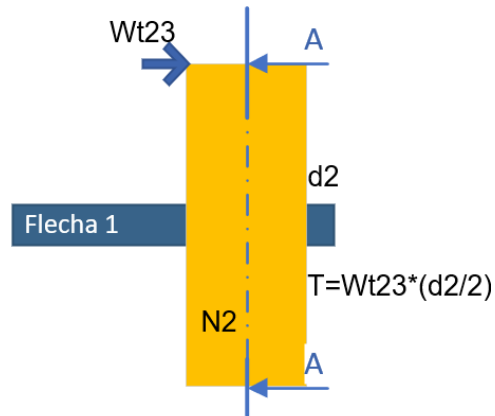
En el gráfico 6, se muestra un diagrama de fuerza aplicada en el eje 1 en el sentido Y – Z, sacado del programa MDSolids.

$$\sum M_{Az} = 0$$

$$-R_{Bz} \cdot 5.25 \text{ in} + W_{23}^t \cdot 2.75 \text{ in} = 0$$

$$-R_{Bz} \cdot 5.25 \text{ in} + 3.3167 \text{ lbf} \cdot 2.75 \text{ in} = 0$$

$$R_{Bz} = 1.7373 \text{ lbf}$$



**Gráfico 7:** Diagrama Ilustrativo para el Análisis de Toque en las Flechas.

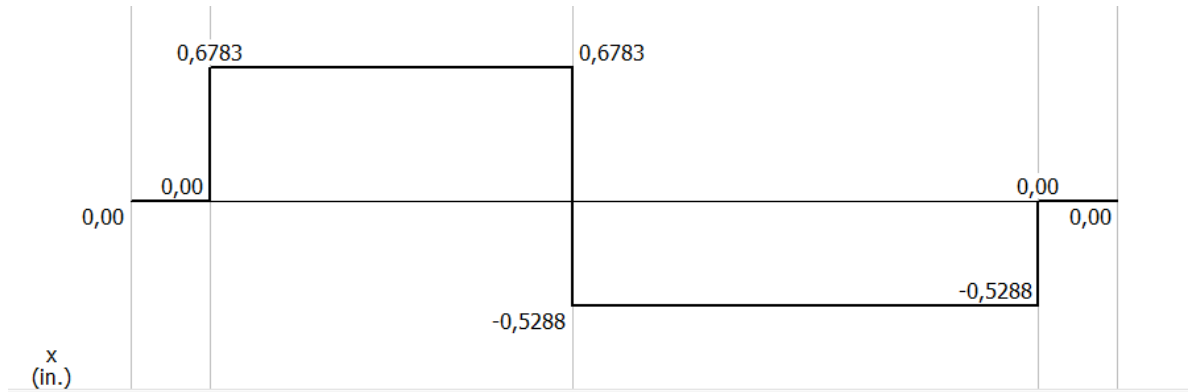
**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En el gráfico 7, se muestra el análisis de torque en la flecha, el cual es similar para las diferentes flechas.

$$T = W_{23}^t (d_{3/2})$$

$$T = 3.3167 \left( \frac{16 \text{ in}}{2} \right)$$

$$T = 26.5336 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$



**Gráfico 8:** Diagrama de las Áreas Generadas por la fuerza y reacciones en el sentido x-y.  
Fuente: (Mullo P, 2020)

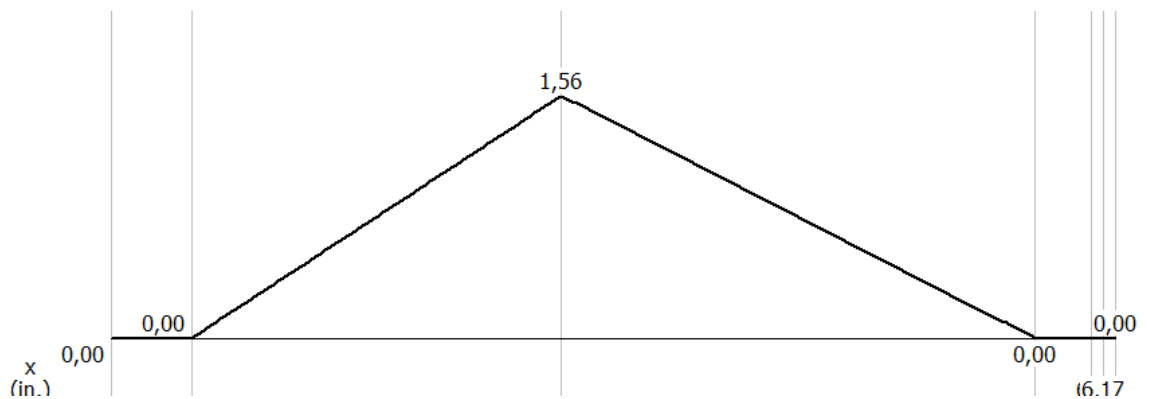
En el gráfico 8, se muestra las áreas generadas por la fuerza y las reacciones del eje 1 en el sentido X – Y, sacado del programa MDSolids.

$$A_1 = 0.5748 \text{ lbf} \cdot 2.75$$

$$A_1 = 1.5807 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

$$A_2 = -0.6323 \text{ lbf} \cdot 2.5$$

$$A_2 = -1.5807 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$



**Gráfico 9:** Momento Flector Generado por la Fuerza y Reacciones en el sentido x-y.  
Fuente: (Mullo P, 2020)

En el gráfico 9, se muestra el momento flector generado por la fuerza y las reacciones del eje 1 en el sentido X – Y, sacado del programa MDSolids.

$$M_0 = 0$$

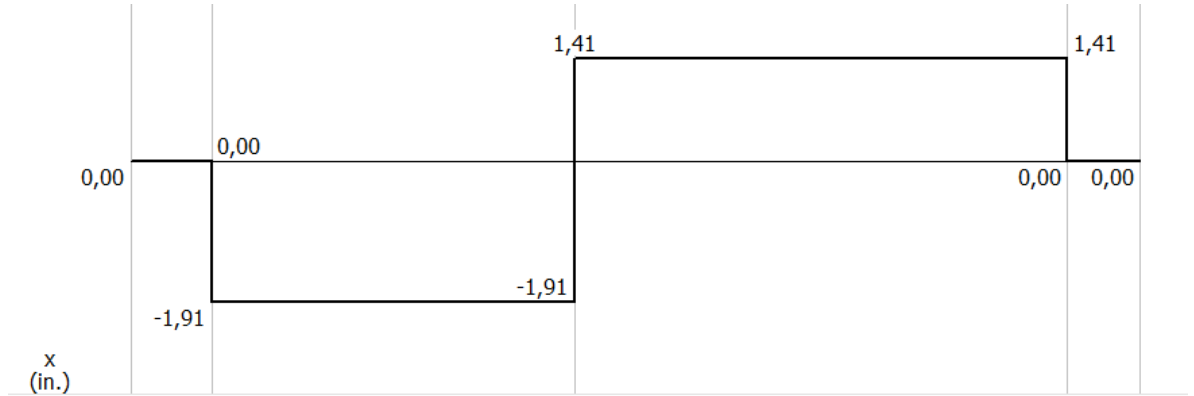
$$M_1 = A_1 + M_0$$

$$M_1 = 1.5807 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

$$M_2 = A_2 + M_1$$

$$M_2 = -1.5807 \text{ lbf} \cdot \text{in} + 1.5807 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

$$M_2 = 0$$



**Gráfico 10:** Diagrama de las Áreas Generadas por la fuerza y reacciones en el sentido y-z.

**Fuente:** (Mullo P, 2020)

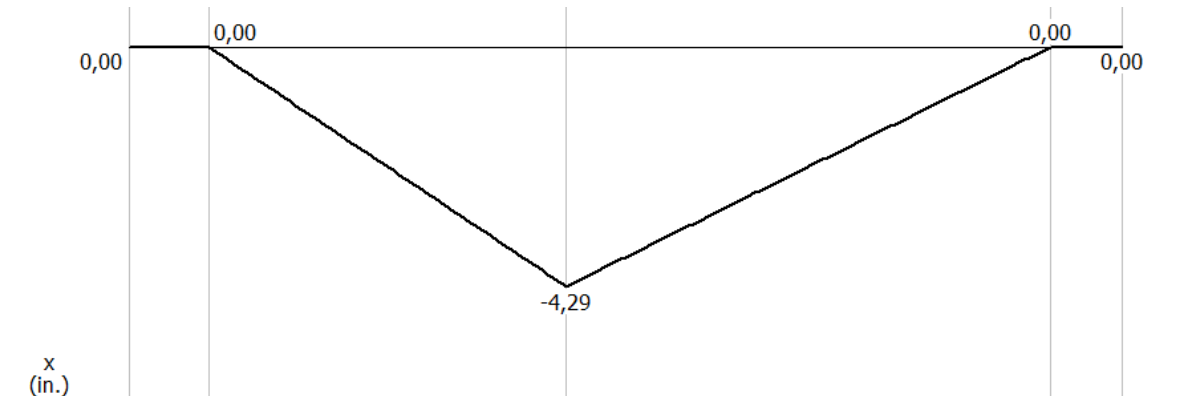
En el gráfico 10, se muestra las áreas generadas por la fuerza y las reacciones del eje 1 en el sentido Y – Z, sacado del programa MDSolids.

$$A_1 = -1.5793 \text{ lbf} \cdot 2.75 \text{ in}$$

$$A_1 = -4.343 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

$$A_2 = 1.7374 \text{ lbf} \cdot 2.5 \text{ in}$$

$$A_2 = 4.343 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$



**Gráfico 11:** Momento Flector Generado por la Fuerza y Reacciones en el sentido y-z.

**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En el gráfico 11, se muestra el momento flector generado por la fuerza y las reacciones del eje 1 en el sentido Y – Z, sacado del programa MDSolids.

$$M_0 = 0$$

$$M_1 = A_1 + M_0$$

$$M_1 = -4.343 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

$$M_2 = A_2 + M_1$$

$$M_2 = 4.343 \text{ lbf} \cdot \text{in} - 4.343 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

$$M_2 = 0$$

$$M = \sqrt{4.343^2 + 1.5807^2}$$

$$M = 4.6217 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

Anexo 6: Filete de hombro: bien redondeado; este valor se utilizará en todas las flechas calculadas.  $\left(r/d = 0.1\right)$

$$k_t = 1.7$$

$$k_{ts} = 1.5$$

$$k_f = k_t$$

$$k_{fs} = k_{ts}$$

Para la fabricación del eje se escogió un acero común conocido como AISI 1020 cuyo valor se encuentra en el anexo 7.

$$S_{ut} = 68 \text{ KPSI}$$

Anexo 8: Maquinado o laminado en frío ( $a = 2.7$  y  $b = -0.265$ )

$$k_a = a \cdot S_{ut}^b$$

$$k_a = 2.7 \cdot (68)^{-0.265}$$

*Ecuación 25*

$$k_a = 0.883 \text{ KPSI}$$

$$k_b = 0.9$$

$$k_c = k_d = k_e = 1$$

$$k_f = 0.24 - 0.9 \cong 0.5$$

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S_{ut}$$

*Ecuación 26*

$$S_e = 0.883 \cdot 0.9 \cdot 0.5 \cdot 68$$

$$S_e = 27.019 \text{ KPSI}$$

$$d = \left\{ \frac{16n}{\pi} \left( \frac{2k_f \cdot M_a}{S_e} + \frac{[3(k_{fs} \cdot T_m)^2]^{1/2}}{S_{ut}} \right) \right\}^{1/3} \quad \text{Ecuación 27}$$

$$d = \left\{ \frac{16 \cdot 2}{\pi} \left( \frac{2 \cdot 1.7 \cdot 4.6217 \text{ lbf} \cdot \text{in}}{27019} + \frac{[3(1.5 \cdot 26.5336)^2]^{1/2}}{68000} \right) \right\}^{1/3}$$

$$d = 0.2533 \cong 0.3 \text{ in}$$

$$d = 0.3$$

$$D/d = 1.2$$

$$D = 1.2 \cdot 0.3$$

$$D = 0.36 \cong 0.4 \text{ in}$$

$$\frac{D}{d} = \frac{0.4 \text{ in}}{0.3 \text{ in}}$$

$$\frac{D}{d} = 1.33$$

$$r = \frac{d}{10}$$

$$r = \frac{0.4}{10}$$

$$r = 0.04 \text{ in}$$

$$\frac{r}{d} = \frac{0.04 \text{ in}}{0.4 \text{ in}}$$

$$\frac{r}{d} = 0.1$$

Para el valor de  $k_t$  se obtuvo del análisis del anexo 9; al igual que el valor de  $q$  del anexo 10.

$$k_t = 1.45$$

$$q = 0.82$$

$$k_f = 1 + q(k_t - 1)$$

Ecuación 28

$$k_f = 1 + 0.82(1.45 - 1)$$

$$k_f = 1.369$$

Para el valor de  $k_t$  se obtuvo del análisis del anexo 11; al igual que el valor de  $q$  del anexo 12.

$$k_{ts} = 1.4$$

$$q_s = 0.95$$

$$k_{fs} = 1 + q_s(k_{ts} - 1)$$

*Ecuación 29*

$$k_{fs} = 1 + 0.95(1.8 - 1)$$

$$k_{fs} = 1.38$$

$$0.11 \leq d \leq 2 \text{ in}$$

$$k_b = 0.879 \cdot d^{-0.107}$$

*Ecuación 30*

$$k_b = 0.879 \cdot (0.4)^{-0.107}$$

$$k_b = 0.9695$$

$$k_f = 0.24 - 0.9$$

$$k_c = k_d = k_e = 1$$

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S_u$$

$$S_e = 0.883 \cdot 0.9695 \cdot 0.5 \cdot 68$$

$$S_e = 29.107 \text{ KPSI}$$

$$\vartheta'_a = \frac{32 \cdot k_f \cdot M_a}{\pi \cdot d^3}$$

*Ecuación 31*

$$\vartheta'_a = \frac{32 \cdot 1.369 \cdot 4.6217}{\pi \cdot 0.4^3}$$

$$\vartheta'_a = 1006.9904 \text{ PSI}$$

$$\vartheta'_m = \left[ 3 \left( \frac{16 \cdot k_{fs} \cdot T_m}{\pi \cdot d^3} \right)^2 \right]^{1/2}$$

*Ecuación 32*

$$\vartheta'_m = \left[ 3 \left( \frac{16 \cdot 1.38 \cdot 26.5336}{\pi \cdot 0.4^3} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\vartheta'_m = 5046.9154 \text{ PSI}$$

Criterio Goodman

$$\frac{1}{n_f} = \frac{\vartheta'_a}{S_e} + \frac{\vartheta'_m}{S_{ut}}$$

Ecuación 33

$$\frac{1}{n_f} = \frac{1006.9904}{29107} + \frac{5046.9154}{68000}$$

$$\frac{1}{n_f} = 0.1081$$

$$n_f = 9.1898$$

Para el valor de  $S_y$  se obtuvo del anexo 7.

$$S_y = 57000$$

$$n_y = \frac{S_y}{\vartheta'_a + \vartheta'_m}$$

Ecuación 34

$$n_y = \frac{57000}{1006.9904 + 5046.9154}$$

$$n_y = 9.4154$$

Anillo de retención ER0031. Ver anexo 13.

$$a = \text{grosor} = 0.025$$

$$r = 0.01 \text{ in}$$

$$\emptyset = 0.281 \text{ in}$$

$$t = \text{profundidad} = 0.026$$

$$\frac{r}{t} = \frac{0.01 \text{ in}}{0.026 \text{ in}}$$

$$\frac{r}{t} = 0.3846$$

$$\frac{a}{t} = \frac{0.025 \text{ in}}{0.026 \text{ in}}$$

$$\frac{a}{t} = 0.9615$$

Para el valor de  $K_t$  se obtuvo del anexo 14, al igual que el valor de  $q$  del anexo 10.

$$k_t = 4.9$$

$$q = 0.9$$

$$k_f = 1 + 0.65(4.9 - 1)$$

$$k_f = 4.51$$

$$\vartheta'_a = \frac{32 \cdot 4.51 \cdot 4.6217}{\pi \cdot 0.4^3}$$

$$\vartheta'_a = 3317.4044 \text{ PSI}$$

$$n_f = \frac{s_e}{\vartheta'_a}$$

*Ecuación 35*

$$n_f = \frac{29.107}{3317.4044 \text{ PSI}}$$

$$n_f = 8.7740$$

$$D_3 = 0.4 \text{ in}$$

$$D_1 = D_6 = 0.28 \text{ in}$$

$$D_2 = 0.33 \text{ in}$$

$$D_5 = 0.48 \text{ in}$$

Cojinetes: Cojinete A

$$L_c = 1200h \cdot \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \cdot \frac{100 \text{ rev}}{\text{min}}$$

$$L_c = 7.2 \times 10^7 \text{ rev}$$

$$R_{Az} = 1.6583 \text{ lbf}$$

$$R_{Ay} = 0.6036 \text{ lbf}$$

$$R_A = \sqrt{R_{Az}^2 + R_{Ay}^2}$$

*Ecuación 36*

$$R_A = \sqrt{1.6583^2 + 0.6036^2}$$

$$R_A = 1.7647 \text{ lbf}$$

$a = 3$  Para cojinetes de bielas



$$F_{RA} = R_A \left[ \frac{L_c}{0.02 + 4.439 (1 - 0.99)^{1/1.483}} \right]^{1/3}$$

Ecuación 37

$$F_{RA} = 1.7647 \left[ \frac{7.2 \times 10^7 rev}{0.02 + 4.439 (1 - 0.99)^{1/1.483}} \right]^{1/3}$$

$$F_{RA} = 1218,1194 \text{ lbf}$$

Cojinete B

$$R_{By} = 0.6035 \text{ lbf}$$

$$R_{Bz} = 1.6585 \text{ lbf}$$

$$R_B = \sqrt{R_{By}^2 + R_{Bz}^2}$$

Ecuación 38

$$R_B = \sqrt{0.6035^2 + 1.6585^2}$$

$$R_B = 1.7647 \text{ lbf}$$

$$F_{RB} = 1.7647 \left[ \frac{7.2 \times 10^7 rev}{0.02 + 4.439 (1 - 0.99)^{1/1.483}} \right]^{1/3}$$

$$F_{RB} = 1218.1194 \text{ lbf}$$

Cuñas

$$T = 26.5336 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

$$\emptyset = D_3 = 0.4 \text{ in}$$

$$L = 4 \text{ in}$$

$$t = \frac{3}{32} = 0.09375 \text{ in}$$

$$S_y = 57 \text{ KPSI AISI 1020}$$

$$F = \frac{T}{r}$$

Ecuación 39

$$F = \frac{26.5336 \text{ lbf} \cdot \text{in}}{0.2}$$

$$F = 132.668 \text{ lbf}$$

$$L = \frac{2F}{tS_y}$$

Ecuación 40

$$L = \frac{2 \cdot 132.668 \text{ lbf}}{0.09375 \text{ in} \cdot 57000}$$

$$L = 0.04965 \text{ in}$$

Flecha 2.

$$W_{23}^r = 1.2071 \text{ lbf}$$

$$W_{23}^t = 3.3167 \text{ lbf}$$

$$W_{45}^r = 0.4828 \text{ lbf}$$

$$W_{45}^t = 1.3266 \text{ lbf}$$



**Gráfico 12:** Diagrama de Fuerza Aplicada en el Eje sentido x-y.

**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En el gráfico 12, se muestra un diagrama de las fuerzas aplicadas en el eje 2 en el sentido X – Y, sacado del programa MDSolids.

$$\uparrow^+ \sum F_y = 0$$

$$-R_{Ay} + R_{By} + W_{23}^r - W_{45}^r = 0$$

$$R_{Ay} = W_{23}^r + R_{By} - W_{45}^r$$

$$R_{Ay} = 1.2071 + 0.1034 - 0.4828$$

$$R_{Ay} = 0.8277 \text{ lbf}$$

$$\swarrow^+ \sum F_z = 0$$

$$-R_{Az} + R_{Bz} + W_{23}^t - W_{45}^r = 0$$

$$R_{Az} = W_{23}^t + R_{Bz} - W_{45}^r$$

$$R_{Az} = 3.3167 - 0.2842 - 1.3266$$

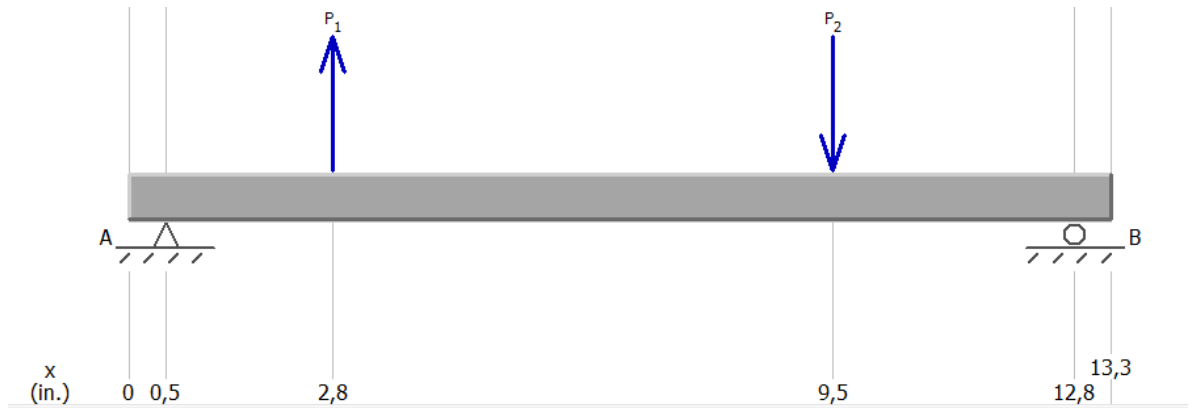
$$R_{Az} = 2.2743 \text{ lbf}$$

$$\sum^+ M_{Ay} = 0$$

$$R_{By} \cdot 12.25 \text{ in} + W_{23}^r \cdot 2.75 \text{ in} - W_{45}^r \cdot 9.5 \text{ in} = 0$$

$$R_{By} \cdot 12.25 \text{ in} + 1.2071 \cdot 2.75 \text{ in} - 0.4828 \cdot 9.5 \text{ in} = 0$$

$$R_{By} = 0.1034 \text{ lbf}$$



**Gráfico 13:** Diagrama de Fuerza Aplicada en el Eje sentido y-z.

**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En el gráfico 13, se muestra un diagrama de las fuerzas aplicadas en el eje 2 en el sentido Y – Z, sacado del programa MDSolids.

$$\sum^+ M_{Az} = 0$$

$$R_{Bz} \cdot 12.25 \text{ in} + W_{23}^t \cdot 2.75 \text{ in} - W_{45}^t \cdot 9.5 \text{ in} = 0$$

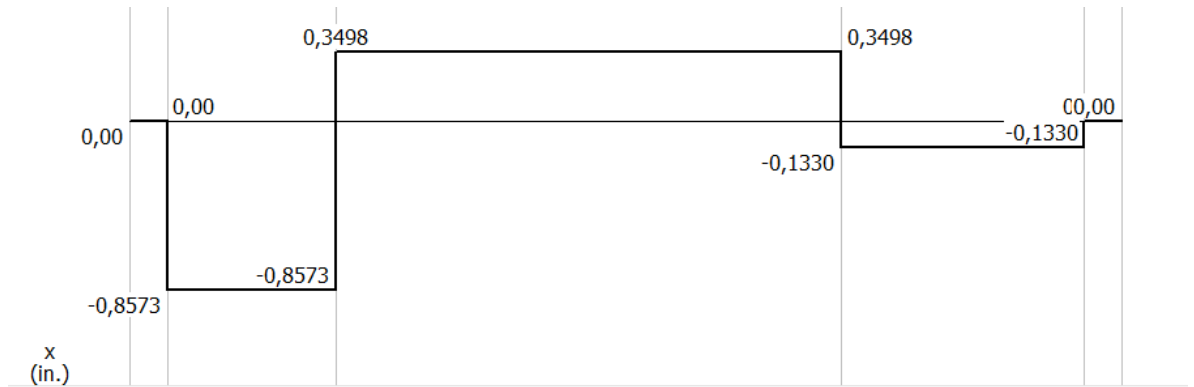
$$R_{Bz} \cdot 12.25 \text{ in} + 3.3167 \cdot 2.75 \text{ in} - 1.3266 \cdot 9.5 \text{ in} = 0$$

$$R_{Bz} = 0.2842 \text{ lbf}$$

$$T = W_{45}^t (d/2)$$

$$T = 1.3266 \left( \frac{16 \text{ in}}{2} \right)$$

$$T = 10.6128 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$



**Gráfico 14:** Diagrama de las Áreas Generadas por la fuerza y reacciones en el sentido x-y.  
**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En el gráfico 14, se muestra las áreas generadas por las fuerzas y las reacciones del eje 2 en el sentido X – Y, sacado del programa MDSolids.

$$A_1 = -0.8277 \text{ lbf} \cdot 2.75$$

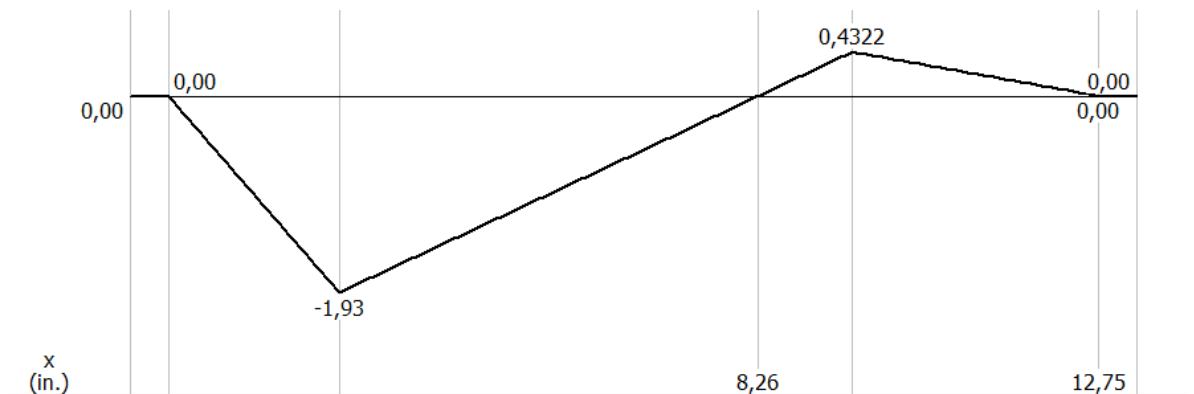
$$A_1 = -2.2761 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

$$A_2 = 0.3794 \text{ lbf} \cdot 6.75$$

$$A_2 = 2.5609 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

$$A_3 = -0.1034 \text{ lbf} \cdot 2.75$$

$$A_3 = -0.2843 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$



**Gráfico 15:** Momento Flector Generado por la Fuerza y Reacciones en el sentido x-y.  
**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En el gráfico 15, se muestra el momento flector generado por las fuerzas y las reacciones del eje 2 en el sentido X – Y, sacado del programa MDSolids.

$$M_0 = 0$$

$$M_1 = A_1 + M_0$$

$$M_1 = -2.2761 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

$$M_2 = A_2 + M_1$$

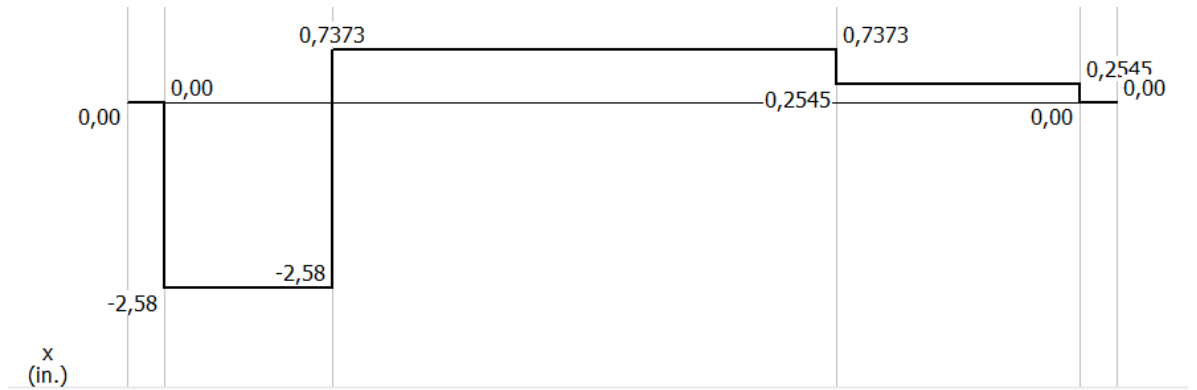
$$M_2 = 2.5609 - 2.2761$$

$$M_2 = 0.2848$$

$$M_3 = A_3 + M_2$$

$$M_3 = -0.2843 + 0.2848$$

$$M_3 = 0$$



**Gráfico 16:** Diagrama de las Áreas Generadas por la fuerza y reacciones en el sentido y-z.

**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En el gráfico 16, se muestra las áreas generadas por las fuerzas y las reacciones del eje 2 en el sentido Y – Z, sacado del programa MDSolids.

$$A_1 = -2.2743 \text{ lbf} \cdot 2.75 \text{ in}$$

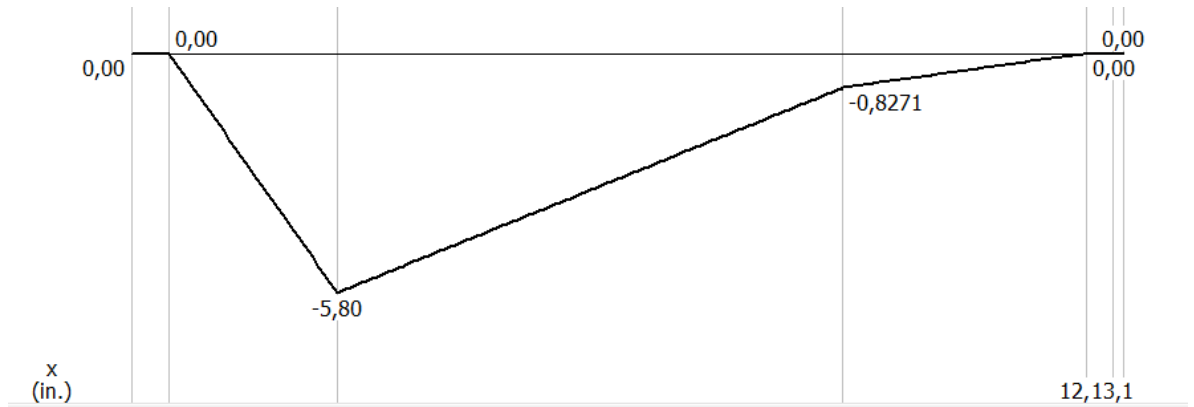
$$A_1 = -6.2543 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

$$A_2 = 1.0424 \text{ lbf} \cdot 6.75 \text{ in}$$

$$A_2 = 7.0362 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

$$A_3 = -0.2842 \text{ lbf} \cdot 2.75 \text{ in}$$

$$A_3 = -0.7815 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$



**Gráfico 17:** Momento Flector Generado por la Fuerza y Reacciones en el sentido y-z.

**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En el gráfico 17, se muestra el momento flector generado por las fuerzas y las reacciones del eje 2 en el sentido Y – Z, sacado del programa MDSolids.

$$M_0 = 0$$

$$M_1 = A_1 + M_0$$

$$M_1 = -6.2543 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

$$M_2 = A_2 + M_1$$

$$M_2 = 7.0362 - 6.2543$$

$$M_2 = 0.7819$$

$$M_3 = A_3 + M_2$$

$$M_3 = -0.7815 + 0.7819$$

$$M_3 = 0$$

$$M = \sqrt{-6.2543^2 + (-2.2701)^2}$$

$$M = 6.6555 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

Anexo 6: Filete de hombro: bien redondeado ( $r/d = 0.1$ )

$$k_t = 1.7$$

$$k_{ts} = 1.5$$

$$k_f = k_t$$

$$k_{fs} = k_{ts}$$

AISI 1020

$$S_{ut} = 68 \text{ KPSI}$$

Anexo 8: Maquinado o laminado en frío ( $a = 2.7$  y  $b = -0.265$ )

$$k_a = a \cdot S_{ut}^b$$

$$k_a = 2.7 \cdot (68)^{-0.265}$$

$$k_a = 0.8825 \text{ KPSI}$$

$$k_b = 0.9$$

$$k_c = k_d = k_e = 1$$

$$k_f = 0.24 - 0.9 \cong 0.5$$

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S_u$$

$$S_e = 0.8825 \cdot 0.9 \cdot 0.5 \cdot 68$$

$$S_e = 27.019 \text{ KPSI}$$

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

$$d = \left\{ \frac{16 \cdot 2}{\pi} \left( \frac{2 \cdot 1.7 \cdot 0.6555 \text{ lbf} \cdot \text{in}}{27000} + \frac{[3(1.5 \cdot 10.6123)^2]^{1/2}}{68000} \right) \right\}^{1/3}$$

$$d = 0.2331 \cong 0.24 \text{ in}$$

$$d = 0.24$$

$$D/d = 1.2$$

$$D = 1.2 \cdot 0.24$$

$$D = 0.288 \cong 0.3 \text{ in}$$

$$\frac{D}{d} = \frac{0.3 \text{ in}}{0.24 \text{ in}}$$

$$\frac{D}{d} = 1.25$$

$$r = \frac{d}{10}$$

$$r = \frac{0.3}{10}$$

$$r = 0.03 \text{ in}$$

$$\frac{r}{d} = \frac{0.03 \text{ in}}{0.3 \text{ in}}$$

$$\frac{r}{d} = 0.1$$

Para el valor de  $k_t$  se obtuvo del análisis del anexo 9; al igual que el valor de  $q$  del anexo 10.

$$k_t = 1.45$$

$$q = 0.82$$

$$k_f = 1 + q(k_t - 1)$$

$$k_f = 1 + 0.82(1.45 - 1)$$

$$k_f = 1.369$$

Para el valor de  $k_t$  se obtuvo del análisis del anexo 11; al igual que el valor de  $q$  del anexo 12.

$$k_{ts} = 1.35$$

$$q_s = 0.95$$

$$k_{fs} = 1 + q_s(k_{ts} - 1)$$

$$k_{fs} = 1 + 0.95(1.35 - 1)$$

$$k_{fs} = 1.3325$$

$$0.11 \leq d \leq 2 \text{ in}$$

$$k_f = 0.24 - 0.9 \cong 0.5$$

$$k_b = 0.879 \cdot d^{-0.107}$$

$$k_b = 0.879 \cdot (0.3)^{-0.107}$$

$$k_b = 0.9998$$



$$k_c = k_d = k_e = 1$$

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot \cancel{k_c} \cdot \cancel{k_d} \cdot \cancel{k_e} \cdot k_f \cdot S_u$$

$$S_e = 0.883 \cdot 0.9998 \cdot 0.5 \cdot 68$$

$$S_e = 29.998 \text{ KPSI}$$

$$\vartheta'_a = \frac{32 \cdot k_f \cdot M_a}{\pi \cdot d^3}$$

$$\vartheta'_a = \frac{32 \cdot 1.369 \cdot 6.6555}{\pi \cdot 0.3^3}$$

$$\vartheta'_a = 3437.3241 \text{ PSI}$$

$$\vartheta'_m = \left[ 3 \left( \frac{16 \cdot k_{fs} \cdot T_m}{\pi \cdot d^3} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\vartheta'_m = \left[ 3 \left( \frac{16 \cdot 1.3325 \cdot 10.6128}{\pi \cdot 0.3^3} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\vartheta'_m = 4620.2361 \text{ PSI}$$

Criterio Goodman

$$\frac{1}{n_f} = \frac{\vartheta'_a}{S_e} + \frac{\vartheta'_m}{S_{ut}}$$

$$\frac{1}{n_f} = \frac{3437.3241}{29998} + \frac{4620.2361}{68000}$$

$$\frac{1}{n_f} = 0.1825$$

$$n_f = 5.4785$$

$$S_y = 57000$$

$$n_y = \frac{S_y}{\vartheta'_a + \vartheta'_m}$$

$$n_y = \frac{57000}{3437.324 + 4620.2361}$$

$$n_y = 7.0741$$

Anillo de retención ER0031. Ver anexo 13.

$$a = \text{grosor} = 0.025$$

$$r = 0.01 \text{ in}$$

$$\emptyset = 0.28 \text{ in}$$

$$t = \text{profundidad} = 0.026$$

$$\frac{r}{t} = \frac{0.01 \text{ in}}{0.026 \text{ in}}$$

$$\frac{r}{t} = 0.3816$$

$$\frac{a}{t} = \frac{0.025 \text{ in}}{0.026 \text{ in}}$$

$$\frac{a}{t} = 0.9615$$

Para el valor de  $K_t$  se obtuvo del anexo 14, al igual que el valor de  $q$  del anexo 10.

$$k_t = 3.9$$

$$q = 0.9$$

$$k_f = 1 + q(k_t - 1)$$

$$k_f = 1 + 0.65(4.4 - 1)$$

$$k_f = 3.61$$

$$\vartheta'_a = \frac{32 \cdot k_f \cdot M_a}{\pi \cdot d^3}$$

$$\vartheta'_a = \frac{32 \cdot 3.61 \cdot 6.6555}{\pi \cdot 0.3^3}$$

$$\vartheta'_a = 9064.0904 \text{ PSI}$$

$$n_f = \frac{S_e}{\vartheta'_a}$$

$$n_f = \frac{29.998}{9064.0904}$$

$$n_f = 3.3095$$

$$D_1 = D_7 = 0.36 \text{ in}$$

$$D_2 = D_6 = 0.25 \text{ in}$$

$$D_5 = D_3 = 0.3 \text{ in}$$

$$D_4 = 0.21 \text{ in}$$

Cojinetes: Cojinete A

$$L_c = 1200h \cdot \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \cdot \frac{250 \text{ rev}}{\text{min}}$$

$$L_c = 1.8 \times 10^8 \text{ rev}$$

$$R_{Az} = 2.2743 \text{ lbf}$$

$$R_{Ay} = 0.8277 \text{ lbf}$$

$$R_A = \sqrt{R_{Az}^2 + R_{Ay}^2}$$

$$R_A = \sqrt{2.2743^2 + 0.8277^2}$$

$$R_A = 2.4202 \text{ lbf}$$

$a = 3$  Para cojinetes de bolas

$$F_{RA} = R_A \left[ \frac{L_c}{0.02 + 4.439 (1 - 0.99)^{41,483}} \right]^{1/3}$$

$$F_{RA} = 2.4202 \left[ \frac{1.8 \times 10^8 \text{ rev}}{0.02 + 4.439 (1 - 0.99)^{41,483}} \right]^{1/3}$$

$$F_{RA} = 2267.3414 \text{ lbf}$$

Cojinete B

$$R_{By} = 0.1034 \text{ lbf}$$

$$R_{Bz} = 0.2842 \text{ lbf}$$

$$R_B = \sqrt{R_{By}^2 + R_{Bz}^2}$$

$$R_B = \sqrt{0.1034^2 + 0.2842^2}$$

$$R_B = 0.3024 \text{ lbf}$$

$$F_{RB} = R_B \left[ \frac{L_c}{0.02 + 4.439 (1 - 0.99)^{41,483}} \right]^{1/3}$$

$$F_{RB} = 0.3024 \left[ \frac{1.8 \times 10^8 rev}{0.02 + 4.439 (1 - 0.99)^{41,483}} \right]^{1/3}$$

$$F_{RB} = 283.30 \text{ lbf}$$

Cuñas

$$T = 10.6128 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

$$D_5 = D_3 = 0.3 \text{ in}$$

$$t = 3132 = 0.09375 \text{ in}$$

$$S_y = 57 \text{ KPSI AISI 1020}$$

$$F = \frac{T}{r}$$

$$F = \frac{10.6128 \text{ lbf} \cdot \text{in}}{0.312}$$

$$F = 70.752 \text{ lbf}$$

$$w = \frac{3}{32}$$

$$w = 0.09375$$

$$n = \frac{S_y}{\vartheta}$$

$$L = \frac{2F}{tS_y}$$

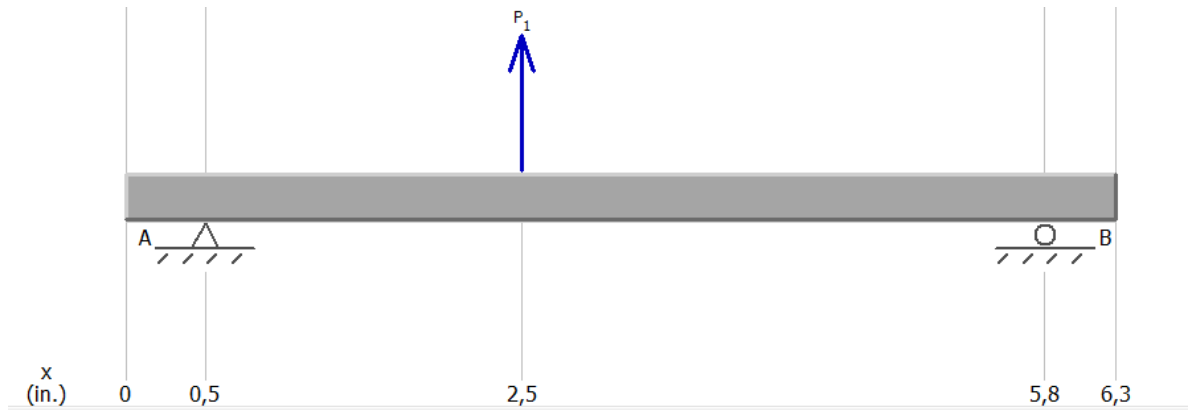
$$L = \frac{2 \cdot 70.752 \text{ lbf}}{0.09375 \text{ in} \cdot 57000}$$

$$L = 0.02648 \text{ in}$$

Flecha 3.

$$W_{45}^r = 0.4828 \text{ lbf}$$

$$W_{45}^t = 1.3266 \text{ lbf}$$



**Gráfico 18:** Diagrama de Fuerza Aplicada en el Eje sentido x-y.

**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En el gráfico 18, se muestra un diagrama de fuerza aplicada en el eje 3 en el sentido X – Y, sacado del programa MDSolids.

$$\uparrow^+ \sum F_y = 0$$

$$-R_{Ay} - R_{By} + W_{45}^r = 0$$

$$R_{Ay} = -R_{By} + W_{45}^r$$

$$R_{Ay} = -0.2299 + 0.4828$$

$$R_{Ay} = 0.2528 \text{ lbf}$$

$$\swarrow^+ \sum F_z = 0$$

$$-R_{Az} - R_{Bz} + W_{45}^t = 0$$

$$R_{Az} = -R_{Bz} + W_{45}^t$$

$$R_{Az} = -0.6317 + 1.3266$$

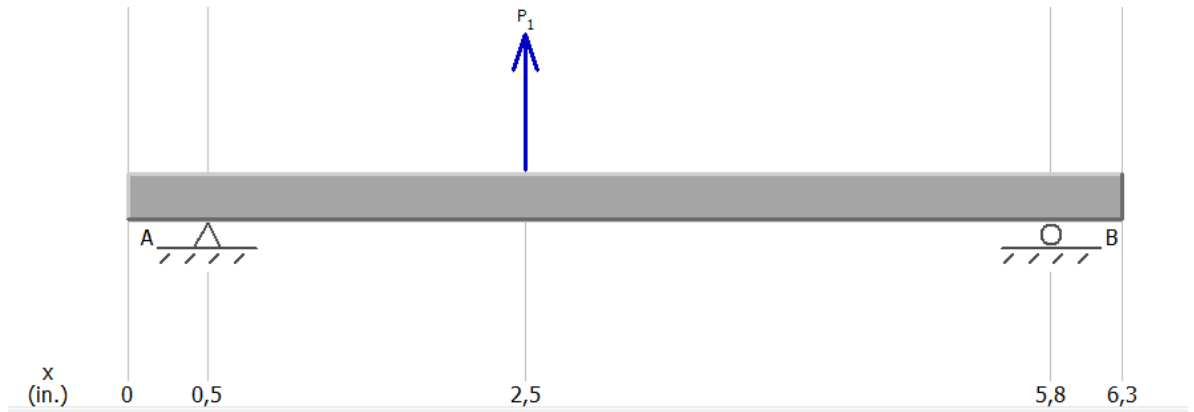
$$R_{Az} = 0.6948 \text{ lbf}$$

$$\curvearrowright^+ \sum M_{Ay} = 0$$

$$-R_{By} \cdot 5.25 \text{ in} + W_{45}^r \cdot 2.5 \text{ in} = 0$$

$$-R_{By} \cdot 5.25 \text{ in} + 0.4828 \cdot 2.5 \text{ in} = 0$$

$$R_{By} = 0.2299 \text{ lbf}$$



**Gráfico 19:** Diagrama de Fuerza Aplicada en el Eje sentido y-z.

**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En el gráfico 19, se muestra un diagrama de fuerza aplicada en el eje 3 en el sentido Y – Z, sacado del programa MDSolids.

$$\sum^+ M_{Az} = 0$$

$$-R_{Bz} \cdot 5.25 \text{ in} + W_{45}^t \cdot 2.5 \text{ in} = 0$$

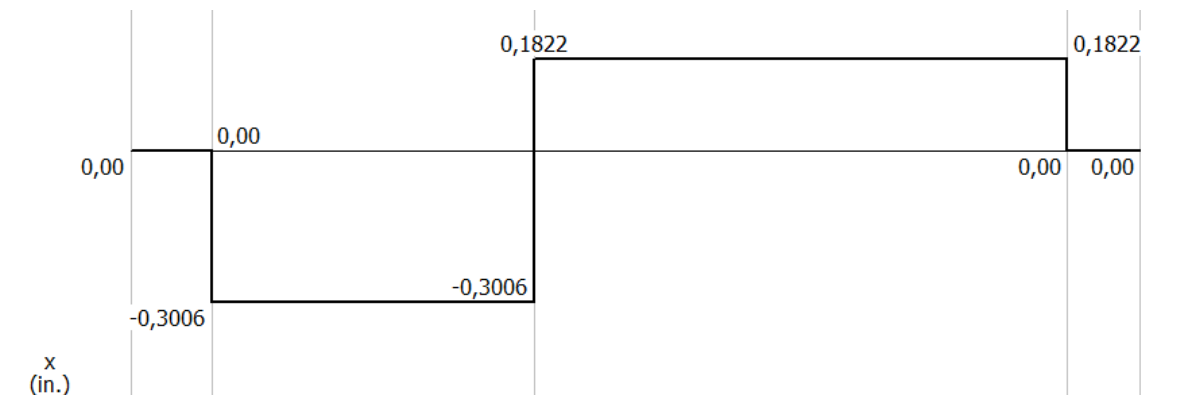
$$-R_{Bz} \cdot 5.25 \text{ in} + 1.3266 \cdot 2.5 \text{ in} = 0$$

$$R_{Bz} = 0.6317 \text{ lbf}$$

$$T = W_{45}^t (d/2)$$

$$T = 1.3266 \left( \frac{6.4 \text{ in}}{2} \right)$$

$$T = 4.2451 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$



**Gráfico 20:** Diagrama de las Áreas Generadas por la fuerza y reacciones en el sentido x-y.

**Fuente:** (Mullo P, 2020)

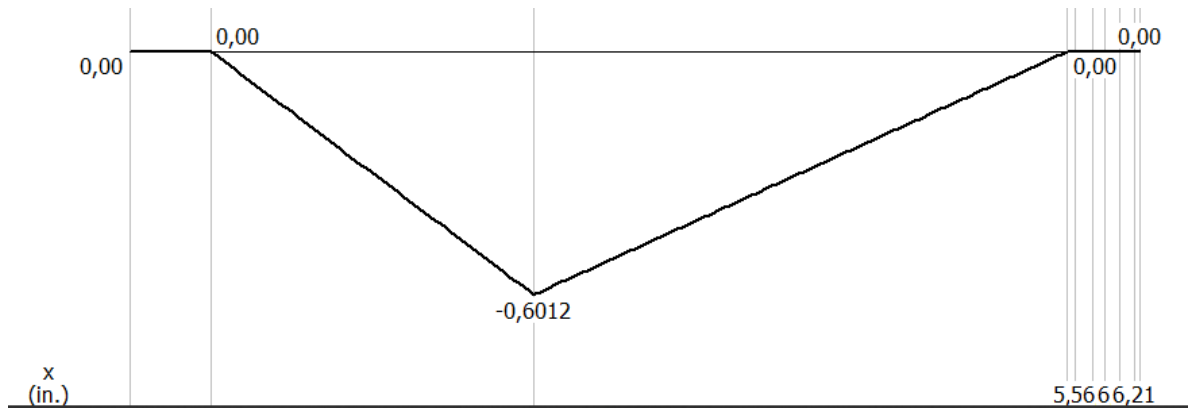
En el gráfico 20, se muestra las áreas generadas por la fuerza y las reacciones del eje 3 en el sentido X – Y, sacado del programa MDSolids.

$$A_1 = -0.2528 \text{ lbf} \cdot 2.5$$

$$A_1 = -0.6325 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

$$A_2 = 0.23 \text{ lbf} \cdot 2.75$$

$$A_2 = 0.6325 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$



**Gráfico 21:** Momento Flector Generado por la Fuerza y Reacciones en el sentido x-y.

**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En el gráfico 21, se muestra el momento flector generado por la fuerza y las reacciones del eje 3 en el sentido X – Y, sacado del programa MDSolids.

$$M_0 = 0$$

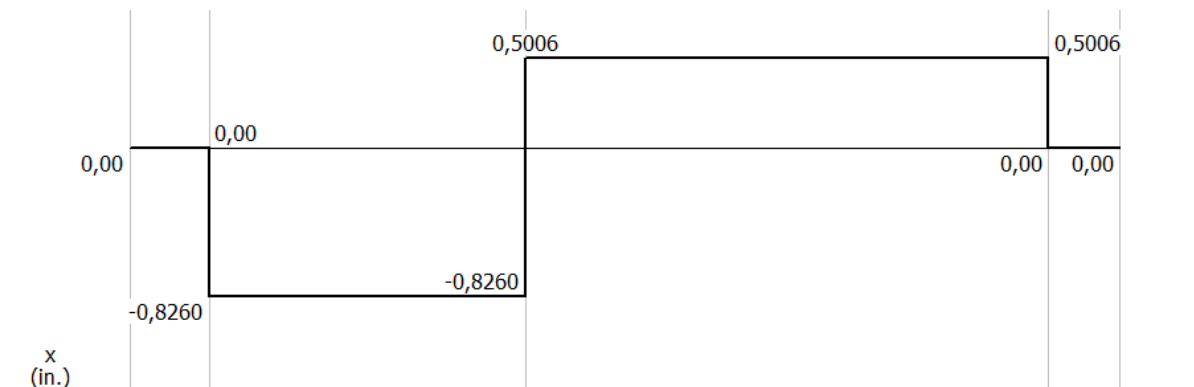
$$M_1 = A_1 + M_0$$

$$M_1 = -0.6325 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

$$M_2 = A_2 + M_1$$

$$M_2 = 0.6325 - 0.6325$$

$$M_2 = 0$$



**Gráfico 22:** Diagrama de las Áreas Generadas por la fuerza y reacciones en el sentido y-z.

**Fuente:** (Mullo P, 2020)

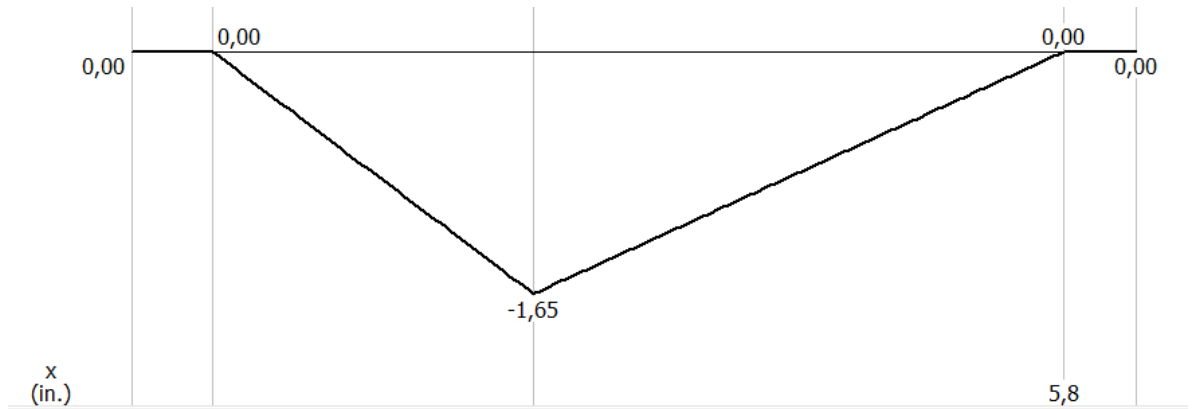
En el gráfico 22, se muestra las áreas generadas por la fuerza y las reacciones del eje 3 en el sentido Y – Z, sacado del programa MDSolids.

$$A_1 = -0.6948 \text{ lbf} \cdot 2.5 \text{ in}$$

$$A_1 = -1.737 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

$$A_2 = 0.6337 \text{ lbf} \cdot 2.75 \text{ in}$$

$$A_2 = 1.7426 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$



**Gráfico 23:** Momento Flector Generado por la Fuerza y Reacciones en el sentido y-z.  
Fuente: (Mullo P, 2020)

En el gráfico 23, se muestra el momento flector generado por la fuerza y las reacciones del eje 3 en el sentido Y – Z, sacado del programa MDSolids.

$$M_0 = 0$$

$$M_1 = A_1 + M_0$$

$$M_1 = -1.737 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

$$M_2 = A_2 + M_1$$

$$M_2 = 1.7426 - 1.737$$

$$M_2 = 0$$

$$M = \sqrt{0.6232^2 + 1.737^2}$$

$$M = 1.8484 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

Anexo 6: Filete de hombro: bien redondeado  $\left(r/d = 0.1\right)$

$$k_t = 1.7$$



$$k_{ts} = 1.5$$

$$k_f = k_t$$

$$k_{fs} = k_{ts}$$

$$\text{AISI 1020}$$

$$S_u = 68 \text{ KPSI}$$

$$\text{Anexo 8: Maquinado o laminado en frío } (a = 2.7 \text{ y } b = -0.265)$$

$$k_a = a \cdot S_{ut}^b$$

$$k_a = 2.7 \cdot (68)^{-0.265}$$

$$k_a = 0.8825 \text{ KPSI}$$

$$k_b = 0.9$$

$$k_c = k_d = k_e = 1$$

$$k_f = 0.24 - 0.9 \cong 0.5$$

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S_u$$

$$S_e = 0.8825 \cdot 0.9 \cdot 0.5 \cdot 68$$

$$S_e = 27.019 \text{ KPSI}$$

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

$$d = \left\{ \frac{16 \cdot 2}{\pi} \left( \frac{2 \cdot 1.7 \cdot 1.8484 \text{ lbf} \cdot \text{in}}{27019} + \frac{[3(1.5 \cdot 4.2451)^2]^{1/2}}{68000} \right) \right\}^{1/3}$$

$$d = 0.159 \cong 0.2 \text{ in}$$

$$d = 0.24$$

$$D/d = 1.2$$

$$D = 1.2 \cdot 0.2$$

$$D = 0.24 \text{ in}$$

$$\frac{D}{d} = \frac{0.24 \text{ in}}{0.24 \text{ in}}$$

$$\frac{D}{d} = 1$$

$$r = \frac{d}{10}$$

$$r = \frac{0.24}{10}$$

$$r = 0.024 \text{ in}$$

$$\frac{r}{d} = \frac{0.024 \text{ in}}{0.24 \text{ in}}$$

$$\frac{r}{d} = 0.1$$

Para el valor de  $k_t$  se obtuvo del análisis del anexo 9; al igual que el valor de  $q$  del anexo 10.

$$k_t = 1.45$$

$$q = 0.9$$

$$k_f = 1 + q(k_t - 1)$$

$$k_f = 1 + 0.9(1.45 - 1)$$

$$k_f = 1.405$$

Para el valor de  $k_t$  se obtuvo del análisis del anexo 11; al igual que el valor de  $q$  del anexo 12.

$$k_{ts} = 1$$

$$q_s = 0.95$$

$$k_{fs} = 1 + q_s(k_{ts} - 1)$$

$$k_{fs} = 1 + 0.95(1 - 1)$$

$$k_{fs} = 1$$

$$0.11 \leq d \leq 2 \text{ in}$$

$$k_f = 0.24 - 0.9 \cong 0.5$$

$$k_b = 0.879 \cdot d^{-0.107}$$

$$k_b = 0.879 \cdot (0.24)^{-0.107}$$

$$k_b = 1.014$$

$$k_c = k_d = k_e = 1$$

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S_u$$

$$S_e = 0.8825 \cdot 1.014 \cdot 0.5 \cdot 68$$

$$S_e = 30.725 \text{ KPSI}$$

$$\vartheta'_a = \frac{32 \cdot k_f \cdot M_a}{\pi \cdot d^3}$$

$$\vartheta'_a = \frac{32 \cdot 1.405 \cdot 1.8484}{\pi \cdot 0.24^3}$$

$$\vartheta'_a = 1913.5449 \text{ PSI}$$

$$\vartheta'_m = \left[ 3 \left( \frac{16 \cdot k_{fs} \cdot T_m}{\pi \cdot d^3} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\vartheta'_m = \left[ 3 \left( \frac{16 \cdot 1 \cdot 4.2451}{\pi \cdot 0.24^3} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\vartheta'_m = 2708.8498 \text{ PSI}$$

Criterio Goodman

$$\frac{1}{n_f} = \frac{\vartheta'_a}{S_e} + \frac{\vartheta'_m}{S_{ut}}$$

$$\frac{1}{n_f} = \frac{1913.5449}{30725} + \frac{2708.8498}{68000}$$

$$\frac{1}{n_f} = 0.1021$$

$$n_f = 9.7928$$

$$S_y = 57000$$

$$n_y = \frac{S_y}{\vartheta'_a + \vartheta'_m}$$

$$n_y = \frac{57000}{1913.5449 + 2708.8498}$$

$$n_y = 12.3312$$

Anillo de retención ER0023. Ver anexo 13.

$$a = \text{grosor} = 0.015$$

$$r = 0.01 \text{ in}$$

$$\emptyset = 0.215 \text{ in}$$

$$t = \text{profundidad} = 0.019$$

$$\frac{r}{t} = \frac{0.01 \text{ in}}{0.019 \text{ in}}$$

$$\frac{r}{t} = 0.5263$$

$$\frac{a}{t} = \frac{0.015 \text{ in}}{0.019 \text{ in}}$$

$$\frac{a}{t} = 0.7894$$

Para el valor de  $K_t$  se obtuvo del anexo 14, al igual que el valor de  $q$  del anexo 10.

$$k_t = 4.5$$

$$q = 0.65$$

$$k_f = 1 + q(k_t - 1)$$

$$k_f = 1 + 0.65(4.5 - 1)$$

$$k_f = 3.275$$

$$\vartheta'_a = \frac{32 \cdot k_f \cdot M_a}{\pi \cdot d^3}$$

$$\vartheta'_a = \frac{32 \cdot 3.275 \cdot 1.8484}{\pi \cdot 0.24^3}$$

$$\vartheta'_a = 4460.3983 \text{ PSI}$$

$$n_f = \frac{S_e}{\vartheta'_a}$$

$$n_f = \frac{30.725}{4460.3983}$$

$$n_f = 6.888$$

$$D_1 = D_5 = 0.2 \text{ in}$$

$$D_2 = 0.28 \text{ in}$$

$$D_3 = 0.24 \text{ in}$$

$$D_4 = 0.22 \text{ in}$$

Cojinetes: Cojinete A

$$L_c = 1200h \cdot \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \cdot \frac{625 \text{ rev}}{\text{min}}$$

$$L_c = 4.5 \times 10^8 \text{ rev}$$

$$R_{Az} = 0.6948 \text{ lbf}$$

$$R_{Ay} = 0.2528 \text{ lbf}$$

$$R_A = \sqrt{R_{Az}^2 + R_{Ay}^2}$$

$$R_A = \sqrt{0.6948^2 + 0.2528^2}$$

$$R_A = 0.7393 \text{ lbf}$$

$a = 3$  Para cojinetes de bolas

$$F_{RA} = R_A \left[ \frac{L_c}{0.02 + 4.439 (1 - 0.99)^{41,483}} \right]^{1/3}$$

$$F_{RA} = 0.7393 \left[ \frac{4.5 \times 10^8 \text{ rev}}{0.02 + 4.439 (1 - 0.99)^{41,483}} \right]^{1/3}$$

$$F_{RA} = 940.0112 \text{ lbf}$$

Cojinete B

$$R_{By} = 0.2299 \text{ lbf}$$

$$R_{Bz} = 0.6317 \text{ lbf}$$

$$R_B = \sqrt{R_{By}^2 + R_{Bz}^2}$$

$$R_B = \sqrt{0.2299^2 + 0.6317^2}$$

$$R_B = 0.6722 \text{ lbf}$$

$$F_{RB} = R_B \left[ \frac{L_c}{0.02 + 4.439 (1 - 0.99)^{41,483}} \right]^{1/3}$$

$$F_{RB} = 0.6722 \left[ \frac{4.5 \times 10^8 rev}{0.02 + 4.439 (1 - 0.99)^{41,483}} \right]^{1/3}$$

$$F_{RB} = 854.6943 \text{ lbf}$$

Cuñas

$$T = 4.2451 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

$$D_3 = 0.24 \text{ in}$$

$$t = 3132 = 0.09375 \text{ in}$$

$$S_y = 57 \text{ KPSI AISI 1020}$$

$$F = \frac{T}{r}$$

$$F = \frac{4.2451 \text{ lbf} \cdot \text{in}}{0.12}$$

$$F = 35.3758 \text{ lbf}$$

$$n = \frac{S_y}{\vartheta}$$

$$L = \frac{2F}{tS_y}$$

$$L = \frac{2 \cdot 35.3758 \text{ lbf}}{0.09375 \text{ in} \cdot 57000}$$

$$L = 0.01324 \text{ in}$$

Resumen:

**Tabla 9.** Resumen de los Valores Obtenidos para la Flecha 1.

Flecha 1	
<b>Momento Torsor</b>	26,5336 lbf*in
<b>Momento Flecto</b>	4,6217 lbf*in
<b>Diámetro 1</b>	0,28 in
<b>Diámetro 2</b>	0,33 in
<b>Diámetro 3</b>	0,4 in
<b>Diámetro 4</b>	0,48 in
<b>Diámetro 5</b>	0,28 in
<b>Fuerza del cojinete A</b>	1218,1194 lbf
<b>Fuerza del cojinete B</b>	1218,1194 lbf

<b>Cuñas</b>	132,668 lbf
<b>Longitud mínima de la cuña</b>	0,05 in
<b>Límite de resistencia a la fatiga</b>	29,017 KPSI
<b>Esfuerzo medio</b>	5046.9154 PSI
<b>Esfuerzo alternante</b>	1006,9904 PSI

*Fuente: (Mullo P, 2020)*

**Tabla 10.** *Resumen de los Valores Obtenidos para la Flecha 2.*

**Flecha 2**

<b>Momento Torsor</b>	10,3128 lbf*in
<b>Momento Flecto</b>	6,6555 lbf*in
<b>Diámetro 1</b>	0,2 in
<b>Diámetro 2</b>	0,24 in
<b>Diámetro 3</b>	0,3 in
<b>Diámetro 4</b>	0,36 in
<b>Diámetro 5</b>	0,3 in
<b>Diámetro 6</b>	0,24 in
<b>Diámetro 7</b>	0,2 in
<b>Fuerza del cojinete A</b>	2267,3414 lbf
<b>Fuerza del cojinete B</b>	283,30 lbf
<b>Cuñas</b>	70,752 lbf
<b>Longitud mínima de la cuña</b>	0,03 in
<b>Límite de resistencia a la fatiga</b>	29,998 KPSI
<b>Esfuerzo medio</b>	4620.2361 PSI
<b>Esfuerzo alternante</b>	3437,3241 PSI

*Fuente: (Mullo P, 2020)*

**Tabla 11.** *Resumen de los Valores Obtenidos para la Flecha 3.*

**Flecha 3**

<b>Momento Torsor</b>	4,2451 lbf*in
<b>Momento Flecto</b>	1,8484 lbf*in
<b>Diámetro 1</b>	0,2 in
<b>Diámetro 2</b>	0,28 in
<b>Diámetro 3</b>	0,24 in
<b>Diámetro 4</b>	0,22 in
<b>Diámetro 5</b>	0,2 in
<b>Fuerza del cojinete A</b>	940,0112 lbf
<b>Fuerza del cojinete B</b>	854,6943 lbf
<b>Cuñas</b>	35,3158 lbf
<b>Longitud mínima de la cuña</b>	0,02 in
<b>Límite de resistencia a la fatiga</b>	30,725 KPSI
<b>Esfuerzo medio</b>	2708,8498 PSI
<b>Esfuerzo alternante</b>	1913.5449 PSI

*Fuente: (Mullo P, 2020)*

Nota: los diámetros obtenidos para las flechas son pequeños es por esto que por concepto de diseño se multiplicaron por tres para así lograr tener una geometría mecánica mejor y cumplir funciones geométricas como el acople de la chaveta, también ser más adaptada a la realidad, al igual que, se procedió aproximar los diámetros de la flecha para que estos coincidan con los valores estandarizados del diámetro interior para el engrane.

**Tabla 12.** Factores de Seguridad Calculados y Esfuerzo máximos Obtenidos para cada Flecha.

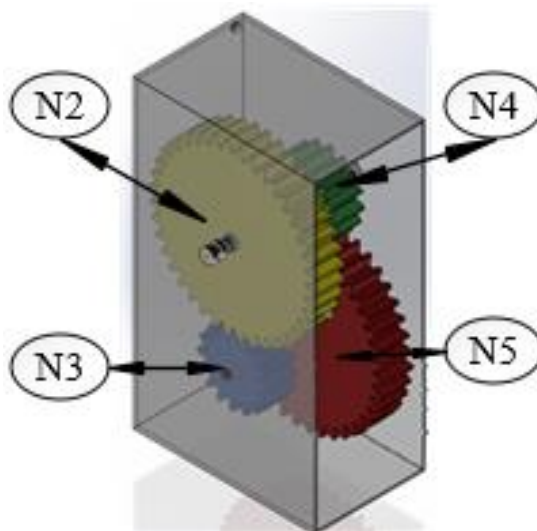
Flecha	Factor de seguridad contra la fatiga (nf)	Factor de seguridad contra la fluencia (ny)	Esfuerzo máximo ( $\sigma_{max}$ )
<b>Flecha 1</b>	9.1898	9.4154	6053.9058 PSI
<b>Flecha 2</b>	5.4785	7.0741	8057.5602 PSI
<b>Flecha 3</b>	9.7928	12.3312	4622.3947 PSI

*Fuente: (Mullo P, 2020)*

Como se puede observar en la tabla 11 los valores de los esfuerzos son bajos comparados a los esfuerzos que puede resistir en material escogido (AISI 1020), es por esto que igual sus factores de seguridad son elevados, y se garantiza la vida funcional de la caja multiplicadora.

### Modelado virtual.

El modelamiento se realizó en el programa de SolidWorks primero comenzando por las flechas, cuñas para después diseñar la carcasa y con los complementos del Toolbox basándonos en la norma ANSI en pulgadas se pudo obtener los engranes, anillos de retención y rodamientos; con estos elementos se logró ensamblar la caja multiplicadora de RPM. Teniendo así el siguiente ensamble.



**Imagen 5:** Caja Multiplicadora Ensamblada en SolidWorks.

*Fuente: (Mullo P, 2020)*



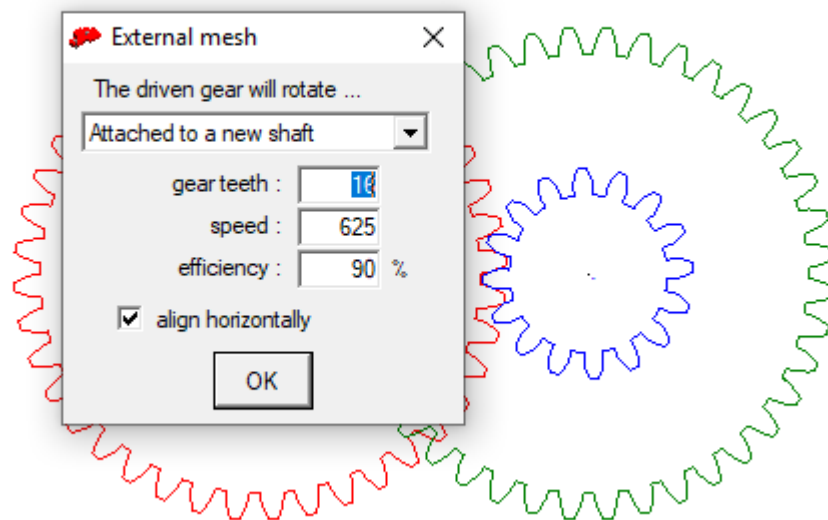
En la imagen 5, se muestra la caja multiplicadora ensamblada en el programa de SolidWorks.

Nota: los componentes diseñados tienen sus planos y se encuentran en los anexos.

### **Simulación.**

Para la animación de movimiento se la realizó en el software SolidWorks.

La simulación de transmisión se realizó en el software Gears Simulation versión demo y se obtuvo los siguientes resultados:



**Imagen 6:** Ingreso del Ultimo Valor del Engrane y su Aproximada Velocidad.  
**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En la imagen 6, se muestra la ventana de ingreso del último dato del número de dientes del engrane, en el cual nos dice que sus revoluciones serán de 625, sacado del programa Gears Simulation versión demo.

La velocidad de entrada es de 100rpm, una potencia de 31.4 W, un torque de 3 N\*m; para después obtener como valores de salida en la simulación de 625 rpm, Una potencia de 25.4 W, y un torque de 0.4 N\*m.

<b>MECHANICAL SYSTEM</b>	
Speed ratio	6.25
Efficiency	81.0 %
<b>MOTOR</b>	
Speed	100.0 rpm
Power	31.4 W
Torque	3.0 N·m
<b>DRIVEN SHAFT</b>	
Speed	625.0 rpm
Power	25.4 W
Torque	0.4 N·m

**Imagen 7:** Valores Obtenidos de la Simulación.

**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En la imagen 7, se muestra los valores obtenidos de la simulación de Gears Simulation.

Como se puede observar el valor calculado de revoluciones por minuto de salida se obtienen en la simulación, dando así una veracidad a la modelación matemática realizada.

### **Análisis en ANSYS de los Engranés.**

La simulación de esfuerzos en ANSYS se realizó con un acero AISI 1020.

Datos ocupados del material a utilizar en la simulación de ANSYS.

**Tabla 13.** Datos del Material Acero AISI 1020.

<b>AISI 1020 &gt; Constants</b>	
Density	0,2836 lbm in <sup>-3</sup>
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	6,6667e-006 F <sup>-1</sup>
Specific Heat Constant Pressure	0,10366 BTU lbm <sup>-1</sup> F <sup>-1</sup>
Isotropic Thermal Conductivity	8,0917e-004 BTU s <sup>-1</sup> in <sup>-1</sup> F <sup>-1</sup>
Isotropic Resistivity	8,5235 ohm cmil in <sup>-1</sup>

**Fuente:** (Mullo P, 2020)

**Tabla 14.** Limite Elástico del Material Acero Estructural.

AISI 1020 > Compressive Yield Strength	
Compressive Yield Strength psi	
	36259

*Fuente: (Mullo P, 2020)*

**Tabla 15.** Resistencia a la Tracción del Material Acero Estructural.

AISI 1020 > Tensile Yield Strength	
Tensile Yield Strength psi	
	29725

*Fuente: (Mullo P, 2020)*

**Tabla 16.** Resistencia a la Tracción del Material Acero Estructural.

AISI 1020 > Tensile Ultimate Strength	
Tensile Ultimate Strength psi	
	55100

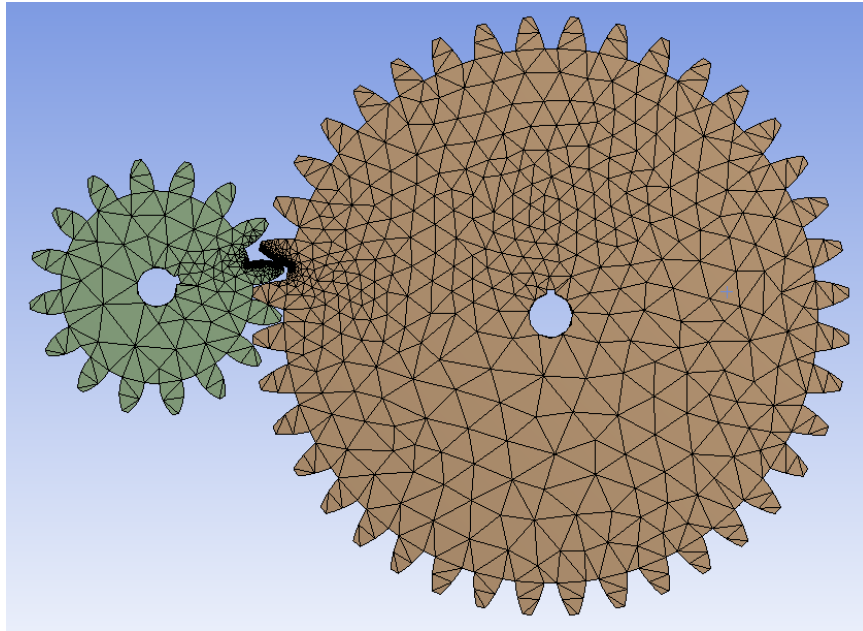
*Fuente: (Mullo P, 2020).*

**Tabla 17.** Datos del Mallado del Conjunto Utilizado en Todas las Simulaciones.

**Model (A4) > Mesh**

Object Name	<i>Mesh</i>
State	Solved
<b>Display</b>	
Display Style	Use Geometry Setting
<b>Defaults</b>	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
Element Size	Default
<b>Sizing</b>	
Use Adaptive Sizing	Yes
Resolution	Default (2)
Mesh Defeaturing	Yes
Defeature Size	Default
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Initial Size Seed	Assembly
Bounding Box Diagonal	38,266 in
Average Surface Area	3,6905 in <sup>2</sup>
Minimum Edge Length	0,12963 in
<b>Quality</b>	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Standard Mechanical
Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	None
<b>Inflation</b>	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
<b>Advanced</b>	
Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Topology Checking	Yes
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No
<b>Statistics</b>	
Nodes	348949
Elements	237654

*Fuente: (Mullo P, 2020)*



**Imagen 8:** *Mallado del Conjunto.*  
**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En la imagen 8, se muestra el mallado realizado para el primer tren de engranes en el programa de Ansys, teniendo así un total de 348949 nodos y 237654 elementos para analizar.

El mallado presentado es utilizado para todos los análisis realizados.

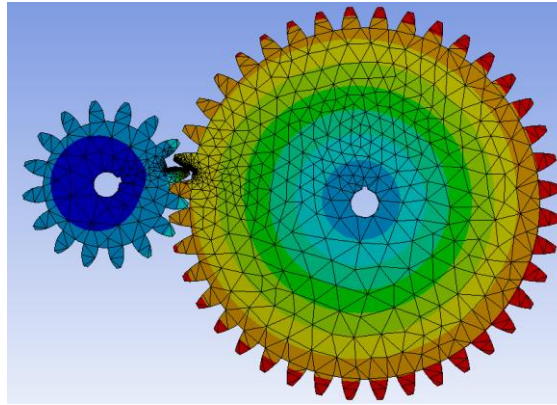
## Análisis Estructural Estática Engrane N2 (Static Structural).

**Tabla 18.** Resultados Generales de la Simulación de Análisis Estructural Estático.

Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Results					
Object Name	Total Deformation	Equivalent Elastic Strain	Equivalent Stress	Equivalent Stress 2	Equivalent Stress 3
State	Solved				
Scope					
Scoping Method	Geometry Selection			Named Selection	
Geometry	All Bodies				
Named Selection				cara	cara2
Definition					
Type	Total Deformation	Equivalent Elastic Strain	Equivalent (von-Mises) Stress		
By	Time				
Display Time	Last				
Calculate Time History	Yes				
Identifier					
Suppressed	No				
Results					
Minimum	0, in	7,9694e-011 in/in	2,0817e-003 psi	28,799 psi	0,25408 psi
Maximum	1,1255e-004 in	1,0986e-004 in/in	2627,6 psi		1354,1 psi
Average	6,6881e-005 in	8,8311e-006 in/in	246,24 psi	394,34 psi	141,61 psi
Minimum Occurs On	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 16T 20PA 3FW — S16N3.0H2.0L1.125S1Keyway	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 40T 20PA 3FW — S40N3.0H2.0L1.25S1Keyway		pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 16T 20PA 3FW — S16N3.0H2.0L1.125S1Keyway	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 40T 20PA 3FW — S40N3.0H2.0L1.25S1Keyway
Maximum Occurs On	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 40T 20PA 3FW — S40N3.0H2.0L1.25S1Keyway	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 16T 20PA 3FW —S16N3.0H2.0L1.125S1Keyway			pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 40T 20PA 3FW — S40N3.0H2.0L1.25S1Keyway
Minimum Value Over Time					
Minimum	0, in	7,6296e-012 in/in	2,2013e-004 psi	4,9843 psi	2,2383e-002 psi
Maximum	0, in	7,9694e-011 in/in	2,0817e-003 psi	28,799 psi	0,25408 psi
Maximum Value Over Time					
Minimum	1,1461e-005 in	1,101e-005 in/in	263,35 psi		130,53 psi
Maximum	1,1255e-004 in	1,0986e-004 in/in	2627,6 psi		1354,1 psi
Information					
Time	1, s				
Load Step	1				
Substep	6				
Iteration Number	11				
Integration Point Results					
Display Option	Averaged				
Average Across Bodies	No				

*Fuente: (Mullo P, 2020)*

## Deformación Total Engrane N2.



**Imagen 9:** Deformación Total.  
**Fuente:** (Mullo P, 2020)

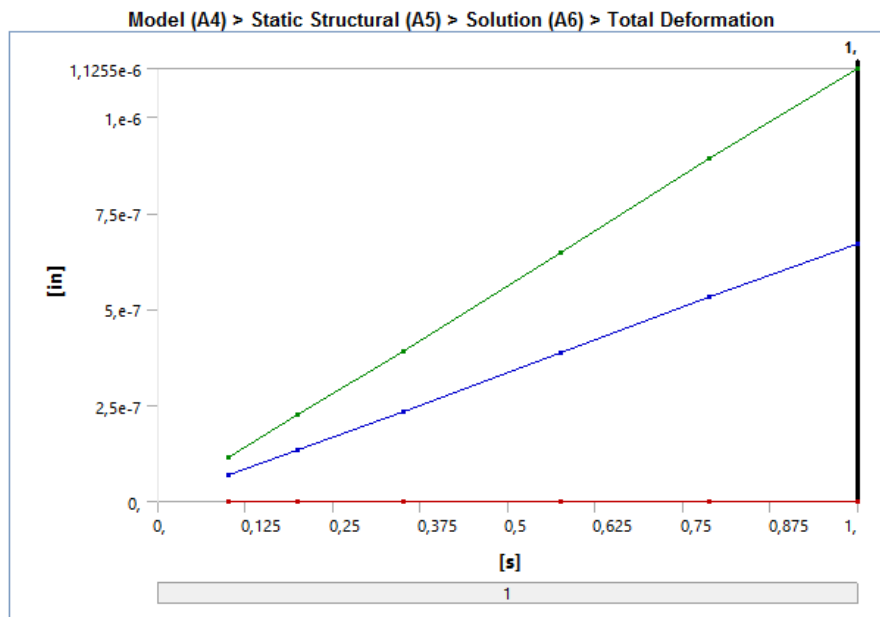
En la imagen 9, se muestra la máxima deformación total del engrane 2 en el análisis estructural del Programa de Ansys.

**Tabla 19.** Resultados de la Deformación Total.

**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation**

Time [s]	Minimum [in]	Maximum [in]	Average [in]
0,1	0,	1,1461e-007	6,8501e-008
0,2		2,2592e-007	1,3434e-007
0,35		3,9173e-007	2,3236e-007
0,575		6,4806e-007	3,8544e-007
0,7875		8,9323e-007	5,3218e-007
1,		1,1255e-006	6,6882e-007

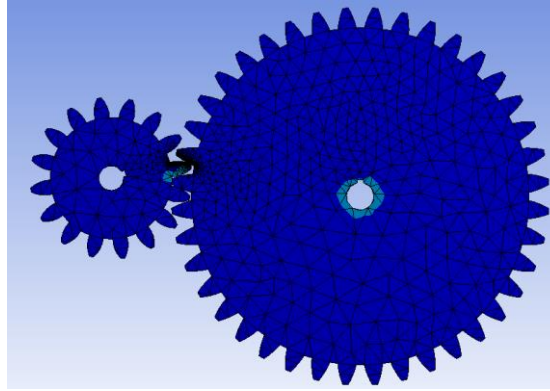
**Fuente:** (Mullo P, 2020)



**Gráfico 24:** Gráfica de los Datos de la Deformación Total.  
**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En el gráfico 21 se observa los datos de la deformación total obteniendo así un valor mínimo de 0 y un valor máximo de 0.000001125 in de deformación en el engrane, por lo tanto, estos valores son bajos y se garantiza el correcto funcionamiento del multiplicador.

Tensión Elástica Equivalente Engrane N2.



**Imagen 10:** Tensión Elástica Equivalente.  
Fuente: (Mullo P, 2020)

En la imagen 10, se muestra la tensión elástica equivalente del engrane 2 en el análisis estructural del Programa de Ansys.

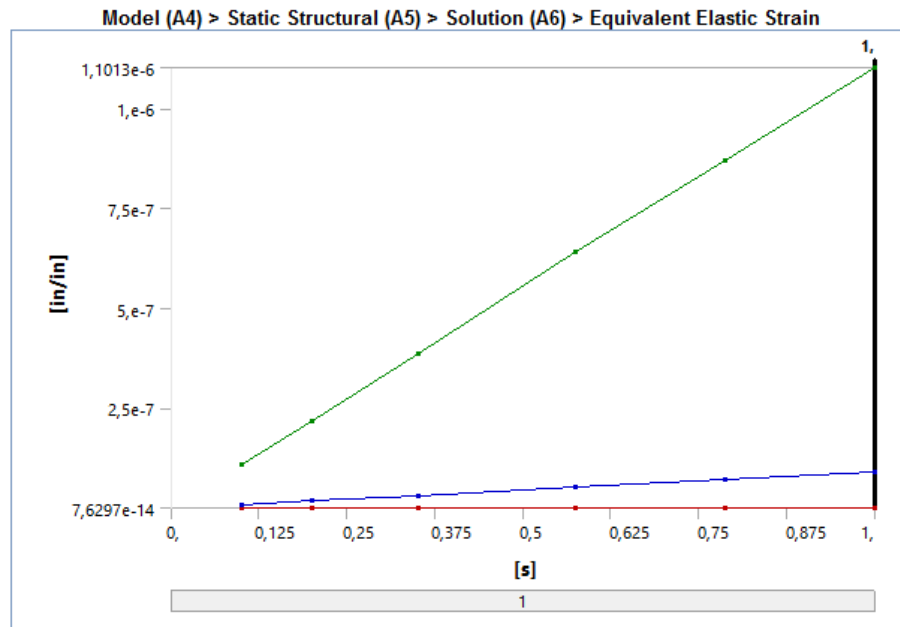
**Tabla 20.** Resultados de la Tensión Elástica Equivalente.

Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Elastic Strain

Time [s]	Minimum [in/in]	Maximum [in/in]	Average [in/in]
0,1	7,6297e-014	1,1013e-007	9,1367e-009
0,2	1,5422e-013	2,1748e-007	1,7734e-008
0,35	3,1594e-013	3,8555e-007	3,0617e-008
0,575	4,3403e-013	6,4038e-007	5,1019e-008
0,7875	5,62e-013	8,7023e-007	7,0579e-008
1,	7,9694e-013	1,1013e-006	8,8318e-008

Fuente: (Mullo P, 2020)

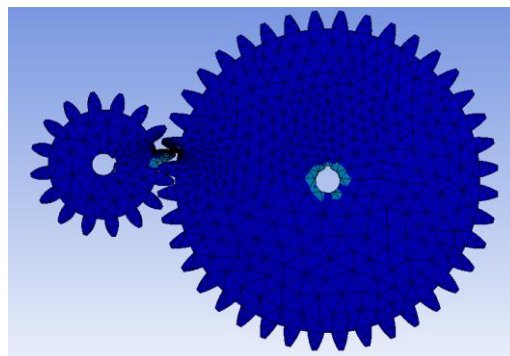




**Gráfico 25:** Gráfica de los Datos de la Tensión Equivalente.  
**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En el gráfico 22 se observa los valores máximos y mínimos de la tensión equivalente que sufre el engrane teniendo así un valor inicial de 0 hasta 0.0000011013 in, así se puede decir que la caja funcionara de manera adecuada sin tener ningún inconveniente.

Estrés Equivalente Engrane N2.



**Imagen 11:** Estrés Equivalente.  
**Fuente:** (Mullo P, 2020)

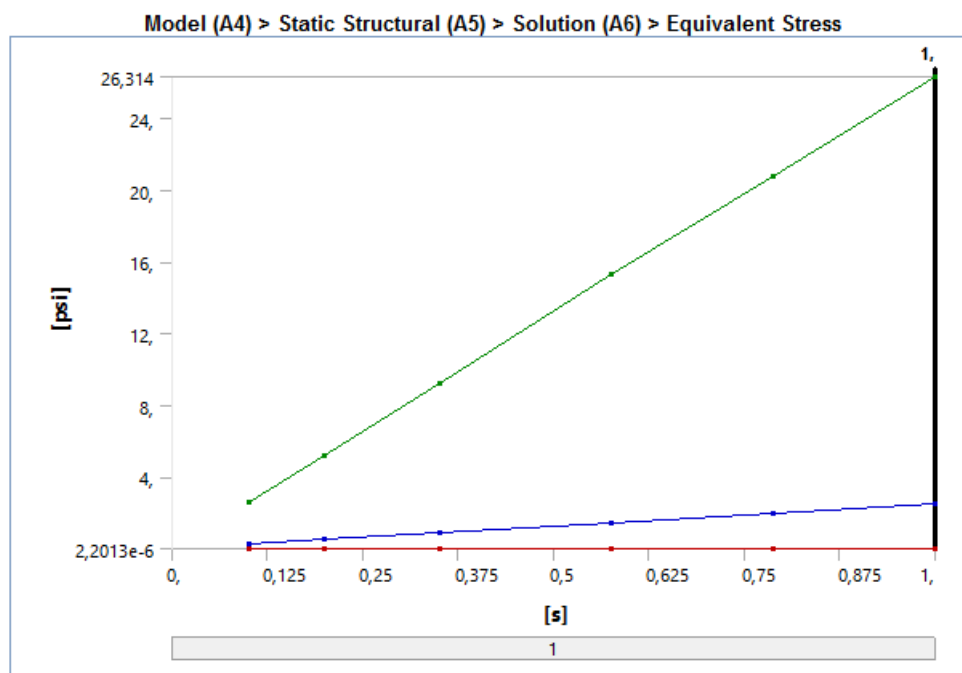
En la imagen 11, se muestra el máximo estrés equivalente del engrane 2 en el análisis estructural del Programa de Ansys.

**Tabla 21.** Resultados Obtenidos del Estrés Equivalente.

Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Stress

Time [s]	Minimum [psi]	Maximum [psi]	Average [psi]
0,1	2,2013e-006	2,6339	0,25496
0,2	4,0287e-006	5,1963	0,4946
0,35	8,3295e-006	9,2107	0,8535
0,575	1,136e-005	15,302	1,4225
0,7875	1,5018e-005	20,8	1,9685
1,	2,0814e-005	26,314	2,4626

*Fuente:* (Mullo P, 2020)



**Gráfico 26:** Gráfica de los Datos del Estrés Equivalente.

*Fuente:* (Mullo P, 2020)

En el gráfico 23 se tiene los datos máximos y mínimos graficados teniendo así valores de 0.0000022013 PSI y 26.314 PSI.

Análisis:

En este análisis estático del engrane N2 se evidencia que los valores obtenidos en la deformación total, tensión elástica y el estrés equivalente son valores bajos, por esta razón la caja multiplicadora es factible, dando así una veracidad a los cálculos realizados y material seleccionado.

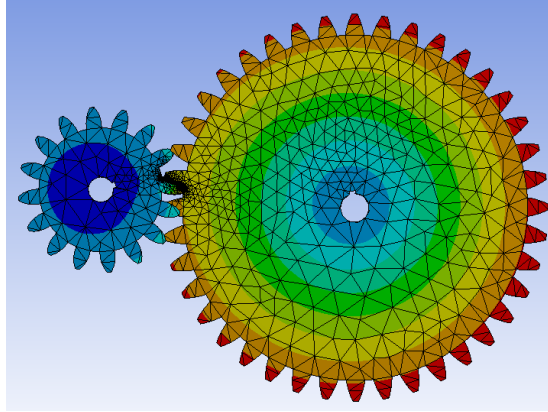
## Análisis Estructural Estática Engrane N3 (Static Structural).

**Tabla 22.** Resultados Generales de la Simulación de Análisis Estructural Estático.

Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Results					
Object Name	Total Deformation	Equivalent Elastic Strain	Equivalent Stress	Equivalent Stress 2	Equivalent Stress 3
State	Solved				
Scope					
Scoping Method	Geometry Selection			Named Selection	
Geometry	All Bodies				
Named Selection				cara	cara2
Definition					
Type	Total Deformation	Equivalent Elastic Strain	Equivalent (von-Mises) Stress		
By	Time				
Display Time	Last				
Calculate Time History	Yes				
Identifier					
Suppressed	No				
Results					
Minimum	0, in	7,9694e-011 in/in	2,0817e-003 psi	28,799 psi	0,25408 psi
Maximum	1,1255e-004 in	1,0986e-004 in/in	2627,6 psi		1354,1 psi
Average	6,6881e-005 in	8,8311e-006 in/in	246,24 psi	394,34 psi	141,61 psi
Minimum Occurs On	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 16T 20PA 3FW — S16N3.0H2.0L1.125S1Keyway	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 40T 20PA 3FW — S40N3.0H2.0L1.25S1Keyway		pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 16T 20PA 3FW — S16N3.0H2.0L1.125S1Keyway	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 40T 20PA 3FW — S40N3.0H2.0L1.25S1Keyway
Maximum Occurs On	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 40T 20PA 3FW — S40N3.0H2.0L1.25S1Keyway	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 16T 20PA 3FW —S16N3.0H2.0L1.125S1Keyway			pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 40T 20PA 3FW — S40N3.0H2.0L1.25S1Keyway
Minimum Value Over Time					
Minimum	0, in	7,6296e-012 in/in	2,2013e-004 psi	4,9843 psi	2,2383e-002 psi
Maximum	0, in	7,9694e-011 in/in	2,0817e-003 psi	28,799 psi	0,25408 psi
Maximum Value Over Time					
Minimum	1,1461e-005 in	1,101e-005 in/in	263,35 psi		130,53 psi
Maximum	1,1255e-004 in	1,0986e-004 in/in	2627,6 psi		1354,1 psi
Information					
Time	1, s				
Load Step	1				
Substep	6				
Iteration Number	11				
Integration Point Results					
Display Option	Averaged				
Average Across Bodies	No				

Fuente: (Mullo P, 2020)

### Deformación Total Engrane N3.



**Imagen 12:** Deformación Total.  
**Fuente:** (Mullo P, 2020)

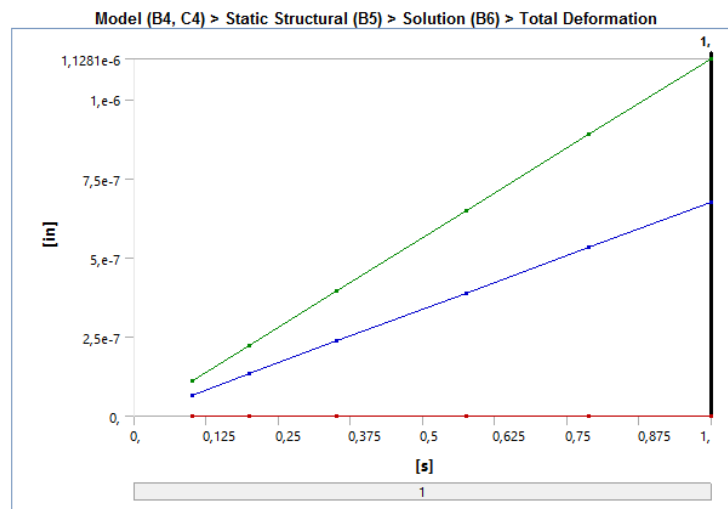
En la imagen 12, se muestra la máxima deformación total del engrane 3 en el análisis estructural del Programa de Ansys.

**Tabla 23.** Resultados de la Deformación Total.

Model (B4, C4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Total Deformation

Time [s]	Minimum [in]	Maximum [in]	Average [in]
0,1	0,	1,0966e-007	6,4985e-008
0,2		2,235e-007	1,334e-007
0,35		3,9451e-007	2,3621e-007
0,575		6,4892e-007	3,8878e-007
0,7875		8,8969e-007	5,3317e-007
1,		1,1281e-006	6,7569e-007

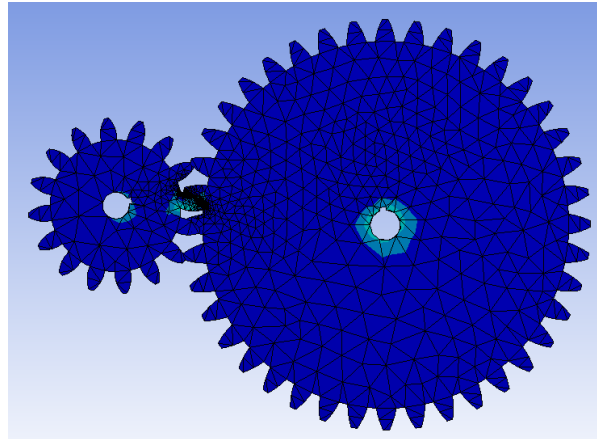
**Fuente:** (Mullo P, 2020)



**Gráfico 27:** Grafica de los Datos de la Deformación Total.  
**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En el gráfico 27 se observa los datos de la deformación total obteniendo así un valor mínimo de 0 y un valor máximo de 0.0000011281 in de deformación en el engrane; estos valores son muy bajos y su deformación es casi nula.

### Tensión Elástica Equivalente Engrane N3.



**Imagen 13:** Tensión Elástica Equivalente.  
**Fuente:** (Mullo P, 2020)

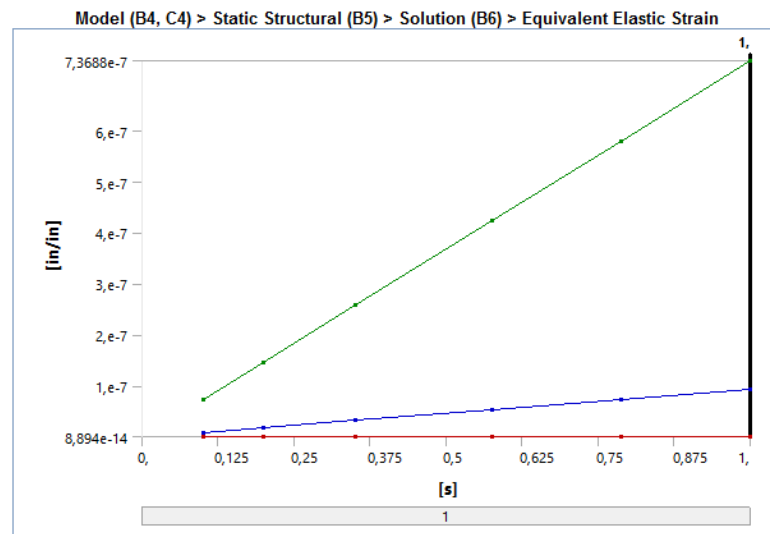
En la imagen 13, se muestra la tensión elástica equivalente del engrane 3 en el análisis estructural del Programa de Ansys.

**Tabla 24.** Resultados de la Tensión Elástica Equivalente.

Model (B4, C4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Equivalent Elastic Strain

Time [s]	Minimum [in/in]	Maximum [in/in]	Average [in/in]
0,1	8,894e-014	7,2113e-008	8,7045e-009
0,2	1,4924e-013	1,4581e-007	1,811e-008
0,35	3,2279e-013	2,5711e-007	3,2339e-008
0,575	5,5775e-013	4,2452e-007	5,3363e-008
0,7875	7,7885e-013	5,802e-007	7,3191e-008
1,	9,5184e-013	7,3688e-007	9,2648e-008

**Fuente:** (Mullo P, 2020)

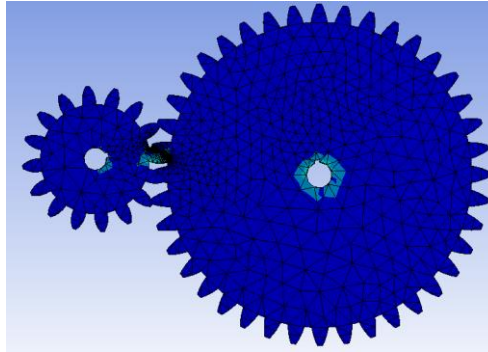


**Gráfico 28:** Grafica de los Datos de la Tensión Equivalente.  
**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En el gráfico 28 se observa los valores máximos y mínimos de la tensión equivalente que sufre el engrane teniendo así un valor inicial de 0.00000008894 in

hasta 0.000000072113 in, estos valores son bajos y se puede decir que no existirá ningún inconveniente con el funcionamiento del multiplicador.

Estrés Equivalente Engrane N3.



**Imagen 14:** Estrés Equivalente.  
**Fuente:** (Mullo P, 2020)

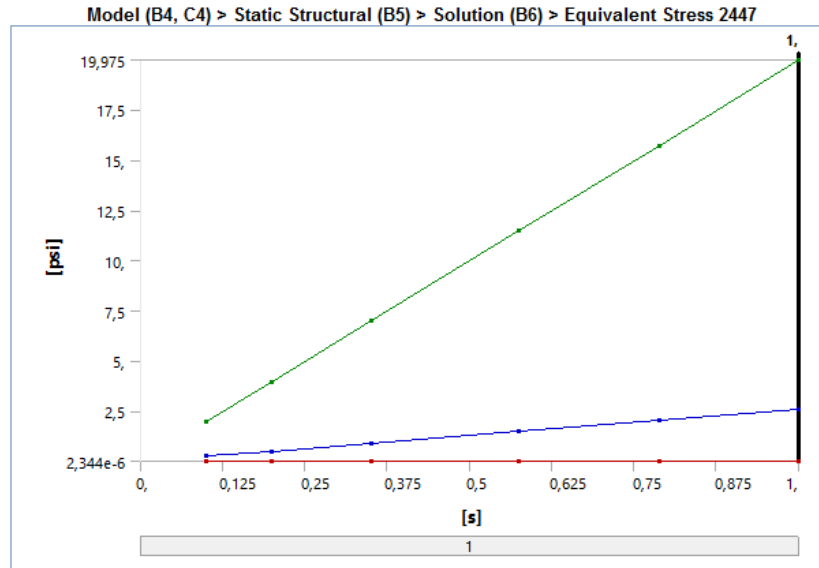
En la imagen 14, se muestra el máximo estrés equivalente del engrane 3 en el análisis estructural del Programa de Ansys.

**Tabla 25.** Resultados Obtenidos del Estrés Equivalente.

Model (B4, C4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Equivalent Stress 2447

Time [s]	Minimum [psi]	Maximum [psi]	Average [psi]
0,1	2,344e-006	1,9601	0,24238
0,2	4,2777e-006	3,9574	0,50461
0,35	9,3633e-006	6,9703	0,90124
0,575	1,6179e-005	11,507	1,487
0,7875	2,2592e-005	15,725	2,0397
1,	2,7611e-005	19,975	2,5818

**Fuente:** (Mullo P, 2020)



**Gráfico 29:** Gráfica de los Datos del Estrés Equivalente.  
**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En el gráfico 29 se tiene los datos máximos y mínimos graficados teniendo así valores de 0.000002344 PSI y 19.975 PSI.

Análisis:

En este análisis estático del engrane N3 se evidencia que los valores obtenidos de deformación total, tensión elástica equivalentes y estrés equivalente son bajos, de lo que se deduce que el material utilizado y los cálculos realizados son correctos, por ende, que funcionalidad de la caja es segura.

## Análisis Transitorio (Transient Structural)

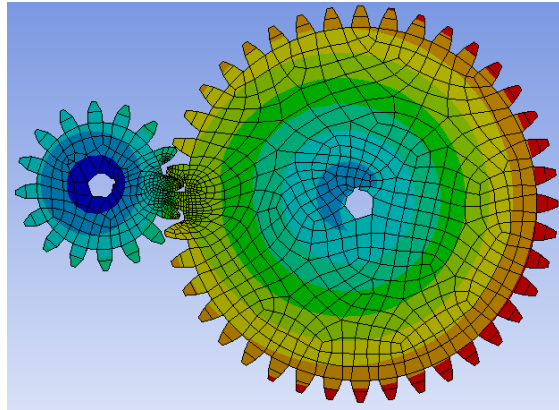
**Tabla 26.** Resultados Generales de la Simulación de Análisis Transitorio.

Model (D4, E4, G4, H4) > Transient (D5) > Solution (D6) > Results		
Object Name	Total Deformation	Equivalent Stress
State	Solved	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	All Bodies	
Definition		
Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Time	
Display Time	Last	
Calculate Time History	Yes	
Identifier		
Suppressed	No	
Results		
Minimum	0, in	1,6823e-003 psi
Maximum	5,73e-005 in	636,67 psi
Average	3,1168e-005 in	50,161 psi
Minimum Occurs On	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 16T 20PA 3FW ---S16N3.0H2.0L1.125S1\Keyway	
Maximum Occurs On	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 40T 20PA 3FW ---S40N3.0H2.0L1.25S1\Keyway	
Minimum Value Over Time		
Minimum	0, in	0, psi
Maximum	0, in	1,6823e-003 psi
Maximum Value Over Time		
Minimum	0, in	0, psi
Maximum	5,73e-005 in	636,67 psi
Information		
Time	61, s	
Load Step	60	
Substep	1	
Iteration Number	61	
Integration Point Results		
Display Option	Averaged	
Average Across Bodies	No	

*Fuente:* (Mullo P, 2020)



Deformación Total.



**Imagen 15:** Deformación Total.

**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En la imagen 15, se muestra la máxima deformación total del tren de engranes en el análisis transitorio del Programa de Ansys.

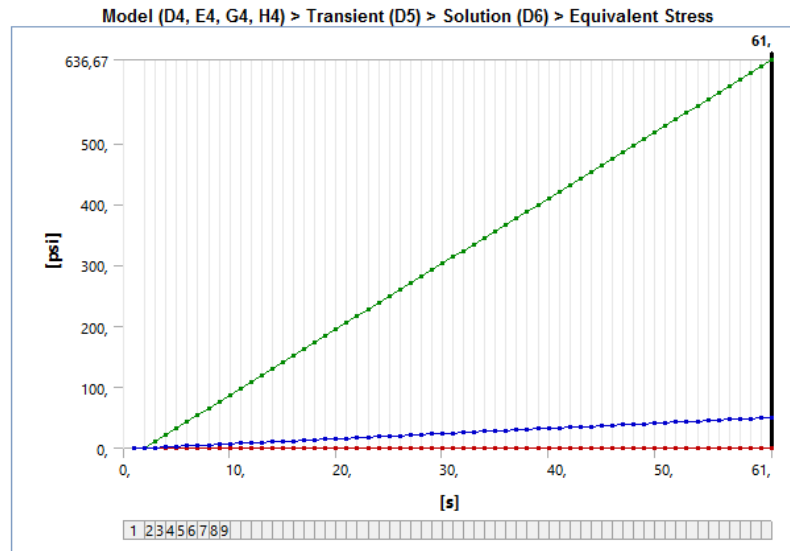
**Tabla 27.** Resultados de la Deformación Total.

Model (D4, E4, G4, H4) > Transient (D5) > Solution (D6) > Total Deformation

Time [s]	Minimum [in]	Maximum [in]	Average [in]
1,		0,	0,
2,			
3,		9,7119e-007	5,2827e-007
4,		1,9424e-006	1,0565e-006
5,		2,9136e-006	1,5848e-006
6,		3,8848e-006	2,1131e-006
7,		4,856e-006	2,6413e-006
8,		5,8272e-006	3,1696e-006
9,		6,7984e-006	3,6979e-006
10,		7,7696e-006	4,2261e-006
11,		8,7407e-006	4,7544e-006
12,		9,7119e-006	5,2827e-006
13,		1,0683e-005	5,8109e-006
14,		1,1654e-005	6,3392e-006
15,		1,2626e-005	6,8675e-006
16,		1,3597e-005	7,3957e-006
17,		1,4568e-005	7,924e-006
18,		1,5539e-005	8,4523e-006
19,		1,651e-005	8,9805e-006
20,		1,7481e-005	9,5088e-006
21,		1,8453e-005	1,0037e-005
22,		1,9424e-005	1,0565e-005
23,		2,0395e-005	1,1094e-005
24,		2,1366e-005	1,1622e-005
25,		2,2337e-005	1,215e-005
26,		2,3309e-005	1,2678e-005
27,		2,428e-005	1,3207e-005
28,		2,5251e-005	1,3735e-005
29,		2,6222e-005	1,4263e-005
30,		2,7193e-005	1,4791e-005

31,	0,	2,8165e-005	1,532e-005
32,		2,9136e-005	1,5848e-005
33,		3,0107e-005	1,6376e-005
34,		3,1078e-005	1,6905e-005
35,		3,2049e-005	1,7433e-005
36,		3,3021e-005	1,7961e-005
37,		3,3992e-005	1,8489e-005
38,		3,4963e-005	1,9018e-005
39,		3,5934e-005	1,9546e-005
40,		3,6905e-005	2,0074e-005
41,		3,7877e-005	2,0602e-005
42,		3,8848e-005	2,1131e-005
43,		3,9819e-005	2,1659e-005
44,		4,079e-005	2,2187e-005
45,		4,1761e-005	2,2715e-005
46,		4,2733e-005	2,3244e-005
47,		4,3704e-005	2,3772e-005
48,		4,4675e-005	2,43e-005
49,		4,5646e-005	2,4829e-005
50,		4,6617e-005	2,5357e-005
51,		4,7588e-005	2,5885e-005
52,		4,856e-005	2,6413e-005
53,		4,9531e-005	2,6942e-005
54,		5,0502e-005	2,747e-005
55,		5,1473e-005	2,7998e-005
56,		5,2444e-005	2,8526e-005
57,		5,3416e-005	2,9055e-005
58,		5,4387e-005	2,9583e-005
59,		5,5358e-005	3,0111e-005
60,		5,6329e-005	3,0639e-005
61,		5,73e-005	3,1168e-005

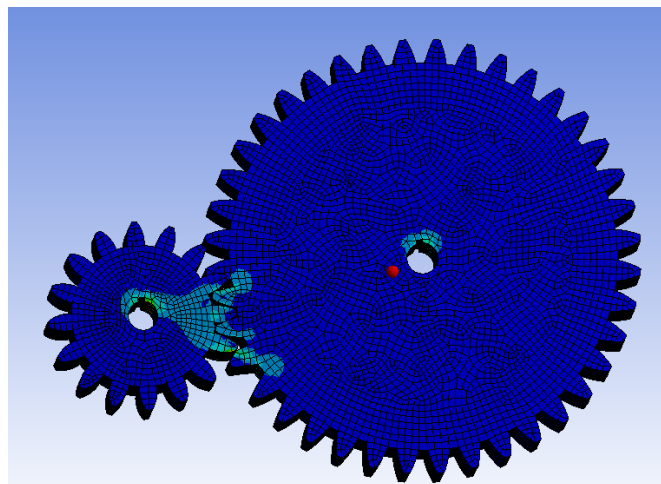
**Fuente:** (Mullo P, 2020)



**Gráfico 30:** Gráfica de los Datos de la Deformación Total.  
**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En el gráfico 30 se observa la distribución de los valores máximos y mínimos del análisis de la deformación total, evaluado en los 61 puntos programados teniendo valores de 0 y 0.0000573 in, estos valores son bajos por lo cual la caja podrá funcionar de la mejor manera.

Estrés Equivalente.



**Imagen 16:** Estrés Equivalente.  
**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En la imagen 16, se muestra el estrés equivalente del tren de engranes en el análisis transitorio del Programa de Ansys.

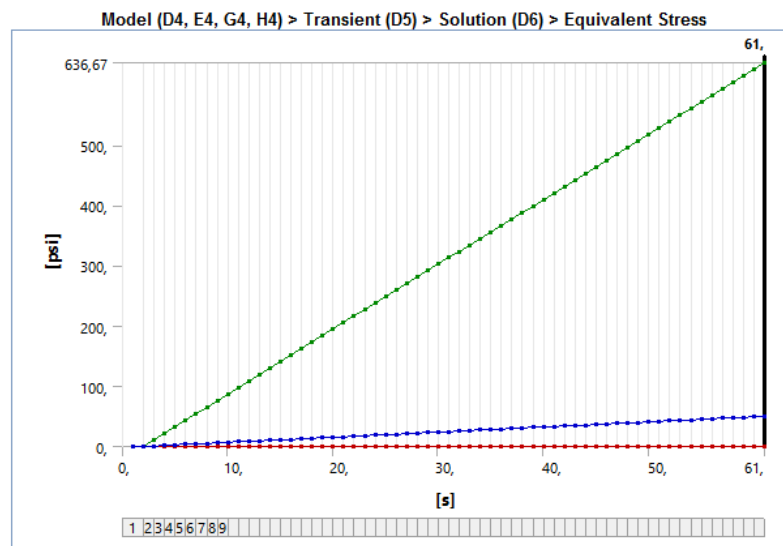
**Tabla 28. Resultados del Estrés Equivalente.**

**Model (D4, E4, G4, H4) > Transient (D5) > Solution (D6) > Equivalent Stress**

Time [s]	Minimum [psi]	Maximum [psi]	Average [psi]
1,	0,	0,	0,
2,			
3,	2,8514e-005	10,791	0,85019
4,	5,7029e-005	21,582	1,7004
5,	8,5543e-005	32,373	2,5506
6,	1,1406e-004	43,164	3,4008
7,	1,4257e-004	53,955	4,251
8,	1,7108e-004	64,746	5,1011
9,	1,996e-004	75,537	5,9513
10,	2,281e-004	86,328	6,8015
11,	2,5663e-004	97,119	7,6517
12,	2,8514e-004	107,91	8,5019
13,	3,1366e-004	118,7	9,3521
14,	3,4216e-004	129,49	10,202
15,	3,7069e-004	140,28	11,052
16,	3,992e-004	151,07	11,903
17,	4,2771e-004	161,87	12,753
18,	4,5623e-004	172,66	13,603
19,	4,8474e-004	183,45	14,453
20,	5,1326e-004	194,24	15,303
21,	5,4175e-004	205,03	16,154
22,	5,7028e-004	215,82	17,004
23,	5,9879e-004	226,61	17,854
24,	6,2729e-004	237,4	18,704
25,	6,5583e-004	248,19	19,554
26,	6,8433e-004	258,98	20,405
27,	7,1286e-004	269,78	21,255
28,	7,4137e-004	280,57	22,105
29,	7,6986e-004	291,36	22,955
30,	7,9837e-004	302,15	23,805
31,	8,2691e-004	312,94	24,656
32,	8,5543e-004	323,73	25,506
33,	8,8392e-004	334,52	26,356
34,	9,1246e-004	345,31	27,206
35,	9,4095e-004	356,1	28,056
36,	9,6948e-004	366,89	28,906

37,	9,98e-004	377,69	29,757
38,	1,0265e-003	388,48	30,607
39,	1,055e-003	399,27	31,457
40,	1,0835e-003	410,06	32,307
41,	1,1121e-003	420,85	33,157
42,	1,1406e-003	431,64	34,008
43,	1,1691e-003	442,43	34,858
44,	1,1976e-003	453,22	35,708
45,	1,2261e-003	464,01	36,558
46,	1,2546e-003	474,81	37,408
47,	1,2831e-003	485,6	38,259
48,	1,3117e-003	496,39	39,109
49,	1,3402e-003	507,18	39,959
50,	1,3687e-003	517,97	40,809
51,	1,3972e-003	528,76	41,659
52,	1,4257e-003	539,55	42,51
53,	1,4542e-003	550,34	43,36
54,	1,4827e-003	561,13	44,21
55,	1,5113e-003	571,92	45,06
56,	1,5398e-003	582,72	45,91
57,	1,5683e-003	593,51	46,76
58,	1,5968e-003	604,3	47,611
59,	1,6253e-003	615,09	48,461
60,	1,6538e-003	625,88	49,311
61,	1,6823e-003	636,67	50,161

*Fuente: (Mullo P, 2020)*



**Gráfico 31:** Grafica de los Datos del Estrés Equivalente.

*Fuente: (Mullo P, 2020)*

En el gráfico 31 se observa los valores graficados de los 61 valores mínimos y máximos teniendo así 0 PSI y 636.67 PSI, estos valores comparados con los demás son más altos pero la resistencia del AISI 1020 es de 68000 PSI.

#### Análisis:

Este análisis transitorio funciona para resolver una ecuación de movimiento siendo alentadores los valores obtenidos en la deformación total, y estrés equivalente ya que sus valores son bajos, lo que significa que al trasladar este análisis al armónico no va a existir ningún tipo de inconvenientes con su resolución.

En la solución generada por ANSYS se puede evidenciar que esta parte de la caja podrá generar 250 rpm.

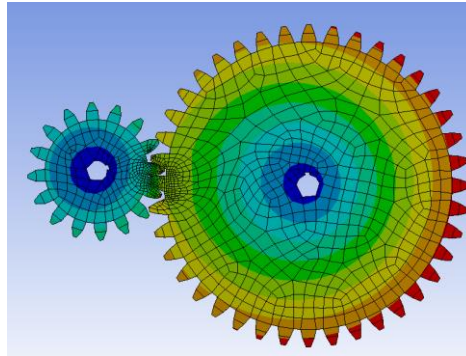
## Respuesta Armónica (Hermonic Response)

**Tabla 29.** *Resultados Generales de la Simulación de Respuesta Armónica.*

Model (D4, E4, G4, H4) > Harmonic Response 2 (H5) > Solution (H6) > Results		
Object Name	Equivalent Stress	Total Deformation
State	Solved	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	All Bodies	
Definition		
Type	Equivalent (von-Mises) Stress	Total Deformation
By	Frequency	
Frequency	Last	
Amplitude	No	
Sweeping Phase	0, °	
Identifier		
Suppressed	No	
Integration Point Results		
Display Option	Averaged	
Average Across Bodies	No	
Results		
Minimum	1,8782e-003 psi	0, in
Maximum	5,8909 psi	6,7529e-007 in
Average	0,48265 psi	3,5933e-007 in
Minimum Occurs On	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 16T 20PA 3FW ---S16N3.0H2.0L1.125S1\Keyway	
Maximum Occurs On	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 16T 20PA 3FW ---S16N3.0H2.0L1.125S1\Keyway	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 40T 20PA 3FW ---S40N3.0H2.0L1.25S1\Keyway
Information		
Reported Frequency	300, Hz	

*Fuente: (Mullo P, 2020)*

Deformación total.



**Imagen 17:** Deformación Total.  
Fuente: (Mullo P, 2020)

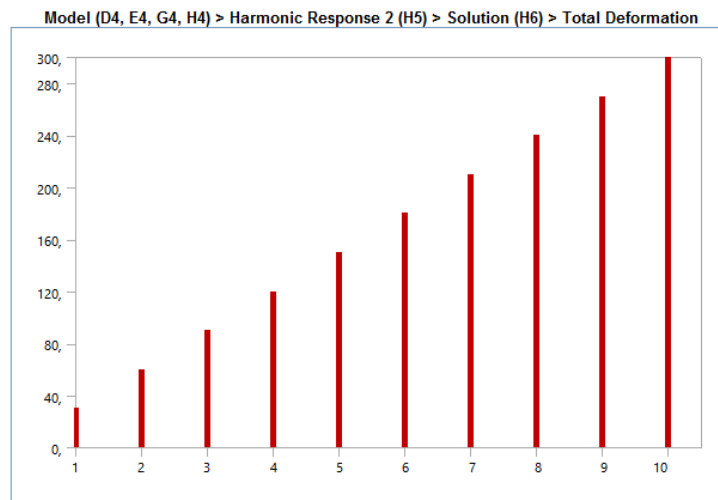
En la imagen 17, se muestra la deformación total del tren de engranes en la respuesta armónica del Programa de Ansys.

**Tabla 30.** Niveles de Frecuencia Utilizados.

Model (D4, E4, G4, H4) > Harmonic Response 2 (H5) > Solution (H6) > Total Deformation

Set	Frequency [Hz]
1,	30,
2,	60,
3,	90,
4,	120,
5,	150,
6,	180,
7,	210,
8,	240,
9,	270,
10,	300,

Fuente: (Mullo P, 2020)

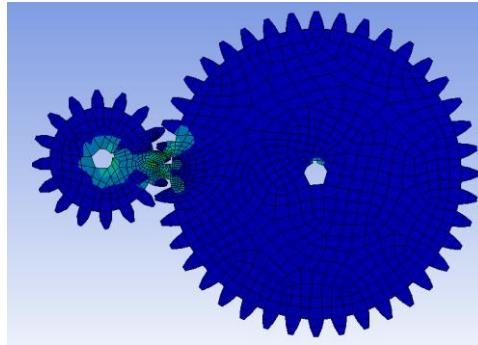


**Gráfico 32:** Gráfica de los Valores obtenidos en la Deformación Total Armónica.  
Fuente: (Mullo P, 2020)

En el gráfico 32 se muestran los valores máximos y mínimos de la frecuencia trabajada en 10 mediciones.



Estrés Equivalente.



**Imagen 18:** Estrés Equivalente.

**Fuente:** (Mullo P, 2020)

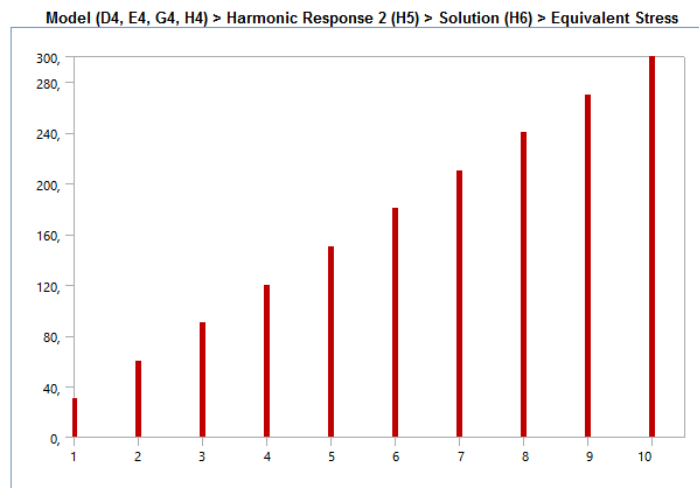
En la imagen 18, se muestra el estrés equivalente del tren de engranes en la respuesta armónica del Programa de Ansys.

**Tabla 31.** Niveles de Frecuencia Utilizados.

Model (D4, E4, G4, H4) > Harmonic Response 2 (H5) > Solution (H6) > Equivalent Stress

Set	Frequency [Hz]
1,	30,
2,	60,
3,	90,
4,	120,
5,	150,
6,	180,
7,	210,
8,	240,
9,	270,
10,	300,

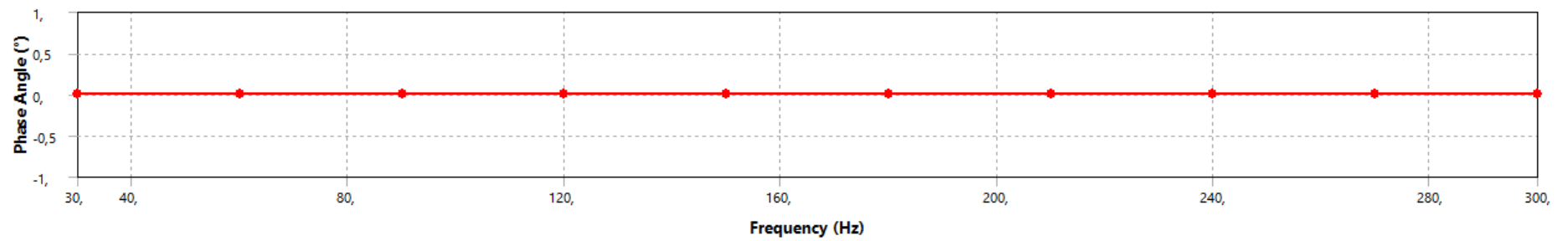
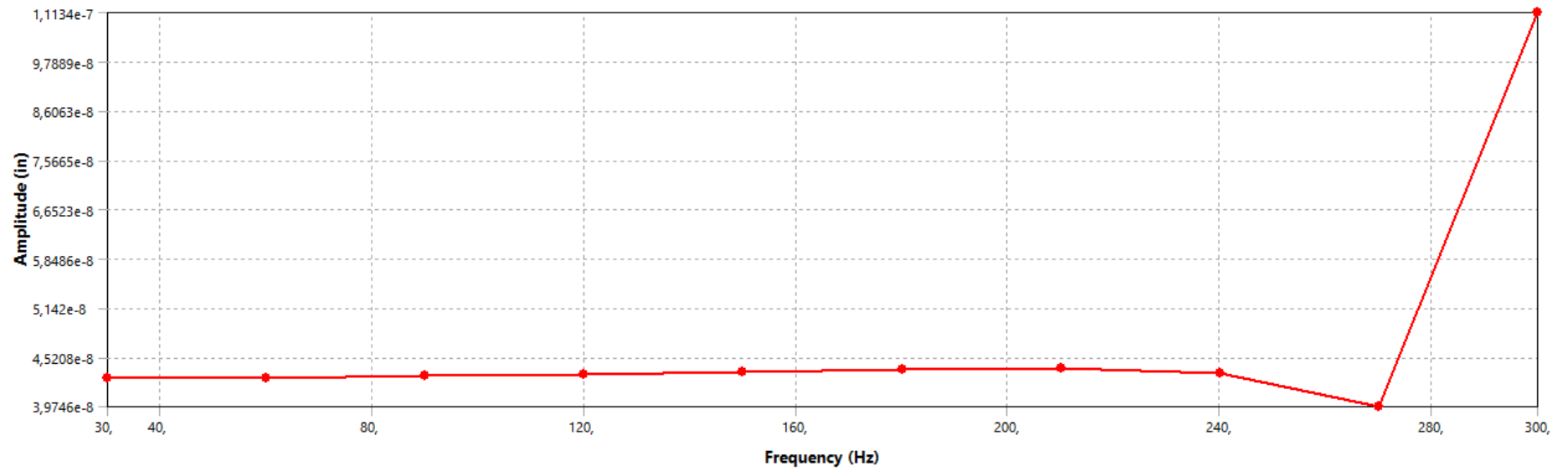
**Fuente:** (Mullo P, 2020)



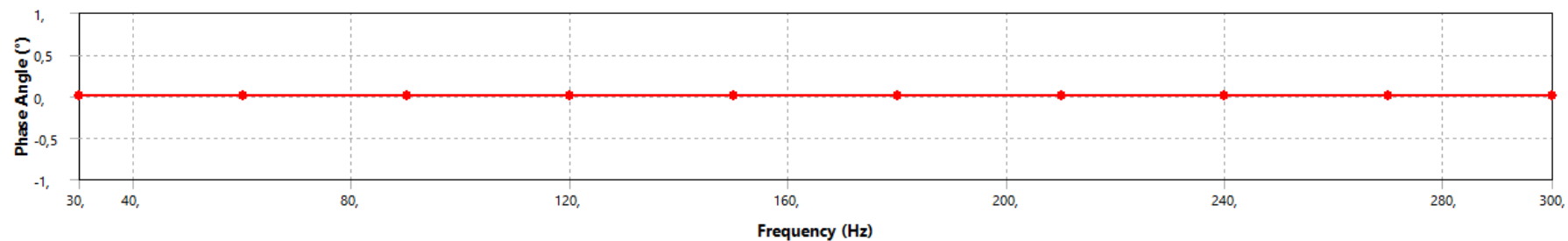
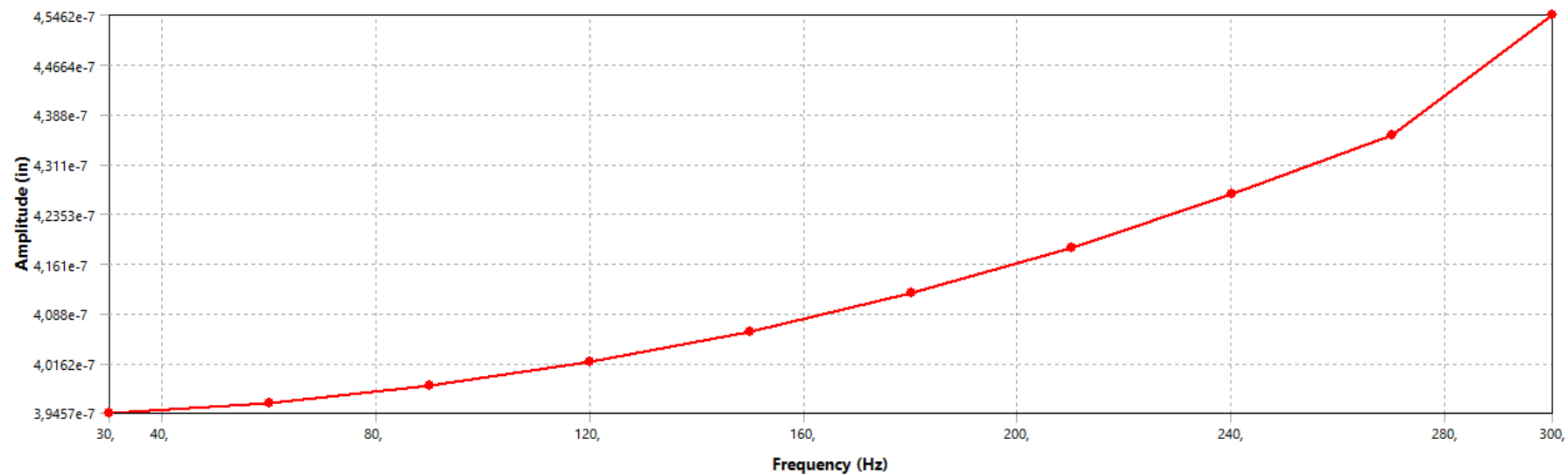
**Gráfico 33:** Gráfica de los valores obtenidos en el Estrés Equivalente Armónico.

**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En el gráfico 33 se muestran los valores de las 10 mediciones hasta llegar a 300 Hz.



**Gráfico 34:** Grafica de las Frecuencias en el Engrane 2.  
**Fuente:** (Mullo P, 2020)



*Gráfico 35: Grafica de las Frecuencias en el Engrane 3.  
Fuente: (Mullo P, 2020)*

En los gráficos 34 y 35 se evidencia el comportamiento del engrane vs la frecuencia, comenzando desde un valor de 0 Hz hasta llegar a 300 Hz, se puede decir que el comportamiento de los dos engranes son diferentes ya que el engrane 2 se mantiene casi constante hasta los 240 Hz para después incrementar drásticamente su valor y su amplitud. En cambio, en el engrane 3 su comportamiento es progresivo si la frecuencia aumenta igual su amplitud.

#### Análisis:

Para la simulación armónica se utilizó diferentes valores de frecuencia hasta llegar a 300 Hz, es ahí donde se evidencia que existe diferentes tipos de resistencia a la amplitud en los engranes, esto se da debido al tamaño del engrane, con esto se evidencia que su funcionamiento a 60 Hz no va a hacer ningún problema para que le cause daño a la caja multiplicadora, lo que prueba que la fabricación de esta caja brindara garantías en su funcionamiento.

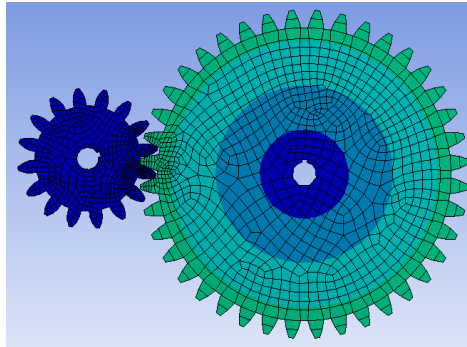
## Dinámica Explícita (Explicit Dynamics).

**Tabla 32.** Resultados Generales de la Simulación Dinámica.

Model (F 4) > Explicit Dynamics (F 5) > Solution (F 6) > Results					
Object Name	Total Deformation	Equivalent Stress	Equivalent Stress 2	Equivalent Stress 3	Shear Stress
State	Solved				
Scope					
Scoping Method	Geometry Selection		Named Selection		Geometry Selection
Geometry	All Bodies				All Bodies
Named Selection			Contact N2	Contact N3	
Definition					
Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress			Shear Stress
By	Time				
Display Time	Last				
Calculate Time History	Yes				
Identifier					
Suppressed	No				
Orientation					XY Plane
Coordinate System					Global Coordinate System
Results					
Minimum	0, in	0, psi	261,34 psi	0, psi	-17913 psi
Maximum	3,0947e-003 in	40307 psi	10611 psi	0, psi	17068 psi
Average	7,2378e-004 in	10768 psi	3475,1 psi	0, psi	24,858 psi
Minimum Occurs On	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 16T 20PA 3FW -- S16N3.0H2.0L1.125S1Keyway		pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 40T 20PA 3FW -- S40N3.0H2.0L1.25S1Keyway		pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 40T 20PA 3FW -- S40N3.0H2.0L1.25S1Keyway
Maximum Occurs On	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 40T 20PA 3FW --S40N3.0H2.0L1.25S1Keyway			pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 16T 20PA 3FW -- S16N3.0H2.0L1.125S1Keyway	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 40T 20PA 3FW -- S40N3.0H2.0L1.25S1Keyway
Minimum Value Over Time					
Minimum	0, in	0, psi			-23983 psi
Maximum	0, in	0, psi	1410,5 psi	0, psi	
Maximum Value Over Time					
Minimum	0, in	0, psi			
Maximum	3,0947e-003 in	47400 psi	43663 psi	0, psi	24059 psi
Information					
Time	1,4605e-005 s				
Set	4				
Cycle Number	100				
Integration Point Results					
Display Option		Averaged			

*Fuente: (Mullo P, 2020)*

Deformación total.



**Imagen 19:** Deformación Total.

**Fuente:** (Mullo P, 2020)

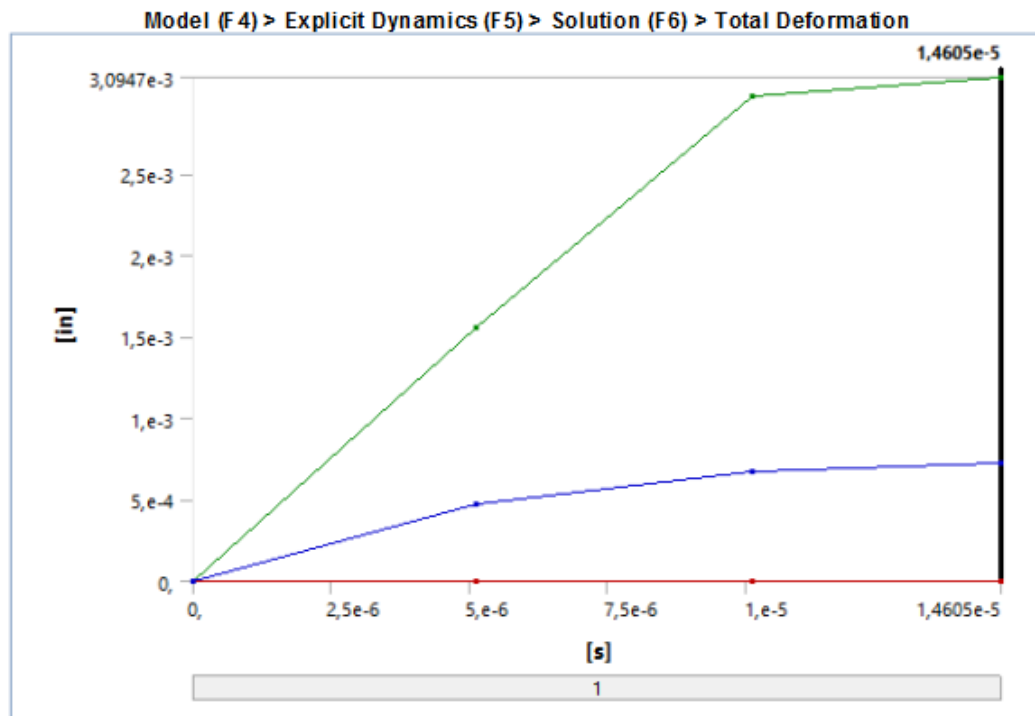
En la imagen 19, se muestra la deformación total del tren de engranes en el análisis dinámico del Programa de Ansys.

**Tabla 33.** Resultados Obtenidos de la Deformación Total.

Model (F4) > Explicit Dynamics (F5) > Solution (F6) > Total Deformation

Time [s]	Minimum [in]	Maximum [in]	Average [in]
1,1755e-038			
5,1316e-006		1,5624e-003	4,689e-004
1,0101e-005	0,	2,9781e-003	6,7548e-004
1,4605e-005		3,0947e-003	7,2378e-004

**Fuente:** (Mullo P, 2020)

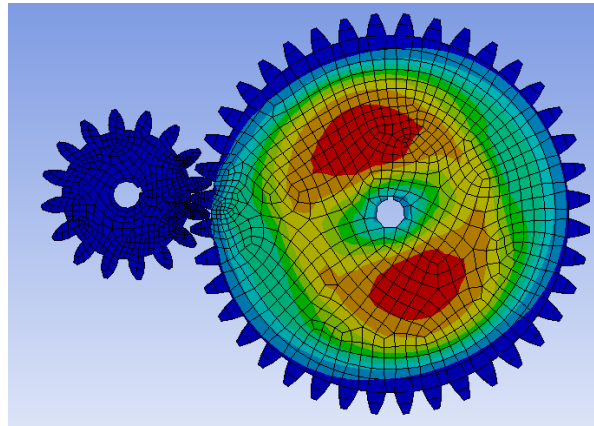


**Gráfico 36:** Grafica de la Deformación Total.

**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En el gráfico 36 se puede evidenciar la gráfica de la deformación total teniendo un valor mínimo de 0 y un valor máximo de 0.003094 in; al igual que los demás casos esta deformación es muy baja.

Estrés Equivalente.



**Imagen 20:** Estrés Equivalente.

*Fuente:* (Mullo P, 2020)

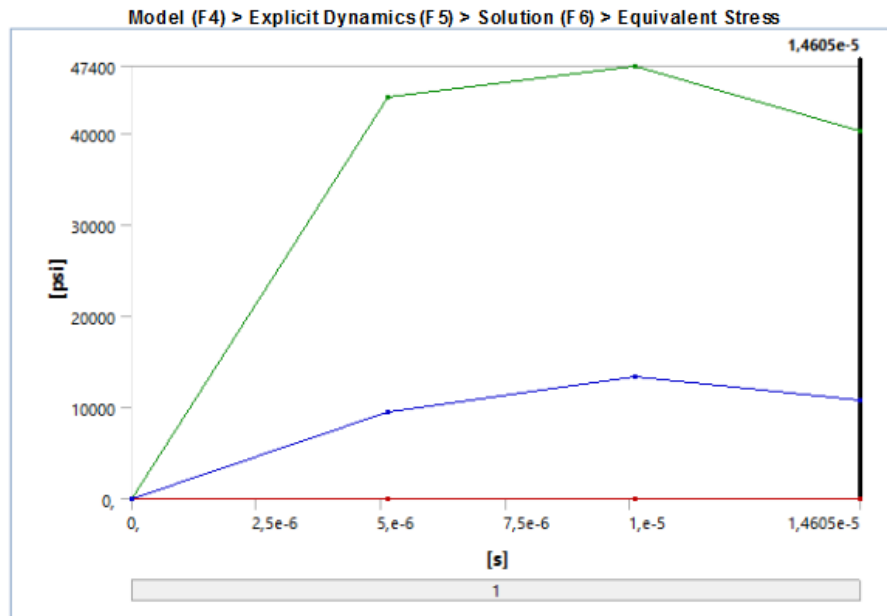
En la imagen 20, se muestra la tensión elástica equivalente del tren de engranes en el análisis dinámico del Programa de Ansys.

**Tabla 34.** Resultados Obtenidos de la Estrés Equivalente.

Model (F4) > Explicit Dynamics (F5) > Solution (F6) > Equivalent Stress

Time [s]	Minimum [psi]	Maximum [psi]	Average [psi]
1,1755e-038			
5,1316e-006	0,	44062	9503,1
1,0101e-005		47400	13325
1,4605e-005		40307	10768

*Fuente:* (Mullo P, 2020)

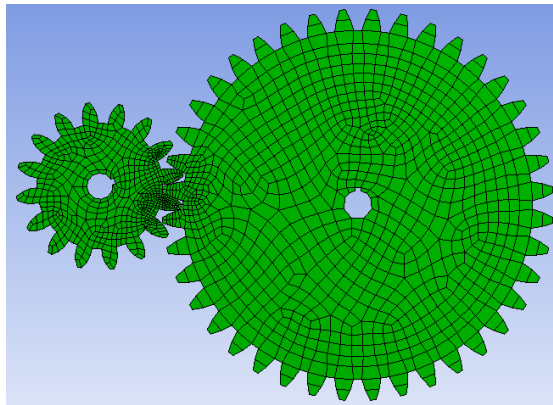


**Gráfico 37:** Gráfica del Estrés Equivalente.

**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En el gráfico 37 el estrés equivalente se grafica sus valores mínimos y máximos teniendo así 0 y 47400 PSI.

Máxima Tensión de Corte.



**Imagen 21:** Máxima Tensión de Corte.

**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En la imagen 21, se muestra la máxima tensión de corte del tren de engranes en el análisis dinámico del Programa de Ansys.

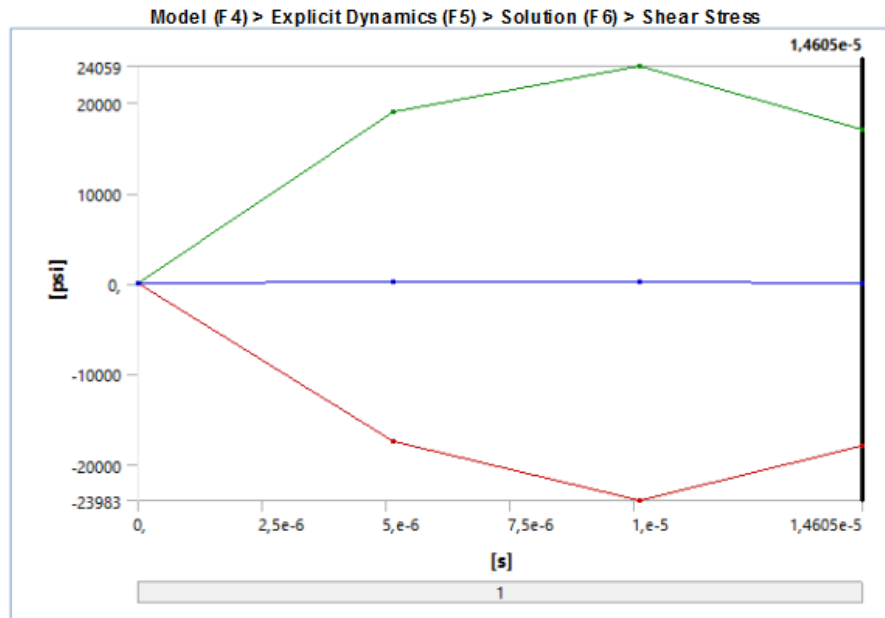
**Tabla 35.** Resultados Obtenidos de la Máxima Tensión de Corte.

**Model (F4) > Explicit Dynamics (F5) > Solution (F6) > Shear Stress**

Time [s]	Minimum [psi]	Maximum [psi]	Average [psi]
1,1755e-038			
5,1316e-006	-17408	18997	170,06
1,0101e-005	-23983	24059	168,25
1,4605e-005	-17913	17068	24,858

**Fuente:** (Mullo P, 2020)





**Gráfico 38:** Gráfica de la Máxima Tensión de Corte.

**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En la gráfica 38 se observa la máxima tensión de corte teniendo valores máximos y mínimos, 24059 PSI y -23983 PSI.

#### Análisis:

En la simulación dinámica se trabajó con 100 rpm que se tiene de la salida de la mini turbina, teniendo así resultados de deformación, tensión elástica equivalente y máxima tensión de corte bajos, debido a que las cargas iniciales ingresadas desde el análisis estático son bajas, y como resultado tenemos que la caja multiplicadora funcionando a los parámetros descritos anteriormente en esta investigación es factible y se garantiza su vida útil, al igual que su funcionalidad correcta.

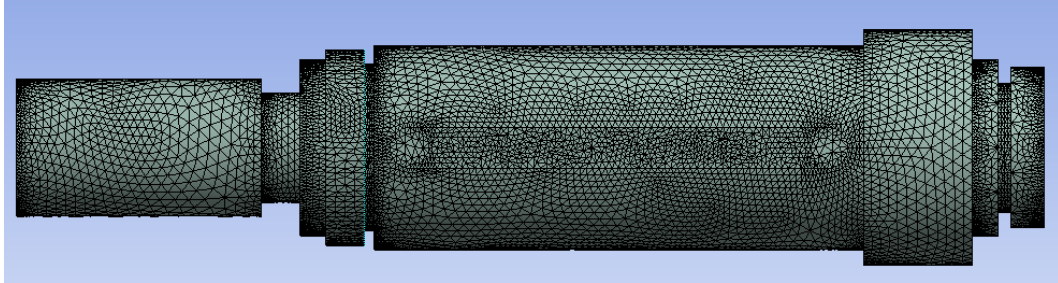
Para los engranes N4 y N5 se realizó el mismo análisis, revisar anexo 35

### **Análisis en ANSYS de las Flechas.**

Para el estudio de las flechas se utilizó un acero AISI 1020, los datos de este material están expuestos en las tablas 8 – 11.

Para el mallado de esta flecha se utilizó los siguientes parámetros dados ya por el programa.

Este mallado será ocupado en la flecha 1 y flecha 3 ya que son iguales geométricamente.



***Imagen 22:** Flecha con el Mallado Respectivo.*

***Fuente:** (Mullo P, 2020)*

En la imagen 22, se muestra el mallado con el cual se trabajará para los análisis de la flecha 1 del Programa de Ansys.

**Tabla 36.** *Datos del Mallado Respectivo.*

Model (A4, B4) > Mesh	
Object Name	Mesh
State	Solved
Display	
Display Style	Use Geometry Setting
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
Element Size	Default
Sizing	
Use Adaptive Sizing	Yes
Resolution	Default (2)
Mesh Defeaturing	Yes
Defeature Size	Default
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Initial Size Seed	Assembly
Bounding Box Diagonal	6,621 in
Average Surface Area	1,0475 in <sup>2</sup>
Minimum Edge Length	4,7372e-002 in
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Standard Mechanical
Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	None
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Advanced	
Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Topology Checking	Yes
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No
Statistics	
Nodes	102190
Elements	51315

*Fuente:* (Mullo P, 2020)

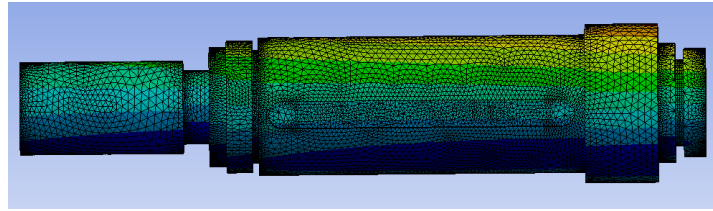
Análisis Estructural Estática Flecha 1 (Static Structural).

**Tabla 37.** Resultados Generales de la Simulación de Análisis Estructural Estático.

Model (A4, B4) > Static Structural 2 (B5) > Loads				
Object Name	Moment F	Moment F 2	Moment T	Moment T 2
State	Fully Defined			
Scope				
Scoping Method	Geometry Selection			
Geometry	1 Face			
Definition				
Type	Moment			
Define By	Components			
Coordinate System	Global Coordinate System			
X Component	0, lbf-in (ramped)		10,313 lbf-in (ramped)	-10,313 lbf-in (ramped)
Y Component	0, lbf-in (ramped)			
Z Component	6,6555 lbf-in (ramped)	-6,6555 lbf-in (ramped)	0, lbf-in (ramped)	
Suppressed	No			
Behavior	Deformable			
Advanced				
Pinball Region	All			

*Fuente: (Mullo P, 2020)*

### Deformación Total Flecha 1.



**Imagen 23:** Deformación Total Flecha 1.

*Fuente:* (Mullo P, 2020)

En la imagen 23, se muestra la deformación total de la flecha 1 en el análisis estático calculada con el momento Torsor y flector del Programa de Ansys.

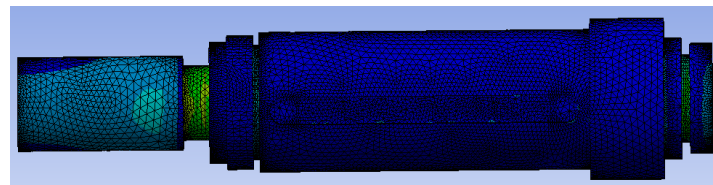
**Tabla 38.** Resultados Obtenidos de la Deformación Total.

**Model (A4, B4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation**

Time [s]	Minimum [in]	Maximum [in]	Average [in]
0,1	0,54901	5,7523	2,5739
0,2	1,098	11,505	5,1478
0,5	2,745	28,761	12,87
1,	5,4901	57,523	25,739

*Fuente:* (Mullo P, 2020)

### Estrés Equivalente Flecha 1.



**Imagen 24:** Estrés Equivalente Flecha 1.

*Fuente:* (Mullo P, 2020)

En la imagen 24, se muestra el estrés equivalente de la flecha 1 en el análisis estático calculada con el momento Torsor y flector del Programa de Ansys.

**Tabla 39.** Resultados Obtenidos del Estrés Equivalente.

**Model (A4, B4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Stress**

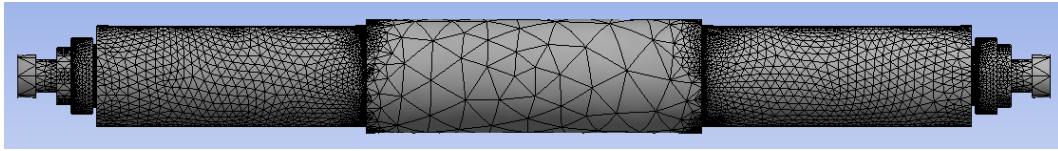
Time [s]	Minimum [psi]	Maximum [psi]	Average [psi]
0,1	1,012e-002	154,97	15,409
0,2	2,0241e-002	309,94	30,819
0,5	5,0609e-002	774,86	77,047
1,	0,10122	1549,7	154,09

*Fuente:* (Mullo P, 2020)

### Análisis:

Para esta flecha 1 los resultados arrojados por el programa son positivos ya que las cargas ingresadas son bajas y el funcionamiento de este será el adecuado, por lo tanto, en su uso brindará seguridad de funcionalidad.

Datos del mallado de la flecha 2.



***Imagen 25:** Mallado de la Flecha 2.*  
***Fuente:** (Mullo P, 2020)*

En la imagen 25, se muestra el mallado con el cual se trabajará para los análisis de la flecha 2 del Programa de Ansys.

**Tabla 40.** *Datos del Mallado Generado.*

<b>Model (C4) &gt; Mesh</b>	
Object Name	Mesh
State	Solved
<b>Display</b>	
Display Style	Use Geometry Setting
<b>Defaults</b>	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
Element Size	Default
<b>Sizing</b>	
Use Adaptive Sizing	Yes
Resolution	Default (2)
Mesh Defeaturing	Yes
Defeature Size	Default
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Initial Size Seed	Assembly
Bounding Box Diagonal	11,659 in
Average Surface Area	1,1703 in <sup>2</sup>
Minimum Edge Length	4,5938e-002 in
<b>Quality</b>	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Standard Mechanical
Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	None
<b>Inflation</b>	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
<b>Advanced</b>	
Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Topology Checking	Yes
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No
<b>Statistics</b>	
Nodes	85873
Elements	43268

*Fuente: (Mullo P, 2020)*

Análisis Estructural Estática Flecha 2 (Static Structural).

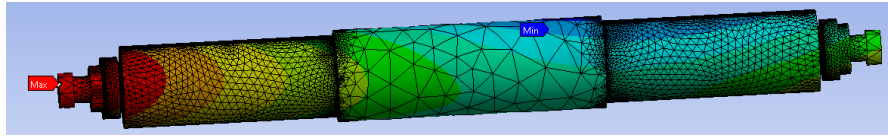
**Tabla 41.** Resultados Generales del análisis Estructural Estático de la flecha 2.

Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > Results		
Object Name	Total Deformation	Equivalent Stress
State	Solved	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	All Bodies	
Definition		
Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Time	
Display Time	Last	
Calculate Time History	Yes	
Identifier		
Suppressed	No	
Results		
Minimum	2,1085e-002 in	0,32008 psi
Maximum	9,5498e-002 in	1533,2 psi
Average	5,6968e-002 in	60,482 psi
Minimum Occurs On	Flecha_2_Solido-FreeParts	
Maximum Occurs On	Flecha_2_Solido-FreeParts	
Information		
Time	1, s	
Load Step	1	
Substep	1	
Iteration Number	1	
Integration Point Results		
Display Option		Averaged
Average Across Bodies		No

*Fuente: (Mullo P, 2020)*



## Deformación Total Flecha 2.



**Imagen 26:** Deformación Total Flecha 2.  
**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En la imagen 26, se muestra la deformación total de la flecha 2 en el análisis estático calculada con el momento Torsor y flector del Programa de Ansys.

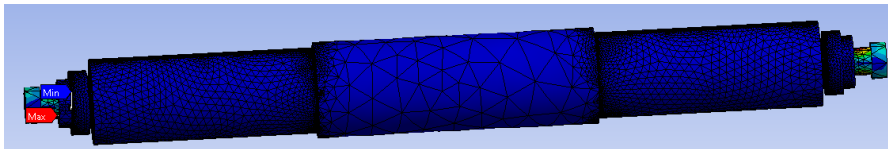
**Tabla 42.** Resultados de la Deformación Total Flecha 2.

**Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > Total Deformation**

Time [s]	Minimum [in]	Maximum [in]	Average [in]
1,	2,1085e-002	9,5498e-002	5,6968e-002

**Fuente:** (Mullo P, 2020)

## Estrés Equivalente Flecha 2.



**Imagen 27:** Estrés Equivalente Flecha 2.  
**Fuente:** (Mullo P, 2020)

En la imagen 27, se muestra el estrés equivalente de la flecha 2 en el análisis estático calculada con el momento Torsor y flector del Programa de Ansys

**Tabla 43.** Resultados del Estrés Equivalente.

**Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > Equivalent Stress**

Time [s]	Minimum [psi]	Maximum [psi]	Average [psi]
1,	0,32008	1533,2	60,482

**Fuente:** (Mullo P, 2020).

## Análisis:

En el análisis de la flecha 2 se observa que los valores de la deformación como del estrés equivalente son bajos es por esto que se concluye que el material utilizado es idóneo y su funcionamiento en conjunto con toda la caja multiplicadora será óptimo.

Para la flecha tres los resultados se encuentran en el anexo 36.

**Resumen:****Tabla 44.** Resumen del Análisis Estructural Engranés.

<b>Análisis Estructural Estática (Static Structural).</b>				
	N2	N3	N4	N5
<b>Deformación Total</b>	0 – 1.125 X 10 <sup>-6</sup> in	0 – 1.1281 X 10 <sup>-6</sup> in	0 – 4.502 X 10 <sup>-5</sup> in	0 – 4.5131 X 10 <sup>-5</sup> in
<b>Estrés Equivalente</b>	2.2013 X 10 <sup>-6</sup> – 26.314 PSI	2.344 X 10 <sup>-6</sup> – 19.975 PSI	8.8051 X 10 <sup>-5</sup> – 105.9 PSI	9.3775 X 10 <sup>-5</sup> – 799.07 PSI

*Fuente:* (Mullo P, 2020).**Tabla 45:** Resumen del Análisis Transitorio por Trenes.

<b>Análisis Transitorio (Transient Structural).</b>		
<b>Tren 1</b>	Deformación Total	0 – 5.73 X 10 <sup>-5</sup> in
	Estrés Equivalente	1.6823 X 10 <sup>-3</sup> – 636.67 PSI
<b>Tren 2</b>	Deformación Total	0 – 2.291 X 10 <sup>-5</sup> in
	Estrés Equivalente	6.729 X 10 <sup>-4</sup> – 254.66 PSI

*Fuente:* (Mullo P, 2020).**Tabla 46:** Resumen del Análisis Armónico por Trenes.

<b>Respuesta Armónica (Hermonic Response).</b>		
<b>Tren 1</b>	Deformación Total	0 – 6.7529 X 10 <sup>-3</sup> in
	Estrés Equivalente	1.8782 X 10 <sup>-3</sup> – 5.8909 PSI
<b>Tren 2</b>	Deformación Total	0 – 5.806 X 10 <sup>-5</sup> in
	Estrés Equivalente	9.151 X 10 <sup>-3</sup> – 637.81 PSI

*Fuente:* (Mullo P, 2020).**Tabla 47:** Resumen Dinámica Explícita por Trenes.

<b>Dinámica Explícita (Explicit Dynamics).</b>		
<b>Tren 1</b>	Deformación Total	0 – 3.0947 X 10 <sup>-5</sup> in
	Estrés Equivalente	0 – 40307 PSI
<b>Tren 2</b>	Deformación Total	0 – 1.0406 X 10 <sup>-2</sup> in
	Estrés Equivalente	0 – 21838 PSI

*Fuente:* (Mullo P, 2020).**Tabla 48:** Resumen del Análisis Estructural de las Flechas

<b>Análisis Estructural Estática Flecha (Static Structural).</b>			
	Flecha 1	Flecha 2	Flecha 3
<b>Deformación Total</b>	0.549 – 57.523 in	2.108 X 10 <sup>-2</sup> – 9.5498 X 10 <sup>-2</sup> in	5.477 X 10 <sup>-3</sup> – 8.3721 X 10 <sup>-2</sup> in
<b>Estrés Equivalente</b>	0.01012 – 1549.7 PSI	0.32 – 1533.2 PSI	0.1961 – 699.74 PSI

*Fuente:* (Mullo P, 2020).

Al analizar los valores detallados en las tablas 44 – 48 se puede decir que la caja multiplicadora va a resistir el esfuerzo creado por este sistema de energía renovable,

teniendo así valores alentadores en sus deformaciones y estrés equivalente; de esta manera se garantiza el correcto funcionamiento de este sistema, así como también una larga vida útil.

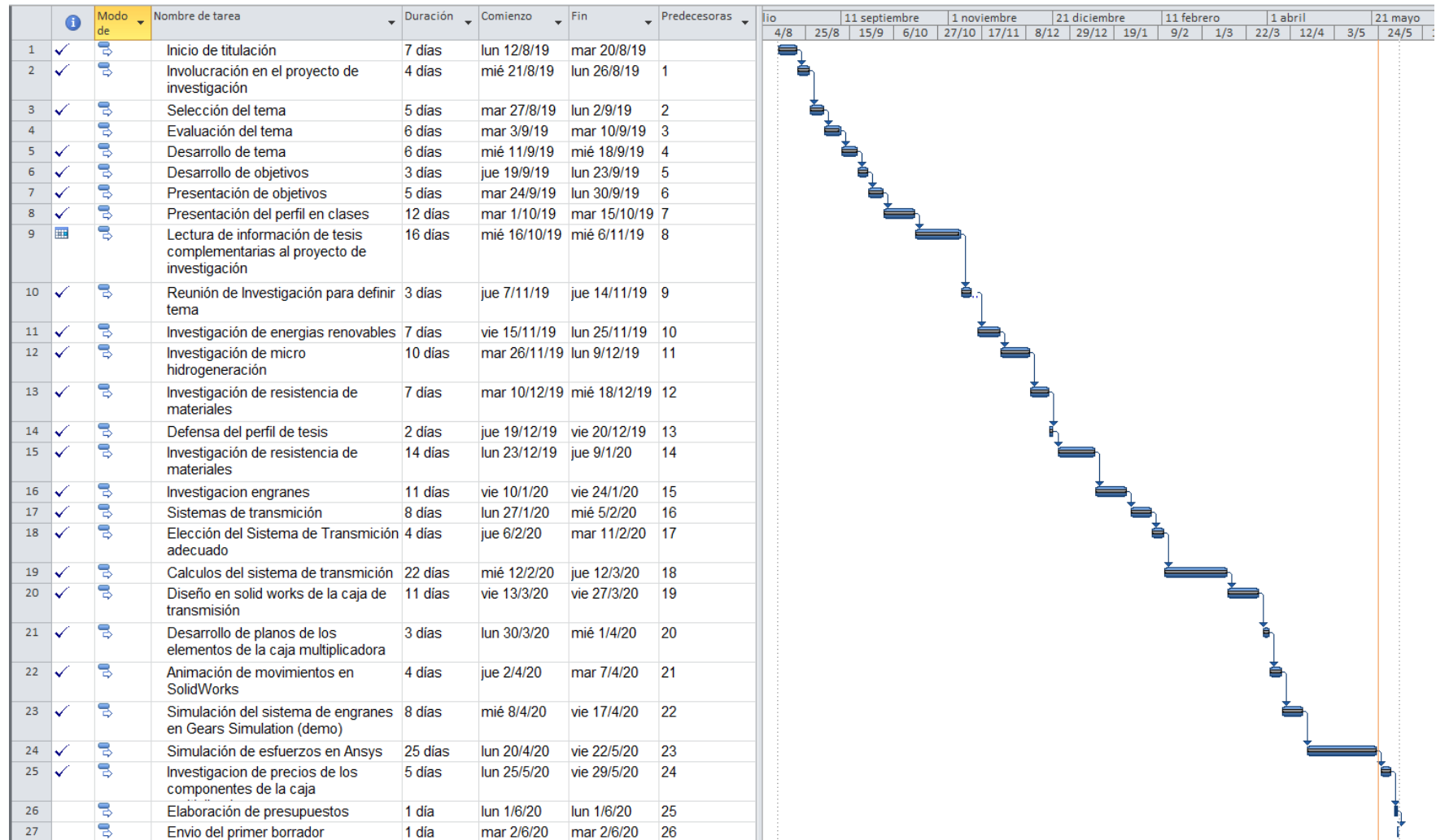
### **Lubricación.**

Para la lubricación se decidió por un aceite API GL2 debido a que las velocidades de la caja son bajas al igual que su torque, para lograr optimizar la lubricación se podría utilizar inhibidores contra la corrosión, antiespumante y aditivos para mejorar el punto mínimo de fluidez.

Nuestra caja multiplicadora tiene un volumen total de 29.05 L, así que es necesario un total de 17 L para que la caja este totalmente lubricada y no tenga ningún problema de funcionamiento.

### **Cronograma de actividades:**

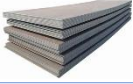

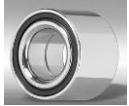
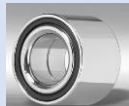







**Tabla 49. Cronograma de Actividades.**



*Fuente: (Mullo P, 2020)*

### Análisis de Costos.

**Tabla 50.** *Análisis de Costo de los Componentes.*

<b>Caja Multiplicadora</b>					
<b>Cantidad</b>	<b>Componente</b>	<b>Imagen</b>	<b>Material</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Precio Total</b>
<b>1</b>	Plancha de acero de 5mm		AISI 1020	\$ 35,00	\$ 35,00
<b>2</b>	Eje de acero		AISI 1020	\$ 42,00	\$ 84,00
<b>4</b>	Rodamiento AFBMA 12,2 - 1,0625 - 1,3125 - 0,1562 - 40, SI, NC, 40		Acero Inoxidable (X65Cr14)	\$ 18,00	\$ 72,00
<b>2</b>	Rodamiento AFBMA 12,2 - 0,625 - 0,8750 - 0,1562 - 26, SI, NC, 26		Acero Inoxidable (X65Cr14)	\$ 9,00	\$ 18,00
<b>2</b>	Anillo de retención B27,1 - NA2 -125a		Acero al Carbono	\$ 5,75	\$ 11,50
<b>2</b>	Anillo de retención B27,1 - NA1 -81		Acero al Carbono	\$ 4,00	\$ 8,00
<b>2</b>	Anillo de retención B27,1 - NA1 - 43		Acero al Carbono	\$ 3,80	\$ 7,60
<b>4</b>	Anillo de retención B27,1 - NA2 -112		Acero al Carbono	\$ 5,25	\$ 21,00
<b>2</b>	Engranaje 2,5 DP 40T 20PA 3FW-S40N3,0H2,0L1.25S1		AISI 1020	\$ 190,00	\$ 380,00
<b>2</b>	Engranaje 2,5 DP 16T 20PA 3FW-S16N3,0H2,0L1.125S1		AISI 1020	\$ 110,00	\$ 220,00
<b>1</b>	Tapón SSCONESLT 0,75 - 16x00,75-N		AISI 316	\$ 2,00	\$ 2,00
<b>2</b>	Platina de 5 mm		AISI 1020	\$ 8,00	\$ 16,00
					\$ 875,10

*Fuente: (Mullo P, 2020)*

**Tabla 51.** *Costo Total.*

<b>Descripción</b>	<b>Costo</b>
<b>Materiales</b>	\$ 875,10
<b>Total hora máquina</b>	\$ 250,00
<b>Mano de Obra</b>	\$ 72,40
<b>Total</b>	\$ 1.197,50

*Fuente: (Mullo P, 2020)*

## **CAPITULO IV**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **Conclusiones:**

- Se caracterizó el recurso hidráulico del canal y se determinó que la sección tres del canal es la más eficiente, debido a que la velocidad es la más alta y su caudal es de  $1.35 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- Se realizó un análisis matemático de los engranes, flechas, rodamientos, anillos de retención y cuñas, teniendo como resultado valores que cumplen la condición de resistencia del diseño. Además, se modeló todos los componentes en el programa SolidWorks.
- Se realizó un análisis cinemático del multiplicador de revoluciones en Gears Simulation teniendo como resultado 625 rpm. Este resultado coincide con las mismas revoluciones que se calculó teóricamente a la salida del multiplicador, de esta manera se comprobó que los cálculos realizados son correctos.
- Se desarrollaron simulaciones dinámicas y estáticas de los componentes del multiplicador en el software ANSYS, teniendo como resultado que los componentes cumplen con las condiciones de resistencia.
- Finalmente, con la simulación del multiplicador de revoluciones se pudo comprobar que es posible optimizar el sistema de generación de electricidad adecuando la velocidad angular de entrada del generador por medio de una caja de multiplicación de revoluciones.

**Recomendaciones:**

- Analizar sitios del canal en donde se puedan implementar nuevos sistemas de generación.
- En el análisis matemático se recomienda utilizar las fórmulas de diseño en ingeniería mecánica, debido a que este posee ecuaciones AGMA que garanticen los resultados.
- En cuanto a las simulaciones de ANSYS se recomienda tener en cuenta el mallado ya que de este dependerá el tiempo de análisis y el resultado más apegado a la realidad.
- Para las futuras investigaciones de esta caja multiplicadora se recomienda prototipar y desarrollar ensayos.

## ANEXOS

Condición	A	B	C
Engranajes abiertos	0.247	0.0167	$-0.765(10^{-4})$
Unidades comerciales, cerradas	0.127	0.0158	$-0.930(10^{-4})$
Unidades de precisión, cerradas	0.0675	0.0128	$-0.926(10^{-4})$
Unidades de precisión extrema, cerradas	0.00360	0.0102	$-0.822(10^{-4})$

\*Vea la norma ANSI/AGMA 2101-D04, pp. 20-22, para formular en unidades SI.

**Anexo 1:** Constantes empíricas A, B y C de la ecuación 16, ancho de la cara F en pulgadas.

**Fuente:** (Douglas y Monel, 2008).

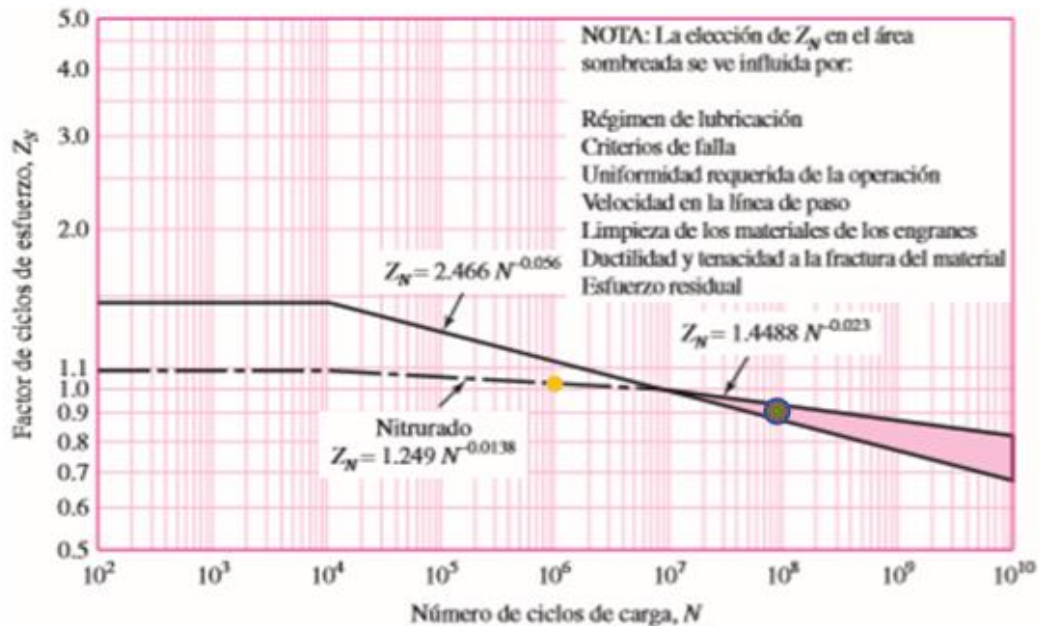
Material del piñón	Módulo de elasticidad del piñón $E_p$ , psi (MPa)*	Material y módulo de elasticidad de la corona $E_w$ , lbf/pulg <sup>2</sup> (MPa)*					
		Acero $30 \times 10^6$ ( $2 \times 10^5$ )	Hierro maleable $25 \times 10^6$ ( $1.7 \times 10^5$ )	Hierro nodular $24 \times 10^6$ ( $1.7 \times 10^5$ )	Hierro fundido $22 \times 10^6$ ( $1.5 \times 10^5$ )	Bronce al aluminio $17.5 \times 10^6$ ( $1.2 \times 10^5$ )	Bronce al estaño $16 \times 10^6$ ( $1.1 \times 10^5$ )
Acero	$30 \times 10^6$ ( $2 \times 10^5$ )	2 300 (191)	2 180 (181)	2 160 (179)	2 100 (174)	1 950 (162)	1 900 (158)
Hierro maleable	$25 \times 10^6$ ( $1.7 \times 10^5$ )	2 180 (181)	2 090 (174)	2 070 (172)	2 020 (168)	1 900 (158)	1 850 (154)
Hierro nodular	$24 \times 10^6$ ( $1.7 \times 10^5$ )	2 160 (179)	2 070 (172)	2 050 (170)	2 000 (166)	1 880 (156)	1 830 (152)
Hierro fundido	$22 \times 10^6$ ( $1.5 \times 10^5$ )	2 100 (174)	2 020 (168)	2 000 (166)	1 960 (163)	1 850 (154)	1 800 (149)
Bronce al aluminio	$17.5 \times 10^6$ ( $1.2 \times 10^5$ )	1 950 (162)	1 900 (158)	1 880 (156)	1 850 (154)	1 750 (145)	1 700 (141)
Bronce al estaño	$16 \times 10^6$ ( $1.1 \times 10^5$ )	1 900 (158)	1 850 (154)	1 830 (152)	1 800 (149)	1 700 (141)	1 650 (137)

Relación de Poisson = 0.30.

\*Cuando se obtienen valores del módulo de elasticidad más exactos mediante pruebas de contacto con rodillo, se pueden utilizar.

**Anexo 2:** Coeficiente elástico.

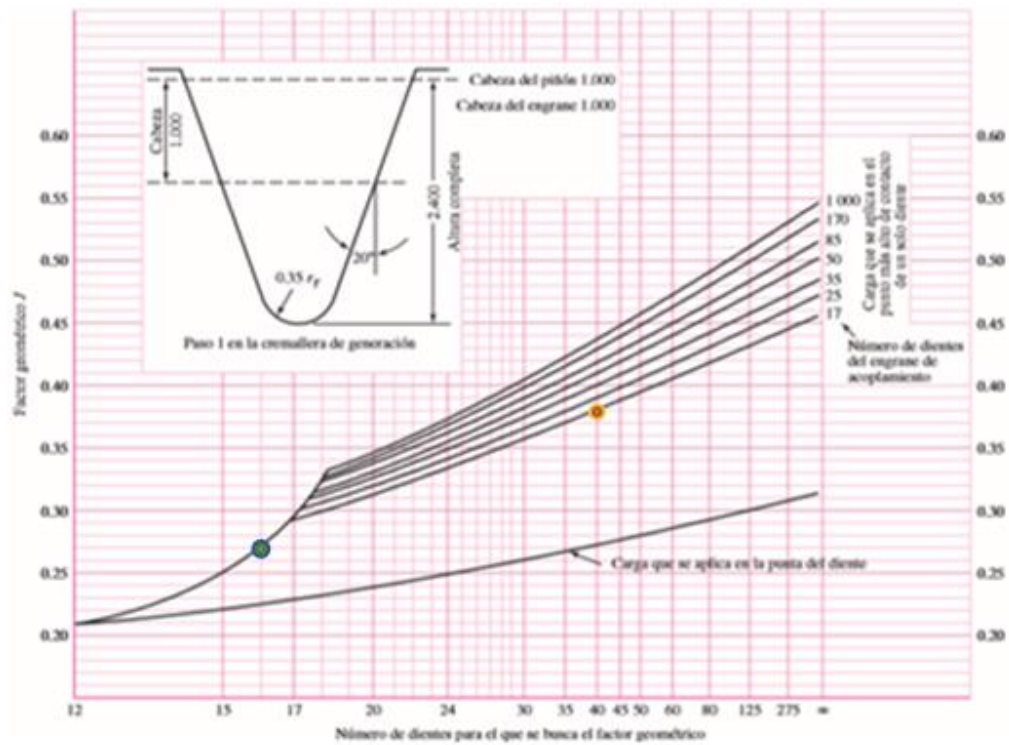
**Fuente:** (Douglas y Monel, 2008).



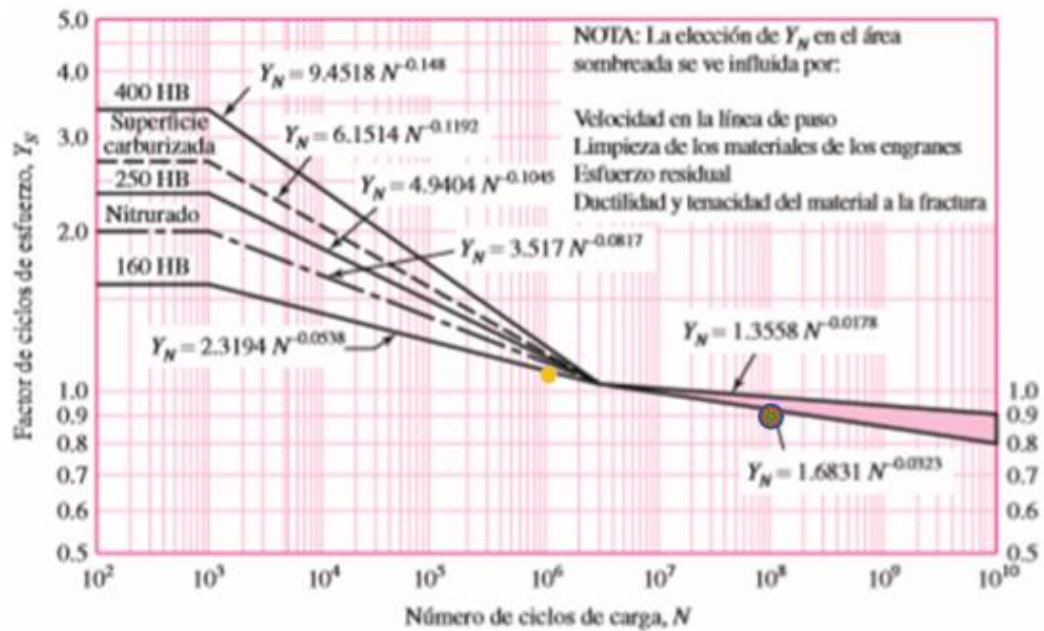
**Anexo 3:** Factor de ciclos de esfuerzos de resistencia a la picadura  $Z_N$ .

**Fuente:** (Douglas y Monel, 2008).





**Anexo 4:** Factores geométricos  $J$  de engranes rectos.  
**Fuente:** (Douglas y Monel, 2008)



**Anexo 5:** Factor de ciclos de esfuerzo repetidamente aplicadas de resistencia a la flexión  $Y_N$ .  
**Fuente:** (Douglas y Monel, 2008)

	Flexión	Torsión	Axial
Filete de hombro: agudo ( $r/d = 0.02$ )	2.7	2.2	3.0
Filete de hombro: bien redondeado ( $r/d = 0.1$ )	1.7	1.5	1.9
Cuñero fresado ( $r/d = 0.02$ )	2.2	3.0	—
Cuñero de patín o trapezoidal	1.7	—	—
Ranura para anillo de retención	5.0	3.0	5.0

Los valores faltantes en la tabla no pueden obtenerse con facilidad.

**Anexo 6:** Estimaciones de los Factores de Concentración de Esfuerzo.

**Fuente:** (Douglas y Monel, 2008)

1	2	3	4	5	6	7	8
UNS núm.	SAE y/o AISI núm.	Procesamiento	Resistencia a la tensión, MPa (kpsi)	Resistencia a la fluencia, MPa (kpsi)	Elongación en 2 pulg. %	Reducción en área, %	Dureza Brinell
G10060	1006	HR	300 (43)	170 (24)	30	55	86
		CD	330 (48)	280 (41)	20	45	95
G10100	1010	HR	320 (47)	180 (26)	28	50	95
		CD	370 (53)	300 (44)	20	40	105
G10150	1015	HR	340 (50)	190 (27.5)	28	50	101
		CD	390 (56)	320 (47)	18	40	111
G10180	1018	HR	400 (58)	220 (32)	25	50	116
		CD	440 (64)	370 (54)	15	40	126
G10200	1020	HR	380 (55)	210 (30)	25	50	111
		CD	470 (68)	390 (57)	15	40	131
G10300	1030	HR	470 (68)	260 (37.5)	20	42	137
		CD	520 (76)	440 (64)	12	35	149
G10350	1035	HR	500 (72)	270 (39.5)	18	40	143
		CD	550 (80)	460 (67)	12	35	163
G10400	1040	HR	520 (76)	290 (42)	18	40	149
		CD	590 (85)	490 (71)	12	35	170
G10450	1045	HR	570 (82)	310 (45)	16	40	163
		CD	630 (91)	530 (77)	12	35	179
G10500	1050	HR	620 (90)	340 (49.5)	15	35	179
		CD	690 (100)	580 (84)	10	30	197
G10600	1060	HR	680 (98)	370 (54)	12	30	201
G10800	1080	HR	770 (112)	420 (61.5)	10	25	229
G10950	1095	HR	830 (120)	460 (66)	10	25	248

**Anexo 7:** Resistencias Mínimas a la Tensión y a la Fluencia ASTM.

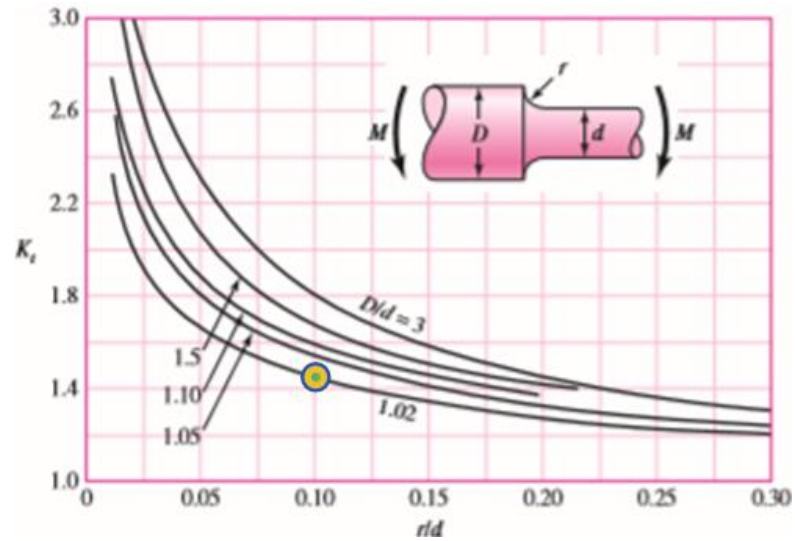
**Fuente:** (Douglas y Monel, 2008)

Acabado superficial	Factor $a$		Exponente $b$
	$S_{ut}$ kpsi	$S_{ut}$ MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

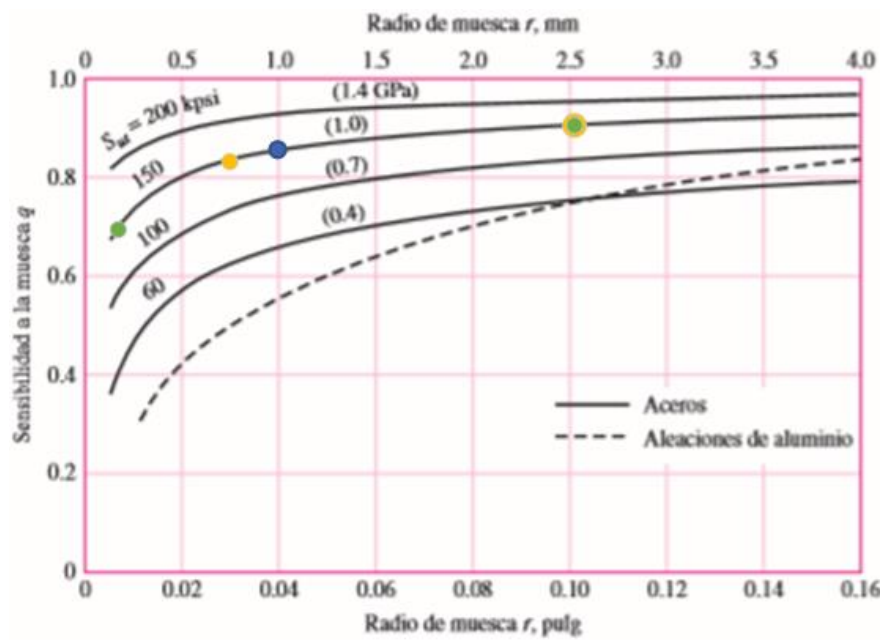
De C. J. Noll y C. Lipson, "Allowable Working Stresses", en *Society for Experimental Stress Analysis*, vol. 3, núm. 2, 1946, p. 29. Reproducida por O. J. Horgar (ed.), *Metals Engineering Design ASME Handbook*, McGraw-Hill, Nueva York. Copyright © 1953 por The McGraw-Hill Companies, Inc. Reproducido con autorización.

**Anexo 8:** Parámetros en el Factor Superficial de Marín.

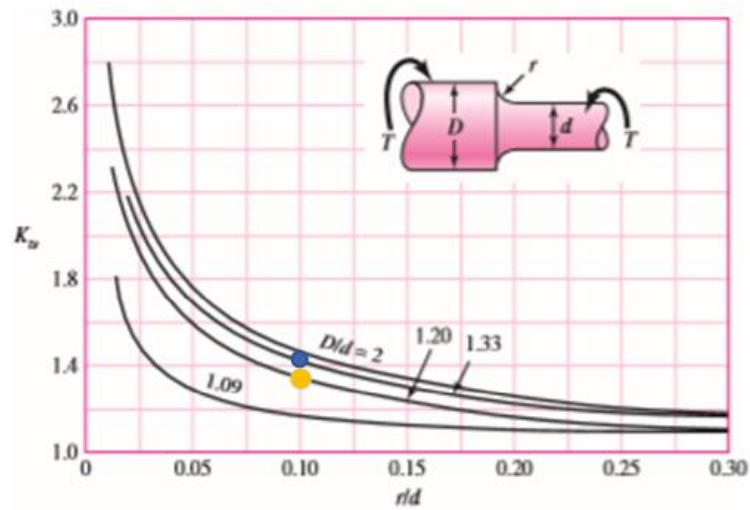
**Fuente:** (Douglas y Monel, 2008)



**Anexo 9: Eje Redondo con Filete en el Hombro en Flexión**  
**Fuente:** (Douglas y Monel, 2008)

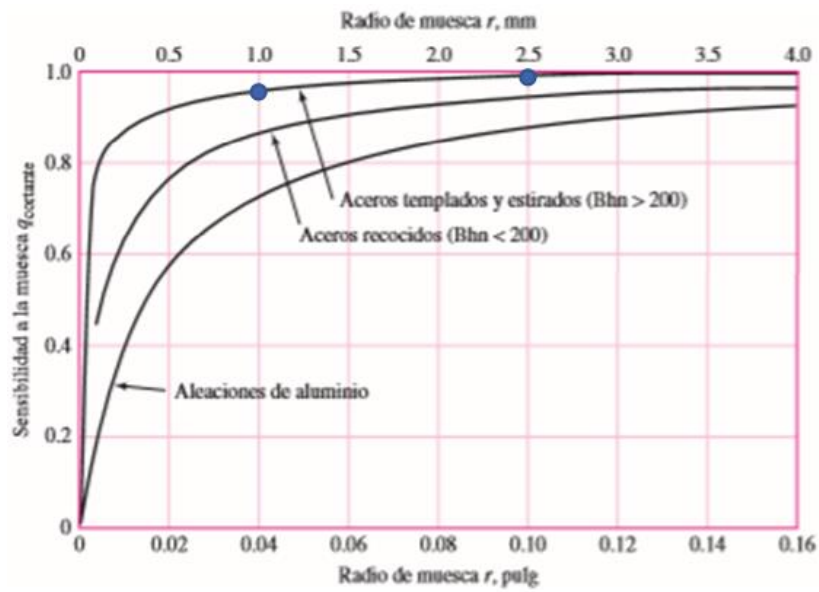


**Anexo 10: Sensibilidad a la Muesca**  
**Fuente:** (Douglas y Monel, 2008)



**Anexo 11:** Eje Redondo con Filete en el Hombro en Torsión.

**Fuente:** (Douglas y Monel, 2008)



**Anexo 12:** Sensibilidad a la Muesca de Materiales Sometidos a Torsión Inversa.

**Fuente:** (Douglas y Monel, 2008)



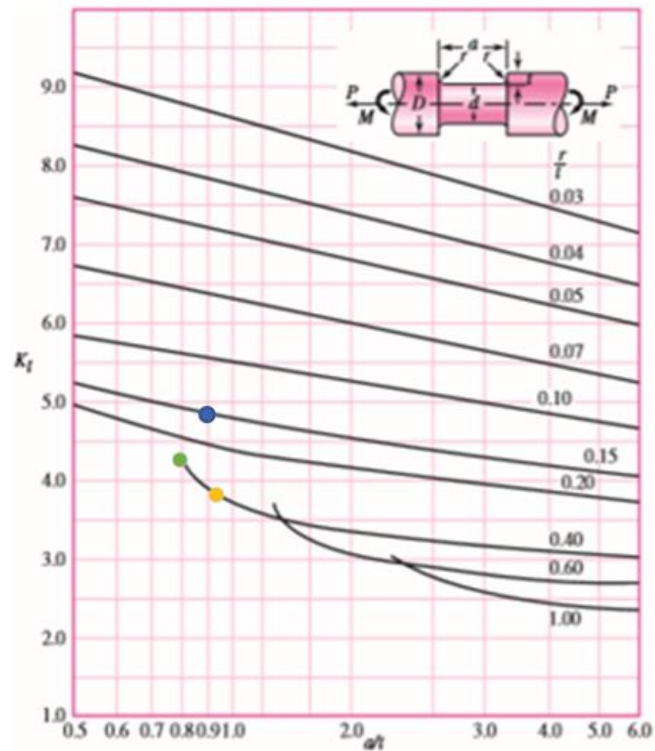
## ER SERIES RINGS

CENTURY STOCK NUMBER	SD Shaft Dia. (Inches)	FD Free Dia.	Free Dia. Tol.	T Thickness	Thickness Tol.	L Large Sec.	S Small Sec.	Section Tol.	U Lug	Lug Tol.	H Hole Dia.	Hole Dia. Tol.	TR Static Throat ID Ring	TG Static Throat ID Groove	GD Groove Dia.	Grown. Dia. Tol.
ER0012	0.125	0.112	+ .002	0.010	± .001	0.018	0.011	+ .0015	0.046	± .002	0.026		105	35	0.117	+ .0015
ER0015	0.156	0.140		0.010		0.026	0.016		0.054		0.026		135	50	0.146	
ER0018	0.188	0.168		0.015		0.025	0.016		0.050		0.025		240	75	0.175	
ER0019	0.197	0.179		0.015		0.026	0.016		0.056		0.026		255	85	0.185	
ER0021	0.219	0.196	-.004	0.015		0.028	0.017	± .002	0.056		0.026		280	105	0.205	
ER0023	0.236	0.215		0.015		0.030	0.019		0.056		0.026		305	120	0.222	-.0015
ER0025	0.250	0.225		0.025		0.035	0.025		0.080		0.041	+ .010	585	175	0.230	
ER0027	0.276	0.250		0.025		0.035	0.024		0.081		0.041		650	195	0.255	
ER0028	0.281	0.256		0.025		0.038	0.0255		0.080		0.041		660	195	0.261	
ER0031	0.312	0.281	+ .002	0.025		0.040	0.026		0.087		0.041		735	240	0.290	
ER0034	0.344	0.309		0.025		0.042	0.0265	± .003	0.070		0.041		810	265	0.321	
ER0035	0.354	0.320		0.025		0.046	0.029		0.087		0.041		830	295	0.330	± .002
ER0037	0.375	0.338		0.025		0.050	0.0305		0.088		0.041		880	315	0.352	
ER0039	0.394	0.354		0.025		0.052	0.310		0.087	± .003	0.041		925	330	0.369	
ER0040	0.406	0.366	-.005	0.025		0.054	0.033		0.087		0.041		950	345	0.382	
ER0043	0.438	0.395		0.025		0.055	0.033		0.088		0.041		1030	400	0.412	
ER0046	0.469	0.428		0.025		0.060	0.035		0.088		0.041		1100	430	0.443	
ER0050	0.500	0.461		0.035		0.065	0.040		0.108		0.047		1650	560	0.468	± .002
ER0055	0.551	0.509		0.035		0.053	0.036		0.108		0.047		1810	620	0.519	
ER0056	0.562	0.521		0.035		0.072	0.041		0.108		0.047		1850	640	0.530	± .004
ER0059	0.594	0.550	+ .005	0.035	± .002	0.076	0.043	± .004	0.109		0.047	-.002	1960	720	0.559	
ER0062	0.625	0.579		0.035		0.080	0.045		0.110		0.047		2000	800	0.588	
ER0066	0.669	0.621		0.035		0.082	0.043		0.110		0.047		2200	950	0.629	
ER0068	0.688	0.635		0.042		0.084	0.480		0.136		0.052		3400	1000	0.646	± .003
ER0075	0.750	0.693	-.010	0.042		0.092	0.051		0.136		0.052		3700	1200	0.704	
ER0078	0.781	0.722		0.042		0.094	0.052		0.136		0.052		3800	1300	0.733	
ER0081	0.812	0.751		0.042		0.096	0.054		0.136		0.052		4000	1400	0.762	
ER0087	0.875	0.810		0.042		0.104	0.057	± .005	0.137		0.052		4300	1600	0.821	
ER0093	0.938	0.867		0.042		0.110	0.063		0.166		0.078		4600	1800	0.882	
ER0098	0.984	0.910	+ .010	0.042		0.114	0.0645		0.167		0.078		4800	2000	0.926	± .003
ER0100	1.000	0.925		0.042		0.116	0.065		0.167		0.078		4900	2100	0.940	
ER0102	1.023	0.946		0.042		0.118	0.066		0.168		0.078		5000	2200	0.961	
ER0106	1.062	0.962		0.050		0.122	0.069		0.181		0.078		6200	2400	0.998	
ER0112	1.125	1.041		0.050		0.128	0.071		0.182		0.078		6600	2600	1.059	
ER0118	1.188	1.098		0.050		0.132	0.072		0.182		0.078		6900	2900	1.118	
ER0125	1.250	1.156		0.050		0.140	0.076		0.183	± .004	0.078		7300	3200	1.176	± .004
ER0131	1.312	1.214	-.015	0.050		0.146	0.0785		0.183		0.078		7700	3700	1.232	
ER0137	1.375	1.272		0.050		0.152	0.082		0.184		0.078		8000	4000	1.291	
ER0143	1.438	1.333		0.050		0.160	0.086		0.184		0.078		8400	4400	1.350	
ER0150	1.500	1.387		0.050		0.168	0.091		0.214		0.120		8800	4900	1.406	
ER0156	1.562	1.446		0.062		0.172	0.093	± .006	0.235		0.125		11400	5100	1.468	
ER0162	1.625	1.503		0.062		0.180	0.097		0.235		0.125		11800	5500	1.529	
ER0168	1.688	1.560	+ .013	0.062		0.184	0.099		0.235		1.250	+ .015	12000	5800	1.589	
ER0175	1.750	1.618		0.062		0.188	0.101		0.237		0.125	-.002	12700	6100	1.650	± .005
ER0177	1.772	1.637		0.062		0.190	0.102		0.237		0.125		12900	6300	1.669	
ER0181	1.812	1.675		0.062		0.192	0.102		0.238		0.125		13200	6600	1.708	
ER0187	1.875	1.735		0.062		0.196	0.104		0.239		0.125		13600	7000	1.769	
ER0196	1.969	1.819	-.020	0.062		0.200	0.106		0.245		0.125		14300	7700	1.857	
ER0200	2.000	1.850		0.062		0.204	0.108		0.239		0.125		14600	8000	1.886	
ER0206	2.062	1.906		0.078	± .003	0.208	0.111		0.266		0.125		18900	8400	1.946	
ER0212	2.125	1.964		0.078		0.212	0.113		0.266		0.125		19500	9100	2.003	
ER0215	2.156	1.993	+ .015	0.078		0.212	0.113		0.266		0.125		19800	9400	2.032	± .006
ER0225	2.250	2.081		0.078		0.220	0.116		0.267		0.125		20600	10300	2.120	
ER0231	2.312	2.139		0.078		0.222	0.118	± .007	0.267	± .007	0.125		21300	10900	2.178	
ER0237	2.350	2.197		0.078		0.224	0.119		0.267		0.125		21800	11400	2.239	± .006
ER0243	2.438	2.255	-.025	0.078		0.228	0.120		0.268		0.125		22400	11800	2.299	± .006
ER0250	2.500	2.313		0.078		0.232	0.122		0.268		0.125		22900	12300	2.360	

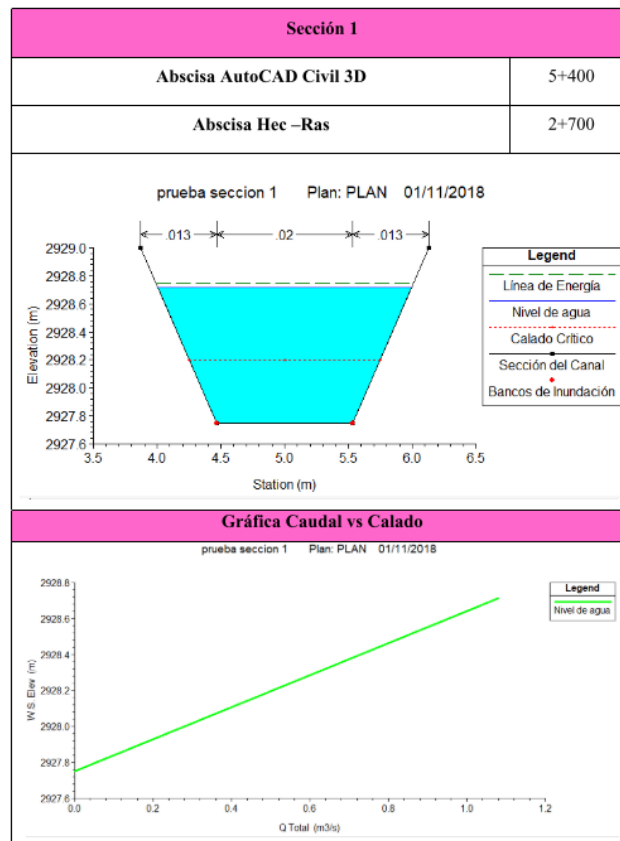
Material: Carbon Spring Steel (SAE 1060-1090)

Anexo 13: Catalogo de Anillos de Retención.

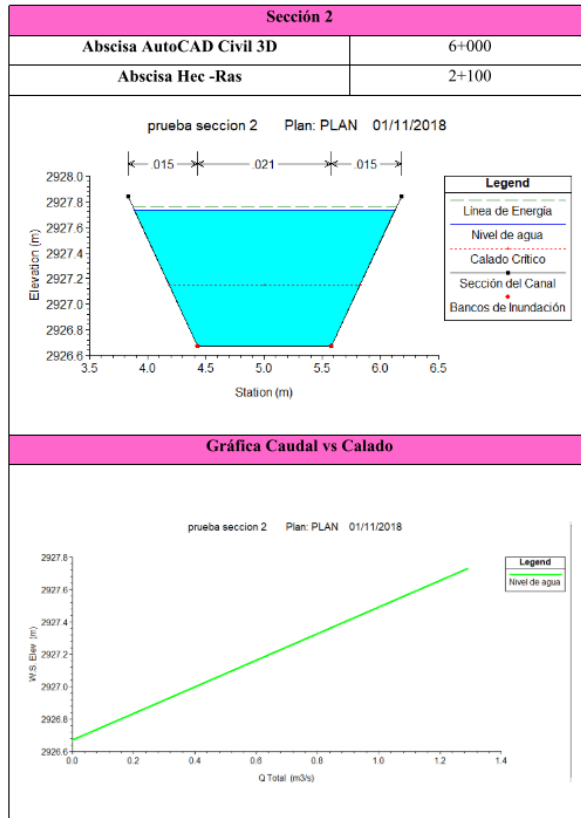
Fuente: (Spring, [sin fecha])



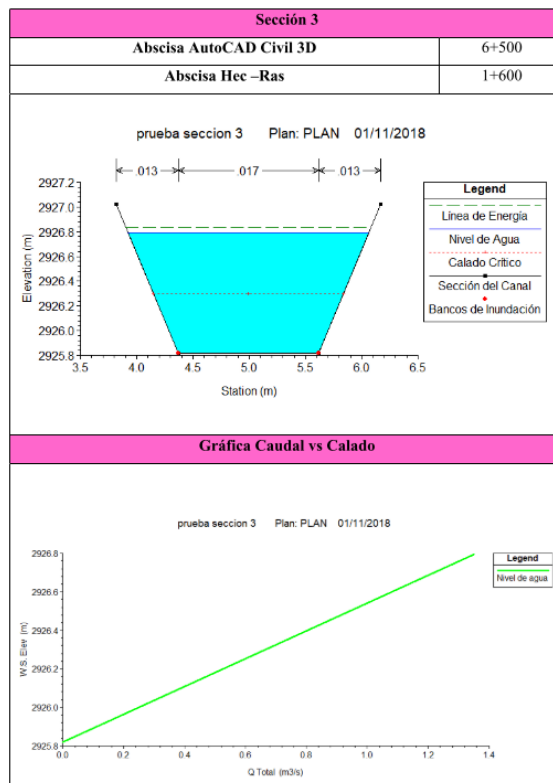
**Anexo 14: Eje Redondo con Ranura de Fondo Plano en Flexión.**  
**Fuente:** (Douglas y Monel, 2008)



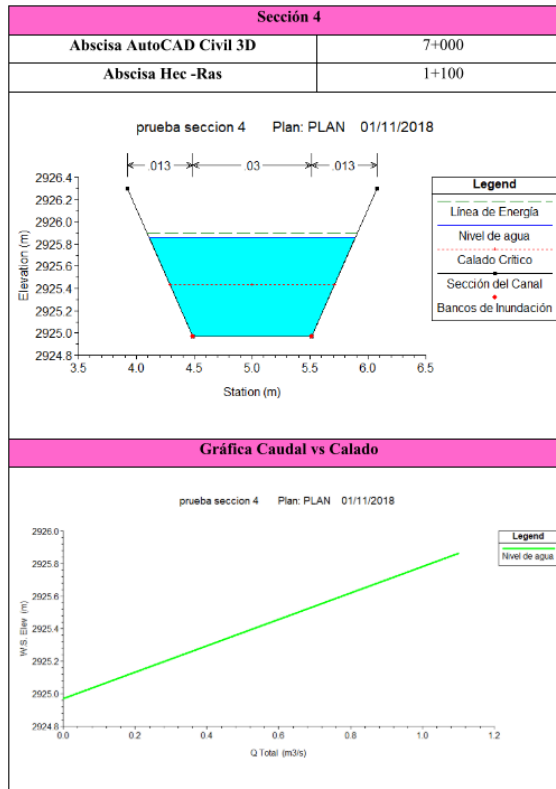
**Anexo 15: Modelación de la Sección Transversal 1.**  
**Fuente:** (JHOSELIN BUÑAY, 2018)



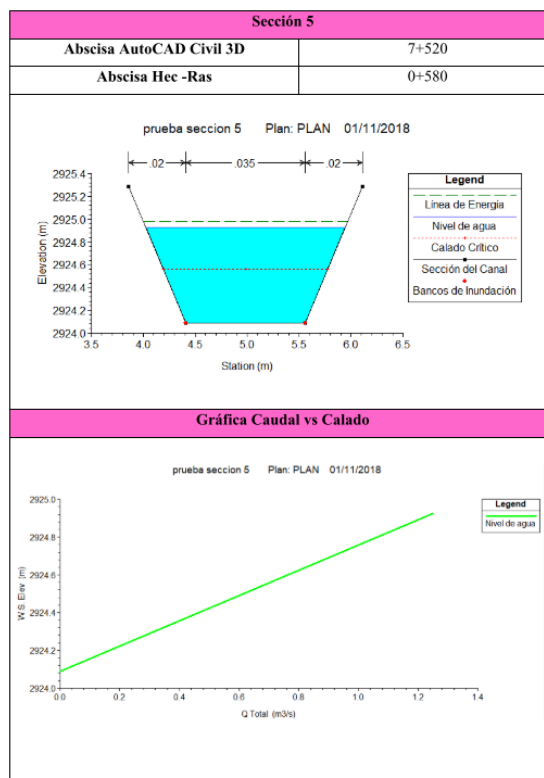
**Anexo 16: Modelación de la Sección Transversal 2.**  
**Fuente:** (JHOSELIN BUÑAY, 2018)



**Anexo 17: Modelación de la Sección Transversal 3.**  
**Fuente:** (JHOSELIN BUÑAY, 2018)

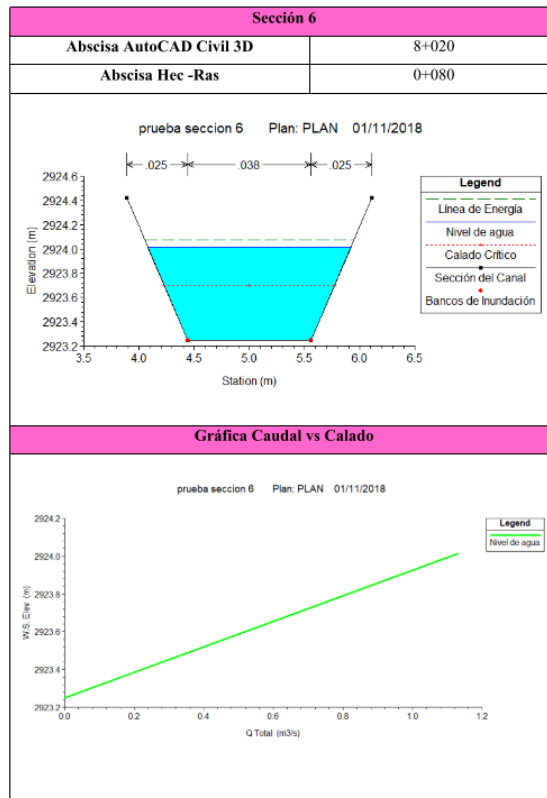


**Anexo 18: Modelación de la Sección Transversal 4.**  
**Fuente:** (JHOSELIN BUÑAY, 2018)

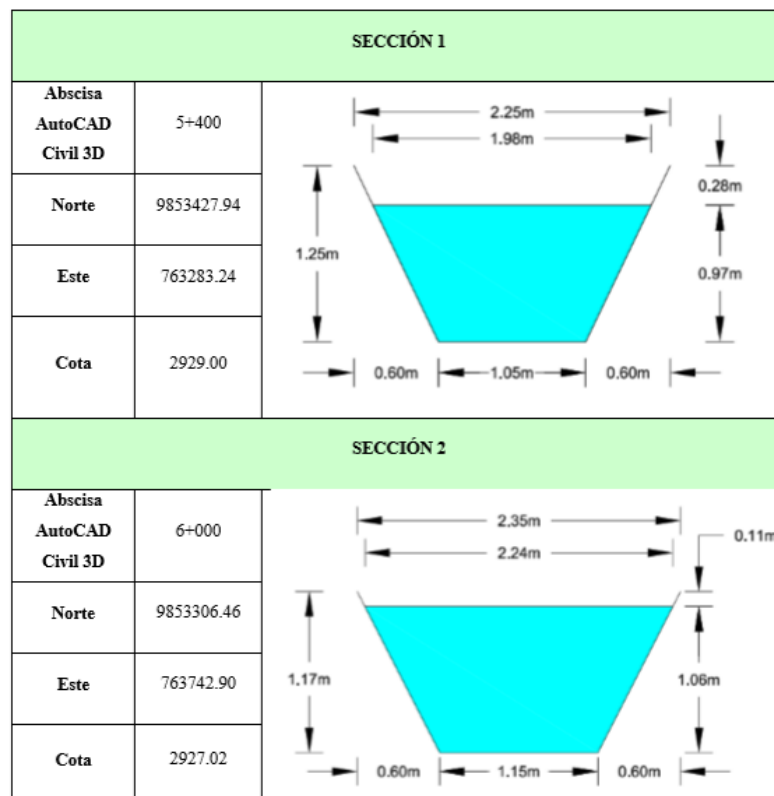


**Anexo 19: Modelación de la Sección Transversal 5.**  
**Fuente:** (JHOSELIN BUÑAY, 2018)

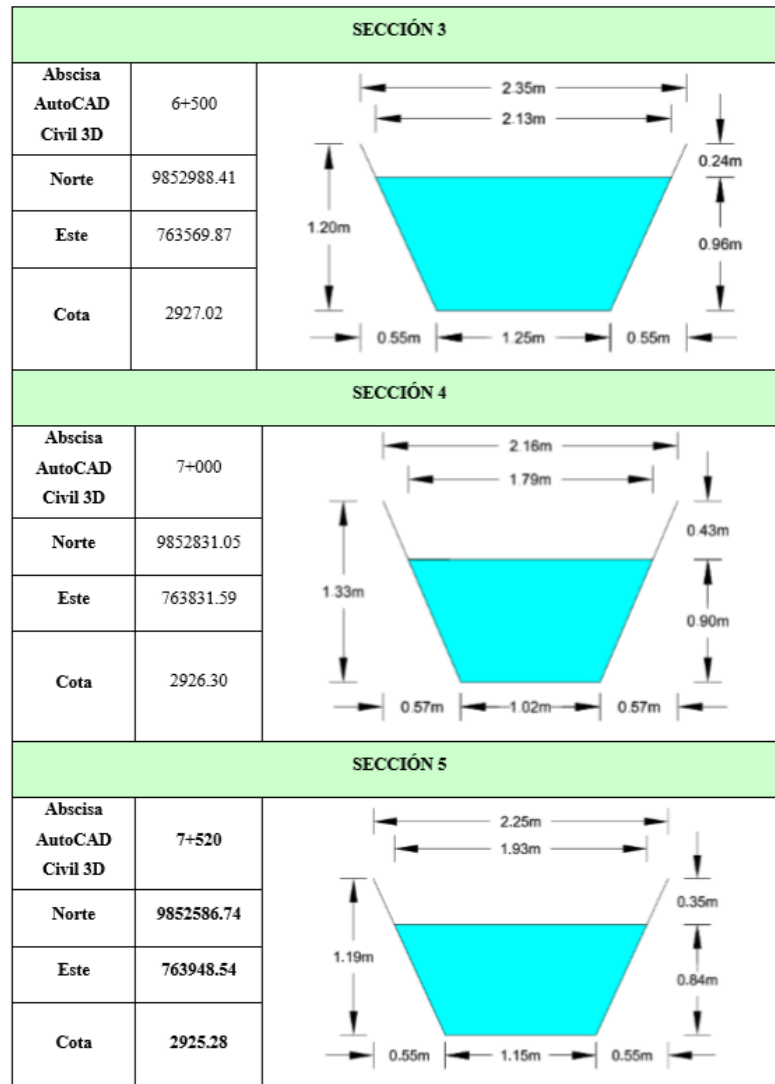




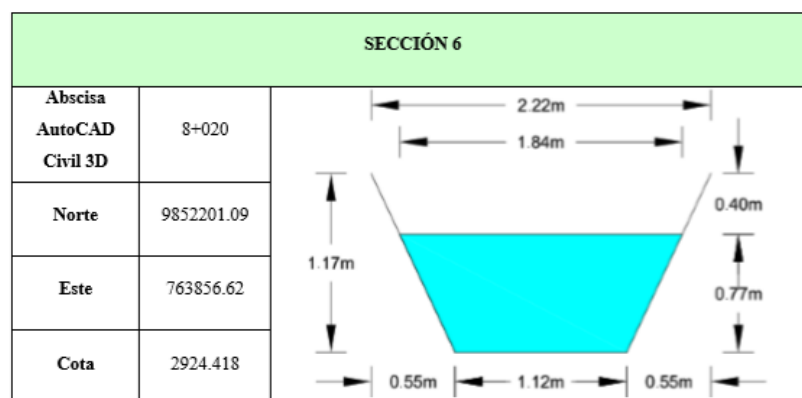
**Anexo 20: Modelación de la Sección Transversal 6.**  
**Fuente:** (JHOSELIN BUÑAY, 2018)



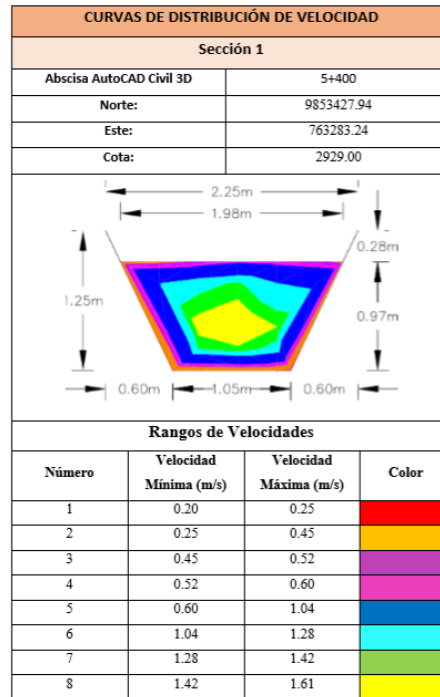
**Anexo 21: Esquematzación de las Secciones Transversales del Canal de Riego.**  
**Fuente:** (JHOSELIN BUÑAY, 2018)



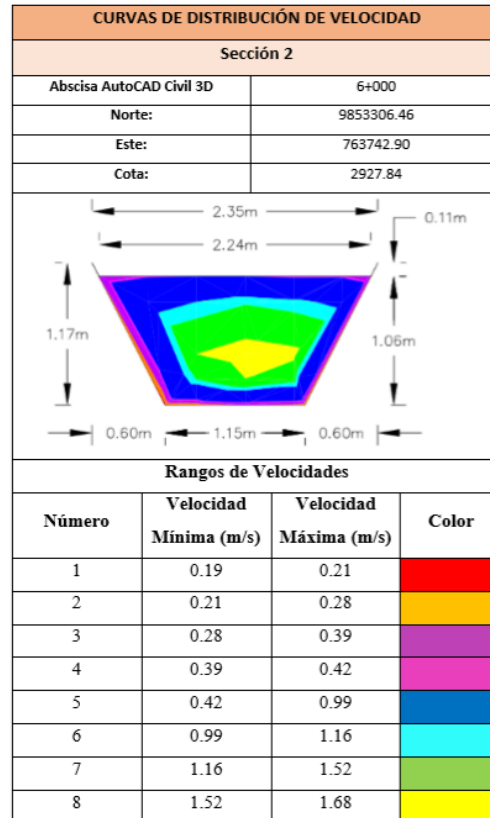
**Anexo 22:** Esquematzación de las Secciones Transversales del Canal de Riego.  
**Fuente:** (JHOSELIN BUÑAY, 2018)



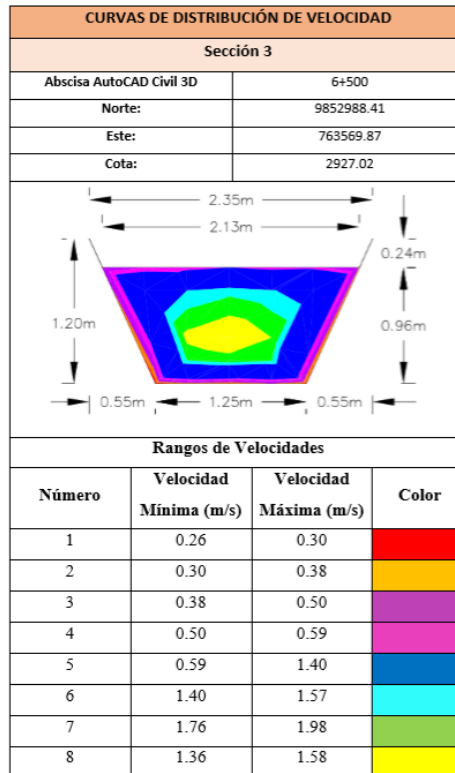
**Anexo 23:** Esquematzación de las Secciones Transversales del Canal de Riego.  
**Fuente:** (JHOSELIN BUÑAY, 2018)



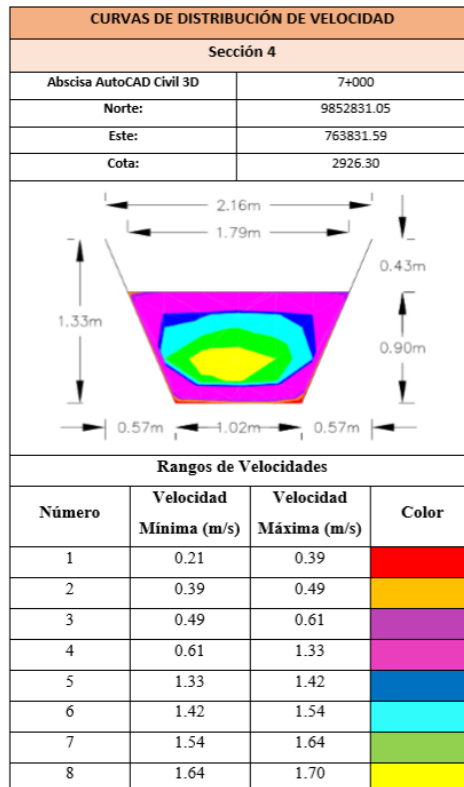
**Anexo 24:** Diagrama de Distribución de Velocidades – Sección 1.  
**Fuente:** (JHOSELIN BUÑAY, 2018)



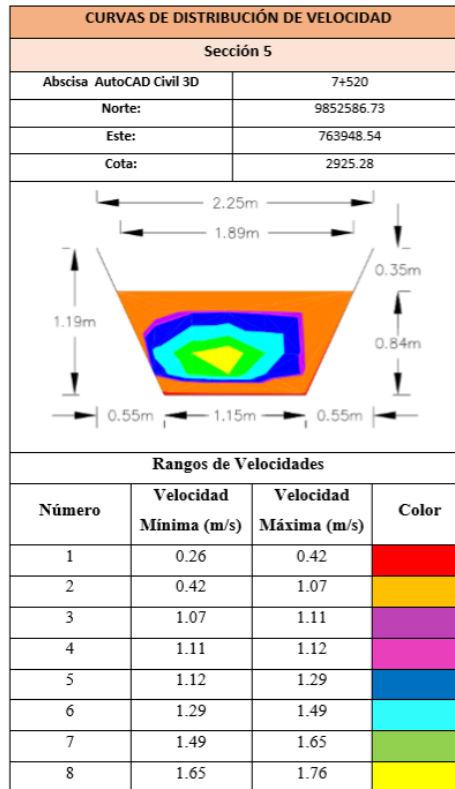
**Anexo 25:** Diagrama de Distribución de Velocidades – Sección 2.  
**Fuente:** (JHOSELIN BUÑAY, 2018)



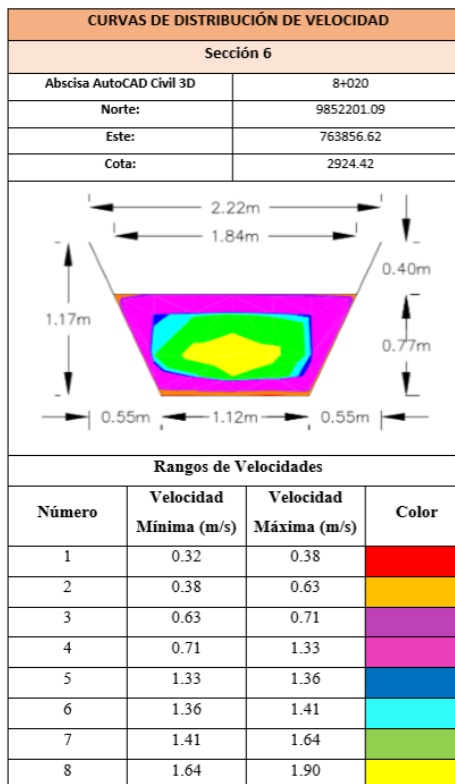
**Anexo 26:** Diagrama de Distribución de Velocidades – Sección 3.  
**Fuente:** (JHOSELIN BUÑAY, 2018)



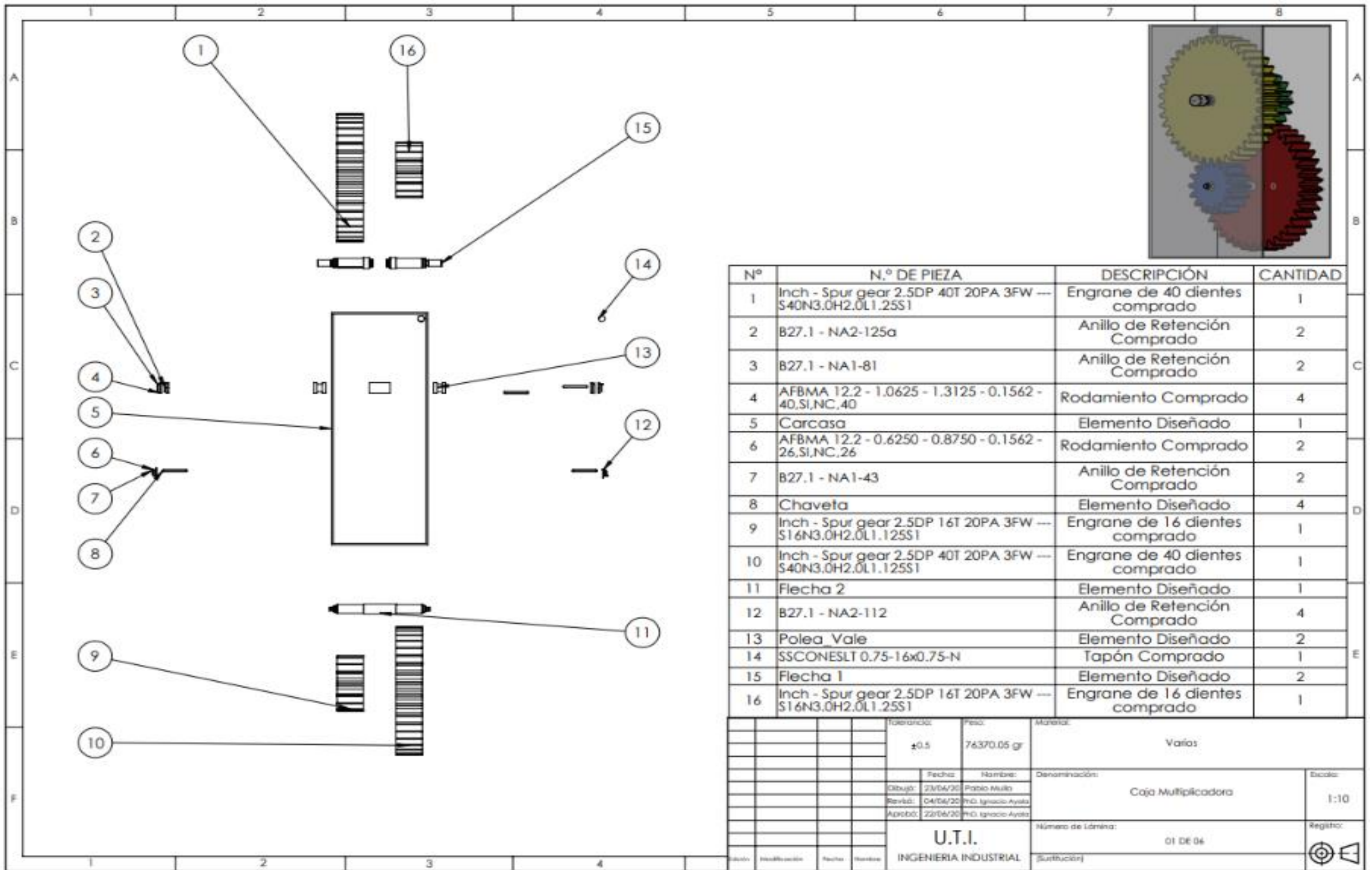
**Anexo 27:** Diagrama de Distribución de Velocidades – Sección 4.  
**Fuente:** (JHOSELIN BUÑAY, 2018)



**Anexo 28:** Diagrama de Distribución de Velocidades – Sección 5.  
**Fuente:** (JHOSELIN BUÑAY, 2018)

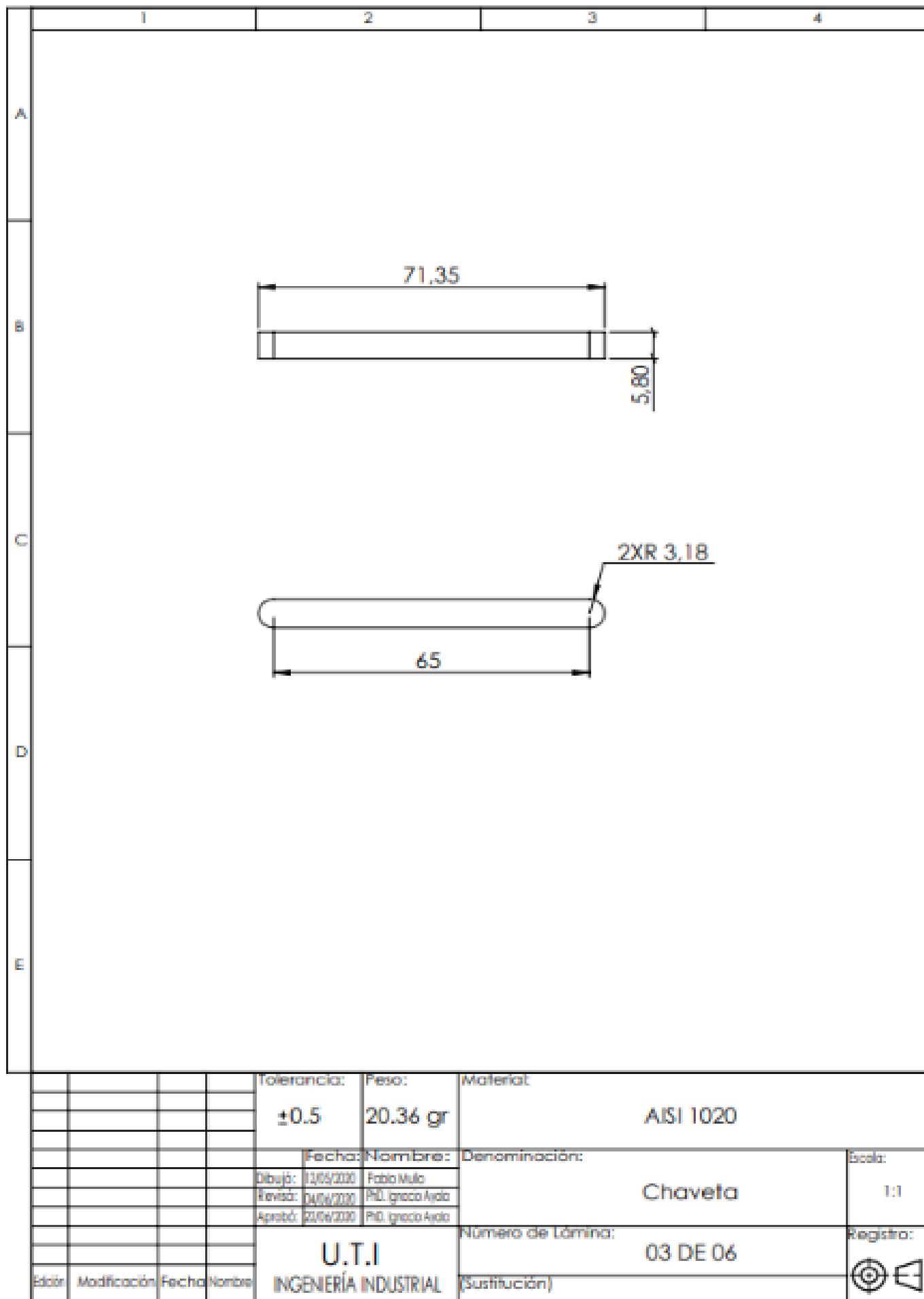


**Anexo 29:** Diagrama de Distribución de Velocidades – Sección 6.  
**Fuente:** (JHOSELIN BUÑAY, 2018)



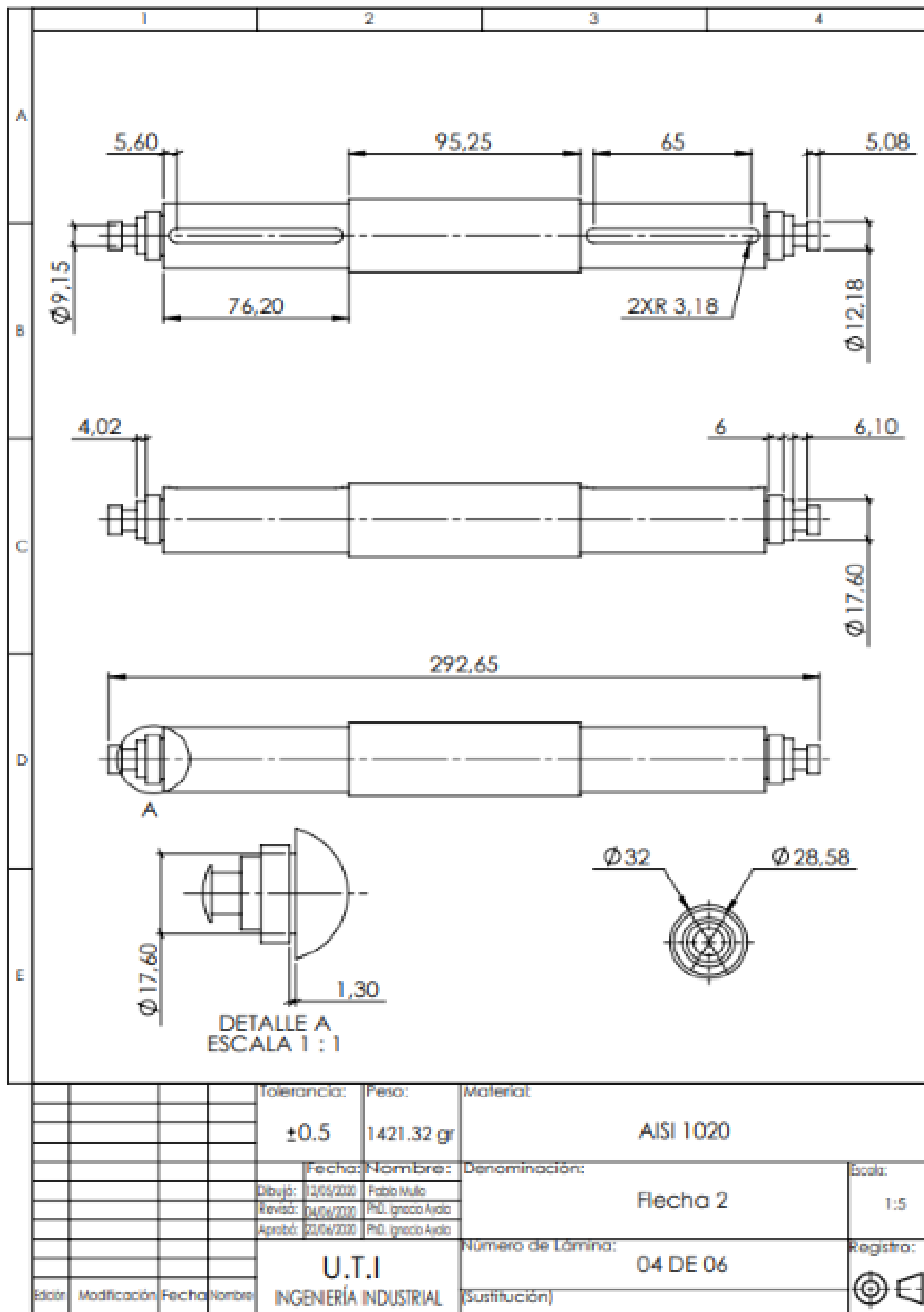
Anexo 30: Plano General del Ensamble  
Fuente: (Mullo P, 2020)



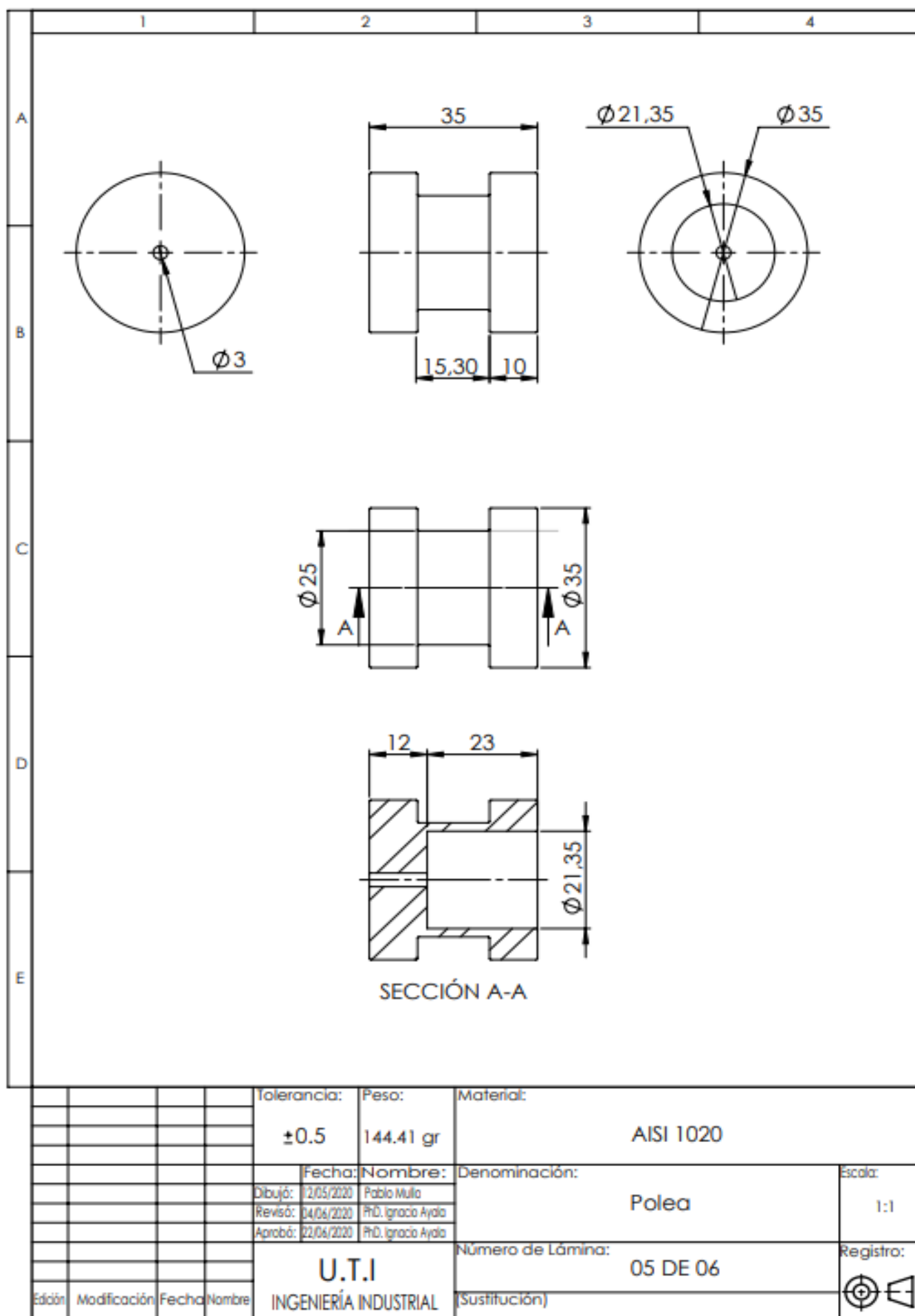


**Anexo 32: Plano de la Chaveta.**  
**Fuente: (Mullo P, 2020)**

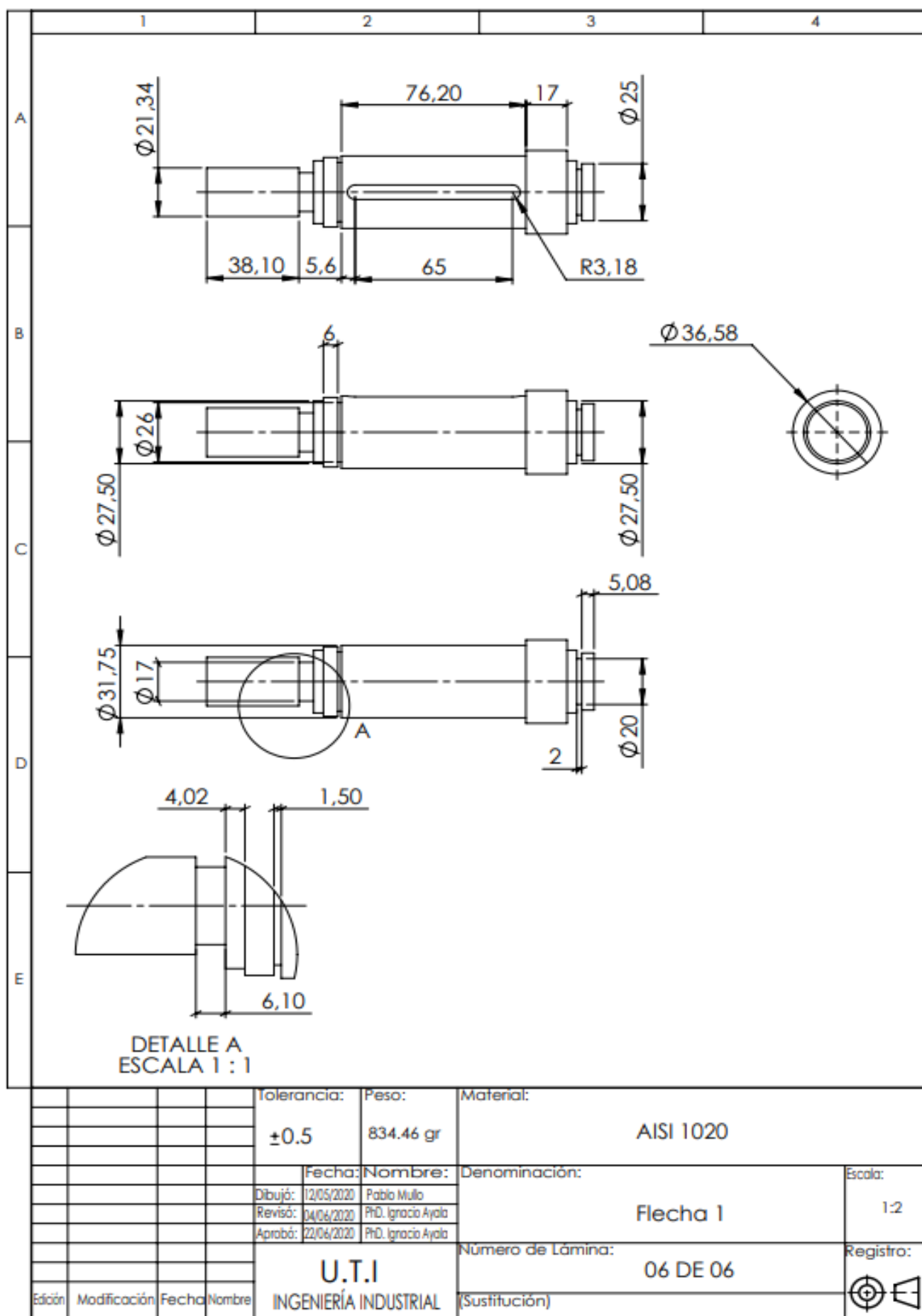




**Anexo 33: Plano de la Flecha 2.**  
**Fuente: (Mullo P, 2020)**



Anexo 34: Plano de la Polea.  
Fuente: (Mullo P, 2020)



*Anexo 35: Plano de la Flecha 1.*  
*Fuente: (Mullo P, 2020)*

## Análisis Estructural Estática Engrane N4 (Static Structural).

TABLE 18  
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Results

Object Name	Total Deformation	Equivalent Elastic Strain	Equivalent Stress	Equivalent Stress 2	Equivalent Stress 3
State	Solved				
Scope					
Scoping Method	Geometry Selection			Named Selection	
Geometry	All Bodies				
Named Selection				cara	cara2
Definition					
Type	Total Deformation	Equivalent Elastic Strain	Equivalent (von-Mises) Stress		
By	Time				
Display Time	Last				
Calculate Time History	Yes				
Identifier					
Suppressed	No				
Results					
Minimum	0, in	3,1874e-011 in/in	8,3252e-004 psi	11,511 psi	0,10159 psi
Maximum	4,502e-005 in	4,4008e-005 in/in		1051,9 psi	543,56 psi
Average	2,6752e-005 in	3,5326e-006 in/in	98,499 psi	157,75 psi	56,653 psi
Minimum Occurs On	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 16T 20PA 3FW --- S16N3.0H2.0L1.125S1Keyway	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 40T 20PA 3FW --- S40N3.0H2.0L1.25S1Keyway	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 16T 20PA 3FW --- S16N3.0H2.0L1.125S1Keyway		pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 40T 20PA 3FW --- S40N3.0H2.0L1.25S1Keyway
Maximum Occurs On	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 40T 20PA 3FW --- S40N3.0H2.0L1.25S1Keyway	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 16T 20PA 3FW --- S16N3.0H2.0L1.125S1Keyway			pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 40T 20PA 3FW --- S40N3.0H2.0L1.25S1Keyway
Minimum Value Over Time					
Minimum	0, in	3,0518e-012 in/in	8,8051e-005 psi	1,9938 psi	8,953e-003 psi
Maximum	0, in	3,1874e-011 in/in	8,3252e-004 psi	11,511 psi	0,10159 psi
Maximum Value Over Time					
Minimum	4,5841e-006 in	4,4045e-006 in/in	105,35 psi		52,209 psi
Maximum	4,502e-005 in	4,4008e-005 in/in	1051,9 psi		543,56 psi
Information					
Time	1, s				
Load Step	1				
Substep	6				
Iteration Number	11				
Integration Point Results					
Display Option	Averaged				
Average Across Bodies	No				

FIGURE 3  
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation

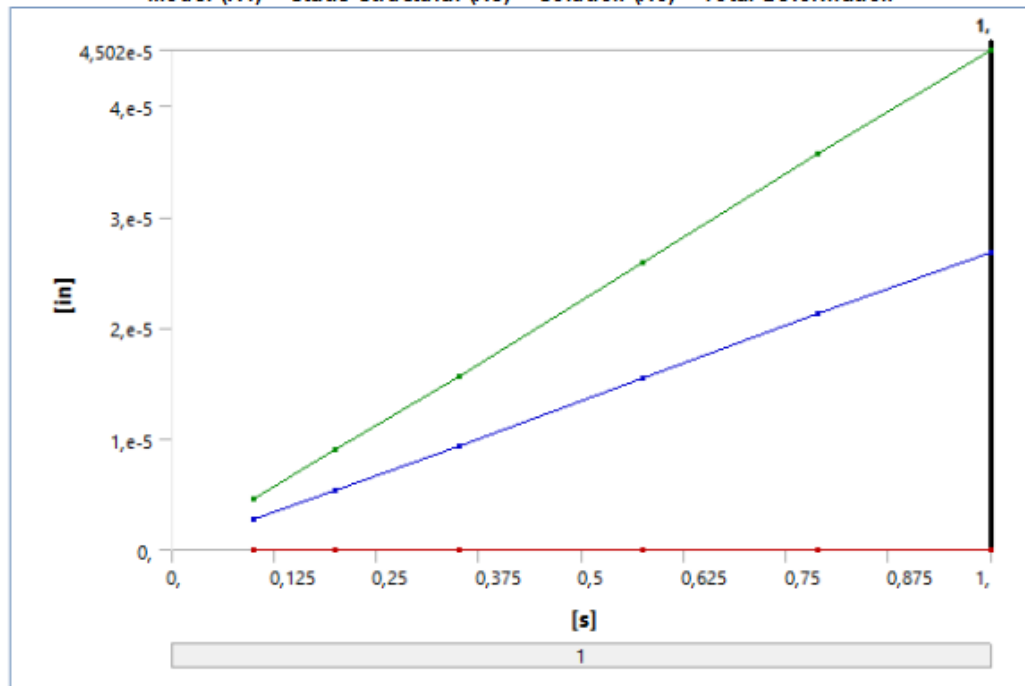


TABLE 19  
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation

Time [s]	Minimum [in]	Maximum [in]	Average [in]
0,1	0,	4,5841e-006	2,7399e-006
0,2		9,0366e-006	5,3733e-006
0,35		1,5669e-005	9,2939e-006
0,575		2,5921e-005	1,5417e-005
0,7875		3,5728e-005	2,1286e-005
1,		4,502e-005	2,6752e-005

FIGURE 4  
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Elastic Strain

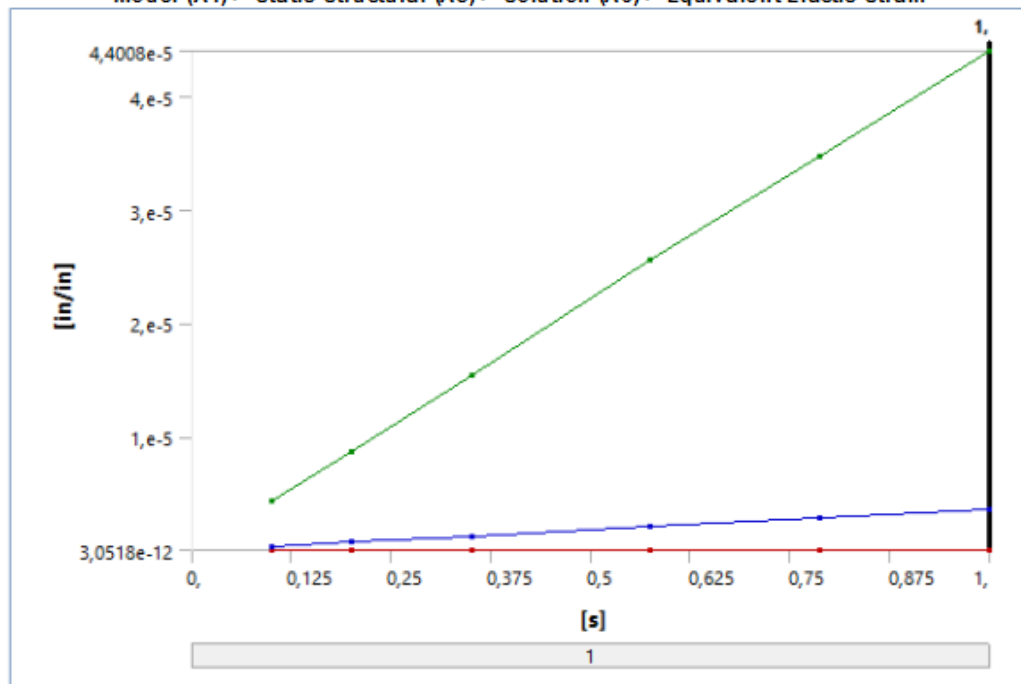


TABLE 20  
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Elastic Strain

Time [s]	Minimum [in/in]	Maximum [in/in]	Average [in/in]
0,1	3,0518e-012	4,4045e-006	3,6545e-007
0,2	6,1688e-012	8,6969e-006	7,0933e-007
0,35	1,2639e-011	1,5417e-005	1,2246e-006
0,575	1,7361e-011	2,5601e-005	2,0407e-006
0,7875	2,2516e-011	3,4781e-005	2,823e-006
1,	3,1874e-011	4,4008e-005	3,5326e-006

FIGURE 5  
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Stress

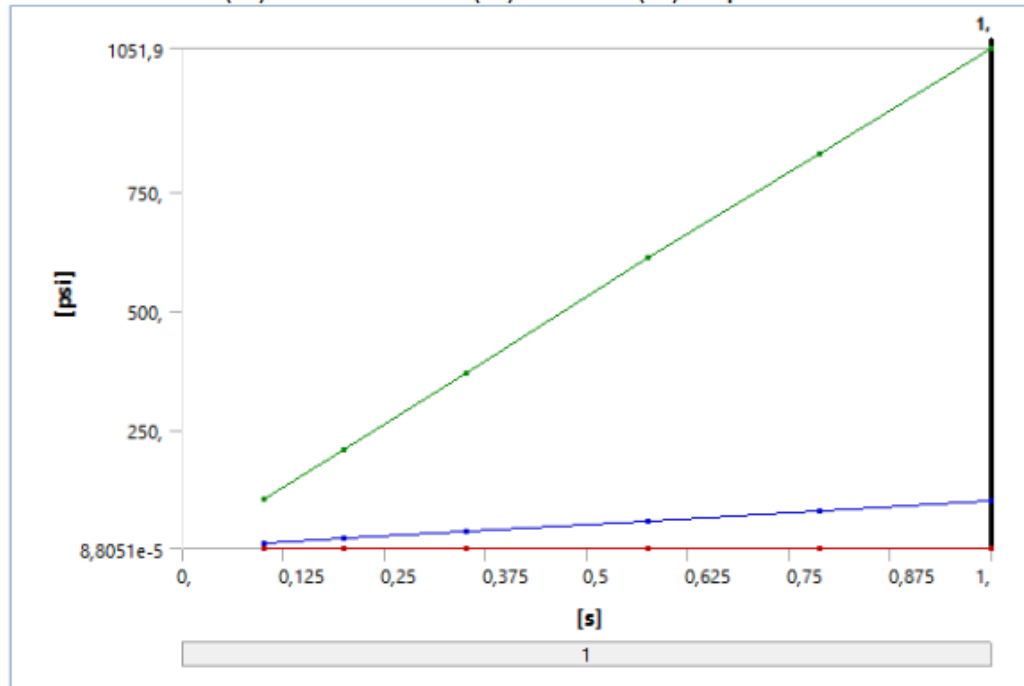


TABLE 21  
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Stress

Time [s]	Minimum [psi]	Maximum [psi]	Average [psi]
0,1	8,8051e-005	105,35	10,198
0,2	1,6114e-004	207,82	19,783
0,35	3,3312e-004	368,35	34,139
0,575	4,5437e-004	611,87	56,898
0,7875	6,0005e-004	831,58	78,736
1,	8,3252e-004	1051,9	98,499

# Análisis Estructural Estática Engrane N5 (Static Structural).

**TABLE 15**  
**Model (B4, C4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Results**

Object Name	Total Deformation	Equivalent Stress
State	Solved	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	All Bodies	
Definition		
Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Time	
Display Time	Last	
Calculate Time History	Yes	
Identifier		
Suppressed	No	
Results		
Minimum	0, in	1,1128e-003 psi
Maximum	4,5131e-005 in	799,07 psi
Average	2,7032e-005 in	103,29 psi
Minimum Occurs On	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 16T 20PA 3FW ---S16N3.0H2.0L1.125S1\Keyway	
Maximum Occurs On	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 40T 20PA 3FW ---S40N3.0H2.0L1.25S1\Keyway	
Minimum Value Over Time		
Minimum	0, in	9,3775e-005 psi
Maximum	0, in	1,1128e-003 psi
Maximum Value Over Time		
Minimum	4,3871e-006 in	78,417 psi
Maximum	4,5131e-005 in	799,07 psi
Information		
Time	1, s	
Load Step	1	
Substep	6	
Iteration Number	9	
Integration Point Results		
Display Option	Averaged	
Average Across Bodies	No	



FIGURE 3  
Model (B4, C4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Total Deformation

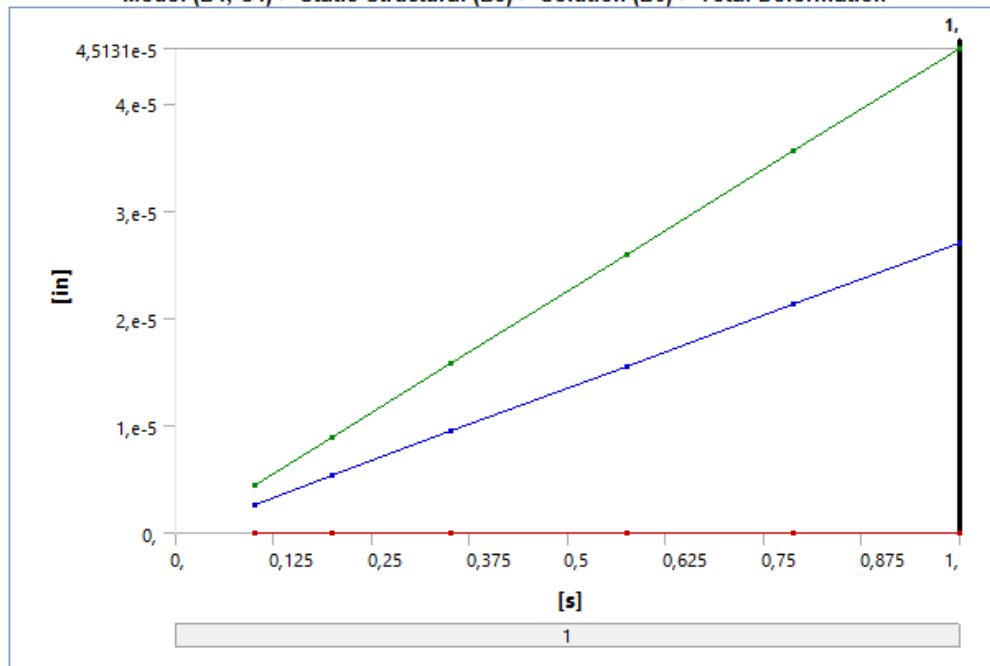
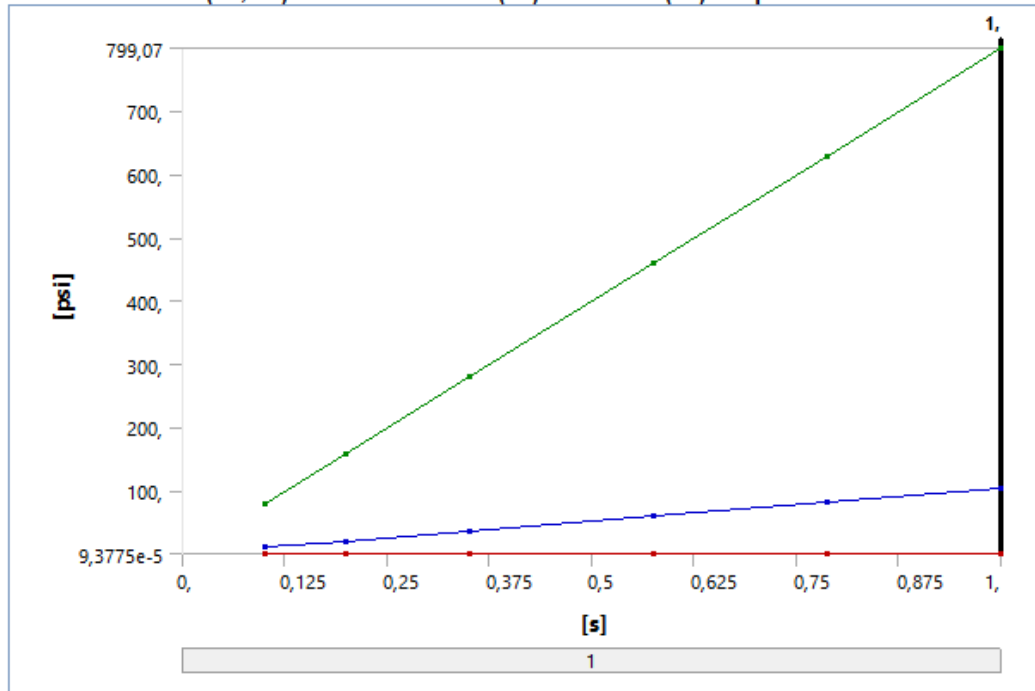


TABLE 16  
Model (B4, C4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Total Deformation

Time [s]	Minimum [in]	Maximum [in]	Average [in]
0.1	0,	4.3871e-006	2.5999e-006
0.2		8.9416e-006	5.3368e-006
0.35		1.5783e-005	9.4501e-006
0.575		2.5961e-005	1.5554e-005
0.7875		3.5594e-005	2.1331e-005
1,		4.5131e-005	2.7032e-005

**FIGURE 4**  
**Model (B4, C4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Equivalent Stress**



**TABLE 17**  
**Model (B4, C4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Equivalent Stress**

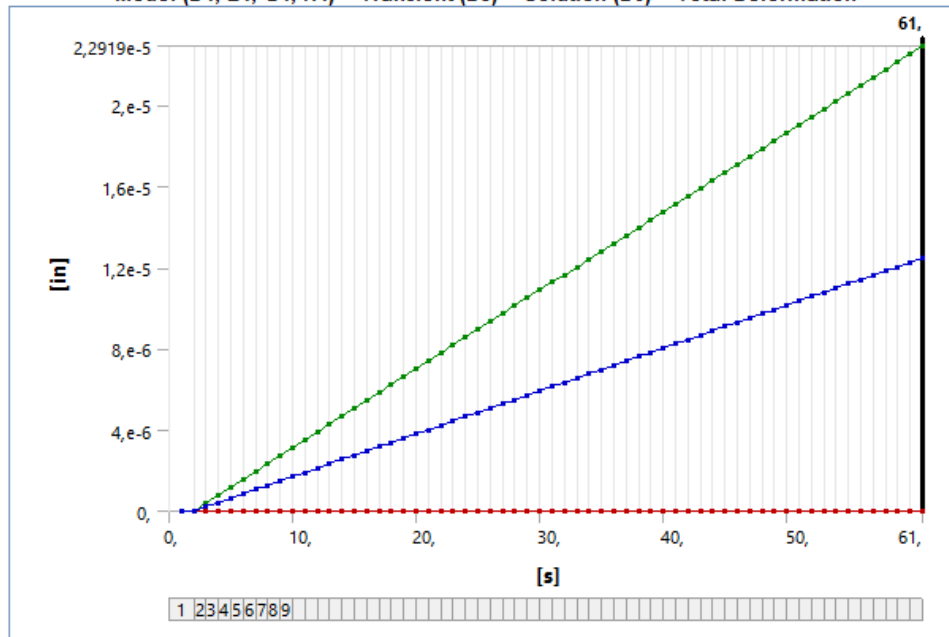
Time [s]	Minimum [psi]	Maximum [psi]	Average [psi]
0,1	9,3775e-005	78,417	9,6968
0,2	1,711e-004	158,32	20,188
0,35	3,7457e-004	278,85	36,056
0,575	6,5405e-004	460,34	59,49
0,7875	9,044e-004	629,05	81,604
1,	1,1128e-003	799,07	103,29

## Análisis Transitorio (Transient Structural)

**TABLE 22**  
**Model (D4, E4, G4, H4) > Transient (D5) > Solution (D6) > Results**

Object Name	Total Deformation	Equivalent Stress
State	Solved	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	All Bodies	
Definition		
Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Time	
Display Time	Last	
Calculate Time History	Yes	
Identifier		
Suppressed	No	
Results		
Minimum	0, in	6,7291e-004 psi
Maximum	2,2919e-005 in	254,66 psi
Average	1,2467e-005 in	20,064 psi
Minimum Occurs On	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 16T 20PA 3FW ---S16N3.0H2.0L1.125S1\Keyway	
Maximum Occurs On	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 40T 20PA 3FW ---S40N3.0H2.0L1.25S1\Keyway	
Minimum Value Over Time		
Minimum	0, in	0, psi
Maximum	0, in	6,7291e-004 psi
Maximum Value Over Time		
Minimum	0, in	0, psi
Maximum	2,2919e-005 in	254,66 psi
Information		
Time	61, s	
Load Step	60	
Substep	1	
Iteration Number	61	
Integration Point Results		
Display Option	Averaged	
Average Across Bodies	No	

**FIGURE 3**  
**Model (D4, E4, G4, H4) > Transient (D5) > Solution (D6) > Total Deformation**

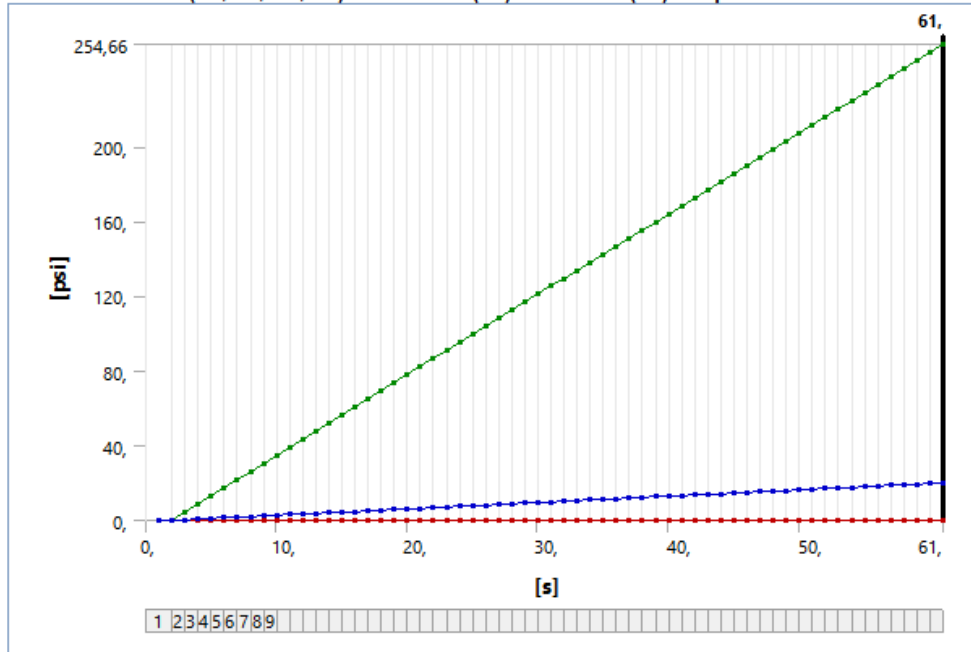


**TABLE 23**  
**Model (D4, E4, G4, H4) > Transient (D5) > Solution (D6) > Total Deformation**

Time [s]	Minimum [in]	Maximum [in]	Average [in]
1,	0,	0,	0,
2,			
3,		3,8846e-007	2,113e-007
4,		7,7692e-007	4,2259e-007
5,		1,1654e-006	6,3389e-007
6,		1,5538e-006	8,4519e-007
7,		1,9423e-006	1,0565e-006
8,		2,3308e-006	1,2678e-006
9,		2,7192e-006	1,4791e-006
10,		3,1077e-006	1,6904e-006
11,		3,4961e-006	1,9017e-006
12,		3,8846e-006	2,113e-006
13,		4,2731e-006	2,3243e-006
14,		4,6615e-006	2,5356e-006
15,		5,05e-006	2,7469e-006
16,		5,4384e-006	2,9582e-006
17,		5,8269e-006	3,1695e-006
18,		6,2154e-006	3,3808e-006
19,		6,6038e-006	3,5921e-006
20,	0,	6,9923e-006	3,8033e-006
21,		7,3807e-006	4,0146e-006
22,		7,7692e-006	4,2259e-006
23,		8,1577e-006	4,4372e-006
24,		8,5461e-006	4,6485e-006
25,		8,9346e-006	4,8598e-006
26,		9,323e-006	5,0711e-006
27,		9,7115e-006	5,2824e-006
28,		1,01e-005	5,4937e-006
29,		1,0488e-005	5,705e-006
30,		1,0877e-005	5,9163e-006
31,		1,1265e-005	6,1276e-006

32,	1,1654e-005	6,3389e-006
33,	1,2042e-005	6,5502e-006
34,	1,2431e-005	6,7615e-006
35,	1,2819e-005	6,9728e-006
36,	1,3208e-005	7,1841e-006
37,	1,3596e-005	7,3954e-006
38,	1,3985e-005	7,6067e-006
39,	1,4373e-005	7,818e-006
40,	1,4761e-005	8,0293e-006
41,	1,515e-005	8,2406e-006
42,	1,5538e-005	8,4519e-006
43,	1,5927e-005	8,6632e-006
44,	1,6315e-005	8,8745e-006
45,	1,6704e-005	9,0858e-006
46,	1,7092e-005	9,2971e-006
47,	1,7481e-005	9,5084e-006
48,	1,7869e-005	9,7197e-006
49,	1,8258e-005	9,931e-006
50,	1,8646e-005	1,0142e-005
51,	1,9035e-005	1,0354e-005
52,	1,9423e-005	1,0565e-005
53,	1,9811e-005	1,0776e-005
54,	2,02e-005	1,0987e-005
55,	2,0588e-005	1,1199e-005
56,	2,0977e-005	1,141e-005
57,	2,1365e-005	1,1621e-005
58,	2,1754e-005	1,1833e-005
59,	2,2142e-005	1,2044e-005
60,	2,2531e-005	1,2255e-005
61,	2,2919e-005	1,2467e-005

**FIGURE 4**  
**Model (D4, E4, G4, H4) > Transient (D5) > Solution (D6) > Equivalent Stress**



**TABLE 24**  
**Model (D4, E4, G4, H4) > Transient (D5) > Solution (D6) > Equivalent Stress**

Time [s]	Minimum [psi]	Maximum [psi]	Average [psi]
1,	0,	0,	0,
2,			
3,	1,1405e-005	4,3162	0,34006
4,	2,281e-005	8,6324	0,68012
5,	3,4216e-005	12,949	1,0202
6,	4,5621e-005	17,265	1,3602
7,	5,7026e-005	21,581	1,7003
8,	6,8431e-005	25,897	2,0404
9,	7,9836e-005	30,214	2,3804
10,	9,1241e-005	34,53	2,7205
11,	1,0264e-004	38,846	3,0605
12,	1,1405e-004	43,162	3,4006
13,	1,2545e-004	47,478	3,7407
14,	1,3686e-004	51,795	4,0807
15,	1,4827e-004	56,111	4,4208
16,	1,5967e-004	60,427	4,7609
17,	1,7108e-004	64,743	5,1009
18,	1,8248e-004	69,059	5,441
19,	1,9388e-004	73,376	5,781
20,	2,0529e-004	77,692	6,1211
21,	2,167e-004	82,008	6,4612
22,	2,281e-004	86,324	6,8012
23,	2,395e-004	90,641	7,1413
24,	2,5091e-004	94,957	7,4813
25,	2,6232e-004	99,273	7,8214
26,	2,7372e-004	103,59	8,1615
27,	2,8513e-004	107,91	8,5015
28,	2,9653e-004	112,22	8,8416
29,	3,0794e-004	116,54	9,1816
30,	3,1935e-004	120,85	9,5217

31,	3,3075e-004	125,17	9,8618
32,	3,4215e-004	129,49	10,202
33,	3,5355e-004	133,8	10,542
34,	3,6497e-004	138,12	10,882
35,	3,7637e-004	142,44	11,222
36,	3,8778e-004	146,75	11,562
37,	3,9918e-004	151,07	11,902
38,	4,1057e-004	155,38	12,242
39,	4,2199e-004	159,7	12,582
40,	4,334e-004	164,02	12,922
41,	4,448e-004	168,33	13,262
42,	4,5619e-004	172,65	13,602
43,	4,6761e-004	176,96	13,942
44,	4,7902e-004	181,28	14,283
45,	4,9041e-004	185,6	14,623
46,	5,0183e-004	189,91	14,963
47,	5,1321e-004	194,23	15,303
48,	5,2463e-004	198,55	15,643
49,	5,3604e-004	202,86	15,983
50,	5,4745e-004	207,18	16,323
51,	5,5885e-004	211,49	16,663
52,	5,7025e-004	215,81	17,003
53,	5,8166e-004	220,13	17,343
54,	5,9307e-004	224,44	17,683
55,	6,0447e-004	228,76	18,023
56,	6,1587e-004	233,08	18,363
57,	6,2729e-004	237,39	18,703
58,	6,3868e-004	241,71	19,043
59,	6,501e-004	246,02	19,383
60,	6,6149e-004	250,34	19,724
61,	6,7291e-004	254,66	20,064

## Respuesta Armónica (Harmonic Response)

**TABLE 59**  
**Model (D4, E4, G4, H4) > Harmonic Response 2 (H5) > Solution (H6) > Results**

Object Name	Total Deformation	Equivalent Stress
State	Solved	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	All Bodies	
Definition		
Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Frequency	
Frequency	Last	
Amplitude	No	
Sweeping Phase	0, °	
Identifier		
Suppressed	No	
Results		
Minimum	0, in	7,5141e-002 psi
Maximum	2,7016e-005 in	235,67 psi
Average	1,4375e-005 in	19,309 psi
Minimum Occurs On	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 16T 20PA 3FW ---S16N3.0H2.0L1.125S1\Keyway	
Maximum Occurs On	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 40T 20PA 3FW ---S40N3.0H2.0L1.25S1\Keyway	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 16T 20PA 3FW ---S16N3.0H2.0L1.125S1\Keyway
Information		
Reported Frequency	300, Hz	
Integration Point Results		
Display Option		Averaged
Average Across Bodies		No



FIGURE 13

Model (D4, E4, G4, H4) > Harmonic Response 2 (H5) > Solution (H6) > Total Deformation

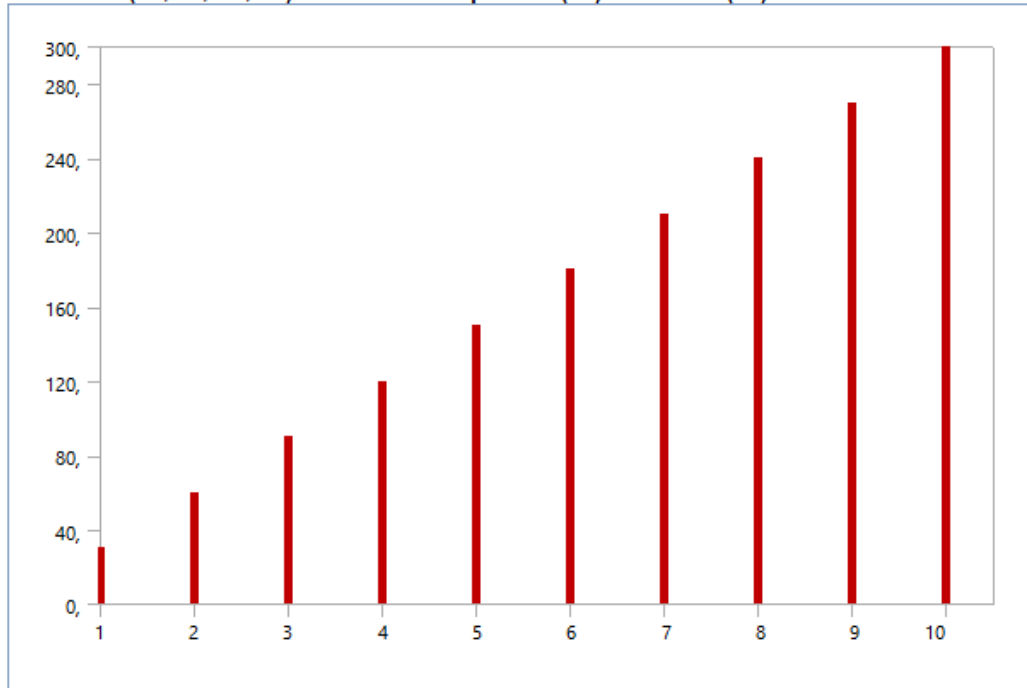
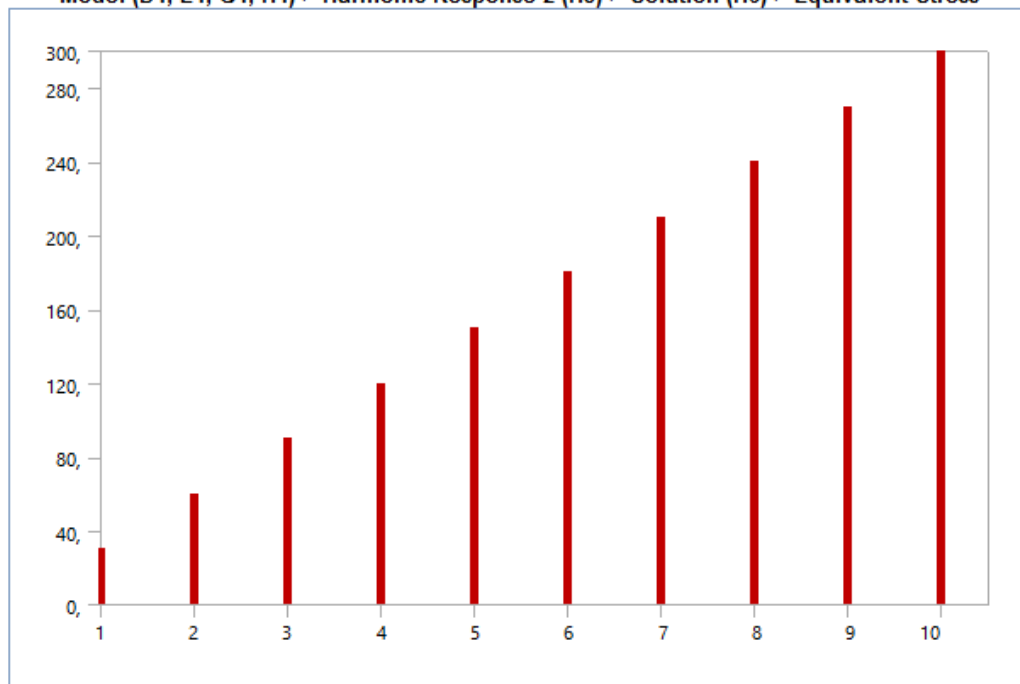


TABLE 60

Model (D4, E4, G4, H4) > Harmonic Response 2 (H5) > Solution (H6) > Total Deformation

Set	Frequency [Hz]
1,	30,
2,	60,
3,	90,
4,	120,
5,	150,
6,	180,
7,	210,
8,	240,
9,	270,
10,	300,

**FIGURE 14**  
**Model (D4, E4, G4, H4) > Harmonic Response 2 (H5) > Solution (H6) > Equivalent Stress**



**TABLE 61**  
**Model (D4, E4, G4, H4) > Harmonic Response 2 (H5) > Solution (H6) > Equivalent Stress**

Set	Frequency [Hz]
1,	30,
2,	60,
3,	90,
4,	120,
5,	150,
6,	180,
7,	210,
8,	240,
9,	270,
10,	300,

**TABLE 62**  
**Model (D4, E4, G4, H4) > Harmonic Response 2 (H5) > Solution (H6) > Result Charts**

Object Name	Frequency Response	Frequency Response 2
State	Solved	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	1 Face	
Spatial Resolution	Use Average	
Definition		
Type	Directional Deformation	
Orientation	Z Axis	
Coordinate System	Global Coordinate System	
Suppressed	No	
Options		
Frequency Range	Use Parent	
Minimum Frequency	0, Hz	
Maximum Frequency	300, Hz	
Display	Bode	
Chart Viewing Style	Log Y	
Results		
Maximum Amplitude	4,4534e-008 in	1,8184e-007 in
Frequency	300, Hz	
Phase Angle	0, °	
Real	4,4534e-008 in	1,8184e-007 in
Imaginary	0, in	

**FIGURE 15**  
**Model (D4, E4, G4, H4) > Harmonic Response 2 (H5) > Solution (H6) > F requency Response**

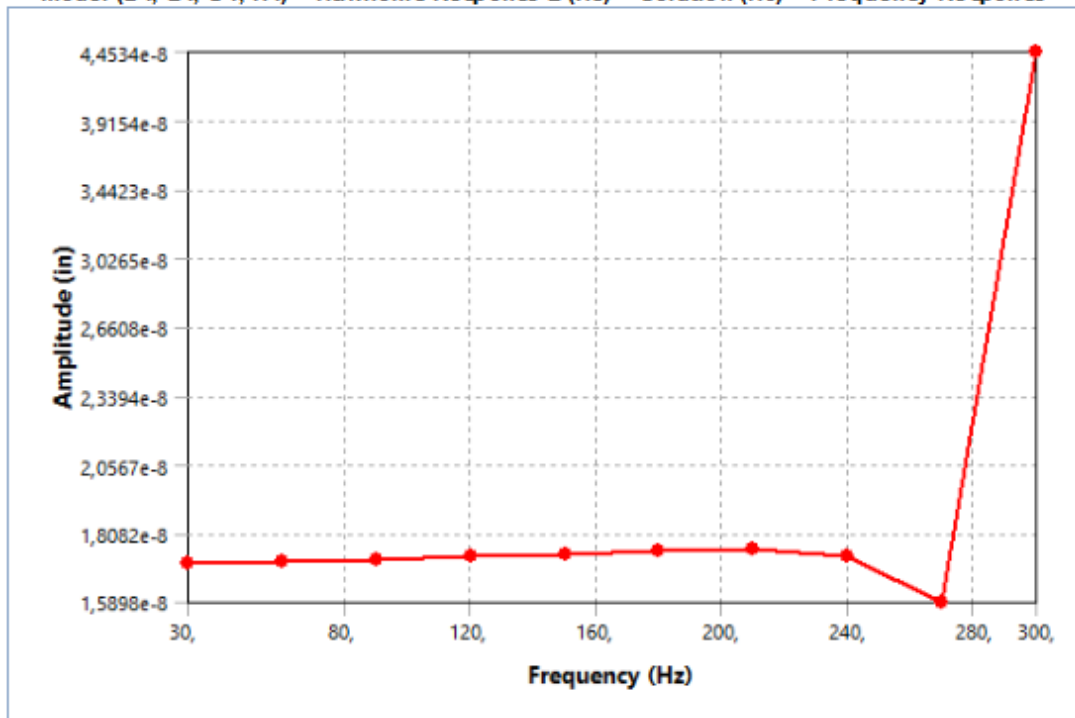
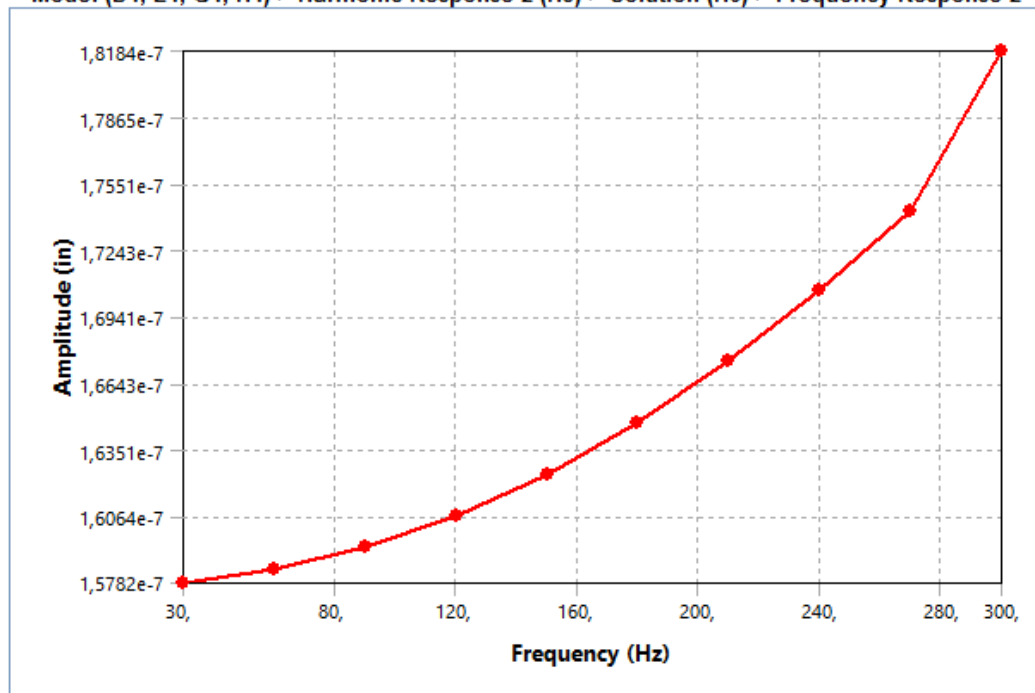


FIGURE 16  
Model (D4, E4, G4, H4) > Harmonic Response 2 (H5) > Solution (H6) > Frequency Response 2

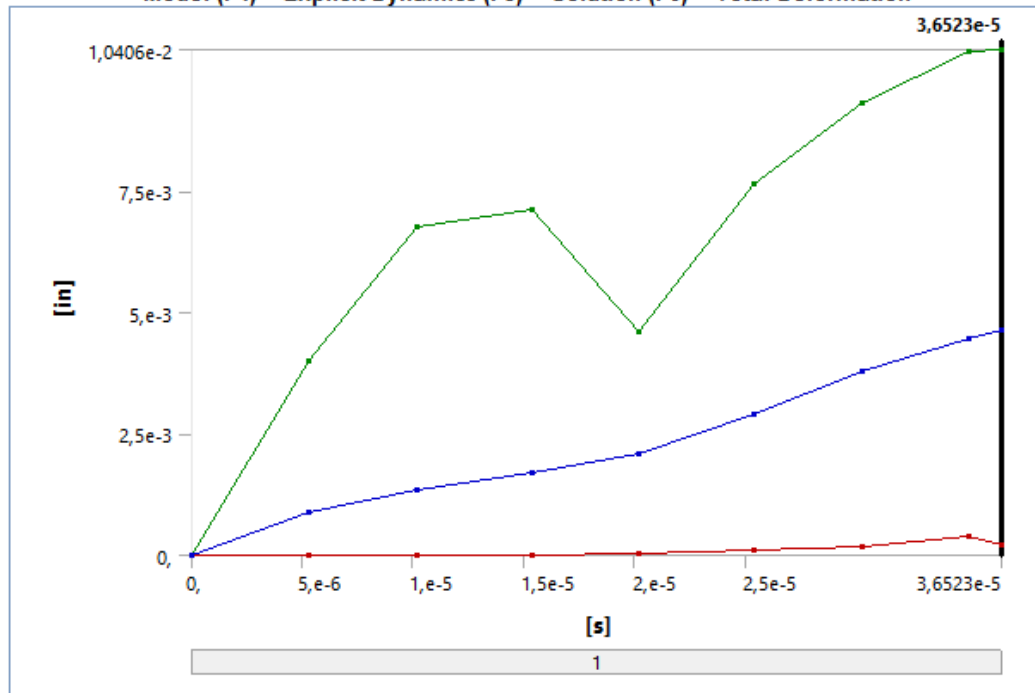


Dinámica Explícita (Explicit Dynamics).

**TABLE 18**  
**Model (F4) > Explicit Dynamics (F5) > Solution (F6) > Results**

Object Name	Total Deformation	Equivalent Stress
State	Solved	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	All Bodies	
Definition		
Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Time	
Display Time	Last	
Calculate Time History	Yes	
Identifier		
Suppressed	No	
Results		
Minimum	2,1707e-004 in	0, psi
Maximum	1,0406e-002 in	1,5703e+005 psi
Average	4,626e-003 in	21838 psi
Minimum Occurs On	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 40T 20PA 3FW ---S40N3.0H2.0L1.25S1\Keyway	
Maximum Occurs On	pppp_Inch - Spur gear 2.5DP 40T 20PA 3FW ---S40N3.0H2.0L1.25S1\Keyway	
Minimum Value Over Time		
Minimum	0, in	0, psi
Maximum	3,8449e-004 in	0, psi
Maximum Value Over Time		
Minimum	0, in	0, psi
Maximum	1,0406e-002 in	1,6297e+005 psi
Information		
Time	3,6523e-005 s	
Set	9	
Cycle Number	100	
Integration Point Results		
Display Option		Averaged
Average Across Bodies		No

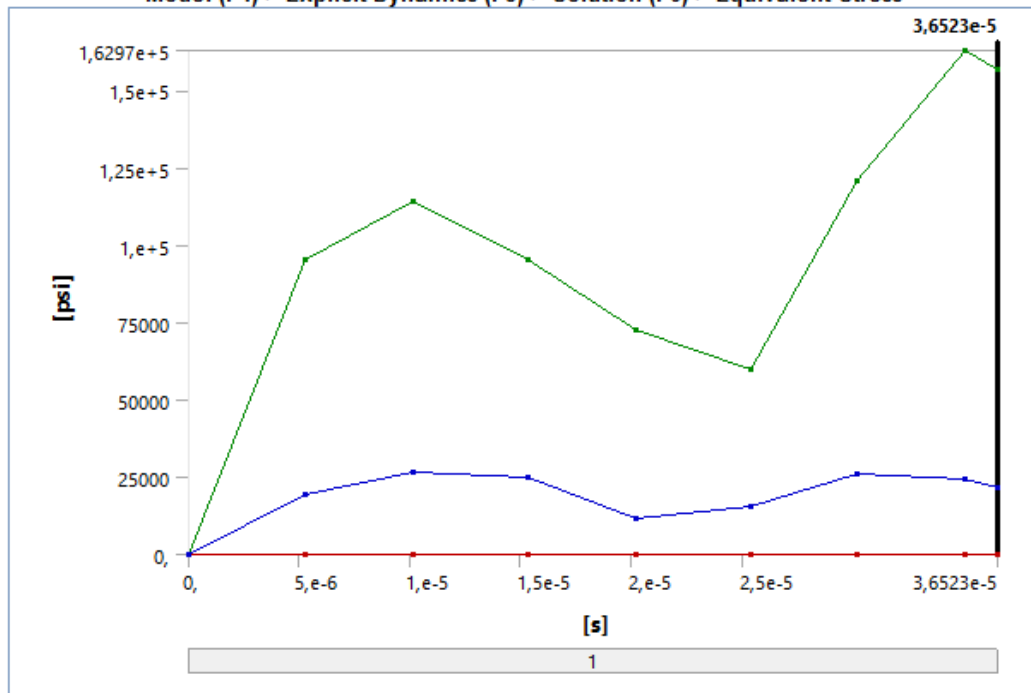
**FIGURE 4**  
**Model (F4) > Explicit Dynamics (F5) > Solution (F6) > Total Deformation**



**TABLE 19**  
**Model (F4) > Explicit Dynamics (F5) > Solution (F6) > Total Deformation**

Time [s]	Minimum [in]	Maximum [in]	Average [in]
1,1755e-038			
5,2877e-006	0,	3,9984e-003	8,9888e-004
1,0122e-005		6,7746e-003	1,3305e-003
1,5329e-005	9,2881e-007	7,1164e-003	1,7072e-003
2,0164e-005	3,8984e-005	4,6076e-003	2,0936e-003
2,537e-005	1,1556e-004	7,641e-003	2,8989e-003
3,0204e-005	1,804e-004	9,302e-003	3,7736e-003
3,5035e-005	3,8449e-004	1,0359e-002	4,4588e-003
3,6523e-005	2,1707e-004	1,0406e-002	4,626e-003

**FIGURE 5**  
**Model (F4) > Explicit Dynamics (F5) > Solution (F6) > Equivalent Stress**



**TABLE 20**  
**Model (F4) > Explicit Dynamics (F5) > Solution (F6) > Equivalent Stress**

Time [s]	Minimum [psi]	Maximum [psi]	Average [psi]
1,1755e-038			
5,2877e-006	0,	95447	19436
1,0122e-005		1,1413e+005	26541
1,5329e-005		95615	24984
2,0164e-005		72614	11566
2,537e-005		60026	15416
3,0204e-005		1,2075e+005	25853
3,5035e-005		1,6297e+005	24251
3,6523e-005		1,5703e+005	21838

*Anexo 36: Análisis de los Engranés N4 y N5*  
**Fuente:** (Mullo P, 2020)

Análisis Estructural Estática Flecha 1 (Static Structural).

TABLE 26		
Model (A4, B4) > Static Structural 2 (B5) > Solution (B6) > Results		
Object Name	Total Deformation	Equivalent Stress
State	Solved	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	All Bodies	
Definition		
Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Time	
Display Time	Last	
Calculate Time History	Yes	
Identifier		
Suppressed	No	
Results		
Minimum	5,4775e-003 in	0,19619 psi
Maximum	8,3721e-002 in	699,74 psi
Average	3,8499e-002 in	71,27 psi
Minimum Occurs On	Flecha_1_Solido-FreeParts	
Maximum Occurs On	Flecha_1_Solido-FreeParts	
Information		
Time	1, s	
Load Step	1	
Substep	1	
Iteration Number	1	
Integration Point Results		
Display Option		Averaged
Average Across Bodies		No

**TABLE 27**  
**Model (A4, B4) > Static Structural 2 (B5) > Solution (B6) > Total Deformation**

Time [s]	Minimum [in]	Maximum [in]	Average [in]
1,	5,4775e-003	8,3721e-002	3,8499e-002

**TABLE 28**  
**Model (A4, B4) > Static Structural 2 (B5) > Solution (B6) > Equivalent Stress**

Time [s]	Minimum [psi]	Maximum [psi]	Average [psi]
1,	0,19619	699,74	71,27

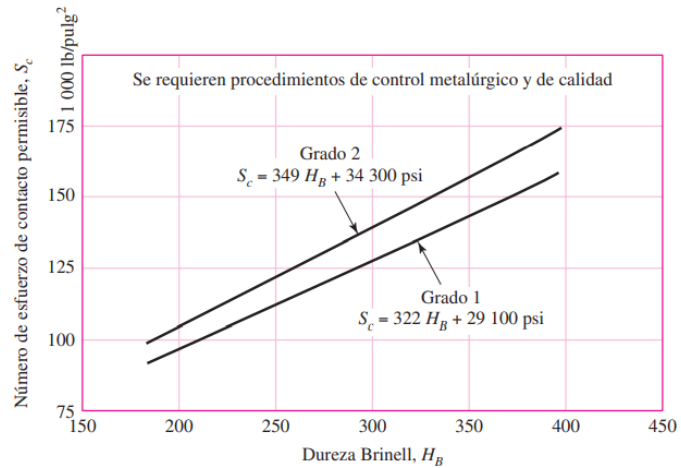
*Anexo 37: Análisis de la Flecha 3.*

*Fuente: (Mullo P, 2020)*



**Figura 14-5**

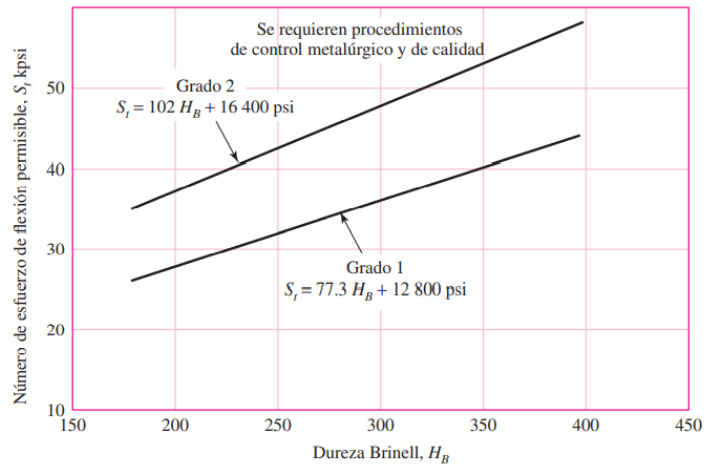
Resistencia a la fatiga por contacto  $S_c$  a  $10^7$  ciclos y confiabilidad de 0.99 de engranes de acero completamente endurecido. Las ecuaciones en unidades SI son  $S_c = 2.22 H_B + 200$  MPa, grado 1 y  $S_c = 2.41 H_B + 237$  MPa, grado 2. (Fuente: ANSI/AGMA 2001-D04 y 2101-D04.)



**Anexo 38: Resistencia a la Fatiga por Contacto de Acero Completamente Endurecido.**  
**Fuente:** (Douglas y Monel, 2008)

**Figura 14-2**

Número de esfuerzo de flexión permisible de aceros completamente endurecidos. Las ecuaciones en unidades SI son  $S_t = 0.533 H_B + 88.3$  MPa, grado 1 y  $S_t = 0.703 H_B + 113$  MPa, grado 2. (Fuente: ANSI/AGMA 2001-D04 y 2101-D04.)



**Anexo 39: Numero de Esfuerzo de Flexión Permisible para Acero Completamente Endurecido.**  
**Fuente:** (Douglas y Monel, 2008)

### Engranes

$w_i$	Velocidad Angular de entrada
$w_0$	Velocidad Angular de salida promedio calculada
$e$	Valor del tren
$N_2$	Número de dientes del engrane N2
$N_3$	Número de dientes del engrane N3
$N_4$	Número de dientes del engrane N4
$N_5$	Número de dientes del engrane N5
$w_5$	Velocidad Angular de salida real
$w_3 = w_4$	Velocidad Angular de salida en el segmento
$H$	Potencia de Entrada

$T_2$	Par Torsor 2
$T_3$	Par Torsor 3
$T_5$	Par Torsor 5
$P_{min}$	Paso Diametral Mínimo
$Y$	Altura global de la caja de engranes
$d_2$	Diámetro de paso del engrane N2
$d_3$	Diámetro de paso del engrane N3
$d_4$	Diámetro de paso del engrane N4
$d_5$	Diámetro de paso del engrane N5
$V_{23}$	Velocidad en Línea de Paso parte 2, 3
$V_{45}$	Velocidad en Línea de Paso parte 4, 5
$W_{23}^t$	Carga Transmitida parte 2, 3
$W_{45}^t$	Carga Transmitida parte 4, 5
$I$	Factor Geométrico
$\Phi_t$	Angulo de Presión Transversal
$m_N$	Relación de Distribución de Carga
$m_G$	Relación de Engranes
$Q_v$	Número del nivel de precisión de la transmisión
$K_v$	Factor Dinámico
$F$	Ancho de Cara
$K_{m1} = C_{mf1}$	Factor de distribución de Carga
$C_{mc}$	Factor de Corrección de Carga
$C_{pf}$	Factor de Proporción del piñón
$C_{pm}$	Modificación de Proporción del Piñón
$C_{ma}$	Factor de Alineación del Acoplamiento
<b>Unidades Comerciales Cerradas A, B, C.</b>	A; B; C
$C_e$	Factor de Corrección de la Alineación del Acoplamiento
$K_0$	Factor de Sobrecarga
$K_s$	Factor de Tamaño
$C_f$	Factor de la Condición Superficial
$C_p$	Coefficiente Elástico
$\sigma_c$	Esfuerzo de contacto a partir de relaciones AGMA (20574.8029 PSI)
$L_2$	Número de Ciclos para la Vida Especificada de 12000 horas ( $10^6$ )
$\sigma_{c perm}$	Esfuerzo de contacto permisible, AGMA
$S_c$	Resistencia a la fatiga superficial AGMA, esfuerzos de contacto permisibles
$S_H$	Factor de seguridad AGMA
$Z_n$	Factor de vida de ciclos de esfuerzo (valor obtenido de la gráfica)

$C_H$	Factores de la relación de durezas de resistencia a la picadura
$K_T$	Factores de temperatura
$K_R$	Factores de confiabilidad
$HB$	Dureza Brinell
$n_C$	Factor de Seguridad para el desgaste
$J$	Factor geométrico de resistencia a la flexión
$K_B$	Factor de espesor del aro
$\sigma$	Esfuerzo de flexión
$Y_N$	Factor de ciclos de esfuerzo de resistencia a la flexión
$S_t$	Resistencia a la flexión AGMA, esfuerzo de flexión permisible
$\sigma_{perm}$	Esfuerzo de flexión permisible
$S_F$	Factor de seguridad AGMA
$n$	Factor de seguridad para la flexión

*Anexo 40: Nombre de los Símbolos Utilizados en el Cálculo de los Engranés.*

*Fuente:* (Douglas y Monel, 2008)

### Flechas

$W_{23}^r$	Carga Transmitida Radialmente parte 2, 3
$T$	Momento Torsor
$M$	Momento Flexiónate o flector
$k_t = k_f$	Flexión Filete de hombro: bien redondeado
$k_{ts} = k_{fs}$	Torsión Filete de hombro: bien redondeado
$S_{ut}$	Resistencia a la Tensión
$S_y$	Resistencia a la Fluencia
$k_a$	Factor de modificación de la condición superficial
$a$	Maquinado o laminado en frío
$b$	Maquinado o laminado en frío
$k_b$	Factor de modificación del tamaño
$k_c$	Factor de modificación de la carga
$k_d$	Factor de modificación de la temperatura
$k_e$	Factor de confiabilidad
$k_f$	Factor de modificación de efectos varios
$S_e$	Límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte de máquina en la geometría y condición de uso.
$d$	Diámetro de la Flecha
$n$	Coeficiente de Seguridad
$M_a$	Momento Flector resultante en la flecha
$T_m$	Momento Torsor calculado
$K_t$	Factor de concentración del esfuerzo
$q$	Sensibilidad a la muesca
$K_f$	Factor de concentración del esfuerzo por fatiga
$\vartheta'_a$	Esfuerzo Alternante Equivalente
$\vartheta'_m$	Esfuerzo Medio
$n_f$	Factor de Seguridad contra la Fluencia

$n_y$	Factor de Seguridad contar Fallo por Fatiga
$a$	Grosor (anillo de retención)
$t$	Profundidad (anillo de retención)
$L_c$	Número de Ciclos para la Vida Especificada de 12000 horas
$F_{RA}$	Fuerza
$F$	Fuerza
$t$	Ancho cuña
$L$	Largo Mínimo

**Anexo 41:** Nombre de los Símbolos Utilizados en el Cálculo de las Flechas.

**Fuente:** (Douglas y Monel, 2008)

## **Bibliografía.**

- CASTILLO GARCÍA, M., 2017. Un Generador Eléctrico Para. , Consumo Anual Per Cápita – ARCONEL. [en línea], 2017. [Consulta: 7 diciembre 2019]. Disponible en: <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/recaudacion-anual/>.
- CONTRERAS, I.T., EDUARDO, C., LÓPEZ, M., ARRIAGA, I.H. y FLORES, G.V., 2018. Desarrollo de una caja de engranajes para un aerogenerador de 30 kW de capacidad. , no. 442.
- COTRANSA, 2012. *Catalogo de engranes y cadenas* [en línea]. 2012. S.l.: s.n. Disponible en: [https://www.cotransa.net/catalogo/ec96\\_cotransa\\_catalogo\\_engranes\\_y\\_cadenas.pdf](https://www.cotransa.net/catalogo/ec96_cotransa_catalogo_engranes_y_cadenas.pdf).
- DOUGLAS, A. y MONEL, M., 2008. *Diseño en Ingeniería Mecánica*. Octava. México, D.F.: s.n. ISBN 978-0-07-312193-2.
- ESTEBAN GARCÍA, 2003. Diseño y simulación de una caja reductora de velocidad. , no. 1, pp. 6-8. DOI 10.16309/j.cnki.issn.1007-1776.2003.03.004.
- JHOSELIN BUÑAY, 2018. *ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA DEL ÓVALO 10 AL 13 DEL CANAL DE RIEGO AMBATO - HUACHI - PELILEO, CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA* [en línea]. S.l.: s.n. Disponible en: <http://repo.uta.edu.ec/bitstream/handle/123456789/5301/Mg.DCEv.Ed.1859.pdf?sequence=3>.
- LAUREANO MOYA RODRÍGUEZ, J. y CHAGOYÉN MÉNDEZ, C.A., 2012. Diseño de caja multiplicadora para turbinas eólicas. *VII Conferencia Científica Internacional de Ingeniería Mecánica*, no. November. DOI 10.13140/RG.2.1.3733.0407.
- LENIN IBAÑEZ, 2019. Diseño y construcción de una mini - turbina hidrúlica tipo Michell - Banki para ser instalada en canales primarios abiertos y generar energía mecánica. , pp. 86.
- ROBERT L. MOTT, P.E., 2004. Diseño de elementos de máquinas. , pp. 944.
- SCHALLENBERG, J.C., GONZALO, R., IZQUIERDO, P., HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ, C., UNAMUNZAGA, P., RAMÓN, F., DÉNIZ, G., DÍAZ, M.,

DELIA, T., PÉREZ, C., MARTEL RODRÍGUEZ, G., PARDILLA, J., VICENTE, F. y ORTIN, S., 2008. *Energías renovables y eficiencia energética*. S.l.: s.n. ISBN 978-84-69093-86-3.

SPRING, C., [sin fecha]. CENTURY NUMBER. , no. 213, pp. 1.

VÁZQUEZ, A.L., 2014. La energía renovable en México: perspectivas desde el Balance Nacional de Energía 2012. *Economía Informa* [en línea], vol. 385, pp. 90-99. ISSN 01850849. DOI 10.1016/s0185-0849(14)70423-2. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/S0185-0849\(14\)70423-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0185-0849(14)70423-2).

Ambato, 01 de febrero del 2021

### **Certificado**

Por el presente certifico que: el señor Mullo Coque Pablo Sebastián, con cedula de identificación No. 050377283-3, estudiante de la carrera de ingeniería Industrial, realizó su trabajo de titulación denominado ***"OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE POR MEDIO DE UNA CAJA MULTIPLICADORA PARA UNA PICO HIDROELÉCTRICA EN EL CANAL DE RIEGO AMBATO – HUACHI – PELILEO"***. Dicho trabajo ha sido culminado y la entrega de este servirá como referente para la aplicación en la optimización del sistema de energía renovable Ambato – Huachi – Pelileo, así mismo debo destacar que ha demostrado responsabilidad, honestidad y dedicación en las labores a el encomendadas para la finalización de su trabajo de titulación.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad, autorizando al interesado hacer uso de este documento como creyera conveniente.



Ing. Patricio Sánchez.  
**Coordinador de la Carrera de ingeniería Industrial.**  
Universidad Tecnológica Indoamérica.



Firmado electrónicamente por:  
**MANUEL IGNACIO  
AYALA CHAUVIN**

Ing. Ignacio Ayala  
**Docente Investigador**  
Universidad Tecnológica Indoamérica.