



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROYECTO TÉCNICO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TEMA:

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLINO DE BOLAS DE ALTA ENERGÍA
CON SISTEMA DE REFRIGERACIÓN PARA APLICACIÓN DE
PULVIMETALURGIA PARA EL LABORATORIO DE MATERIALES DE LA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA”

Autores: Alex Abraham Moya Campaña
Edwin Vinicio Saquina Sangucho

Tutor: Ing. Mg. Gonzalo Eduardo López Villacís

Ambato - Ecuador

Octubre 2020

CERTIFICACIÓN

En calidad de tutor del proyecto técnico, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, con el tema “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLINO DE BOLAS DE ALTA ENERGÍA CON SISTEMA DE REFRIGERACIÓN PARA APLICACIÓN DE PULVIMETALURGIA PARA EL LABORATORIO DE MATERIALES DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**”, elaborado por los señores Moya Campaña Alex Abraham portador de la cedula de ciudadanía: 1850271808, y del señor Saquina Sangucho Edwin Vinicio portador de la cedula de ciudadanía: 1804733093, egresados de Carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, de la Universidad Técnica de Ambato.

CERTIFICO:

- Que el presente proyecto técnico es original de sus autores.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Esta concluido en su totalidad.

Ambato, Octubre 2020

.....
Ing. Mg. Gonzalo Eduardo López Villacís

TUTOR

AUTORIA DE LA INVESTIGACIÓN

Nosotros, Moya Campaña Alex Abraham con CI. 1850271808 y Saquina Sangucho Edwin Vinicio con CI. 1804733093, declaramos que todas las actividades y contenidos expuestos en el presente proyecto técnico con el tema “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLINO DE BOLAS DE ALTA ENERGÍA CON SISTEMA DE REFRIGERACIÓN PARA APLICACIÓN DE PULVIMETALURGIA PARA EL LABORATORIO DE MATERIALES DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**”, así como también las ideas de diseño, criterios, análisis, resultados, conclusiones y recomendaciones son de nuestra exclusiva responsabilidad como autores de la investigación. a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo.

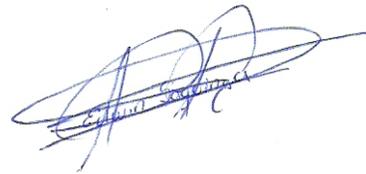
Ambato, Octubre 2020



.....
Alex Abraham Moya Campaña

CI. 1850271808

AUTOR



.....
Edwin Vinicio Saquina Sangucho

CI. 1804733093

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizamos a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga del presente Proyecto Técnico o parte de él, como un documento útil para su lectura, consulta y proceso de investigación, según las normas de la institución.

Cedemos los Derechos en línea patrimoniales de nuestro Proyecto Técnico con fines de difusión pública, además aprobamos la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad Técnica de Ambato, siempre y cuando dicha reproducción no genere una ganancia económica y se realice respetando nuestros derechos de autor.

Ambato, Octubre 2020



.....
Alex Abraham Moya Campaña

CI. 1850271808

AUTOR



.....
Edwin Vinicio Saquinga Sangucho

CI. 1804733093

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del presente Proyecto Técnico realizado por los estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecánica, Moya Campaña Alex Abraham y Saquina Sangucho Edwin Vinicio, bajo el tema: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLINO DE BOLAS DE ALTA ENERGÍA CON SISTEMA DE REFRIGERACIÓN PARA APLICACIÓN DE PULVIMETALURGIA PARA EL LABORATORIO DE MATERIALES DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA”**

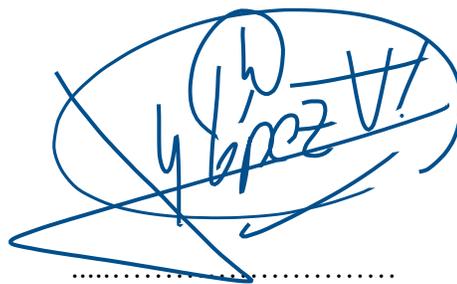
Ambato, Octubre 2020

Para constancia firman:



.....
Ing. Mg. Francisco Agustín Peña Jordán

Miembro del Tribunal



.....
Ing. Mg. Jorge Enrique López Velástegui

Miembro del Tribunal

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación se lo dedico en primer lugar a Dios por darme la fuerza y la salud necesaria para lograr llegar hasta este momento y cumplir un sueño más, a mis padres por ser el pilar principal en mi formación académica y personal, quienes han estado a mi lado en todo momento apoyándome ante cualquier obstáculo, inculcándome valores como el respeto, el trabajo y la honestidad, entregándome todo su amor, trabajo y sacrificio a lo largo de todos estos años.

A mis maestros quienes con sus enseñanzas y conocimientos me ayudaron a cumplir una meta y a mis amigos con quienes hemos sabido salir adelante para alcanzar nuestra meta de ser grandes profesionales.

Alex Moya

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios por mantener a mis padres junto a mí, por compartir y disfrutar la vida junto a ellos, gracias a mis padres porque ellos son los principales promotores de mis sueños, gracias por cada día confiar y creer en mí y en mis sueños; gracias a ellos porque siempre desean y anhelan lo mejor para mi vida, gracias cada uno sus consejos y cada una de sus palabras que me encaminaron durante mi vida.

De igual manera mis agradecimientos a la Universidad Técnica de Ambato, a la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, por darme la oportunidad de cumplir una meta más en mi vida.

Finalmente agradezco al Ing. Mg. Gonzalo López, el principal colaborador durante todo el proceso, gracias a su orientación, conocimiento, enseñanza y colaboración que permitió el cumplimiento de este trabajo.

Alex Moya

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación se lo dedico en primer lugar a Dios y a mi madre que está en el cielo por darme la fuerza y la salud necesaria para lograr llegar hasta este momento y cumplir un sueño más, a mi padre y hermano por ser el pilar principal en mi formación académica y personal, quienes han estado a mi lado en todo momento apoyándome ante cualquier obstáculo, inculcándome valores como el respeto, el trabajo y la honestidad, entregándome todo su amor, trabajo y sacrificio a lo largo de todos estos años.

A mis maestros quienes con sus enseñanzas y conocimientos me ayudaron a cumplir una meta y a mis amigos con quienes hemos sabido salir adelante para alcanzar nuestra meta de ser grandes profesionales.

Edwin Saquina.

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios por mantener a mi Padre y hermano junto a mí, por compartir y disfrutar la vida junto a ellos, gracias a mi padre y hermano porque ellos son los principales promotores de mis sueños, gracias por cada día confiar y creer en mí y en mis sueños; gracias a ellos porque siempre desean y anhelan lo mejor para mi vida, gracias cada uno sus consejos y cada una de sus palabras que me encaminaron durante mi vida.

De igual manera mis agradecimientos a la Universidad Técnica de Ambato, a la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, por darme la oportunidad de cumplir una meta más en mi vida.

Finalmente agradezco al Ing. Mg. Gonzalo López, el principal colaborador durante todo el proceso, gracias a su orientación, conocimiento, enseñanza y colaboración que permitió el cumplimiento de este trabajo.

Edwin Saquina.

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORIA DE LA INVESTIGACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
DEDICATORIA	viii
AGRADECIMIENTO	ix
ÍNDICE GENERAL.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvii
RESUMEN EJECUTIVO.....	xxvi
ABSTRACT	xxvii
CAPÍTULO I.....	1
MARCO TEORICO.....	1
1.1. Antecedentes Investigativo.....	1
1.1.1. Investigaciones preliminares.....	1
1.1.2. Justificación	2
1.1.3. Fundamentación Teórica.....	2

1.1.3.1.	Ciencia e Ingeniería	2
1.1.3.2.	Pulvimetalurgia.....	5
1.1.3.3.	Pulverización	5
1.1.3.4.	Molienda.....	6
1.1.3.5.	Operación de molienda.....	10
1.1.3.6.	Tipos de molinos.....	11
1.1.3.7.	Cuerpos moledores	12
1.1.3.8.	Molinos de Bolas de alta energía.....	12
1.1.3.9.	Fundamentos de la Molienda Mecánica	15
1.2.	Objetivos.....	18
1.2.1.	Objetivo General:.....	18
1.2.2.	Objetivos Específicos:	18
CAPÍTULO II		20
METODOLOGÍA		20
2.1.	Molino de bolas de alta energía con sistema de refrigeración.....	20
2.1.1.	Mecanismos de molienda.....	21
2.2.	Sistema mecánico	25
2.2.1.	Acero estructural.....	25
2.2.1.1.	Características del acero estructural	25

2.2.1.2.	Perfil angular de calidad ASTM A36	25
2.2.1.3.	Plancha de Acero Galvanizada bajo Norma: ASTM A36	26
2.2.1.4.	Eje AISI 4340	27
2.2.2.	Acero al carbono para máquinas AISI 1045	27
2.2.3.	Acero Inoxidable.....	28
2.2.4.	Rodamientos radiales	29
2.2.5.	Motor	29
2.2.6.	Piñón de cigüeñal.....	30
2.2.7.	Bandas dentadas Sincrónicas.....	30
2.2.8.	Bomba SUMERGIBLE AD20P	31
2.2.9.	Pintura o fondo Epóxico.	32
2.2.10.	Reductor epóxido.....	32
2.2.11.	Bolas para molienda.....	32
2.3.	Sistema eléctrico	33
2.3.1.	Selector ON/OFF	33
2.3.2.	Variador de frecuencia:.....	33
2.3.3.	Pulsador de emergencia	34
2.3.4.	Relé temporizador.....	35
2.3.5.	Breaker.....	35
2.3.6.	Enchufe trifásico	35

2.3.7.	Cable No 12	36
2.4.	Métodos	37
2.4.1.	Descripción de metodología	37
2.4.1.1.	Etapa de estudio	37
2.4.1.2.	Etapa de diseño preliminar	37
2.4.1.3.	Etapa de diseño final.....	38
2.4.1.4.	Etapa de simulación	38
2.4.1.5.	Etapa de construcción	38
2.4.1.6.	Etapa de montaje.....	38
2.4.1.7.	Etapa de pruebas de funcionamiento	38
CAPÍTULO III.....		39
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		39
3.1.	Selección de alternativas.....	39
3.1.1.	Sistemas de transmisión.....	39
3.1.1.1.	Alternativa I - Por engranajes	39
3.1.1.2.	Alternativa II - Por ruedas y 4 bandas dentadas	40
3.1.1.3.	Alternativa III – Por piñones y correa sincronizada	40
3.1.2.	Refrigerante	41
3.1.2.1.	Alternativa I – Refrigerante FREEZETONE.....	41

3.1.2.2.	Alternativa II – Líquido Antioxidante FREEZETONE	41
3.1.2.3.	Alternativa III – Refrigerante Radiador Verde	42
3.1.3.	Evaluación de los sistemas de transmisión	42
3.1.3.1.	Criterios a ponderar	42
3.1.3.2.	Evaluación de cada criterio:.....	43
3.1.3.3.	Tabla de criterios	45
3.1.4.	Evaluación de los tipos de refrigerantes	46
3.1.4.1.	Criterios a ponderar	46
3.1.4.2.	Evaluación de cada criterio:.....	47
3.1.4.3.	Tabla de evaluación de los tipos de refrigerante.....	48
3.2.	Diseño del molino de bolas de alta energía con sistema de refrigeración	49
3.2.1.	Cálculo de número de bolas para este tipo de molinos.....	49
3.2.2.	Diseño del recipiente de molienda.....	55
3.2.3.	Delimitación del espesor del recipiente de molienda	58
3.2.4.	Potencia requerida.....	63
3.2.4.1.	Definición de inercias.	64
3.2.5.	Validación de potencia y fuerza de impacto con el Working Model.....	74
3.2.6.	Diseño de la caja base de molienda.	76
3.2.7.	Cálculo del número de pernos en la caja base (acero1045.).....	79
3.2.8.	Determinación de las tensiones en la polea Dentada.....	84

3.2.9.	Selección de correas síncronas	86
3.2.10.	Diseño de eje Principal.	92
3.2.11.	Selección de chumaceras para eje primario	100
3.2.12.	Selección de rodamientos para el eje de unión de la caja base.....	103
3.2.13.	Selección del tipo de juste y tolerancia de los rodamientos- eje	106
3.2.14.	Excentricidad	110
3.3.	Análisis de componentes	111
3.3.1.	Eje	111
3.3.1.1.	Análisis fatiga.	113
3.3.2.	Caja Base	115
3.3.2.1.	Estudio de frecuencia del sistema del molino de bolas de alta energía.	117
3.3.3.	Caja de Molienda	120
3.3.3.1.	Análisis de impacto de la caja de molienda	120
3.3.3.2.	Por impacto en la bola con 6480 N, distribuida en todas sus caras	121
3.4.	Proceso de construcción del molino de bolas de alta energía.....	123
3.5.	Presupuesto	128
3.6.	Pruebas de Funcionamiento	131
3.6.1.	Resultados de funcionamiento:.....	131
3.6.2.	Proceso de molienda.	136

CAPÍTULO IV	138
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	138
4.1. Conclusiones.....	138
4.2. Recomendaciones	139
BIBLIOGRAFÍA	141
Anexos.....	149

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Sistema de Aleación Dúctil-Dúctil.	4
Figura 1-2: Sistema de aleación dúctil-frágil.....	5
Figura 1-3: Ventajas de molienda mecánica.....	14
Figura 2-1: Molino de bolas de alta energía	20
Figura 2-2: Componentes principales de un molino de bolas de alta energía	20
Figura 2-3: Mecanismo de molienda	21
Figura 2-4: Partes que conforman el mecanismo de molienda.....	21
Figura 2-5: Perfil angular.....	25
Figura 2-6: Rodamientos de bolas.	29
Figura 2-7: Motor eléctrico.....	30
Figura 2-8: Piñón de cigüeñal.....	30
Figura 2-9: Bandas dentadas.....	31
Figura 2-10: Esquema bandas dentada y piñón de cigüeñal.....	31
Figura 2-11: Bomba sumergible AD20P.	31
Figura 2-12: Fondo Epóxico.....	32
Figura 2-13: Reductor Epóxico.	32
Figura 2-14: Bolas para molienda.....	33
Figura 2-15: Selector ON / OFF.	33
Figura 2-16: Variador de frecuencia.....	33

Figura 2-17: Pulsador de emergencia	34
Figura 2-18: Relé Temporizador.....	35
Figura 2-19: Breaker	35
Figura 2-20: Enchufe Trifásico	36
Figura 2-21: Cable N° 12.....	36
Figura 2-22: Etapas de la metodología	37
Figura 3-1: Sistema de Transmisión por engranajes.....	39
Figura 3-2: Sistema de Transmisión por ruedas y 4 bandas dentadas	40
Figura 3-3: Sistema de Transmisión por piñones y correa sincronizada	40
Figura 3-4: Refrigerante FREEZETONE.	41
Figura 3-5: Líquido Antioxidante FREEZETONE.....	41
Figura 3-6: Refrigerante Radiador Verde.	42
Figura 3-7: Bandeja de molienda.....	54
Figura 3-8: Dimensionamiento del recipiente de molienda.....	55
Figura 3-9: Diagrama del cuerpo libre de las partículas después del choque.....	56
Figura 3-10: Diagrama de impacto de las bolas sobre el recipiente de molienda.	58
Figura 3-11: Vistas de sección crítica de impacto del recipiente de molienda.....	59
Figura 3-12: Caso práctico de flexión.....	62
Figura 3-13: Datos característicos de la polea dentada.....	64
Figura 3-14: Datos característicos del eje primario	65

Figura 3-15: Datos característicos del disco excéntrico	66
Figura 3-16: Datos característicos de la tapa	68
Figura 3-17: Datos característicos de la caja base	69
Figura 3-18: Datos característicos de la caja de molienda.....	71
Figura 3-19: Datos característicos de la esfera	72
Figura 3-20: Modelado de los elementos en Working Model	74
Figura 3-21: Obtención de resultados en Working Model	74
Figura 3-22: Obtención de la Fuerza Total de Círculo en Working Model.....	75
Figura 3-23: Obtención de la Velocidad de impacto de Círculo en Working Model.....	75
Figura 3-24: Modelado de la caja base de molienda	76
Figura 3-25: Vista de sección de la caja base de molienda	76
Figura 3-26: Vista de pernos M5	80
Figura 3-27: Definición de tensiones de las poleas dentadas	84
Figura 3-28: Definición de tensiones de las poleas dentadas individuales.....	85
Figura 3-29: Conjunto poleas – correas sincrónicas.....	90
Figura 3-30: Anchura de correa H8M.....	91
Figura 3-31: Modelado del eje principal.....	92
Figura 3-32: Diagrama de cuerpo libre de una viga con carga puntual.	93
Figura 3-33: Sensibilidad de la muesca en el acero.....	97
Figura 3-34: Eje redondo con filete.	98

Figura 3-35: Valor de sensibilidad.....	99
Figura 3-35: Eje redondo con filete en el hombro de torsión.	99
Figura 3-37: Ajustes del conjunto de molienda.....	106
Figura 3-38: Consideraciones de giro y carga.	106
Figura 3-39: Ajustes de los rodamientos.	107
Figura 3-40: Diagrama de cuerpo libre eje rodamiento.	109
Figura 3-41: Datos característicos de la excentricidad	110
Figura 3-42: Análisis del eje.....	111
Figura 3-43: Análisis de tensiones del eje	112
Figura 3-44: Análisis de desplazamiento del eje	112
Figura 3-45: Análisis por factor de seguridad del eje.....	113
Figura 3-46: Análisis por porcentaje de daño del eje	114
Figura 3-47: Análisis de ciclo de vida total del eje.....	114
Figura 3-48: Análisis de factor de carga.....	115
Figura 3-49: Análisis de tensiones de la caja base.....	115
Figura 3-50: Análisis de desplazamiento de la caja base.....	116
Figura 3-51: Análisis por factor de seguridad de la caja base	116
Figura 3-52: Estudio 1 de frecuencia.....	117
Figura 3-53: Estudio 2 de frecuencia.	117
Figura 3-54: Estudio 3 de frecuencia.	118

Figura 3-55: Estudio 4 de frecuencia.....	118
Figura 3-56: Estudio 5 de frecuencia.....	119
Figura 3-57: Análisis de la caja de molienda por impacto	120
Figura 3-58: Análisis tensiones de la caja de molienda por impacto.....	120
Figura 3-59: Análisis del factor de seguridad de la caja de molienda por impacto.....	121
Figura 3-60: Análisis de la caja de molienda por impacto en la bola con 6480 N	121
Figura 3-61: Análisis tensiones de la caja de molienda por impacto con 6480 N.....	122
Figura 3-62: Análisis de Factor de Seguridad del recipiente por impacto con 6480 N	122
Figura 3-63: Análisis del Ensayo 1	132
Figura 3-64: Análisis del Ensayo 2.....	133
Figura 3-65: Análisis del Ensayo 3.....	134
Figura 3-66: Análisis del Ensayo 4.....	134

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Tipos de molinos.	7
Tabla 1-2: Cargas de componentes moledores.	8
Tabla 1-3: Tipos de molienda.	10
Tabla 1-4: Pesos molturadores.	12
Tabla 2-1. Elementos constitutivos del mecanismo de molienda	22
Tabla 2-2. Elementos constitutivos de la transmisión.....	23
Tabla 2-3. Elementos constitutivos de la estructura.....	24
Tabla 2-4. Tubo estructural cuadrado.	26
Tabla 2-5. Composición Química de la Plancha de Acero bajo Norma: ATM A36.....	26
Tabla 2-6. Propiedades Mecánicas de la Plancha de Acero bajo Norma: ATM A36.	26
Tabla 2-7. Análisis típico del material AISI 4340.	27
Tabla 2-8. Propiedades mecánicas del material AISI 4340.	27
Tabla 2-9. Análisis típico del material AISI 1045.	27
Tabla 2-10. Propiedades mecánicas del material AISI 1045.	28
Tabla 2-11. Tratamiento térmicos del material AISI 1045.	28
Tabla 3-1. Evaluación de criterios por los mecanismos.....	43
Tabla 3-2. Valoración según el costo.....	43

Tabla 3-3. Valoración según la adquisición.....	44
Tabla 3-4. Valoración según el montaje.....	44
Tabla 3-5. Valoración según la estabilidad	44
Tabla 3-6. Valoración según la facilidad de mantenimiento.....	45
Tabla 3-7. Criterios	45
Tabla 3-8. Evaluación por criterio de tipos de refrigerantes	46
Tabla 3-9. Valoración según el costo.....	47
Tabla 3-10. Valoración según la adquisición de refrigerantes.....	47
Tabla 3-11. Valoración según el periodo de duración	47
Tabla 3-12. Valoración según el Punto de Ebullición.....	48
Tabla 3-13. Evaluaciones de los tipos de refrigerante	48
Tabla 3-14. Pautas para la selección de la cantidad de bolas.....	50
Tabla 3-15. Constantes para el cálculo de placas rectangulares	60
Tabla 3-16. Coeficientes k y k1 para los casos prácticos de flexión.....	62
Tabla 3-17. Resumen de datos característicos de elementos	73
Tabla 3-18. Tornillo Allen Cabeza Plana.....	80
Tabla 3-19. Diámetros y áreas roscadas.....	81
Tabla 3-20. Parámetros de rigidez.....	82

Tabla 3-21. Clases métricas de propiedad mecánica pernos	83
Tabla 3-22. Especificaciones de la refrigeración externa	83
Tabla 3-23. Coeficiente de rozamiento	86
Tabla 3-24. Factor de servicio.....	87
Tabla 3-25. Tabla de selección del paso para Transmisión Sincrónica	88
Tabla 3-26. Tabla de selección para Transmisión Sincrónica. Paso 8 M	89
Tabla 3-27. Tabla de capacidad de Transmisión con Correas 8M.....	90
Tabla 3-28. Tamaño Estándar de Correa. H8M	91
Tabla 3-29. Fajas de Distribución.	92
Tabla 3-30. Parámetros del Factor de Modificación	95
Tabla 3-31. Efectos de temperatura de operación	96
Tabla 3-32. Factor de modificación de confiabilidad	97
Tabla 3-33. Vida útil especificada	101
Tabla 3-34. Chumacera para eje. I	102
Tabla 3-35. Chumacera para eje. II.....	102
Tabla 3-36. Vida útil especificada	103
Tabla 3-37. Rodamiento de Bolas para contacto angular.....	105
Tabla 3-38. Tolerancia para los rodamientos de bolas.....	108

Tabla 3-39. Tolerancia en el sistema de agujero único y eje único	108
Tabla 3-40. Ajustes recomendados en los alojamientos para rodamientos axiales.....	109
Tabla 3-41. Tolerancia en los alojamientos soporte de función de hierro o acero.....	110
Tabla 3-42. Datos del estudio frecuencia.	119
Tabla 3-43. Construcción del molino de bolas de alta energía	123
Tabla 3-44. Costo de materiales.....	128
Tabla 3-45. Costo de mano de obra.....	129
Tabla 3-46. Costos indirectos.....	130
Tabla 3-47. Costos totales	130
Tabla 3-48. Pruebas de funcionamiento.....	131
Tabla 3-49. Ensayos	132
Tabla 3-50. Proceso de molienda	136

RESUMEN EJECUTIVO

El presente proyecto técnico se llevó a cabo debido a la importancia de implementar un molino de bolas de alta energía para aplicación de pulvimetalurgia y a su vez obtener polvos metálicos para el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato. El proyecto se direcciona en el diseño, construcción, y pruebas de funcionamiento, los cuales están constituidos de un motor trifásico, excéntrica, ejes, ruedas dentadas, tensores, componentes de sistema estructural, por lo que se investigó la parte teórica y práctica, con un mecanismo de molienda compuesto por una caja base de molienda, tapa de la caja, bandeja de molienda y elementos demolidores, definiendo su soporte, donde los ejes tienen la función de generar movimiento a través de las ruedas dentadas y la correa sincrónica; donde el tamaño, peso y ruido del molino son parámetros muy importantes para diseñar así como el volumen máximo de material a moler; definido así su propósito de construcción obteniéndose tamaños de partículas de 0.30 a 4.72 mm, en tiempo que varía de 0 a 120 minutos. Finalmente, la máquina se construyó con materiales disponibles en el mercado a precios accesibles en caso que se requiera algún cambio o mantenimiento.

Palabras claves: diseño, molino de bolas de alta energía, ruedas dentadas, correa sincrónica, pulvimetalurgia, equipo de molienda.

ABSTRACT

This technical project was carried out due to the importance of implementing a high-energy ball mill for powder metallurgy application and in turn obtaining metal powders for the materials laboratory of the Faculty of Mechanical Engineering of the Technical University of Ambato. The project is directed at the design, construction, and operation tests, which are made up of a biphasic motor, eccentric, axles, gear wheels, tensioners, structural system components, for which the theoretical and practical part was investigated, with a grinding mechanism composed of a grinding base box, box lid, grinding tray and demolition elements, defining its support, where the axes have the function of generating movement through the gear wheels and the synchronous belt; where the size, weight and noise of the mill are very important parameters to design as well as the maximum volume of material to be ground; Thus defined its purpose of construction obtaining particle sizes of 0.30 to 4.72 mm, in a time that varies from 0 to 120 minutes. Finally, the machine was built with materials available on the market at affordable prices in case any change or maintenance is required.

Keywords: design, high energy ball mill, gear wheels, synchronous belt, powder metallurgy, grinding equipment.

CAPÍTULO I

MARCO TEORICO

1.1. Antecedentes Investigativos

1.1.1. Investigaciones preliminares

Las investigaciones preliminares son:

Según, Cabezas, [1], indican que el molino de bolas está diseñado y construido para moler 2 kilogramos, donde sus dimensiones son de 95 cm de longitud y 51 cm de alto, produciendo ondas acústicas iguales a 112 decibeles, originado por el impacto entre las esferas y el tambor del molino, para lo cual se utiliza un aislante reduciéndose a 85 dB, obteniéndose granos de tamaño de hasta 15 μm de cuproaluminio (90% Cu+10% Al) después de 4 horas de molienda, construyéndose exitosamente ayudando a obtener nuevas aleaciones mecánicas.

Otro proyecto de investigación planteado es el de Dueñas & Gonzáles [2], el cual dice que se diseñó un prototipo de molino de bolas con capacidad de producción validada de 20 gramos de arcilla pulverizada con tamaños variables que van entre 75 μm y 250 μm , a partir de una carga inicial de 1000 gramos con un tiempo de operación de 30 minutos, disminuyendo significativamente el tiempo de procesos los cuales oscilaban entre 35 y 45 horas, ahorrándose un tiempo mínimo de hasta el 98%, duplicándose la cantidad producida pasando de 10 gramos a 20 gramos, con tamaños proporcionales de 75 a 250 micras, donde por el método manual era de 180 a 250 micras, validando la construcción con pruebas de operación y rendimiento.

Finalmente se puede indicar que según Herrera et al., dice que se diseñó un molino para la producción de aleamiento mecánico, con movimientos de tipos planetario y vibratorio, con lo cual se espera contribuir al desarrollo de infraestructura para la investigación en nuevos materiales de la región, donde el diseño propuesto pueden generar un tamaño de grano de material aleado, en base a la cantidad presupuestada, produciéndose tamaños caracterizadas, resaltando la importancia de las herramientas computacionales como facilidades de procesos [3].

1.1.2. Justificación

La pulvimetalurgia ha progresado de manera radical en las diferentes áreas de producción como la carrocería, náuticas, entre otras, por lo que el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, promueve originar diferentes estudios de aleaciones, siendo imposible efectuarlos en la actualidad, ya que se carece de estos equipos o dispositivos que permitan obtener polvos, que se utilizan para esta clase de análisis [2].

Por lo que se propone diseñar y construir un molino de bolas de alta energía con sistema de refrigeración para aplicación de pulvimetalurgia para el Laboratorio de Materiales de la carrera de Ingeniería Mecánica, el mismo que tiene la función de generar polvos metálicos, pudiendo llegar a formar aleaciones mecánicas a través del impacto si se lo requiere, que se origina por las esferas, contribuyendo de esta manera al desarrollo de investigaciones en el área de materiales, considerándose como viable el proyecto [2].

1.1.3. Fundamentación Teórica

1.1.3.1. Ciencia e Ingeniería

En los últimos tiempos la ciencia e ingeniería de los materiales ha evolucionado de manera significativa, esto se debe a que sus aplicaciones cada vez requieren materiales con mejores características y desempeño para trabajo en condiciones adversas. Es decir, cumplir con elevada rigidez, alta resistencia mecánica, baja densidad, resistencia a la corrosión y a la fatiga, etc. Es muy importante buscar nuevos procesos productivos para que con su acción en conjunto las propiedades de los materiales y las aplicaciones específicas, se logre llegar a tecnologías innovadoras como polvos sinterizados, aleaciones mecánicas, molienda de alta energía, entre otros, cuyo objetivo es obtener propiedades mejoradas de los mismos de manera considerable [4].

La aleación mecánica es un proceso muy sencillo que se sustenta en una combinación de propiedades de polvos finos. Este método se puede realizar de forma más tecnológicamente atractiva con diferentes métodos de molienda de alta energía. En este trabajo se propone obtener compuestos aleados mecánicamente según el método de

molienda aplicado y que permite obtener partículas finas en menores tiempos y empleando una menor cantidad de recursos energéticos. En sinergia se aplica elementos de molienda, siendo los más comunes los de forma esférica (Bolas de Molienda), para obtener mejores resultados [4].

La aleación mecánica es la fragmentación o dispersión de un componente en partes muy pequeñas comúnmente para producir partículas de polvo a partir de materiales útiles en la industria y esto es lo que ayuda al desarrollo de investigaciones tecnológicas en la técnica de molienda con bolas para la obtención de compuestos de alta dureza [4].

Al aplicar el proceso de molienda mencionado su proceso produce calor debido a las colisiones entre las bolas, los polvos y los componentes del agitador. Es por ello que el diseño ha tomado en cuenta la temperatura de molienda para definir la constitución del polvo molido, ya que si la temperatura que se genera es alta existe mayor movilidad atómica, es decir la difusividad asociada se incrementa y se produciría procesos de recristalización. Si esto ocurra se define como fase estable [4].

Reyes et al., dicen que la temperatura alta durante la molienda se puede producir por:

- La energía cinética durante la molienda.
- Se pueden producir fases exotérmicas durante el proceso.

Para el control de temperatura es necesario refrigerar las paredes del tanque para que en éstas el incremento de temperatura no sea tan revelador que pueda afectar el proceso. Esto es debido a que con altas temperaturas los polvos tienden a aglomerarse en las paredes y podrían provocar la avería del mismo [4].

Se citan a continuación tres sistemas que se producen mediante aleación mecánica:

1) Sistemas de Aleación Dúctil-Dúctil

En el proceso de molienda predomina la soldadura frente a la fractura. Esta es una combinación excelente para aleaciones mecánicas puesto que la aleación de estos componentes alcanza una acción repetida de soldadura en frío y la fractura que soportan las partículas de polvo como se indica en la Figura 1-1 [4].

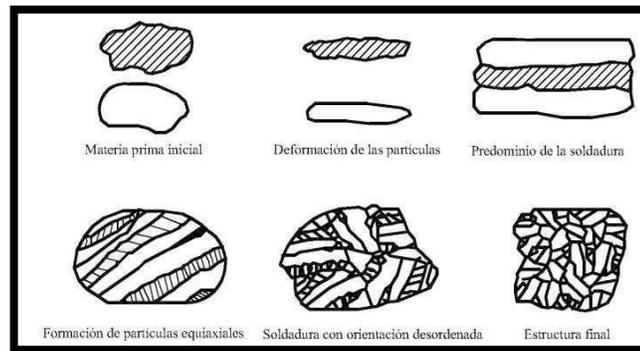


Figura 1-1: Sistema de Aleación Dúctil-Dúctil. [4]

2) Sistemas de Aleación Dúctil-Frágil

Para este proceso las partículas frágiles se fracturan y van introduciéndose dentro del material dúctil. Este proceso es muy rápido debido a la dispersión y posterior difusión de las partículas, la cual genera excelentes características obtenidas por el calentamiento propio de la técnica. En conjunto la aleación que implica un proceso de mezcla presente mejora las mismas propiedades del producto en forma parcial o total, ya que depende de la dispersión o de la solubilidad del componente frágil al introducirse en el elemento dúctil [4].

En la aleación se considera un método significativo del elemento frágil en la matriz del elemento dúctil puesto que se forma un refuerzo que permite resguardar una distribución homogénea de sus partículas para el material solidificado incrementando su resistencia mecánica y su dureza., donde el proceso de molienda se aplanan por el choque producido entre bolas y las el elemento frágil fragmentados, los cuales tienen que quedarse entre las láminas producto de la deformación de las partículas dúctiles. Si se aumenta el tiempo para la molienda las fracciones del elemento frágil quedarían uniformemente distribuidas entre las placas delgadas formadas por el material o elemento dúctil, como lo detalla en la Figura 1-2 [4].

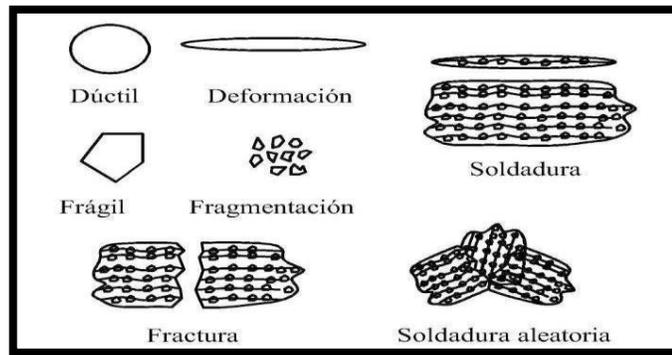


Figura 1-2: Sistema de aleación dúctil-frágil. [4]

3) Sistemas de Aleación Frágil-Frágil

Para este sistema de molienda el componente o elemento más duro (más frágil) queda adherido en la superficie del menos frágil [4].

Aquí predomina la fractura puesto que los elementos frágiles se fragmentan durante el proceso y continuamente durante la molienda se van reduciendo hasta alcanzar un tamaño muy pequeño y de esta manera sus partículas adquieren un comportamiento dúctil hasta llegar al punto de que ya no es posible reducir más su tamaño [4].

1.1.3.2. Pulvimetalurgia

Es un proceso de conformador de materiales metálicos de los que se puede obtener polvos y la fabricación de piezas con el propósito de economizar la materia prima para obtener materiales de mejor calidad [5].

El proceso de materiales por métodos pulvimetalurgicos, se dan mediante el uso de técnicas útiles para obtener una mayor cantidad de productos que por medio de la aleación mecánica con propiedades similares a los métodos comunes, siendo algo novedoso y útil, el cual hace referencia a una serie de procesos para producir muestras aptas en el desarrollo de la investigación de nuevos materiales [6].

1.1.3.3. Pulverización

Es una técnica o método utilizado para reducir el volumen de partículas mediante compresión o frotamiento de impacto. Se identifican dos tipos de operaciones básicas,

conocidos como el triturado, el cual es un método de procesamiento de materiales para reducir el tamaño de las partículas de un elemento por medio de la molienda y obtener un material homogéneo a través de su mezcla [7].

1.1.3.4. Molienda

Es una técnica o proceso mediante el cual se reduce el volumen de partículas utilizando métodos mecánicos de impacto, molienda de cizalla, por compresión y corte [8].

Elementos usados para molienda:

- ✓ Velocidad de giro
- ✓ Velocidad crítica
- ✓ Correlación entre los elementos variables que componen la molienda
- ✓ Tamaño máximo de los componentes del molino
- ✓ Tamaño de carga
- ✓ Dimensión de las bolas
- ✓ Potencia
- ✓ Tipos de molienda

1) Velocidad de Giro

Se refiere a la velocidad de rotación del molino según la operación del mismo. Su giro sobre el eje produce que la carga se desplace hasta la resistencia que produce el peso que es igual a la potencia del motor. Es decir, el peso de la carga es igual a la potencia del motor esto se logra con el movimiento del molino y sus elementos de los que está compuesto [1].

El movimiento del molino se origina mediante sistemas de unión o acople de elementos haciendo que parte de uno entre en otro esto produce el motor y el molino dependiendo siempre del tamaño [1].

Un sistema se puede acoplar según el sistema hidráulico o regulador de velocidad que se incorpore [1].

Según la investigación realizada se puede clasificar los sistemas de acoplamiento de acuerdo con el tamaño del molino, como se indica en la Tabla 1-1 [1].

Tabla 1-1: Tipos de molinos. [1]

Molinos				
Tamaño	Pequeños (hasta 50 kW)	Medianos (giro menor 20 rpm)	Grandes	Muy grandes (mayor a 6 m de diámetro)
Sistema	Poleas y correas trapezoidales.	Motor, reductor, piñón y corona calada concéntrica con el molino.	Motor síncrono, piñón, y corona calada sobre el molino.	El propio molino es el eje, adherido con un motor síncrono de gran tamaño.

Fuente: [1]

2) Velocidad Crítica

También se le llama velocidad de trabajo puesto que esta velocidad evita que mediante el proceso entre los cuerpos molidores y la pared del molino se adhiera a la pared y es el agente que produce el golpeteo entre estos elementos molidores para obtener el polvo metálico. Para evitar la adherencia se recomienda trabajar en un porcentaje de menor velocidad crítica. Es decir, la velocidad mínima de giro del molino produciendo una fuerza centrífuga para conseguir que las partículas se adhieran a los revestimientos del molino [9].

El criterio de comparación de la acción de las bolas depende del tamaño del molino y basado en esta relación se aplica la velocidad crítica. En si es una velocidad teórica en donde la fuerza que ejerce durante todo el proceso es igual a la fuerza sobre la misma producto de la gravedad [9].

3) Correlación entre los elementos variables que componen la molienda

Luna [9], dice que la correlación la componen: la velocidad crítica y los elementos molidores tomando en cuenta que los mismos pueden ser de diferentes diámetros. Es así que se relacionan como:

- Según el diámetro de los elementos moledores, es decir si es Mayor habrá mayor rotura de partículas grandes (golpeteo o choque) [9].
- Menor diámetro de los elementos moledores, mayor pulverización de partículas pequeñas según una mayor superficie de los mismos. (fricción) [9].
- Para mejorar la molienda de materiales duros el diámetro de los elementos moledores debe ser mayor [9].
- Diámetro mayor de los cuerpos moledores, mejora la molienda de un material duro. (golpeteo o choque) [9].
- Si se utiliza diámetro menor de bolas, se obtendrá igual molienda con mayor diámetro de molino o mayor velocidad [9].

4) Tamaño máximo de los componentes del molino

Los cuerpos moledores deben ser de mayor volumen en relación el volumen de las partículas molidas, esto es muy significativo si se estima una relación 3 a 1 que produce la disminución de las mismas para obtener polvos metálicos. Para obtener polvo metálico más fino debe variar en diámetro de mayor a menor [1].

5) Tamaño de carga

Es un componente importante que afecta estrechamente al funcionamiento del molino depende del volumen interno del mismo que ocupa la carga, el material a moler y los componentes moledores. Según el grado de llenado para la molienda comprende por lo general el 45% con los cuerpos o elementos moledores y el material a ser molido como se lo detalla en la Tabla 1-2.

Tabla 1-2: Cargas de componentes moledores [1].

Tipo	% huecos	Peso de los cuerpos moledores	Observaciones
Bolas	40	$B = V_m(0,2 - 0,4) * 0.6$ $* \delta b$	δb : densidad de las bolas 7.8 kg/dm^3 V_m =volumen del material en Kg.

6) Dimensión de las bolas

Se establece una relación entre el tamaño de la bola con el material a ser fragmentado. Según investigaciones experimentales que surgieron sobre el volumen de la bola. Estos resultados se proponen para prácticas industriales que se asignan mediante un factor de 0,1 en prototipos a escala aceptables en laboratorios.

Se toma en cuenta para un molino de bolas ésta es de 143 en el Sistema Métrico y de 200 en el Sistema Inglés, donde nr es la velocidad en porcentaje de la velocidad crítica, ρs es la gravedad específica del material para fragmentar y Dt es el diámetro del tambor del molino en metros o pies [1].

7) Potencia

Generalmente la potencia de trabajo está entre 35% y 40% pero la potencia máxima se consigue cuando el volumen de la carga alcanza más del 30% cuyo porcentaje debe llegar al 50% [1].

La potencia generalmente exigida por un molino de bolas no se puede predecir eficazmente, pero según modelos empíricos el rango de trabajo puede aproximarse bastante a valores reales en la molienda, para el estudio se toma como expresión lo siguiente; que el esfuerzo que se requiere para formar partículas de un tamaño D mediante su alimentación muy grande es proporcional a la raíz cuadrada de la relación superficie-volumen del producto [1].

8) Tipos de molienda

Cabezas [1], dice que los tipos de moliendas se caracterizan de la siguiente manera:

Molienda Húmeda

- ✓ Por cada kilogramo del elemento existe menor potencia.
- ✓ El ruido es menor ya que el transporte es más fácil y existe menos polvo.
- ✓ Se emplea mayor revestimiento.

Molienda Seca.

- ✓ El mayor rendimiento se consigue en seco, pudiendo mejorar con una humedad del 1% pues permite la rotura de las partículas de forma más rápida.
- ✓ Por cada kilogramo del elemento existe mayor potencia.
- ✓ Se emplea menor revestimiento.

1.1.3.5. Operación de molienda

A continuación, se describe la operación de molienda por etapas:

- La primera etapa es fragmentar los sólidos de tamaño grande utilizando los trituradores o molidores primarios que pueden ser de martillo o de mandíbulas [2].
- La segunda etapa es la disminución de tamaño, con más control manejándose tamaños intermedios y más finos el cual realiza la reducción por impacto cuando gira en su propio eje produciendo el efecto cascada que ayuda a la mezcla del material haciendo una molienda uniforme y homogénea [2].

Para estudio de molienda se considera también la clasificación según su operación, como se lo detalla en la Tabla 1-3:

Tabla 1-3: Tipos de molienda [2].

Tipo de proceso	Tamaño de salida
Molienda gruesa	$\cong 1 - 2 \text{ mm}$
Molienda fina	$\cong 50 - 100 \text{ }\mu\text{m}$
Molienda ultra fina	$\leq 10 \text{ }\mu\text{m}$

Para lograr el fraccionamiento de partículas se utilizan distintas fuerzas que son:

- Fuerzas de compresión
- Fuerzas de cizalladura
- Fuerzas de abrasión que puede trabajar de forma continua o discontinua.

a) Forma Discontinua

Para su operación se necesita recargar el material, es decir, el molino se cierra para hacerlo girar y luego se abre para continuar la separación del material de los cuerpos. Esto es aplicable en molinos pequeños de un laboratorio [2].

b) Forma Continua

La recarga del material se lo hace mediante un extremo o por el centro según el diseño del molino y a la vez se descarga el material de la molienda por otro extremo. Su operación solo se detendrá para trabajos de mantenimiento o recarga de cuerpos materiales de molienda. Su aplicación se encuentra en la industria minera y producción de semillas por su molienda de forma continua. A continuación se detalla los factores de molienda: [2]

Los factores según Dueñas & González [2], que pueden afectar la eficiencia de un Molino de Bolas con respecto a la molienda son:

- La densidad del elemento que alimenta el molino debe ser muy alta para garantizar un desplazamiento fácil en el mismo.
- Las esferas o bolas deben estar recubiertas por alguno de los materiales antes mencionados para que puedan permanecer sumergidas totalmente en el material de molienda.
- El choque de metal-metal reduce la eficiencia.
- Según el peso de los sólidos el rango de operación de un molino de bolas fluctúa entre 65% a 80%.
- La capacidad máxima según la carga de bolas y el material para la molienda equivale a un 50% de la capacidad del molino.
- Para una eficiencia máxima para moler el material las bolas deben ser idóneas en tamaños mínimos.

1.1.3.6. Tipos de molinos

Los tipos de molinos para pulvimetalurgia según Álvarez (2011), son:

- Molinos de barras
- Molinos de bolas planetario
- Molino de bolas de alta energía
- Molinos autógenos (AG) o semiautógenos (SAG)
- Molinos de pebbles (cuerpos no metálicos naturales o fabricados)
- Molinos de rotor

- Molinos de discos
- Molinos de mortero
- Molinos de cuchillas
- Molinos de corte

1.1.3.7. Cuerpos moledores

Los cuerpos moledores según Álvarez [10], son:

- Barras, manufacturados por acero con alto contenido de carbono, como se lo indica en la Tabla 1-4.
- Bolas, manufacturados por acero de fundición, acero forjado y aleado al Cr-Mo, como se lo indica en la Tabla 1-4.
- Propio mineral, los cuerpos de molienda referentes al propio mineral se da un porcentaje y de otro tipo de bolas o componentes, como se lo indica en la Tabla 1-4.

Tabla 1-4: Pesos molidores [11].

Elemento	% huecos	Peso de los elementos molidores	Observaciones
Bolas	40	$P_{bolas} = V_{mol} \cdot 0,45 \cdot 0,6 \cdot \delta_b$	δ_b : Densidad de las bolas, material molidor, para el acero 7,85 kg/dm ³
Barras	20	$P_{barras} = V_{mol} \cdot 0,45 \cdot 0,8 \cdot \delta_b$	δ_b : Densidad de las barras
Carga del molino	0%	$P_{carga} = V_{mol} \cdot 0,45 \cdot (0,6 \cdot \delta_b + 0,4 \cdot \delta_m)$ $= V_{mol} \cdot 0,45 \cdot (0,8 \cdot \delta_b + 0,2 \cdot \delta_m)$	Molino de bolas Molino de barras δ_m : Densidad del mineral

1.1.3.8. Molinos de Bolas de alta energía

Se usan para moliendas de mucha intensidad y su característica principal es combinar mecanismos complejos de fragmentación para obtener partículas muy finas en corto tiempo [12].

Ventajas

- ✓ Los tiempos se acortan para la molienda
- ✓ Las aleaciones mecánicas son nanométricas
- ✓ Granulometrías más finas y en menor tiempo que con otros molinos de bolas

✓ Fácil colocación de los recipientes de molienda

Características

- Aplicación: Trituración, homogeneización, aleación mecánica, molienda de alta energía.
- Campos de aplicación: Agricultura, biología, metalurgia, ingeniería, entre otras.
- Tipo de material: Duro, semiduro, frágil, fibroso seco y húmedo
- Principios de molienda: Impacto, fricción

Molienda más utilizada en los molinos de bolas de alta energía

Dentro de estudio se considera la molienda mecánica como el procedimiento que se realiza en molinos de bolas de alta energía en donde el polvo obtenido se suelta, fractura y se vuelve a soldar, originándose como objetivo principal la reducción, cambios o creación de procesos de mezcla y soldadura, obteniéndose una microestructura muy fina de polvos metálicos, compuestos y cerámico [13].

Para iniciar el proceso es necesario conocer el tamaño de la partícula o elemento que se va usar y determinar el tamaño más fino que se desea obtener y así poderlos clasificar según su diámetro y forma [13].

Existe una relación entre el tamaño de la partícula obtenido y el tiempo de molienda, es decir si se aumenta el tiempo de molienda el tamaño de la partícula se reduce mucho más. Este procedimiento genera demasiado calor si se trabajan en tiempos excesivos debido a los choques que se producen internamente con el medio y la recristalización del polvo ya procesado [13].

La tecnología aplicada de la molienda mecánica de alta energía se ha utilizado particularmente para procesos de la industria farmacéutica mejorando la homogeneización de los productos compactados al frío, en la industria de la metalurgia los procesos de trituración, polvos finos y homogenizados se aplican en la preparación de cementos y hormigón, preparación de pinturas y pigmentos metálicos. Para utilizar este proceso de una mejor manera se ha incrementado tecnológicamente con aleaciones mecánicas resistentes por dispersión de óxidos [13].

La molienda de alta energía ha permitido obtener polvos con composiciones imposibles de alcanzar con otras técnicas mejorando sus aplicaciones estructurales, mecánicas y en donde se requiere propiedades específicas gracias al constante desarrollo de los sectores productivos que cada vez van aportando conocimiento de sus necesidades concretas [14].

Este proceso constituye lo más actual en tecnología obteniendo polvo diversificado para ampliar el campo de aplicación desde aleación con base de hierro a aleaciones de aluminio y sistemas cerámicos que se comercializan en la actualidad. Se define como un proceso en seco con la ventaja de obtener composiciones inalcanzables por procesos de atomización, logrando elevar el contenido de solutos muy arriba de las composiciones de equilibrio, como se indica en la Figura 1-3 [14].

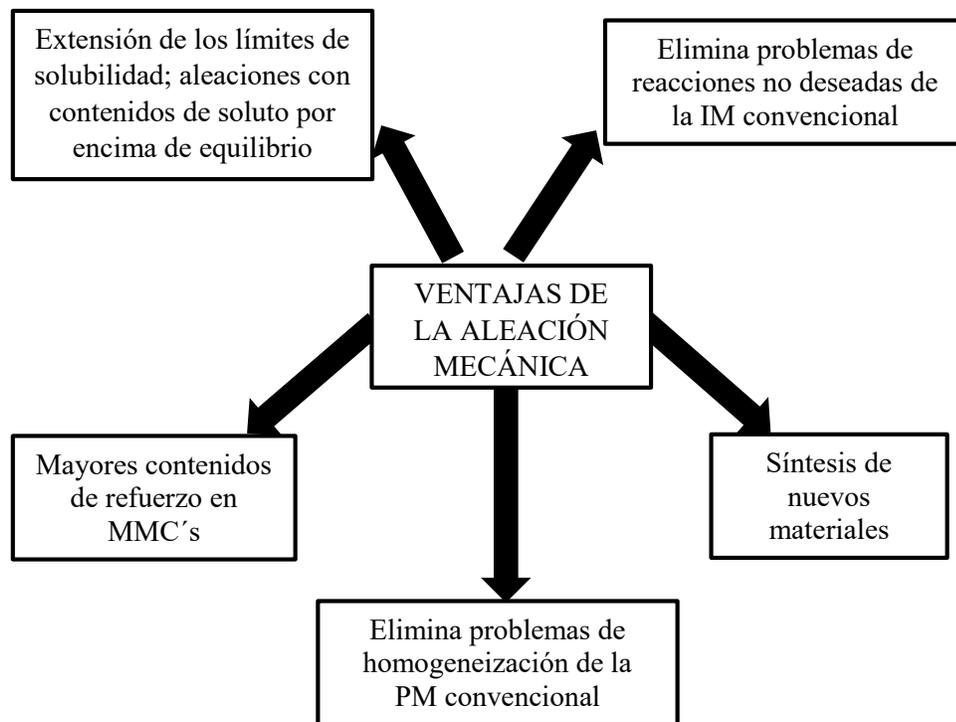


Figura 1-3: Ventajas de molienda mecánica [14].

1.1.3.9. Fundamentos de la Molienda Mecánica

Este proceso consiste en choques continuos de alta energía que se producen en las partículas mediante los cuerpos moledores, causando que las bolas se adhieran, unan y fracturen las partículas para producir los polvos más finos [13].

El impacto entre las partículas modifica la estructura en los polvos obtenidos, dando lugar a la aparición de uniones frías en ciertas partículas del material que están siendo molidas, esto provoca una nueva combinación de componentes con referencia a la materia prima inicial [13].

Durante el proceso la soldadura en frío provoca una deformación plástica y un conjunto de partículas; dado esto las fracturas se unen provocando una reducción de los tamaños constante durante todo el procedimiento se logra un refinamiento homogenizado de los polvos a obtener [13].

Dentro del procedimiento de molienda se ha determinado las etapas principales:

a) Etapa Inicial

Las bolas para la molienda ayudan a la deformación de las partículas al ser aplastadas por ellas, en el caso de los materiales dúctiles por los choques continuos su deformación es más rápida producto de las fuerzas de compresión, pero en los materiales frágiles la fractura producida es más fácil al igual que su deformación [13].

b) Etapa de predominio de la soldadura

En esta etapa se obtiene las partículas con morfología de multicapas y donde las más finas se han soldado e incrementado el espesor de las mismas debido a los materiales moledores. [13]

c) Etapa de formación de partículas de Textura cristalográfica

Aquí se produce la reducción de tamaño del material, es decir, partículas que se obtienen debido a la pérdida de ductilidad a causa del endurecimiento a lo largo de los procesos de la etapa anterior [13].

d) Etapa donde la soldadura tiene orientación desorientada

Aquí se encuentran partículas de textura cristalográfica, es decir, material que carece de orientación preferencial más bien posee una distribución aleatoria de orientaciones, lo mismo que aumenta sus propiedades en este caso su dureza en polvo [13].

e) Etapa de afinación de la estructura

En esta etapa el polvo en su estructura alcanza una homogenización y composición deseada según la aleación porcentual obtenida de la mezcla en polvo inicial. Se encuentran equilibrados los procesos de fractura y soldadura con un incremento en la dureza interna del polvo y su reducción en su ductilidad [13].

Variantes existentes en el proceso

- Según el diámetro de bolas utilizadas para el molino, esto es que la energía cinética depende de la masa y la velocidad que se marcan, de esto se propone la utilización de bolas de material más denso por ejemplo de aceros lo más considerable. Aquí lo importante es la relación de ratio de la bola con la carga que oscila entre 10:1 y 20:1 dependiendo del molino [13].
- Durante el proceso los incrementos de temperatura oscilan entre 100°C-200°C muy por debajo de la temperatura de recristalización, que produce la energía cinética de la molienda, afectando a la microestructura final y a la formación cinética en sus fases pudiendo medirse temperaturas macroscópicas y locales. En los casos donde el molino presente reacciones exotérmicas que disparen incrementos de temperatura pueden ser controlados mediante refrigeración, donde la temperatura macroscópica se produce por fricciones o por el motor del molino y sus intercambios energéticos entre los mismos componentes, se puede controlar mediante mecanismos de recirculación de agua o baños térmicos. La temperatura local se origina producto de los choques que provocan las deformaciones y calentamientos localizados, pudiéndose medir a través del estudio de la microestructura del producto obtenido [13].

- Según los tipos de frecuencia e intensidad de molienda mecánica de alta energía, para el caso de frecuencia media de colisión su relación es inversamente proporcional según el tamaño del medio utilizado para la molienda y la velocidad media. En cuanto a la frecuencia de impacto de las partículas están relacionadas con el incremento de concentración de las partículas en la superficie y su uniformidad en el tamaño de las mismas. En cuanto a la intensidad de la molienda debe ser proporcional a las propiedades del polvo durante el proceso y el indicador de la molienda, es decir, que si se incrementa la introducción de bolas mayor será la densidad o aumentaran las velocidades de colisión, transfiriendo la energía de las partículas en cada colisión y aumentando la energía que se disipa [13].
- Un factor importante es la selección del molino, pues de esto depende los resultados obtenidos, conociendo su capacidad, costo, tiempo de ciclo que se debe trabajar, tipo de material y como se va distribuir las partículas según su tamaño [13].
- Para la fractura de las partículas se consideran si la presión de la molienda es alta y si la resistencia de las partículas es baja, en el medio de velocidades elevadas incrementando la energía en cada colisión. Para conseguir tamaño de partículas micro se considera los medios de molienda de tamaños más pequeños donde su morfología puede crear según su distribución variados resultados de fracturas [13].
- Para trabajar con una atmósfera controlada es necesario la colocación del molino dentro de un contenedor para evitar la contaminación. Las atmosferas controladas se constituyen de gases nobles como el argón o el helio [13].
- La materia prima con la que se trabaja generalmente está constituida de Textura cristalográfica (Distribución aleatoria de alineaciones) y esto ayuda con la obtención de un producto final a base de estructura física y química mejorada [13].
- Este proceso tiene como objetivo la utilización de componentes que controlen la disminución del contacto natural que en ocasiones imposibilita la soldadura provocando cambios en la composición, tamaño, forma, propiedades, contaminación y dan origen a nuevos materiales tecnológicos. Los polvos cerámicos pueden actuar

como componentes abrasivos, mientras que los polvos metálicos logran prevenir la formación de compuestos [13].

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General:

Diseñar y construir un molino de bolas de alta energía con sistema de refrigeración para aplicación de pulvimetalurgia para el Laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica

1.2.2. Objetivos Específicos:

- Investigar los tipos de molino, el proceso de aleación mecánica y los parámetros de diseño.

Este ítem se cumplirá en base a la recolección de información donde de conceptualiza ciencia e ingeniera, pulvimetalurgia, pulverización, molienda, operaciones de molienda, tipos de molinos, cuerpos moledores, molinos de bola de alta energía, fundamentación de la mecánica de molienda.

- Diseñar los sistemas que conforman el molino de bolas de alta energía con sistema de refrigeración.

El diseño se efectuará, en base a la selección con la mayor ponderación del sistema de transmisión y refrigerante, determinación del número de bolas, diseño del recipiente de molienda, delimitación del espesor del recipiente, definición de la potencia requerida, determinación de inercias de las diferentes partes que constituyen el sistema de molienda, validación de potencia y fuerza de impacto con el working model, diseño de la caja base de molienda, cálculo del número de pernos en la caja base, determinación de las tensiones en las poleas dentadas, selección de correas sincrónicas, diseño del eje principal, selección de chumaceras y rodamientos con sus respectivos ajustes, así como su excentricidad y validación respectiva con sus análisis de los componentes diseñados.

- Construir el molino de bolas de alta energía con sistema de refrigeración.

La construcción del molino de bolas de alta energía se dará a partir de cuatro fases; la primera que abarca el armado de la estructura que soporta el peso total de los elementos del molino, la segunda fase engloba el sistema de transmisión conformado por el montaje de poleas y una banda sincrónica, la tercera fase comprende la parte del sistema eléctrico como es la instalación de variador de frecuencia, breaker, temporizador; selector ON/OFF y pulsador de emergencia y finalmente la última fase hace referente al sistema de refrigeración, la cual involucra con la instalación de la bomba sumergible, acoples y ductos para la circulación del refrigerante.

- Realizar pruebas de funcionamiento del molino de bolas de alta energía con sistema de refrigeración.

La realización de las pruebas de funcionamiento se dará en base a 5 pruebas donde se utiliza el mismo material a moler y una prueba de aleación mecánica de aluminio y zinc, cuerpos moledores (bolas de acero AISI 304) que permitan alcanzar un tamaño de partícula de 0,3mm en los 4 ensayos realizados con diferentes tiempos de acuerdo a los distintos diámetros de los cuerpos moledores, siguiendo en proceso el cual inicia con el material a moler, continuando con el pesaje, colocando los elementos demoledores y material a moler en los recipientes, se continua con el cierre hermético, continuando con la colocación de los recipientes en las cajas bases, realizando las separaciones de los granos y reducción con la ayuda de tamices.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

Este capítulo se tratará de identificar los materiales y métodos que se definen en el proyecto.

2.1. Molino de bolas de alta energía con sistema de refrigeración para aplicación de pulvimetalurgia

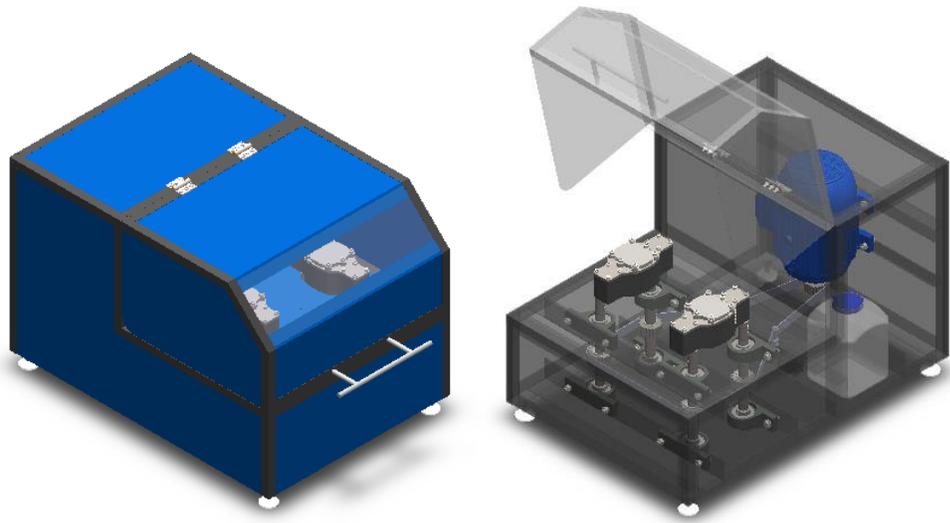


Figura 2-1: Molino de bolas de alta energía

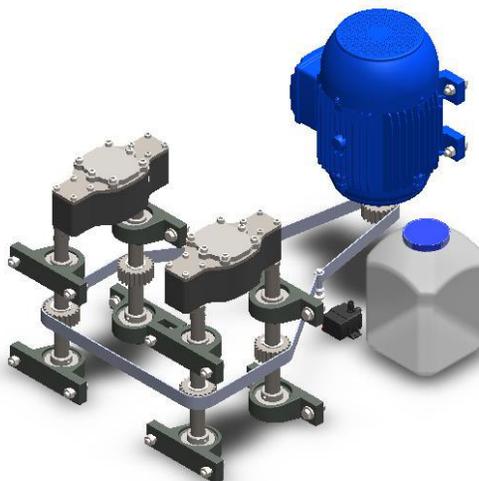


Figura 2-2: Componentes principales de un molino de bolas de alta energía

El molino de bolas de alta energía con sistema de refrigeración, consta de varios componentes como se observan en las Figuras 2-1 y 2-2, los cuales se clasifican en:

2.1.1. Mecanismos de molienda

Es el componente principal del molino de bolas de alta energía, como se detalla en las Figuras 2-3 y 2-4, porque es el elemento en el que se genera la molienda de las partículas, con una velocidad máxima de 2000 rpm.

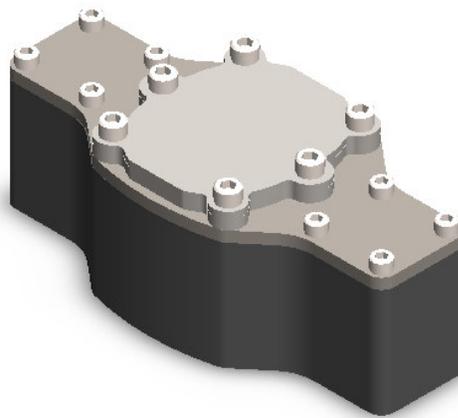


Figura 2-3: Mecanismo de molienda



Figura 2-4: Partes que conforman el mecanismo de molienda

Los componentes que constituyen el mecanismo de molienda, se pueden observar en las Tablas 2-1, 2-2 y 2-3, los cuales son:

Tabla 2-1. Elementos constitutivos del mecanismo de molienda

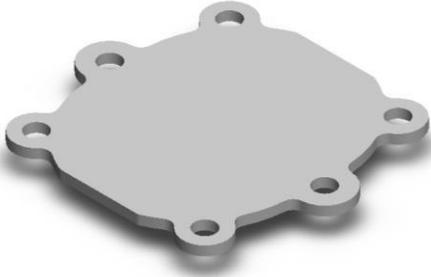
Componentes del mecanismo de molienda	
Elemento	Descripción
	<p>Caja base de molienda, es el elemento constituido de Acero AISI 1045, encargado de contener a la bandeja que soporta el impacto de las bolas durante la molienda.</p>
	<p>Tapa de la caja de molienda, maquinado en Acero AISI 1045, es el elemento que se encarga de cubrir la caja de la base de móvil de molienda.</p>
	<p>Bandeja de molienda, es maquinado en Acero Inoxidable AISI 304, es el elemento del recipiente en el cual se ejecuta la molienda.</p>
	<p>Tapa de la bandeja de molienda, es manufacturada en acero AISI 304, inoxidable, donde su función es guardar la hermeticidad total de la bandeja.</p>

Tabla 2-2. Elementos constitutivos de la transmisión

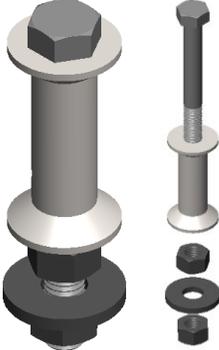
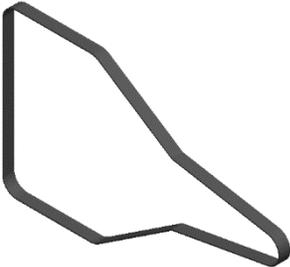
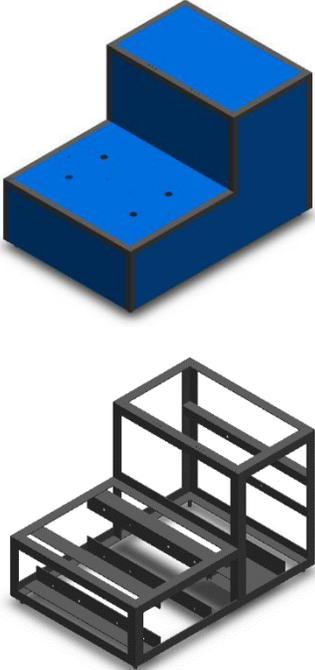
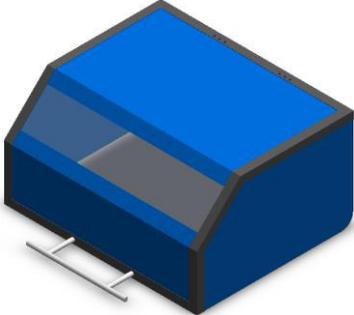
Componentes del sistema de transmisión	
Elemento	Descripción
	<p>Excéntrica, constituido de un Acero AISI 4340, su función es generar la excentricidad de la caja de molienda.</p>
	<p>Eje, es de Acero AISI 4340, sirve de guía y de soporte del conjunto generado de la caja de molienda.</p>
	<p>Rueda dentada, es de Acero ASTM A36, es útil para transmitir la potencia originada del motor, mediante el uso de bandas dentadas.</p>
	<p>Tensores, son elementos constituidos de 1 perno, 2 tuercas, 1 arandela y un rodillo tensor de Acero AISI 1018, útil para templar la banda de transmisión.</p>
	<p>Bandas dentadas, son elementos constituidos por caucho, útil para transmitir el movimiento de rotación ejercido del motor a los ejes.</p>

Tabla 2-3. Elementos constitutivos de la estructura

Componentes del sistema de la estructura	
Elemento	Descripción
	<p>Estructura central, de Acero Estructural, su función es brindar soporte a todos los elementos que constituyen el molino.</p>
	<p>Cubierta principal, es de Acero Estructural y acrílico, útil para brindar protección a los mecanismos de molienda.</p>
	<p>Soporte de cauchos, son soportes que permiten amortiguar los impactos que se dan en el molino.</p>

2.2. Sistema mecánico

El sistema mecánico está compuesto por materiales que se emplean para el diseño y construcción de un molino de bolas de alta energía con sistema de refrigeración para aplicación de pulvimetalurgia son:

2.2.1. Acero estructural

El acero es una aleación de hierro, carbono, y en pequeñas cantidades silicio, fósforo, azufre y oxígeno [15].

2.2.1.1. Características del acero estructural

Entre las características más importantes del acero estructural están:

- Densidad: 7850 kg/m^3
- Punto de fusión: $1375 \text{ }^\circ\text{C}$ a $1650 \text{ }^\circ\text{C}$
- Punto de ebullición: $3000 \text{ }^\circ\text{C}$
- Conductividad: $3 \times 10^6 \text{ S m}^{-1}$

2.2.1.2. Perfil angular de calidad ASTM A36

Es un elemento con forma de ángulo para fines estructurales, fácil de cortar, soldar y estar dispuesto para dar forma y maquinarse, con calidad ASTM A36, acabado acero negro, como se detalla en la Figura 2-5 y en la Tabla 2-4.

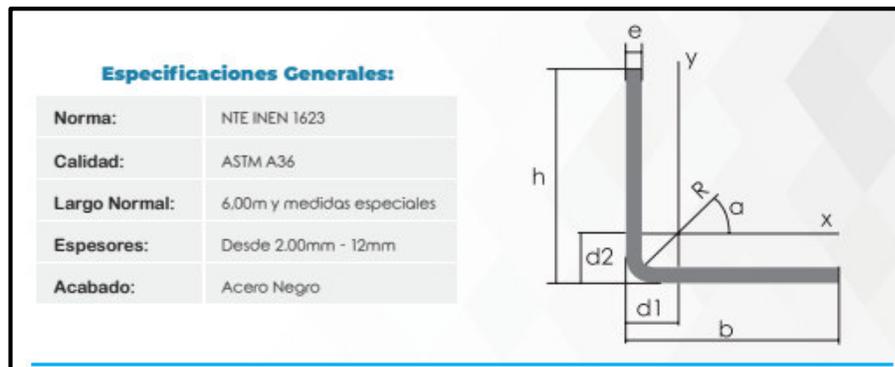


Figura 2-5: Perfil angular [16].

Tabla 2-4. Tubo estructural cuadrado [16].

Descripción	Ángulos de alas iguales																			
	b	h	e	Masa	Área	d1	d2	Ángulo	Eje X - X			Eje Y - Y			Eje U - U			Eje V - V		
	mm	mm	mm	Kg/m	cm ²	cm	cm	(°)	Ix	Iy	Iz	Iy	Iy	Iy	Iu	Iu	Iu	Iv	Iv	Iv
L 20x 2	20	20	2	0,57	0,73	0,60	0,60	45,00	0,28	0,20	0,62	0,28	0,20	0,62	0,46	0,32	0,79	0,10	0,14	0,37
L 20 x 3	20	20	3	0,81	1,03	0,65	0,65	45,00	0,38	0,28	0,60	0,38	0,28	0,60	0,63	0,45	0,78	0,12	0,17	0,34
L 25x 2	25	25	2	0,73	0,93	0,72	0,72	45,00	0,56	0,32	0,78	0,56	0,32	0,78	0,92	0,52	1,00	0,20	0,23	0,47
L 25x 3	25	25	3	1,05	1,33	0,78	0,78	45,00	0,78	0,45	0,77	0,78	0,45	0,77	1,30	0,74	0,99	0,26	0,30	0,45
L 30 x 2	30	30	2	0,88	1,13	0,85	0,85	45,00	1,00	0,46	0,94	1,00	0,46	0,94	1,63	0,77	1,20	0,37	0,35	0,57
L 30x 3	30	30	3	1,28	1,63	0,90	0,90	45,00	1,40	0,67	0,93	1,40	0,67	0,93	2,32	1,09	1,19	0,49	0,46	0,55
L 30x 4	30	30	4	1,65	2,10	0,95	0,95	45,00	1,76	0,86	0,91	1,76	0,86	0,91	2,93	1,38	1,18	0,58	0,55	0,52
L 40x 2	40	40	2	1,20	1,33	1,10	1,10	45,00	2,44	0,84	1,26	2,44	0,84	1,26	3,96	1,40	1,61	0,92	0,65	0,78
L 40x 3	40	40	3	1,75	2,23	1,15	1,15	45,00	3,49	1,22	1,25	3,49	1,22	1,25	5,71	2,02	1,60	1,27	0,90	0,75
L 40x 4	40	40	4	2,28	2,90	1,20	1,20	45,00	4,44	1,59	1,24	4,44	1,59	1,24	7,23	2,59	1,59	1,55	1,10	0,73
L 40x 5	40	40	5	2,77	3,54	1,25	1,25	45,00	5,29	1,92	1,22	5,29	1,92	1,22	8,80	3,11	1,58	1,77	1,25	0,71
L 50x 2	50	50	2	1,51	1,93	1,35	1,35	45,00	4,85	1,33	1,59	4,85	1,33	1,59	7,85	2,22	2,02	1,85	1,05	0,98
L 50x 3	50	50	3	2,22	2,83	1,40	1,40	45,00	7,01	1,95	1,57	7,01	1,95	1,57	11,42	3,23	2,01	2,61	1,47	0,98
L 50x 4	50	50	4	2,90	3,70	1,45	1,45	45,00	9,01	2,54	1,56	9,01	2,54	1,56	14,76	4,18	2,00	3,25	1,84	0,94
L 50x 5	50	50	5	3,58	4,54	1,50	1,50	45,00	10,84	3,10	1,55	10,84	3,10	1,55	17,89	5,06	1,99	3,79	2,14	0,91
L 60x 3	60	60	3	2,69	3,43	1,65	1,65	45,00	12,34	2,84	1,90	12,34	2,84	1,90	20,03	4,72	2,42	4,65	2,19	1,16
L 60x 4	60	60	4	3,53	4,50	1,70	1,70	45,00	15,96	3,71	1,70	15,96	3,71	1,70	26,04	6,14	2,40	5,88	2,77	1,14
L 60x 5	60	60	5	4,34	5,54	1,75	1,75	45,00	19,33	4,55	1,87	19,33	4,55	1,87	31,72	7,48	2,39	6,95	3,27	1,12
L 75x 3	75	75	3	3,40	4,33	2,02	2,02	45,00	24,55	4,48	2,38	24,55	4,48	2,38	39,72	7,49	3,03	9,38	3,53	1,47
L 75x 4	75	75	4	4,47	5,70	2,07	2,07	45,00	31,94	5,88	2,37	31,94	5,88	2,37	51,90	9,79	3,02	11,99	4,51	1,45
L 75x 5	75	75	5	5,52	7,04	2,12	2,12	45,00	38,96	7,24	2,35	38,96	7,24	2,35	63,56	11,99	3,01	14,35	5,40	1,43
L 75x 6	75	75	6	6,53	8,33	2,17	2,17	45,00	45,60	8,56	2,34	45,60	8,56	2,34	74,73	14,09	2,99	16,46	6,20	1,41
L 80x 4	80	80	4	4,79	6,10	2,20	2,20	45,00	39,00	6,72	2,53	39,00	6,72	2,53	63,30	11,19	3,22	14,70	5,19	1,55
L 80x 5	80	80	5	5,91	7,54	2,25	2,25	45,00	47,65	8,28	2,51	47,65	8,28	2,51	77,64	13,72	3,21	17,65	6,23	1,53
L 80x 6	80	80	6	7,00	8,93	2,30	2,30	45,00	55,86	9,79	2,50	55,86	9,79	2,50	91,39	16,16	3,20	20,32	7,17	1,51
L 80x 8	80	80	8	9,11	11,61	2,40	2,40	45,00	71,03	12,68	2,47	71,03	12,68	2,47	117,22	20,72	3,18	24,85	8,78	1,46
L 80x 10	80	80	10	11,09	14,14	2,50	2,50	45,00	94,59	15,39	2,45	94,59	15,39	2,45	140,84	24,90	3,16	28,34	10,04	1,42
L 100x 5	100	100	5	7,48	9,54	2,75	2,75	45,00	95,23	13,13	3,16	95,23	13,13	3,16	154,55	21,86	4,03	35,90	10,13	1,94

2.2.1.3. Plancha de Acero Galvanizada bajo Norma: ASTM A36

Es útil para soportes y el forrado de paredes, donde sus características principales, se distinguen en la Tabla 2 -5 y 2-6 son:

Tabla 2-5. Composición Química de la Plancha de Acero bajo Norma: ATM A36 [17].

Composición química del Acero A36		
% C	0.25	0.29
% Mn	0.80	1.2
% P	0.04	Max
% S	0.05	Max
% Si	0.4	Max
% Cu	0.20	Max

Tabla 2-6. Propiedades Mecánicas de la Plancha de Acero bajo Norma: ATM A36 [17].

Propiedades Mecánicas del Acero A36	
Fluencia, MPa	250 min
Esfuerzo Máximo, MPa	400 -550
Alargamiento	20 min
Norma Equivalente	GRADO 36

2.2.1.4. Eje AISI 4340

El acero AISI 4340 es al molibdeno más cromo y níquel, por lo que posee una solubilidad limitada siendo formador de carburos, soportando alta resistencia y tenacidad, como se detalla en la Tabla 2-7 y 2-8 [18].

Tabla 2-7. Análisis típico del material AISI 4340 [18].

Análisis típico %	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	V
34 CrNiMo6	0,30 - 0,38	≤ 0,30	0,50 - 0,80	0,025	0,025	1,30 - 1,70	1,30 - 1,70	0,15 - 0,30
AISI 4337	0,35 - 0,40	0,20 - 0,35	0,60 - 0,80	0,04	0,04	1,65 - 2,00	0,70 - 0,90	0,20 - 0,30
AISI 4340	0,38 - 0,43	0,15 - 0,35	0,60 - 0,80	0,03	0,04	1,65 - 2,00	0,70 - 0,90	0,20 - 0,30
Código de color	Dorado / Azul							
Equivalencias	AISI / SAE (4337 - 4340) Din (34CrNiMo6)			W.Nr (1.6582) JIS (SNCM1)		AFNOR (35NCD6)		

Tabla 2-8. Propiedades mecánicas del material AISI 4340 [18].

Resistencia a la tracción	90 - 110 kg/mm ²
Esfuerzo de cedencia	70 kg/mm ²
Elongación, A5	min 12 %
Reducción de área, Z	min 45 %
Resistencia al impacto, KU	aprox. 20 J
Dureza	270 - 330 HB

2.2.2. Acero al carbono para máquinas AISI 1045

Son acero sin alear con buena tenacidad, alta uniformidad y rendimiento con tratamiento térmico de temple y revenido, útil para piezas que requieren resistencia para aplicaciones automotriz, como se detallan en la Tabla 2-9, 2-10 y 2-11

Tabla 2-9. Análisis típico del material AISI 1045 [18].

Análisis típico %	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
C45	0.42 - 0.50	≤ 0.40	0.50 - 0.80	0.045	0.045	≤ 0.40	≤ 0.10
AISI 1045	0.43 - 0.50	0.15 - 0.35	0.60 - 0.90	0.030	0.050		
Normas equivalentes	AISI (1045), SAE (C1045), W.Nr (1.1820), DIN (CK45)						
Código de color	Rojo / Plomo						

Tabla 2-10. Propiedades mecánicas del material AISI 1045 [18].

Resistencia a la tracción	65 kg/mm ²
Esfuerzo de cedencia	32 kg/mm ²
Elongación, A5	min 10%
Reducción de área	40 %
Dureza	220 - 235

Tabla 2-11. Tratamientos térmicos del material AISI 1045 [18].

TIPO	°C
Forjado	800 - 1050
Normalizado	830 - 850
Temple (agua)	770 - 810
Temple (aceite)	790 - 830
Revenido (herramientas de corte)	100 - 300
Revenido de bonificación	550 - 650

2.2.3. Acero Inoxidable

Es una aleación de hierro y carbono con un mínimo del 10.5% de cromo, en menores cantidades con níquel y el molibdeno si se lo requiere [19].

Sus principales características son:

- Resistencia a la corrosión
- Resistencia a la alta y baja temperatura
- Facilidad para la fabricación
- Resistencia mecánica
- Estética
- Ciclo de trabajo durable

Características de sus componentes.

- Cromo: Formador de Ferrita y Carburo, principal responsable de la resistencia a la corrosión [19].

- Níquel: Formador de Aumentita, permite mejorar la resistencia a la corrosión, tenacidad y a la ductilidad, aumentando la resistencia eléctrica, fatiga y capacidad de ser soldado, reduciendo la conductividad del calor [19].
- Molibdeno: Formador de Ferrita y Carburo, permite mejorar la resistencia a temperaturas elevadas [19].

2.2.4. Rodamientos radiales

Son aquellos que soportan cargas que se encuentran, principalmente en dirección perpendicular al eje, estas varían según los siguientes factores, como se detalla en la Figura 2-6 que son: [20]

- Espacio disponible
- Cargas
- Desalineación
- Precisión y rigidez
- Velocidades
- Temperatura de funcionamiento
- Niveles de vibración
- Niveles de contaminación
- Tipo y método de lubricación



Figura 2-6: Rodamientos de bolas [20].

2.2.5. Motor

Es un dispositivo encargado de convertir de la energía eléctrica en mecánica por la acción de campos magnéticos, como se observa en la Figura 2-7 [21].



Figura 2-7: Motor eléctrico [21].

2.2.6. Piñón de cigüeñal

Es el elemento que acciona un determinado mecanismo, pudiendo ser utilizada con bandas dentadas o cadenas, como se detalla en la Figura 2-8 [22].

Las ventajas que rinde el piñón del cigüeñal a distintos mecanismos son:

- Velocidades y capacidad de transmisión mayor
- Mejor eficacia
- Soporta grandes cargas
- Mejor relación de transmisión en espacios reducidos



Figura 2-8: Piñón de cigüeñal [22].

2.2.7. Bandas dentadas Sincrónicas.

Bandas dentadas sincrónicas se trata de una transmisión de tipo flexible libre de patinaje, que se puede acoplar de manera adecuada a los engranes útiles en situaciones donde se debe dar una sincronización adecuada, como se indica en la Figura 2-9 [23].



Figura 2-9: Bandas dentadas [23].

Esquema de la banda dentada sincrónica y la polea dentada, como se indica en la Figura 2-10:

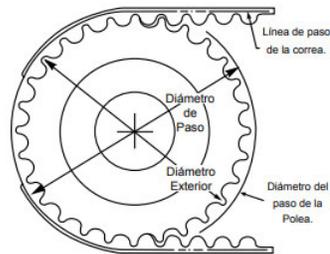


Figura 2-10: Esquema bandas dentada y piñón de cigüeñal

2.2.8. Bomba SUMERGIBLE AD20P



Figura 2-11: Bomba sumergible AD20P [24].

Bombas sumergibles, sin escobilla, con bajo ruido, sin interferencia electromagnética, útil para circular agua, cargando y recargando; económico, utiliza alta sensibilidad y eficiencia electrónica, con rendimiento más alto que el actual, con un modelo de nueva generación de micro bombas, como se observa en la Figura 2-11 [24].

2.2.9. Pintura o fondo Epóxico.

Es un Fondo Epóxico anticorrosivo con dos mecanismos, sumando con fosfato de zinc. Fabricado con poliamidas. Origina una capa dura y resistente a la corrosión, de muy buena adherencia y maleabilidad, frecuentemente utilizado como generador de adherencia en zonas ferrosas, no ferrosas y concreto, como se indica en la Figura 2-12 [25].



Figura 2-12: Fondo Epóxico [25].

2.2.10. Reductor epóxico.

El Reductor Epóxico Unidas provee una excelente solubilidad a las resinas y pinturas de este espécimen, confiere un rápido secado y brillo, brinda acabados perdurables y conservación de color, como se detalla en la Figura 2-13 [25].

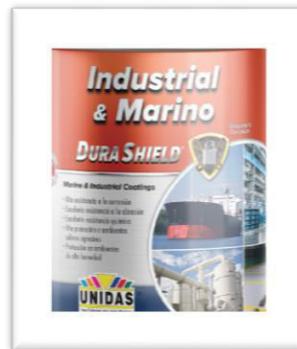


Figura 2-13: Reductor Epóxico [25].

2.2.11. Bolas para molienda

Las bolas son elementos de acero inoxidable AISI 304, la cual debe ser 3 veces más grande que las partículas a moler, por lo que se recomienda que para molienda húmeda se use bolas menores a 3 mm, donde las cargas de las bolas deben ser el 60% del volumen de la bandeja que le contiene, como se indica en la Figura 2-14 [26].



Figura 2-14: Bolas para molienda [26].

2.3. Sistema eléctrico

El sistema eléctrico adecuado para el funcionamiento del molino de bolas de alta energía, está constituido por las siguientes partes:

2.3.1. Selector ON/OFF

Para el encendido y apagado se utiliza el selector ON/OFF, identificando dos posiciones en los sistemas de control, en la Figura 2-15 [27].



Figura 2-15: Selector ON / OFF [27].

2.3.2. Variador de frecuencia:



Figura 2-16: Variador de frecuencia [28].

Los variadores de frecuencia compacto iG5A tienen las siguientes características, como se detalla en la Figura 2-16.

- Aplicaciones:
 - Monofásico 0,4-1,5kW (200-230V)
 - Trifásico 0,4-22kW (200-230V)
 - Trifásico 0,4-22kW (380-480V)
- Control seleccionable.
- Algoritmo de control para bombas y ventiladores.
- Selección del tipo de señal de entrada NPN/PNP.
- Salida de alimentación a 24 Vcc.
- Ventilador desmontable fácilmente.

2.3.3. Pulsador de emergencia

El pulsador de emergencia tiene un voltaje nominal para 600 V, con una corriente térmica nominal de 10 A, con una vida útil mecánica de 300 000 operaciones, empleado en temperaturas térmicas que varía de -25 a 55 °C, útil en aplicaciones para equipos industriales, como se indica en la Figura 2-17.



Figura 2-17: Pulsador de emergencia



Figura 2-20: Enchufe Trifásico

2.3.7. Cable N° 12

Son cables útiles para extensiones reforzadas, útiles para transmisión de energía de tipo industrial, como se detalla en la Figura 2-21.



Figura 2-21: Cable N° 12

2.4. Métodos

2.4.1. Descripción de metodología

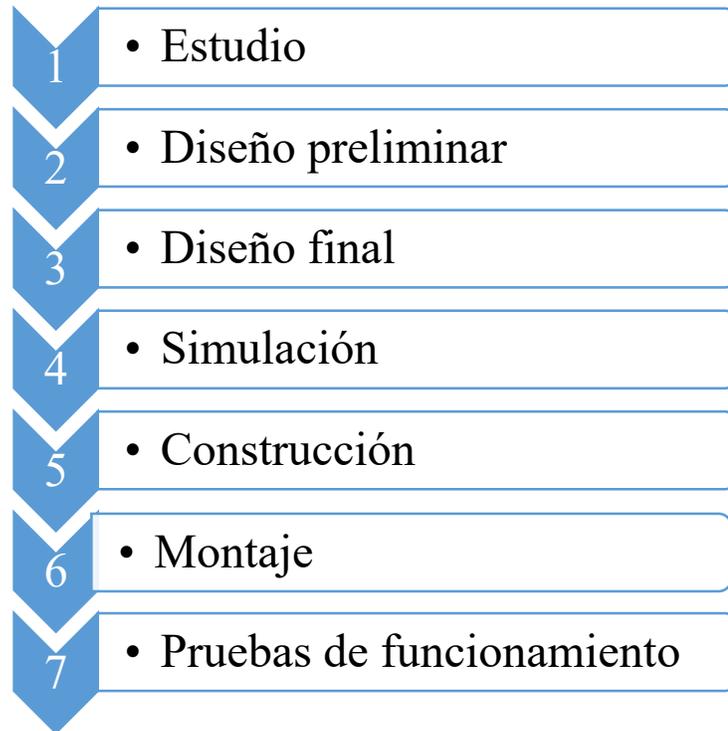


Figura 2-22: Etapas de la metodología

La metodología usada en el proyecto de investigación, sigue varias etapas, definidas en la Figura 2-22, que son:

2.4.1.1. Etapa de estudio

En esta etapa se da el estudio sistemático de los elementos que conforman el molino de bolas de alta energía, en base al modelado individual y grupal mediante el ensamblado, de cada uno de los elementos, seguido por el análisis de las partes más críticas.

2.4.1.2. Etapa de diseño preliminar

Esta etapa consiste el modelado inicial que se da, el cual está sujeto a cambios, así como modificaciones, es el bosquejo inicial.

2.4.1.3. Etapa de diseño final

Esta etapa consiste en el diseño analítico de las diferentes partes que conforman el molino de bolas, validando y seleccionándolos con materiales existentes en el mercado nacional, y el diseño de cada una de las piezas en el software apropiado de tipo CAD (Diseño Asistido por Computadora).

2.4.1.4. Etapa de simulación

Es la etapa que consiste en determinar si los elementos simulados soportarían las cargas delimitadas, validándose en base a su factor de seguridad (FDS), sus esfuerzos y sus máximas deformaciones.

2.4.1.5. Etapa de construcción

Es la etapa donde se procede a la construcción según las dimensiones definidas anteriormente, de cada una de las partes de manera independiente manufacturadas en torno, fresadoras, cortadoras, sierras, entre otras; así como a la adquisición de los diferentes accesorios que se requieren.

2.4.1.6. Etapa de montaje

Es la fase donde se ensambla el conjunto entero de las diferentes partes mecanizadas anteriormente, con varios accesorios como el motor, el sistema eléctrico, el panel, el variador de frecuencia, entre otros.

2.4.1.7. Etapa de pruebas de funcionamiento

En esta etapa consiste en la pulverización del material, mediante el uso de las máquinas donde se evalúa su comportamiento estructural, así como de impacto, de los diferentes elementos.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Selección de alternativas

El diseño final ha tomado varios parámetros que necesita de selección y ponderación como son;

3.1.1. Sistemas de transmisión

Los sistemas de transmisión que pueden usarse en el molino de bolas de alta energía con sistema de refrigeración para aplicación de pulvimetalurgia son:

3.1.1.1. Alternativa I - Por engranajes

Esta alternativa se caracteriza por transmitir su movimiento entre los ejes mediante engranajes, los cuales inician su movimiento con una banda saliente del motor a las 2 barras iniciales a través de poleas, como se detalla en la Figura 3-1.

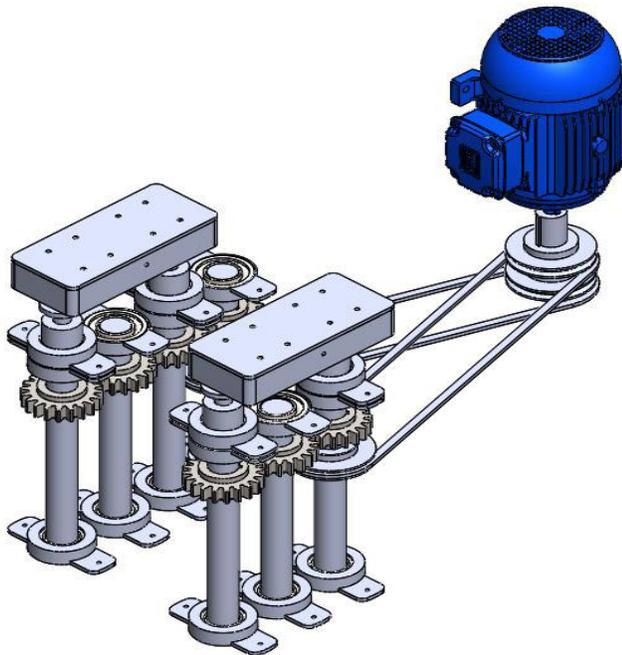


Figura 3-1: Sistema de Transmisión por engranajes

3.1.1.2. Alternativa II - Por ruedas y 4 bandas dentadas

La segunda alternativa se caracteriza por transmitir su movimiento entre los ejes mediante ruedas y bandas dentadas, los cuales inician su movimiento con una banda saliente del motor a la primera barra, siguiendo su transmisión en secuencia, como se indica en la Figura 3-2

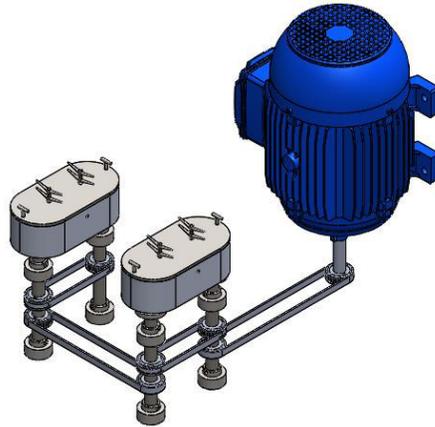


Figura 3-2: Sistema de Transmisión por ruedas y 4 bandas dentadas

3.1.1.3. Alternativa III – Por piñones y correa sincronizada

La tercera alternativa transmite su movimiento del piñón del motor a los ejes del mecanismo de molienda, mediante una correa sincronizada y 4 engranes ubicados en cada barra definida, como se indica en la Figura 3-3.

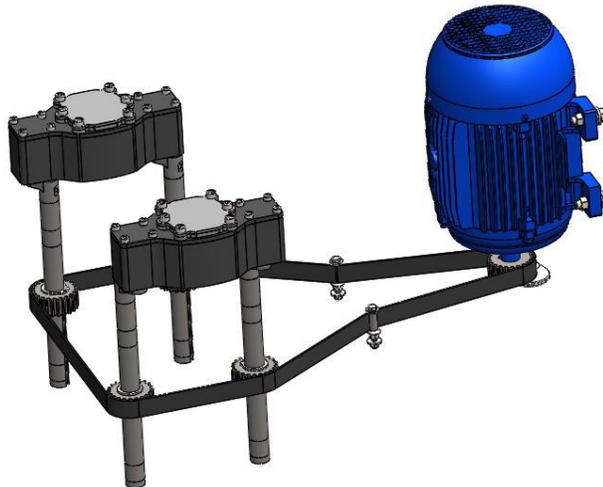


Figura 3-3: Sistema de Transmisión por piñones y correa sincronizada

3.1.2. Refrigerante

Los refrigerantes que pueden usarse en el molino de bolas de alta energía con sistema de refrigeración para aplicación de pulvimetalurgia son:

3.1.2.1. Alternativa I – Refrigerante FREEZETONE

La primera alternativa es el refrigerante FREEZETONE, el cual es caracterizado para motores de todo tipo de vehículos, como se indica en la Figura 3-4.



Figura 3-4: Refrigerante FREEZETONE [30].

3.1.2.2. Alternativa II – Líquido Antioxidante FREEZETONE

Es una formula multifuncional, con una longevidad alta de fluido, proporciona una excelente protección, como se indica en la Figura 3-5.



Figura 3-5: Líquido Antioxidante FREEZETONE [31].

3.1.2.3. Alternativa III – Refrigerante Radiador Verde

Es recomendado para el sistema de enfriamiento de automóviles, camiones y tractores, protegiendo contra óxidos y corrosión, como se detalla en la Figura 3-6.



Figura 3-6: Refrigerante Radiador Verde [32].

3.1.3. Evaluación de los sistemas de transmisión

La evaluación de los sistemas de transmisión se da en base al método ordinal el cual se valora de la siguiente manera:

1 = cuando la fila es superior a la columna

0.5 = cuando la fila y columnas son iguales

0 = cuando la fila es inferior a la columna

3.1.3.1. Criterios a ponderar

- a) Montaje
- b) Estabilidad
- c) Costo
- d) Adquisición
- e) Facilidad de mantenimiento

Jerarquizando

Costo > Adquisición > Montaje > Estabilidad = Facilidad de mantenimiento

Por lo que la evaluación se da en la Tabla 3-1, de la siguiente manera:

Tabla 3-1. Evaluación de criterios por los mecanismos

Criterio	Costo	Adquisición	Montaje	Estabilidad	Facilidad de mantenimiento	$\Sigma+1$	Ponderado
Costo		1	1	1	1	5.0	0.333
Adquisición	0		1	1	1	4.0	0.267
Montaje	0	0		1	1	3.0	0.200
Estabilidad	0	0	0		0.5	1.5	0.100
Facilidad de mantenimiento	0	0	0	0.5		1.5	0.100
Total						15.0	1.000

3.1.3.2. Evaluación de cada criterio:

a) Costo

Tabla 3-2. Valoración según el costo

Costo	Alternativa I	Alternativa II	Alternativa III	$\Sigma+1$	Ponderado
Alternativa I		1	0	2	0.333
Alternativa II	0		0	1	0.167
Alternativa III	1	1		3	0.500
Total				6	1.000

En la Tabla 3-2, según el criterio de costos, por sus implementos que constituyen los diferentes mecanismos, el de menor precio que se pueden adquirir por su accesibilidad en el mercado o nacional es la alternativa III, que es el mecanismo compuesto por piñones y correa sincronizada.

b) Adquisición

Tabla 3-3. Valoración según la adquisición

Adquisición	Alternativa I	Alternativa II	Alternativa III	$\sum+1$	Ponderado
Alternativa I		1	0	2	0.333
Alternativa II	0		0	1	0.167
Alternativa III	1	1		3	0.500
Total				6	1.000

En la Tabla 3-3, según el criterio de adquisición, el de mayor valoración es la alternativa III, porque el mecanismo lo constituye diferentes partes que se pueden adquirir en el mercado local y nacional, en caso de requerir cambiar o ubicar un complemento nuevo; mientras que la alternativa II es la más difícil de poder adquirir por las bandas que se requiere para dar movimiento a los ejes, por lo que se debería mandar a fabricar para ubicarlos, siendo difícil de conseguir en caso de requerirlo de manera urgente.

c) Montaje

Tabla 3-4. Valoración según el montaje

Montaje	Alternativa I	Alternativa II	Alternativa III	$\sum+1$	Ponderado
Alternativa I		0	0	1.0	0.166
Alternativa II	1		0.5	2.5	0.417
Alternativa III	1	0.5		2.5	0.417
Total				6.0	1.000

En la Tabla 3-4, según el criterio de montaje, los mecanismos que poseen mayores ponderaciones son las alternativas II y III, por su facilidad de ensamblaje que constituyen los elementos, los cuales son formados por bandas o correas sincronizadas.

d) Estabilidad

Tabla 3-5. Valoración según la estabilidad

Estabilidad	Alternativa I	Alternativa II	Alternativa III	$\sum+1$	Ponderado
Alternativa I		0	0	1.0	0.166
Alternativa II	1		0.5	2.5	0.417
Alternativa III	1	0.5		2.5	0.417
Total				6.0	1.000

En la Tabla 3-5, según el criterio de estabilidad, el mecanismo con mejor alternativa es la III que es la que está compuesta por piñones y correa sincronizada, generando menos vibración en sus componentes constitutivos y por ende brindar mayor firmeza a la estructura y al molino de bolas de alta energía.

e) Facilidad de mantenimiento

Tabla 3-6. Valoración según la facilidad de mantenimiento

Facilidad de mantenimiento	Alternativa I	Alternativa II	Alternativa III	$\Sigma+1$	Ponderado
Alternativa I		0	0	1.0	0.167
Alternativa II	1		0	2.0	0.333
Alternativa III	1	1		3.0	0.500
Total				6.0	1.000

En la Tabla 3-6, según el criterio establecido, la mejor alternativa es la III, la cual esta constituida por un mecanismo fácil de dar mantenimiento, el cual debe aflojarse los tensores para poder cambiar la correa en caso de requerir, continuando con la banda y los piñones; pudiéndose ensamblar cada elemento de forma fácil.

3.1.3.3. Tabla de criterios

Tabla 3-7. Criterios

Criterios	Costo	Adquisición	Montaje	Estabilidad	Facilidad de mantenimiento	$\Sigma+1$	Ponderado
Alternativa I	0.111	0.089	0.034	0.016	0.017	1.267	0.317
Alternativa II	0.056	0.045	0.083	0.042	0.033	1.259	0.315
Alternativa III	0.166	0.133	0.083	0.042	0.050	1.474	0.368
Total						4.000	1.000

En la Tabla 3-7, según las conclusiones originadas la alternativa III, que esta conformada por piñones y correas sincronizadas es la mejor opción por tener valoraciones superiores

a las otras alternativas basadas en costo, adquisición, montaje, estabilidad y facilidad de mantenimiento.

3.1.4. Evaluación de los tipos de refrigerantes

La evaluación de los tipos de refrigerante se da en base al método ordinal el cual se valora de la siguiente manera:

1 = cuando la fila es superior a la columna

0.5 = cuando la fila y columnas son iguales

0 = cuando la fila es inferior a la columna

3.1.4.1. Criterios a ponderar

- a) Costo
- b) Adquisición
- c) Duración
- d) Punto de Ebullición

Jerarquizando

Costo > Adquisición > Duración > Punto de ebullición

Por lo que la evaluación según en la Tabla 3-8, se da de la siguiente manera:

Tabla 3-8. Evaluación por criterio de tipos de refrigerantes

Criterio	Costo	Adquisición	Duración	Punto de Ebullición	$\Sigma+1$	Ponderado
Costo		1	1	1	4	0.4
Adquisición	0		1	1	3	0.3
Duración	0	0		1	2	0.2
Punto de Ebullición	0	0	0		1	0.1
Total					10	1.0

3.1.4.2. Evaluación de cada criterio:

a) Costo

Tabla 3-9. Valoración según el costo

Costo	Alternativa I	Alternativa II	Alternativa III	$\sum+1$	Ponderado
Alternativa I		0.5	1	2.5	0.417
Alternativa II	0.5		1	2.5	0.417
Alternativa III	0	0		1.0	0.166
Total				6.0	1.000

En la Tabla 3-9, según el criterio de costos, las alternativas más económicas son la I y II, las mismas que están a un costo de 5 \$ el galón, mientras que la tercera alternativa está en 6.50 \$.

b) Adquisición

Tabla 3-10. Valoración según la adquisición de refrigerantes

Adquisición	Alternativa I	Alternativa II	Alternativa III	$\sum+1$	Ponderado
Alternativa I		0.5	0.5	2	0.333
Alternativa II	0.5		0.5	2	0.333
Alternativa III	0.5	0.5		2	0.333
Total				6	0.999

En la Tabla 3-10, según el criterio de adquisición, las tres alternativas se pueden adquirir en el mercado local y nacional.

c) Duración

Tabla 3-11. Valoración según el periodo de duración

Montaje	Alternativa I	Alternativa II	Alternativa III	$\sum+1$	Ponderado
Alternativa I		1	0.5	2.5	0.417
Alternativa II	0		0	1.0	0.166
Alternativa III	0.5	1		2.5	0.417
Total				6.0	1.000

En la Tabla 3-11, según el criterio del tiempo de duración, las mejores alternativas son la I y III por que pueden durar hasta 10 años para proceder a su cambio, mientras que la II tiene un tiempo de duración de 6 años.

d) Punto de Ebullición

Tabla 3-12. Valoración según el Punto de Ebullición

Estabilidad	Alternativa I	Alternativa II	Alternativa III	$\Sigma+1$	Ponderado
Alternativa I		1	0	2.0	0.333
Alternativa II	0		0	1.0	0.167
Alternativa III	1	1		3.0	0.500
Total				6.0	1.000

En la Tabla 3-12, según el punto de ebullición, la alternativa I ebulle a una temperatura de 119 °C, mientras que la II da a 112.8 °C, finalmente la última alternativa ebulle a 125 °C, por lo que la tercera alternativa es la mejor opción bajo este criterio.

3.1.4.3. Tabla de evaluación de los tipos de refrigerante

Tabla 3-13. Evaluaciones de los tipos de refrigerante

Criterios	Costo	Adquisición	Duración	Punto de Ebullición	$\Sigma+1$	Ponderado
Alternativa I	0.167	0.099	0.083	0.033	1.382	0.346
Alternativa II	0.167	0.099	0.034	0.017	1.317	0.329
Alternativa III	0.066	0.099	0.083	0.050	1.298	0.325
Total					3.997	1.000

En la Tabla 3-13, según las conclusiones originadas la alternativa I, que es el Refrigerante FREEZETONE, es la mejor opción por tener valoraciones superiores a las otras alternativas basadas en el costo, adquisición, duración y punto de ebullición.

3.2. Diseño del molino de bolas de alta energía con sistema de refrigeración

El diseño requiere tener los siguientes parámetros que son:

- Volumen del recipiente de molienda: 125 ml
- Números de recipientes: 2
- Material de los elementos moledores: Acero Inoxidable
- Material de la masa a moler: Aleación de Aluminio
- Como regla general, las bolas de molienda deben ser aproximadamente 3 más grande que el más grande de partículas de la muestra.

La relación material – bolas de molienda para este tipo de molino viene dado por:

- **Para la molienda húmeda.**

Para la molienda en húmedo con bolas de molienda <3 mm, la carga de la bola debe constituir el 60% de la jarra volumen, mientras que la cantidad de muestra debe ser del 30%.

La densidad de los materiales de bolas de molienda se usa para calcular la masa de la cantidad necesaria de bolas de molienda.

- **Para la molienda seca.**

Al moler materiales a granel, el frasco se debe llenar con aprox. $\frac{1}{3}$ muestra y $\frac{1}{3}$ de carga de bolas. El tercio restante es el volumen de jarra libre que es necesario para libre movimiento de las bolas.

3.2.1. Cálculo de número de bolas para este tipo de molinos.

Para molino de bolas de alta energía, la selección de la cantidad de bolas se da según la Tabla 3-14.

Tabla 3-14. Pautas para la selección de la cantidad de bolas para molinos de alta energía [26].

High Energy Ball Mill E_{max}

Volume of the grinding jar	Sample amount	Max. Feed particle size	Dry Grinding Recommended ball charge (Pieces)				Wet Grinding Recommended ball charge (Mass, g)
			∅ 5 mm	∅ 10 mm *	∅ 12 mm *	∅ 15 mm *	∅ ≤ 3 mm
50 ml	5-20 ml	4 mm	160	16	8-12	-	Zirconium oxide: 110 g Stainless steel: 145 g Tungsten carbide: 276 g
125 ml	15-50 ml	5 mm	400	50	35	15-18	Zirconium oxide: 275 g Stainless steel: 364 g

De donde se obtiene los parámetros más críticos:

- Para el Volumen del recipiente de molienda: 125 ml
- Diámetro de las bolas 15mm.
- Numero de bolas: 15 - 18

Por lo que la capacidad de molienda del contenedor sería de 42 ml que representa el 1/3, el cual es un valor que está en el rango de la cantidad de la muestra (15-50) ml.

Por lo que se recomienda que el volumen contenedor no debe sobrepasar el 50% de la capacidad de molienda para evitar que el índice de impacto disminuya, por su forma circular se considera un factor de empaquetamiento de 0.74.

Una vez definida la capacidad de molienda, se debe determinar el volumen de empaquetamiento, el cual se da de la siguiente manera:

$$V_{Emp} = V_{Molienda} * FE$$

Donde:

- V_{Emp} = Volumen de empaquetamiento
- $V_{Molienda}$ = Volumen de Molienda = 42 ml
- FE=0.74

Por lo que:

$$V_{Emp} = 42 \text{ ml} * 0.74 = 31.08 \text{ ml}$$

Una vez definida el volumen de empaquetamiento se debe determinar la masa total que se dan de las esferas.

$$\rho_{material} = \frac{m_{MOLIENDA}}{v_{Emp}}$$

Donde:

- $m_{MOLIENDA}$ = Masa del material a moler
- v_{Emp} = Volumen de empaquetamiento = 31.08 ml = 0.00003108 m³
- $\rho_{material}$ = Densidad del material a moler = 2820 kg/m³ (Por ser material de aleación de aluminio)

Por lo que:

$$2820 \text{ kg/m}^3 = \frac{m_{MOLIENDA}}{0.00003108 \text{ m}^3}$$

$$m_{MOLIENDA} = 0.0876456 \text{ Kg}$$

El volumen que origina el material a moler es:

$$v_{material} = \frac{m_{material}}{\rho_{material}}$$

Donde:

- $m_{material}$ = Masa del material = 0.0876456 kg
- $v_{material}$ = Volumen del material
- $\rho_{material}$ = Densidad del material a moler = 2820 kg/m³ (Por ser material de aleación de aluminio)

$$v_{material} = \frac{0.0876456 \text{ kg}}{2820 \text{ kg/m}^3}$$

$$v_{material} = 3.108 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cong 31.08 \text{ ml}$$

El diámetro más apropiado para el uso para las bolas de molienda es de $\phi = 15 \text{ mm}$, donde el volumen por bola es de:

$$v_{BA} = \frac{4}{3} \pi * r_{BA}^3$$

Donde

- v_{BA} = Volumen de las Bolas de Molienda
- r_{BA} = Radio de las Bolas de Molienda = 7.5 mm

Por lo que:

$$v_{BA} = \frac{4}{3} \pi * (7.5 \text{ mm})^3 = 1767.146 \text{ mm}^3 = 1.767 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

Por lo que el número de bolas que se debe utilizar es:

$$N_{bolas} = \frac{v_{bolas}}{v_{B.A.}}$$

Donde:

- v_{emp} = Volumen de empaquetamiento = 31.08 ml = 0.00003108 m³
- v_{BA} = Volumen de las Bolas de Molienda = 1.767 x 10⁻⁶ m³
- N_{bolas} = Número de bolas

Por lo que:

$$N_{bolas} = \frac{3.108 \times 10^{-5} \text{ m}^3}{1.767 \times 10^{-6} \text{ m}^3} = 17.5 = 18 \text{ bolas}$$

Por lo que el número de bolas que se debe utilizar es:

$$N_{bolas} * v_{B.A.} = v_{bolas}$$

Donde:

- v_{bolas} = Volumen de las bolas seleccionadas
- v_{BA} = Volumen de las Bolas de Molienda = 1.767 x 10⁻⁶ m³

- N_{bolas} . = Número de bolas en este caso 18

Por lo que:

$$v_{bolas} = 18 * 1.767 \times 10^{-6} m^3$$

$$v_{bolas} = 3.1806 \times 10^{-5} m^3$$

Por lo que el Volumen real que ocupa las bolas en el recipiente de molienda es:

$$V_{real} = v_{bolas} + (v_{bolas} * (1 - F.E))$$

Donde:

- V_{real} = Volumen real de las bolas
- v_{bolas} = Volumen de las Bolas de Molienda = $3.1806 \times 10^{-5} m^3$
- F.E. = Factor de Empaquetamiento = 0.74

Por lo que:

$$\begin{aligned} V_{real} &= 3.1806 \times 10^{-5} m^3 + (3.1806 \times 10^{-5} m^3 * (1 - 0.74)) = 4.007556 \times 10^{-5} m^3 \\ &= 40.07556 \text{ ml} \end{aligned}$$

De igual forma el Volumen real que ocupa el material hacer molido en el recipiente de molienda es:

$$V_{realM} = v_{materiales} + (v_{materiales} * (1 - F.E))$$

Donde:

- V_{realM} = Volumen real del material
- $v_{materiales}$ = Volumen de del material calculado = $3.108 \times 10^{-5} m^3$
- F.E. = Factor de Empaquetamiento = 0.74

Por lo que:

$$\begin{aligned} V_{realM} &= 3.108 \times 10^{-5} m^3 + (3.108 \times 10^{-5} m^3 * (1 - 0.74)) = 3.988 \times 10^{-5} m^3 \\ &= 39.88 \text{ ml} \end{aligned}$$

Finalmente, el último paso a determinar es que el volumen total no debe sobre pasar el 50% de la capacidad del recipiente de molienda.

$$V_{total} = V_{real} + V_{real}M$$

Donde:

- V_{real} = Volumen real de las bolas = 40.07556 ml
- $V_{real}M$ = Volumen real del material = 39.88 ml
- V_{total} = Volumen Total

Por lo que:

$$V_{total} = 40.07556 \text{ ml} + 39.88 \text{ ml} = 79.95 \text{ ml} \approx 80 \text{ ml}$$

Como se sabe que la capacidad total es de 125 ml y el valor calculado es menor, se da por aceptado volumen total.

Como se tiene que el Volumen final del recipiente contenedor de molienda es de 125 ml como se indica en la Figura 3-7, se define que las dimensiones son:

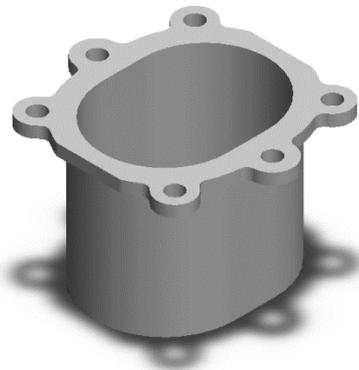


Figura 3-7: Bandeja de molienda

Por lo que:

- $V_{req} = 125 \text{ ml} = 125000 \text{ mm}^3$
- Área = b x a = 2656.64 mm²
- Altura = h

Una vez definido:

$$V_{req} = A \times h$$

$$125000 \text{ mm}^3 = 2669.74 \text{ mm}^2 \times h$$

$$h = 46.82 \text{ mm}$$

Por seguridad se definiría una altura de 48 mm por el redondeo de la base del recipiente.

3.2.2. Diseño del recipiente de molienda.

Cálculo de la fuerza y velocidad de impacto en el recipiente de molienda, como se detalla en la Figura 3-8.

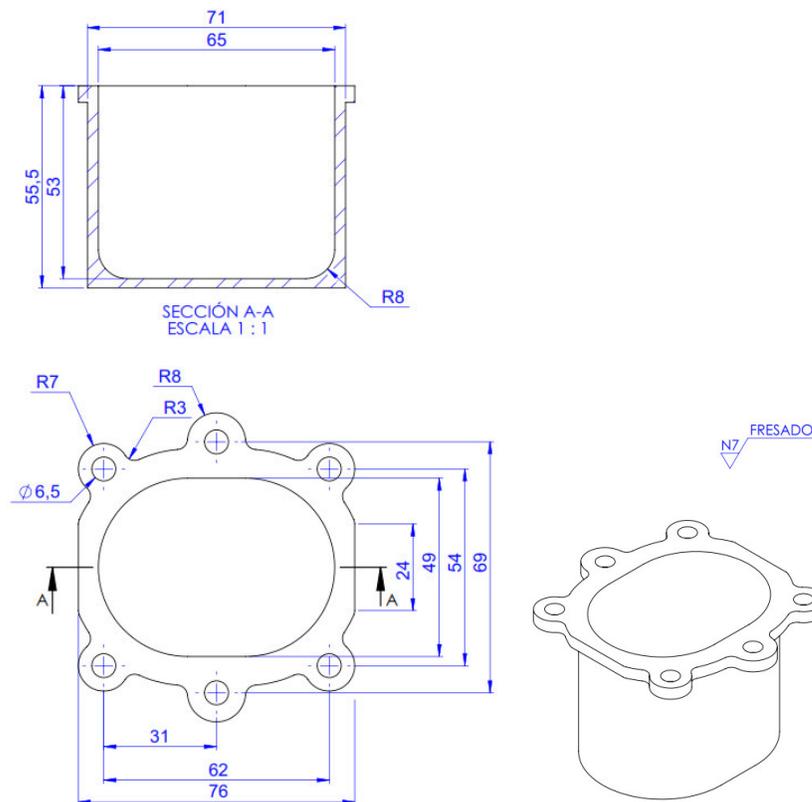


Figura 3-8: Dimensionamiento del recipiente de molienda

- Velocidad angular $W_f = 2000 \text{ rpm} = 209,44 \text{ rad/seg}$

- Masa la esfera

$$m = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho = \frac{4}{3} \pi (7,5 \text{ mm})^3 \left(8 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3} \right)$$

$$m = 0,01414 \text{ kg}$$

$$V_A = Wf * r_A$$

$$V_A = 209,44 * \left(\frac{32,5}{1000} \right)$$

$$V_A = 6,8068 \text{ m/s} = V_{B'}$$

$$V_B = \text{Velocidad de la bola}$$

- Velocidad de la bola durante el impacto mediante el coeficiente de restitución.

$$e = \frac{(V_B)_2 - (V_A)_2}{(V_A)_1 - (V_B)_1}$$

Donde $(V_B)_2$ y $(V_A)_2$ son las velocidades de las partículas después del choque y $(V_A)_1$ la velocidad antes del choque y $(V_B)_1$ la velocidad al chocar a la pared, como se indica en la Figura 3-9.

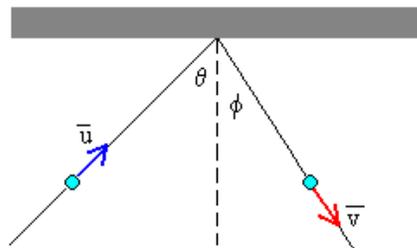


Figura 3-9: Diagrama del cuerpo libre de las partículas después del choque

$$e = \text{Coeficiente de restitución del acero AISI 304} = 0.28$$

La partícula 2 es ahora la pared cuya velocidad antes y después del choque es cero por lo que la velocidad al chocar la pared $(V_B)_1 = 0$

La bola se acerca hacia la pared con una velocidad $(V_A)_2 = (V_A)_2' \cdot \cos 45$, y se aleja de la pared con una velocidad $v_l = -v \cdot \cos f$ entonces la velocidad después del choque es:

$$(V_A)_2' = Wf * r_{A2}$$

$r_{A2} =$ Radio de curvatura mínimo.

$$(V_A)_2' = 209,44 * 0,0245$$

$$(V_A)_2' = 5.13128 \text{ m/s}$$

$$0,28 = \frac{(V_B)_2 - 5.13128 * \cos 45}{6,8068 - 0}$$

$$(V_B)_2 = 5,53427 \text{ m/s}$$

La velocidad de la bola durante el impacto:

$$(V_B) = (V_B)_2 + V_B'$$

$$(V_B) = 5,53427 \text{ m/s} + 6,8068 \text{ m/s}$$

$$(V_B) = 12.34107 \text{ m/s}$$

Cálculo de la fuerza durante el impacto.

Fuerza Normal.

$$\sum F_n = m * a_n = \frac{m * V_B^2}{\rho}$$

Donde:

- a_n : Aceleración normal
- ρ radio de curvatura mínimo.

$$F_n = \frac{0,014 \text{ kg} * (12.34107 \text{ m/s})^2}{0,0245 \text{ m}}$$

$$F_n = 87.03 \text{ N}$$

Fuerza Tangencial:

Por impulso y cantidad de movimiento.

$$m * (V_B)_1 + \int_{t_1}^{t_2} F_T dt = m * (V_B)$$

Donde:

$t_2 = 6 * 10^{-3}$ seg es el tiempo del choque obtenido de un software de simulación

$$0,014 * 0 + \int_{t_1}^{6 * 10^{-3}} F_T dt = 0,014 * (12.34107 \text{ m/s})$$

$$F_T(6 * 10^{-3}) = 0,1728 \text{ N}$$

$$F_T = 28.8 \text{ N}$$

$$F_{IMP} = (28.8 \text{ N} + 87.3 \text{ N}) * 2$$

$$F_{IMP} = 232.2 \text{ N} = \text{Fuerza de impacto .}$$

Se multiplica por dos debido a que la bola se mueve hacia arriba y la caja se mueve hacia abajo.

3.2.3. Delimitación del espesor del recipiente de molienda

El espesor del recipiente de molienda se identifica como la parte más crítica donde va a sufrir el impacto de las bolas, como se indica en la Figura 3-10.

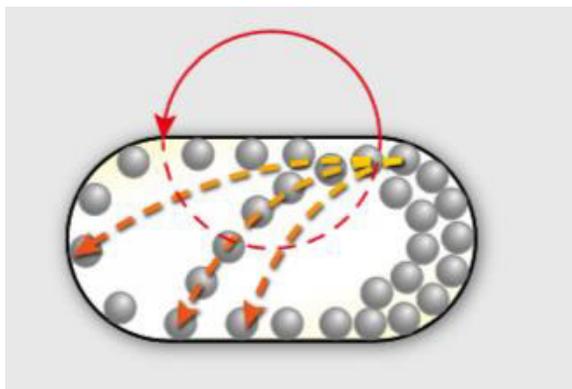


Figura 3-10: Diagrama de impacto de las bolas sobre el recipiente de molienda.

La parte crítica sería una placa rectangular apoyada en los bordes:

Con una **Fuerza** $F=360$ N (Fuerza de impacto) uniformemente distribuida sobre la superficie donde la deflexión máxima (δ) se da en el centro de la placa, como se detalla en la Figura 3-11.

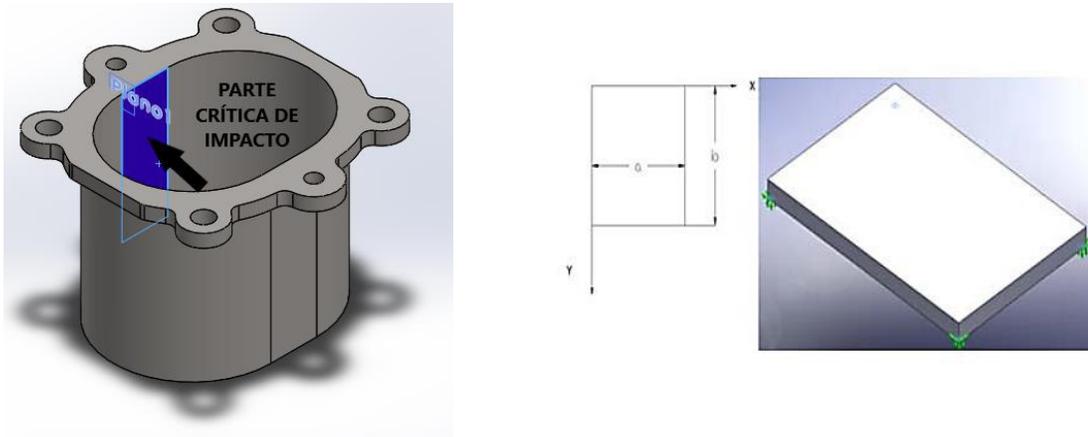


Figura 3-11: Vistas de sección crítica de impacto del recipiente de molienda.

Una vez identificado se procede al cálculo analítico:

Deflexión permisible [δ].

Para calcular las placas de soporte al impacto de las bolas de molienda debemos asumir una deflexión inicial permisible.

Datos: $a = 32.5$ mm $b = 48$ mm

$$[\delta] = \frac{L}{800}$$

$$[\delta] = \frac{48}{800}$$

$$[\delta] = 0.06 \text{ mm}$$

Espesor inicial placa soporte inferior [h_0]

Datos:

- Acero AISI 304
- E= 193 GPa
- $\rho= 8 \text{ gr/cm}^3$
- a= 32.50 mm
- b= 48 mm
- $\mu= 0.29$
- F=360 N fuerza de impacto.
- A = Factor numérico, depende de la relación b/a

$$\delta = \alpha \frac{F * a^2}{E * h^3}$$

El valor de α se lo obtiene en base a la relación b/a de la tabla 3-15.

$$\alpha = \frac{b}{a}$$

$$\alpha = \frac{48}{32.50} = 1.48 = 1.5$$

Tabla 3-15. Constantes para el cálculo de placas rectangulares cargados uniformemente [33].

$\frac{b}{a}$	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
α	0,0443	0,0530	0,0616	0,0697	0,0770	0,0843	0,0906	0,0964
β_1	0,0479	0,0553	0,0626	0,0693	0,0753	0,0812	0,0862	0,0908
β_2	0,0479	0,0494	0,0501	0,0504	0,0506	0,0500	0,0493	0,0486
$\frac{b}{a}$	1,8	1,9	2,0	3,0	4,0	5,0	α	
α	0,1017	0,1064	0,1106	0,1336	0,1400	0,1416	0,1422	
β_1	0,0948	0,0985	0,1017	0,1189	0,1235	0,1246	0,1250	
β_2	0,0479	0,0471	0,0464	0,0404	0,0384	0,0375	0,0375	

$$\alpha = 0,0843$$

$$\delta = \alpha \frac{F * a^2}{E * h^3}$$

Para el valor del espesor inicial (h_0) de la placa que va resistir la fuerza de impacto.

$$[\delta] \geq \delta \rightarrow [\delta] = \alpha \frac{F * a^2}{E * h^3}$$

$$0,06 = 0.0843 \frac{360N * (32.50 \text{ mm})^2}{193000 * h^3}$$

$$h_0 = 1,4 \text{ mm}$$

Por seguridad se definiría un espesor de **3 mm**

Espesor real asumido por construcción placa soporte inferior [hf] Se asume por facilidad de montaje y construcción un espesor de 3 mm para la placa, con el cual garantizamos una deflexión real menor a la permisible esto nos garantiza que no existan deformaciones constantes al momento de producirse el impacto de las bolas de molienda.

La deflexión real obtenida para una placa de hf = 3 mm y con Fuerza = 360N

$$\delta = 0.0843 \frac{360N * (32.5 \text{ mm})^2}{193000 * (2,5 \text{ mm})^3}$$

$$\delta = 0,01063 \text{ mm}$$

$$[\delta] \geq \delta$$

$$[0,06] \geq 0,010163 \quad \text{OK}$$

Cálculo del esfuerzo máximo producido en la parte más crítica debido al impacto.

$$\sigma_{max} = \frac{k * \text{Fuerza de impcto}}{h^2}$$

Donde k: Factor numérico, depende de la relación $b/a= 48/32.5=1.5$, se da de la Figura 3-12 y Tabla 3-16.

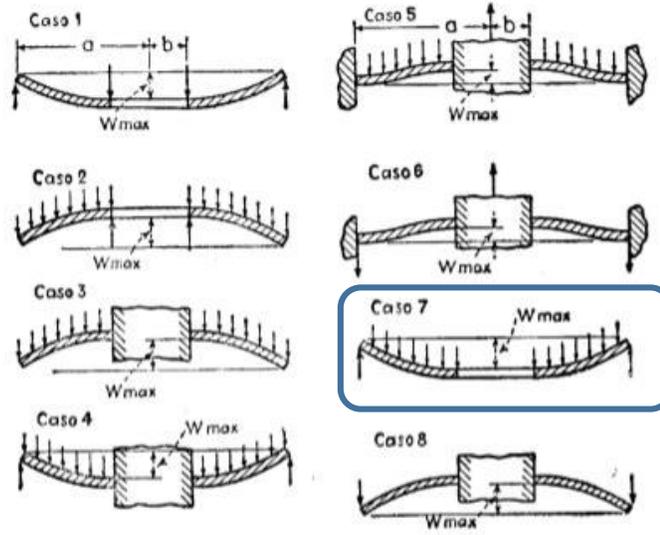


FIG. 96

Figura 3-12: Caso práctico de flexión [33].

Tabla 3-16. Coeficientes k y k1 para los casos prácticos de flexión [33].

a b	1,25		1,5		2		3		4		5	
	k	k ₁										
1	1,10	0,341	1,26	0,519	1,48	0,672	1,88	0,734	2,17	0,724	2,34	0,704
2	0,66	0,202	1,19	0,491	2,04	0,902	3,34	1,220	4,30	1,300	5,10	1,310
3	0,135	0,00231	0,410	0,0183	1,04	0,0938	2,15	0,293	2,99	0,448	3,69	0,564
4	0,122	0,00343	0,336	0,0313	0,74	0,1250	1,21	0,291	1,45	0,417	1,59	0,492
5	0,090	0,00077	0,273	0,0062	0,71	0,0329	1,54	0,110	2,23	0,179	2,80	0,234
6	0,115	0,00129	0,220	0,0064	0,405	0,0237	0,703	0,062	0,933	0,092	1,13	0,114
7	0,592	0,184	0,976	0,414	1,440	0,694	1,880	0,824	2,08	0,830	2,19	0,813
8	0,227	0,00610	0,428	0,0249	0,753	0,0877	1,205	0,209	1,514	0,293	1,745	0,350

$k=0,976$

$$\sigma_{max} = \frac{0,976 * 360N}{3^2}$$

$$\sigma_{max} = 39,04 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{max} = 39,04MPa$$

Cálculo del factor de seguridad.

$$\text{Factor de seguridad} = \frac{Sy \text{ mater.}}{\sigma_{max}}$$

$$\text{Factor de seguridad} = \frac{215MPa.}{39,04MPa}$$

$$\text{Factor de seguridad} = \mathbf{5.51}$$

El factor de seguridad es de 5.50 por que el espesor seleccionado o implementado en la caja de molienda es el adecuado.

3.2.4. Potencia requerida

La potencia se determina de la siguiente manera:

$$P_i = T_i * W_f$$

$$T_i = I_i * \alpha_m$$

$$\alpha_m = \frac{W_f - W_o}{t_f - t_o}$$

$$t_o^2 = 0 \text{ s}$$

$$W_o = 0 \text{ rad/s}$$

$$\alpha_m = \frac{W_f}{t_f}$$

Donde:

Pi = Potencia para vencer la inercia de los elementos (Watts).

Ti = Torque necesario para vencer la inercia (Nmm).

ω_f = Velocidad angular (rad/s).

I = Inercia de los elementos (kg mm^2).

α_m = Aceleración media producida durante el encendido y plena marcha (rad/s^2).

t_f = tiempo de arranque del motor

3.2.4.1. Definición de inercias.

a) Rueda dentada (Figura 3-13)

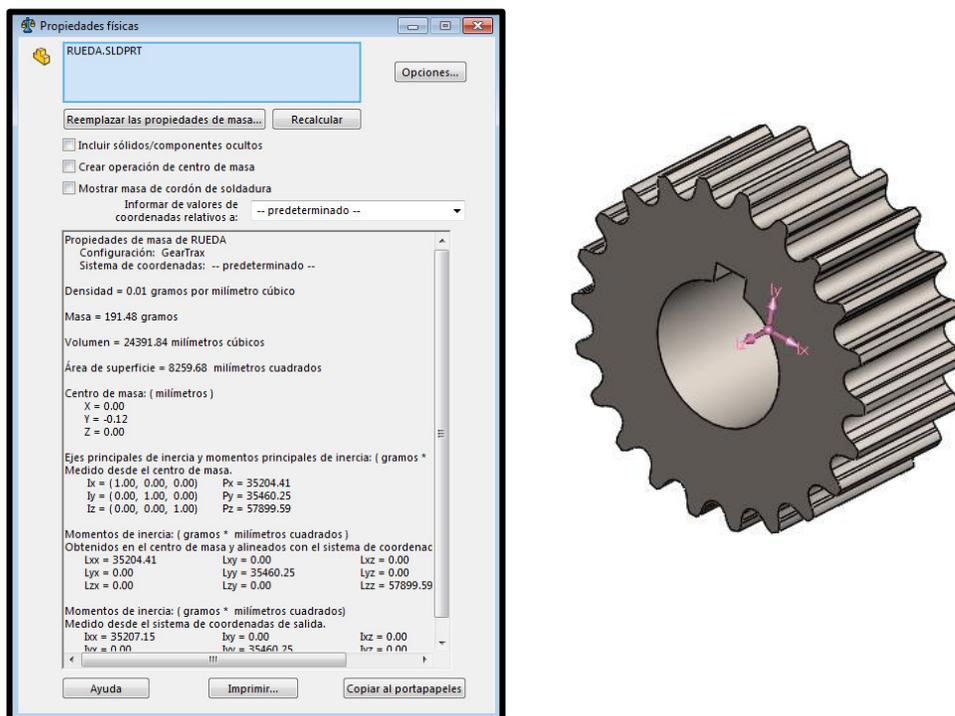


Figura 3-13: Datos característicos de la polea dentada

Masa

Material de la polea: Acero ASTM A36

$$m_p = \pi * (r_{ex}^2 - r_{intx}^2) * e * \rho = \pi(22^2 - 10^2)(20 \text{ mm}) \left(7,85 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3}\right)$$

$$m_p = 0,1894 \text{ kg}$$

Inercia

Se considera como un sólido hueco:

$$I = \frac{1}{2} m_p (r_{ex}^2 + r_{int}^2)$$

$$I = \frac{1}{2} \times 0.1894 \text{ Kg} \times (22^2 + 10^2)$$

$$I_p = 55.3 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$$

Por tener cuatro poleas en el movimiento se obtiene.

$$I_p = 55,3 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2 \cdot 4$$

$$I_{pT} = 221,2 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$$

b) Eje Primario (Figura 3-14)

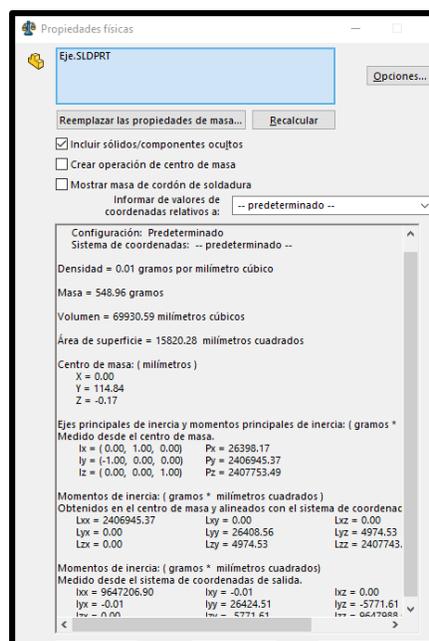


Figura 3-14: Datos característicos del eje primario

Masa

$$m_1 = \pi * r_{eje}^2 * l * \rho = \pi (10 \text{ mm})^2 (215 \text{ mm}) \left(7,85 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3} \right)$$

$$m_1 = 0,53 \text{ kg} = 530 \text{ gr}$$

Inercia

$$I = \frac{1}{2} m_T r_{eje}^2$$

$$I = \frac{1}{2} (530g)(10mm)^2$$

$$I = 26500 \text{ grmm}^2$$

c) Disco excéntrico (Figura 3-15)

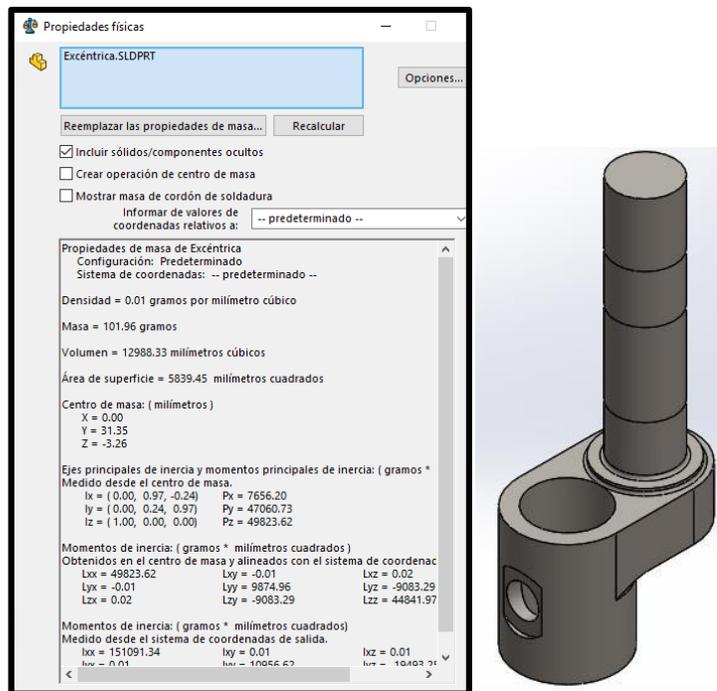


Figura 3-15: Datos característicos del disco excéntrico

Masas.

$$m_1 = \pi * (r_{ex}^2 - r_{intx}^2) * e * \rho = \pi(10^2 - 7^2)(25mm) \left(7,85 \times 10^{-6} \frac{kg}{mm^3} \right)$$

$$m_1 = 0,0314 \text{ kg}$$

$$m_2 = \pi * (r_{ex}^2 - r_{intx}^2) * e * \rho = \pi(10^2 - 16^2)(10mm) \left(7,85 \times 10^{-6} \frac{kg}{mm^3} \right)$$

$$m_2 = 0,0158 \text{ kg}$$

$$m_1 = \pi * r_{eje}^2 * l * \rho = \pi(6\text{mm})^2(61\text{mm}) \left(7,85 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3} \right)$$

$$m_3 = 0,0542 \text{ kg} = 530 \text{ gr}$$

$$m_T = m_1 + m_2 + m_3$$

$$m_T = 0,0314\text{kg} + 0,0158 \text{ kg} + 0,0542 \text{ kg}$$

$$m_T = 0,1014\text{kg} = 101,4 \text{ gr}$$

Inercias.

$$I = \frac{1}{2} m_1 (r_{ex}^2 + r_{int}^2) + m_1 d^2$$

$$I = \frac{1}{2} 0,0314\text{kg} (10^2 + 7^2) + (0,0314\text{kg})(8\text{mm})^2$$

$$I_1 = 2,8103 \text{ kg} * \text{mm}^2$$

$$I = \frac{1}{2} m_2 (r_{ex}^2 + r_{int}^2)$$

$$I = \frac{1}{2} 0,0158\text{kg} (10^2 + 6^2)$$

$$I_2 = 0,5056 \text{ kg} * \text{mm}^2$$

$$I = \frac{1}{2} m_3 r_{eje}^2 + m_3 d^2$$

$$I = \frac{1}{2} (0,0542\text{kg})(6\text{mm})^2 + (0,0542\text{kg})(8\text{mm})^2$$

$$I_3 = 4,4444 \text{ kgmm}^2$$

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3$$

$$I_{TD} = 7,7603 \text{ kgmm}^2$$

d) Tapa (Figura 319)

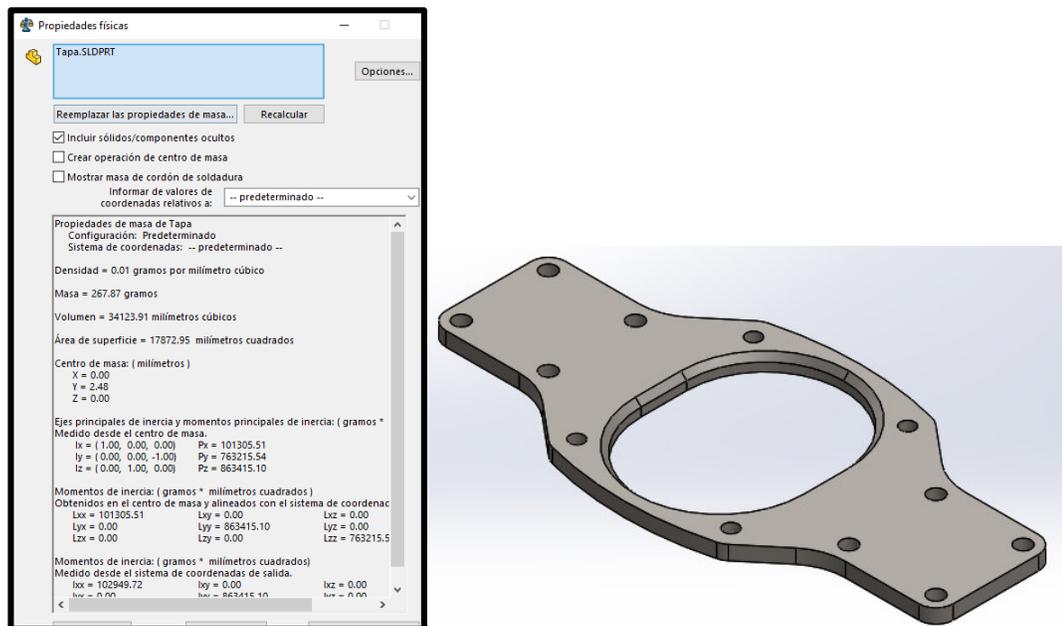


Figura 3-16: Datos característicos de la tapa

Masa

$$m_1 = l * a * e * \rho = 2 * (42mm)(39mm)(5mm) \left(7,85 \times 10^{-6} \frac{kg}{mm^3} \right) = 0,1286 kg$$

$$m_2 = l * a * e * \rho = (42mm)(100mm)(5mm) \left(7,85 \times 10^{-6} \frac{kg}{mm^3} \right) = 0,1649 kg$$

$$m_3 = l * a * e * \rho = 2 * (63mm)(20,50mm)(5mm) \left(7,85 \times 10^{-6} \frac{kg}{mm^3} \right) = 0,1014 kg$$

$$m_4 = l * a * e * \rho = (16mm)(55mm)(5mm) \left(7,85 \times 10^{-6} \frac{kg}{mm^3} \right) = 0,03454 kg$$

$$m_5 = \pi * r_1^2 * l * \rho = \pi (27,5mm)^2 (5mm) \left(7,85 \times 10^{-6} \frac{kg}{mm^3} \right) = 0,0933 kg$$

$$m_T = (m_1 + m_2 + m_3) - (m_4 + m_5)$$

$$m_T = 0,3949kg - 0,1278kg$$

$$m_T = 0,2671 kg = 267,1 gr$$

Inercia

$$I = 2 * \frac{1}{12} m_1 (a^2 + b^2) + m_1 d^2 + \frac{1}{12} m_2 (a^2 + b^2) + 2 * \frac{1}{12} m_3 (a^2 + b^2) - \frac{1}{2} m_4 (a^2 + b^2) - \frac{1}{2} m_5 r^2$$

$$I = 2 * \left\{ \frac{1}{12} (0,1286 \text{ kg}) [(42\text{mm})^2 + (39\text{mm})^2] \right\} + (0,1286\text{kg})(69,5\text{mm})^2$$

$$+ \frac{1}{12} (0,1649\text{kg}) [(42\text{mm})^2 + (100\text{mm})^2] + 2$$

$$* \left\{ \frac{1}{12} (0,1014 \text{ kg}) [(63\text{mm})^2 + (20,5\text{mm})^2] \right\}$$

$$- \frac{1}{12} (0,03454 \text{ kg}) [(16\text{mm})^2 + (55\text{mm})^2]$$

$$- \frac{1}{2} (0,0933 \text{ kg}) (27,5\text{mm})^2$$

$$I = 882,691 \text{ kgmm}^2 = \mathbf{882691 \text{ gr} * \text{mm}^2}$$

e) Caja Base (Figura 3-17)

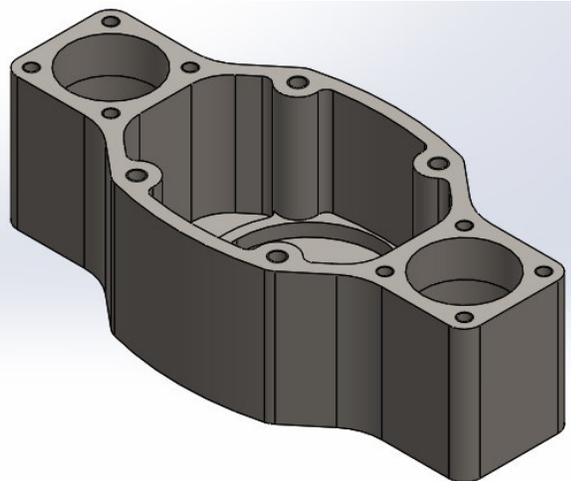
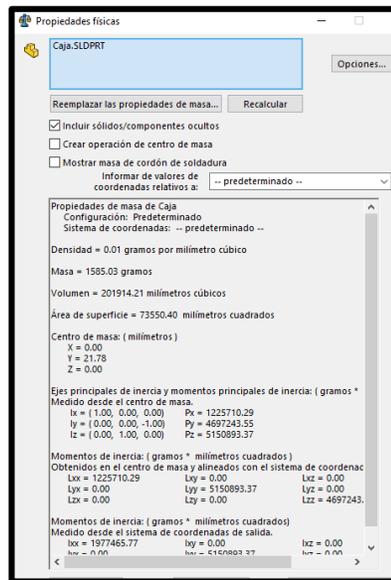


Figura 3-17: Datos característicos de la caja base

Masa

$$m_1 = l * a * e * \rho = 2 * (42\text{mm})(39\text{mm})(51\text{mm}) \left(7,85 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3} \right) = 1,3115 \text{ kg}$$

$$m_2 = l * a * e * \rho = (42mm)(100mm)(51mm) \left(7,85 \times 10^{-6} \frac{kg}{mm^3} \right) = 1,6815 kg$$

$$m_3 = l * a * e * \rho = 2 * (63mm)(20,5mm)(51mm) \left(7,85 \times 10^{-6} \frac{kg}{mm^3} \right) = 1,0341 kg$$

$$m_4 = l * a * e * \rho = (16mm)(63mm)(5mm) \left(7,85 \times 10^{-6} \frac{kg}{mm^3} \right) = 0,03956 kg$$

$$m_5 = \pi * r_1^2 * l * \rho = \pi(31,5mm)^2(5mm) \left(7,85 \times 10^{-6} \frac{kg}{mm^3} \right) = 0,1224 kg$$

$$m_6 = \pi * r_1^2 * l * \rho = 2\pi(16mm)^2(51mm) \left(7,85 \times 10^{-6} \frac{kg}{mm^3} \right) = 0,644 kg$$

$$m_7 = l * a * e * \rho = (42mm)(94mm)(46mm) \left(7,85 \times 10^{-6} \frac{kg}{mm^3} \right) = 1,4256 kg$$

$$m_8 = l * a * e * \rho = 2 * (48mm)(15,5mm)(46mm) \left(7,85 \times 10^{-6} \frac{kg}{mm^3} \right) = 0,5373 kg$$

$$m_T = (m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5) - (m_6 + m_7 + m_8)$$

$$m_T = 4,1891kg - 2,6069kg$$

$$m_T = 1,5822 kg = 1582,2 gr$$

Inercia

$$I = 2 * \frac{1}{12} m_1(a^2 + b^2) + m_1 d^2 + \frac{1}{12} m_2(a^2 + b^2) + 2 * \frac{1}{12} m_3(a^2 + b^2) + \frac{1}{2} m_4(a^2 + b^2) + \frac{1}{2} m_5 r^2 - \frac{1}{2} m_6 r_a^2 - m_6 d^2$$

$$\begin{aligned} I &= 2 * \left\{ \frac{1}{12} (1,3115 kg)[(42mm)^2 + (39mm)^2] \right\} + (1,3115kg)(69,5mm)^2 \\ &+ \frac{1}{12} (1,6815kg)[(42mm)^2 + (100mm)^2] + 2 \\ &* \left\{ \frac{1}{12} (1,0341 kg)[(63mm)^2 + (20,5mm)^2] \right\} + \frac{1}{12} (0,03956 kg)[(16mm)^2 \\ &+ (63mm)^2] + \frac{1}{2} (0,1224 kg)(31,5mm)^2 - \frac{1}{2} (0,644kg)(16mm)^2 \\ &- (0,644kg)(69,5mm)^2 - \frac{1}{12} (1,4256kg)[(42mm)^2 + (94mm)^2] - 2 \\ &* \left\{ \frac{1}{12} (0,5373 kg)[(48mm)^2 + (15,5mm)^2] \right\} \end{aligned}$$

$$I = 4851,8187 kgmm^2 = 4851818,7 gr * mm^2$$

f) Caja de Molienda (Figura 3-18)

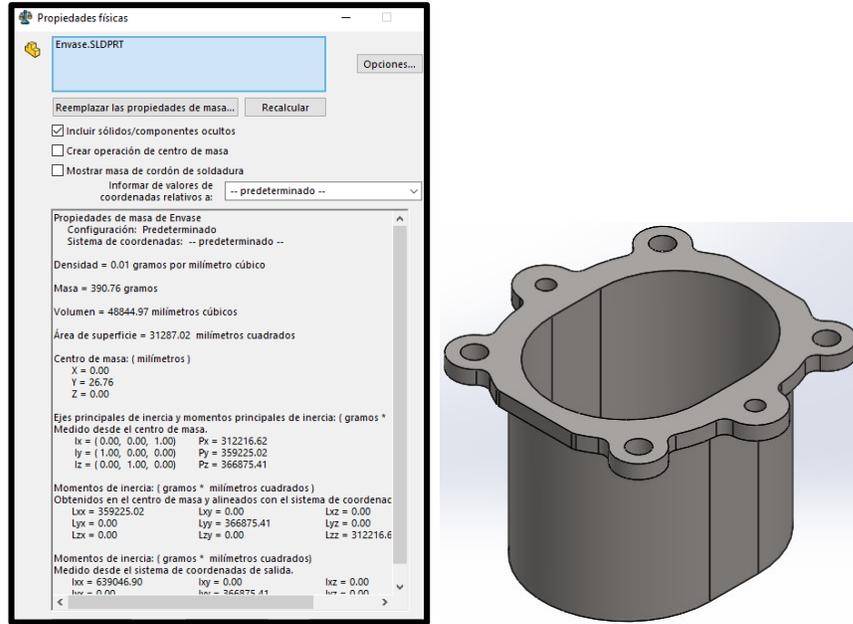


Figura 3-18: Datos característicos de la caja de molienda

Masa

$$m_1 = l * a * e * \rho = (16mm)(55mm)(55,5mm) \left(8 \times 10^{-6} \frac{kg}{mm^3} \right)$$

$$m_1 = 0,3907 \text{ kg}$$

$$m_2 = \pi * r_1^2 * l * \rho = \pi(27,5mm)^2(55,5mm) \left(8 \times 10^{-6} \frac{kg}{mm^3} \right)$$

$$m_2 = 1,0548 \text{ kg}$$

$$m_3 = l * a * e * \rho = (16mm)(49mm)(53mm) \left(8 \times 10^{-6} \frac{kg}{mm^3} \right)$$

$$m_3 = 0,3324 \text{ kg}$$

$$m_4 = \pi * r_1^2 * l * \rho = \pi(24,5mm)^2(53mm) \left(8 \times 10^{-6} \frac{kg}{mm^3} \right)$$

$$m_4 = 0,7995 \text{ kg}$$

$$m_T = (m_1 + m_2) - (m_3 + m_4) = (0,3907kg + 1,0548kg) - (0,3324kg + 0,7995kg)$$

$$m_T = 0,323 \text{ kg} = 323 \text{ gr}$$

Inercia

$$I = \frac{1}{12}m_1(a^2 + b^2) + \frac{1}{2}m_2r^2 - \frac{1}{12}m_3(a^2 + b^2) - \frac{1}{2}m_4r^2$$

$$I = \frac{1}{12}(0,3907kg)[(16mm)^2 + (55mm)^2] + \frac{1}{2}(1,0548kg)(27,5mm)^2$$

$$+ \frac{1}{12}(0,3324kg)[(16mm)^2 + (49mm)^2] - \frac{1}{2}(0,79kg)(24,5mm)^2$$

$$I = 342,27 \text{ kgmm}^2 = 342270 \text{ grmm}^2$$

g) Esferas (Figura 3-19)

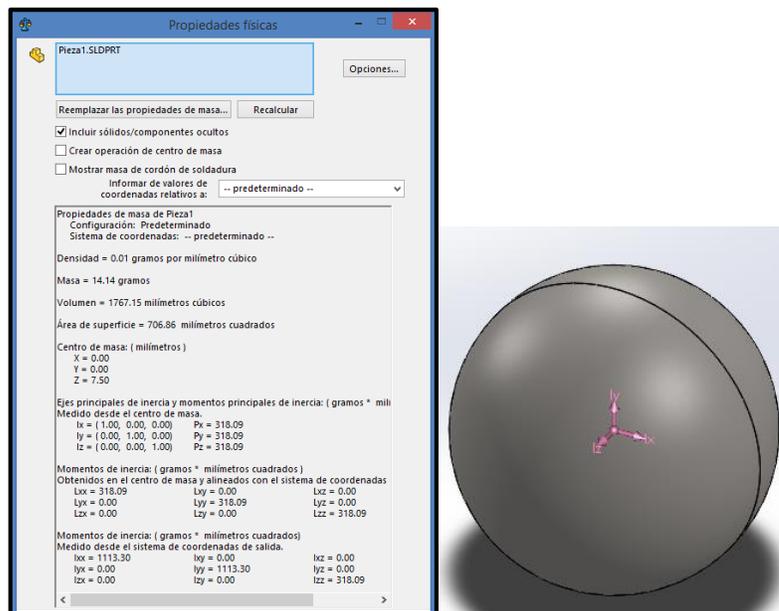


Figura 3-19: Datos característicos de la esfera

Masa

$$m = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho = \frac{4}{3}\pi(7,5mm)^3 \left(8 \times 10^{-6} \frac{kg}{mm^3}\right)$$

$$m = 0,01414 \text{ kg}$$

Inercia

$$I = \frac{2}{5}mr^2$$

$$I = \frac{2}{5} (0,01414 \text{ kg})(7,5 \text{ mm})^2$$

$$I = 0,31815 \text{ kgmm}^2 = 318,15 \text{ grmm}^2$$

Resumen (Tabla 3-17)

Tabla 3-17. Resumen de datos característicos de elementos

ELEMENTO	MASA IND. (kg)	INERCIA IND. (kg*mm ²)	CANTIDAD	INERCIA TOTAL(kg*mm ²)
Poleas	0,104	24,01	4	96,04
Ejes Principales	0,5277	26,35	2	52,7
Disco	0,11544	39,36	2	78,72
Ejes Secundarios	0,0155	0,2243	2	0,4486
Tapa	0,81	2582,75	1	2582,75
Caja Base	1,56	7088,69	1	7088,69
Caja de Molienda	0,606	688,5	1	688,5
Esferas	0,01414	0,31815	18	5,7267
			TOTAL	10593,5753

Inercia de un conjunto = $I_{IT} = 6372.2167 \text{ kg*mm}^2 = 0.0063722167 \text{ kg*m}^2$

Inercia Total = $2x I_{IT} = 2x0.0063722167 \text{ kg*m}^2 = 0.012744433 \text{ kg*m}^2$

Velocidad Angular $W_f = 2000\text{rpm} = 209,44 \text{ rad/seg}$

Tiempo de encendido del motor $t = 0,5\text{seg}$

Aceleración angular

$$\alpha = \frac{W_f}{t} = \frac{209,44}{(0,5)} = 418,88 \text{ rad/s}^2$$

Torque

$$T = I_T * \alpha = (0.012744433 \text{ kg * m}^2) \left(418,88 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \right) = 5.34 \text{ Nm}$$

Potencia

$$P = T * W_f = (5.34 \text{ Nm}) \left(209.44 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right) = 1118.4096 \text{ watts} = 1.5 \text{ hp}$$

Una vez calculada la potencia requerida se selecciona un motor de 2HP.

3.2.5. Validación de potencia y fuerza de impacto con el Working Model

La validación se dará en función del uso del Working Model, el cual se inicia la modelación con del mecanismo principal en el programa, como se detalla en la Figura 3-20.

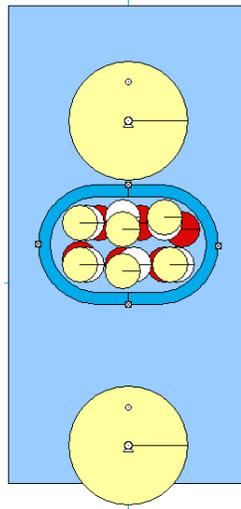


Figura 3-20: Modelado de los elementos en Working Model

El siguiente paso es la simulación y obtención de los resultados, como se observa en la Figura 3-21.

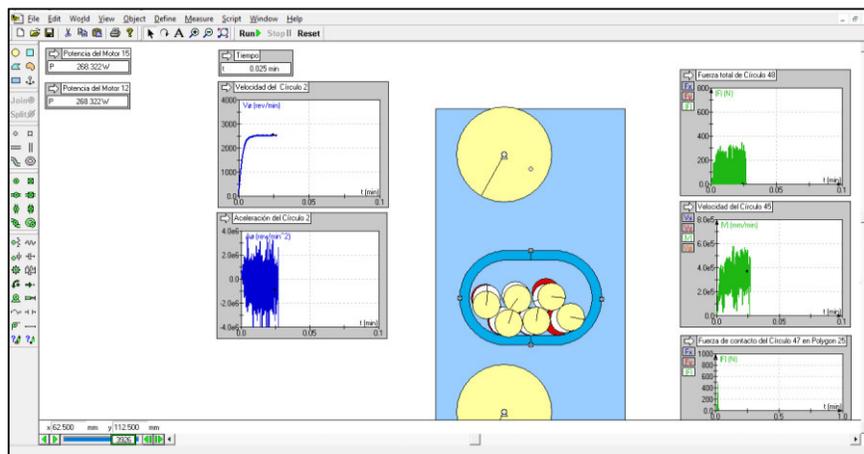
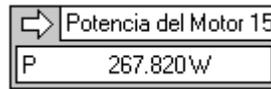


Figura 3-21: Obtención de resultados en Working Model

Potencia obtenida de la simulación de un solo eje.



$$P = 267,820 \text{ W} = 0,3711 \text{ Hp}$$

$$P = 0,3711 \text{ Hp} * 4$$

$$P = 1,5 \text{ Hp}$$

Se multiplica por 4 porque son 4 ejes que intervienen en el mecanismo de molienda.

Verificación de fuerza impacto, como se detalla en la Figura 3-22.

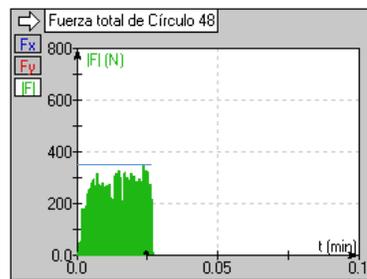


Figura 3-22: Obtención de la Fuerza Total de Círculo en Working Model

$$F=360\text{N}$$

Verificación de la velocidad de impacto como se detalla en la Figura 3-23.

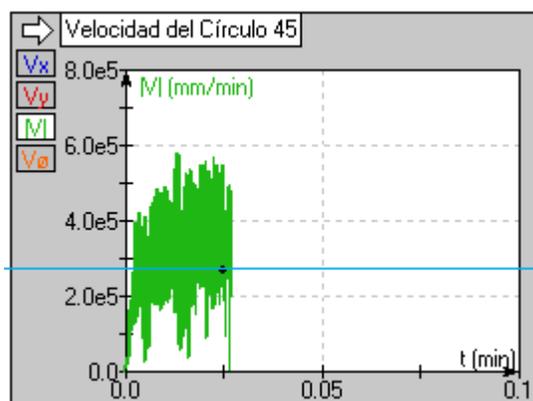


Figura 3-23: Obtención de la Velocidad de impacto de Círculo en Working Model

$$V_{simulada} = 6 * 10^5 \text{ mm/min}$$

$$V_{simulada} = 10 \text{ m/s}$$

$$V_{calculada} = 13,01 \text{ m/s}$$

Por facilidad de adquisición en el mercado local y nacional se escoge un motor de 2 hp.

3.2.6. Diseño de la caja base de molienda.

El diseño se inicia con el modelado de la caja base de molienda como se indica en la Figura 3-24.

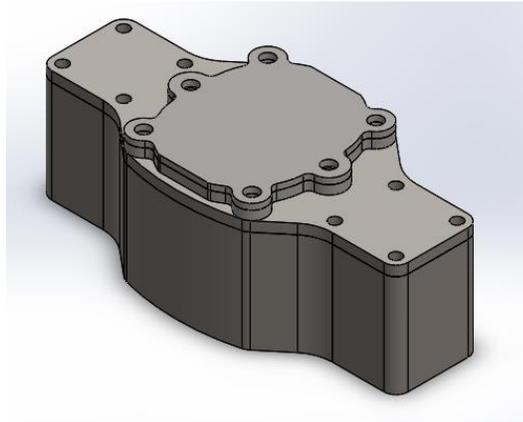


Figura 3-24: Modelado de la caja base de molienda

Fuerzas y esfuerzos que actúan en la caja base molienda, como se indica en la Figura 3-25.

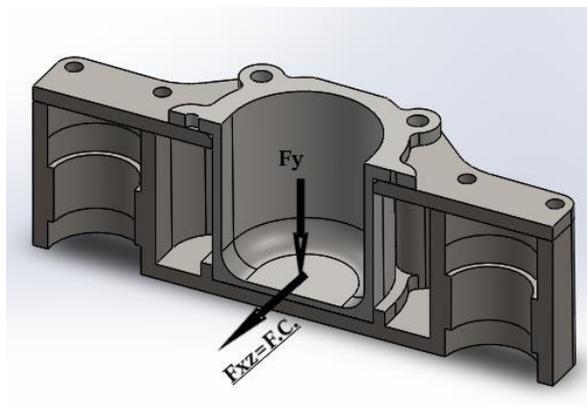


Figura 3-25: Vista de sección de la caja base de molienda

Donde

F_y : Produce un esfuerzo normal σ_x .

F_{xz} : produce un esfuerzo cortante T_{xy} .

$$F_y = W_{cm} + W_m + W_b + W_{tb}.$$

W_{cm} = Peso de la caja de molienda.

$$W_{cm} = m_{cm} * g$$

$$W_{cm} = 0.323kg * 9.8 \frac{m}{s^2} = 3.1654 N$$

W_m = Peso del material de molienda.

$$W_m = m * g$$

$$W_m = 0.0876456 Kg * 9.8 m/s^2 = 0.85N$$

W_b = Peso de las bolas de molienda.

$$W_b = m_b * g$$

$$W_b = 0,01414 kg * 9.8 m/s^2 * 18 = 2.49N$$

W_{tb} = Peso de la taba base.

$$W_{tb} = 0,267kg * 9.8 m/s^2 = 2,62N$$

$$F_y = (2,62 + 2,49 + 0,85 + 3.1654)N$$

$$F_y = 9.1254 N$$

Cálculo del esfuerzo normal.

$$\sigma_x = \frac{F_y}{A}$$

$$\sigma_x = \frac{9.1254 N}{53mm * 65mm}$$

$$\sigma_x = 0,00265 \text{ MPa.}$$

Cálculo del esfuerzo cortante.

$$\tau_{xy} = \frac{F.C. * Q}{I * t}$$

Donde

Q=Primer momento de área.

I=momento de inercia de la sección transversal.

t=espesor que va a soportar la Fxz: F.C.

$$F_{xy} = F.C = \text{Fuerza centrípeta} = m * w^2 * r_e$$

w: Velocidad angular

m: masa total del conjunto de movimiento de molienda.

r_e = radio excéntrico del movimiento.

$$F.C = 2.92 \text{ kg} * (209.44 \text{ rad/seg})^2 * 0.016 \text{ m}$$

$$F.C = 2049.38 \text{ N}$$

Primer momento de área.

$$Q = A * y$$

$$Q = b * h * y$$

$$Q = (71 * 55 * 46) \text{ mm}^3$$

$$Q = 179630 \text{ mm}^3$$

Momento de inercia de la sección de acuerdo con el eje neutro.

$$I = \frac{1}{12} * h * b^3$$

$$I = \frac{1}{12} * 71 * 55^3$$

$$I = 984385.42 \text{ mm}^4$$

$$I = 1640425.417 \text{ mm}^4$$

$$\tau_{xy} = \frac{2049.38 \text{ N} * 179630 \text{ mm}^3}{1640425.417 \text{ mm}^4 * 5 \text{ mm}}$$

$$\tau_{xy} = 44,88 \text{ MPa}$$

Por Von Mises: Utilizando la teoría de la energía de distorsión para hallar el esfuerzo equivalente

$$\sigma_{equi} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3 * \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_{equi} = \sqrt{(0,00265 \text{ MPa})^2 + 3 * (44,88 \text{ MPa})^2}$$

$$\sigma_{equi} = 77,734 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad

$$F_s = \frac{S_y \text{ del acero } 1045}{\sigma_{equi}} = \frac{515 \text{ Mpa}}{77,734 \text{ Mpa}}$$

$$F_s = 6.625 \approx 6.6 \text{ OK}$$

En el material de la caja base obtuvo un factor de seguridad 6.6 el cual tiene propiedades muy efectivas ante el dejaste por fatiga.

3.2.7. Cálculo del número de pernos en la caja base (acero1045.)

Para este cálculo se procede a determinar el número de pernos para la sujeción de la tapa en donde se ha utilizado pernos de M5 tipo allen de 30mm que tiene la siguiente ilustración para el cierre hermético, como se indica en la Figura 3-26.

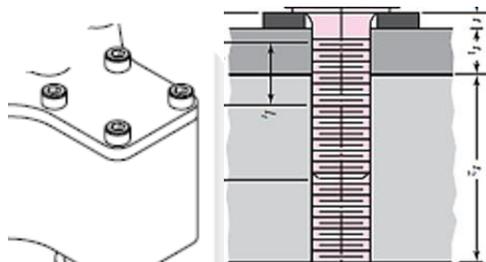


Figura 3-26: Vista de pernos M5

Con estos datos se procede a calcular la longitud del perno, así como el número adecuado de ellos, como se detalla en la Tabla 3-18.

Tabla 3-18. Tornillo Allen Cabeza Plana [34].

d	Métrica del tornillo									
dk	Diámetro de la cabeza									
k	Altura de la cabeza									
t	Profundidad de boca									
s	Distancia entre caras (llave)									
b	Longitud roscada									
l	Longitud seleccionada (sin cabeza)									

Cotas en milímetros (mm)										
d	M4	M5	M6	M7	M8	M10	M12	M14	M16	M18
dk	7	8,5	10	12	13	16	18	21	24	27
k	4	5	6	7	8	10	12	14	16	18
t	2	2,5	3	4	4	5	6	7	8	9
b	20	22	24	26	28	32	36	40	44	48
s	3	4	5	6	6	8	10	12	14	14
paso	0,7	0,8	1	1	1,25	1,5	1,75	2	2	2,5

Datos:

Denominación: M5

Agarre: 25mm

Longitud de perno = 30mm

Agarre L = 25mm

Diámetro mayor nominal:

Diámetro mayor nominal: d = 5mm

Serie métrica: $L_T = 2d + 6$

$$L_T = 2(5) + 6 = 16\text{mm}$$

Longitud de la parte útil sin rosca:

$$L_d = L - L_T = 25\text{mm} - 16\text{mm}$$

$$L_d = 9\text{mm}$$

Longitud de la parte roscada:

$$L_t = L - L_d = 25\text{mm} - 9\text{mm}$$

$$L_t = 16\text{mm}$$

Área de la parte sin rosca:

$$A_d = \frac{\pi * d^2}{4}$$

$$A_d = \frac{\pi * 5^2}{4}$$

$$A_d = 19.63\text{mm}^2 = I_d = 1.963 * 10^{-5}\text{m}^2$$

Área de esfuerzo de tensión, como se descifra en la Tabla 3-19.

Tabla 3-19. Diámetros y áreas roscadas [35].

Diámetro mayor nominal d_r mm	Serie de paso grueso			Serie de paso fino		
	Paso p_r mm	Área de esfuerzo de tensión A_r mm ²	Área del diámetro menor $A_{r,r}$ mm ²	Paso p_r mm	Área de esfuerzo de tensión A_r mm ²	Área del diámetro menor $A_{r,r}$ mm ²
1.6	0.35	1.27	1.07			
2	0.40	2.07	1.79			
2.5	0.45	3.39	2.98			
3	0.5	5.03	4.47			
3.5	0.6	6.78	6.00			
4	0.7	8.78	7.75			
5	0.8	14.2	2.7			
6	1	20.1	17.9			
8	1.25	36.6	32.8	1	39.2	36.0

$$A_t = 14.2\text{mm}^2 = 1.42 * 10^{-5}\text{m}^2$$

Constante de rigidez del perno:

$$E_{Acero} = 207GPa$$

$$K_b = \frac{A_d * A_t * E_{Acero}}{A_d * L_t + A_t * L_d}$$

$$K_b = \frac{1.963 * 10^{-5}m^2 * 1.42 * 10^{-5}m^2 * 207}{1.963 * 10^{-5}m^2 * 0.016m + 1.42 * 10^{-5}m^2 * 0.009m}$$

$$K_b = 0.1311134 \frac{GN}{m}$$

Módulo de resorte como se detalla en la Tabla 3-20.

$$K_m = E * d * A \frac{B*d}{l}$$

Tabla 3-20. Parámetros de rigidez [35].

Material usado	Relación de Poisson	Módulo de elasticidad,		A	B
		GPa	Mpsi		
Acero	0.291	207	30.0	0.787 15	0.628 73
Aluminio	0.334	71	10.3	0.796 70	0.638 16
Cobre	0.326	119	17.3	0.795 68	0.635 53
Hierro fundido gris	0.211	100	14.5	0.778 71	0.616 16
Expresión general				0.789 52	0.629 14

$$K_m = 207 * 10^9 * 0.005 * 0.78715 \frac{0.62873*0.005}{0.025}$$

$$K_m = 0.766 \frac{GN}{m}$$

Relación de rigidez.

$$C = \frac{K_b}{K_b + K_m}$$

$$C = \frac{0.131 \frac{GN}{m}}{0.131 \frac{GN}{m} + 0.766 \frac{GN}{m}}$$

$$C = 0.15$$

Resistencia de prueba como se indica en la Tabla 3-21.

Tabla 3-21. Clases métricas de propiedad mecánica pernos [35].

Clase de propiedad	Intervalo de tamaños, inclusive	Resistencia de prueba mínima, [†] MPa	Resistencia mínima a la tensión, [†] MPa	Resistencia mínima a la fluencia, [†] MPa	Material	Marca en la cabeza
4.6	M5-M36	225	400	240	Acero de bajo o medio carbono	

$$S_p = 225MPa$$

Precarga

$$F_i = 0,90 * A_t * S_p \text{ para conexiones permanentes.}$$

$$F_i = 0.9 * 1.42 * 10^{-5} m^2 * 225MPa$$

$$F_i = 2875.5N$$

Carga: La tapa de la caja base está sometida a una presión de 6 bar por lo que esta tapa está sometida a fuerza de separación en virtud de los pernos que se necesita para la sujeción hermética, como se detalla en la Tabla 3-22.

Tabla 3-22. Especificaciones de la refrigeración externa [36].

Líquido refrigerante	agua limpia sin cal
Presión mín. de la bomba	0,6 bares
Presión máx. de la bomba	6 bares
Capacidad de refrigeración mín. a una temperatura de 20°C	1 kW
Caudal	10 l/min
Temperatura de servicio	0 °C – 40 °C

Carga P de separación:

$$Presion = \frac{P}{A}$$

$$P = Presión * Area.$$

$$P = 0.6MPa * 11576mm^2$$

$$P = 6945.6N$$

Factor de seguridad

$$n = 2$$

Número de pernos:

$$N = \frac{C * n * P}{S_p * A_t - F_i}$$

$$N = \frac{0.15 * 2 * 6945.6N}{225MPa * 1.42 * 10^{-5} - 2875.5N}$$

$$N = 6.5 = 7 \text{ Pernos}$$

Debido a que la caja base tiene una geometría simétrica se necesita un numero de pernos pares por lo cual se procede a subir al inmediato superior de pernos a 8 y posteriormente a calcular el factor de seguridad con el número de pernos determinado.

$$n = \frac{N * S_p * A_t - F_i}{C * P}$$

$$n = \frac{8 * (225MPa * 1.42 * 10^{-5} - 2875.5N)}{0.15 * 6945.6N}$$

$$n = 2.45$$

3.2.8. Determinación de las tensiones en la polea Dentada

A continuación, se indica las tensiones a las que están sometidas las poleas, como se indica en la Figura 3-27.

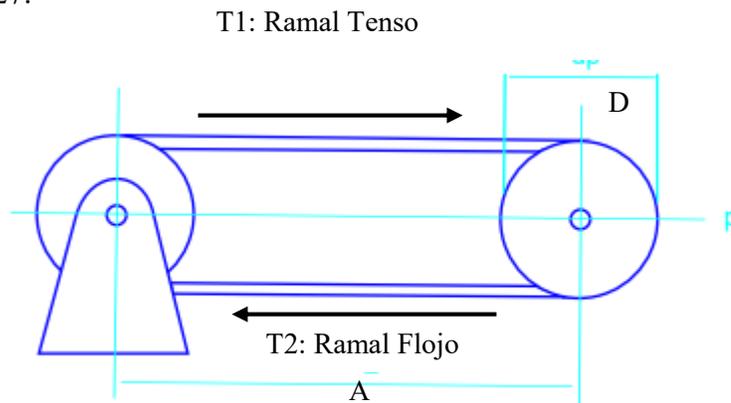


Figura 3-27: Definición de tensiones de las poleas dentadas

Donde:

D: Diámetro de la polea dentada=49mm

A= Distancia entre centros: 599,7mm

Como las poleas señaladas en la Figura 3-28, tienen el mismo diámetro las tensiones son:

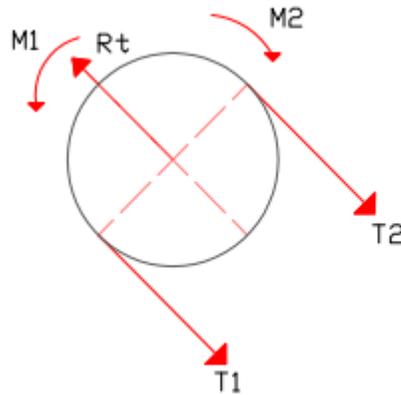


Figura 3-28: Definición de tensiones de las poleas dentadas individuales

En base a los siguientes datos como son:

- Potencia: 2Hp
- N: 2000rpm.
- D=49mm
- Cálculo de la Velocidad: Tangencial m/s

$$Vt = \frac{D * N * \pi}{60000}$$

$$Vt = \frac{49 * 2000 * \pi}{60000} = 5,131m/s$$

Cálculo de T1 = Fuerza Transmisible por la potencia.

$$T1(kgf) = \frac{W * P}{Vt}$$

W= Factor de conversión 75 a CV o 76 para Hp

$$T1(kgf) = \frac{76 * 2Hp}{5,131 m/s}$$

$$T1 = 28,45 (kgf) * 9.8$$

$$\mathbf{T1 = 278,81 N}$$

Arco de contacto entre la polea y la banda

$\alpha = 0^\circ$; Debido que las poleas son el mismo diametro.

Cálculo de T2 Por el principio de trabajo.

$$\frac{T1}{T2} = e^{f \cdot \alpha}$$

Donde f: Coeficiente de rozamiento entre la banda y la polea, como se detalla en la Figura 3-23.

Tabla 3-23. Coeficiente de rozamiento

Tipo de correa	Material de la llanta de la polea			
	Papel prensado	Madera	Acero	Fundición
Cuero	0.5	0.45	0.4	0.4
Algodón	0.28	0.25	0.22	0.22
Lana	0.45	0.4	0.35	0.35
Caucho	0.35	0.32	0.3	0.3

$$T2 = \frac{278,81N}{e^{0.3 \cdot 0}} = \frac{278,81N}{1} =$$

$$T2 = 278,81N$$

Tensión Total.

$$T_{total} = T1 + T2$$

$$T_{total} = 557,62 N$$

3.2.9. Selección de correas síncronas

Procedimiento de selección de una banda dentada sincrónica.

1.- Datos:

- HP y tipo de unidad motriz :2Hp
- RPM de la unidad motriz =3450 rpm
- RPM de la máquina a impulsar =2000rpm
- Diámetros de los ejes y dimensión de los cuñeros=20mm
- Distancia entre centros de los ejes: 700mm
- Tipo de equipo a impulsa: Molino de bolas de lata energía.

2.- Determine la Potencia del Diseño en HP, iniciando con el factor de servicio como se indica en la Tabla 3-24.

Tabla 3-24. Factor de servicio [37].

TIPO		FACTOR
Agitadores, batidores (Pala o propulsor)	Líquido	1.6
	Semilíquido	1.7
Maquinaria de panadería	Batidoras de masa	1.6
Maquinaria para ladrillos y barro	Taladras, batidoras y granuladores	1.7
	amasaderas	2.0
Centrifugadoras		1.9
Compresores	Recíprocos	2.2
	centrífugos	1.7
Transportadores	Banda, carga ligera;	1.5
	banda para horno; mineral, carbón,	1.7
	apron cangilón, espiral, helicoidal	1.8
Ventiladores, Sopladores	Centrífugos, propulsor, ventiladores	1.8
	para minas, sopladores positivos	2.0
Generadores y excitadores		1.8
Molinos para de martillos		1.9
Grúas, elevadores		1.8
Maquinaria para lavanderías	General	1.6
	Extractores, lavadoras	1.8
Eje de línea		1.7
Máquinas herramientas	Taladras, tornos	1.6
	máquinas de tornillo, esme-	1.7
	nil fresadoras, cepillos, troque-	1.7
Molinos	Bola, varilla, granulo, etc.	2.2
Maquinaria para papel	Agitadores, calandrias, secadoras,	1.6
	desfibradoras, bombas nash	1.9
Maquinaria para imprentas	Imprentas, periódicos, rotativas,	1.6
Bombas	planas, revista; máquinas de linotipo,	1.7
	cartadoras, plegadoras	2.2
Maquinarias para plantas de hule	Centrífugas, engranes rotarias,	1.8
Maquinarias para aserraderos	tubular, recíprocas	1.8
Cribas	Vibradoras, (agitadoras)	1.7
	tambor, cóni-	1.5
Maquinaria textil	co	1.8
	Telares, hilanderías, carretes, urdimbre	1.7
Maquinaria para trabajos en madera	Tornos, sierras sinfín, sierras circulares,	1.4
	cepillos	1.6

3.- Cálculo de la Potencia de Diseño

La potencia de diseño se determina de la siguiente manera:

$$P_d = P_m \times F_s$$

Donde:

- P_d = Potencia de diseño
- P_m = Potencia motriz = 2 HP
- F_s = Factor de servicio = 2.2

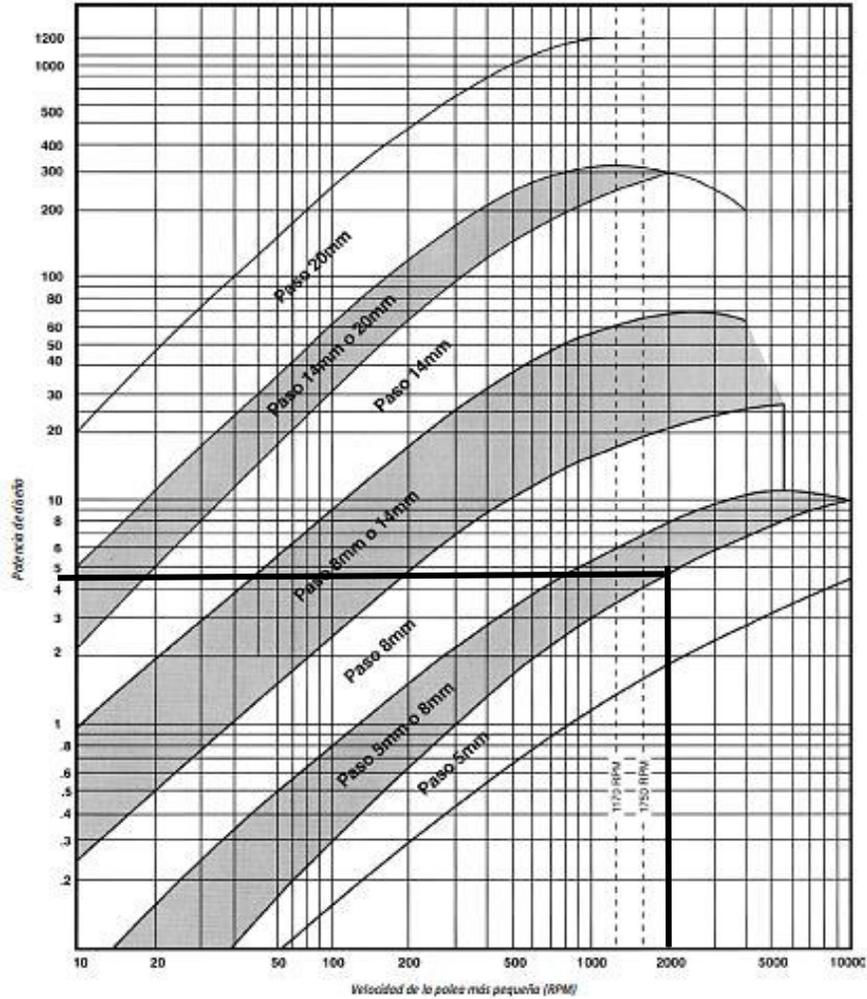
Por lo que:

$$P_d = 2 \text{ HP} \times 2.2$$

$$P_d = 4.4 \text{ HP}$$

4.- Paso de la Correa, como se indica en la Tabla 3-25.

Tabla 3-25. Tabla de selección del paso para Transmisión Sincrónica [37].



Se selecciona una correa de paso 5mm ó 8mm

5.-Relacion de velocidad.

$$RV = \frac{3450 \text{ rpm}}{2000 \text{ rpm}}$$

$$RV = 1.73$$

6.- Encontrando una transmisión estándar.

Longitud de la banda necesitada =1400mm

Relación de velocidad:1.73

Tabla 3-26. Tabla de selección para Transmisión Sincrónica. Paso 8 M [37].

Combinación de Poleas			Distancias de centros nominales mm/pulg.															
Relación de Velocidad	Matriz No. Dientes	Impulsada No. Dientes	Designación de código de la correa mm/pulg.															
			480 18.90	560 22.05	600 23.62	640 25.20	720 28.35	800 31.50	880 34.65	960 37.80	1040 40.94	1120 44.09	1200 47.24	1280 50.39	1440 56.69	1600 62.99	1760 69.29	1800 70.87
1.61	56	90								223.8 8.81	264.4 10.41	304.9 12.00	345.3 13.59	425.8 16.76	506.1 19.93	586.4 23.09	606.5 23.88	
1.64	44	72					164.1 6.46	204.9 8.07	245.4 9.66	285.8 11.25	326.0 12.84	366.3 14.42	406.4 16.00	486.7 19.16	566.9 22.32	647.0 25.47	667.0 26.26	
	22	36	122.7 4.83	163.0 6.42	183.1 7.21	203.2 8.00	243.3 9.58	283.4 11.16	323.5 12.74	363.6 14.31	403.6 15.89	443.6 17.47	483.7 19.04	523.7 20.62	603.7 23.77	683.8 26.92	783.8 30.86	
1.65	34	56				137.1 5.40	177.8 7.00	218.2 8.59	258.5 10.18	298.7 11.76	338.8 13.34	379.0 14.92	419.1 16.50	459.1 18.08	539.3 21.23	619.4 24.38	699.4 27.54	719.5 28.32
1.67	48	80						179.4 7.06	220.2 8.67	260.8 10.27	301.2 11.86	341.6 13.45	381.8 15.03	462.2 18.20	542.5 21.36	622.7 24.51	642.7 25.30	
	24	40	110.1 4.34	150.6 5.93	170.8 6.72	190.9 7.52	231.1 9.10	271.2 10.68	311.3 12.26	351.4 13.83	391.5 15.41	431.5 16.99	471.6 18.57	511.6 20.14	591.7 23.29	671.7 26.44	751.7 29.60	771.7 30.38
1.68	38	64				152.4 6.00	193.2 7.60	233.7 9.20	274.0 10.79	314.3 12.37	354.5 13.95	394.6 15.54	434.7 17.12	514.9 20.27	595.1 23.43	675.2 26.58	695.2 27.37	
1.69	26	44	138.1 5.44	158.3 6.23		178.5 7.03	218.8 8.61	259.0 10.20	299.1 11.78	339.2 13.36	379.3 14.93	419.4 16.51	459.4 18.09	499.5 19.66	579.5 22.82	659.6 25.97	739.6 29.12	759.7 29.91
1.71	28	48	125.4 4.94	145.8 5.74		166.0 6.54	206.4 8.13	246.7 9.71	286.9 11.29	327.0 12.87	367.1 14.45	407.2 16.03	447.3 17.61	487.3 19.19	567.4 22.34	647.5 25.49	727.6 28.64	747.6 29.43
1.73	22	38	118.2 4.66	158.7 6.25	178.8 7.04	199.0 7.83	239.1 9.41	279.3 10.99	319.4 12.57	359.4 14.15	399.5 15.73	439.5 17.30	479.6 18.88	519.6 20.46	599.7 23.61	679.7 26.76	759.7 29.91	779.7 30.70
1.75	64	112											240.2 9.46	281.3 11.08	362.8 14.29	443.8 17.47	524.4 20.65	544.6 21.44
	32	56				140.7 5.54	181.4 7.14	221.9 8.74	262.2 10.32	302.5 11.91	342.6 13.49	382.8 15.07	422.9 16.65	463.0 18.23	543.1 21.38	623.3 24.54	703.3 27.69	723.4 28.48

Como se tiene las poleas del mismo diámetro:

Los datos obtenidos estándar son:

- Polea motriz: 22 dientes
- Longitud de la correa estándar: 1440mm
- Distancia entre centros: 599.7mm, como se indica en la Tabla 3-26.

8.- Ancho de la Correa:

Potencia de diseño:4.4

Por catálogos

Tabla 3-27. Tabla de capacidad de Transmisión con Correas 8M de Anchos Estándar [37].

		RANGO DE HP — 30mm (1.18 pulg.) ancho de correa (8M-30)															
No. de Ranuras		22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	44	48	56	64	72	80
D.P.	mm in.	56.02 2.206	61.12 2.406	66.21 2.607	71.30 2.807	76.39 3.008	81.49 3.208	86.58 3.409	91.87 3.609	96.77 3.810	101.86 4.010	112.05 4.411	122.23 4.812	142.60 5.614	162.97 6.416	183.35 7.218	203.72 8.020
RPM DE LA POLEA MENOR	10	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.17	0.19	0.21	0.24
	20	0.07	0.08	0.09	0.11	0.13	0.15	0.17	0.20	0.22	0.24	0.26	0.29	0.33	0.38	0.43	0.48
	40	0.14	0.16	0.19	0.22	0.26	0.30	0.35	0.39	0.44	0.48	0.52	0.57	0.67	0.76	0.86	0.95
	60	0.21	0.23	0.28	0.34	0.39	0.46	0.52	0.59	0.66	0.72	0.79	0.86	1.00	1.14	1.29	1.43
	100	0.34	0.39	0.47	0.56	0.66	0.76	0.87	0.98	1.11	1.19	1.31	1.43	1.67	1.91	2.15	2.38
	200	0.69	0.76	0.94	1.12	1.31	1.52	1.74	1.97	2.21	2.38	2.61	2.83	3.25	3.67	4.08	4.48
	300	1.03	1.13	1.36	1.62	1.90	2.19	2.51	2.84	3.20	3.46	3.77	4.08	4.68	5.28	5.86	6.44
	400	1.38	1.50	1.77	2.10	2.46	2.84	3.25	3.68	4.14	4.48	4.88	5.28	6.06	6.83	7.58	8.32
	500	1.72	1.88	2.16	2.57	3.00	3.47	3.97	4.50	5.06	5.47	5.96	6.44	7.39	8.32	9.24	10.14
	600	2.07	2.25	2.55	3.03	3.54	4.09	4.68	5.30	5.96	6.44	7.02	7.58	8.69	9.78	10.85	11.90
	700	2.41	2.63	2.93	3.47	4.06	4.69	5.37	6.08	6.83	7.39	8.05	8.69	9.96	11.20	12.42	13.61
	800	2.75	3.00	3.30	3.91	4.58	5.29	6.04	6.85	7.70	8.32	9.06	9.78	11.20	12.59	13.95	15.28
	870	2.99	3.26	3.56	4.22	4.93	5.70	6.51	7.38	8.29	8.97	9.75	10.53	12.06	13.55	15.00	16.42
	1000	3.44	3.75	4.06	4.77	5.58	6.45	7.37	8.34	9.38	10.14	11.03	11.9	13.61	15.28	16.91	18.49
	1160	3.99	4.35	4.71	5.45	6.36	7.35	8.40	9.51	10.69	11.55	12.56	13.55	15.48	17.35	19.17	20.94
	1200	4.12	4.49	4.87	5.61	6.56	7.57	8.65	9.80	11.01	11.90	12.93	13.95	15.94	17.86	19.73	21.53
	1400	4.80	5.24	5.67	6.43	7.51	8.67	9.90	11.21	12.60	13.61	14.79	15.94	18.18	20.33	22.41	24.41
	1600	5.48	5.98	6.47	7.22	8.44	9.74	11.13	12.59	14.14	15.28	16.58	17.86	20.33	22.70	24.97	27.12
	1750	5.98	6.53	7.07	7.81	9.12	10.53	12.02	13.61	15.28	16.50	17.90	19.27	21.90	24.41	26.79	29.04
	2000	6.84	7.45	8.06	8.84	10.23	11.81	13.46	15.25	17.12	18.49	20.03	21.53	24.41	27.12	29.66	32.01
2400	8.18	8.90	9.62	10.55	11.95	13.78	15.73	17.78	19.96	21.53	23.28	24.97	28.16	31.09	33.76	36.13	
2800	9.50	10.34	11.17	12.24	13.59	15.66	17.86	20.19	22.64	24.41	26.33	28.16	31.56	34.58	37.20	39.38	
3200			12.68	13.88	15.15	17.45	19.89	22.47	25.18	27.12	29.17	31.09	34.58	37.54	39.92		
3500					16.26	18.73	21.34	24.09	26.99	29.04	31.15	33.12	36.58	39.38			
4000						20.73	23.60	26.62	29.79	32.01	34.17	36.13	39.38				
4500							25.67	28.93	32.34	34.68	36.81	38.66					
5000								30.99	34.60	37.03	39.03	40.66					
5500									36.57	39.03	40.80						

Se eligió una correa de **30 mm** de ancho pues con una polea de 22 dientes soporta hasta una potencia de 6,84 hp a 2000 rpm, como se detalla en la Tabla 3-27.

9.- Adquisición de la banda dentada sincrónica:

Debido la facilidad de adquisición y montaje del diseño se utilizará una polea dentada con las siguientes características, como se indica en la Figura 3-29:

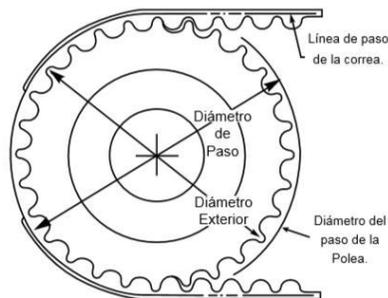


Figura 3-29: Conjunto poleas – correas sincrónicas [37].

- Diámetro paso: 56.2mm
- Diámetro Exterior: 49mm
- Diámetro del eje: 20mm

La selección del paso de la correa de 8M es de tipo H normalizado.

Las formas redondas de los dientes permiten la distribución uniforme de la tensión de carga sobre el diente entero de la correa. Como el diente de la correa engrana con la ranura de la polea sin ninguna interferencia, la concentración de tensión al pie del diente de la correa puede eliminarse [37].

10.- Capacidad de Transmisión de Alta Potencia (Figura 3-30 y Tabla 3-28)

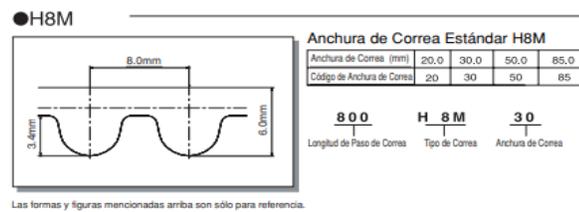


Figura 3-30: Anchura de correa H8M [37].

Tabla 3-28. Tamaño Estándar de Correa. H8M [37].

H8M						H14M		
Código de Producto	No. de Dientes	Longitud de Paso de Correa (mm)	Código de Producto	No. de Dientes	Longitud de Paso de Correa (mm)	Código de Producto	No. de Dientes	Longitud de Paso de Correa (mm)
536H8M	67	536	1200H8M	150	1,200	784H14M	56	784
560H8M	70	560	1224H8M	153	1,224	826H14M	59	826
592H8M	74	592	1248H8M	156	1,248	924H14M	66	924
600H8M	75	600	1280H8M	160	1,280	966H14M	69	966
624H8M	78	624	1304H8M	163	1,304	1148H14M	82	1,148
632H8M	79	632	1320H8M	165	1,320	1190H14M	85	1,190
640H8M	80	640	1360H8M	170	1,360	1344H14M	96	1,344
656H8M	82	656	1392H8M	174	1,392	1400H14M	100	1,400
680H8M	85	680	1400H8M	175	1,400	1458H14M	104	1,458
720H8M	90	720	1424H8M	178	1,424	1512H14M	108	1,512
760H8M	95	760	1432H8M	179	1,432	1540H14M	110	1,540
776H8M	97	776	1440H8M	180	1,440	1568H14M	112	1,568
800H8M	100	800	1480H8M	185	1,480	1610H14M	115	1,610
840H8M	105	840	1520H8M	190	1,520	1638H14M	117	1,638
856H8M	107	856	1600H8M	200	1,600	1652H14M	118	1,652
880H8M	110	880	1680H8M	210	1,680	1680H14M	120	1,680
896H8M	112	896	1696H8M	212	1,696	1736H14M	124	1,736
912H8M	114	912	1728H8M	216	1,728	1778H14M	127	1,778
920H8M	115	920	1760H8M	220	1,760	1890H14M	135	1,890

Por la facilidad de la adquisición y cumpliendo con los parámetros calculados se implementa la siguiente banda dentada sincrónica con el código BANDO la cual cumple con la longitud necesitada en el diseño, definidas en la Tabla 3-29.

Tabla 3-29. Fajas de Distribución.

■ **Fajas de Distribución | Fajas Sincrónicas**

COD. BANDO	COD. SUN	DIENTE		DESCRIPCIÓN
101BYU20 CR	A318YU20MM	101	D- R	HYUNDAI ATOZ MX SOHC 1000 1997- / KIA PICANTO 1100 2004
105BRU22 CR	A394RU22MM	105	D- R	HYUNDAI ACCENT 1.5 G4ECX 97-03 / HYUNDAI AVANTE / LAVITA 1.5 2001/HYUNDAI MATRIX 1.6 2001/ HYUNDAI VERNA 1.5 1999/ KIA RIO II(JB) G4EE / KIA CERATO (LD) G4ED 26
151BRU29 CR	A566RU29MM	151	D- R	HYUNDAI ELANTRA 1.5 G4DJ 1990-95, 1.6 G4CR 1991-95 / MITSUBISHI LANCER 1.6 4G61 88-91/ MITSUBISHI MIRAGE 1.6 4G61 1989-1991 30

3.2.10. Diseño de eje Principal.

El diseño se da de la siguiente manera:



Figura 3-31: Modelado del eje principal

Inicialmente se determina el **Torque**, del eje principal definido en la Figura 3-31, de la siguiente manera:

$$T = \frac{9950 * P}{N}$$

Donde:

- T = Torque
- P = Potencia = 2 HP = 1491.4 Watts = 1.49 KW
- N = 2000 rpm

$$T = \frac{9950*1.49}{2000} = 7.4127 \text{ Nm}$$

El siguiente paso es determinar la Carga Crítica:

$$Fb = \frac{T}{4 * D}$$

Donde:

- T = Torque Motriz = 7.4127 Nm
- Fb = Carga Crítica + Fuerza de resistencia.
- D eje = 20 mm = 0.02 m

$$Fb = \frac{7.4127 \text{ Nm}}{4 * 0.02 \text{ m}} = 92.659375 \text{ N}$$

Fuerza de resistencia en la unión con la caja base de molienda.

$$Fr = \frac{T}{r(\text{excentricidad})}$$

$$Fr = \frac{7.4127 \text{ Nm}}{0.016 \text{ m}} = 445,05 \text{ N}$$

Teniendo en cuenta que todo el conjunto del eje principal se lo tomara como una viga en voladizo, como se detalla en la Figura 3-32.

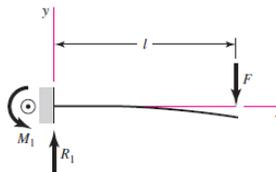


Figura 3-32: Diagrama de cuerpo libre de una viga con carga puntual [35].

$$\sigma = \frac{32 M}{\pi * D^3}$$

Donde:

- M = Momento
- D = 20 mm = 0.02 m
- σ = Esfuerzo
- FT = Carga Crítica + Fuerza de resistencia. = 92.659375 N + 445 N

- l = Longitud del eje = 291 mm = 0.291m
- τ_{xy} = Esfuerzo cortante máximo

Como no se tiene el Momento, se procede a determinar de la siguiente manera:

$$M = F_T * l$$

$$M = 537.65 \text{ N} \times 0.291 \text{ m} = 156.46 \text{ Nm}$$

$$\sigma_x = \frac{32 * 156.46 \text{ Nm}}{\pi * (0.02 \text{ m})^3} = 199.21 \text{ MPa}$$

Esfuerzo cortante máximo.

$$\tau_{xy} = \frac{16 T}{\pi d^3} = \frac{16 * 7.4127 \text{ Nm}}{\pi (0.02 \text{ m})^3} = 4.72 \text{ MPa}$$

Utilizando la teoría de la energía de distorsión para hallar el esfuerzo equivalente:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3 \tau_{xy}^2} = \sqrt{(199.21 \text{ MPa})^2 + 3 * (4.72 \text{ MPa})^2} = 199.378 \text{ MPa}$$

Una vez definido el Esfuerzo Equivalente se procede a determinar el Factor de Seguridad, de la siguiente manera:

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{equi.}}$$

Donde:

- $S_y = 710 \text{ MPa}$ (Acero AISI 4340)
- $\sigma_{eq} = 199.378 \text{ MPa}$

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{eq}} = \frac{710 \text{ MPa}}{199.378 \text{ MPa}} = 3.56 = 4$$

Análisis dinámico

El diseño del eje central parte de un diámetro $d = 20 \text{ mm}$, de un Eje de Acero AISI 4340.

Por lo que se inicia determinando los Factores que modifican el Límite de Resistencia a la Fatiga, según [35, p. 323], como es:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e$$

Donde:

- k_a = Factor de superficie
- k_b = Factor de modificación del tamaño
- k_c = Factor de carga
- k_d = Factor de temperatura
- k_e = Factor de confiabilidad
- k_f = Factor de concentración
- S'_e = Límite de Resistencia a la fatiga en viga rotatoria
- S_e = Límite de Resistencia a la fatiga en la ubicación crítica

Por lo que el Factor de superficie (k_a) es:

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

Donde

- a = Factor = 4.51 (Tabla 3-30)
- b = Exponente = -0.265
- S_{ut} = Resistencia ultima a la tensión = 1110 MPa (Acero AISI 4340)
- k_a = Factor de superficie

Tabla 3-30. Parámetros del Factor de Modificación [35, p. 337].

Acabado superficial	Factor a		Exponente b
	S_{ut} , kpsi	S_{ut} , MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o estirado 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

Por lo que:

$$k_a = 4.51 * 1110^{-0.265} = 0.703$$

El siguiente paso es determinar el factor de modificación del tamaño (k_b)

$$k_b = \begin{cases} (d/0.3)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ pulg} \\ 0.91d^{-0.157} & 2 < d \leq 10 \text{ pulg} \\ (d/7.62)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d < 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < 254 \text{ mm} \end{cases}$$

Como se sabe que el diámetro del eje, que es de 20 mm, se procede a determinar el factor en base a la tercera formula que es.

$$k_b = \left(\frac{d}{7.62}\right)^{-0.107} = \left(\frac{20}{7.62}\right)^{-0.107} = 0.902$$

Una vez definido k_a y k_b se procede a determina k_c que es el factor de carga, en base al siguiente criterio.

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{flexión} \\ 0.85 & \text{axial} \\ 0.59 & \text{torsión} \end{cases}$$

Por lo que:

$$K_c = 0.59 \text{ por estar el eje en torsión}$$

Otro factor a determinar es el Factor de temperatura (k_d), como se detalla en la Tabla 3-31, el cual se según la base a efectos de operación como son:

Tabla 3-31. Efectos de temperatura de operación [35, p. 337].

Temperatura, °C	S_T/S_{RT}	Temperatura, °F	S_T/S_{RT}
20	1.000	70	1.000
50	1.010	100	1.008
100	1.020	200	1.020
150	1.025	300	1.024
200	1.020	400	1.018
250	1.000	500	0.995
300	0.975	600	0.963
350	0.943	700	0.927
400	0.900	800	0.872
450	0.843	900	0.797
500	0.768	1 000	0.698
550	0.672	1 100	0.567
600	0.549		

Como se sabe que la temperatura del material está a 20°C, el Factor $k_d = 1$

En tanto que el **(ke) Factor de confiabilidad** se determina en base a la siguiente ecuación que es:

$$k_e = 1 - 0.08Z_a$$

Z_a = Factor de Confiabilidad = Indicando que se tiene una confiabilidad del 99% (Tabla 3-32)

$$k_e = 1 - 0.08 * 2.326 = 0.81392$$

Tabla 3-32. Factor de modificación de confiabilidad [35, p. 337].

Confiabilidad, %	Variación de transformación z_a	Factor de confiabilidad k_e
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

En tanto que el **(kf) Factor de modificación de efectos varios** se determina en base a la siguiente ecuación que es:

$$k_f = 1$$

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

El valor de la sensibilidad a la muesca (q) se procede a encontrarla como se indica en la Figura 3-33.

$$q = 0.8$$

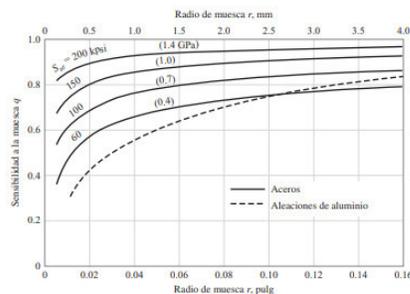


Figura 3-33: Sensibilidad de la muesca en el acero [35].

Para el cálculo de factor teórico de concentración de esfuerzos (k_t) se procede hallar:

r =radio de la muesca critica seleccionado en la excéntrica, como indica en la Figura 3-34.

$$\frac{r}{d} = \frac{0.5}{12} = 0.0416$$

$$\frac{D}{d} = \frac{20}{12} = 1.67$$

$$k_t = 2.2$$

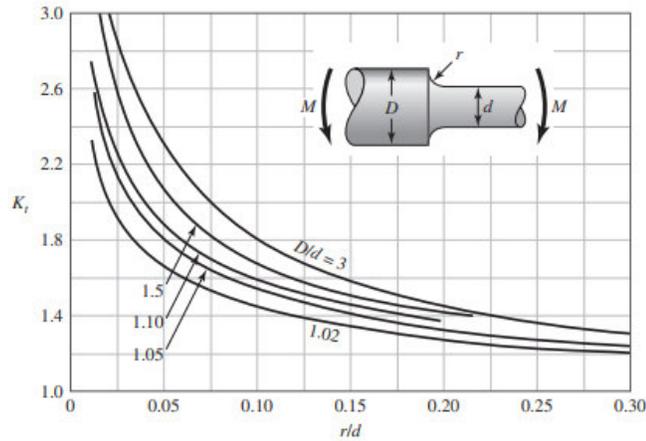


Figura 3-34: Eje redondo con filete [35].

$$k_f = 1 + 0.8(2.2 - 1) = 1.96$$

Ahora el (k_{fs}) **Factor de modificación de efectos varios sometidos a torsión** se determina en base a la siguiente ecuación que es:

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

El valor de la sensibilidad a la muesca (q_s), según la Figura 3-35, es:

$$q_s = 0.81$$

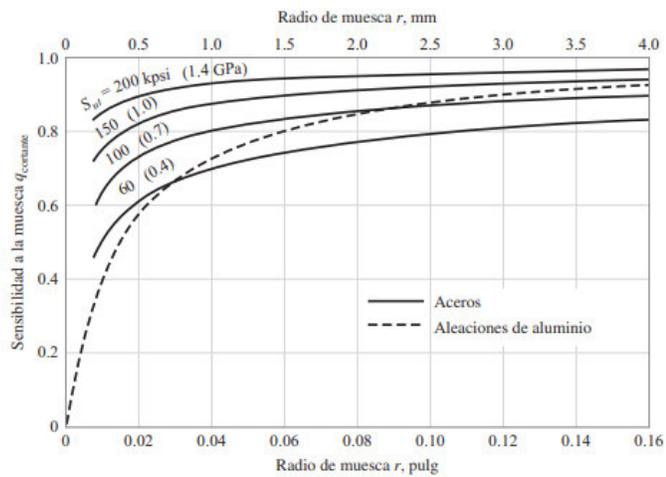


Figura 3-35: Valor de sensibilidad [35].

Para el cálculo de factor teórico de concentración de esfuerzos (kts) se procede hallar en La Figura 3-36 con los siguientes datos.

$$\frac{r}{d} = \frac{0.5}{12} = 0.0416$$

$$\frac{D}{d} = \frac{20}{12} = 1.67$$

$$kts = 2.$$

$$kfs = 1 + 0.81(2 - 1)$$

$$kfs = 1.81$$

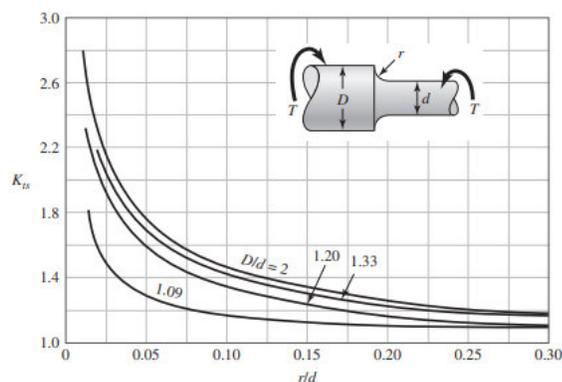


Figura 3-36: Eje redondo con filete en el hombro de torsión [35].

El límite de Resistencia $S'e$ se determina:

$$S'_e = \begin{cases} 0.5S_{ut} & S_{ut} \leq 200 \text{ kpsi (1 400 MPa)} \\ 100 \text{ kpsi} & S_{ut} > 200 \text{ kpsi} \\ 700 \text{ MPa} & S_{ut} > 1 400 \text{ MPa} \end{cases}$$

Como se sabe que el S_{ut} es de 1110 MPa y este valor es inferior al requerido de 1400 MPa

$$S'e = 0.5 S_{ut}$$

$$S'e = 0.5 * 1110 \text{ MPa} = 555 \text{ MPa}$$

Por lo que S_e , sería

$$S_e = 0.703 * 0.902 * 0.59 * 1 * 0.81392 * 1.96 * 1.81 * 555 \text{ MPa} = 599.55 \text{ MPa}$$

Teniendo en cuenta como criterio de fatiga la línea de Goodman modificado:

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma'_a = \sigma_{eq}}{S_e} + \frac{\sigma'_m = \sigma_{eqm}}{S_{ut}}$$

$$\frac{1}{n} = \frac{199.378 \text{ MPa}}{599.55 \text{ MPa}} + \frac{1}{1110 \text{ MPa}}$$

$$\frac{1}{n} = 0.333$$

$$n = 2.99 = 3 \text{ OK}$$

3.2.11. Selección de chumaceras para eje primario

La selección se da de la siguiente manera.

Inicialmente hay que considerar una vida útil como se detalla en la Tabla 3-33:

Tabla 3-33. Vida útil especificada [20].

Valores orientativos de la vida útil especificada de los diferentes tipos de máquinas	
Tipo de máquina	Vida útil especificada Horas de funcionamiento
Electrodomésticos, máquinas agrícolas, instrumentos, equipos técnicos de uso médico	300 ... 3 000
Máquinas utilizadas intermitentemente o durante breves periodos: herramientas eléctricas portátiles, dispositivos de elevación en talleres, máquinas y equipos para la construcción	3 000 ... 8 000
Máquinas utilizadas intermitentemente o durante breves periodos donde se requiere una alta confiabilidad: ascensores (elevadores), grúas para productos embalados o eslingas para tambores, etc.	8 000 ... 12 000
Máquinas para 8 horas de trabajo diario, no siempre utilizadas al máximo: transmisiones por engranajes de uso general, motores eléctricos para uso industrial, trituradoras giratorias	10 000 ... 25 000
Máquinas para 8 horas de trabajo diario utilizando plenamente sus capacidades: herramientas mecánicas, máquinas para carpintería, máquinas para la industria de la ingeniería, grúas para materiales a granel, ventiladores, cintas transportadoras, equipos de impresión, separadores y centrifugadoras	20 000 ... 30 000
Máquinas para 24 horas de trabajo continuo: unidades de engranajes para laminadores, maquinaria eléctrica de tamaño medio, compresores, tornos de extracción para minas, bombas, maquinaria textil	40 000 ... 50 000
Maquinaria para energía eólica, incluidos los rodamientos del eje principal, de orientación, de la caja de engranajes de cambio de paso, del generador	30 000 ... 100 000
Maquinaria para abastecimiento de agua, hornos giratorios, máquinas de trenzado de cables, maquinaria de propulsión para buques de alta mar	60 000 ... 100 000
Máquinas eléctricas de gran tamaño, plantas de generación de energía, bombas para minas, ventiladores para minas, rodamientos para ejes en túnel para buques de alta mar	> 100 000

Por lo que la elección se da de la siguiente manera:

- Las Revoluciones Requeridas = $n_D = 2000$ rpm.
- Vida útil, $l_D = 8\ 000$ h
- $F_b =$ Carga Crítica = $92.659375N$ (Carga determinada en el diseño del eje primario)
- Carga Requerida, $C = ?$
- Diámetro interior = 20 mm
- $V =$ Factor de Rotación = 1.2
- $a = 3$ para cojinetes de bolas

Por lo que:

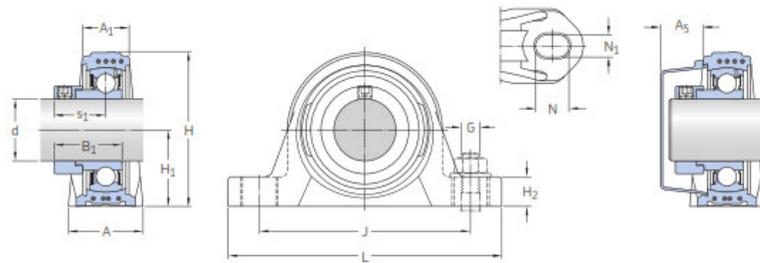
$$P = F_b * V$$

$$P = 92.659375N * 1.2 = 111.2\ N$$

$$C = P \left(\frac{l_D * n_D * 60}{10^6} \right)^{1/a} = 111.2\ N \left(\frac{8\ 000 * 2000 * 60}{10^6} \right)^{1/3} = 1.1\ KN$$

Por facilidad de adquisición, y aproximación se seleccionará una chumacera con los siguientes datos, definidos en la Tabla 3-34 y 3-35.

Tabla 3-34. Chumacera para eje. I [20].



Dimensiones

d	A	A ₁	B ₁	H	H ₁	H ₂	J	L	N	N ₁	G	s ₁	A ₅
mm													
20	32	21	31	64	33,3	16	96	126	17,6	12,4	M10	23,9	18,5
25	32	22	30,9	70,5	36,5	16	105	134	17,6	12,4	M10	23,4	18
30	40	25	35,6	82	42,9	19	121	159	21,4	14,4	M12	26,6	20
35	45	27	38,8	93	47,6	19	126	164	21,4	14,4	M12	29,3	22
40	48	30	43,6	99	49,2	19	136	176	21,4	14,4	M12	33,1	23,5

Tabla 3-35. Chumacera para eje. II [20].

Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidad límite	Masa	Designación del soporte	Designación del rodamiento	Designación adecuada de la tapa lateral	Designación de la unidad
C	C ₀	P ₀						
kN		kN	r. p. m.	kg	-	-	-	-
12,7	6,55	0,28	8 500	0,26	SYK 504	E2.YET 204	ECY 204	SYK 20 FE
14	7,8	0,335	7 000	0,31	SYK 505	E2.YET 205	ECY 205	SYK 25 FE
19,5	11,2	0,475	6 300	0,50	SYK 506	E2.YET 206	ECY 206	SYK 30 FE
25,5	15,3	0,655	5 300	0,69	SYK 507	E2.YET 207	ECY 207	SYK 35 FE
30,7	19	0,8	4 800	0,86	SYK 508	E2.YET 208	ECY 208	SYK 40 FE

A continuación, se da el cálculo de la vida nominal

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^3$$

Donde:

- C: Capacidad de carga dinámica 12,7 KN
- P: Carga equivalente 0,11 KN

- L_{10} : Duración de vida nominal 1538980.466

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60(n)} * L_{10}$$

Donde:

- n: Velocidad rotacional 2000 rpm
- L_{10h} : vida nominal en horas 12824837.22 h

3.2.12. Selección de rodamientos para el eje de unión de la caja base de molienda.

La selección se da de la siguiente manera.

- Inicialmente hay que considerar una vida útil, como se detalla en la Tabla 3-36:

Tabla 3-36. Vida útil especificada [20].

Valores orientativos de la vida útil especificada de los diferentes tipos de máquinas	
Tipo de máquina	Vida útil especificada Horas de funcionamiento
Electrodomésticos, máquinas agrícolas, instrumentos, equipos técnicos de uso médico	300 ... 3 000
Máquinas utilizadas intermitentemente o durante breves períodos: herramientas eléctricas portátiles, dispositivos de elevación en talleres, máquinas y equipos para la construcción	3 000 ... 8 000
Máquinas utilizadas intermitentemente o durante breves períodos donde se requiere una alta confiabilidad: ascensores (elevadores), grúas para productos embalados o eslingas para tambores, etc.	8 000 ... 12 000
Máquinas para 8 horas de trabajo diario, no siempre utilizadas al máximo: transmisiones por engranajes de uso general, motores eléctricos para uso industrial, trituradoras giratorias	10 000 ... 25 000
Máquinas para 8 horas de trabajo diario utilizando plenamente sus capacidades: herramientas mecánicas, máquinas para carpintería, máquinas para la industria de la ingeniería, grúas para materiales a granel, ventiladores, cintas transportadoras, equipos de impresión, separadores y centrifugadoras	20 000 ... 30 000
Máquinas para 24 horas de trabajo continuo: unidades de engranajes para laminadores, maquinaria eléctrica de tamaño medio, compresores, tornos de extracción para minas, bombas, maquinaria textil	40 000 ... 50 000
Maquinaria para energía eólica, incluidos los rodamientos del eje principal, de orientación, de la caja de engranajes de cambio de paso, del generador	30 000 ... 100 000
Maquinaria para abastecimiento de agua, hornos giratorios, máquinas de trenzado de cables, maquinaria de propulsión para buques de alta mar	60 000 ... 100 000
Máquinas eléctricas de gran tamaño, plantas de generación de energía, bombas para minas, ventiladores para minas, rodamientos para ejes en túnel para buques de alta mar	> 100 000

La selección de rodamientos se da de la siguiente manera.

- Las Revoluciones Requeridas = $n_D = 2000$ rpm
- Vida útil, $l_D = 8\ 000$ h
- F_r = Fuerza radial = 445.45N
- F_a = Fuerza Axial = 16.08N (P.eje+1/2(Conjunto))
- Carga Requerida, $C = ?$
- Diámetro interior = 10 mm
- Factor de Rotación = 1.5
- $a = 3$ para cojinetes de bolas

Por lo que:

$$P = F_b * V$$

$$P = 1.5 * (X_i V F_r + Y_i F_a)$$

$$SI = \frac{F_a}{C_o} = 0.0052 \gg e = 0.19$$

$$\frac{F_a}{V * F_r} \leq e$$

$$0.036 \leq 0.19$$

$$0.036 \leq 0.19$$

$$X_i = 1$$

$$Y_i = 0$$

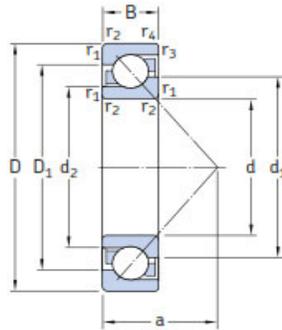
$$P = 1.5 * (445.45N * 1 * 1 + 0)$$

$$P = 668.175N$$

$$C = P \left(\frac{l_D * n_D * 60}{10^6} \right)^{1/a} = 668.175 N \left(\frac{8\ 000 * 2000 * 60}{10^6} \right)^{1/3} = 6.6 KN$$

Por lo que se seleccionara el rodamiento, según la Tabla 3-37, con los siguientes datos:

Tabla 3-37. Rodamiento de Bolas para contacto angular [20].



Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidades		Masa	Designaciones ¹⁾	
d	D	B	dinámica C	estática C ₀	P _u	Velocidad de referencia	Velocidad límite		Rodamiento para apareamiento universal	de diseño básico
mm			kN		kN	rpm		kg	-	
10	30	9	7,02	3,35	0,14	30 000	30 000	0,030	7200 BECBP	7200 BEP
12	32	10	7,61	3,8	0,16	26 000	26 000	0,036	7201 BECBP	7201 BEP
	37	12	10,6	5	0,208	24 000	24 000	0,063	-	7301 BEP
15	35	11	9,5	5,1	0,216	26 000	26 000	0,045	* 7202 BECBP	-
	35	11	8,84	4,8	0,204	24 000	24 000	0,045	-	7202 BEP
	42	13	13	6,7	0,28	20 000	20 000	0,081	7302 BECBP	7302 BEP
17	40	12	11	5,85	0,25	22 000	22 000	0,064	* 7203 BECBP	-
	40	12	10,4	5,5	0,236	20 000	20 000	0,064	-	7203 BEP
	40	12	11,1	6,1	0,26	20 000	20 000	0,064	-	7203 BEY
	40	12	11	5,85	0,25	22 000	22 000	0,070	* 7203 BECBM	-
	47	14	15,9	8,3	0,355	19 000	19 000	0,11	7303 BECBP	7303 BEP

Cálculo de la vida nominal

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^3$$

Donde:

- C: Capacidad de carga dinámica 7.02 KN
- P: Carga equivalente 0.66 KN
- L₁₀: Duración de vida nominal 1203.316

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60(n)} * L_{10}$$

Donde:

- n: Velocidad rotacional 2000 rpm
- L_{10h}: vida nominal en horas 10027.633 h

3.2.13. Selección del tipo de juste y tolerancia de los rodamientos- eje en el conjunto de molienda.

La selección del tipo de juste y tolerancia de los rodamientos- eje en el conjunto de molienda, se da en la Figura 3-37.

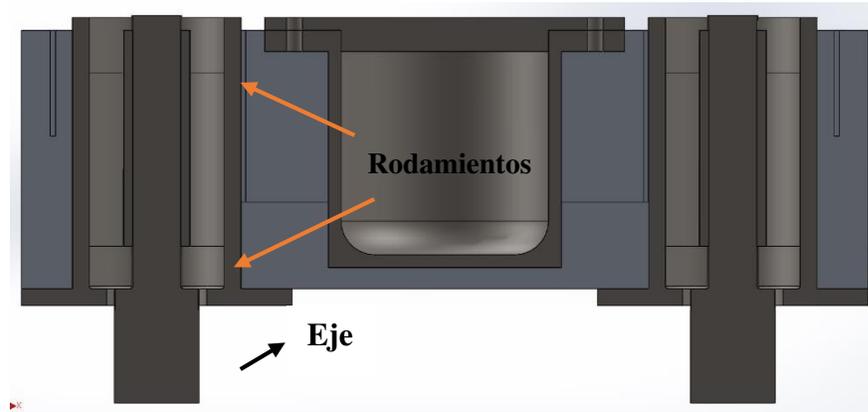


Figura 3-37: Ajustes del conjunto de molienda

Para seleccionar los ajustes, debe tener en cuenta pautas generales dadas en la sección del catálogo SKF 2015.

Condiciones de giro y carga

Condiciones de giro y carga				
Condiciones de funcionamiento	Ilustración esquemática	Condición de carga	Ejemplo	Ajustes recomendados
Aro interior giratorio Aro exterior fijo Dirección de carga constante		Carga giratoria sobre el aro interior Carga fija sobre el aro exterior	Ejes accionados por correas	Ajuste de interferencia para el aro interior Ajuste flojo para el aro exterior (posible)
Aro interior fijo Aro exterior giratorio Dirección de carga constante		Carga fija sobre el aro interior Carga giratoria sobre el aro exterior	Rodillos de transportadores Rodamientos para cubos de rueda de automóviles	Ajuste flojo para el aro interior (posible) Ajuste de interferencia para el aro exterior
Aro interior giratorio Aro exterior fijo Carga que gira con el aro interior		Carga fija sobre el aro interior Carga giratoria sobre el aro exterior	Aplicaciones vibratorias Cribas o motores vibratorios	Ajuste de interferencia para el aro exterior Ajuste flojo para el aro interior (posible)
Aro interior fijo Aro exterior giratorio Carga que gira con el aro exterior		Carga giratoria sobre el aro interior Carga fija sobre el aro exterior	Trituradora giratoria (Impulsores de un carrusel)	Ajuste de interferencia para el aro interior Ajuste flojo para el aro exterior (posible)

Figura 3-38: Consideraciones de giro y carga [20].

Con las condiciones de ya planteadas se recomienda un ajuste de interferencia para obtener mejores resultados, como se detalla en la Figura 3-39.

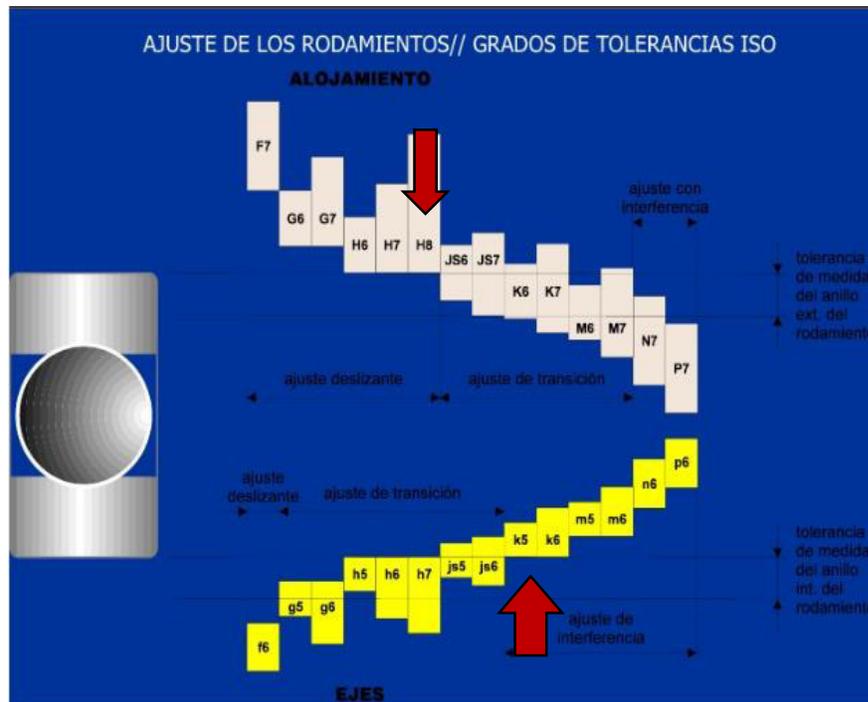


Figura 3-39: Ajustes de los rodamientos [20].

La tolerancia recomendada para el eje es k5, ajuste de adherencia o interferencia

AGUJERO H 6 AJUSTE DE PRECISION

- | | | |
|--|---|--|
| <p>Para los ejes corresponden esta serie de ajustes.....</p> | } | <p>Ajuste forzado n 5.</p> <p>» de arrastre m 5.</p> <p>» de adherencia k 5.</p> <p>» de entrada suave j 5.</p> <p>» de deslizamiento h 5.</p> <p>» de juego libre g 5.</p> |
|--|---|--|

Ajuste de adherencia: utilizado para piezas que tengan acoplamiento fijo, y su desmontaje no sea frecuente, pudiendo acoplarse y desacoplarse a golpe de martillo corriente de mano en pequeñas piezas, y martillo fuerte en grandes; es preciso asegurar el movimiento, de giro por medio de chaveta u otro, así como el movimiento longitudinal.

Algunas aplicaciones: Rodamientos a bolas sobre ejes para cargas medias, Volantes, Casquillos en ruedas, Poleas y Bielas, Platos para acoplamientos de ejes, Excéntricas de

distribución sobre ejes, Rodetes de turbinas y Bombas centrifugas, Pernos en bielas, como se indica en la Tabla 3-38.

Tabla 3-38. Tolerancia para los rodamientos de bolas [38].

Tabla 8. 2 Tolerancias para Rodamientos

Tabla 8. 2. 2 Tolerancias

Diámetro Exterior Nominal D (mm)	Δ_{Dmp}										Δ_{Ds}				
	Normal	Clase 6		Clase 5		Clase 4		Clase 2		Clase 4		Clase 2			
		incl	alta	baja	alta	baja	alta	baja	alta	baja	alta	baja	alta	baja	
2.5(1)	6	0	-8	0	-7	0	-5	0	-4	0	-2.5	0	-4	0	-2.5
6	18	0	-8	0	-7	0	-5	0	-4	0	-2.5	0	-4	0	-2.5
18	30	0	-9	0	-8	0	-6	0	-5	0	-4	0	-4	0	-4
30	50	0	-11	0	-9	0	-7	0	-6	0	-4	0	-6	0	-4
50	80	0	-13	0	-11	0	-9	0	-7	0	-4	0	-7	0	-4
80	120	0	-15	0	-13	0	-10	0	-8	0	-5	0	-8	0	-5
120	150	0	-18	0	-15	0	-11	0	-9	0	-5	0	-9	0	-5
150	180	0	-25	0	-18	0	-13	0	-10	0	-7	0	-10	0	-7
180	250	0	-30	0	-20	0	-15	0	-11	0	-8	0	-11	0	-8
250	315	0	-35	0	-25	0	-18	0	-13	0	-8	0	-13	0	-8
315	400	0	-40	0	-28	0	-20	0	-15	0	-10	0	-15	0	-10
400	500	0	-45	0	-33	0	-23	-	-	-	-	-	-	-	-
500	630	0	-50	0	-38	0	-28	-	-	-	-	-	-	-	-
630	800	0	-75	0	-45	0	-35	-	-	-	-	-	-	-	-
800	1 000	0	-100	0	-60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 000	1 250	0	-125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 250	1 600	0	-160	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 600	2 000	0	-200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2 000	2 500	0	-250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

$$D_n = 12_{-0,008}^0$$

La tolerancia para el eje es k5 como se indica en la Tabla 3-39.

Tabla 3-39. Tolerancia en el sistema de agujero único y eje único [39].

Ajustes Internacional I.S.A. AGUJERO UNICO DIFERENCIAS NOMINALES

* CIFRAS MARCADAS CON ASTERISCO NO PASA

DIAMETROS NOMINALES mm.	AGUJERO H 6 	EJES					
		NO PASA	PASA	NO PASA	PASA	NO PASA	PASA
		n 5	m 5	k 5	j 5	h 5	g 5
1 a 3	+ 0,007* 0,000	+ 0,011 + 0,006*	+ 0,007 + 0,002*		+ 0,004 - 0,001*	0,000 - 0,005*	- 0,003 - 0,008*
Más de 3 a 6	+ 0,008* 0,000	+ 0,013 + 0,008*	+ 0,009 + 0,004*		+ 0,004 - 0,001*	0,000 - 0,005*	0,004 - 0,009*
Más de 6 a 10	+ 0,009* 0,000	+ 0,016 0,010*	+ 0,012 0,006*	+ 0,007 + 0,001*	+ 0,004 - 0,002*	0,000 - 0,006*	- 0,005 0,011*
Más de 10 a 18	+ 0,011* 0,000	+ 0,020 + 0,012*	+ 0,015 + 0,007*	+ 0,009 + 0,001*	+ 0,005 - 0,003*	0,000 - 0,008*	- 0,006 - 0,014*
Más de 18 a 30	+ 0,013* 0,000	+ 0,024 + 0,015*	+ 0,017 + 0,008*	+ 0,011 + 0,002*	+ 0,005 - 0,004*	0,000 - 0,009*	- 0,007 - 0,016*
Más de 30 a 40	+ 0,016* 0,000	+ 0,028 + 0,017*	+ 0,020 0,009*	+ 0,013 + 0,002*	+ 0,006 - 0,005*	0,000 - 0,011*	- 0,009 - 0,020*
Más de 40 a 50							
Más de 50 a 65	+ 0,019* + 0,000	+ 0,033 + 0,020*	+ 0,024 + 0,011*	+ 0,015 + 0,002*	+ 0,006 - 0,007*	0,000 - 0,013*	- 0,010 - 0,023*
Más de 65 a 80							
Más de 80 a 100	+ 0,022* 0,000	+ 0,038 + 0,023*	+ 0,028 + 0,013*	+ 0,018 + 0,003*	+ 0,006 - 0,009*	0,000 - 0,015*	- 0,012 - 0,027*
Más de 100 a 120							

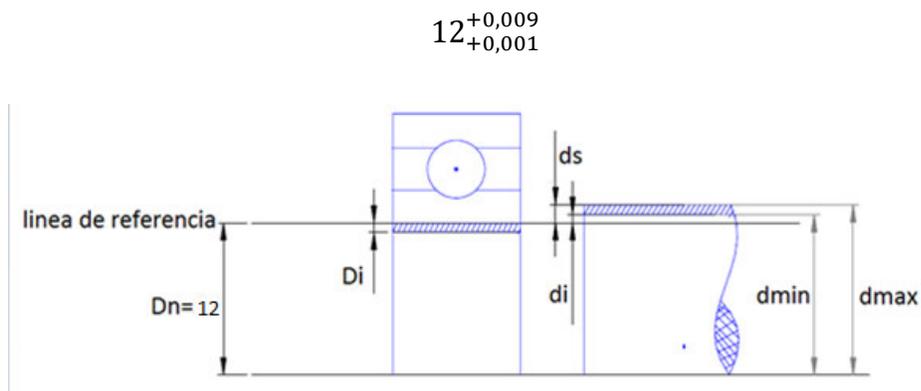


Figura 3-40: Diagrama de cuerpo libre eje rodamiento [39].

agujero $12_{-0,008}^0$: $D_s = 0$, $D_i = -0,008\text{mm}$

Dimensiones limites : $D_{\text{max}} = D_n + D_s = 12\text{mm} + 0 = 12\text{mm}$

$D_{\text{min}} = D_n + D_i = 12\text{m} - 0,008 = 11,992\text{mm}$

Eje 12 k5: $d_s = 0,009\text{mm}$, $d_i = 0,001\text{mm}$, $T_{\text{eje}} = 0,008\text{mm}$

Dimensiones limites: $d_{\text{max}} = D_n + d_s = 12 + 0,009 = 12,009\text{mm}$

$d_{\text{min}} = D_n + d_i = 12 + 0,001 = 12,001\text{mm}$

Apriete: $A_{\text{max}} = d_{\text{max}} - D_{\text{min}} = 12,009 - 11,992 = 0,017\text{mm}$

$A_{\text{min}} = d_{\text{min}} - D_{\text{max}} = 12,001 - 12 = 0,001\text{mm}$

Tolerancia para la forma geométrica del rodamiento (Tabla 3-40 y 3-41)

Tabla 3-40. Ajustes recomendados en los alojamientos para rodamientos axiales [38].

Tipo de Carga		Símbolo de Tolerancia	
Solamente carga axial (Todos los rodamientos axiales)	Cuando se utiliza otro rodamiento para soportar la carga radial.	—	Utilizar una tolerancia ¹⁾ adecuada para el diámetro interior del soporte de manera que se obtenga un juego radial entre el anillo exterior y el soporte.
Carga Combinada (Rodamientos axiales de rodillos esféricos)	Carga giratoria en el anillo interior, o carga indeterminada	H7	—
	Carga giratoria en el anillo exterior	M7	—

Nota: 1) Se recomienda H8 cuando sea necesario montar con precisión un rodamiento axial de bolas

Tabla 3-41. Tolerancia en los alojamientos soporte de función de hierro o acero [38].

Dia. Nominal (mm)		g6	H6	H7	H8	J6	J7	Js6	Js7	K6	K7	M6	M7	N6	N7	P6	P7	Dia. Nominal (mm)		ΔD_{emp} del rodam. (Clase O)
Más de	Hasta																	Más de	Hasta	
10	18	+24 +6	+11 0	+18 0	+27 0	+6 -5	+10 -8	±5.5	±9	+2 -9	+6 -12	-4 -15	0 -18	-9 -20	-5 -23	-15 -26	-11 -29	10	18	-0 -8
18	30	+28 +7	+13 0	+21 0	+33 0	+8 -5	+12 -9	±6.5	±10	+2 -11	+6 -15	-4 -17	0 -21	-11 -24	-7 -28	-18 -31	-14 -35	18	30	-0 -9
30	50	+34 +9	+16 0	+25 0	+39 0	+10 -6	+14 -11	±8	±12	+3 -13	+7 -18	-4 -20	0 -25	-12 -28	-8 -33	-21 -37	-17 -42	30	50	-0 -11
50	80	+40 +10	+19 0	+30 0	+46 0	+13 -6	+18 -12	±9.5	±15	+4 -15	+9 -21	-5 -24	0 -30	-14 -33	-9 -39	-26 -45	-21 -51	50	80	-0 -13
80	120	+47 +12	+22 0	+35 0	+54 0	+16 -6	+22 -13	±11	±17	+4 -18	+10 -25	-6 -28	0 -35	-16 -38	-10 -45	-30 -52	-24 -59	80	120	-0 -15

$$32^{+0,039}_{+0}$$

3.2.14. Excentricidad (Figura 3-41)

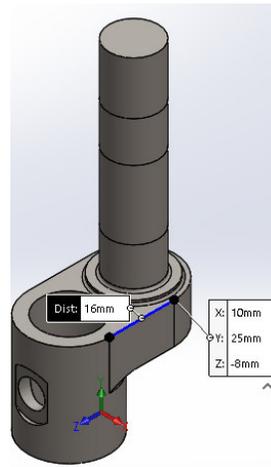


Figura 3-41: Datos característicos de la excentricidad

Teniendo presente que:

- r = Radio menor = 6 mm
- L = Altura del Disco = Espesor del Disco = 10 mm
- A = Teniendo en cuenta que rotaría los 360 grados se tomaría como referencia los 90 grados

Por lo que:

$$x = r - r \cos \alpha + \frac{r^2}{2L} \sin^2 \alpha$$

$$x = 12 \text{ mm} - 12 \text{ mm} \cos 90^\circ + \frac{(12 \text{ mm})^2}{2(25 \text{ mm})} \text{Sen}^2 90^\circ$$

$$X = 15.88 \text{ mm} \approx 16 \text{ mm}$$

Por lo que la longitud de la excentricidad es la adecuada.

3.3. Análisis de componentes

3.3.1. Eje

Después del modelado en 3D, y aplicación de las condiciones de contorno se procede al mallado.

Las aplicaciones de contornos, según la Figura 3-42; son:

- **Torque Motriz = 7.4127 Nm**
- **Fuerza de resistencia en la unión del eje y caja base de molienda = 445.05N**
- **Fuerza de la caja de molienda = 9.1254 N**
- **Tensión total en las poleas. = 557.62 N**

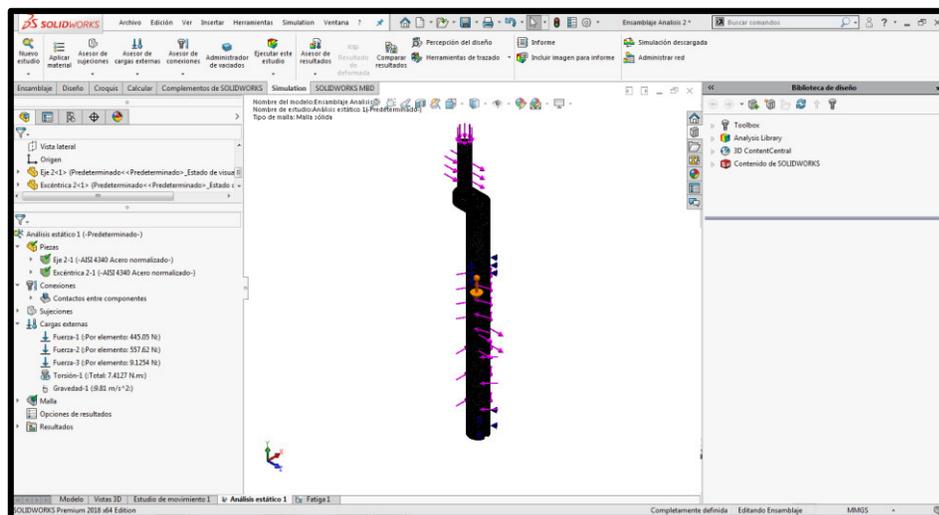


Figura 3-42: Análisis del eje

Una vez mallado se procede a la ejecución dando como resultados.

- **Tensiones**

Según el análisis de tensiones, en la escala de vonMises el valor promedio es de 41.10 MPa, donde el código de colores señala un celeste muy cercano a verde, por lo que se da como aceptado el diseño, según la Figura 3-43.

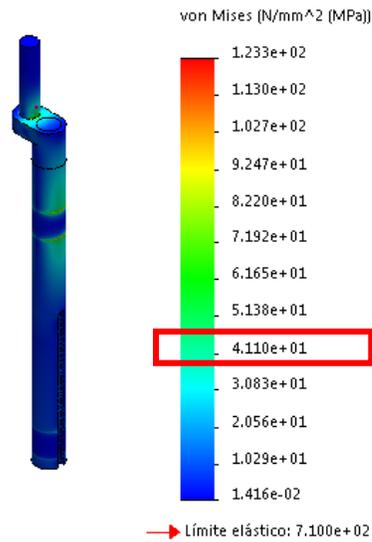


Figura 3-43: Análisis de tensiones del eje

- **Desplazamiento**

Según el análisis de desplazamiento, el valor máximo de deformación es de 0.01862 mm, dando como aceptado por ser considerado un valor mínimo de deformación, según la Figura 3-44.

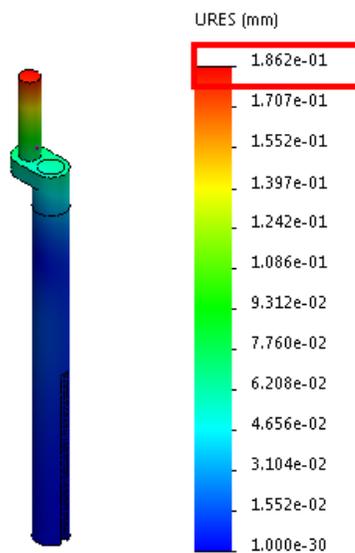


Figura 3-44: Análisis de desplazamiento del eje

- **Factor de Seguridad**

El factor de seguridad resultante es de 3.8 como se indica en la Figura 3-45, por lo que se valida el diseño, porque según Mott, dice que el diseño de elementos de máquinas bajo cargas dinámicas con incertidumbre debe tener un FDS que varíe entre 2.5 a 4.

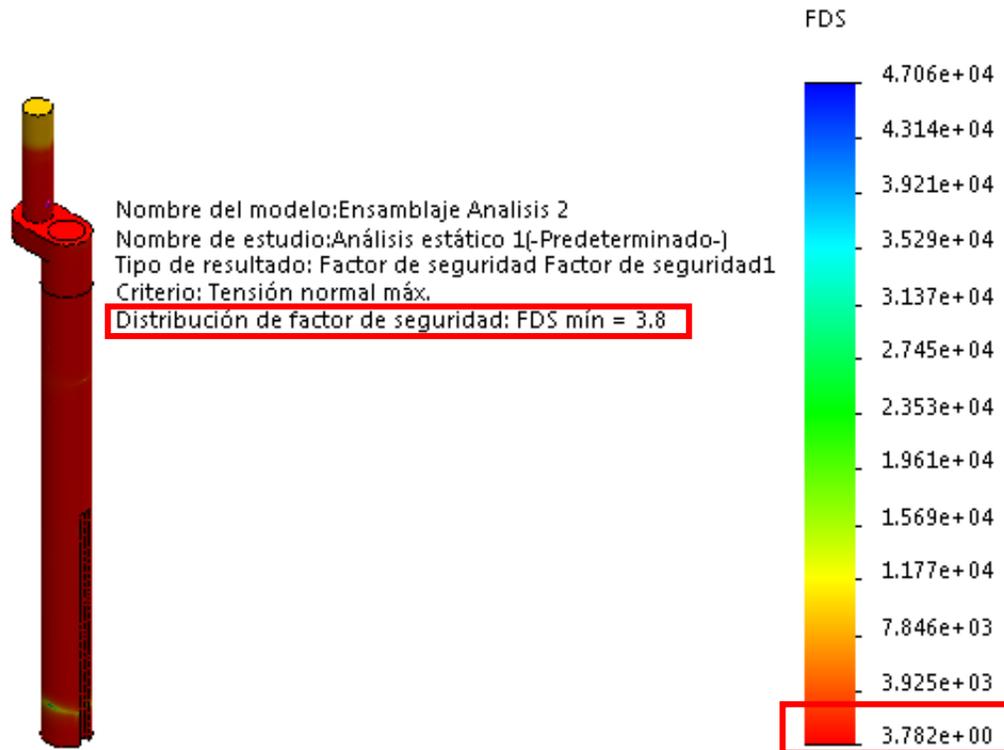


Figura 3-45: Análisis por factor de seguridad del eje

3.3.1.1. Análisis fatiga.

El análisis a fatiga se lo realiza considerando las mismas fuerzas de contorno que se utilizaron en el estático.

- **Porcentaje de daño**

Según el análisis de fatiga, los resultados dados se establece un porcentaje mínimo de daño del 0.07143, marcando un color azul según el código de colores, dando por válido el diseño, como lo indica en la Figura 3-46.

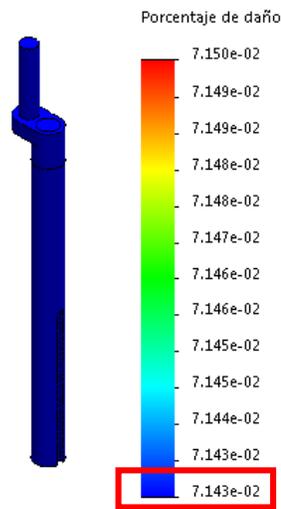


Figura 3-46: Análisis por porcentaje de daño del eje

- **Ciclo de vida total**

Según el análisis de fatiga, los resultados dados establecen un ciclo de vida mínimo aceptable de 14000000 ciclos, marcando un color azul según el código de colores, dando por válido el diseño, como lo especifica la Figura 3-47.

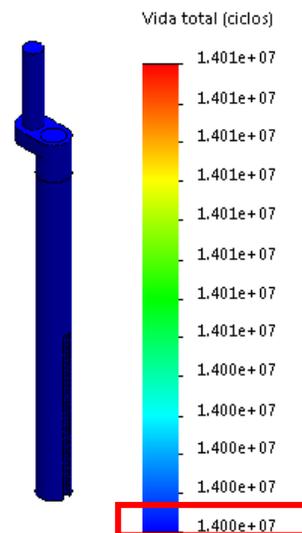


Figura 3-47: Análisis de ciclo de vida total del eje

- **Factor de carga**

Dados los resultados del factor de carga; se puede indicar que es aceptable, por un factor mínimo de 2.867 según la escala definida, como lo detalla en la Figura 3-48.

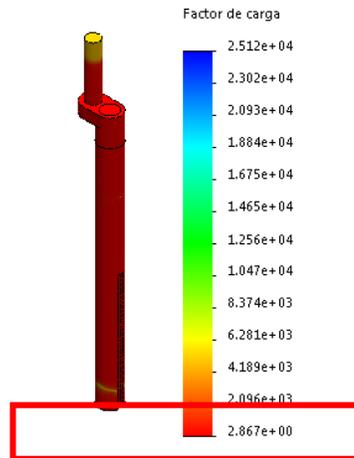


Figura 3-48: Análisis de factor de carga

3.3.2. Caja Base

- Tensiones

Según el análisis de tensiones, en la escala de vonMises el valor promedio es de 6,64MPa, donde el código de colores señala un celeste muy cercano a verde, por lo que se da como aceptado el diseño, como lo indica la Figura 3-49.

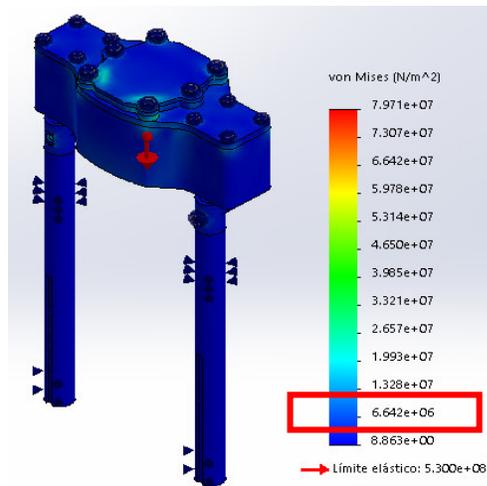


Figura 3-49: Análisis de tensiones de la caja base

- Desplazamiento

Según el análisis de desplazamiento, el valor máximo de deformación es de 0.01747 mm, dando como aceptado por ser considerado un valor mínimo de deformación, como lo detalla la Figura 3-50.

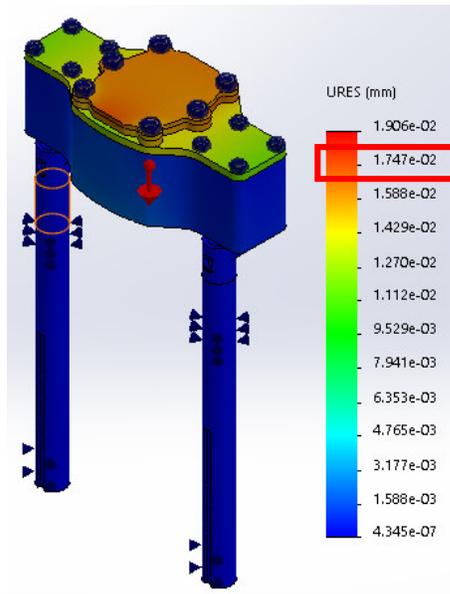


Figura 3-50: Análisis de desplazamiento de la caja base

- **Factor de Seguridad**

El factor de seguridad resultante es de 6,649, por lo que se valida el diseño, ya que concuerda con el factor de seguridad calculado de 6,6, como lo especifica la Figura 3-51.

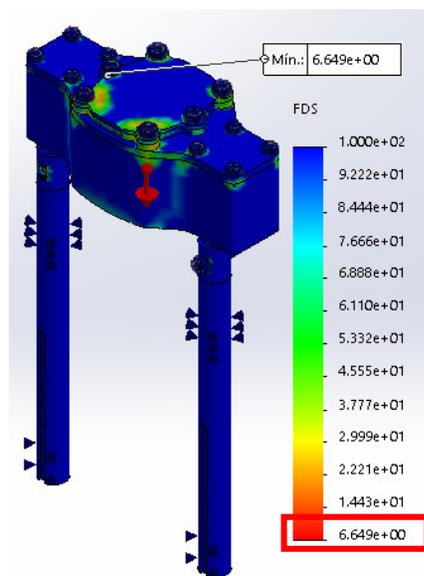


Figura 3-51: Análisis por factor de seguridad de la caja base

3.3.2.1. Estudio de frecuencia del sistema del molino de bolas de alta energía.

En el sistema del molino de bolas ALTA ENERGIA se efectuó un análisis de frecuencia que se presenta a continuación.

El análisis 1 de frecuencia de acuerdo con la Figura 3-52, se obtuvo un valor de amplitud 2211.7Hz con un número de nodos máximo 33085 y un valor mínimo 36806, como lo señala la Figura 3-52.

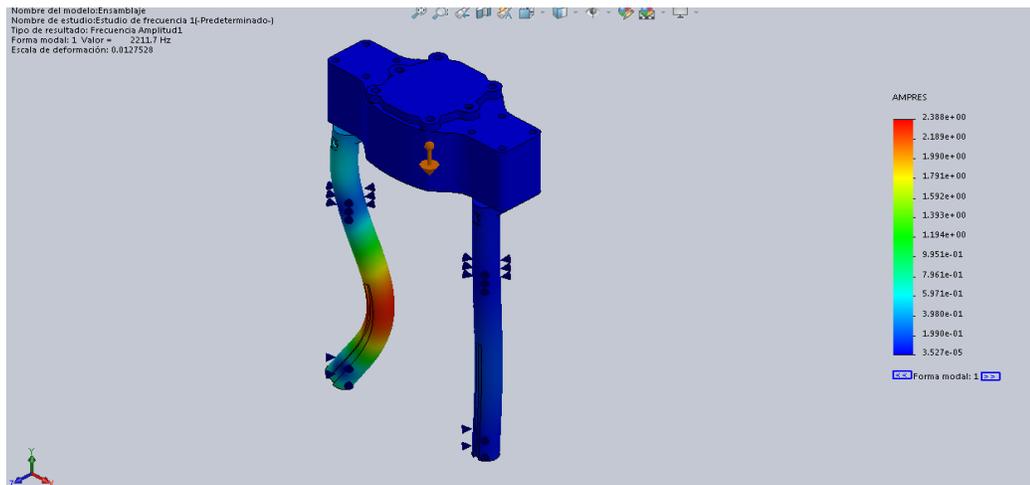


Figura 3-52: Estudio 1 de frecuencia.

El análisis 2 de frecuencia de acuerdo con la Figura 3-53, se obtuvo un valor de amplitud 2211.9Hz con un número de nodos máximo 36528 y un valor mínimo 620, como lo define la Figura 3-53.

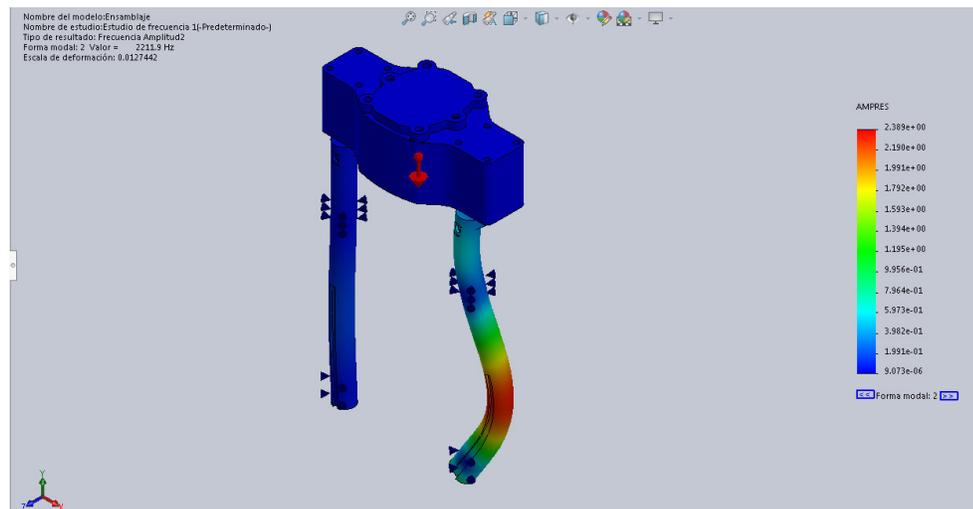


Figura 3-53: Estudio 2 de frecuencia.

El análisis 3 de frecuencia de acuerdo con la Figura 3-54, se obtuvo un valor de amplitud 2244.4Hz con un número de nodos máximo 33112 y un valor mínimo 46839, como lo indica la Figura 3-54.

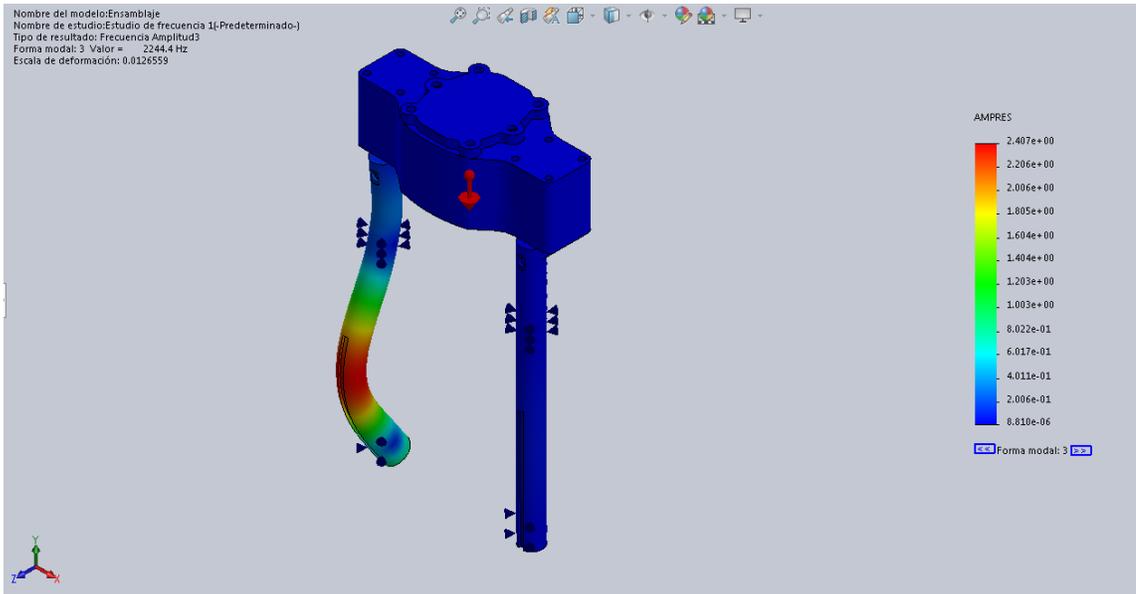


Figura 3-54: Estudio 3 de frecuencia.

El análisis 4 de frecuencia de acuerdo con la Figura 3-55, se obtuvo un valor de amplitud 2245Hz con un número de nodos máximo 36536 y un valor mínimo 7921, como lo detalla la Figura 3-55.

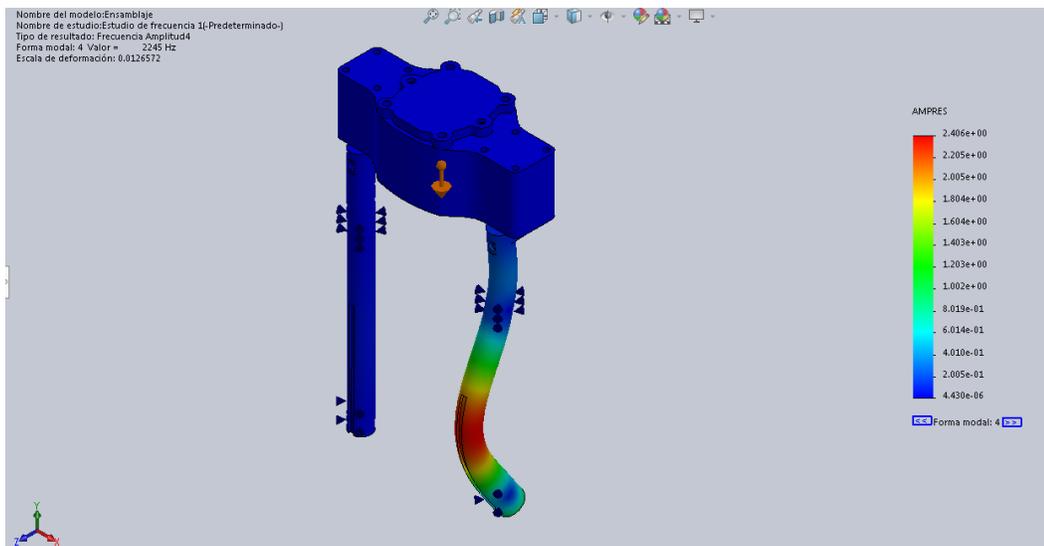


Figura 3-55: Estudio 4 de frecuencia.

El análisis 5 de frecuencia de acuerdo con la Figura 3-56, se obtuvo un valor de amplitud 5246.3Hz con un número de nodos máximo 47728 y un valor mínimo 37636, como le indica la Figura 3-56.

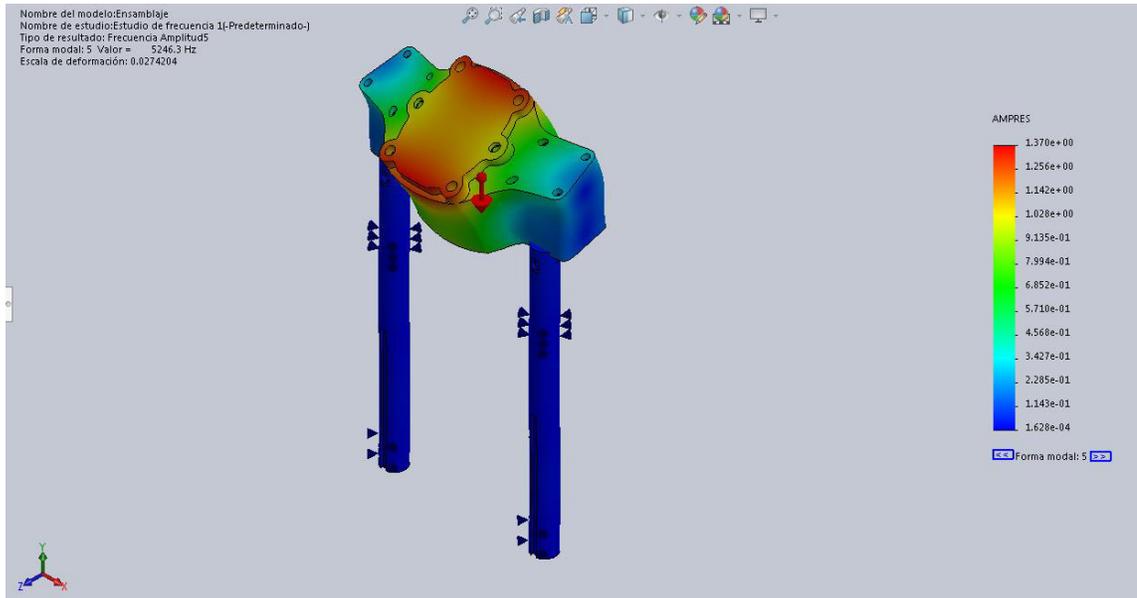


Figura 3-56: Estudio 5 de frecuencia.

De acuerdo con la Tabla 3-42 el estudio de frecuencia realizado da como resultado valores en rad/s y Hertz que están detallados a continuación. Al seleccionar el valor mínimo de 13897 rad/seg de los 5 estudios realizados se pudo comparar con el valor calculado analíticamente en el cual se obtuvo la velocidad máxima de 209,45 rad/seg lo cual indica que la máquina esta correcta por lo que el valor calculado analíticamente es menor a los obtenidos por el software.

Tabla 3-42. Datos del estudio frecuencia.

Frecuencia nº.	Rad/seg	Hertz	Segundos
1	13897	2211.7	0.00045213
2	13898	2211.9	0.00045211
3	14102	2244.4	0.00044556
4	14106	2245	0.00044543
5	32964	5246.3	0.00019061

3.3.3. Caja de Molienda

3.3.3.1. Análisis de impacto de la caja de molienda

Por impacto generada en la bola con 360 N, como lo indica en la Figura 3-57.

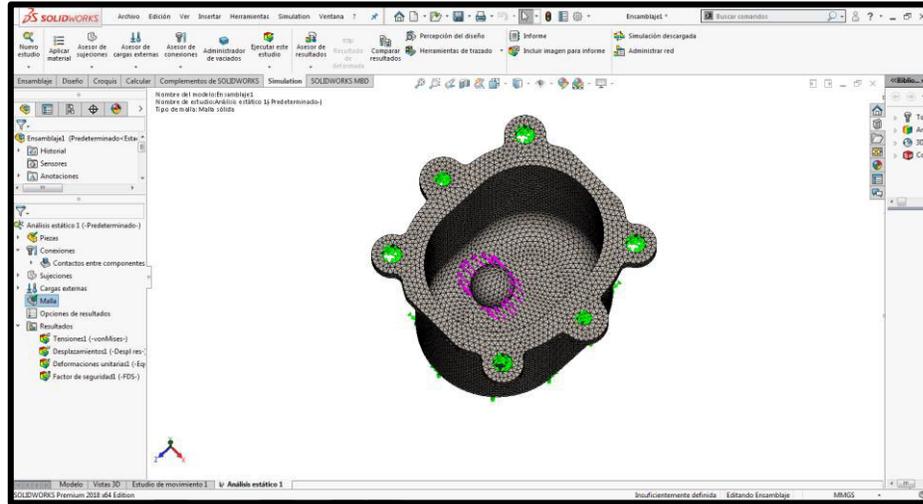


Figura 3-57: Análisis de la caja de molienda por impacto

- Tensiones

Según el análisis de tensiones, en la escala de vonMises el valor promedio es de 57.73 MPa, donde el código de colores señala un celeste muy cercano a verde, por lo que se da como aceptado el diseño, como se lo observa en la Figura 3-58.

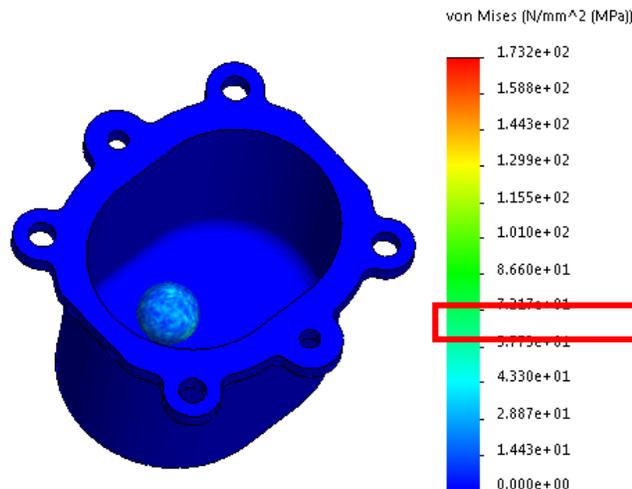


Figura 3-58: Análisis tensiones de la caja de molienda por impacto

- **Factor de Seguridad**

El factor de seguridad resultante es de 3, por lo que se valida el diseño, porque según Mott (2009), dice que el diseño de elementos de máquinas bajo cargas dinámicas con incertidumbre debe tener un FDS que varíe entre 2.5 a 4, como se observa en la Figura 3-59.

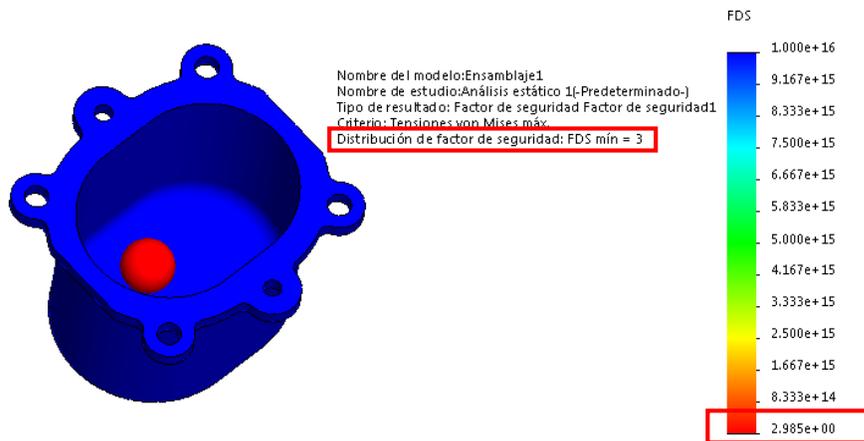


Figura 3-59: Análisis del factor de seguridad de la caja de molienda por impacto

3.3.3.2. Por impacto generada en la bola con 6480 N, distribuida en todas sus caras

Por impacto generada en la bola con 6480 N, distribuida en todas sus caras, se indica en la Figura 3-60.

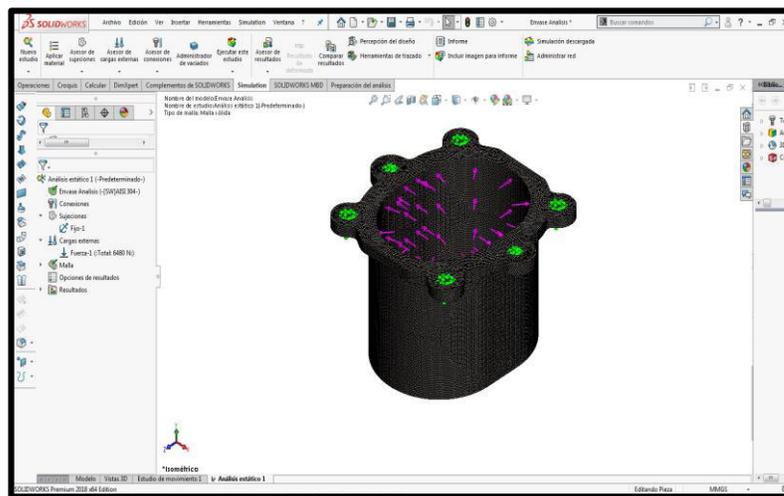


Figura 3-60: Análisis de la caja de molienda por impacto generado en la bola con 6480 N

- **Tensiones**

Según el análisis de tensiones, en la escala de vonMises el valor promedio es de 26.14 MPa, donde el código de colores señala amarillo, por lo que se da como aceptado el diseño, como lo define la Figura 3-61.

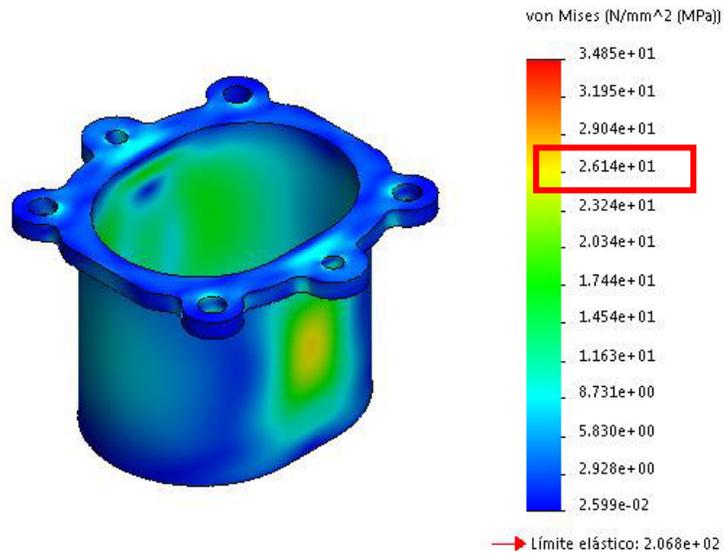


Figura 3-61: Análisis tensiones de la caja de molienda por impacto generado con 6480 N

- **Factor de Seguridad**

El factor de seguridad resultante es de 5.9, como lo indica la Figura 3-62, por lo que se valida el diseño, porque según Mott (2009), dice que el diseño de elementos de máquinas bajo cargas dinámicas con incertidumbre debe tener un FDS que varíe entre 2.5 a 4.



Figura 3-62: Análisis de Factor de Seguridad del recipiente contenedor por impacto con 6480 N

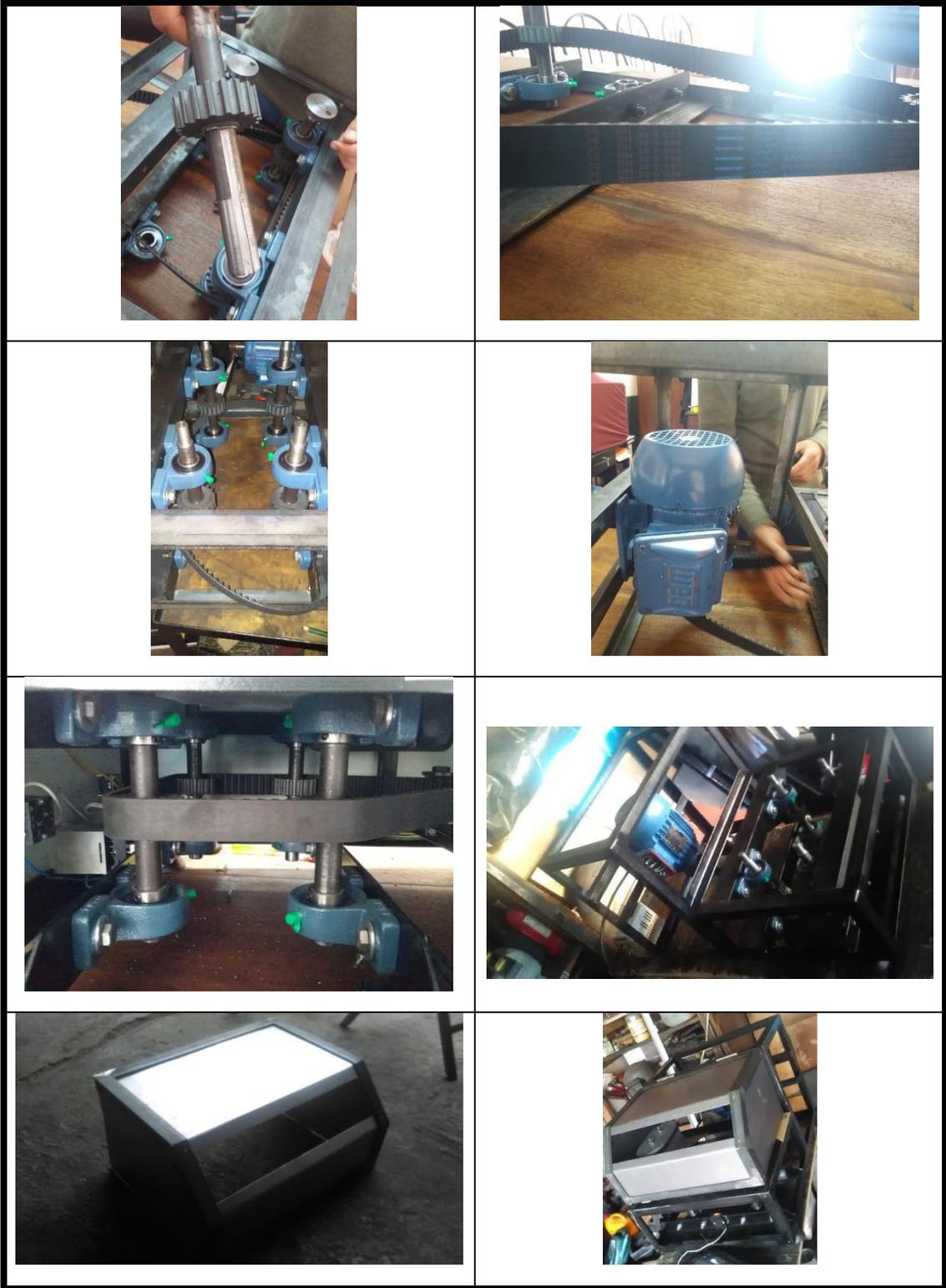
3.4. Proceso de construcción del molino de bolas de alta energía

El proceso de construcción del molino de bolas de alta energía se define en la Tabla 3-43.

Tabla 3-43. Construcción del molino de bolas de alta energía











3.5. Presupuesto

El presupuesto según su costo de materiales se da en la Tabla 3-44, mano de obra en la Tabla 3-45, costos indirectos en la Tabla 3-46 y costos totales en la Tabla 3-47.

Tabla 3-44. Costo de materiales

Costo de Materiales				
Descripción	Detalle	Cantidad	Valor Unitario	Total
Estructura	Perfil angular L30x3	2	8	16
	Plancha de acero A-36, 3mm	1	25	25
	1lb de aporte E6011	1	2,8	2,8
	1lb de remaches	1	6,85	6,85
	Pernos y tuercas	1	6,85	6,85
	Bases de caucho	4	2,5	10
	Bisagras de acero	2	4,2	8,4
	Acrílico	1	6	6
	Caucho, L=2000mm	1	3,5	3,5
Sistema Mecánico	Eje AISI 4340	1	160,5	160,5
	Poleas	5	13	65
	Chumaceras	8	6	48
	Rodamientos	4	6,5	26
	Banda sincrónica	1	25	25
	Bloque de aluminio	2	82,5	165
	Bloque de AISI 304	2	51,5	103
	Pernos	1	5,5	5,5
	Mariposas	4	2	8
	4kg de bolas AISI 304	4	40	160

Costo de Materiales				
Descripción	Detalle	Cantidad	Valor Unitario	Total
Sistema Eléctrico	Motor 2HP	1	200	200
	Temporizador	1	25	25
	Bomba sumergible	1	20	20
	Variador de frecuencia	1	200	200
	Breaker	1	20	20
	Enchufe trifásico	1	5,5	5,5
	Perillas ON/OFF	1	2	2
	Pulsador STOP	1	20	20
	Cables eléctricos	1	15	15
Sistema de Refrigeración	1gl de refrigerante	1	10	10
	Recipiente para refrigerante	1	3	3
	Manguera descarga, d=8mm; L=1000mm	1	2,5	2,5
	Manguera de carga, d=6mm; L=1000mm	1	2,5	2,5
	Unión roscada	4	4	16
Total				1392,9

Tabla 3-45. Costo de mano de obra

Costos de Mano de Obra		
Descripción	Detalle	Costo
Metalmecánico	Montaje de la estructura	50
Tornero	Maquinado de ejes	100
Eléctrico	Instalación de Componentes	50
Matricero	Maquinado de cajas de aluminio	122
	Maquinado de cajas de inoxidable	350
Total		672

Tabla 3-46. Costos indirectos

Costos Indirectos	
Detalle	Costo
Transporte de materiales	80
Consumibles, insumos	52
Alimentación	50
Reprocesado de piezas mecánicas	1000
Total	1182

Tabla 3-47. Costos totales

Costo Total	
Descripción	Costo
Costos de Materiales	1392,9
Costos de Mano de Obra	672
Costos Indirectos	1182
Total	3246,9

3.6. Pruebas de Funcionamiento

Control del funcionamiento de los sistemas y componentes del molino de bolas de alta energía, cuando el molino está en marcha de acuerdo a la Tabla 3-48.

Tabla 3-48. Pruebas de funcionamiento

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO					
PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.					
Verificador.	A. Moya – E. Saquina		Fecha:	27-01-2020	
Revisado:	Ing. Gonzalo López		Prueba	En marcha	
Sistemas y componente	Ruido o vibración	Calentamiento	Aceptación		Observación
			SI	NO	
Eje principal			x		
Ejes Excéntricos			x		
Puerta principal	x		x		
Variador			x		
Estructura	x		x		
Motor	x	x	x		
Poleas Dentadas			x		
Correas sincrónicas			x		
Sistema De refrigeración			x		
Rodamiento			x		
Recipientes de molienda	x	x	x		

3.6.1. Resultados de funcionamiento:

Se efectuaron 5 pruebas de funcionamiento para los cuales 4 ensayos se utilizó el mismo material a moler y una prueba de aleación mecánica de aluminio y zinc, cuerpos moledores (bolas de acero AISI 304) que permitieron alcanzar un tamaño de partícula de 0,3mm en los 4 ensayos realizados con diferentes tiempos de acuerdo a los distintos diámetros de los cuerpos moledores. Además, con los datos obtenidos se procedieron a realizar una gráfica indica la reducción de material molido en función del tiempo, según la Tabla 3-49.

Tabla 3-49. Ensayos

	Tamaño de Bolas	RPM	Tiempo (min)	Tamaño de partícula (mm)
Ensayo 1	5mm	2000	0	2,36
			15	1,18
			30	0,60
			45	0,30
			60	0,15
Ensayo 2	10mm	2000	0	4,72
			20	2,36
			40	1,18
			60	0,60
			80	0,30
Ensayo 3	12mm	2000	0	4,72
			20	2,36
			40	1,18
			60	0,60
			80	0,30
Ensayo 4	15mm	2000	0	4,72
			30	2,36
			60	1,18
			90	0,60
			120	0,30

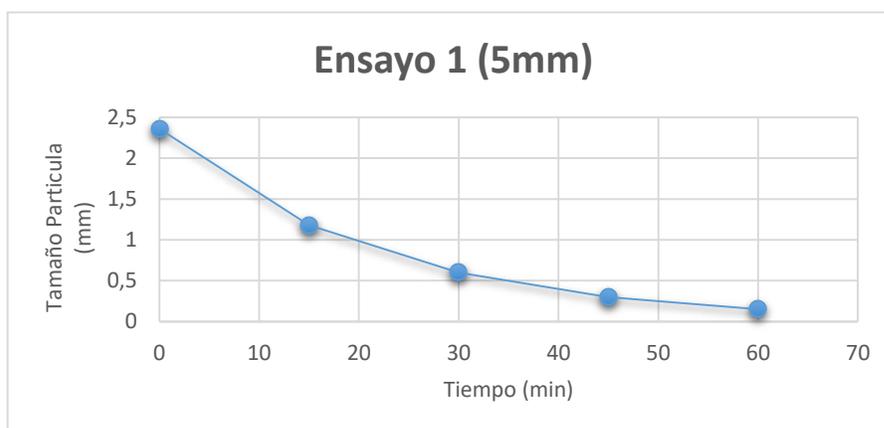


Figura 3-63: Análisis del Ensayo 1

Para el ensayo número 1, primero se tamizo la viruta de aluminio por el tamiz número 8 para obtener partículas con granulometría semejante a un diámetro de 2,36mm, para luego

ingresarlas a la caja de molienda en una cantidad de 80gr junto con los 400 cuerpos moledores de 5mm de diámetro, de acuerdo con la Figura 3-63 se realizó medidas del tamaño de la partícula en intervalos de tiempo de 15min a 2000rpm, hasta alcanzar una granulometría de 0,3mm en el tamiz número 50 en un tiempo de 45min, debido a que las partículas tuvieron un diámetro menor a los otros ensayos se logró llegar a una granulometría de 0,15mm en 60min,

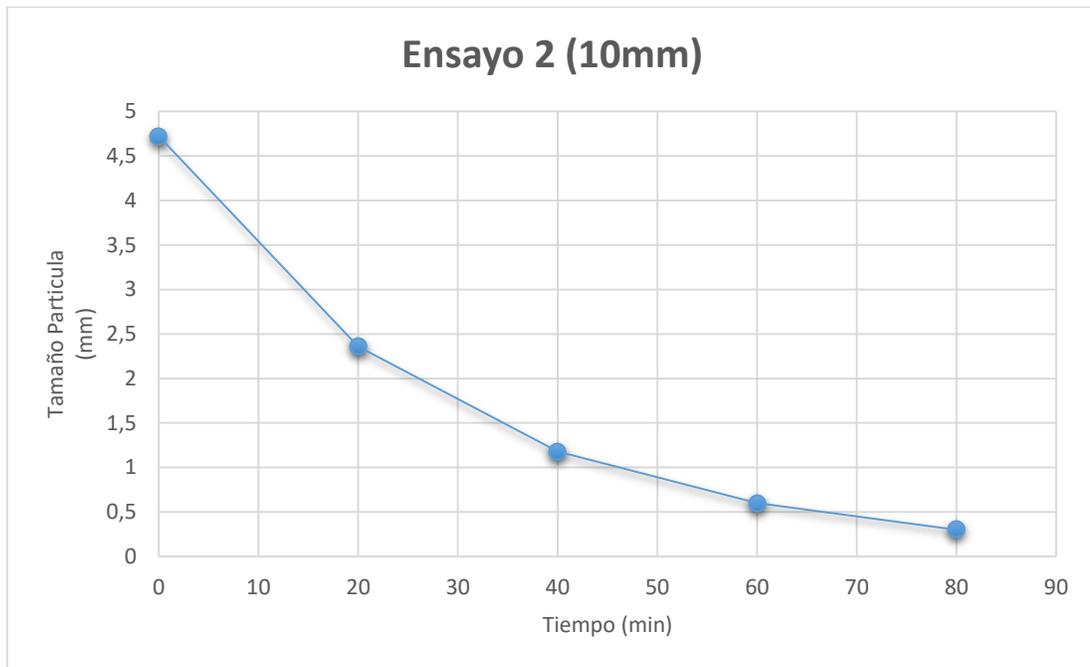


Figura 3-64: Análisis del Ensayo 2

Para el ensayo número 2, primero se tamizó la viruta de aluminio por el tamiz número 4 para obtener partículas con granulometría semejante a un diámetro de 4,72mm, para luego ingresarlas a la caja de molienda en una cantidad de 80gr junto con los 50 cuerpos moledores de 10mm de diámetro, de acuerdo con la Figura 3-64 se realizó medidas del tamaño de la partícula en intervalos de tiempo de 20min a 2000rpm hasta alcanzar una granulometría de 0,3mm en el tamiz número 50 en un tiempo de 80min



Figura 3-65: Análisis del Ensayo 3

Para el ensayo número 3, primero se tamizo la viruta de aluminio por el tamiz número 4 para obtener partículas con granulometría semejante a un diámetro de 4,72mm, para luego ingresarlas a la caja de molienda en una cantidad de 80gr junto con los 35 cuerpos moledores de 12mm de diámetro, de acuerdo con la figura 43 se realizó medidas del tamaño de la partícula en intervalos de tiempo de 20min a 2000rpm hasta alcanzar una granulometría de 0,3mm en el tamiz número 50 en un tiempo de 80min, al igual que el ensayo número 2 se obtuvo en el mismo tiempo de molienda debido a que los diámetros de los cuerpos moledores no son tan diferentes en tamaño, como se indica en la Figura 3-65.

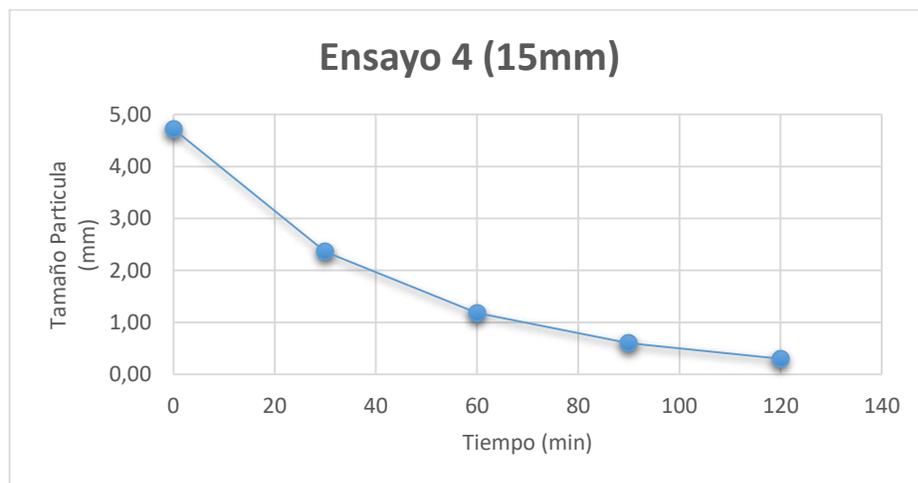


Figura 3-66: Análisis del Ensayo 4

Para el ensayo número 4, primero se tamizo la viruta de aluminio por el tamiz número 4 para obtener partículas con granulometría semejante a un diámetro de 4,72mm, para luego ingresarlas a la caja de molienda en una cantidad de 80gr junto con los 18 cuerpos molidores de 15mm de diámetro, de acuerdo con la figura 66 se realizó medidas del tamaño de la partícula en intervalos de tiempo de 30min a 2000rpm hasta alcanzar una granulometría de 0,3mm en el tamiz número 50 en un tiempo de 120min.

Aleación Mecánica (Al – Zn)

En este ensayo se utilizó el 50% de cada material esto es 40gr de aluminio y 40gr de zinc que representan el 1/3 del volumen total de la caja de molienda, para lo cual se tamizo los dos materiales en el tamiz número 8, con la finalidad de obtener tamaño de partículas homogéneo a 2,36mm e ingresarlos a la caja de molienda con 400 cuerpos molidores de 5mm de diámetro por un tiempo total de 120min a 2000rpm, obteniendo como resultado una granulometría final de 0,15mm.

3.6.2. Proceso de molienda.

Para las pruebas de funcionamiento que se realizaron en el molino de bolas de alta energía se procedió con el siguiente proceso de acuerdo con la Tabla 3-50.

Tabla 3-50. Proceso de molienda

GRÁFICA	DESCRIPCIÓN.
	Material a moler limalla de aluminio con la cual se debe relacionar con el peso de las bolas. La Relación que se realiza es de 1:3.
	Con la ayuda de la balanza electrónica se procede a pesar 82g lo que representa el 1:3 para moler en cada uno de los recipientes del molino de bolas de alta energía.
	Tamaño de cuerpos molidores: en este ensayo se usó bolas de acero, tamaño 5, 10, 12 y 15 mm de diámetro.
	Colocación de las bolas de acero y el material a moler en el recipiente de acero inoxidable.

GRÁFICA	DESCRIPCIÓN.
	<p>Cierre hermético de los recipientes de 125ml con la tapa de acero inoxidable</p>
	<p>Colocar los recipientes en las cajas bases y asegurar adecuadamente para que el material a moler no se esparza en el interior de la máquina y no tenga fugas del refrigerante.</p>
	<p>Con la ayuda de los tamices que existen en el laboratorio se realizó las separaciones de los granos lo cual ayuda a identificar la reducción en la cual se encuentra la molienda.</p>
	<p>Material obtenido luego del proceso de molienda en el molino de bolas de alta energía</p>

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Los tipos de molinos se clasifican en de barras, planetario, de alta energía, autógenos o semiautógenos, de pebles, de rotor, de disco de mortero, de cuchillas y de corte; donde se describen que tiene ventajas como son disminución de los tiempos de molienda, generando una granulometría fina y en menor tiempo, útiles para materiales duros, semiduros, frágiles, fibrosos seco y húmedos, con un principio de molido por fricción e impacto; requiriendo que el número de recipientes sean 2, el volumen de cada recipiente sea de 125 ml, con elementos molidores de acero inoxidable, mientras que la masa a moler sea el aluminio, teniendo en cuenta que las bolas deben ser aproximadamente 3 veces más grandes que las partículas de la muestra.
- El diseño del sistema que constituye el molino son según las pautas de selección para cada recipiente de molienda un volumen total de 125ml, se debe emplear 1/3 del volumen para las bolas de molienda, en tanto el material a moler debe representar el 1/3 siguiente, dando como resultado un volumen de 80ml y el 1/3 restante se mantendrá vacío para que el material y las bolas puedan moverse y generar la molienda, con una velocidad de 2000rpm transmitida desde el motor de potencia de 2hp, a través de una correa sincrónica de 30mm de amplitud y 151 dientes previamente seleccionada y ejes de 20mm de diámetro con FDS igual a 4, además incorporado por una bomba sumergible que permitirá al sistema de refrigeración bombear el refrigerante seleccionado desde el tanque de almacenamiento hacia las cajas de molienda y de esta manera evitar el aumento de temperatura.
- La construcción del molino de bolas de alta energía se dio a partir de cuatro fases; la primera que abarca el armado de la estructura que soporta el peso total de los elementos, la segunda fase engloba el sistema de transmisión conformado por el

montaje de poleas y una banda sincrónica, la tercera etapa comprende la parte eléctrica como es la implementación del variador de frecuencia, breaker, temporizador; selector ON/OFF y pulsador de emergencia y finalmente se hace referencia a la refrigeración, la cual involucra con la instalación de la bomba sumergible, acoples y ductos para la circulación del refrigerante.

- Se efectuaron 5 pruebas de funcionamiento para los cuales se utilizó el mismo material a moler y una prueba de aleación mecánica de aluminio y zinc, bolas de acero AISI 304 que permitieron alcanzar un tamaño de partícula de 0,3mm en los 4 ensayos realizados con diferentes tiempos de acuerdo con los distintos diámetros de los cuerpos molidores, continuando con el pesaje, colocando los elementos demolidores y la materia prima en los recipientes, dándose un cierre hermético, siguiendo con la colocación cajas bases, realizando las separaciones de los granos y reducción con la ayuda de tamices.

4.2. Recomendaciones

- Los cálculos deben ser verificados en un software especializado, para tener resultados más confiables.
- El tamaño del material a moler debe ser aproximadamente tres veces inferior a los cuerpos molidores que se empleen para reducir tiempo y consumo energético.
- Los envases de molienda deben tener un redondeo igual al radio de los cuerpos molidores más grandes con la finalidad de que el material no se acumule en las paredes del recipiente y facilite una mejor trituración.
- Para el mecanizado de las piezas del material acero AISI 1045 tener un stock de fresas carburadas.
- Utilizar los materiales que se encuentren disponibles en el mercado para evitar problemas al momento de construir.

- Evitar introducir partículas demasiado grandes de un diámetro mayor a 5 mm ya que esto produce un tiempo de molienda prolongada y mayor consumo energético.
- Si se quiere realizar la molienda húmeda el operador debe considerar el nivel de oxidación del material y a partir de ese grado de oxidación evaluar si es oportuno ejecutarlo ese tipo de molienda.
- Colocar el molino en un espacio con suficiente aislamiento acústico para impedir que el ensayo no desconcierte a los docentes y estudiantes.
- Utilizar los equipos de protección personal para la manipulación de las diferentes máquinas herramientas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Cabezas, “Diseño y construcción de un molino de bolas para aplicaciones de pulvimetalurgia en los laboratorios de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato”, Ambato: Autor - Editor (Universidad Técnica de Ambato), 2017.
- [2] J. Dueñas y V. González, "Diseño y construcción de un molino de bolas para la pulverización de arcillas en el laboratorio de materiales y catálisis de la Universidad de Córdoba", Montería: Autor - Editor (Universidad de Córdoba), 2016.
- [3] D. Herrera, J. Grueso, H. Jaramillo, N. De Sánchez y H. Sánchez, "El proceso de diseño de un molino vibro-planetario para la producción de materiales compuestos", El Hombre y la Máquina, vol. I, n° 24, pp. 144-157, 2005.
- [4] Reyes, César; Guerra, José; Guerrero, Víctor; Dávila, José, "Diseño y Construcción de un Molino de Atricción con Sistema de Control Atmosférico y de Temperatura para la Obtención de Compuestos Aleados Mecánicamente", Quito: Autor - Editor (ESPE), 2013.
- [5] G. Omar, "Procesos de manufactura", Autor - Editor (Universidad Nacional Abierta y a Distancia), 2008, pp. 1-15.
- [6] J. Rentería, "Rediseño y construcción de un molino tipo atritor", Santiago de Cali: Autor - Editor (Universidad Autónoma de Occidente), 2008.
- [7] D. Arias, “Estudio del proceso de trituración de los residuos sólidos orgánicos para reducir la contaminación residual en el Mercado Mayorista de Ambato”, Ambato: Autor - Editor (Universidad Técnica de Ambato), 2013.
- [8] L. Garcés, P. Gutiérrez, M. Meyer, N. Vaca, J. Reyes y H. Vega, "Operaciones con sólidos", Bogotá: Autor - Editor (Universidad de Bogotá " Jorge Tadeo Lozano"), 2014.

- [9] E. Luna, "Elaboracion de guias practicas de procesos matalurgicos para el laboratorio de minas de la Universidad del Azuay", Cuenca: Autor - Editor (Universidad del Azuay), 2016, p. 1.
- [10] C. Alvarez, "Diseño y construcción de un molino de atricción pasra moler materiales cerámicos", Quito, 2011.
- [11] E. Blanco, Molienda, Cantabria: Universidad de Cantabria, 2012.
- [12] Retsch GmbH, "Molino de bolas de alta energía Emax", Retsch, 18 Julio 2007. [En línea]. Available: <https://www.retsch.com/>. [Último acceso: 22 Julio 2019].
- [13] Campos, Beatriz, "Síntesis y caracterización de los sistemas Eu₂O₃ y Gd₂O₃ por molienda mecánica", Leganés: Autor - Editor (Universidad Carlos III de Madrid), 2011.
- [14] M. García, "Oo/uc3m/51- Aplicación de la molienda de alta energía para el desarrollo de materiales", Universidad Carlos III de Madrid , pp. 1-3.
- [15] Unknown , "aceromaterialestructural", blogspot, 27 Marzo 2015. [En línea]. Available: <http://aceromaterialestructural.blogspot.com/>. [Último acceso: 04 Junio 2019].
- [16] DIPAC, "Perfiles estructurales ángulos “L” doblado", *DIPAC*, pp. 1-2, 2016.
- [17] DIPAC, "Planchas laminadas al caliente", *DIPAC*, p. 14, 2016.
- [18] IVAN BONMAN C.A., Catálogo de productos, Quito, 2018.
- [19] MIPSAs, "Que es el acero inoxidable", www.mipsa.com.mx, 2019. [En línea]. Available: <https://www.mipsa.com.mx/dotnetnuke/Sabias-que/Que-es-acero-inoxidable>. [Último acceso: 14 Agosto 2019].
- [20] SKF, Rodamientos, EEUU: Grupo SKF 2015, 2015.

- [21] WEG, "Motores electricos", www.weg.net, 2018. [En línea]. Available: https://www.weg.net/catalog/weg/US/es/Motores-El%C3%A9ctricos/Motor-de-Inducc%C3%ADon---IEC/Usos-Generales-ODP-TEFC/Carcasa-de-Aluminio/TEFC-Multimounting-IE3/c/MT_IEC_3PHASE_LV_TEFC_W21MULTIMOUNTUNG_IE3?h=5e186957. [Último acceso: 14 Agosto 2019].
- [22] H. Chávez y J. Gavilanes, "Análisis microestructural, diseño del cigueñal y la biela de una motocicleta de 4 tiempos - desagregación tecnológica", Riobamba: Escuela Politécnica de Chimborazo, 2016.
- [23] D. Intriago y W. Manchay, "Readecuación e implementación de un equipo para alineación láser de bandas y poleas en el laboratorio de análisis vibracional de la escuela de ingeniería de mantenimiento de la ESPOCH", Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2011.
- [24] AliExpress, "Shop4215004 Store," 2020. [En línea]. Available: <https://es.aliexpress.com/item/32877093723.html>. [Último acceso: 3 Febrero 2020].
- [25] UNIDAS, "Línea Industrial & Marina", 2018. [En línea]. Available: <https://www.pinturasunidas.com/uploads/productos/industrial/24.REDUCTOR%20EPOXICO.pdf>. [Último acceso: 30 Abril 2020].
- [26] Retsch, Ball Mills - Guidelines for sample amount and ball charge, Germany, 2019.
- [27] David, "Selector 3 Posiciones", 2014. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/243738056/Selector-3-Posiciones-pdf>. [Último acceso: 30 Abril 2020].
- [28] VMC, «iG5A,» [En línea]. Available: <https://www.vmc.es/es/convertidor-de-frecuencia-ig5a>. [Último acceso: 3 Febrero 2020].

- [29] A. Carvajal y J. Valencia, "Evaluación de los esquemas de automatización industrial de lógica cableada y lógica programada", Riobamba: Escuela Politécnica de Chimborazo, 2015.
- [30] FREEZETONE, "Refrigerante FREEZETONE", 2020. [En línea]. Available: <http://www.freezestone.com.co/inicio/index.php/features/mantenimiento/freezestone>. [Último acceso: 29 Abril 2020].
- [31] EDIPESA, "FREEZETONE Líquido Antioxidante p/radiador 904-28N,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.edipesa.com.pe/tienda/taller-automotriz/liquido-antioxidante-p-radiador-904-28n-freezestone-detalle>. [Último acceso: 29 Abril 2020].
- [32] SIMONIZ, "Refrigerante Radiador – Verde", 2019. [En línea]. Available: <http://simonizauto.com/refrigerante-radiador-verde/>. [Último acceso: 29 Abril 2020].
- [33] Timoshenko, Resistencia de Materiales, Madrid, 1957.
- [34] Entaban, UNBRAKO, Zaragoza, 2014.
- [35] Shigley, Diseño en Ingeniería Mecánica, Mexico D.F.: McGraw-Hill, 2015.
- [36] Retsch, Manual de instrucciones - Molino de bolas de alta energía Emax, Alemania, 2019.
- [37] INTERMEC, Transmisiones por Correas Dentadas de Tiempo y Sincrónicas, 2015.
- [38] Koyo, Manual de rodamientos, 2010.
- [39] J. García, Tolerancias y ajustes, Ternium, 2006.
- [40] D. Gonzáles, "Diseño y cálculo de un tanque de almacenamiento de un fluido de alta temperatura", Madrid: Autor - Editor (Universidad Politécnica de Madrid), 2018.

- [41] L. Nuricumbo, "Caracterización de grado de sensibilidad de acero inoxidable austenítico AISI 316 a deformaciones previas", México D.F.: Autor - Editor (Universidad Nacional Autónoma de México), 2013.
- [42] M. Bombón, "Análisis de la variación de velocidad de avance en la soldadura del acero inoxidable austenítico aisi 304 mediante el proceso Gmaw y su incidencia en la defectología", Ambato: Autor - Editor (Universidad Técnica de Ambato), 2014.
- [43] P. Gudiño y S. Rubio, "Diseño y construcción de un tanque en acero inoxidable para un sistema de tratamiento de aguas residuales del Hospital Monte SINAI", Quito: Autor - Editor (Escuela Politécnica Nacional), 2017.
- [44] M. Ibarra, E. Núñez y J. Huerta, "Manual Aceros Inoxidables", *INDURA*, pp. 2-72, 2010.
- [45] DIPAC, "Planchas Acero Inoxidable", *DIPAC*, pp. 1-2, 2016.
- [46] DIPAC, "Tubo Redondo en Acero Inoxidable", *DIPAC*, p. 40, 2016.
- [47] QuimiNet, "Los antiespumantes, agentes tensoactivos desestabilizadores de espuma", quiminet.com, 12 Julio 2011. [En línea]. Available: <https://www.quiminet.com/articulos/los-antiespumantes-agentes-tensoactivos-desestabilizadores-de-espuma-63146.htm>. [Último acceso: 05 Junio 2019].
- [48] G. Joaquín, "Alternativas de captación y tratamiento del biogás en el vertedero de Piedras Blancas", Córdoba, Argentina, Córdoba, 2014.
- [49] C. Riba y A. Molina, Ingeniería Concurrente: Una metodología integradora, Barranquilla, 2006.
- [50] R. Mott, Diseño de Elementos de Máquinas, Naucalpan de Juarez: PEARSON, 2006.

- [51] INAMHI, Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, Quito: Autor - Editor, 2016.
- [52] M. Yurico, Perdida de Carga en Tuberías y Accesorios, Trujillo, 2011.
- [53] Eduardo Cortina, Tubos y accesorios de Acero Inoxidable, 2015.
- [54] McCormac, Diseño de Estructuras de Acero, Mexico D.F.: Alfaomega, 2012.
- [55] DIPAC Productos de acero, «DIPAC,» 2016. [En línea]. Available: http://www.dipacmanta.com/index.php?route=product/product&product_id=79.
- [56] URVAKUIM S.L., Ficha Técnica, Barcelona, 2018.
- [57] J. Jines, "Uso del tubo de diálisis en el diseño de tratamiento antiescala en el pozo sa 110 del campo sachá en distrito amazónico ecuatoriano", Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2010.
- [58] S. Katherine, "Diseño y construcción de una dosificadora automática de granos secos", Quito: Universidad Tecnológica Equinoccial, 2017.
- [59] R. Mott, Mecánica de fluidos, México D.F.: PEARSON, 2006.
- [60] J. McCormac y F. Csernak, "Diseño de estructuras de acero", México: Alfaomega S.A., 2012.
- [61] Mott, Robert, Resistencia de Materiales, México D.F.: PEARSON, 2009.
- [62] Eugene F. Megyesy, Manual de recipiente a presión diseño y cálculo, México D.F.: Limusa, 1992.
- [63] Cia. General de Aceros S.A., Aceros Inoxidables Austeníticos, Bogotá: Autor - Editor, 2018.

- [64] López, Camurri, Osorio y Ignat, "Caracterización Mecánica y Microestructural mediante Ensayo IN SITU de Acero 3Cr-1Mo con soldadura AISI 347", Gandia: VIII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos, 2002.
- [65] Ingersoll Rand, Soplates y Compresores de baja presión para aire y gases, Wsequehal, 2007.
- [66] Ecuadorencifras, INEC, Quito, 2017.
- [67] INDURA, Soldadura INDURA, Autor - Editor, 2018.
- [68] S. Pullaguari, "Diseño y construcción de un tanque rectangular de 400(m³/día) para un sistema de tratamiento de aguas residuales modalidad electrocoagulación para la empresa YAKUPRO CIA. LTDA.", Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2015.
- [69] GIACOMINI, Válvulas de esfera, Barcelona: Autor - Editor, 2009.
- [70] DIPAC, "Tubo estructural cuadrado", *DIPAC*, p. 22, 2016.
- [71] DIPAC, "Eje AISI 1018 transmisión", *DIPAC*, p. 50, 2016.
- [72] IPAC, "Productos Laminados Vigas UPN", *IPAC*, p. 1, 2014.
- [73] Robert L. Mott, Resistencia de Materiales, México: PEARSON EDUCACIÓN, 2009.
- [74] G. Rado, D. Presta y G. Devincenzi, "Análisis de las fuerzas que actúan en la interface neumático – carretera. modelos de simulación de aceleración", Mendoza: Asociación Argentina de Mecánica Computacional, 2013.
- [75] Martin, Transmisiones Sincrónicas, 2018.
- [76] C. Poveda, Estudio para la fabricación de catalinas para motocicletas de ensamblaje nacional, Quito: Universidad Internacional del Ecuador, 2017.

- [77] FerroTienda, 2019. [En línea]. Available: <https://ferrotienda.com/bomba-de-agua-paolo-1-2-hp-40l-min-italiana-qb-plus/>. [Último acceso: 24 Septiembre 2019].
- [78] P. J. Blau, Friction Science and Technology, New York: STLE, 2009.
- [79] C. Riba, Diseño concurrente, ETSEIB - UPC, 2002.

Anexos

Anexo 1 – Manual de Operación

1. Pesar el material a moler
2. Colocar el material a moler y los cuerpos molidores en el recipiente de molienda.
3. Cerrar herméticamente el envase de molienda
4. Colocar los envases de moliendas en las cajas bases respectivas y sellar herméticamente.
5. Bajar la tapa de protección de la máquina.
6. Enchufar la máquina a una toma de corriente
7. Subir el breaker para energizar la máquina
8. Configurar el variador de frecuencia a la velocidad requerida
9. Configurar el temporizador al tiempo necesario
10. Activar el selector en la posición ON para encender el funcionamiento de la máquina.

Anexo 1I – Manual de Mantenimiento

El manual de mantenimiento consta de algunos ítems que son:

Manguera neumática PU azul

- Verificar fugas de aire que pueden producirse por las juntas, acoplamientos defectuosos o roturas de mangueras.
- Acoplar las mangueras mediante el uso de elementos de acción rápida.
- Efectuar el cambio de mangueras cuando la vida útil colapse y requiera del cambio del producto.

BANDA SINCRONICAS 151 dientes paso M8.

- Verificar la tensión de las correas
- Durante las primeras horas de servicio hay que observar la transmisión y, de acuerdo con las experiencias recogidas, volverla a tensar tras un tiempo de marcha a plena carga de entre 0,5 y 4 horas. De este modo se compensa la deformación inicial de la banda.
- Se recomienda verificar regularmente las transmisiones por banda; Esto incluye comprobar la tensión y corregirla si hace falta.
- No se implementa una banda de paso diferente a M8.
- Debe evitarse el uso de ceras y sprays para la banda.

Rodamientos AXIAL DE BOLAS 7200 (D=10)

- Limpiar los rodamientos del polvo y otras suciedades pueden estropearlos rápidamente.
- Ajustar de manera correcta los rodamientos definida por los fabricantes.

- Lubricar los rodamientos con grasa.
- Los rodamientos deben ser limpiados y revisados periódicamente.

Bomba SUMERGIBLE AD20P.

- Comprobar la tensión y la potencia de la bomba antes de encenderla.
- Desconectar la alimentación antes de instalar / colocar / quitar la bomba del agua.
- Usar en el agua u otros líquidos (sin partículas e impurezas).
- Apagar y encender la alimentación repetidamente varias veces para eliminar el aire en el impulsor de la bomba y la tubería.
- Programar un reemplazo anual de los principales componentes para evitar averías.

Sistema de refrigeración: REFRIGERANTE FREEZETONE™

- Comprobar el nivel del refrigerante, la cual debe realizarse con la máquina apagada, donde se verificará que no esté bajo el nivel mínimo para que pueda refrigerar el sistema, y por otra parte es indispensable que no esté por encima del máximo ya que podría haber fugas por el exceso del refrigerante.
- Revisar el estado del líquido que se va a renovar, con el objetivo de comprobar si está sucio o contiene óxidos.
- En el caso de que contenga óxidos, vaciarlo y limpiar el circuito con un producto destinado a la limpieza del radiador.
- Verificar la existencia de fugas.
- Se aconseja el cambio de líquido refrigerante cada 10 años

Anexo 2

Diagramas de Control y Potencia

- Q = interruptor magnetotérmico
- G=Variador de frecuencia
- M=motor trifasico
- P=bomba de refrigerante
- KA=paro de emergencia
- K=temporizador
- V=transformador a 12VDC

DIAGRAMA POTENCIA

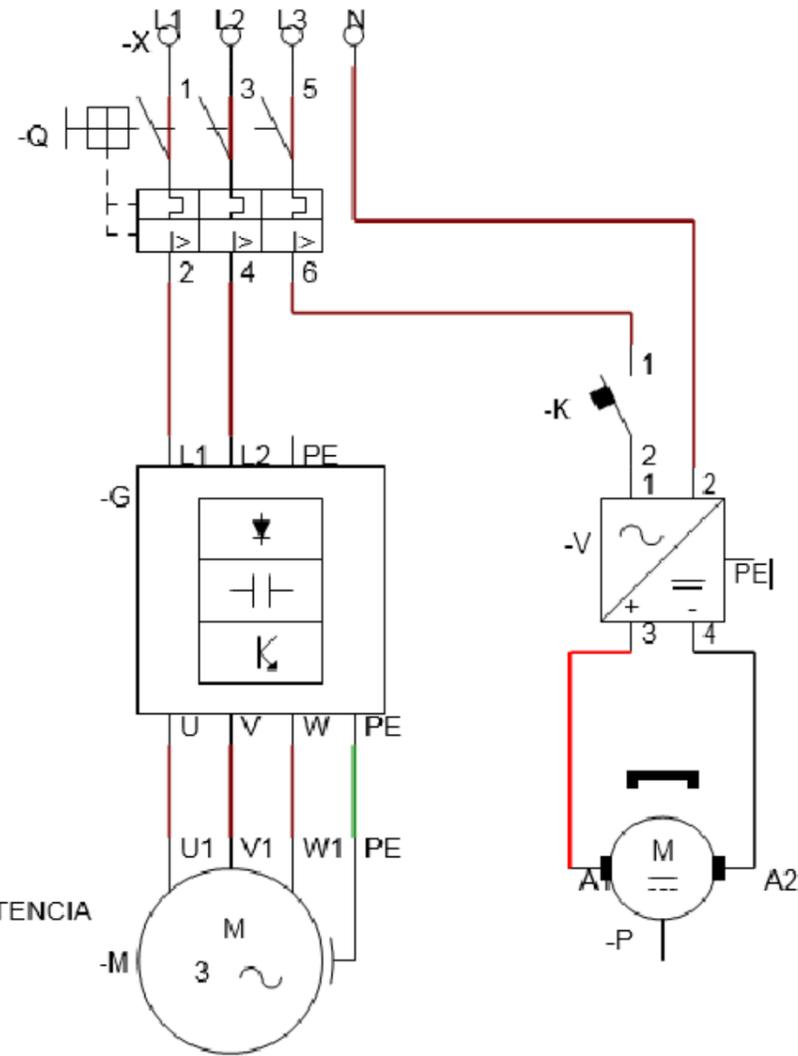
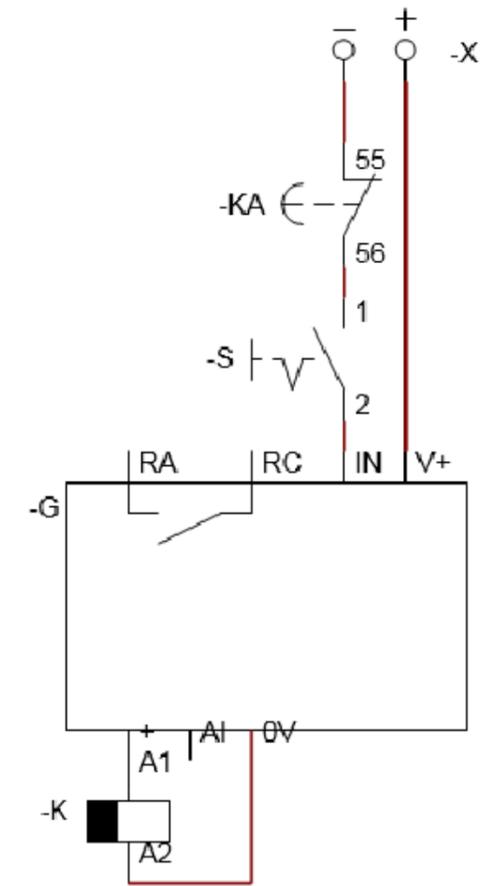


DIAGRAMA CONTROL



				TOLERANCIA:	PESO:	MATERIAL:		
				±1	Kg	Varios		
				FECHA	NOMBRE	TÍTULO:		
				DIBUJO: 16/04/2020	Los Autores	Diagrama de control y potencia		
				REVISO: 16/04/2020	Ing. López G. Msc.	ESCALA:		
				APROBO: 16/04/2020	Ing. López G. Msc.	1:1		
				U.T.A. INGENIERIA MECANICA		N.º DE LAMINA		REGISTRO:
						HOJA 1 DE 1		
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:	SUSTITUCION:				

Anexo 3

PLANOS

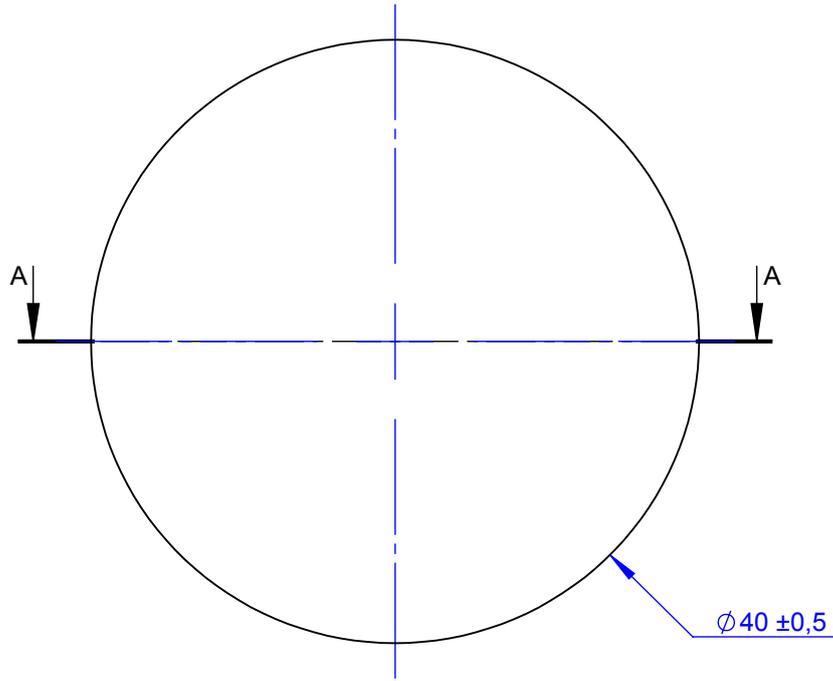
1

2

3

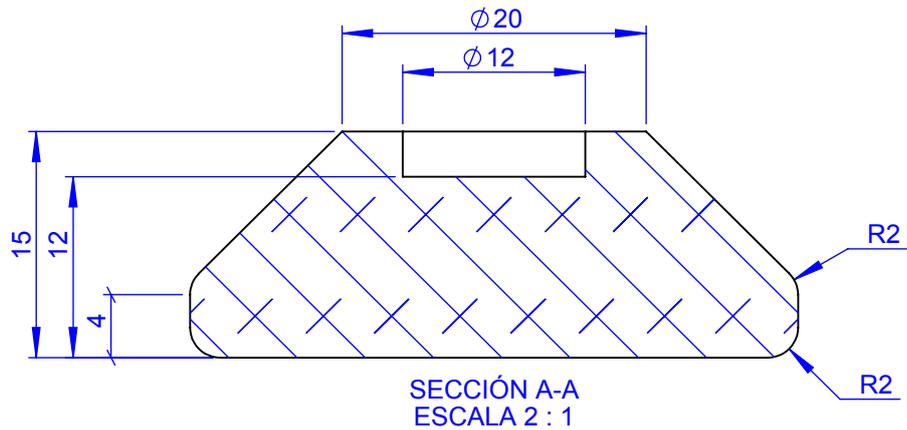
4

A

 $\varnothing 40 \pm 0,5$

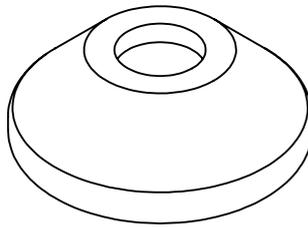
B

C

SECCIÓN A-A
ESCALA 2 : 1

D

E

VISTA ISOMÉTRICA
ESCALA: 1:1

				TOLERANCIA: ± 1	PESO: 0.012 Kg	MATERIAL: Caucho	
						TÍTULO: Caucho amortiguador	ESCALA: 1:1
				DIBUJO: 01/10/2019	Los Autores		
				REVISO: 01/10/2019	Ing. López G. Msc.		
				APROBO: 01/10/2019	Ing. López G. Msc.		
				U.T.A. INGENIERIA MECANICA		N.º DE LAMINA HOJA 2 DE 18	REGISTRO:
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:			SUSTITUCION:	

1

2

3

4

A

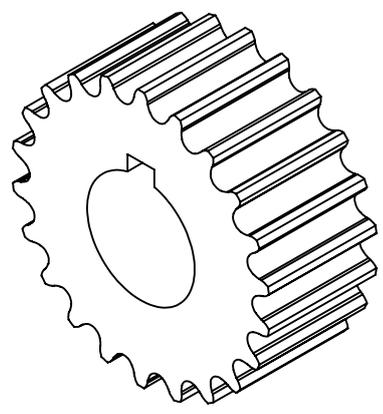
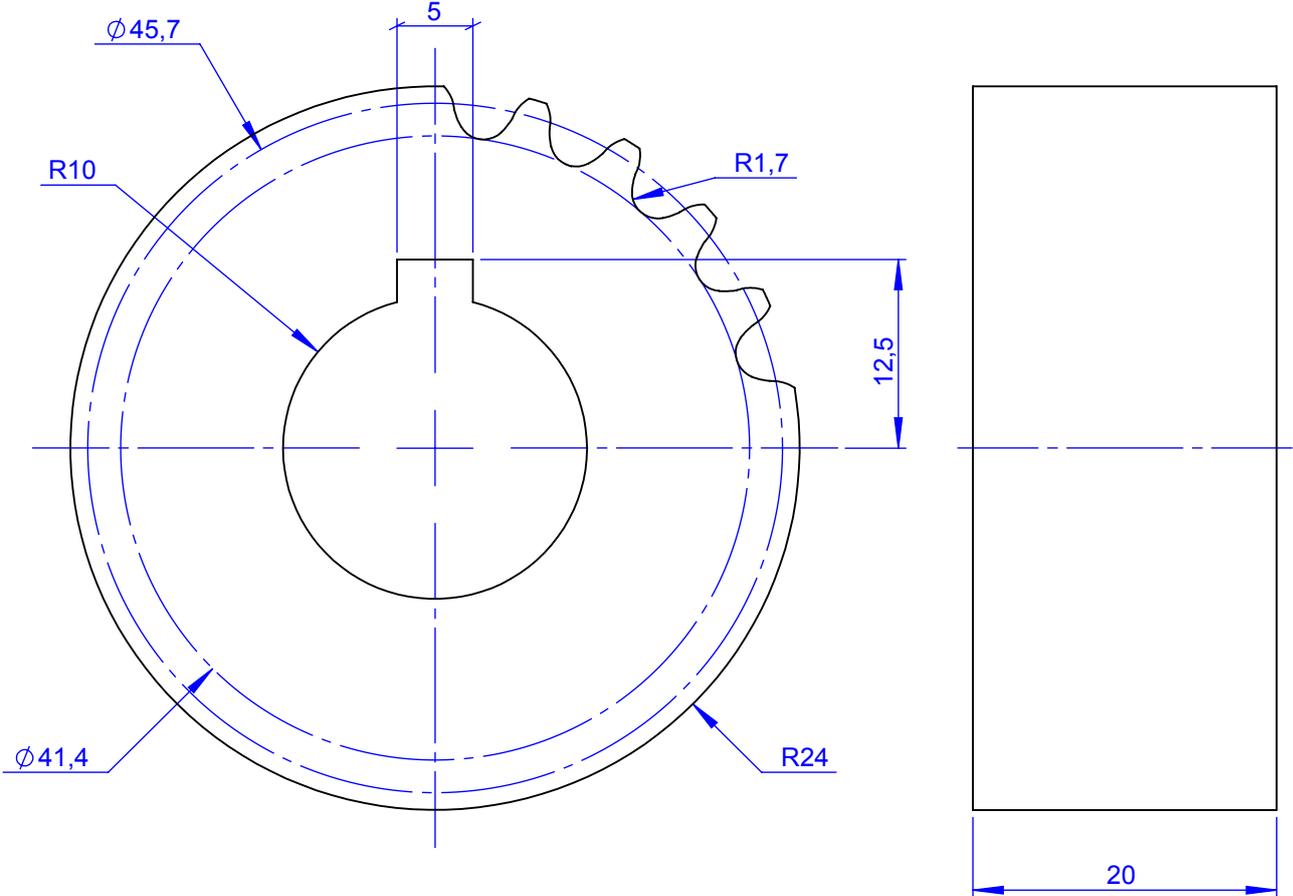
B

C

D

E

N7 FRESADO



VISTA ISOMÉTRICA
ESCALA: 1:1

DATOS	
Módulo	m = 2.077
N° dientes	Z = 22
Diametro Primitivo	Dp = 45.7 mm
Pazo Circular	P = 6.524
Tipo de Diente	Recto

				TOLERANCIA:	PESO:	MATERIAL:		
				±1	0.2 Kg	AISI 1018		
				FECHA	NOMBRE	TÍTULO:		ESCALA:
				DIBUJO: 16/04/2020	Los Autores	Rueda dentada		2:1
				REVISO: 16/04/2020	Ing. López G. Msc.			
				APROBO: 16/04/2020	Ing. López G. Msc.			
				U.T.A. INGENIERIA MECANICA		N.º DE LAMINA		REGISTRO:
						HOJA 3 DE 18		
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:			SUSTITUCION:		

1

2

3

4

A

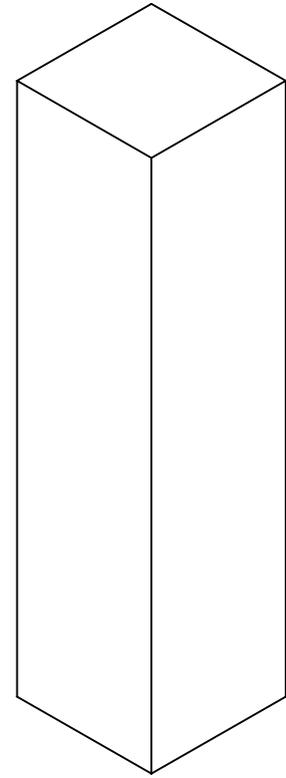
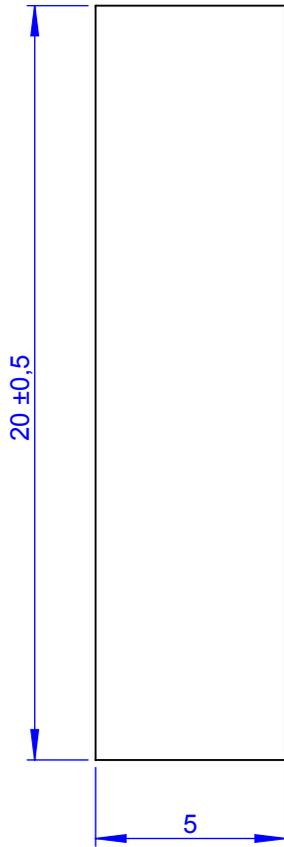
B

C

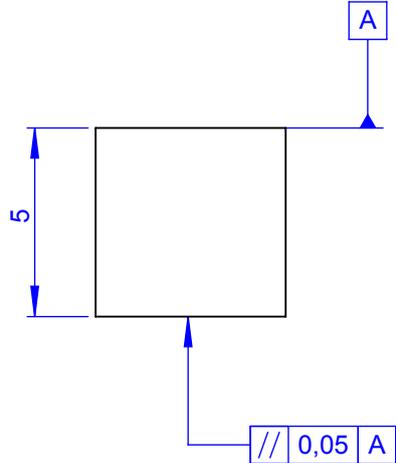
D

E

N7 FRESADO

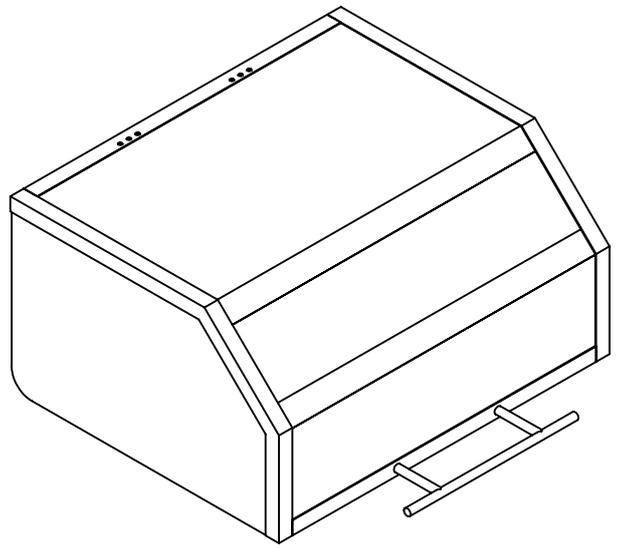
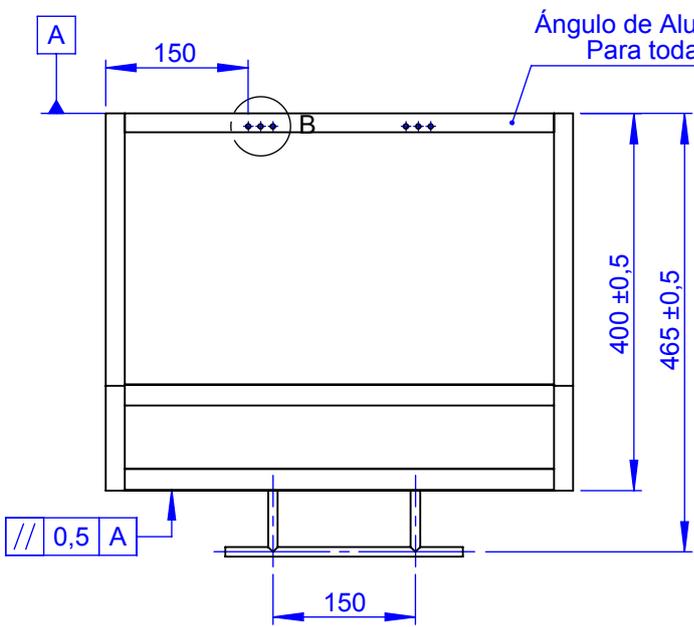
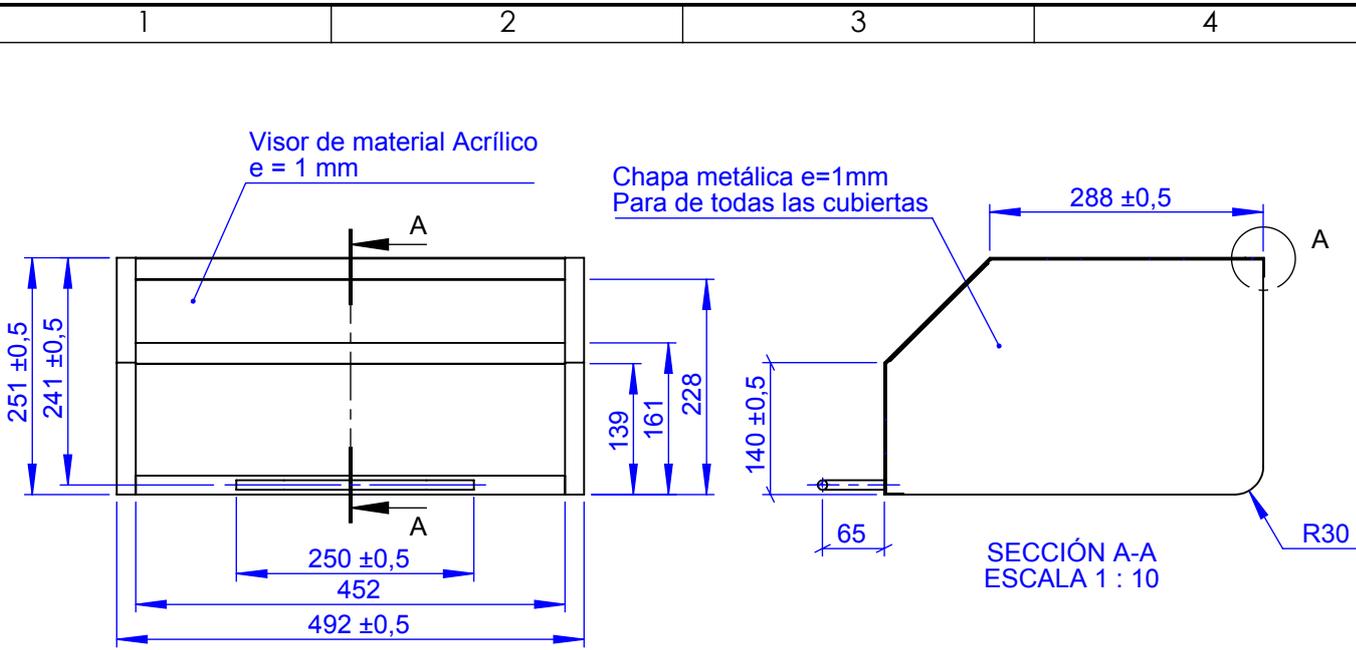


VISTA ISOMÉTRICA
ESCALA: 5:1

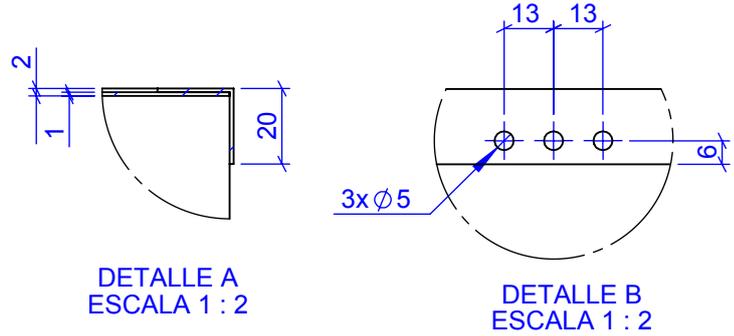


// 0,05 A

				TOLERANCIA: ±1	PESO: 0.004 Kg	MATERIAL: AISI 4340	
						TÍTULO: Chaveta	ESCALA: 5:1
				FECHA	NOMBRE		
				DIBUJO: 16/04/2020	Los Autores		
				REVISO: 16/04/2020	Ing. López G. Msc.		
				APROBO: 16/04/2020	Ing. López G. Msc.		
				U.T.A. INGENIERIA MECANICA		N.º DE LAMINA HOJA 4 DE 18	REGISTRO:
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:			SUSTITUCION:	



VISTA ISOMÉTRICA
ESCALA: 1:10



				TOLERANCIA: ± 1	PESO: 4.77 Kg	MATERIAL: Varios	
				FECHA DIBUJO: 16/04/2020	NOMBRE Los Autores	TÍTULO: Cubierta	ESCALA: 1:10
				REVISO: 16/04/2020	Ing. López G. Msc.		
				APROBO: 16/04/2020	Ing. López G. Msc.		
				U.T.A. INGENIERIA MECANICA		N.º DE LAMINA HOJA 5 DE 18	REGISTRO:
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:			SUSTITUCION:	



1

2

3

4

A

B

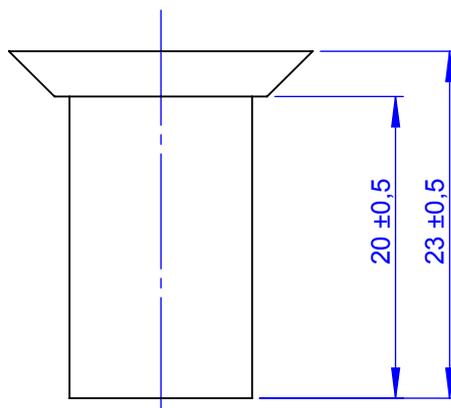
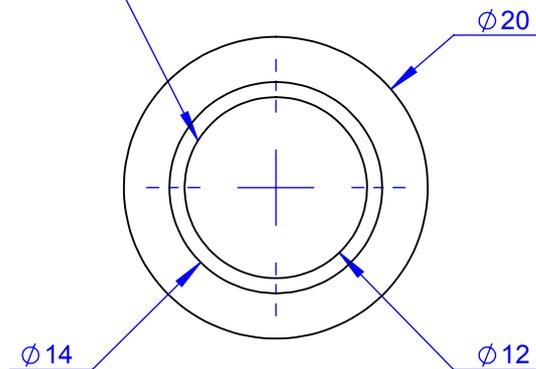
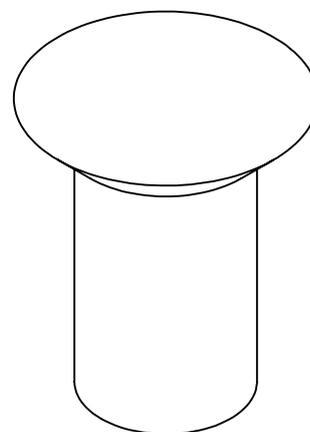
C

D

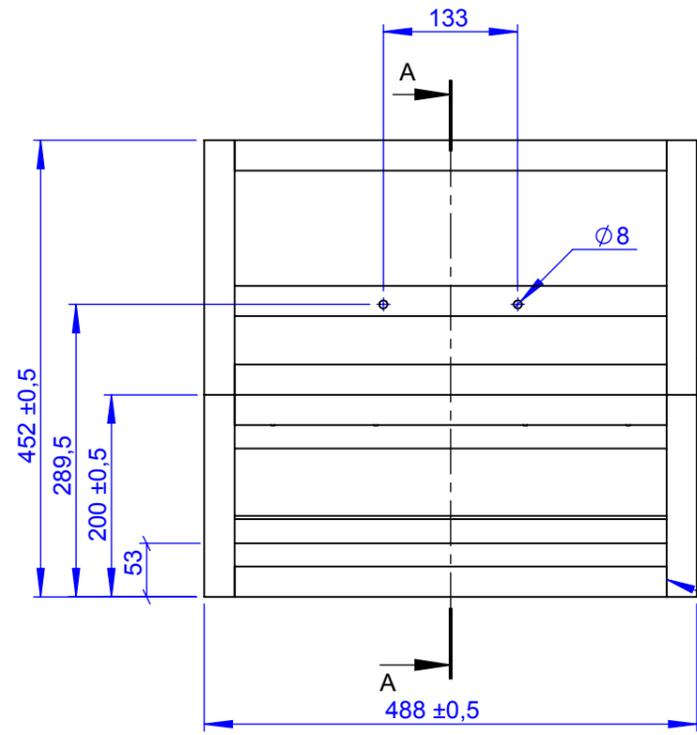
E

0.05

N7 TORNEADO


 VISTA ISOMÉTRICA
 ESCALA: 2:1


				TOLERANCIA: ± 1	PESO: 0.026 Kg	MATERIAL: ASTM A36	
						TÍTULO: Soporte de la estructura	ESCALA: 2:1
				FECHA	NOMBRE		
				DIBUJO: 01/10/2019	Los Autores		
				REVISO: 01/10/2019	Ing. López G. Msc.		
				APROBO: 01/10/2019	Ing. López G. Msc.		
				U.T.A. INGENIERIA MECANICA		N.º DE LAMINA HOJA 7 DE 18	REGISTRO:
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:			SUSTITUCION:	

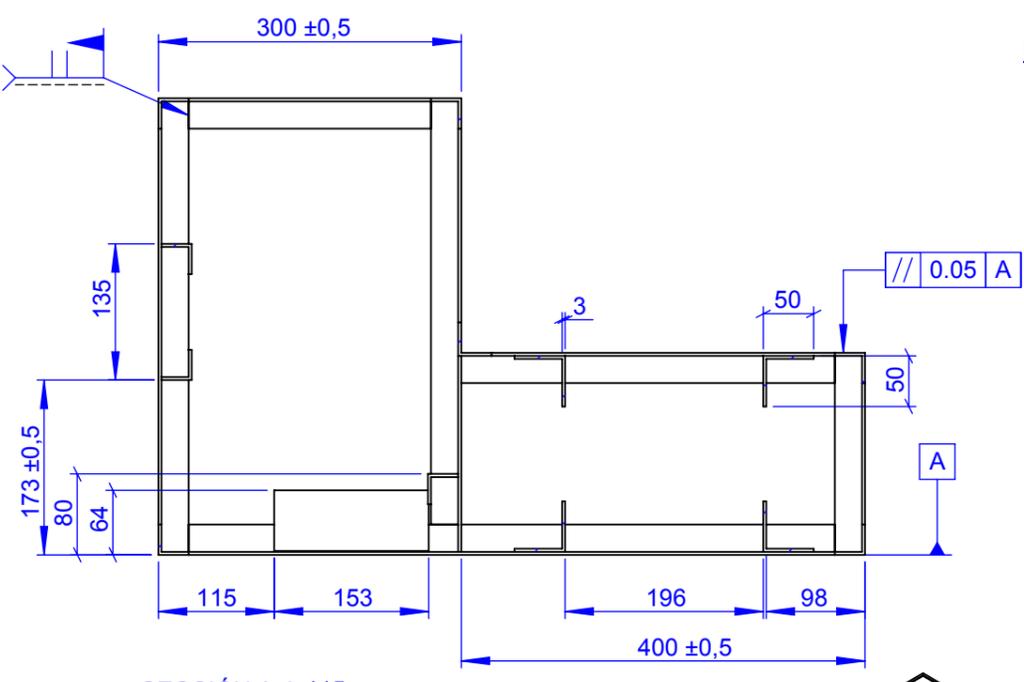


Ángulo L30X3
Para toda la estructura excepto
donde indique lo contrario

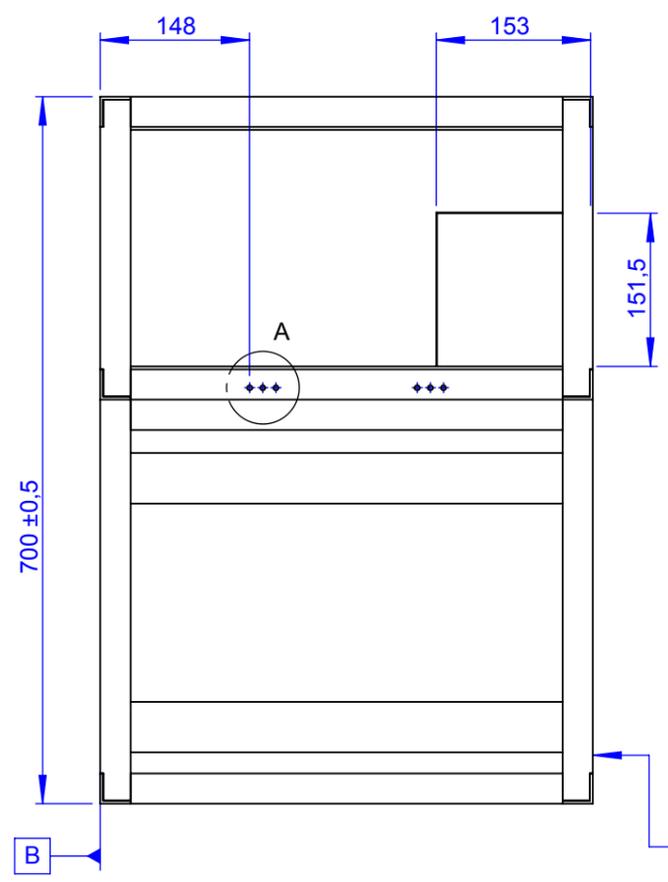
SMAW
E-6011

SMAW
E-6011

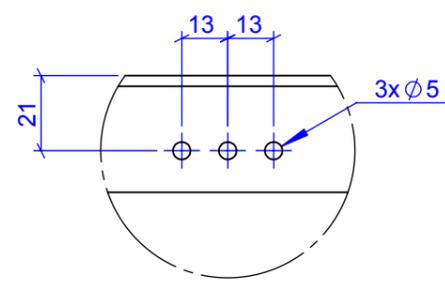
N6 AMOLADO - PULIDO



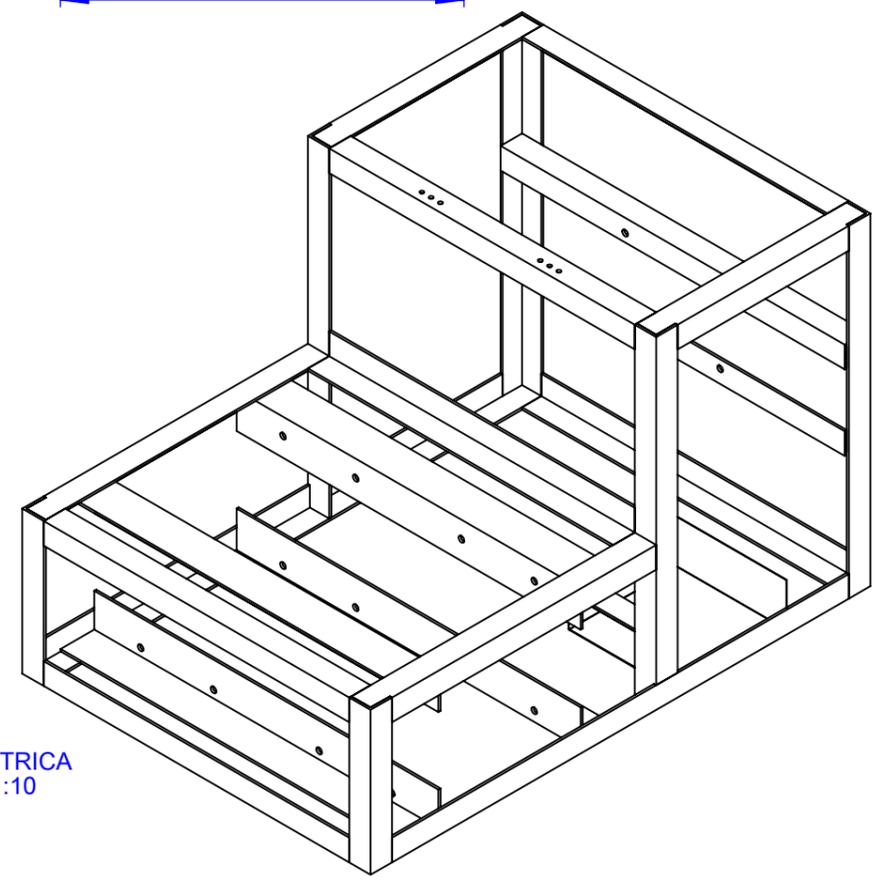
SECCIÓN A-A 115
ESCALA: 1:10



// 0.05 B

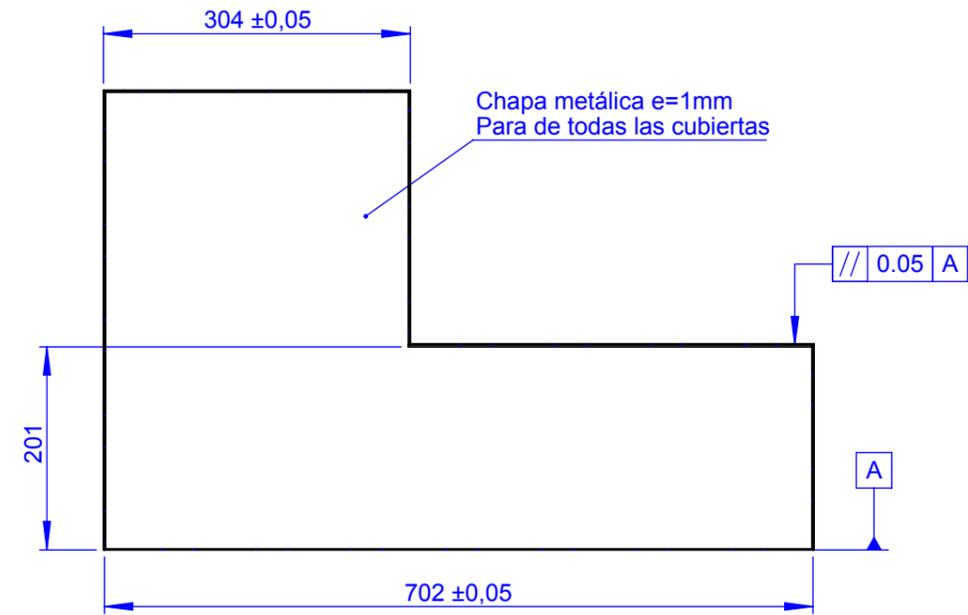
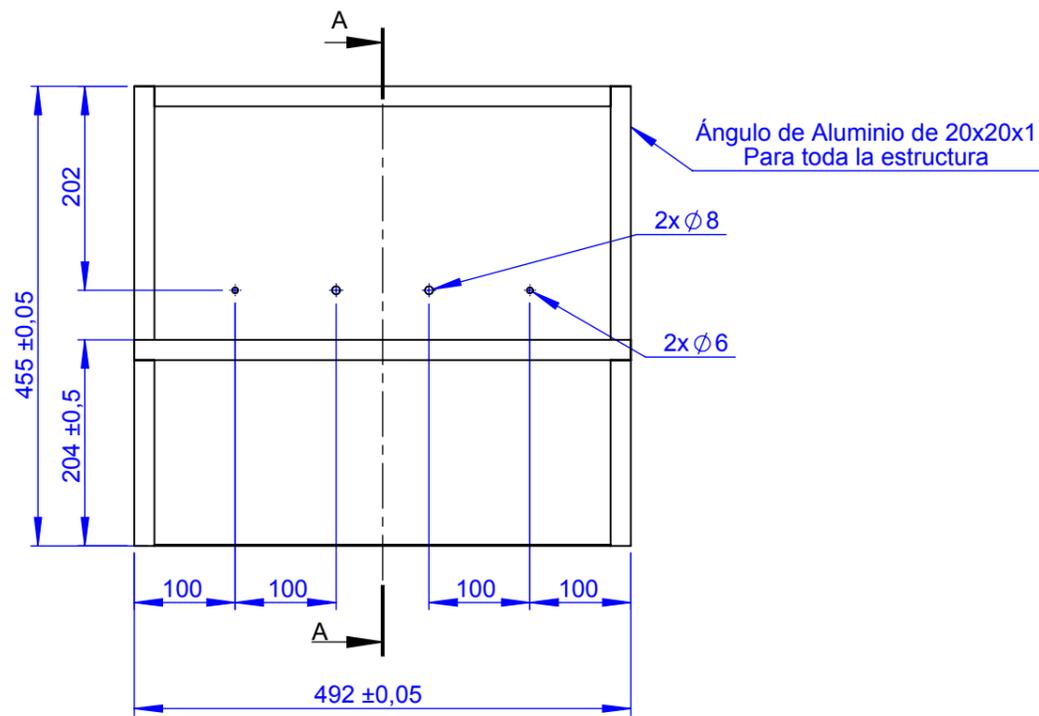


DETALLE A
ESCALA 1:2

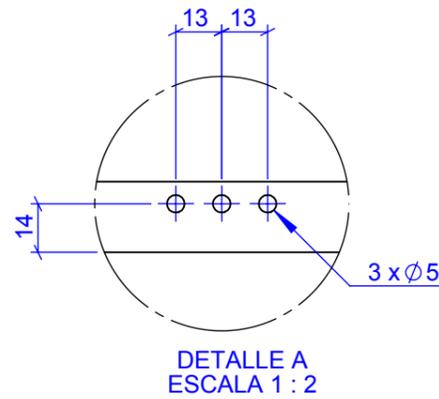
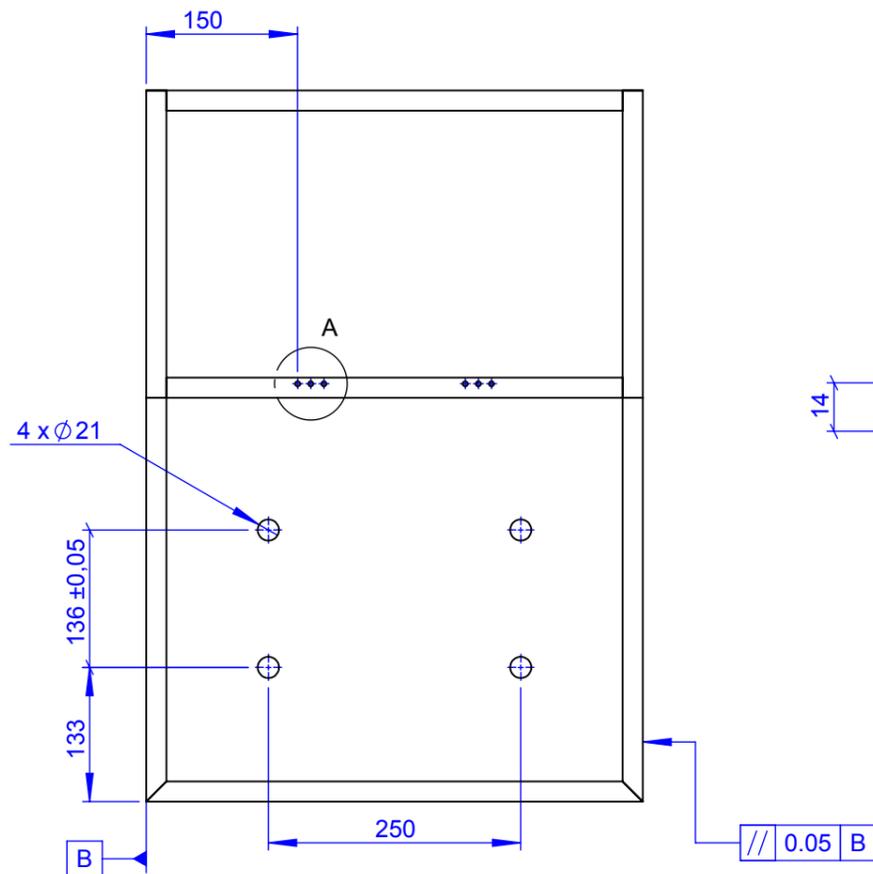


VISTA ISOMÉTRICA
ESCALA: 1:10

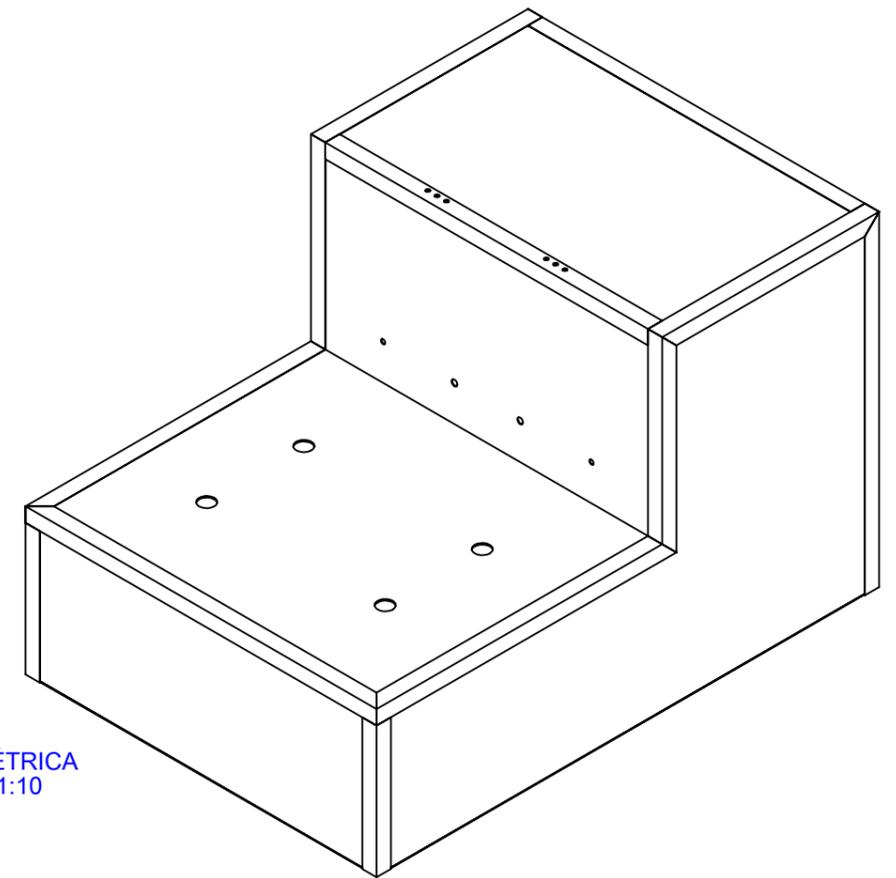
				TOLERANCIA:	PESO:	MATERIAL:		
				±1	16.6 Kg	ASTM A36		
				FECHA	NOMBRE	TÍTULO:		ESCALA:
				DIBUJO: 16/04/2020	Los Autores	Esqueleto de la estructura central		1:10
				REVISO: 16/04/2020	Ing. López G. Msc.			
				APROBO: 16/04/2020	Ing. López G. Msc.			
				U.T.A.		N.º DE LAMINA		REGISTRO:
				INGENIERIA MECANICA		HOJA 8 DE 18		
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:			SUSTITUCION:		



SECCIÓN A-A 115
ESCALA: 1:10



VISTA ISOMÉTRICA
ESCALA: 1:10



				TOLERANCIA:	PESO:	MATERIAL:		
				± 1	5.7 Kg	Varios		
				FECHA	NOMBRE	TÍTULO:		
				DIBUJO: 16/04/2020	Los Autores	Cubierta de la estructura central		
				REVISO: 16/04/2020	Ing. López G. Msc.	ESCALA:		
				APROBO: 16/04/2020	Ing. López G. Msc.	1:10		
				U.T.A.		N.º DE LAMINA		REGISTRO:
				INGENIERIA MECANICA		HOJA 9 DE 18		
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:	SUSTITUCION:				

1

2

3

4

A

// 0.5 A

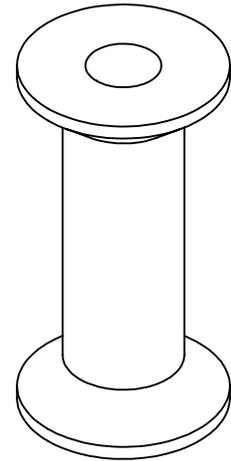
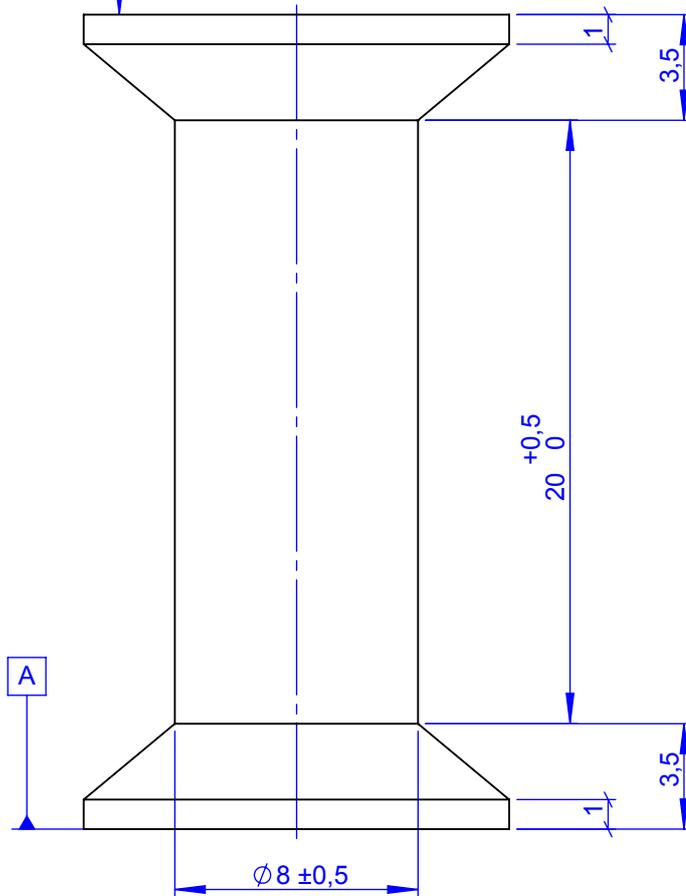
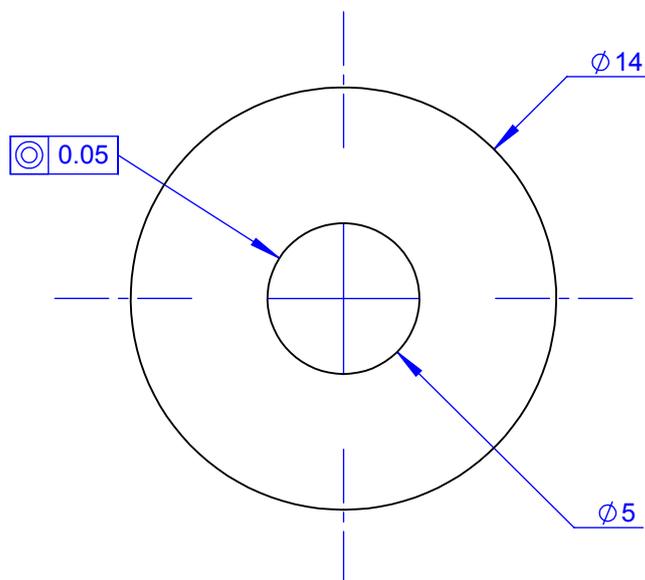
N7 TORNEADO

B

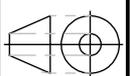
C

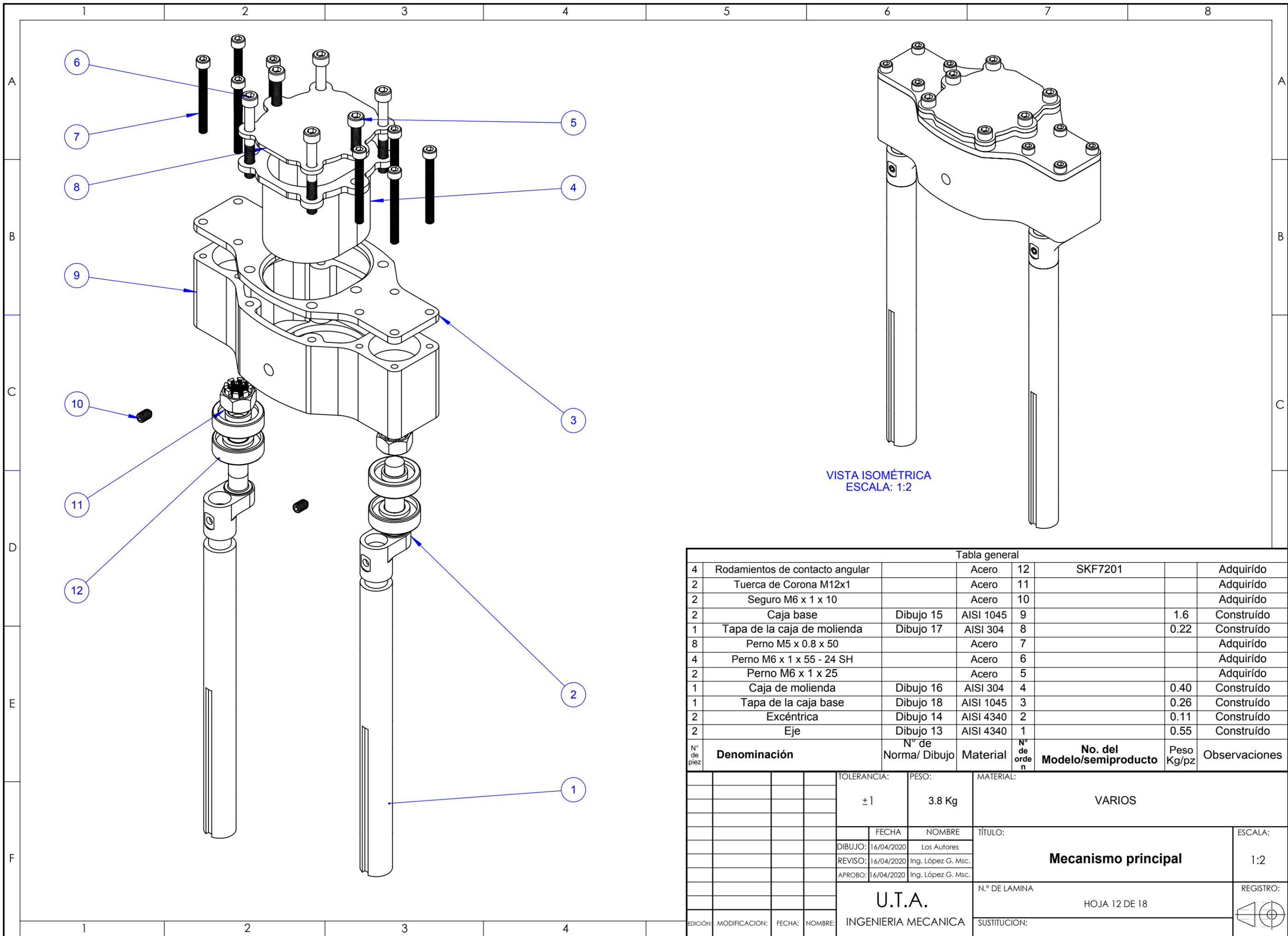
D

E

VISTA ISOMÉTRICA
ESCALA: 2:1

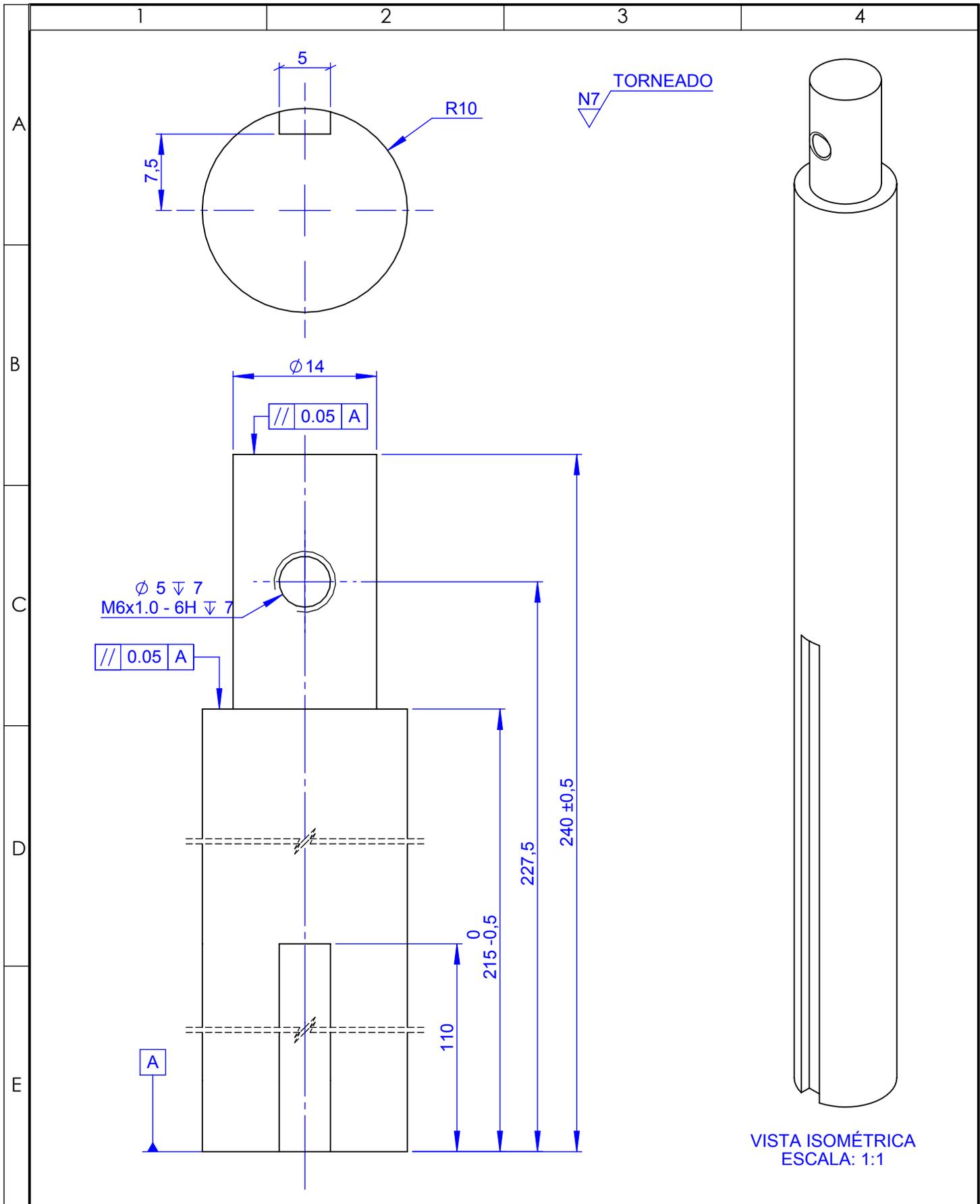
				TOLERANCIA: ± 1	PESO: 0.01 Kg	MATERIAL: AISI 1018	
						TÍTULO: Rodillo tensor	ESCALA: 5:1
				DIBUJO: 16/04/2020	NOMBRE: Los Autores		
				REVISO: 16/04/2020	Ing. López G. Msc.		
				APROBO: 16/04/2020	Ing. López G. Msc.		
				U.T.A. INGENIERIA MECANICA		N.º DE LAMINA HOJA 11 DE 18	REGISTRO:
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:			SUSTITUCION:	



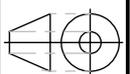


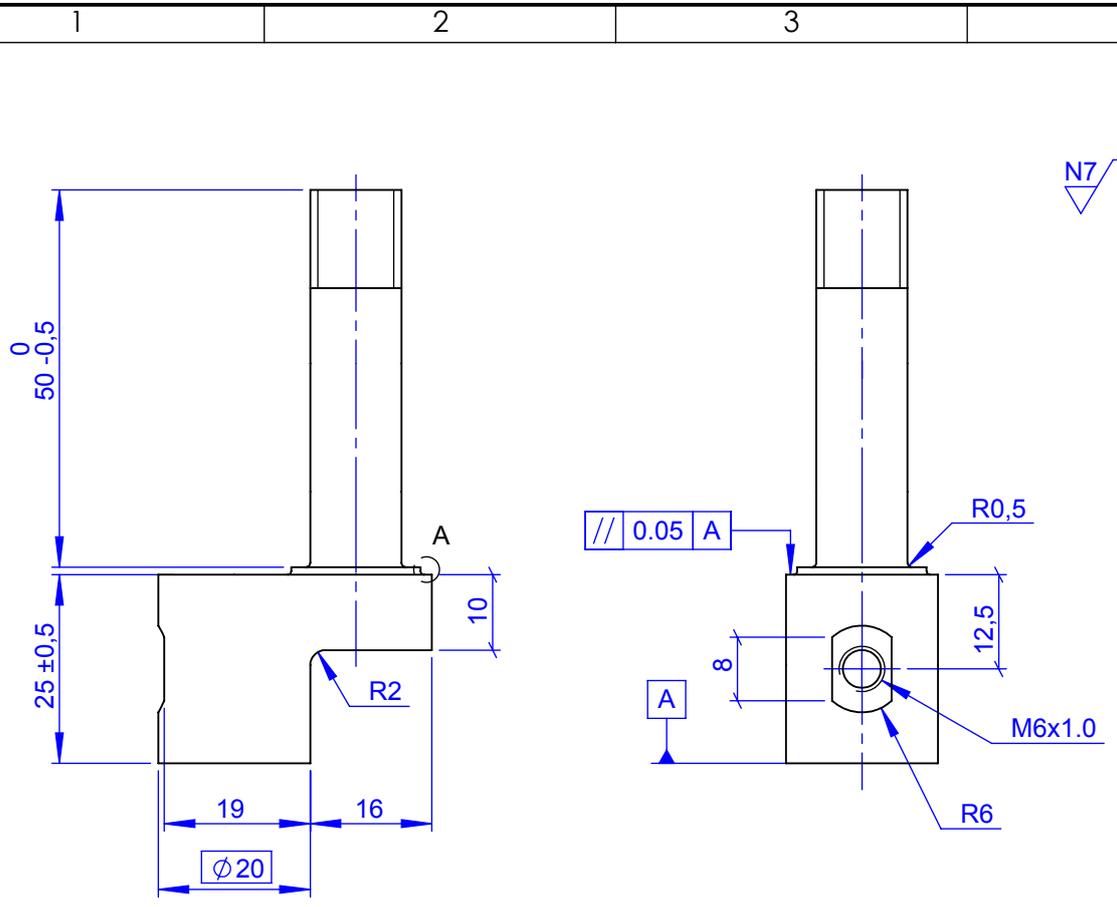
VISTA ISOMÉTRICA
ESCALA: 1:2

Tabla general							
N° de pieza	Denominación	N° de Norma/ Dibujo	Material	N° de orden	No. del Modelo/semiproducto	Peso Kg/pz	Observaciones
4	Rodamientos de contacto angular		Acero	12	SKF7201		Adquirido
2	Tuerca de Corona M12x1		Acero	11			Adquirido
2	Seguro M6 x 1 x 10		Acero	10			Adquirido
2	Caja base	Dibujo 15	AISI 1045	9		1.6	Construido
1	Tapa de la caja de molienda	Dibujo 17	AISI 304	8		0.22	Construido
8	Perno M5 x 0.8 x 50		Acero	7			Adquirido
4	Perno M6 x 1 x 55 - 24 SH		Acero	6			Adquirido
2	Perno M6 x 1 x 25		Acero	5			Adquirido
1	Caja de molienda	Dibujo 16	AISI 304	4		0.40	Construido
1	Tapa de la caja base	Dibujo 18	AISI 1045	3		0.26	Construido
2	Excéntrica	Dibujo 14	AISI 4340	2		0.11	Construido
2	Eje	Dibujo 13	AISI 4340	1		0.55	Construido
		TOLERANCIA: ± 1		PESO: 3.8 Kg		MATERIAL: VARIOS	
		DIBUJO: 16/04/2020 Los Autores		REVISO: 16/04/2020 Ing. López G. Msc.		APROBO: 16/04/2020 Ing. López G. Msc.	
		U.T.A. INGENIERIA MECANICA		N.º DE LAMINA: HOJA 12 DE 18		REGISTRO:	
		EDICIÓN: MODIFICACION: FECHA: NOMBRE:		TÍTULO: Mecanismo principal		ESCALA: 1:2	

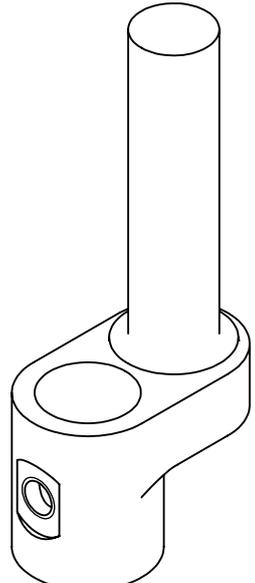
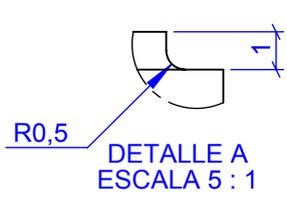
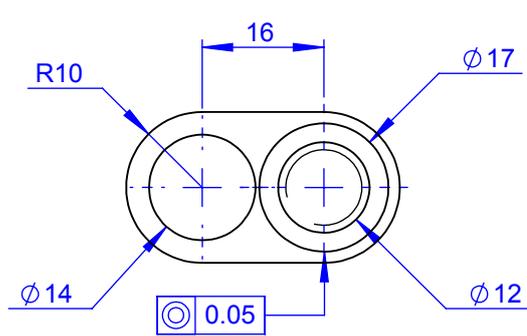


				TOLERANCIA: ± 1	PESO: 0.55 Kg	MATERIAL: AISI 4340	
						TÍTULO: Eje	ESCALA: 2:1
				FECHA	NOMBRE		
				DIBUJO: 16/04/2020	Los Autores		
				REVISO: 16/04/2020	Ing. López G. Msc.		
				APROBO: 16/04/2020	Ing. López G. Msc.		
				U.T.A. INGENIERIA MECANICA		N.º DE LAMINA HOJA 13 DE 18	REGISTRO:
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:			SUSTITUCION:	



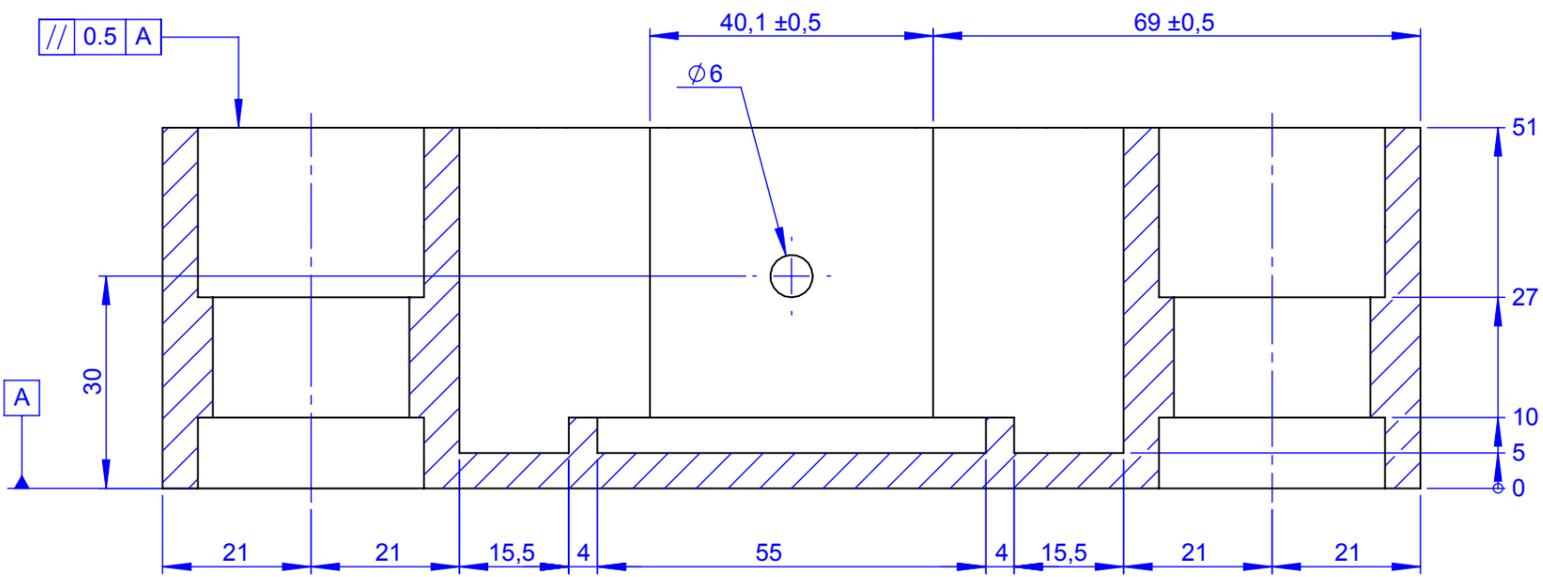


N7 FRESADO



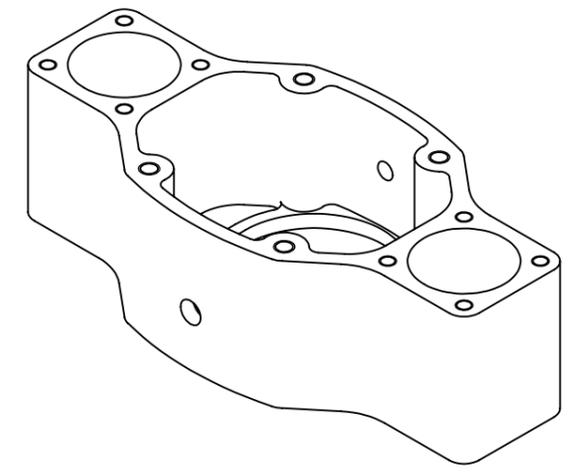
VISTA ISOMÉTRICA
ESCALA: 1:1

				TOLERANCIA: ±1	PESO: 0.11 Kg	MATERIAL: AISI 4340	
				FECHA	NOMBRE	TÍTULO: Excéntrica	ESCALA: 1:1
				DIBUJO: 16/04/2020	Los Autores		
				REVISO: 16/04/2020	Ing. López G. Msc.		
				APROBO: 16/04/2020	Ing. López G. Msc.	N.º DE LAMINA HOJA 14 DE 18	REGISTRO:
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:	U.T.A. INGENIERIA MECANICA		SUSTITUCION:	

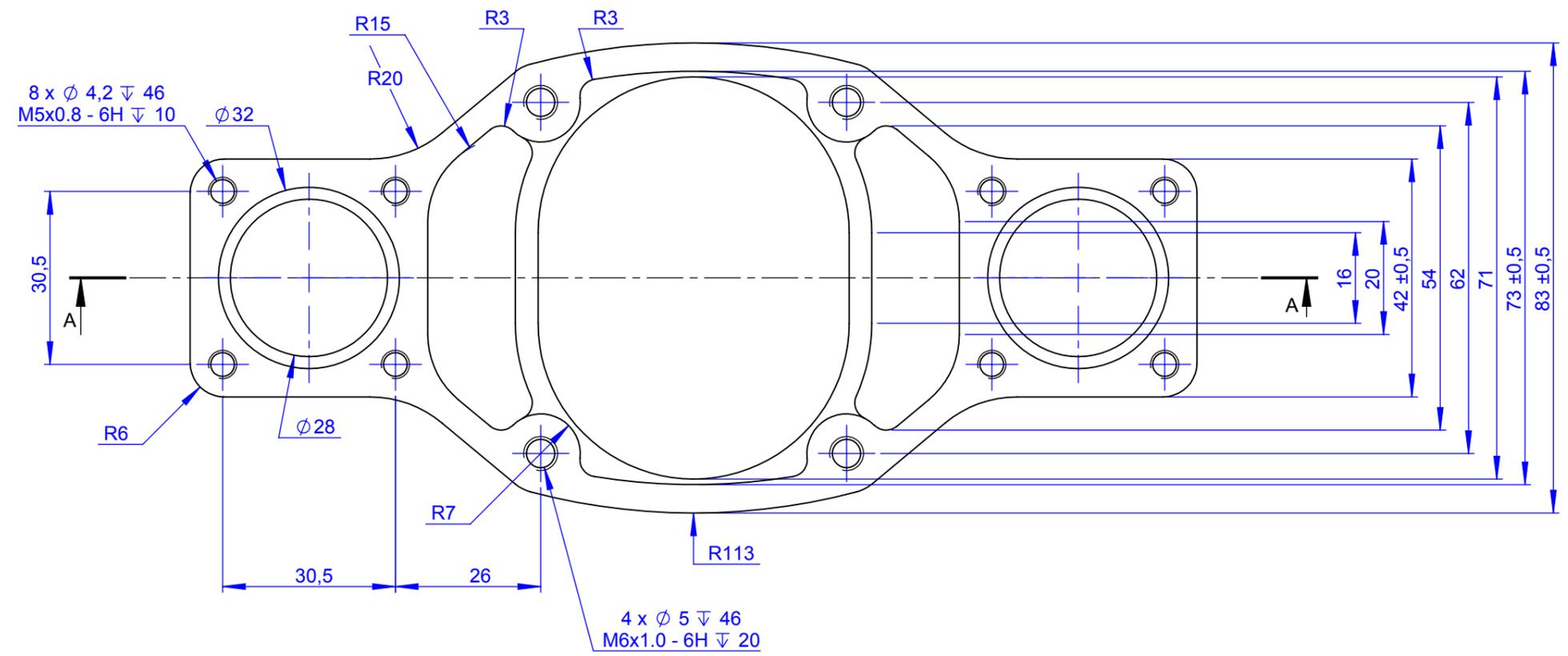


SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 1

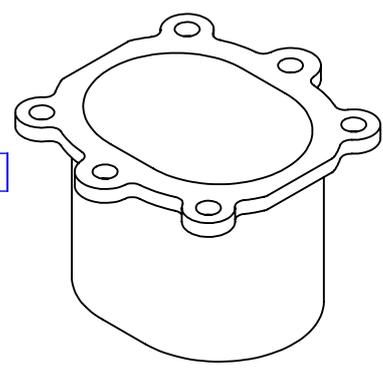
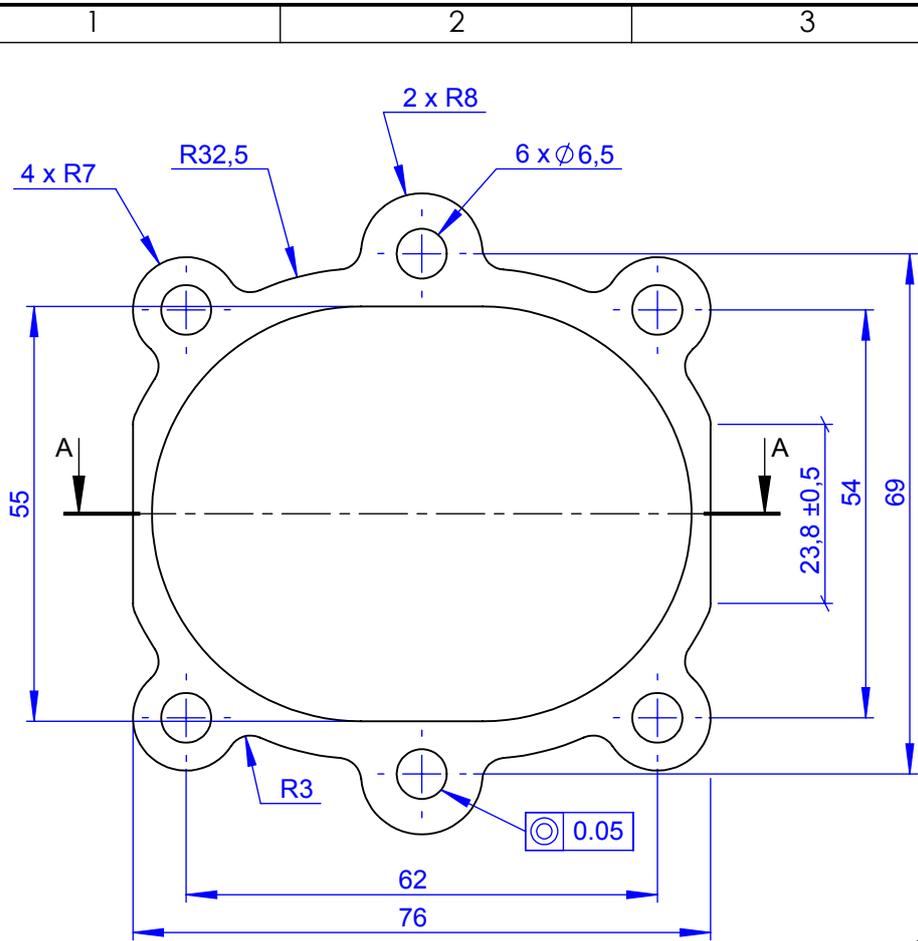
N7 FRESADO



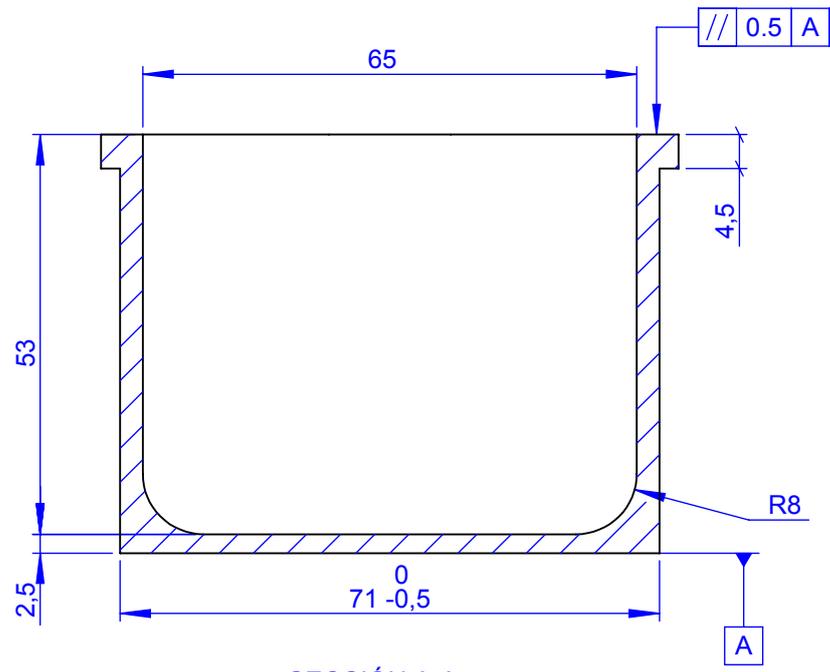
VISTA ISOMÉTRICA
ESCALA: 1:2



				TOLERANCIA:	PESO:	MATERIAL:		
				±1	1.6 Kg	AISI 1045		
				FECHA	NOMBRE	TÍTULO:		ESCALA:
				DIBUJO: 16/04/2020	Los Autores	Caja base		1:1
				REVISO: 16/04/2020	Ing. López G. Msc.			
				APROBO: 16/04/2020	Ing. López G. Msc.			
				U.T.A.		N.º DE LAMINA	REGISTRO:	
				INGENIERIA MECANICA		HOJA 15 DE 18		
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:			SUSTITUCION:		

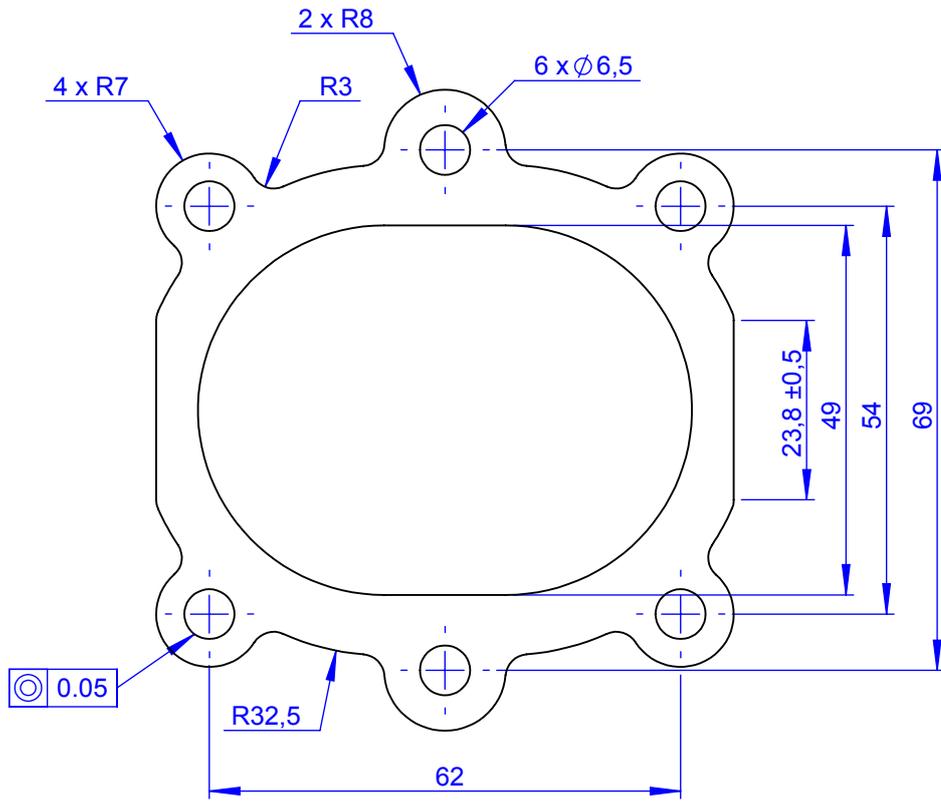


VISTA ISOMÉTRICA
ESCALA: 1:2

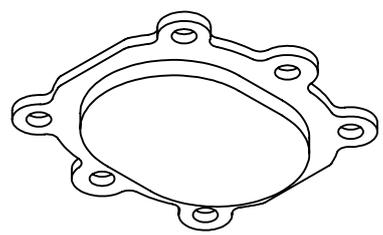
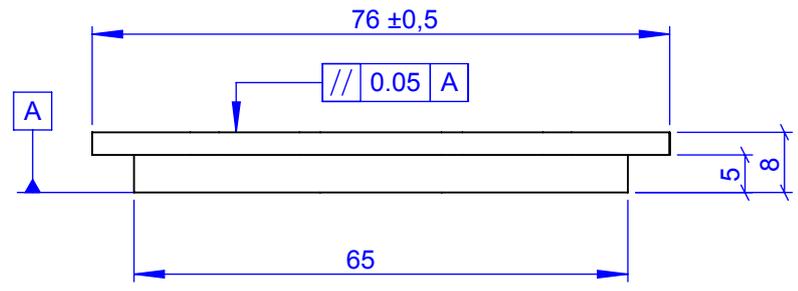


SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 1

				TOLERANCIA: ± 1	PESO: 0.40 Kg	MATERIAL: AISI 304	
				FECHA	NOMBRE	TÍTULO: Caja de molienda	ESCALA: 1:1
				DIBUJO: 16/04/2020	Los Autores		
				REVISO: 16/04/2020	Ing. López G. Msc.		
				APROBO: 16/04/2020	Ing. López G. Msc.	N.º DE LAMINA HOJA 16 DE 18	REGISTRO:
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:	U.T.A. INGENIERIA MECANICA		SUSTITUCION:	

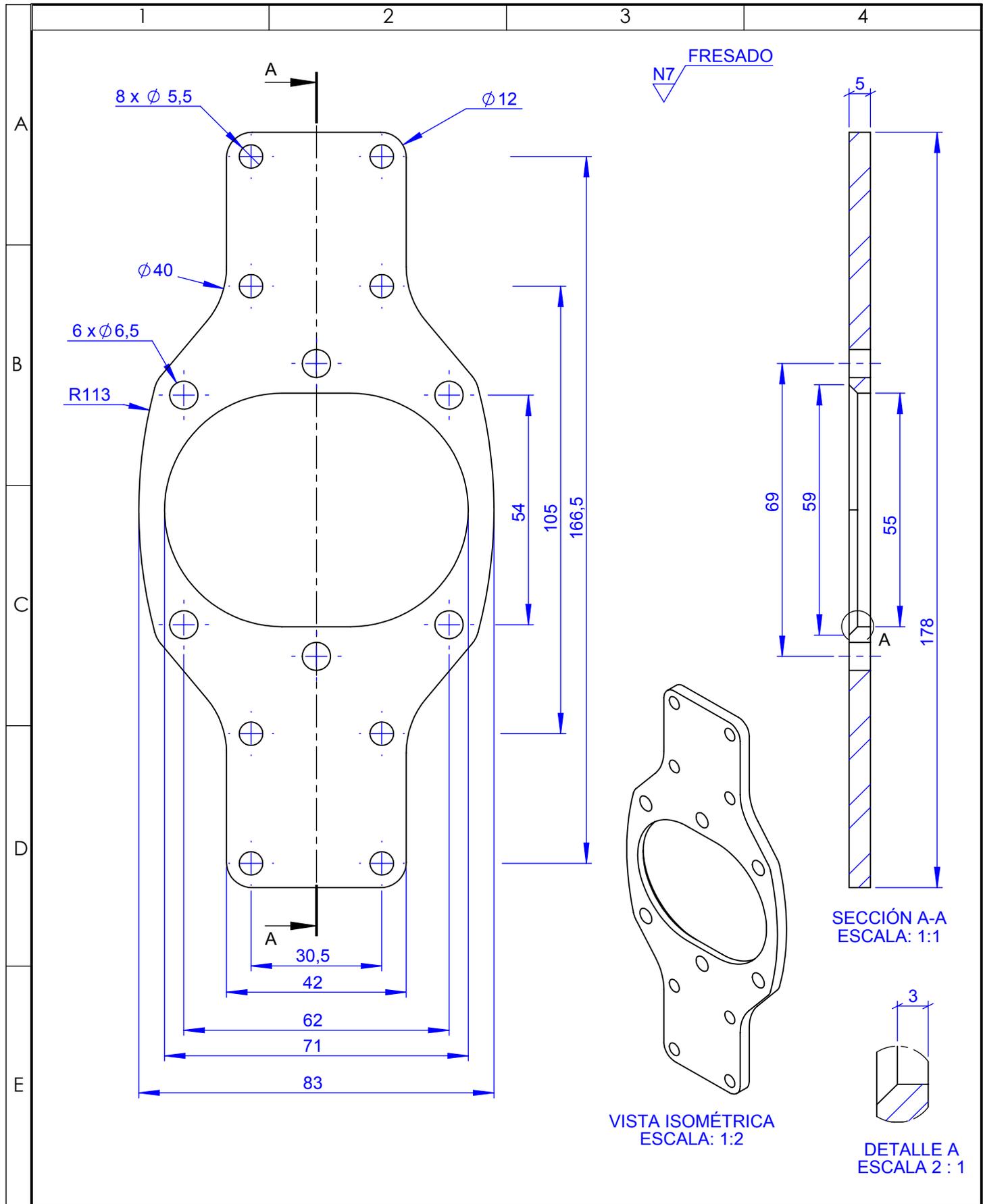


N7 FRESADO



VISTA ISOMÉTRICA
ESCALA: 1:2

				TOLERANCIA:	PESO:	MATERIAL:		
				±1	0.22 Kg	AISI 304		
				FECHA	NOMBRE	TÍTULO:	ESCALA:	
				DIBUJO: 16/04/2020	Los Autores		Tapa de la caja de molienda	1:1
				REVISO: 16/04/2020	Ing. López G. Msc.			REGISTRO:
				APROBO: 16/04/2020	Ing. López G. Msc.			
				U.T.A. INGENIERIA MECANICA		N.º DE LAMINA	REGISTRO:	
						HOJA 17 DE 18		
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:			SUSTITUCION:		



				TOLERANCIA: ±1	PESO: 0.26 Kg	MATERIAL: AISI 1045	
				FECHA	NOMBRE	TÍTULO:	
				DIBUJO: 16/04/2020	Los Autores	Tapa de la caja base	
				REVISO: 16/04/2020	Ing. López G. Msc.		ESCALA: 1:1
				APROBO: 16/04/2020	Ing. López G. Msc.		
				U.T.A. INGENIERIA MECANICA		N.º DE LAMINA HOJA 18 DE 18	
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:			SUSTITUCION:	REGISTRO:

