



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PARA LA OBTENCIÓN DE POLVO METALICO A PARTIR DE LA VIRUTA GENERADA DE LOS PROCESOS DE MECANIZADO DEL CIRT UNIDAD DE NEGOCIOS HIDROAGOYAN”

**GUSQUI MARTINEZ ESTEFANIA PAULINA
RIVERA ENRIQUEZ MARCO IVAN**

TRABAJO DE TITULACIÓN TIPO: PROPUESTA TECNOLÓGICA

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

RIOBAMBA – ECUADOR

2018

ESPOCH

Facultad de Mecánica

APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

2017-04-17

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparado por:

GUSQUI MARTÍNEZ ESTEFANÍA PAULINA

Titulado:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PARA LA
OBTENCIÓN DE POLVO METALICO A PARTIR DE LA VIRUTA
GENERADA DE LOS PROCESOS DE MECANIZADO DEL CIRT UNIDAD
DE NEGOCIOS HIDROAGOYÁN”**

Sea aceptado como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Ing. Carlos Santillán Mariño
DECANO FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Javier Enrique Orna Chávez.
DIRECTOR

Ing. Julio Cesar Villavicencio Cevallos.
MIEMBRO

ESPOCH

Facultad de Mecánica

APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

2017-04-17

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparado por:

MARCO IVÁN RIVERA ENRÍQUEZ

Titulado:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PARA LA
OBTENCIÓN DE POLVO METALICO A PARTIR DE LA VIRUTA
GENERADA DE LOS PROCESOS DE MECANIZADO DEL CIRT UNIDAD
DE NEGOCIOS HIDROAGOYÁN”**

Sea aceptado como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Ing. Carlos Santillán Mariño
DECANO FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Javier Enrique Orna Chávez.
DIRECTOR

Ing. Julio Cesar Villavicencio Cevallos
MIEMBRO

ESPOCH

Facultad de Mecánica

EXAMINACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: GUSQUI MARTINEZ ESTEFANIA PAULINA

TRABAJO DE TITULACIÓN: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PARA LA OBTENCIÓN DE POLVO METALICO A PARTIR DE LA VIRUTA GENERADA DE LOS PROCESOS DE MECANIZADO DEL CIRT UNIDAD DE NEGOCIOS HIDROAGOYAN”

Fecha de Examinación: 2018-11-06

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Edwin Viteri PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Javier Orna DIRECTOR			
Ing. Julio Villavicencio MIEMBRO			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Ángel Guamán
**PRESIDENTE TRIB. DEFENSA
DEDICATORIA**

ESPOCH

Facultad de Mecánica

EXAMINACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: RIVERA ENRIQUEZ MARCO IVAN

TRABAJO DE TITULACIÓN: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PARA LA OBTENCIÓN DE POLVO METALICO A PARTIR DE LA VIRUTA GENERADA DE LOS PROCESOS DE MECANIZADO DEL CIRT UNIDAD DE NEGOCIOS HIDROAGOYAN”

Fecha de Examinación: 2018-11-06

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Edwin Viteri PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Javier Orna DIRECTOR			
Ing. Julio Villavicencio MIEMBRO			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Ángel Guamán
**PRESIDENTE TRIB. DEFENSA
DEDICATORIA**

DERECHOS DE AUTORÍA

El Trabajo de Titulación que presento, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad del autor. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Gusqui Martínez Estefanía Paulina

Rivera Enríquez Marco Iván

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Nosotros, Estefanía Paulina Gusqui Martínez y Marco Iván Rivera Enríquez declaramos que el presente Trabajo de Titulación es de nuestra autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autores, asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación.

Gusqui Martínez Estefanía Paulina

Rivera Enríquez Marco Iván

DEDICATORIA

Con todo mi corazón dedico el presente trabajo de titulación y toda mi carrera estudiantil a Dios, quien día a día me dio fortaleza y perseverancia para seguir adelante por intervención de mi madre Mercedes de Jesús Molina.

Mi sacrificio, esfuerzo y dedicación se lo dedico al ser más maravillo que tengo en mi vida, a mi madre Fany Martínez, a mis hermanas por quienes lucho día a día para que reciban el mejor ejemplo del mundo Lesny y Tatiana, a mi hermosa sobrina Isabella, a mi princesa Lulú mi fiel compañera, a mi tío Fredy Martínez y a mi abuelito Arturo Martínez, mi gran ejemplo.

Estefanía Paulina Gusqui Martínez

Para mis padres Marco y Betty por ser la fuente de amor, paciencia y sabiduría en mí caminar.

Para mi familia y amigos que me brindaron aliento y apoyo los cuales han sido y serán fundamentales en mi vida.

M. I. Rivera Enríquez

AGRADECIMIENTO

Infinitas gracias a mi madre, mi motor, el ser que lucho para que ahora consiga este enorme logro, a toda mi familia por su gran apoyo, a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica por brindarme la oportunidad de aprender y crecer en conocimientos y como persona.

Estefanía Paulina Gusqui Martínez

Mis más sinceros agradecimientos a todos mis maestros en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica; gracias por todas las sabias enseñanzas impartidas en todo este tiempo.

A mis padres por su apoyo incondicional, por sus consejos, por su fuerza para trabajar y de esta manera ayudarme a cumplir una meta más en mi vida.

Marco Iván Rivera Enríquez

CONTENIDO

Pág

RESUMEN

ABSTRACT

CAPITULO I

1.1	Antecedentes.....	1
1.2	Formulación del problema.	3
1.3	Alcance.....	3
1.4	Justificación.....	3
<i>1.4.1</i>	<i>Justificación Práctica.....</i>	<i>3</i>
<i>1.4.2</i>	<i>Justificación teórica.</i>	<i>4</i>
<i>1.4.3</i>	<i>Justificación Metodológica.</i>	<i>4</i>
1.5	Objetivos.	4
<i>1.5.1</i>	<i>Objetivo general </i>	<i>4</i>
<i>1.5.2</i>	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>4</i>
2.	MARCO REFERENCIAL PROCESOS DE OBTENCIÓN DE POLVO	6
2.1	La Pulvimetalurgia, polvos metálicos y sus características.....	6
2.2	Molienda mecánica	9
2.3	VARIABLES OPERATIVAS DEL MOLINO.....	12
2.4	Tipos de viruta en el mecanizado.....	13
2.5	Consideraciones teóricas para el diseño	19
<i>2.5.1</i>	<i>Metodología, fases y etapas del diseño.....</i>	<i>19</i>
<i>2.5.2</i>	<i>Herramientas para el diseño concurrente - Casa de calidad</i>	<i>22</i>
2.6	Criterios del diseño mecánico.....	24
<i>2.6.1</i>	<i>Diseño a carga estática.</i>	<i>24</i>
<i>2.6.2</i>	<i>Diseño a fatiga.</i>	<i>26</i>
2.7	Herramientas y recursos de diseño	28
3.	PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL DISEÑO DEL PROTOTIPO..	29
3.1	Definición del producto.....	29

3.1.1	<i>Desarrollo de la función de la calidad (QFD).</i>	29
3.1.2	<i>Resultados de la matriz QFD.</i>	35
3.2	Diseño conceptual.	36
3.2.1	<i>Estructura funcional.</i>	36
3.2.2	<i>Estructura modular.</i>	37
3.3	Selección de alternativas.	40
3.4	Características de la máquina de molienda seleccionada.	52
4.	DISEÑO DEL PROTOTIPO	54
4.1	Dimensionamiento del tanque de molienda.	54
4.2	Fuerza requerida para la molienda	58
4.2.1	<i>Simulación en ADAMS View.</i>	58
4.2.2	<i>Simulación en ANSYS</i>	60
4.3	Selección de la potencia necesaria.	69
4.3.1	<i>Momento de inercia del sistema de molienda con respecto al eje del tanque</i>	70
4.3.2	<i>Momento de inercia del tanque y contrapeso respecto al centro del eje</i>	70
4.3.3	<i>Aceleración angular del tanque.</i>	71
4.3.4	<i>Torque del tanque con respecto al centro.</i>	72
4.3.5	<i>Potencia necesaria para el tanque</i>	72
4.3.6	<i>Potencia necesaria para el tanque con respecto al centro.</i>	72
4.3.7	<i>Potencia total necesaria para el movimiento del mecanismo</i>	73
4.4	Diseño de engranajes planetarios.	73
4.4.1	<i>Calculo fuerzas resultantes en el diente</i>	76
4.4.2	<i>Fuerza tangencial</i>	77
4.4.3	<i>Fuerza radial.</i>	77
4.4.4	<i>Fuerza resultante</i>	77
4.4.5	<i>Análisis de esfuerzo de fatiga por flexión.</i>	77
4.4.6	<i>Análisis de la flexión.</i>	78
4.4.7	<i>Análisis a desgaste superficial</i>	81
4.5	Cálculo de la fuerza centrípeta.	82
4.6	Selección de poleas y bandas	84
4.6.1	<i>Relación de transmisión.</i>	84
4.6.2	<i>Potencia de diseño.</i>	84
4.6.3	<i>Selección del perfil de la banda</i>	85
4.6.4	<i>Diámetros de poleas</i>	85
4.6.5	<i>Distancia entre centros</i>	86
4.6.6	<i>Longitud de la correa</i>	86
4.6.7	<i>Arco de contacto.</i>	87

4.6.8	<i>Número de correas necesarias</i>	87
4.6.9	<i>Factor de seguridad</i>	88
4.6.10	<i>Velocidad</i>	88
4.6.11	<i>Tensión debido a fuerza centrífuga</i>	88
4.6.12	<i>Tensiones en el lado tirante y lado flojo</i>	89
4.7	Diseño del eje del tanque de molienda	90
4.7.1	<i>Análisis estático</i>	91
4.7.2	<i>Análisis dinámico</i>	92
4.7.3	<i>Recalculo del límite de fatiga</i>	93
4.7.4	<i>Análisis por MEF del eje</i>	98
4.7.5	<i>Diseño de chaveta en el eje del tanque de molienda</i>	101
4.7.6	<i>Selección de rodamientos para eje de tanque</i>	103
4.8	Diseño caja de rodamientos para el eje del tanque de molienda	106
4.8.1	<i>Análisis estático</i>	107
4.8.2	<i>Análisis dinámico</i>	108
4.8.3	<i>Recalculo del límite de fatiga</i>	108
4.8.4	<i>Análisis por MEF de la caja de rodamientos</i>	111
4.8.5	<i>Selección de pernos de la caja de rodamientos</i>	111
4.9	Diseño de la base del tanque de molienda	115
4.9.1	<i>Análisis estático</i>	116
4.9.2	<i>Análisis dinámico</i>	117
4.10	Diseño de Soportes de fijación	118
4.10.1	<i>Recalculo del límite de fatiga</i>	121
4.10.2	<i>Selección de pernos para los soportes de fijación</i>	123
4.11	Diseño del brazo	124
4.12	Diseño del eje principal de transmisión	129
4.12.1	<i>Análisis estático</i>	130
4.12.2	<i>Análisis dinámico</i>	131
4.12.3	<i>Selección de rodamientos para eje de transmisión</i>	132
4.13	Diseño caja de rodamientos para el eje de transmisión	133
4.13.1	<i>Análisis estático</i>	134
4.13.2	<i>Análisis dinámico</i>	135
4.14	Dimensionamiento del contrapeso	135
4.15	Selección del motor	136
4.16	Diseño de la estructura para el prototipo	136
4.16.1	<i>Cálculo de cargas en la estructura</i>	137
5.	CONSTRUCCION Y MONTAJE DEL PROTOTIPO	140

5.1	Máquinas y herramientas.....	140
5.2	Componentes del prototipo.	141
5.3	Material de construcción de los componentes del prototipo.	142
5.4	Tiempo de construcción para cada sistema.	144
5.5	Flujograma para la construcción.....	148
5.6	Montaje del molino planetario de bolas.	151
5.7	Flujograma del montaje del molino planetario de bolas.	154
5.8	Pruebas del molino planetario de bolas.....	155
5.8.1	<i>Viruta de Bronce</i>	157
5.8.2	<i>Viruta del acero de transmisión AISI 1018.</i>	163
5.8.3	<i>Viruta acero ASTM A-743</i>	170
5.9	Análisis de defectos en bolas y tanque posterior a la molienda	178
5.10	Verificación de los requerimientos.....	179
6.	MANUAL DE OPERACIONES, Y ANALISIS DE COSTOS	181
6.1	Manual de operaciones.	181
6.1.1	<i>Características principales del molino planetario de bolas.</i>	181
6.1.2	<i>Requisitos necesarios para el funcionamiento del molino.</i>	182
6.1.3	<i>Instrucciones antes de la molienda.</i>	182
6.1.4	<i>Puesta en marcha.</i>	182
6.2	Pasos a seguir para la molienda y tamización.....	185
6.3	Manual de mantenimiento del molino planetario de bolas.	187
6.4	Riesgos y medidas preventivas.	188
6.5	Análisis de costos del prototipo de molino planetario de bolas.....	190
6.5.1	<i>Costos directos.</i>	190
6.5.2	<i>Costo total.</i>	195
	CAPITULO VII	196
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	196
7.1	Conclusiones.	196
7.2	Recomendaciones.	198

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1-2: Ventajas y desventajas de la metalurgia de polvos.</i>	7
<i>Tabla 2-2: Tipos de molienda. Húmeda y seca.</i>	13
<i>Tabla 3-2: Relación entre el material ISO y la viruta en el mecanizado.</i>	15
<i>Tabla 4-2: Propiedades mecánicas y composición del acero ASTM A743 CA6NM</i>	16
<i>Tabla 5-2: Propiedades mecánicas y composición del acero AISI 1018.</i>	17
<i>Tabla 6-2: Propiedades mecánicas y composición del bronce SAE 40.</i>	18
<i>Tabla 1-3 : Molinos Retsch.</i>	32
<i>Tabla 2-3: Molinos Fritsch.</i>	33
<i>Tabla 3-3: Molinos Fritsch.(Continuación)</i>	34
<i>Tabla 4-3: Molino attritor – Union process.</i>	34
<i>Tabla 5-3: Especificaciones técnicas de la máquina</i>	36
<i>Tabla 6-3: Análisis morfológico de las alternativas</i>	40
<i>Tabla 7-3: Ventajas y desventajas del molino de bolas de alta energía.</i>	41
<i>Tabla 8-3: Ventajas y desventajas del molino atritor.</i>	43
<i>Tabla 9-3: Ventajas y desventajas del molino planetario.</i>	44
<i>Tabla 10-3: Valores utilizados en el método de criterios ponderados.</i>	45
<i>Tabla 11-3: Códigos para las alternativas de diseño</i>	45
<i>Tabla 12-3: Criterio de evaluación de soluciones mediante ponderaciones.</i>	46
<i>Tabla 13-3: Evaluación de las soluciones respecto al criterio de fabricación</i>	47
<i>Tabla 14-3: Evaluación de las soluciones respecto al criterio de Costo.</i>	47
<i>Tabla 15-3: Tecnología de la empresa.</i>	48
<i>Tabla 16-3: Tiempo de molienda.</i>	48
<i>Tabla 17-3: Evaluación de las soluciones respecto al criterio de tiempo de molienda.</i>	49
<i>Tabla 18-3: Granulometría de acuerdo al tipo de molino.</i>	49
<i>Tabla 19-3: Evaluación de las soluciones respecto al criterio de granulometría.</i>	49
<i>Tabla 20-3: Evaluación de las soluciones respecto al criterio de materiales de construcción.</i>	50
<i>Tabla 21-3: Evaluación de las soluciones para obtención de materiales metálicos.</i>	50
<i>Tabla 22-3: Evaluación de las soluciones respecto al criterio de granulometría.</i>	51
<i>Tabla 23-3: Pre diseño de la máquina seleccionada.</i>	52
<i>Tabla 1-4: Masa de los elementos en el sistema de molienda.</i>	57
<i>Tabla 2-4: Niveles de calidad de malla.</i>	64
<i>Tabla 3-4: Resumen de resultados obtenidos en ANSYS.</i>	68
<i>Tabla 4-4: Resumen de resultados obtenidos en ANSYS(Continuación)</i>	69
<i>Tabla 5-4: Ángulos de presión y número mínimo de dientes</i>	74
<i>Tabla 6-4: Resumen cálculo geométrico de los engranajes.</i>	75

<i>Tabla 7-4: Datos para la selección de la polea.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 8-4: Factor de carga</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 9-4: propiedades mecánicas acero AISI 4140.....</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 10-4: Factor de modificación de la condición superficial</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 11-4: Factor de Tamaño.....</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 12-4: Factor de confiabilidad.....</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 13-4: Dimensiones de chaveta de acuerdo al diámetro de eje</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 14-4: Dimensiones rodamientos NTN</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 15-4: Carga radial dinámica equivalente</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 16-4: Propiedades mecánicas acero AISI 1045.....</i>	<i>107</i>
<i>Tabla 17-4: Propiedades mecánicas acero AISI 304.....</i>	<i>116</i>
<i>Tabla 18-4: Propiedades mecánicas acero AISI 1045.....</i>	<i>120</i>
<i>Tabla 19-4: Rodamientos de bolas NTN</i>	<i>133</i>
<i>Tabla 20-4: Resumen valores de centro de gravedad en Y masa del sistema de molienda y contrapeso</i>	<i>136</i>
<i>Tabla 21-4: Selección del Motor eléctrico Weg</i>	<i>136</i>
<i>Tabla 22-4: Masa de los componentes en el prototipo</i>	<i>137</i>
<i>Tabla 23-4: Masa de la corona</i>	<i>138</i>
<i>Tabla 1-5: Sistemas del molino planetario de bolas.....</i>	<i>141</i>
<i>Tabla 1-5: Sistemas del molino planetario de bolas (Continuación)</i>	<i>142</i>
<i>Tabla 2-5: Materiales de construcción y cantidad de los elementos del prototipo.....</i>	<i>143</i>
<i>Tabla 3-5 : Tiempos de construcción del molino planetario de bolas.....</i>	<i>144</i>
<i>Tabla 4-5 : Tiempos de construcción del molino planetario de bolas (continuación).....</i>	<i>145</i>
<i>Tabla 5-5 : Tiempos de construcción del molino planetario de bolas (continuación).....</i>	<i>146</i>
<i>Tabla 6-5 : Tiempos de construcción del molino planetario de bolas (continuación).....</i>	<i>147</i>
<i>Tabla 7-5 : Tiempos de construcción del molino planetario de bolas (continuación).....</i>	<i>148</i>
<i>Tabla 8-5 : Montaje del sistema estructural.....</i>	<i>151</i>
<i>Tabla 9-5: Montaje del sistema motriz.....</i>	<i>151</i>
<i>Tabla 10-5: Montaje del sistema motriz. (continuación).....</i>	<i>152</i>
<i>Tabla 11-5: Montaje del sistema de alimentación y seguridad del tanque de molienda.....</i>	<i>152</i>
<i>Tabla 12-5 : Montaje del sistema de transmisión.....</i>	<i>153</i>
<i>Tabla 13-5 : Montaje del sistema eléctrico</i>	<i>153</i>
<i>Tabla 14-5 : Tiempo empleado en operaciones de estética.</i>	<i>153</i>
<i>Tabla 15-5: Tiempo total empleado en la construcción del molino planetario.</i>	<i>154</i>
<i>Tabla 16-5: fórmulas de las gráficas de control de medias y rangos.....</i>	<i>155</i>
<i>Tabla 17-5: Datos de la viruta antes de la molienda.....</i>	<i>157</i>
<i>Tabla 18-5: Proceso de molienda de bronce.....</i>	<i>158</i>
<i>Tabla 19-5: Resultado del tamizado.</i>	<i>159</i>
<i>Tabla 20-5: Graficas de control X - R</i>	<i>161</i>
<i>Tabla 21-5: Estudio estadístico del tamaño de viruta de bronce</i>	<i>162</i>
<i>Tabla 22-5: Resultados de molienda de bronce.</i>	<i>163</i>

<i>Tabla 23-5: Datos de la viruta de transmisión antes de la molienda.....</i>	<i>163</i>
<i>Tabla 24-5: Proceso de molienda del acero de transmisión AISI 1018.</i>	<i>164</i>
<i>Tabla 25-5: Resultado del tamizado.</i>	<i>166</i>
<i>Tabla 26-5: Graficas de control X – R, polvo de acero de transmisión</i>	<i>168</i>
<i>Tabla 27-5: Estudio estadístico del tamaño de viruta del acero AISI 1018.....</i>	<i>169</i>
<i>Tabla 28-5: Resultados de molienda Acero de transmisión 1018.</i>	<i>170</i>
<i>Tabla 29-5: Datos de la viruta antes de la molienda acero ASTM A-743.....</i>	<i>170</i>
<i>Tabla 30-5: Proceso de molienda del acero ASTM A743 CA 6 NM.</i>	<i>171</i>
<i>Tabla 31-5: Resultado del tamizado del acero ASTM A-743.</i>	<i>173</i>
<i>Tabla 32-5: Graficas de control X – R, polvo de acero inoxidable ASTM A-743.....</i>	<i>175</i>
<i>Tabla 33-5: Análisis estadístico del polvo de acero inoxidable ASTM A-743.</i>	<i>176</i>
<i>Tabla 34-5: Resultados de molienda Acero ASTM A743.</i>	<i>177</i>
<i>Tabla 35-5: Defectos en la bola de molienda.....</i>	<i>178</i>
<i>Tabla 36-5: Defectos en el tanque de molienda</i>	<i>179</i>
<i>Tabla 37-5: Verificación de los requerimientos del usuario.....</i>	<i>180</i>
<i>Tabla 38-5 : Verificación de los requerimientos del usuario.....</i>	<i>180</i>
<i>Tabla 1-6: Características principales del prototipo</i>	<i>181</i>
<i>Tabla 2-6: Tablero de control del molino planetario de bolas.</i>	<i>183</i>
<i>Tabla 3-6: Pasos para la molienda.....</i>	<i>185</i>
<i>Tabla 4-6: Pasos para la tamización del polvo metálico.</i>	<i>187</i>
<i>Tabla 5-6: Cronograma de mantenimiento.</i>	<i>188</i>
<i>Tabla 6-6: Costos de materia prima.</i>	<i>190</i>
<i>Tabla 7-6: Costos por el uso de máquinas y herramientas.</i>	<i>193</i>
<i>Tabla 8-6: Costos de mano de obra.</i>	<i>194</i>
<i>Tabla 9-6: Costos directos totales.</i>	<i>194</i>
<i>Tabla 10-6: Costos indirectos.....</i>	<i>194</i>
<i>Tabla 11-6: Costo total.</i>	<i>195</i>

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1-2: Molienda mecánica</i>	10
<i>Figura 2-2: Tamaño de la partícula por efecto de la molienda</i>	11
<i>Figura 3-2: Proceso de molienda</i>	11
<i>Figura 4-2: Viruta discontinua fragmentada</i>	13
<i>Figura 5-2: Viruta continua</i>	14
<i>Figura 6-2: Viruta de cizallamiento</i>	14
<i>Figura 7-2: Tipos de viruta según la Norma ISO 3685</i>	15
<i>Figura 8-2: Proceso de desbaste de un rodete Francis</i>	16
<i>Figura 9-2: Procesos, máquinas y viruta del mecanizado de acero de transmisión</i>	17
<i>Figura 10-2: Recolección de la viruta obtenida del mecanizado de bronce</i>	18
<i>Figura 11-2: Fases en el proceso de diseño</i>	20
<i>Figura 12-2: Etapas de diseño</i>	21
<i>Figura 13-2: Casa de calidad</i>	23
<i>Figura 1-3: Matriz QFD</i>	35
<i>Figura 2-3 : Análisis funcional – Nivel 0</i>	36
<i>Figura 3-3: Análisis funcional – Nivel I</i>	37
<i>Figura 4-3: Módulos del prototipo de molienda</i>	38
<i>Figura 5-3: Funciones del módulo de alimentación</i>	38
<i>Figura 6-3: Funciones del módulo de molienda</i>	39
<i>Figura 7-3: Funciones del módulo de tamización</i>	39
<i>Figura 8-3: Molino de bolas de alta energía</i>	41
<i>Figura 9-3: Elementos básicos de molino por atricción</i>	42
<i>Figura 10-3: Elementos básicos de molino planetario</i>	44
<i>Figura 1-4: Tapa del tanque de molienda</i>	55
<i>Figura 2-4: Dimensiones del tanque de molienda</i>	56
<i>Figura 3-4: Configuración bridas - Tanque</i>	56
<i>Figura 4-4: Pre diseño del sistema de molienda</i>	57
<i>Figura 5-4: Geometría en ADAMS View</i>	58
<i>Figura 6-4: Relaciones establecidas entre elementos</i>	59
<i>Figura 7-4: Medida de velocidad en el tanque de molienda</i>	59
<i>Figura 8-4: Movimiento de las bolas dentro del tanque de molienda</i>	60
<i>Figura 9-4: Medida de velocidad lineal en una bola</i>	60
<i>Figura 10-4: Modelo geométrico</i>	61
<i>Figura 11-4: Modelado de bola, viruta y tanque para simulación explícita</i>	61
<i>Figura 12-3: Propiedades del Tungsteno para el modelo Steinberg Guinan</i>	63

<i>Figura 13-4: Materiales explícitos para la simulación</i>	63
<i>Figura 14-4: Asignación de propiedades del material</i>	Fuente:
<i>Software ANSYS – Módulo Explicit Dynamics</i>	63
<i>Figura 15-4: Importación de modelo en ANSYS Design Modeler</i>	64
<i>Figura 16-4: Asignación de valores de coeficientes de fricción</i>	64
<i>Figura 17-4: Asignación de velocidad para la bola de molienda</i>	65
<i>Figura 18-4: Analysis settings en ANSYS</i>	65
<i>Figura 19-4: Propiedades del Acero 4340 para el modelo Johnson Cook</i>	67
<i>Figura 20-4: Materiales explícitos para la simulación</i>	67
<i>Figura 21-4: Momento de inercia del sistema de molienda con respecto a su eje</i>	70
<i>Figura 22-4: Momento de inercia con respecto al centro del eje de transmisión</i>	70
<i>Figura 23-4: Configuración de engranajes planetarios</i>	73
<i>Figura 24-4: Engranaje planeta y engranaje corona</i>	76
<i>Figura 25-4: Fuerzas en el diente del engranaje</i>	76
<i>Figura 26-4: Ángulos de contacto</i>	87
<i>Figura 27-4: Pre diseño geométrico y ubicación del eje del tanque de molienda de molienda</i>	90
<i>Figura 28-4: Diagrama de cuerpo libre XY</i>	90
<i>Figura 29-4: Reacciones del eje XY</i>	91
<i>Figura 30-4: Modelado del eje en ANSYS</i>	98
<i>Figura 31-4: Aplicación de cargas en ANSYS</i>	99
<i>Figura 32-4: Mallado de eje</i>	100
<i>Figura 33-4: Factor de seguridad a fatiga</i>	100
<i>Figura 34-4: Deformación máxima del eje</i>	101
<i>Figura 35-4: Pre diseño y ubicación de la caja de rodamientos</i>	106
<i>Figura 36-4: Diagrama de cuerpo libre XY</i>	106
<i>Figura 37-4: Reacciones del eje XY</i>	106
<i>Figura 38-4: Resultados de factor de seguridad en ANSYS</i>	111
<i>Figura 39-4: Distribución tracción secundaria en la caja de rodamientos</i>	113
<i>Figura 40-4: Pre diseño base del tanque de molienda</i>	115
<i>Figura 41-4: Diagrama de cuerpo libre XY</i>	115
<i>Figura 42-4: Reacciones del eje XY</i>	116
<i>Figura 43-4: Pre diseño de brazo sujetador</i>	118
<i>Figura 44-4 Diagrama de cuerpo libre XY</i>	119
<i>Figura 45-4: Reacciones del eje XY</i>	119
<i>Figura 46-4: Distribución tracción secundaria en los soportes de fijación</i>	123
<i>Figura 47-4: Pre diseño del brazo</i>	124
<i>Figura 48-4: Dimensionamiento parcial del brazo</i>	125
<i>Figura 49-4: Pre diseño y ubicación del eje principal de transmisión</i>	129
<i>Figura 50-4: Diagrama de cuerpo libre XY</i>	129
<i>Figura 51-4: Reacciones del eje XY</i>	130

<i>Figura 52-4: Dimensiones finales eje de transmisión</i>	132
<i>Figura 53-4: Pre diseño de la caja de rodamientos</i>	133
<i>Figura 54-4: Diagrama de cuerpo libre XY</i>	133
<i>Figura 55-4: Reacciones del eje XY</i>	133
<i>Figura 56-4: Configuración sistema de molienda y contrapeso</i>	135
<i>Figura 57-4: Diseño de la Estructura del prototipo</i>	137
<i>Figura 58-4: Distribución de cargas en la estructura</i>	138
<i>Figura 59-4: Factores demanda capacidad en la estructura</i>	139
<i>Figura 1-5: Flujograma de construcción del sistema estructural</i>	149
<i>Figura 2 -5:Flujograma de construcción del sistema motriz</i>	149
<i>Figura 3-5: Flujograma de construcción del sistema de alimentación y seguridad de molienda</i>	150
<i>Figura 4-5: Flujograma de construcción del sistema de transmisión</i>	150
<i>Figura 5-5: Flujograma de construcción del sistema eléctrico</i>	150
<i>Figura 6-5: Flujograma del montaje del molino planetario de bolas</i>	154
<i>Figura 7-5: Polvo de bronce, 200x</i>	160
<i>Figura 8-5: Polvo de acero de transmisión AISI 1018, 67x</i>	167
<i>Figura 9-5: Polvo de acero inoxidable ASTM A 743, 250x</i>	174
<i>Figura 10-5: Bola de molienda en estereoscopio</i>	178

LISTA DE ANEXOS

Anexo A: Factor de sobrecarga

Anexo B: Factor dinámico

Anexo C: Factor de Lewis

Anexo D: Constantes empíricas A,B,C ancho de cara b en milímetros

Anexo E: Factor geométrico

Anexo F: Número de esfuerzo de flexión permisible

Anexo G: Módulo de elasticidad

Anexo H: Factor de ciclos de esfuerzo

Anexo I: Coeficiente elástico

Anexo J: Número de esfuerzo de contacto permisible

Anexo K: Factor de ciclos de esfuerzo

Anexo L: Densidad de la banda

Anexo M: Constantes para gráficas de control

Anexo N: Medidas del polvo de bronce obtenido.

Anexo O: Medidas del polvo de acero de transmisión obtenido

Anexo P: Medidas del polvo de acero inoxidable ASTM A743 obtenido

Anexo Q: Tabla de salario mínimo sectorial del Ecuador 2018

Anexo R: Calidad del engranaje

RESUMEN

En la propuesta tecnológica que se presenta, se realizó el diseño y construcción del prototipo para la obtención de polvo metálico a partir de la viruta generada del proceso de mecanizado, para lo cual fue necesario el análisis bibliográfico y estudio de las técnicas de obtención de polvo, se selecciona la alternativa más conveniente para lograr dicho objetivo mediante el uso de la matriz QFD y método de los criterios ponderados, el molino planetario de bolas, luego se procedió al diseño mecánico y selección de cada elemento que conforma el prototipo, usando herramientas de simulación: SOLIDWORKS, ANSYS, ADAMS Y SAP2000. Posteriormente se desarrolló los planos de los elementos, mediante la elaboración de flujogramas de procesos se realizó dicha construcción y montaje del prototipo. Las pruebas de funcionamiento se realizaron con bronce, acero de transmisión y Acero ASTM A743, a una capacidad máxima de alimentación de 220 gr y una velocidad de 400 RPM durante dos, cuatro y cinco horas, con 25 bolas de acero templado de 20 mm durante la primera y segunda hora de molienda, usando en el tiempo restante 100 de $\phi 10$ mm, posteriormente se tamizó el polvo teniendo 153 gr de bronce entre 0,6 a 0,06 mm y 69 gr \leq a 0,06 mm de donde el 57,14% está en un rango de 2,49 a 9,74 μm , en el de transmisión se tiene 143 gr entre 0,4 a 0,06 mm y 76 gr debajo de estos límites con un 58,57% entre 1,02 a 4,72 μm , en el inoxidable 129 gr tienen de 1 a 0,06 mm de donde 86 gr son menores con un 78,57% entre 2,13 a 8,45 μm , se concluye entonces que si es posible obtener polvo metálico de acero inoxidable especialmente. Se sugiere seguir las recomendaciones presentadas con el fin de ampliar esta investigación.

PALABRAS CLAVE: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <VIRUTA>, <ACERO ASTM A743>, <MOLIENDA>, <VELOCIDAD DE IMPACTO>, <POLVO METALICO>, <TAMIZACION>, <TAMAÑO DEL POLVO>.

ABSTRACT

In the technological proposal presented, the design and construction of the prototype were carried out to obtain metallic powder from the chip generated from the machining process, For which it was necessary the bibliographic analysis and study of the techniques of obtaining a powder, the most convenient alternative is selected to achieve this objective through the use of the QFD matrix and the weighted criteria method, the planetary ball mill. Then it proceeded to the mechanical design and selection of each element that makes up the prototype, using simulation tools: SOLIDWORKS, ANSYS, ADAMS and SAP2000. Subsequently, the plans of the elements were developed through the elaboration of processes flowcharts, the construction and assembly of the prototype were carried out. The functional tests were performance tests with bronze, transmission steel and Steel ASTM A743, at a maximum supply capacity of 220 gr and a speed of 400 RPM for two, four and five hours, with 25 tempered steel balls of 20 mm during the first and second grinding hours, used in the remaining time 100 of $\phi 10$ mm. Afterward the powder was sieved having 153 gr of bronze between 0,6 to 0,06 mm and 69 gr \leq to 0,06 mm of where the 57 , 14% is in a range of 2.49 to 9.74 μm , in the transmission there is 143 gr between 0.4 to 0.06 mm and 76 gr below these limits with 58.57% between 1, 02 to 4.72 μm , in the stainless 129 gr have from 1 to 0.06 mm where 86 g are smaller with 78.57% between 2.13 to 8.45 μm , it is concluded that if it is possible to obtain stainless steel metallic powder especially. It is suggested to follow the recommendations presented in order to expand this investigation.

KEYWORDS: <TECHNOLOGY AND SCIENCE OF ENGINEERING>, <VIRUTE>, <ASTM A743 STEEL>, <MILLING>, <IMPACT SPEED>, <METAL POWDER>, <SCRAMBLING>, <DUST SIZE>.

CAPÍTULO I

1.1 Antecedentes

Sin duda en la actualidad las industrias han crecido a pasos agigantados debido al avance tecnológico al cual nos enfrentamos, sin embargo, la generación de desperdicios que producen dichas empresas es tan alto que a nivel mundial se buscan soluciones para reciclar y reusarlos, creando campañas que permitan preservar muchos de los recursos naturales que estamos cada vez más cerca de perder.

Muchos materiales son dados por la naturaleza, el hombre procesa dichos elementos para ser utilizados y/o consumidos en el entorno en el cual se desempeña, es el caso de la madera, agua, metales, entre otros. Dentro de estos recursos, los metales no son renovables, por lo que se convierten en elementos de mayor cuidado, de ahí la necesidad de buscar alternativas que nos permitan reutilizar estos materiales.

Son varias las empresas a nivel nacional que trabajan con metales como principal materia prima, contando con equipos para la fundición y maquinado de la misma, generando a su vez residuos posteriores a los procesos mencionados. Una de las entidades más importantes es el Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas CIRT, creado como parte del cambio de la matriz energética del país, el cual cuenta en su estructura funcional con una línea de proceso de mecanizado para la reparación de turbinas hidráulicas, la que genera gran cantidad de viruta de alta calidad y costo elevado, generalmente acero inoxidable martensítico ASTM A743, el cual hasta ahora es considerado no útil y es almacenado sin ningún uso posterior.

En el país, no se registra maquinaria especializada para el reciclaje de viruta, es decir equipos que reduzcan su tamaño o la conviertan en polvo metálico para ser compactada y así formar piezas de diferente forma y que sean usadas donde se requiera las características adoptadas por el nuevo elemento. Se cuenta sí, con procesos de trituración para reciclaje de plástico, papel y piedra.

En el mercado internacional existen varias marcas destinadas a la construcción de máquinas para la reducción de tamaño de la viruta, es el caso de UNTHA, productora de trituradoras de metales ligeros como Al, Mg, aleaciones de Al y Mg, Cu, Ni, de metales duros como el Fe, Ti y láminas de Acero (UNTHA, 2017); ERDWICH marca especializada en la trituración de viruta con varios modelos en su catálogo dependiendo de las necesidades del consumidor, proporcionando como principal servicio el centro de pruebas ERDWICH para someter a sus equipos a condiciones reales con el material a triturar; en cuanto a molinos se refiere, industrias como Retsch, Fritsch y Union Process son empresas fabricantes de diferentes tipos de molinos para materiales cerámicos principalmente.

No existe información necesaria para la obtención de polvo metálico de acero inoxidable ASTM A 743, debido a que por sus características exige un alto valor económico para su adquisición por lo que al investigar y comprobar que es factible obtener polvo de este material se abrirá un campo completamente nuevo para el país, el cual no solo permitirá reducir la cantidad de desechos obtenidos si no también crear alternativas de aplicación de este producto en labores como relleno de fisuras con polvo del mismo material del elemento evitando la soldadura, uso en la creación de nuevas piezas mediante la tecnología de impresión 3D y la sinterización que es parte de la pulvimetalurgia.

Son varias las marcas a nivel internacional que trabajan con polvos como ASCO SINTERING (USA), especializada en sinterización de metales pulverizados que realiza principalmente engranajes como una alternativa a las técnicas CNC; SHANDONG HUIJIA (China) empresa de alta tecnología que desarrolla productos de polvos magnéticos de metales blandos para baterías de carga, sin embargo, para el acero inoxidable mencionado no existe en ningún mercado la generación de polvo y su aplicación posterior.

La propuesta de una máquina que transformaría estos elementos de mecanizado en polvo metálico se hace viable debido a la realidad planteada, convirtiéndose en una excelente opción para el uso adecuado de estos residuos y una puerta para la creación de tecnología de punta para el país que apuesta por no más contaminación ambiental y minimización de recursos económicos

1.2 Formulación del problema.

La creación del CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y RECUPERACIÓN DE TURBINAS Y PARTES INDUSTRIALES, “CIRT”, tiene como objetivo el análisis y desarrollo tecnológico de los procesos de recuperación y reparación de turbinas hidráulicas, mediante técnicas como soldadura, mecanizado, metrología, control de calidad e ingeniería , en los procesos de mecanizado principalmente se genera gran cantidad de viruta del mismo material, que se almacena sin utilización posterior, lo cual produce un desperdicio de material puro de alta calidad además de un uso de espacio innecesario, la generación de polvo puede constituir una solución a todos estos inconvenientes que afectan cada vez más al medio ambiente y a nosotros mismos.

1.3 Alcance

La realización de este proyecto es el primer paso para hallar una reutilización a la viruta generada en los procesos de mecanizado del “CIRT”, es una propuesta innovadora que se buscará llevar a cabo satisfactoriamente logrando el objetivo planteado.

El proyecto se centrará en buscar el proceso mecánico adecuado para la obtención de diferentes tamaños de partículas para poder ser consideradas polvo, y demostrar de esta manera la factibilidad de la propuesta.

De comprobarse la factibilidad de obtener polvo de acero inoxidable ASTM A743 especialmente, se estará abriendo paso a siguientes proyectos que podrán usar los resultados obtenidos para encontrar el mecanismo adecuado para la aplicación del polvo.

1.4 Justificación.

1.4.1 *Justificación Práctica*

Esta propuesta tiene como finalidad; luego de demostrar su eficacia en el proceso de obtención de polvos, mejorar el manejo de los residuos de mecanizado mediante la generación de nuevos elementos a través de un proceso de sinterización para ser utilizados en diferentes propósitos como lo son la soldadura de insertos, piezas necesarias para diferente maquinaria, etc.

1.4.2 *Justificación teórica.*

Esta investigación se realiza con el propósito de aportar una solución a los problemas de contaminación ambiental, costo y espacio de almacenamiento de viruta, para lo cual se provee una metodología de diseño, construcción y montaje para la reutilización de la viruta, de tal manera que ayude a su posterior sinterización, para ello los resultados que se obtengan, estarán garantizados por el uso de normas técnicas y aplicación de los conocimientos científicos del Ingeniero Mecánico.

1.4.3 *Justificación Metodológica.*

Este proyecto se presenta como una medida innovadora, ya que no existe un estudio previo del proceso de obtención de polvos metálicos para viruta de acero inoxidable martensítico y otros metales de propiedades similares, de ser demostrado su validez y confiabilidad, se convertirá en un gran aporte a la solución de varios problemas como lo son el almacenaje y la contaminación que produce la viruta de los procesos de mecanizado en el país.

1.5 *Objetivos.*

1.5.1 *Objetivo general*

Diseñar y construir un prototipo para la obtención de polvo metálico, a partir de la viruta generada en el proceso de mecanizado.

1.5.2 *Objetivos específicos*

- Estudiar los distintos procesos mecánicos para la obtención de polvos metálicos.
- Seleccionar el proceso mecánico adecuado para la obtención de polvos metálicos a partir de la viruta generada en los procesos de mecanizado.
- Aplicar metodologías para el diseño y construcción del prototipo para la obtención de polvo metálico.

- Construir y evaluar el funcionamiento del prototipo.
- Tamizar el producto de la molienda y determinar si es considerado polvo o no según la norma ASTM B214.
- Medir las partículas más pequeñas obtenidas de la molienda.
- Determinar si es factible la obtención de polvo metálico de acero ASTM A743.

CAPITULO II

2. MARCO REFERENCIAL PARA PROCESOS MECÁNICOS DE OBTENCIÓN DE POLVO METÁLICO.

El presente capítulo tiene como objetivo desarrollar el estudio bibliográfico referente a los polvos metálicos, sus características y procesos de obtención, poniendo especial énfasis en los procedimientos mecánicos y las herramientas de diseño a utilizar con el fin de lograr este propósito, en vista de ello se evalúa los siguientes aspectos:

2.1 La Pulvimetalurgia, polvos metálicos y sus características.

Según Schulz, la metalurgia de polvos o Pulvimetalurgia (PM) es el estudio del procesamiento de polvos metálicos, incluyendo la fabricación, caracterización cuantitativa, cualitativa y conversión de polvos en componentes ingenieriles útiles. Para Campos esta tecnología permite la producción de piezas a bajo coste con una pérdida de propiedades mecánicas a comparación de otras técnicas de obtención. (Campos, 2014). Marín menciona que la PM, comienza con la fabricación de los polvos metálicos, seguida por la fabricación de piezas a partir de los mismos; en vista de todos estos conceptos se dice entonces que la pulvimetalurgia es el proceso que inicia desde la obtención de polvo hasta la formación de una nueva pieza, en la cual se debe tener en cuenta que de todos los metales se pueden producir polvo, pero no todos cumplen con las características necesarias para formar un nuevo elemento (Marín, 2011)

La PM se aplica para la fabricación de piezas tales como engranes, guías de válvulas, segmentos de pistones y piezas de máquinas principalmente, el carburo de wolframio o la alúmina aleados con Ti o Co se usan para herramientas de corte de alta dureza y resistencia a la temperatura, el polvo de Cu se usa para cojinetes de fricción auto lubricantes, los materiales compuestos por metales de alta resistencia mecánica y tenacidad con cerámicos de gran resistencia al desgaste y propiedades refractarias conocidos como cerments también es producto de la pulvimetalurgia (López, 2015). además, se combinan latón y acero para partes estructurales; también, aunque en menor proporción, se emplean polvos de níquel, plata, tungsteno, tantalio, titanio, cobalto, zirconio, grafito, aluminio y diferentes carburos y óxidos metálicos. (Marín, 2011).

A continuación, en la tabla 1, se mencionan las ventajas y desventajas de la metalurgia de polvos, recopilada de varias obras publicadas a cerca de este tema de investigación.

Tabla 1-2: Ventajas y desventajas de la metalurgia de polvos.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Reduce la pérdida de materia prima de los procesos de mecanizado. • Facilita la fabricación de nuevas piezas con material de alta calidad. • Permite el control exacto de su composición, lo que influye en las propiedades físicas de la pieza. • Tolerancias reducidas y buenos acabados superficiales. • Corto tiempo de fabricación de piezas a costos bajos. • Porosidad controlada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Difícil almacenaje del polvo metálico. • Las nuevas piezas no tienen las mismas propiedades mecánicas que las obtenidas por procesos convencionales. • Alto costo de las matrices de compactado. • Limitaciones de diseño, debido a que las piezas deben tener una forma que sean fácilmente extraídas por la matriz.

Fuente: Autores, 2018

Realizado por: Realización propia

La pulvimetalurgia conlleva un estudio relevante de los polvos metálicos, los cuales se definen como aquellas pequeñas partículas metálicas o de aleación que se encuentre en un rango de tamaño de 0.1 a 1000 μ m (ASTM B214). Las características de los polvos metálicos influyen en las etapas de compactación y sinterizado, por tanto, en las propiedades finales de las piezas obtenidas y calidad del producto.

Las características más importantes que se buscan obtener en los polvos son:

- Forma: a diferencia del tamaño es una propiedad difícil de medir, depende del proceso de manufactura pudiendo ser esferoidal, granular, nodular, irregular, laminar, fibrosa, dendrítica, angular y acicular.

- **Tamaño:** esta propiedad depende del diámetro, ancho de la partícula y proceso de molienda.
- **Fluidez:** es el tiempo en el que una cantidad de polvo fluye bajo condiciones atmosféricas a través de un orificio de dimensiones específicas, depende de propiedades como forma, tamaño de la partícula, fricción entre partículas y el material.
- **Compresibilidad:** muestra su comportamiento frente a la compactación. Es la habilidad de los polvos a ser sometidos a una carga para su densificación.
- **Fricción entre partículas:** se presenta durante el movimiento de los cuerpos molidores y la viruta.
- **Densidad:** dentro de ella se puede distinguir, la densidad aparente, la cual determina el grado de compactación de un material al someterlo a una cierta carga y la densidad real referida a la densidad en fase sólida.
- **Composición e impurezas:** debido a la obtención de polvos metálicos por molienda, puede ocurrir cambios en la composición, produciendo impurezas debido al desgaste que sufre el molino.

Según Campos los polvos metálicos se pueden obtener de cuatro formas distintas, así como: atomización pudiendo ser de gas, agua u otras técnicas de pulverización, reacción química mediante la descomposición de óxidos, deposición electrolítica y finalmente procesos mecánicos mediante molienda de alta energía y aleación mecánica. (Campos, 2014).

En función del propósito que busca esta investigación, el proceso para la obtención de polvos metálicos ideal es la molienda mecánica, de las cuales se evaluará y analizará la mejor de acuerdo a las necesidades que deseamos satisfacer.

2.2 Molienda mecánica

La molienda es un método mecánico de fabricación que tiene como objetivos principales la reducción del tamaño de las partículas, modificación, cambio o alteración de las propiedades del material tales como resistencia, dureza, densidad, tamaño de grano, cambio de forma, mezcla de varios materiales o mezcla de fases. Consiste en el fraccionamiento de un material a fin de reducir el tamaño de la partícula; este método se realiza por medio de cuerpos moledores duros.

Las máquinas de molienda que reducen el volumen promedio de las partículas de una muestra sólida son las trituradoras de las cuales se obtienen granos gruesos y finos, molinos para residuos intermedios y finos. Entonces se opta por el estudio de estos últimos, ya que permiten la reducción del tamaño de las partículas con más control.

El molino más usado en la industria es el de bolas que lleva a cabo la mayor parte de la reducción por impacto, el golpeteo constante que sucede entre los elementos moledores y el material a moler hace que exista un buen mezclado del material y el resultado de la molienda sea uniforme. (Valladares, 2008)

El molino de bolas consta principalmente de cuerpos moledores o bolas, los cuales debido a su acción deben ser lo suficientemente resistentes al desgaste y al impacto tanto para asegurar su calidad interna como para lograr los mejores resultados posibles.

Union process, señala que la selección de las bolas de molienda depende de varios factores, los principales son (Process, 2012):

- Tamaño de alimentación inicial y final- al inicio de la molienda si las partículas a desintegrar son grandes y el tamaño de las bolas pequeñas, estas no podrán reducir el tamaño del grano de forma fácil y uniforme, caso contrario sucede en la última etapa de molienda donde las bolas más pequeñas son más eficientes cuando se desean obtener partículas muy finas.
- Costo- este dependerá de la calidad de bolas que se requiera (dureza, resistencia al impacto y desgaste).

- Gravedad específica- se recomienda que las bolas deben ser más densas que el material a moler puesto que si se trata de una molienda húmeda estas flotarían más y no actuarían.
- Dureza- a mayor dureza de los elementos moledores menor desgaste de ellos existe y se produce mayor eficiencia en el proceso de molienda, por lo mismo estas se seleccionarán en función del material sólido a moler.
- Contaminación- el material de las bolas se seleccionará de tal modo que no contamine al producto de forma que pueda ser aleado con el residuo y no pueda ser separado fácilmente sino por medios magnéticos o procesos de sinterización.

En cuanto al principio de funcionamiento de los molinos de bolas, en la figura siguiente se muestra los cuerpos moledores o bolas y el material en un molino, en el contenedor cilíndrico se pone en un eje rotatorio, donde las esferas continuamente colisionan entre sí, junto con el material.

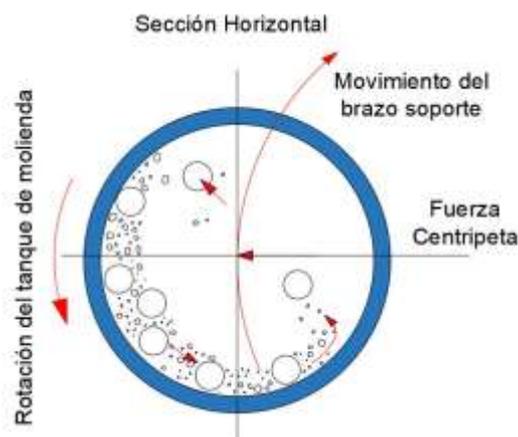


Figura 1-2: Molienda mecánica
Fuente: (Schulz, 2003)

Durante la molienda ocurre de manera repetitiva la fractura, donde en la sección transversal horizontal del molino se muestra el movimiento de las bolas y el material del contenedor, con la fuerza centrípeta que genera la rotación. El tiempo de molienda depende de la cantidad de polvos que se requiere, su tamaño y velocidad de rotación.

Este proceso no es completamente útil para metales dúctiles, puesto que no son fáciles de fragilizar. En la figura 2-2, se muestra el efecto de la molienda sobre el tamaño de la partícula hasta lograr convertir la viruta en polvo metálico.

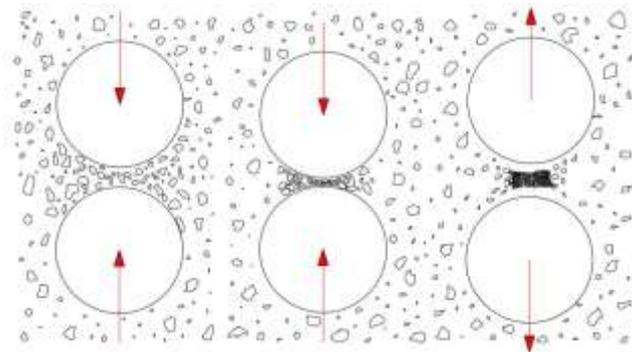


Figura 2-2: Tamaño de la partícula por efecto de la molienda
Fuente: (Mechanical alloyin for fabrication of advanced engineering material)

La eficiencia del proceso depende de la técnica mecánica a baja o alta energía con la que se procese. (Peñaloza, 2008). Dentro de esta técnica se tienen cuatro etapas principales, como se observa en la figura 3-2.

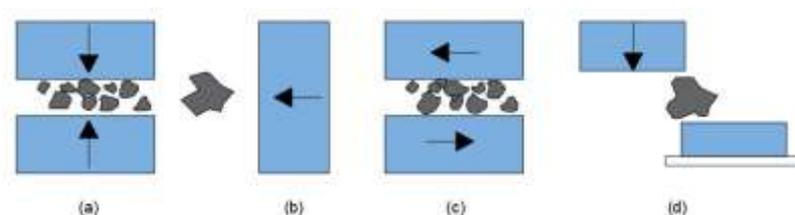


Figura 3-2: Proceso de molienda
Fuente: (Campos, 2014)

- a. Compresión:* produce una reducción tosca de elementos duros, produciendo granos un tanto más gruesos que finos.
- b. Impacto:* implica un golpe brusco y rápido, casi instantáneo generando granos finos, medios o gruesos.
- c. Atricción:* referente a la generación de partículas como residuo del desgaste generado entre ellas por fricción.
- d. Cizalladura:* forma una hendidura la cual posteriormente se convierte en una fractura de corte del material dando origen a una grieta y su propagación.

Si el tamaño de una partícula es mayor a 840 μm se considera una reducción tosca o grosera, entre 75 a 840 μ reducción intermedia, mientras que menor a 75 μm reducción fina y ultra fina cuando tiene tamaños de aproximadamente 1 μm . (Carlos Álvarez, 2011)

2.3 Variables operativas del molino.

En la molienda se debe tomar muy en cuenta los aspectos siguientes:

- *Velocidad de giro*- de esta velocidad depende el resultado final de la molienda, y el consumo y operación del molino. El giro produce el movimiento de las bolas en conjunto con el material a moler, la potencia del motor hace que esta velocidad sea la adecuada para una trituración perfecta. De acuerdo al tipo de molino que se seleccione se estudia el sistema de transmisión útil entre el motor y el molino. (poleas, bandas y correas, motoreductor y engranes. Etc.) (Industrias, 2015)
- *Velocidad crítica*- referente a la velocidad de trabajo u operación, de esta dependerá la molienda para que no sea contaminada, es decir no exista aleación de las bolas de molienda y el residuo sólido como desgaste rápido de la pared del tanque del molino. En el análisis experimental se puede determinar la velocidad crítica capaz de producir el impacto entre las bolas y el producto a moler de acuerdo a las propiedades del material que se muele. (Industrias, 2015)
- *Tamaño de las bolas de molienda*- estos elementos deben ser de mayor dimensión que el material a moler, se estima una relación de 3 a 1 para la obtención de polvo metálico, este valor puede variar de mayor a menor a medida que el proceso de molienda avance y se quiera lograr partículas muy finas. (Industrias, 2015)
- *Volumen de carga*- para Retsch el volumen de carga debe ser un tercio del material a moler, un tercio de los elementos moledores y un tercio de vacío. De este volumen dependerá el rendimiento del molino, así como su vida útil. (Retsch)
- *Potencia*- la potencia es máxima cuando el volumen de carga es mayor al 30%, por lo general se trabaja de 35% a 40% de la potencia. (Retsch)

- Dentro de los tipos de molienda se tiene húmeda y seca, a continuación, se hace un análisis comparativo entre estos dos tipos:

Tabla 2-2: Tipos de molienda. Húmeda y seca.

Molienda húmeda.	Molienda seca.
Requiere menos potencia por masa de material.	Requiere mayor potencia por masa de material.
Menor ruido y fácil transporte.	Exceso de ruido.
Menor desgaste de los elementos del molino. (tanque y bolas de molienda)	Mayor desgaste de los elementos del molino.

Realizado por: Autores 2018
Fuente: (Industrias, 2015)

2.4 Tipos de viruta en el mecanizado.

Con el fin de ensayar la molienda en diferentes virutas para distintos materiales y determinar su granulometría en la alimentación del molino de bolas. Se analiza a continuación los tipos de viruta generada en los procesos de mecanizado.

- *Viruta discontinua o fragmentada:*

Se presenta en el corte, generalmente de materiales frágiles como el hierro y latón fundido debido a que no tienen la capacidad de absorber las constantes deformaciones que se presentan, además pueden presentarse por velocidades de corte muy bajas o altas, presencia de inclusiones o impurezas, así como grandes profundidades de corte. (Castro)



Figura 4-2: Viruta discontinua fragmentada
Fuente: (MonsterMill, 2017)

- *Viruta continua:*

Se produce en materiales blandos y resistentes por altas velocidades de corte, elevado ángulo de ataque y poca fricción de la viruta con la herramienta. Pueden presentarse en procesos como torneado y taladrado. (Castro).



Figura 5-2: Viruta continua
Fuente: (Castro)

- *Viruta de cizallamiento:*

Se producen en materiales resistentes por velocidades medias de corte, ángulos de ataque bajos e intermedios.

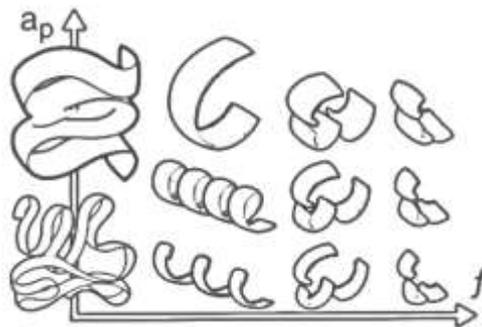


Figura 6-2: Viruta de cizallamiento.
Fuente: (Proceso de corte)

En el mecanizado, el tipo de viruta se genera de acuerdo al material de trabajo y condiciones de operación.

Según la norma ISO 3685 las virutas pueden ser como se muestra en la figura siguiente:

Flujo y fraccionamiento de la viruta

No deseable

Virutas largas

- Evacuación
- Enrollamiento
- Peligro

Virutas muy pequeñas

- Riesgo/máquina

1. Virutas rectas	2. Virutas tubulares	3. Virutas espirales	4. Virutas helicoidales planas	5. Virutas helicoidales cónicas	6. Virutas arqueadas	7. Virutas elementales	8. Virutas afusadas
 M	 R	 B	 M	 R	 B	 R	 R
1.1 Larga	2.1 Larga	3.1 Plano	4.1 Larga	5.1 Larga	6.1 Concha		
 B	 B	 B	 B	 B	 R		
1.2 Corta	2.2 Corta	3.2 Corta	4.2 Corta	5.2 Corta	6.2 Inconexa		
 M	 M		 M	 M			
1.3 Enredada	2.3 Enredada		4.3 Enredada	5.3 Enredada			

B Bien
 R Regular
 M Mal

Figura 7-2: Tipos de viruta según la Norma ISO 3685

Fuente: (Krahmer, 2017)

La norma indica la relación entre el material y la viruta, así, se tiene los siguiente:

Tabla 3-2: Relación entre el material ISO y la viruta en el mecanizado.

ISO	Características del mecanizado
P	Viruta larga. Mecanizado fundidos e inoxidables
M	Viruta larga y corta. mecanizado de aceros inoxidables austeníticos, aceros al Mn y aleaciones de hierro fundido
K	Viruta corta. Mecanizado de fundición gris y duras, aceros duros y no metales, no ferrosos como Al, Bronce, polímeros, madera, ebonita.
N	Viruta larga. Mecanizado de materiales no ferrosos, Cu, Bronce, latón,
S	Viruta larga. Materiales de difícil mecanización, superaleaciones termo-resistentes, aleaciones de Co, Ti, Fe, Ni
H	Viruta larga. Mecanizado de materiales endurecidos, aceros templados

Realizado por: Autores 2018

Fuente: (Coromant, 2015)

En el CIRT se mecaniza principalmente acero inoxidable, bronces, acero estructural y de transmisión encontrándose varios tipos de viruta dependiendo del proceso que se realice, para nuestro estudio se hace necesario el conocimiento de las características mecánicas y químicas de los materiales, siendo estas:

- Acero inoxidable ASTM A743

Este material es el principal constituyente de las turbinas hidráulicas y de la mayor parte de sus componentes; su mecanizado se realiza principalmente en el torno vertical Bost, tecnología con la que cuenta el CIRT.



Figura 8-2: Proceso de desbaste de un rodete Francis
Fuente: Autores

La viruta que se obtiene proviene de varios procesos siendo uno de los principales el desbaste para rectificación de rodetes como se observa en la figura 8-2. A continuación, se describen las características mecánicas y composición del acero ASTM A743.

Tabla 4-2: Propiedades mecánicas y composición del acero ASTM A743 CA6NM

ASTM A743 CA6NM		
Propiedades mecánicas	Esfuerzo de flexión	550 MPa
	Esfuerzo de tensión	755 MPa
	Dureza	289 HV
Composición	% C	0.06 %
	% Cr	11.5 – 14 %
	% Fe	82.9 – 88.1 %
	% Mn, % Si	1 %
	% Mo	0.4 – 1 %
	% P - % S	0.04 % - 0.03 %

Realizado por: Autores 2018
Fuente (Matweb)

- Acero AISI 1018

El acero estructural y de transmisión principalmente AISI 1018 es usado en el CIRT para partes de sujeción bridas, estructuras y ejes que son mecanizados en tornos y centros CNC dentro de la empresa como se muestra a continuación:



Figura 9-2: Procesos, máquinas y viruta del mecanizado de acero de transmisión
Fuente: Autores

A continuación, se describen las características mecánicas y composición del Acero de transmisión AISI 1018.

Tabla 5-2: Propiedades mecánicas y composición del acero AISI 1018

AISI 1018		
Propiedades mecánicas	Esfuerzo de flexión	370 MPa
	Esfuerzo de tensión	440 MPa
	Dureza	131 HV
Composición	% C	0.14 - 0.20 %
	% Fe	98.81 – 99.26 %
	% Mn	0.6 – 0.9 %
	% P	0.04 %
	% S	0.05 %

Realizado por: Autores 2018
Fuente (Matweb)

- Bronce

El bronce es usado en el CIRT para repuestos de accesorios en tuberías como uniones, bridas, cuerpos de impulsores para bombas entre otros componentes, se mecanizan principalmente piezas de tamaño reducido y su viruta resulta muy frágil.

En el centro el almacenaje de esta se realiza de manera inadecuada como se muestra a continuación y su aprovechamiento es nulo.



Figura 10-2: Recolección de la viruta obtenida del mecanizado de bronce
Fuente: Autores

A continuación, se describen las características del bronce mecanizado en el CIRT.

Tabla 6-2: Propiedades mecánicas y composición del bronce SAE 40

Bronce SAE - 40		
Propiedades mecánicas	Esfuerzo de flexión	117 MPa
	Esfuerzo de tensión	255 MPa
	Dureza	60 HB
Composición	% Cu	84 – 86 %
	% Sn	4 – 6 %
	% Pb	4 – 6 %
	% Zn	4 – 6 %
	% Ni	1 %
	% Fe	0.3 %
	% P	0.5 %

Realizado por: Autores 2018
Fuente (Matweb)

2.5 Consideraciones teóricas para el diseño

El diseño mecánico para Shigley es una tarea complicada que involucra muchas habilidades, puesto que es un proceso iterativo con muchas fases interactivas, en donde primero se aborda la naturaleza del diseño en general, para luego pasar al diseño en la ingeniería mecánica, mientras que para Hall, Holowenco y Laughlin el diseño en ingeniería es “la creación de los planos necesarios para que las máquinas, las estructuras, los sistemas o los procesos desarrollen las funciones deseadas”, así también Hamrock dice que el diseño es la transformación de conceptos e ideas en maquinaria útil. En conclusión, para nosotros, los autores de este proyecto de investigación, el diseño mecánico es la habilidad de crear un sistema que satisfaga necesidades de la manera más óptima y económica posible, con el propósito de obtener productos de calidad.

Al tratar el diseño mecánico, conviene referirnos al concepto de máquina, la cual Hamrock la define como “la combinación de mecanismos y otros componentes que transforma, transmite o emplea energía, carga o movimiento para un propósito específico”. Para el diseño de una máquina debe tomarse en cuenta factores como resistencia, deformación, tribología, costo, propiedades físicas de la misma, así como la selección de los materiales.

Lo que se busca no es solo producir una máquina lo suficientemente resistente para funcionar con gran eficiencia durante un tiempo considerable, sino que también sea económica en su fabricación, montaje y mantenimiento, por tanto, se debe producir diseños seguros, prácticos y adecuados tal como lo establece el Código de ética para ingenieros ASME.

2.5.1 Metodología, fases y etapas del diseño.

En la ingeniería concurrente intervienen perspectivas desde el punto de vista del producto al considerar su fabricación, requerimientos de la empresa y costes, de recursos humanos referentes al personal participativo en la ejecución del proyecto y de recursos materiales dadas por las herramientas tecnológicas de modelado, ensamble y simulación. (Riba, 2002 pág. 12)

Para Riba, todo producto tiene un ciclo de vida basada en las seis etapas siguientes:

- 1 Decisión y definición.
- 2 Diseño y desarrollo.
- 3 Fabricación.
- 4 Distribución y comercialización.
- 5 Utilización y mantenimiento.
- 6 Fin de vida.

Todas estas etapas van de la mano si se desea lograr un excelente trabajo, un producto que satisfaga una necesidad a bajo costo, fácil utilización y mantenimiento a considerable vida útil.

Shigley en la figura siguiente muestra las fases del proceso de diseño, en donde de manera repetitiva estas vuelven a suceder a medida que se vaya presentando el problema.

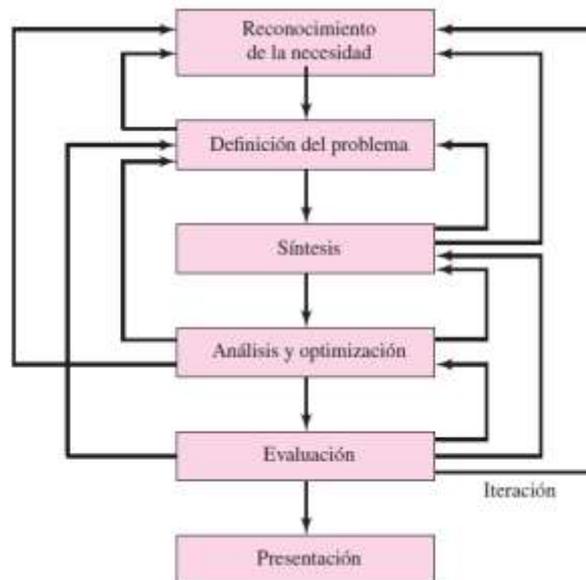


Figura 11-2: Fases en el proceso de diseño
Fuente: (Budynas, 2008 p. 6)

El reconocimiento de la necesidad es el primer paso para el diseño, seguido por la definición del problema en donde se especifica todos los detalles del objeto que se ha de diseñar, siendo estos por ejemplo cantidades de entrada y salida, características, propiedades físicas y limitaciones de la misma, estas limitaciones definen el costo, proceso de fabricación, tiempo de vida útil, características de operación y la confiabilidad.

Posteriormente se procede a la síntesis llamado también según Shigley intención del concepto, aquí varios esquemas se proponen, analizan e investigan de acuerdo a la definición del problema que se establece, en el análisis los sistemas se revisan, mejoran o desechan, de tal forma que los esquemas que sobreviven a este análisis deben ser capaces de ser comparados para que así se pueda elegir el camino que conduzca al diseño mecánico más competitivo.

Tanto la síntesis, el análisis y la optimización del diseño están relacionados en forma íntima e iterativa, cada alternativa se desarrolla de forma que si no se obtiene lo deseado en cuanto a características y limitaciones se regresa a la fase inicial hasta conseguir un producto de calidad para presentar así los resultados de forma audaz y eficaz.

Estas fases del diseño presentadas por Shigley, están ligadas en lo que Riba define las etapas metodológicas del diseño. Las cuales se resumen en la figura siguiente:

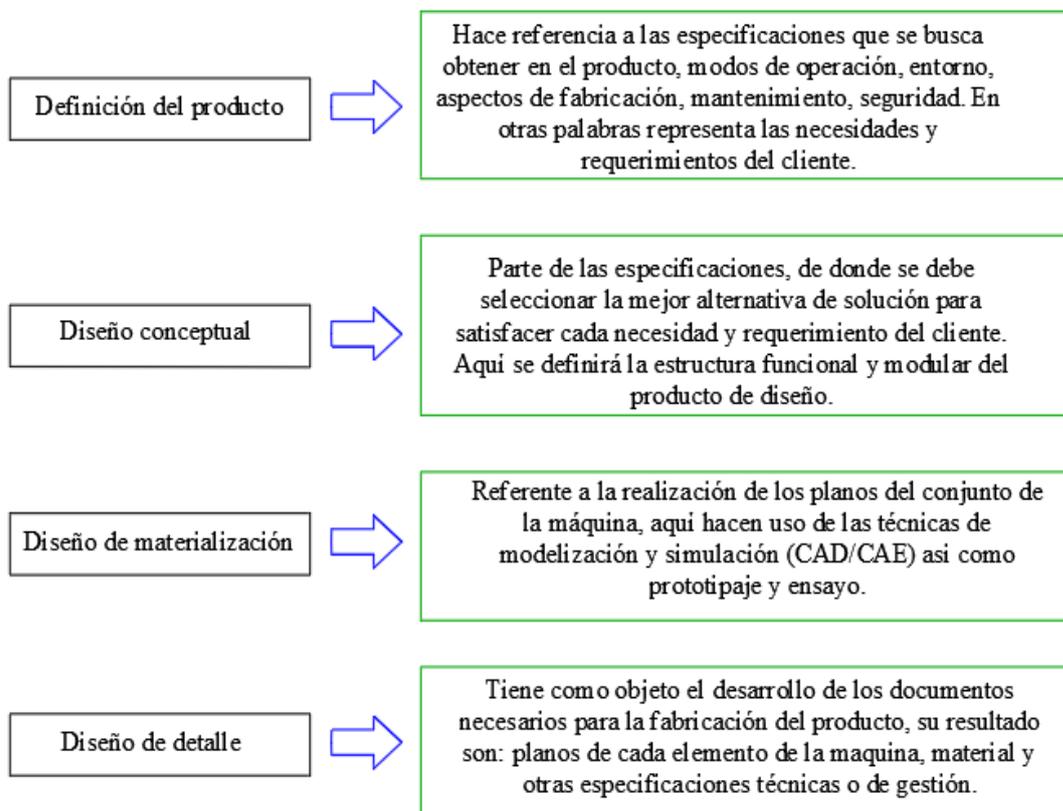


Figura 12-2: Etapas de diseño
Fuente: (Riba, 2002 págs. 76-80)

Todas estas etapas están enlazadas, es decir a partir de las especificaciones del producto se dan varias alternativas de solución donde se selecciona la mejor para diseñar la máquina y establecer los planos de conjunto que modelados y simulados mediante softwares de ingeniería se tiene definitivamente los planos de cada pieza, así como su modo de fabricación.

En los capítulos posteriores de nuestro proyecto de titulación se desarrollarán estas cuatro etapas de diseño concurrente que muestra Riba.

2.5.2 Herramientas para el diseño concurrente - Casa de calidad

La metodología QFD, es la más usada dentro del diseño para la definición del producto, debido a que es una herramienta de planificación que se usa para la selección de la mejor alternativa del diseño, esta técnica se lo conoce también "como la voz del cliente" o "la casa de calidad" según Arturo Ruiz profesor de la Universidad Pontificia de Madrid.

La matriz QFD sirve para:

- ✓ Planificación del producto. - traduce las demandas de los clientes en características técnicas del producto.
- ✓ Despliegue de componentes. - traduce las especificaciones del producto en características de componentes.
- ✓ Planificación del proceso. -traduce las especificaciones de los componentes en características del proceso de fabricación.
- ✓ Planificación de la producción. - traduce las especificaciones del proceso en procedimientos de planificación de la producción.

En la figura 13-2 se muestra el esquema de la casa de calidad en donde se tiene la voz del ingeniero vs la voz del cliente, la misma que mediante un análisis cuantitativo y cualitativo estable la mejor opción de diseño.

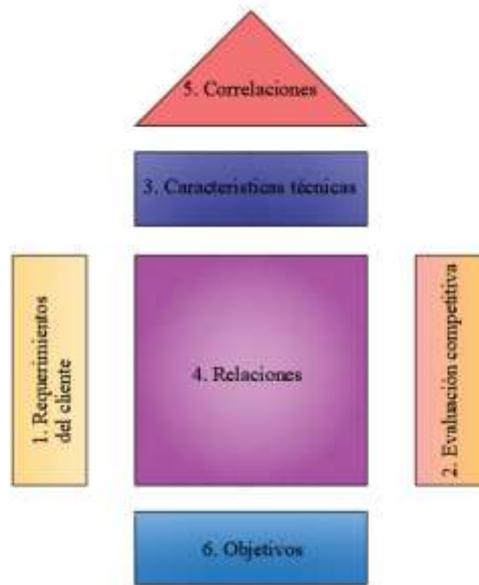


Figura 13-2: Casa de calidad
Fuente: (Ruiz, 2009)

A continuación, se detalla las partes que se muestra en la figura anterior:

Requerimientos del cliente: Aquí se detallan las necesidades del cliente, estas constituyen la base del diseño puesto que lo que se buscará es satisfacer esos requerimientos.

Evaluación competitiva: se refiere a la evaluación del cliente respecto a los productos o empresas existentes en el mercado en función de sus requerimientos inicialmente impuestos.

Características técnicas: Es una respuesta directa a todas las necesidades planteadas por el cliente, constituyen las características técnicas e ingenieriles que busca dar una solución a cada requerimiento dado.

Relaciones: relaciona cuantitativamente la voz del cliente vs la voz del ingeniero, mostrando que tan fuertes, medias o bajas son estas características.

Correlaciones: En este punto se establece la relación entre la demanda del cliente y la característica técnica del producto, es decir la voz del cliente vs la voz del ingeniero, en donde se pueden presentar tres niveles de relación fuerte, liviana y débil.

Responde a la pregunta ¿Hasta qué punto se puede satisfacer la demanda a partir de la característica técnica elegida? si no existe ninguna relación el espacio se dejará en blanco.

Objetivos: muestran las metas a lograr en cada característica técnica del producto.

2.6 Criterios del diseño mecánico.

El prototipo de molino de bolas constará de elementos mecánicos en los cuales es necesario estudiar y analizar bajo principios de diseño a carga estática y cíclica los mismos con el fin de asegurar características como factor de seguridad, material, y esfuerzos que no afecten al funcionamiento de la máquina ni a su tiempo de vida útil.

2.6.1 *Diseño a carga estática.*

Un elemento se diseña a carga estática cuando a pesar de tener fuerzas, torques y esfuerzos no está en movimiento. Para seleccionar la teoría de falla útil para cada elemento de nuestro prototipo se debe analizar y estudiar cada una de ellas.

- Teorías de falla

Las formas por las que puede fallar un elemento pueden ser por: deformación permanente, agrietamiento y rotura, lo que ocasiona una pérdida funcional de la máquina y acorta la vida útil. (Budynas, 2008 p. 211). Las teorías de falla según Budynas pueden ser para:

Materiales dúctiles:

- Esfuerzo cortante máximo (ECM)
- Energía de distorsión (ED)
- Mohr Coulomb dúctil (CMD)

Materiales frágiles:

- Esfuerzo normal máximo (ENM)
- Mohr Coulomb frágil (CMF)
- Mohr modificada (MM)

En vista de que diseñaremos los elementos del prototipo bajo criterios de fluencia. A continuación, se detallan los mismos:

- Teoría del esfuerzo cortante máximo.

Esta teoría señala que: “*la fluencia comienza cuando el esfuerzo cortante máximo de cualquier elemento iguala al esfuerzo cortante máximo en una pieza de ensayo a tensión del mismo material cuando esa pieza comienza a fluir*”. (Budynas, 2008 p. 211). La teoría ECM, llamada también la teoría de Tresca es muy conservadora, de allí su frecuencia de uso. La ecuación que define este criterio se muestra a continuación:

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{S_y}{2n} \quad (1)$$

Donde:

$\tau_{\text{máx}}$: Esfuerzo cortante máximo.

S_y : Resistencia a la fluencia.

n : Factor de seguridad

- Teoría de la energía de distorsión.

“*Predice que la falla por fluencia ocurre cuando la energía de deformación total por unidad de volumen alcanza o excede la energía de deformación por unidad de volumen correspondiente a la resistencia a la fluencia en tensión o en compresión del mismo material.*” (Budynas, 2008 p. 213). Esta teoría se conoce también como la de Von Mises, esta surge a partir de que se postula que la fluencia no es un fenómeno de tensión o compresión sino más bien está relacionada a la distorsión angular del elemento forzado, esto se da debido a que los esfuerzos hidrostáticos presentan valores considerables de resistencia a la fluencia mayores a los de la tensión. La ecuación de diseño de la fluencia dada por esta teoría es:

$$\left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \geq S_y \quad (2)$$

Donde:

$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ son las tensiones principales en el punto considerado.

2.6.2 *Diseño a fatiga.*

Un elemento falla por fatiga cuando sobre el actúan esfuerzos repetidos o fluctuantes que fallan por debajo de la resistencia última del material o incluso de la resistencia a la fluencia. La falla por fatiga no es predictiva como la estática que desarrolla una flexión muy grande, es por ello la importancia de su estudio. (Budynas, 2008 p. 258)

- Límite de resistencia a la fatiga.

Debido al procedimiento extenso que conlleva determinar los límites de resistencia mediante ensayos, se toma los ya tabulados por experimentaciones, en el caso de los aceros se tiene: (Budynas, 2008 p. 274)

$$S_e' = \begin{cases} 0,5 \times S_{ut} & S_{ut} \leq 200kpsi (1400 MPa) \\ 100kpsi & S_{ut} > 200kpsi \\ 100kpsi & S_{ut} > 1400 MPa \end{cases} \quad (3)$$

Donde:

S_e' : Límite de resistencia a la fatiga.

S_{ut} : Resistencia a la tensión mínima.

Sin embargo, de ello existen factores que pueden modificar significativamente el límite a la fatiga, estos pueden ser: composición del material, método de manufactura, corrosión, tamaño, forma, entre otros. Marín identifico estos factores originándose así la siguiente ecuación:

$$S_e = k_a \times k_b \times k_c \times k_d \times k_e \times k_f \times S_e' \quad (4)$$

Dónde:

k_a = Factor de modificación de la superficial

k_b = Factor de modificación del tamaño

k_c = Factor de modificación de la carga

k_d = Factor de modificación de la temperatura

k_e = Factor de confiabilidad

k_f = Factor de modificación de efectos varios

S_e = Límite de resistencia a la fatiga en una viga rotatoria

S_e' : Límite de resistencia a la fatiga.

Todos estos factores dependerán de las circunstancias de trabajo del elemento que se diseñe. Dado el límite de resistencia a la fatiga se puede determinar mediante las ecuaciones siguientes el factor de seguridad, material del elemento o esfuerzos fluctuantes.

- Soderberg

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = \frac{1}{n} \quad (5)$$

- Goodman modificado

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n} \quad (6)$$

- Gerber

$$\frac{n\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{n\sigma_m}{S_y}\right)^2 = 1 \quad (7)$$

Donde:

σ_a : Esfuerzo amplitud.

σ_m : Esfuerzo medio.

S_e : Límite de resistencia a la fatiga en una viga rotatoria

S_y : Resistencia a la fluencia

S_{ut} : Resistencia ultima.

n : Factor de seguridad.

Tanto los esfuerzos de amplitud como medios se dan por las fuerzas actuantes en el elemento ya sean estas de tracción, compresión, torsión y corte

2.7 Herramientas y recursos de diseño

Debido al gran desarrollo tecnológico que se da actualmente, el ingeniero tiene gran variedad de herramientas y recursos que de una u otra forma le ayudan a solucionar problemas que se presenten en el diseño, sin dejar de lado el aporte de libros, folletos, catálogos de fabricantes, etc.

Dentro de estas herramientas se encuentran las computacionales, CAD, diseño asistido por computadora, el cual permite el desarrollo de diseños tridimensionales, de esa forma se puede obtener planos con dimensionamiento automático, que permiten tener una exacta localización del centro de gravedad y momento de inercia, con cálculos rápidos. Algunos de los softwares CAD son AutoCAD, Solid Works, etc.

El CAD forma parte del CAE, ingeniería asistida por computadora, dentro de estos se tiene los programas para el análisis del elemento finito (AEF), vibración y transferencia de calor (ANSYS, MSC, NASTRAN), dinámica de fluidos (CFD) y programas para simulación de fuerzas dinámicas y el movimiento de mecanismos (ADAMS, DADS y Working Model).

En el desarrollo de esta investigación se usará herramientas computacionales como Solidworks, Autocad y Adams para el modelado, dimensionamiento y simulación del sistema, así también ANSYS y SAP 2000 para el análisis de la estructura y coeficiente de seguridad de la misma.

CAPITULO III

3. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL DISEÑO DEL PROTOTIPO DE MÁQUINA DE MOLIENDA PARA LA OBTENCIÓN DE POLVO METÁLICO.

Con el fin de establecer una propuesta metodológica para el diseño del prototipo de molienda, en el presente capítulo se desarrolla las etapas del diseño concurrente mencionadas en el capítulo II, la realización de la casa de calidad y la selección de la alternativa que cumpla con los requerimientos del cliente en función de la voz del ingeniero.

3.1 Definición del producto.

Para saber de forma clara que busca obtener el cliente como producto de la molienda de viruta generada en los procesos de mecanizado, es necesario desarrollar la herramienta de diseño QFD (Quality Function Deployment).

3.1.1 *Desarrollo de la función de la calidad (QFD).*

La casa de la calidad, nos permitirá realizar un análisis cuantitativo y cualitativo de lo que busca el cliente y el ingeniero trata de satisfacer, en ella se distinguen los siguientes pasos:

3.1.1.1 *Voz del usuario*

Una máquina está hecha para satisfacer las necesidades y requerimientos del cliente, en función de ello y en vista de que este prototipo será usado en el CIRT, se opta por entrevistar al Especialista en laboratorio y control de calidad de la empresa Ing. Marcelo Toapanta Defáz que en conjunto con los posibles operadores del equipo señalan que, en busca de determinar la factibilidad de obtener polvo metálico de materiales como acero inoxidable principalmente, a través de la viruta desechada en dicha empresa, requieren las especificaciones siguientes:

- Función

Convertir la viruta que se obtiene del centro de mecanizado en polvo metálico, capaz de en trabajos posteriores poder compactarse y sinterizarse para formar nuevas piezas.

- Capacidad

Al tratarse de un prototipo, se requiere una capacidad de 500 ml del tanque de molienda, este volumen se pretende realizarlo a mayor escala en lo posterior, al evaluar los resultados obtenidos en este prototipo.

- Disponibilidad de materiales de construcción.

La máquina a fabricarse debe utilizar los materiales que se encuentren en stock dentro de la bodega de la empresa.

- Costo

Se busca que el prototipo sea lo más económico posible y competitivo en función de aquellas máquinas que se tendrían que importar internacionalmente.

- Fabricación con la tecnología de la empresa.

Todos los elementos del molino de bolas deberán ser realizados con la tecnología con la que cuenta la empresa (centro de mecanizado, torno, fresadora, etc.).

- Fácil mantenimiento

Se busca que el equipo sea de fácil mantenimiento, con el objeto de evitar paros bruscos durante la operación, además no exigirá más de un operador, elevado tiempo y alto costo.

- Útil para materiales metálicos.

Útil para acero inoxidable ASTM A473 principalmente, además aceros estructurales y de transmisión, materiales usados en los procesos de mecanizado del CIRT.

- Tamaño

Deberá ser de un tamaño considerable, de forma que sea llamado prototipo.

- Molienda rápida.

Se requiere un equipo que realice su trabajo de forma rápida y eficaz, capaz de obtener productos de calidad en corto tiempo.

- Automatización.

Haciendo uso de los equipos con los que cuenta la empresa, se requiere un prototipo automático y manual, de fácil operación y manejo claro.

- Tamaño de grano

El producto final deberá ser tan pequeño que pueda ser considerado polvo metálico.

- Seguridad

El prototipo deberá asegurar la integridad del operador y personal a su alrededor.

3.1.1.2 Voz del ingeniero

Este paso se puede considerar lo más complejo en la construcción de la casa de la calidad, debido a que será el arma con la que el diseñador se enfrente a la competencia. Se basa en la traducción técnica de los requerimientos del cliente, teniendo así lo siguiente:

- Capacidad.
- Costo
- Peso
- Dimensiones
- Materiales de construcción.
- Seguridad y Ergonomía
- Nivel de automatización.

3.1.1.3 Análisis de la competencia.

Ecuador no cuenta con empresas que fabriquen molinos de bolas para la obtención de polvo metálico de lo investigado existen molinos para cerámicos y minerales.

En trabajos de titulación se tiene diseño y construcción de molinos de bolas horizontales para cemento, piedra y silicatos; de atricción para cerámicos y de alta energía para cuproaluminio y bronce en universidades como Politécnica Nacional y Técnica de Ambato, en cuanto a acero inoxidable se refiere no se encuentran investigaciones previas, por lo que se estudia el mercado internacional, encontrando así las empresas que se describen a continuación.

- *Molinos Retsch*

Empresa alemana, fundada en 1915, dedicada a la fabricación de molinos a partir de 2003, forma actualmente parte del consorcio tecnológico VERDER convirtiéndose en líder mundial en fabricación de máquinas y equipos metalográficos como molinos, trituradoras, tamizadoras, sistemas de asistencia como baños ultrasónicos, secadoras rápidas, alimentadoras, entre otras, por medio de las cuales han alcanzado productos útiles para la preparación de muestras y caracterización de sólidos (Retsch, 2018).

Tabla 1-3 : Molinos Retsch

NOMBRE	MOLINO	CARACTERISTICAS
Molino de bolas de alta energía semiautomática Emax		<ul style="list-style-type: none">• Para material semiduro, duro, frágil, fibroso - seco o húmedo• Granulometría inicial: < 5 mm• Granulometría final: < 80 nm• 2 recipientes de molienda• Volumen: 50 ml/125 ml• Velocidad: 300-2000 rpm• Molienda por Impacto y fricción.• Peso: 120 Kg• Dimensiones: 625 x 525 x 645 m

Tabla 1-3: Molinos Retsch (Continuación)

Molino planetario de bolas



- Para material blando, duro, frágil, fibroso - seco o húmedo
- Granulometría inicial: < 10 mm
- Granulometría final: <10 µm
- 1 recipiente de molienda
- Molienda por: Impacto y fricción.
- Velocidad máx. rueda principal: 100 - 650 min-1
- Volumen de molienda: 12, 25, 50, 80, 125, 250 y 500 ml
- Peso: 86 Kg
- Dimensiones: 835 x 630 x 505 mm
- Su costo oscila entre \$2084 y \$4300

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: (Retsch)

- *Molinos Fritsch*

Fundada en 1920 en Singapur extendiéndose a Rusia, China, EE. UU y Francia en el 2005. Líder en molinos de bolas para muestras semiduras, blandas, viscosas, fibrosas, sensibles a la temperatura y húmedas, su mayor logro lo obtiene en el 2007 con el molino micro planetario capaz de obtener resultados de molienda ultra finos hasta el rango nanométrico. Sus molinos son:

Tabla 2-3: Molinos Fritsch.

NOMBRE	MOLINO	CARACTERISTICAS
<p>Molino Vibratory Micro Mill PULVERISETTE</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Molienda por: Impacto y fricción. • Granulometría inicial: 5 mm • Granulometría final: 1 µm • Cantidad de muestra 1-10 ml • Peso: 20 Kg • Dimensiones: 370 x 400 x 200 m

Tabla 3-3: Molinos Fritsch.(Continuación)

**Planetary Mill
PULVERISETTE
5**



- Molienda por impacto
- Tazones de molienda de 125, 150, 250, 420, 500 ml
- Max. tamaño de alimentación (depende del material) 10 mm
- Min. cantidad de muestra 15 ml
- Max. cantidad de muestra: 450 ml
- Finura final (depende del material) <math><0.1 \mu\text{m}</math>
- Velocidad : 100-800 rpm
- Peso: 100 Kg
- Dimensiones: 580 x 670 x 570 mm
- Su costo oscila de \$2000 a \$3500

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Catálogo de productos Fritsch

- Molinos Union process.

Esta empresa es líder en la construcción de molinos attritores, los cuales pueden tener de uno a seis tanques de molienda. Sus características principales se resumen a continuación:

Tabla 4-3: Molino attritor – Union process

NOMBRE	MOLINO	CARACTERISTICAS
<p>Molino attritor para laboratorio</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Molienda por impacto • Tazones de molienda de 250, 500 ml • Max. tamaño de alimentación (depende del material) 10 mm • Dimensiones: 432x940 mm • Velocidad: 200 a 650 RPM • Útil especialmente para materiales cerámicos.

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: (Union Process, 2018)

El análisis de los requerimientos del cliente comparadas con máquinas existentes en el mercado, nos permiten definir las siguientes especificaciones técnicas.

Tabla 5-3: Especificaciones técnicas de la máquina

Capacidad	500 ml
Autonomía	Semi automática
Peso	<200 Kg
Producto final	Fino

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Autores

3.2 Diseño conceptual

Definidas las especificaciones técnicas requeridas en el prototipo, se realiza el análisis conceptual de molienda basada según Ribba, en la estructura funcional y modular del equipo. A continuación, se detallará estos dos últimos

3.2.1 Estructura funcional

Para describir la transformación del producto desde su estado inicial hasta el final se usa la estructura funcional, su propósito es describir entre flujos de entrada y salida la función de la máquina de molienda. De manera general se muestra a continuación el primer nivel, este describe de forma global la tarea principal que pretende resolver el equipo.



Figura 2-3 : Análisis funcional – Nivel 0

Fuente: Autores

Como se observa en la figura anterior el flujo de entrada es la viruta, energía eléctrica y la señal de encendido o puesta en marcha, para que a través del proceso de molienda se pueda obtener finalmente polvo metálico.

Como Nivel I de la estructura funcional, se evalúa las operaciones principales a desarrollar en el equipo de molienda, a continuación, se describe de forma general los procesos que se realizará en el equipo para obtener la función global descrita en la figura anterior.



Figura 3-3: Análisis funcional – Nivel I

Fuente: Autores

Fueron necesarios dos niveles de la estructura funcional para identificar el proceso de obtención de polvo a través de residuos sólidos. En el nivel 0 se determinó la función global de proyecto, siendo este, moler viruta gracias al suministro de energía eléctrica, señal de encendido y alimentación de viruta.

En el nivel I se determinó los procesos principales que realizará la máquina con el objetivo de cumplir la función global descrita en el nivel 0, aquí se efectuará la molienda de la viruta alimentada en el molino, así como la transformación de energía eléctrica en energía mecánica la cual permitirá el movimiento del motor que accionará al mecanismo de molienda, así también se describe el tamizado del producto que permitirá determinar la cantidad de polvo generado.

3.2.2 Estructura modular.

Para la obtención de polvo metálico se necesitará tres módulos: alimentación, molienda y tamizado, En la figura siguiente se observa el compendio de estos módulos, los cuales se analizarán de forma individual posteriormente.

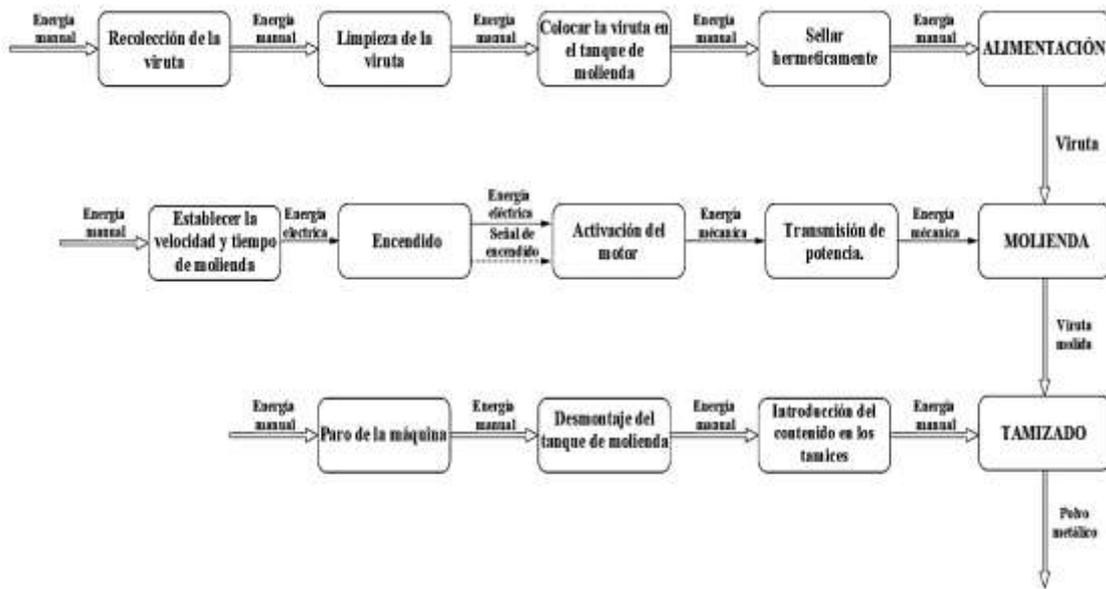


Figura 4-3: Módulos del prototipo de molienda.

Fuente: Autores

MÓDULO 1- Módulo de alimentación

Este módulo consiste de las siguientes funciones:

- Recolección de la viruta.
- Limpieza de la viruta
- Colocar la viruta en el tanque de la máquina de molienda.
- Sellar herméticamente el tanque de molienda.

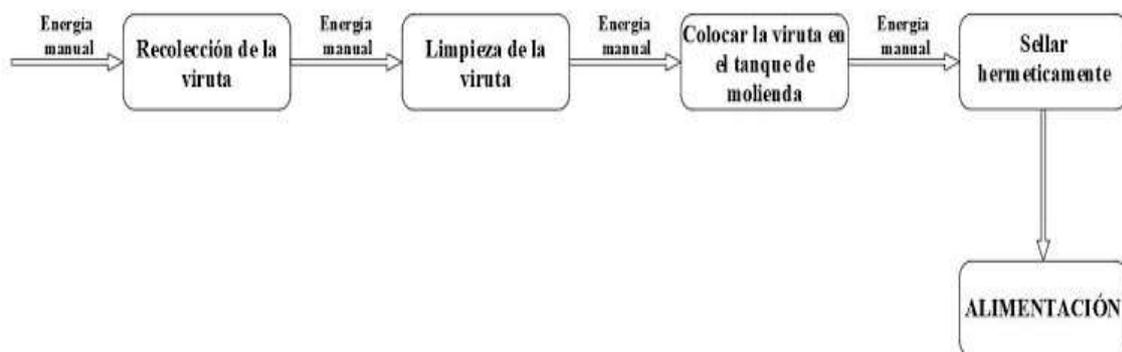


Figura 5-3: Funciones del módulo de alimentación

Fuente: Autores

MÓDULO 2 - Módulo de molienda

Este módulo cuenta con las siguientes funciones:

- Establecer la velocidad y tiempo de molienda.
- Encender y poner en marcha la máquina.
- Activación del motor.
- Transmisión de potencia.

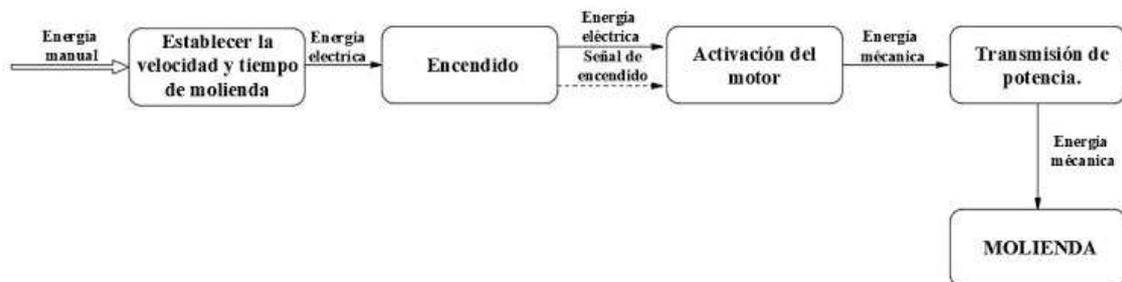


Figura 6-3: Funciones del módulo de molienda

Fuente: Autores

MÓDULO 3 - Módulo de tamización

Este módulo cuenta con las siguientes funciones:

- Paro del equipo de molienda.
- Desmontaje del tanque de molienda
- Introducción del contenido del tanque en los tamices.

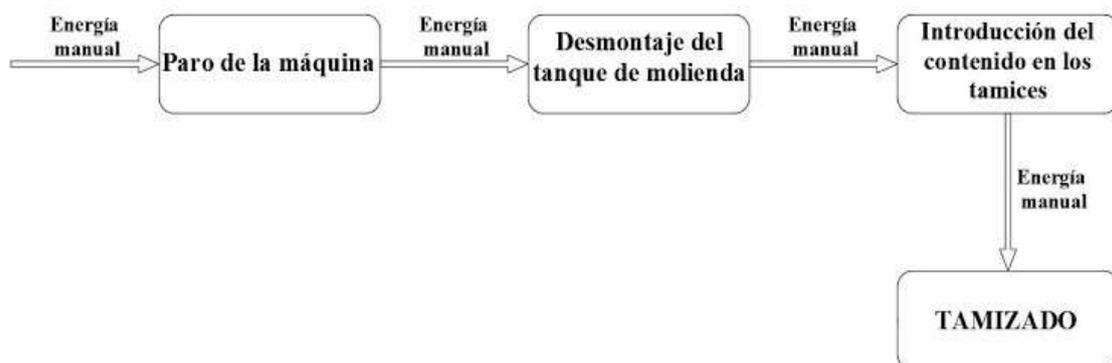


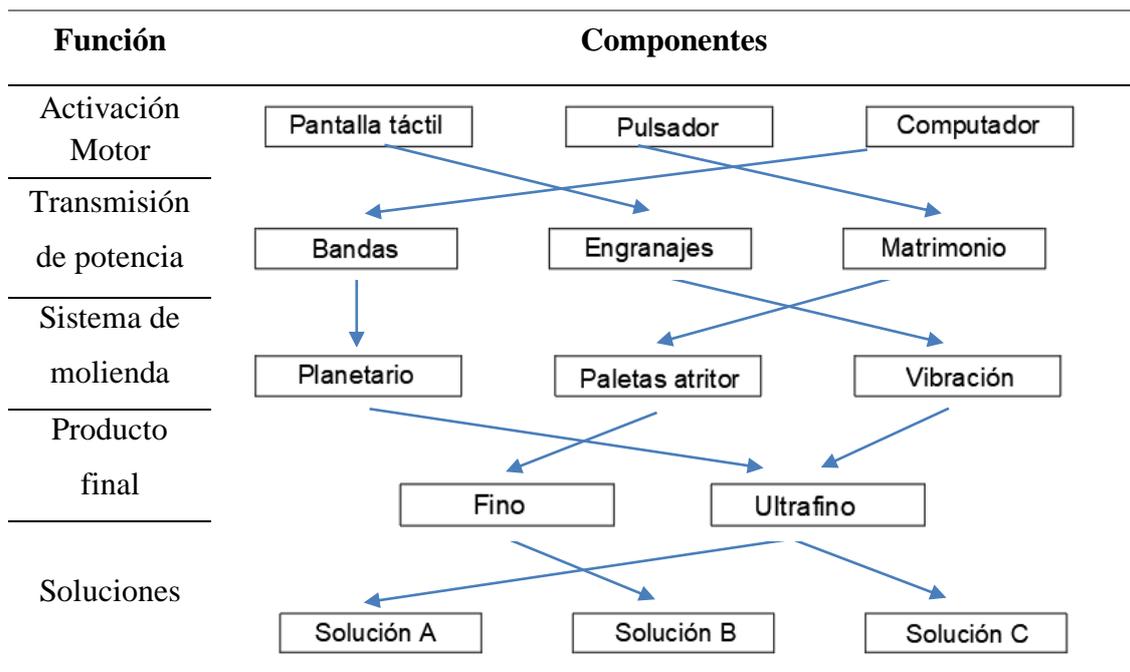
Figura 7-3: Funciones del módulo de tamización.

Fuente: Autores

3.3 Selección de alternativas

Como se dijo en el capítulo anterior, las máquinas de molienda mecánica, útiles para la obtención de granos muy finos son los molinos, la selección de las alternativas se realizará entonces en base a ello y a los resultados obtenidos en la matriz QFD. En la tabla siguiente se describe las principales características de las alternativas que se analizará posteriormente.

Tabla 6-3: Análisis morfológico de las alternativas



Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Realización propia

Alternativa 1

- **Molino de bolas de alta energía.**

Útil para moliendas de máxima intensidad; requiere enfriamientos continuos debido a su gran velocidad de trabajo mayor a la de otros tipos de molinos lo que lo hace ideal para aleaciones mecánicas y moliendas nanométricas.

A este molino se puede considerar una combinación de diferentes mecanismos de molienda, como impacto, fricción y movimientos circulares que provocan granulometrías ultra finas con un exigente diseño del recipiente de molienda, seguridad y movimiento.

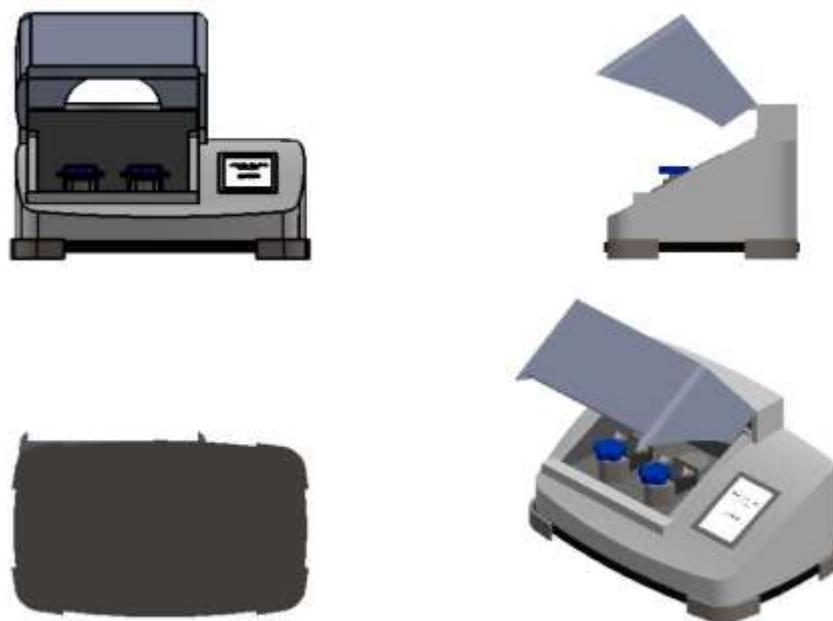


Figura 8-3: Molino de bolas de alta energía.
Fuente: Autores

El funcionamiento de este molino según Retsch, se basa en colocar los residuos a moler en el tanque de molienda al igual que las bolas, las cuales son selladas por un estribo de sujeción que al ser asegurada y puesta en marcha, bajo el principio de molienda impacto y fricción se obtienen tamaños muy finos de residuos. A continuación, se muestran las ventajas y desventajas del uso de este molino:

Tabla 7-3: Ventajas y desventajas del molino de bolas de alta energía.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Obtención de granulometrías muy finas. • Poco tiempo de operación. • Su refrigeración por agua hace que su operación sea continua. • Útil para material semiduro, duro, frágil y fibroso. • Mínimo mantenimiento requerido. 	<ul style="list-style-type: none"> • Exige grandes velocidades de rotación por tanto mayor potencia de motor. • Necesita refrigeración. • Construcción un tanto compleja. • Costo elevado.

Realizado por: Autores, 2018
Fuente: Realización propia

3.3.1 Alternativa 2

- Molienda por atricción.

Llamado también “Molino de bolas agitadas”, formado por un tanque estacionario y un eje agitador acoplado a un motor, el cual gira a elevadas velocidades golpeando a las bolas de molienda produciendo el impacto de ellas con la viruta, aquí el movimiento es interno puesto que el tazón no gira ni vibra. En la figura siguiente se muestra las partes correspondientes a un molino atritor:

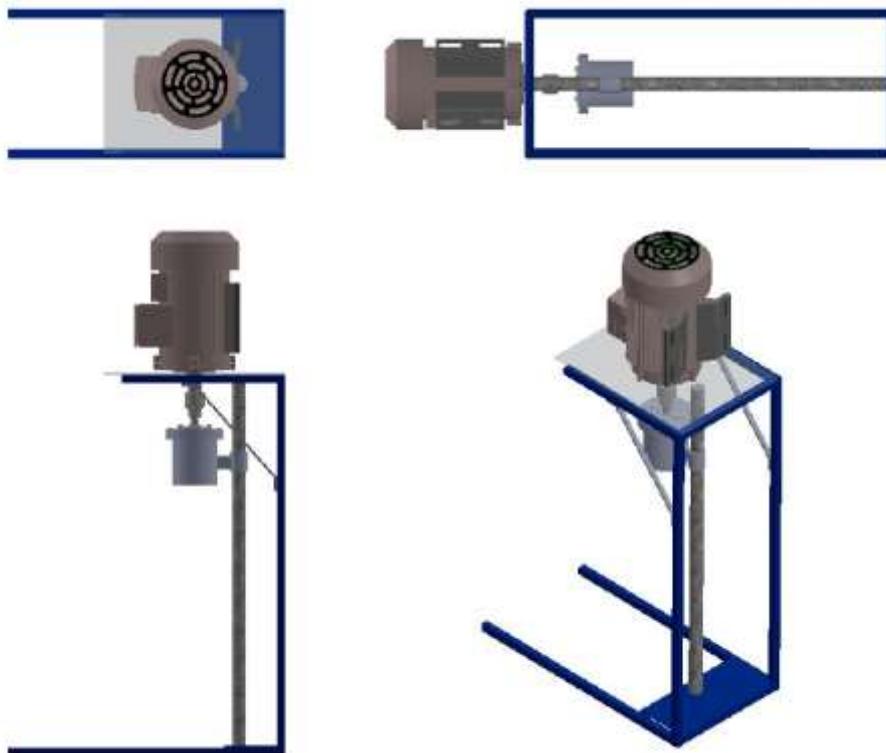


Figura 9-3: Elementos básicos de molino por atricción
Fuente: (Botero, 2009)

En la cámara de molienda se introducen los elementos moledores y el residuo sólido para obtener polvo metálico o para alear, la velocidad del motor se aprovecha directamente al estar acoplado con el agitador y paletas agitadoras haciendo que las rotaciones a alta velocidad ejerzan fuerzas de gran impacto al material. (Botero, 2009).

Las ventajas y desventajas de este tipo de molino se detallan a continuación:

Tabla 8-3: Ventajas y desventajas del molino atritor.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Obtención de granulometrías finas.• Fácil mantenimiento.• Fácil construcción.• Sistema de molienda sencillo.• No necesita premezclado.• Para materiales semiduros y frágiles.	<ul style="list-style-type: none">• Puede alcanzar elevadas temperaturas de operación.• Pronto desgaste de sus elementos.• Sistema de descarga un tanto difícil.• Puede existir pérdida de material al producirse aleación entre la pared del tanque, elementos molidores y residuos

Realizado por: Autores, 2018
Fuente: (Casco., 2017)

3.3.2 *Alternativa 3.*

- **Molino planetario.**

Se caracteriza principalmente por las granulometrías finas que se puede llegar a obtener en tiempos relativamente cortos, puesto que la fuerza que actúa sobre las bolas de molienda puede aumentar la fuerza gravitacional de 10 a 50 veces, de acuerdo al método planetario que se diseñe. (Valladares, 2008).

Su nombre se da debido al movimiento que ejerce el tanque, el cual esta soportado en un elemento rotatorio y un mecanismo de accionamiento especial que giran en sus propios ejes produciendo que las fuerzas centrífugas actúen alternadamente en la misma dirección y de forma opuesta. (P. Le Brun).

Sus elementos principales son el tanque de molienda, elementos molidores, mecanismo planetario y contrapeso como se muestra a continuación:



Figura 10-3: Elementos básicos de molino planetario.
Fuente: (Retsch, s.f.)

En el tanque de molienda se colocan las bolas y la viruta, la rueda principal gira en sentido contrario al recipiente de molienda con una relación de velocidad de 1:-2 generalmente, creándose un efecto Coriolis por el movimiento de las bolas en el tanque gracias a la energía motriz que transmite el motor provocando el suficiente rendimiento energético capaz de obtener granulometrías muy finas, mezclas y aleaciones en poco tiempo por las fuerzas de choque y fricción que liberan gran cantidad de energía dinámica. Se usan para materiales blandos, semiduros, duros y extremadamente duros así también como para frágiles o fibrosos (Retsch, s.f.).

Tabla 9-3: Ventajas y desventajas del molino planetario.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Para granulometrías ultra finas. • Fácil mantenimiento. • Molienda en seco y húmedo. • Altas velocidades de impacto. • Corto tiempo de operación. • Fácil operación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Puede alcanzar elevadas temperaturas de operación. • Costo elevado. • Puede existir pérdida de material y desgaste al producirse aleación entre la pared del tanque, elementos moledores y residuos

Realizado por: Autores, 2018
Fuente: (Casco., 2017)

Para la adecuada selección de la máquina se empleará el método de criterios ponderados, este método se basa en la elaboración de tablas, donde cada criterio se compara con los restantes y se asignan valores conforme a lo detallado en la tabla siguiente:

Tabla 10-3: Valores utilizados en el método de criterios ponderados.

VALOR	CRITERIO
1	Si el criterio de las filas es superior (o mejor, >) que el de las columnas.
0,5	Si el criterio de las filas es equivalente (=) al de las columnas.
0	Si el criterio de las filas es inferior (o peor,<) que el de las columnas

Realizado por: Autores, 2018
Fuente: (Riba, 2002)

Luego para cada criterio o solución, se suman los valores asignados en relación a los restantes criterios al que se le añade una unidad (para evitar que el criterio o solución menos favorable tenga una valoración nula); después en otra columna se calculan los valores ponderados para cada concepto que se obtienen de la división de cada criterio para la sumatoria total.

Finalmente, la evaluación total para cada solución resulta de la suma de productos de cada solución por el peso específico de cada criterio. En la tabla siguiente se describen los códigos asignados por cada alternativa.

Tabla 11-3: Códigos para las alternativas de diseño.

Numero de alternativa	Código	Alternativa
1	A	Molino de bolas de alta energía.
2	B	Molino atritor.
3	C	Molino Planetario

Realizado por: Autores, 2018
Fuente: Autores

Tomando en cuenta los códigos impuestos para cada alternativa, se procede a los criterios de evaluación de soluciones mediante ponderaciones.

Tabla 12-3: Criterio de evaluación de soluciones mediante ponderaciones.

	Capacidad	Costo	Fabricación con la tecnología de la empresa	Molienda rápida	Granulometría fina	Materiales de construcción	Para materiales metálicos	Σ+1	Ponderación
Capacidad		0,5	0,5	0,5	0	0,5	0,5	3,5	0,121
Costo	0,5		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	4	0,138
Fabricación con la tecnología de la empresa	0,5	0,5		0,5	0,5	0,5	1	4,5	0,155
Molienda rápida	0,5	0,5	0,5		0,5	1	0,5	4,5	0,155
Granulometría fina	1	0,5	0,5	0,5		1	0,5	5	0,172
Materiales de construcción	0,5	0,5	0,5	0	0		0,5	3	0,103
Para materiales metálicos	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5		4,5	0,155
							SUMA	29	1

Realizado por: Autores, 2018
Fuente: Realización propia

A continuación, se examina cada criterio de la tabla 10-3 respecto a los códigos establecidos para las herramientas de diseño en la tabla 11-3.

- *Capacidad de molienda*

En función de los datos mostrados en las tablas 2-3 y 4-3 se da la siguiente ponderación:

Tabla 13-3: Evaluación de las soluciones respecto al criterio de fabricación

CAPACIDAD	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A		0	0	1	0,167
Solución B	1		0,5	2,5	0,417
Solución C	1	0,5		2,5	0,417
SUMA				6	1

Realizado por: Autores, 2018
Fuente: Realización propia

Solución B, C > Solución A

- *Costo*

En cuanto al costo, se dará mayor crédito a la alternativa que sea la menos costosa para la empresa, tomando como referencia los posibles elementos de cada molino.

Tabla 14-3: Evaluación de las soluciones respecto al criterio de Costo.

COSTO	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A		0	0	1	0,167
Solución B	1		0,5	2,5	0,417
Solución C	1	0,5		2,5	0,417
SUMA				6	1

Realizado por: Autores, 2018
Fuente: Realización propia

Solución B, C > Solución A

- *Fabricación con la tecnología de la empresa.*

El CIRT en la actualidad cuenta con la tecnología más avanzada del país, es decir con todas las herramientas necesarias para poder construir cualquier prototipo.

Tabla 15-3: Tecnología de la empresa

FABRICACIÓN CON LA TECNOLOGIA DE LA EMPRESA	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A		0,5	0,5	2	0,333
Solución B	0,5		0,5	2	0,333
Solución C	0,5	0,5		2	0,333
			SUMA	6	1

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Realización propia

Solución A=B=C

La empresa cuenta con la mejor tecnología del país, lo que justifica la fabricación de cualquier alternativa.

- *Molienda rápida.*

El tiempo de molienda, es una característica que está en función de la masa a moler, principalmente propiedades de las bolas de molienda y velocidad. Sin embargo, por funcionamiento de los equipos moledores para cerámicos Casco define los siguientes tiempos de molienda:

Tabla 16-3: Tiempo de molienda.

Característica	Tiempo de molienda
Rápida	< 1 h
Normal	1 h
Lenta	> 2 h

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: (Casco., 2017)

Se requiere que el tiempo de molienda sea lo más corto posible, por ello se dará mayor valor al molino que cumpla con dicha característica de acuerdo a base de datos de molinos de bolas ya existentes.

Tabla 17-3: Evaluación de las soluciones respecto al criterio de tiempo de molienda.

MOLIENDA	Solución	Solución	Solución	$\Sigma+1$	Ponderación
RAPIDA	A	B	C		
Solución A		1	0,5	2,5	0,417
Solución B	0		0	1	0,167
Solución C	0,5	1		2,5	0,417
			SUMA	6	1

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Realización propia

Solución A, C > Solución B

- *Granulometría fina*

Para dar una ponderación al criterio de granulometría es necesario definir los tamaños iniciales y finales de operación. Se debe indicar que el tamaño final de la partícula dependerá del material y diámetro de los elementos moledores, por ello se toma como referencia los datos de las empresas Retsch y Fritsch presentados en sus catálogos.

Tabla 18-3: Granulometría de acuerdo al tipo de molino.

Tipo de Molino	Granulometría inicial	Granulometría Final
Bolas de alta energía	< 5 mm	< 80 nm
Atritor	< 10 mm	10 - 20 μm
Planetario	< 10 mm	< 1 μm

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: (Retsch)

Se dará mayor ponderación al molino que obtenga granulometrías muy finas.

Tabla 19-3: Evaluación de las soluciones respecto al criterio de granulometría.

GRANULOMETRIA FINAL	Solución	Solución	Solución	$\Sigma+1$	Ponderación
	A	B	C		
Solución A		1	0	2	0,333
Solución B	0		0	1	0,167
Solución C	1	1		3	0,500
			SUMA	6	1

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Realización propia

Solución C > Solución A > Solución B

- *Materiales de construcción.*

Tabla 20-3: Evaluación de las soluciones respecto al criterio de materiales de construcción.

MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A		0	0	1	0,167
Solución B	1		0,5	2,5	0,417
Solución C	1	0,5		2,5	0,417
SUMA				6	1

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Realización propia

Solución B, C > Solución A

- *Para materiales metálicos.*

Tabla 21-3: Evaluación de las soluciones para obtención de materiales metálicos.

PARA MATERIALES METÁLICOS	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A		1	0,5	2,5	0,417
Solución B	0		0	1	0,167
Solución C	0,5	1		2,5	0,417
SUMA				6	1

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Realización propia

Solución B, C > Solución A

Tabla 22-3: Evaluación de las soluciones respecto al criterio de granulometría.

CONCLUSION	Capacidad	Costo	Fabricación			Materiales de construcción	Para materiales metálicos	$\Sigma+1$	Ponderación
			con la tecnología de la empresa	Molienda rápida	Granulometría fina				
Solución A	0,020	0,023	0,052	0,065	0,057	0,017	0,065	1,299	0,325
Solución B	0,050	0,057	0,052	0,026	0,029	0,043	0,026	1,283	0,321
Solución C	0,050	0,057	0,052	0,065	0,086	0,043	0,065	1,418	0,355
SUMA								4,000	1

Realizado por: Autores, 2018

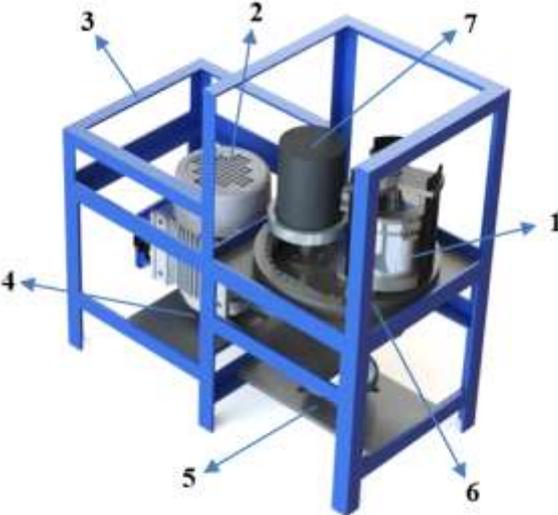
Fuente: Realización propia

Las ponderaciones realizadas anteriormente muestran que en prioridad la alternativa C correspondiente al molino planetario de bolas, seguida de la alternativa A, molino de bolas de alta energía son las mejores opciones para la obtención de polvo metálico, parámetros como capacidad, costo, fabricación con la tecnología de la empresa, molienda rápida y materiales de construcción son los que hacen de este molino la alternativa perfecta para su fabricación.

3.4 Características de la máquina de molienda seleccionada.

En la figura siguiente se muestra el pre diseño del equipo, basado en los requerimientos del cliente y óptima funcionabilidad de la máquina.

Tabla 23-3: Pre diseño de la máquina seleccionada

Esquema	Nombres
	<ol style="list-style-type: none">1. Tanque de molienda.2. Motor.3. Estructura.4. Sistema de transmisión.5. Rodamientos6. Tren planetario de engranajes.7. Contra peso.
	<ol style="list-style-type: none">8. Elementos molidores (bolas de molienda)

Realizado por: Autores, 2018
Fuente: Realización propia

De manera general el equipo consta de ocho elementos principales, en el que se destaca el sistema de engranes planetarios, causante del movimiento que genera el impacto entre las bolas de molienda y la viruta ocasionando la disminución del tamaño de la misma.

Las partes principales del molino planetario se muestran con mayor detalle a continuación:

- *Tanque de molienda.* - aquí se alojará los elementos moledores y la viruta, se necesita que sea lo suficientemente resistente para soportar el movimiento a elevada velocidad.
- *Motor.* - se escogerá en función del torque necesario para lograr el movimiento del sistema de transmisión, velocidad angular necesaria para obtener polvo metálico y del voltaje del lugar de trabajo.
- *Estructura.* - soportará los esfuerzos a los que estará sometida la máquina, a ella se sujetarán los elementos del equipo por lo que se deberá tomar en cuenta la vibración que pueda existir por el movimiento de los mismos.
- *Sistema de transmisión.* - para lograr las revoluciones necesarias del tanque se deberá analizar el sistema más idóneo de transmisión de velocidad del motor, de modo que no exista deslizamiento, asegure el torque y rendimiento del molino.
- *Rodamientos.* - servirán como medio de sujeción y soporte al eje de transmisión del tren de engranes planetarios.
- *Tren de engranes planetarios.* - de este sistema depende el movimiento del tanque de molienda; está formado por el sol que se conectará el eje de transmisión del motor, planeta, considerado como el engrane que dará movimiento al tanque de molienda, mientras que la corona servirá de guía de los dos anteriores.
- *Contrapeso.* - sirve principalmente para equilibrar el sistema de engranes planetarios, por tanto, deberá tener el mismo peso del sistema de molienda más los elementos moledores y viruta.
- *Elementos moledores.* - son los más importantes dentro del funcionamiento de la máquina, pues de ellos dependerá la granulometría final que se logre obtener, deben ser analizados a detalle puesto que cumplen con requisitos como: evitar la contaminación con la viruta, calentamiento excesivo al impactarse la una con la otra y mejores propiedades mecánicas de los elementos que se planeen moler.

CAPITULO IV

4. DISEÑO DEL PROTOTIPO

Este capítulo se centrará en el diseño del sistema de molienda y todos los elementos que conforman el prototipo, para esto se realiza el cálculo de la fuerza necesaria para la ruptura del material, la potencia requerida para el movimiento del sistema y todos los parámetros para la evaluación en estado crítico de todos los elementos para finalmente generar todos los planos respectivos para su construcción.

4.1 Dimensionamiento del tanque de molienda

Dada la capacidad del molino planetario de bolas de 500 cm^3 , se procede a dimensionar el tanque de alimentación. Según el manual de molienda de Union Process la relación diámetro/longitud (D/L) es ≥ 1 , con el objetivo de que el diámetro del tanque de molienda sea mayor brindando más área de impacto, para que exista un número suficiente de bolas en contacto, generando compresión, tracción y cizalladura, obteniendo partículas finas como resultado final.

Para un diámetro interno de 85 mm y un Volumen de 500 cm^3 , a partir de la ecuación (8) se determina la longitud del tanque de molienda.

$$V_{tm} = \frac{\pi}{4} * D_{tm}^2 * L_{tm} \quad (8)$$

Donde:

V_{tm} : Volumen del tanque de molienda.

D_{tm} : Diámetro interior del tanque de molienda.

L_{tm} : Longitud interior del tanque de molienda.

De donde despejando L_{tm} , se tiene:

$$L_{tm} = 4 * \frac{V_{tm}}{\pi * D_{tm}^2}$$

$$L_{tm} = 88.11 \text{ mm}$$

Se opta por una $L_{tm} = 90 \text{ mm}$, con el fin de emplear este exceso para el dimensionamiento de la tapa, recalculando el volumen con la ecuación (8) se tiene:

$$V_{tm} = \frac{\pi}{4} * (85 \text{ mm})^2 * 90 \text{ mm}$$

$$V_{tm} = 510705.15 \text{ mm}^3 \approx 510.7 \text{ cm}^3$$

Al existir un exceso de volumen del tanque de molienda de 10.7 cm^3 , se opta por una tapa de la forma siguiente.

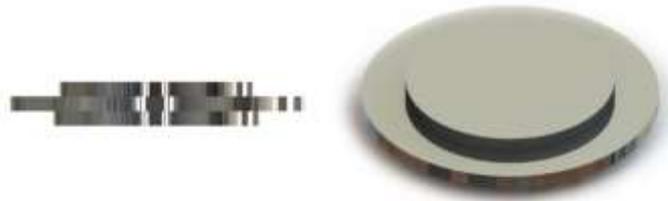


Figura 1-4: Tapa del tanque de molienda.
Fuente: Autores.

A partir del volumen y diámetro interno del tanque de molienda, se puede determinar la altura de la tapa teniendo:

$$L_t = 4 * \frac{V_t}{\pi * D_{tm}^2} \quad (9)$$

Donde:

V_t : Volumen de la sección inferior de la tapa del tanque de molienda.

L_t : Longitud de la sección inferior de la tapa del tanque de molienda.

$$L_t = 4 * \frac{(10705.155 \text{ mm}^3)}{\pi * (85 \text{ mm})^2}$$

$$L_t = 2.88 \text{ mm} \approx 3 \text{ mm}$$

En cuanto al espesor del tanque de molienda, se toma en cuenta el posible desgaste de las paredes internas del mismo por efecto del movimiento de los elementos molidores contra la viruta se opta por un espesor de 10 mm. El material seleccionado para la fabricación del tanque de molienda y su tapa es acero inoxidable AISI 304 ya que al ser más suave

que las bolas de molienda absorbe los impactos y se minimiza la contaminación del producto.

El tanque posee una curvatura en la parte inferior con el fin de evitar la acumulación del producto de la molienda, facilitando el proceso al momento de descargar el material y a su vez para su limpieza; en la siguiente figura se muestran las dimensiones finales del tanque de molienda.

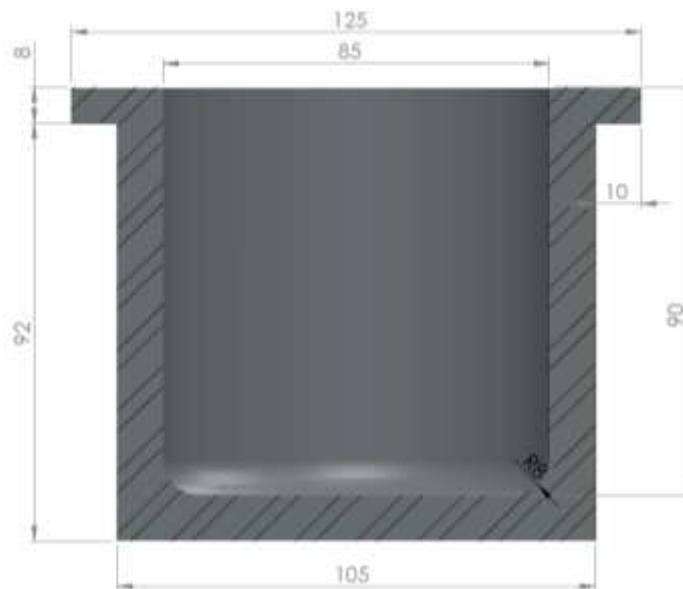


Figura 2-4: Dimensiones del tanque de molienda
Fuente: Autores

La tapa se fija al tanque de molienda mediante bridas una superior e inferior con el fin de obtener hermeticidad en el interior, las mismas serán ajustadas mediante 3 pernos M6x1 para facilidad del operario. A continuación, se muestra una figura con la configuración mencionada.



Figura 3-4: Configuración bridas - Tanque
Fuente: Autores

Para el diseño de los elementos restantes se toma en consideración el torque ejercido por el motor y la fuerza centrípeta producida por el giro de los mismos para lo cual, basados en la geometría del tanque de molienda, anteriormente evaluado, se realiza el modelado en SOLIDWORKS con dimensiones referenciales de los distintos elementos con el fin de obtener una masa que será sujeta a recalculo posteriormente en base al diseño de los elementos con las cargas aplicadas. En la figura 4-4 se puede observar la configuración en un pre diseño de los componentes del sistema de molienda y en la tabla 1-4 las masas correspondientes extraídas de SOLIDWORKS.

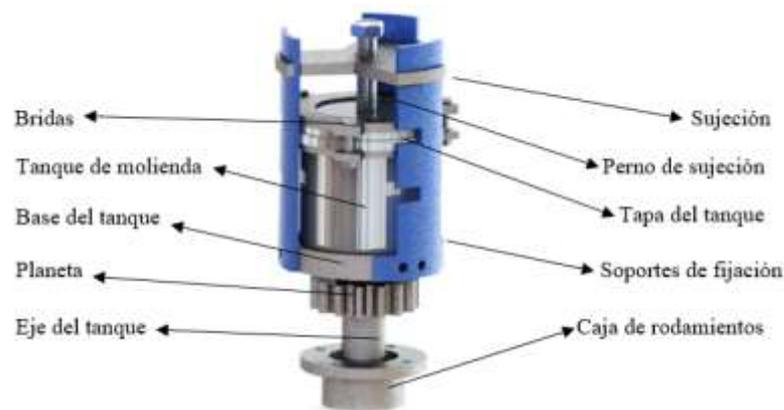


Figura 4-4: Pre diseño del sistema de molienda
Fuente: Autores

Tabla 1-4: Masa de los elementos en el sistema de molienda

Elemento	Masa (Kg)
Tanque de molienda	2.48
Base del Tanque	1.31
Planeta	0.79
Tapa del tanque de molienda	0.98
Brida inferior	0.12
Brida superior	0.39
Sujeción	0.64
Perno de sujeción	0.12
Barras de sujeción (3)	0.92
25 Bolas	0.82
Viruta	1.33
Eje del tanque de molienda	0.61
Caja de rodamientos	0.74
Rodamientos	0.38
Total	11.63 Kg

Realizado por: Autores, 2018
Fuente: Realización propia

4.2 Fuerza requerida para la molienda

Con el fin de determinar la fuerza que requieren los elementos moledores para lograr la molienda utilizamos dos softwares de simulación:

4.2.1 Simulación en ADAMS View

Se realizó una simulación en ADAMS View para constatar el movimiento de las bolas dentro del tanque de molienda y determinar la velocidad a la cual se consigue que este sea adecuado, es decir que las bolas describan una trayectoria característica en un molino planetario. Se detalla a continuación las configuraciones realizadas en el software para este estudio.

Empezamos con la importación de la geometría modelada en SOLIDWORKS en formato .igs eliminando todos los elementos que no afectan en la simulación, asignando de igual manera su material respectivo para cada uno de los sólidos que intervienen.



Figura 5-4: Geometría en ADAMS View
Fuente: Software ADAMS View

Se asignan según correspondan todas las relaciones entre los elementos sean uniones giratorias, lineales o fijas.



Figura 6-4: Relaciones establecidas entre elementos
Fuente: Software ADAMS View

Establecemos un movimiento en el eje de transmisión para nuestro ensayo a distintas velocidades. Asignamos una medida a los lugares de interés, para nuestro caso la velocidad angular del tanque de molienda y la del brazo.

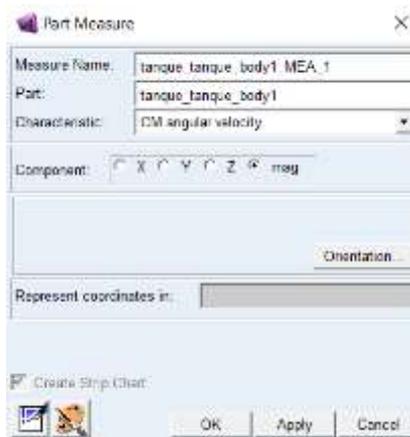


Figura 7-4: Medida de velocidad en el tanque de molienda
Fuente: Software ADAMS View

Al realizar varios ensayos a distintas velocidades se determinó que, para las dimensiones establecidas en el prototipo, la velocidad máxima de trabajo para el tanque de molienda se encuentra en 68 rad/s aproximadamente en 650 rpm por ende una velocidad de 325 rpm en el brazo para conseguir una relación de transmisión de 1:2 en los engranajes planetarios.

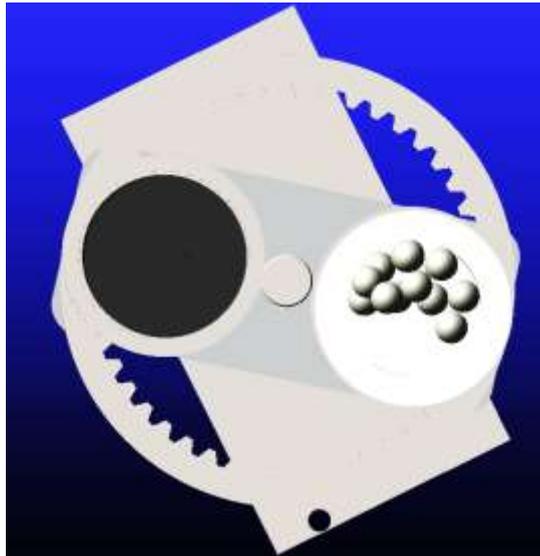


Figura 8-4: Movimiento de las bolas dentro del tanque de molienda
Fuente: Software ADAMS View

Incluyendo 25 bolas dentro del tanque de molienda en la simulación en promedio la velocidad lineal de los elementos molidores es de 600 mm/s velocidad con la que se realiza el estudio en ANSYS.

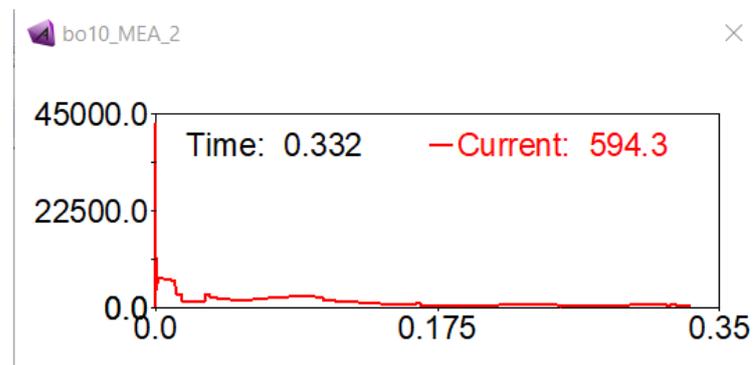


Figura 9-4: Medida de velocidad lineal en una bola
Fuente: Software ADAMS View

4.2.2 Simulación en ANSYS

Se utilizó el módulo Explicit Dynamics de ANSYS para verificar la fragmentación de la viruta al entrar en contacto con una bola de molienda a la velocidad estudiada en ADAMS, se detalla a continuación los parámetros implementados para este estudio.

- *Modelo geométrico para el análisis*

El estudio al ensamble geométrico completo sería innecesario ya que demandaría de excesivos recursos y tiempo de procesamiento por lo cual se decide realizar el estudio en

los elementos que intervienen directamente en la molienda. Consecuentemente se muestra una imagen del ensamble completo para un mejor entendimiento en la descripción posterior.



Figura 10-4: Modelo geométrico
Fuente: Autores

Realizamos entonces la modelación de los elementos de interés para la simulación; como se describe en la figura siguiente, se realiza un bloque de espesor del tanque de molienda emulando al mismo, un bloque pequeño con espesor correspondiente a la viruta promedio obtenida en un proceso de desbaste, aproximadamente 0,9 mm, y una bola de 20 mm de diámetro como elemento moledor.

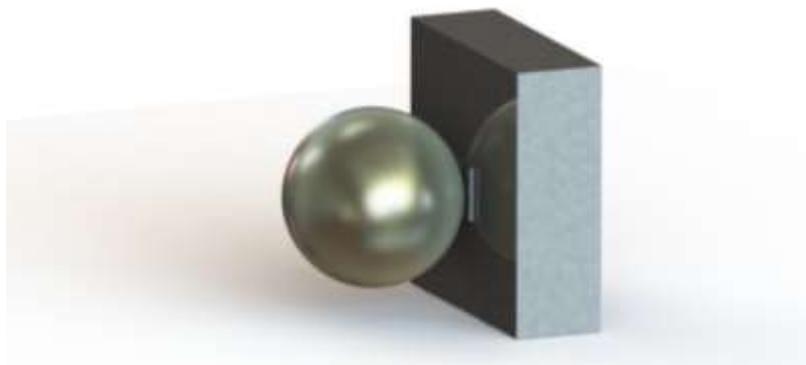


Figura 11-4: Modelado de bola, viruta y tanque para simulación explícita
Fuente: Autores

- *Material en bolas de molienda*

Las bolas de molienda comerciales son fabricadas principalmente de óxido de zirconio, corindón, acero inoxidable, acero templado y carburo de tungsteno, siendo estas dos

últimas las seleccionadas para nuestro estudio debido a las características del material a ser procesado.

Para un análisis explícito se requieren ciertos parámetros dependiendo del modelo que se use en la simulación; para bolas de acero templado encontramos la designación AISI 52100 que para este tipo de estudio no se encuentra con la información para la determinación de los coeficientes especiales necesarios, por lo cual se realiza el análisis para un acero AISI 4340 de menores características, pero perteneciente a la librería de explicit materials dentro de ANSYS.

Se realiza una simulación para cada material de las bolas de molienda correspondiente a carburo de tungsteno y acero AISI 4340 cuyo proceso se describe a continuación.

- Simulación Bolas de Tungsteno – Viruta AISI 304
 - Asignación de materiales

Empezamos el estudio para bolas de carburo de tungsteno asignando los materiales correspondientes dentro del software, el cual trabajará con el criterio de Steinberg Guinan cuya ecuación se describe a continuación y en la cual se relaciona la resistencia elástica, la deformación plástica, la presión y la energía interna (Temperatura) de los materiales (William, 2017).

$$\bar{\sigma}(\bar{\epsilon}^p, T) = [A + B(\bar{\epsilon}_p + \epsilon_o)]^n \cdot \left[1 + H_1 \cdot \frac{p}{j^{\frac{1}{3}}} - H_2 \cdot (T - 300) \right] \quad (10)$$

Donde:

j = Relación de volúmenes

A = Límite elástico

B y n = Parámetros de endurecimiento del material

ϵ_o = Deformación plástica equivalente inicial

H_1 y H_2 = Constantes del material

Datos que son detallados dentro de las propiedades del material dentro de la casilla Steinberg Guinan Strength en ANSYS como se muestra a continuación:

Steinberg Guinan Strength		
Initial Yield Stress Y	2,2E+09	Pa
Maximum Yield Stress Ymax	4E+09	Pa
Hardening Constant B	7,7	
Hardening Exponent n	0,13	
Derivative dg/dP GP	1,501	
Derivative dg/dT GT	-2,208E+07	Pa C ⁻¹
Derivative df/dP YP	0,02064	
Melting Temperature Tmelt	4246,9	C

Figura 12-3: Propiedades del Tungsteno para el modelo Steinberg Guinan

Fuente: ANSYS

Seleccionamos entonces de la librería de ANSYS los materiales mostrados en la figura siguiente:

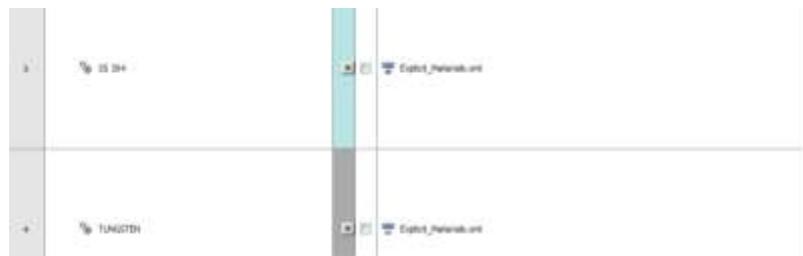


Figura 13-4: Materiales explícitos para la simulación

Fuente: Software ANSYS – Módulo Eexplicit Dynamics

Se añade para el acero inoxidable AISI 304, en elasticidad lineal y elasticidad isotrópica para el estudio del material en base al módulo de Young y radio de Poisson, un criterio de falla en plastic strain failure con un valor de 0.47 indicando de esta manera que a un 47% de deformación máxima se considera que el elemento falla (J.M. Meza, 2008), los valores introducidos se presentan en la siguiente figura.

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7900	kg m ⁻³		
3	Isotropic Elasticity				
4	Derive from	Young's Mo...			
5	Young's Modulus	1,93E+12	Pa		
6	Poisson's Ratio	0,29			
7	Bulk Modulus	1,5317E+13	Pa		
8	Shear Modulus	7,4806E+12	Pa		
9	Specific Heat	423	J kg ⁻¹ C ⁻¹		
10	Steinberg Guinan Strength				
11	Shear Modulus	7,7E+10	Pa		
12	Shock EOS Linear				
13	Plastic Strain Failure				
14	Maximum Equivalent Plastic Strain EPS	0,47			

Figura 14-4: Asignación de propiedades del material

Fuente: Software ANSYS – Módulo Explicit Dynamics

Se procede a importar en Geometry la geometría modelada en Solidworks en formato .STEP, y consecuentemente en Model a asignar los materiales a cada elemento.

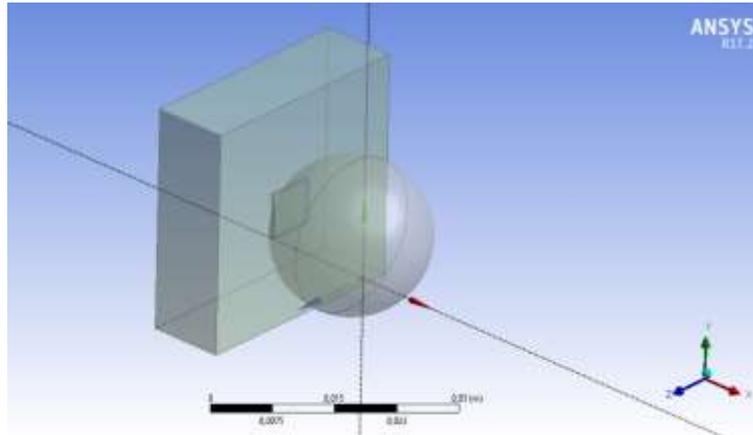


Figura 15-4: Importación de modelo en ANSYS Design Modeler
Fuente: Software ANSYS – Módulo Explicit Dynamics

Establecemos las conexiones entre los elementos de tipo friccional con coeficientes dinámico y estático de 0.74 y 0.54 respectivamente como se muestra a continuación. (Serway, 2008).

Details of "Body Interaction"	
☐ Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
☐ Definition	
Type	Frictional
Friction Coefficient	0,74
Dynamic Coefficient	0,54
Decay Constant	0,
Suppressed	No

Figura 16-4: Asignación de valores de coeficientes de fricción
Fuente: Software ANSYS – Módulo Explicit Dynamics

- *Mallado*

Se realizó la creación de la malla con la herramienta body sizing, con un tamaño de 0.1 mm, para la viruta como elemento de mayor interés, luego de generada la malla en su totalidad se evaluó la calidad de la misma con la opción Statistics – Mesh metric (Element Quality) obteniendo un promedio de 0.9476 aceptable para el estudio según la tabla mostrada a continuación.

Tabla 2-4: Niveles de calidad de malla

Inadecuado	Malo	Suficiente	Buena	Muy Buena	Sobresaliente
0-0,001	0,001-0,15	0,15-0,20	0,20-0,70	0,70-0,95	0,95-1

Realizado por: Autores

Fuente: (BUSTAMANTE SÁNCHEZ, 2014)

- *Condiciones iniciales*

Se establece entonces la condición inicial de velocidad para la bola, con un valor de 600 mm/s en el eje x de acuerdo a lo obtenido en la simulación en ADAMS View, como se muestra a continuación.

Details of "Velocity"	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
[-] Definition	
Input Type	Velocity
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
<input checked="" type="checkbox"/> X Component	-600, mm/s
<input type="checkbox"/> Y Component	0, mm/s
<input type="checkbox"/> Z Component	0, mm/s
Suppressed	No

Figura 17-4: Asignación de velocidad para la bola de molinoda
Fuente: Software ANSYS – Módulo Explicit Dynamics

Establecemos las condiciones para el análisis fijando un tiempo de simulación de 0.01s al ser una simulación explícita y evaluando las condiciones geométricas para que llegue a existir contacto entre los elementos.

Details of "Analysis Settings"	
[-] Analysis Settings Preference	
Type	Program Controlled
[-] Step Controls	
Resume From Cycle	0
Maximum Number of Cycles	1e+06
End Time	1,e-002 s
Maximum Energy Error	0,4
Reference Energy Cycle	0
Initial Time Step	Program Controlled
Minimum Time Step	Program Controlled
Maximum Time Step	Program Controlled
Time Step Safety Factor	0,9
Characteristic Dimension	Diagonals
Automatic Mass Scaling	No

Figura 18-4: Analysis settings en ANSYS
Fuente: Software ANSYS – Módulo Explicit Dynamics

Estableciendo todos los parámetros mencionados seleccionamos en solutions todos los resultados que deseamos sean evaluados. El proceso tomó un tiempo de alrededor de 15 horas esto se justifica, al ser un problema complejo que requiere gran capacidad de procesamiento de datos.

Además del estudio de calidad de malla se analiza un estudio de convergencia para encontrar una linealidad y por lo tanto garantizar resultados de mayor confiabilidad. A continuación, se muestra una gráfica con los puntos en los cuales no se encontró mayor variabilidad de resultados.

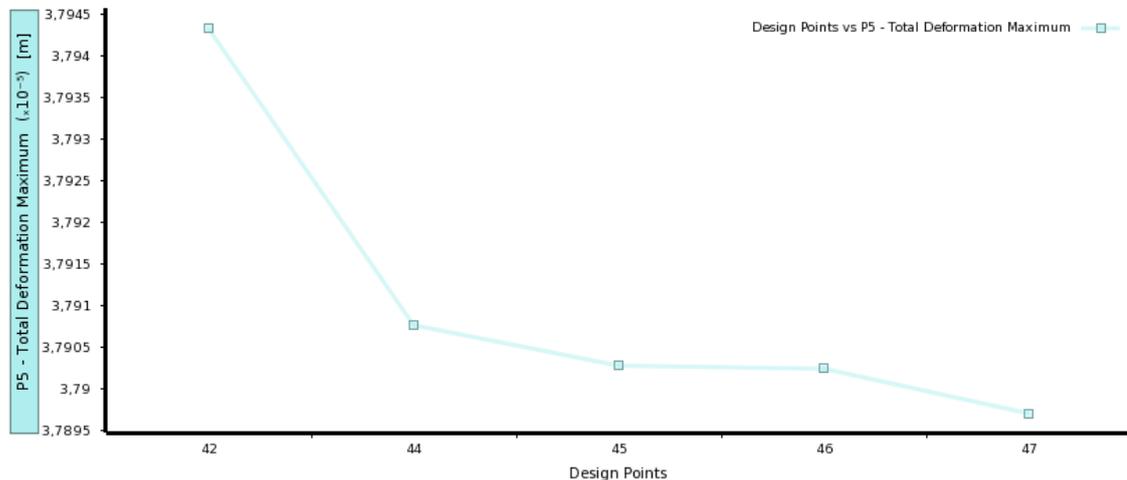


Gráfico 1-4: Análisis de convergencia

Fuente: Software ANSYS – Módulo Explicit Dynamics

Se establece una relación entre el tamaño de los elementos de malla y la deformación máxima obtenida con cada una de ellos, se analizó entonces con un elemento de malla de tamaño 0.5 mm en la viruta como elemento de mayor interés.

- Simulación Acero AISI 4340 – AISI 304

El criterio con el cual trabajará ANSYS para este estudio es el de Johnson-Cook, modelo basado en el concepto de Continuum Damage Mechanics (CDM) que describe que el daño de los materiales se puede interpretar como la degradación de la resistencia de los mismos debido a efectos de carga, térmicos o químicos. El proceso se inicia por la aparición de micro facturas o micro poros en el seno del material como consecuencia de las inevitables imperfecciones existentes, estas por la combinación de los efectos antes comentados se combinan e inducen el crecimiento de las fisuras que acaban por producir la fractura del material. El método es especial para ciertos materiales sometidos a altas tasas de deformación, gran tensión y temperatura elevada, es principalmente utilizado en simulaciones de impacto y penetración; su ecuación se describe a continuación (Helminiak, 2016).

$$\sigma_{eq} = [A + B \cdot \varepsilon_p^n][1 + c \cdot \ln(\dot{\varepsilon}^*)][1 - T^{*m}]$$

Donde:

A = Límite elástico

B y n = Parametros de endurecimiento del material

c = Parametro de sensibilidad de deformación

m = Exponente de temperatura

ε_p = Tension plástica acumulada

T = Temperatura de trabajo

Datos que son detallados dentro de las propiedades del material dentro de la casilla en ANSYS como se muestra a continuación:

Johnson-Cook Strength		
Strain Rate Corrector	First-Order	
Initial Yield Stress	7,52E+08	Pa
Hardening Constant	5,1E+08	Pa
Hardening Exponent	0,26	
Strain Rate Constant	0,014	
Thermal Softening Exponent	1,03	
Melting Temperature	1519,9	C
Reference Strain Rate (sec)	1	

Figura 19-4: Propiedades del Acero 4340 para el modelo Johnson Cook

Fuente: Software ANSYS – Módulo Explicit Dynamics

Seleccionamos entonces de la librería de ANSYS los materiales mostrados en la figura siguiente:

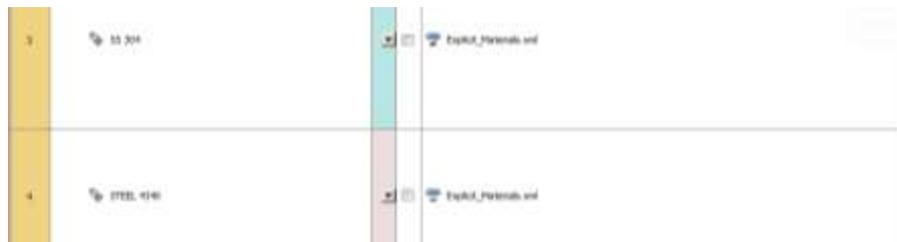


Figura 20-4: Materiales explícitos para la simulación

Fuente: Software ANSYS – Módulo Explicit Dynamics

Realizamos el mismo estudio anteriormente evaluado para el mallado, análisis de convergencia y datos adicionales para la simulación.

4.2.2.1 Análisis de resultados

Una vez finalizada la simulación procedemos con el análisis de resultados, encontrando un análisis de esfuerzos tanto en la bola de molienda como en la viruta y a su vez se muestran valores de deformación obtenidos.

Tabla 3-4: Resumen de resultados obtenidos en ANSYS

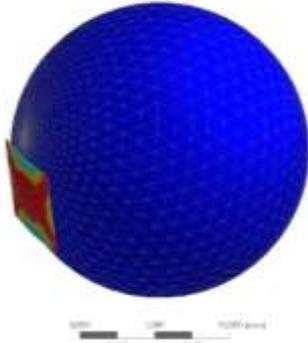
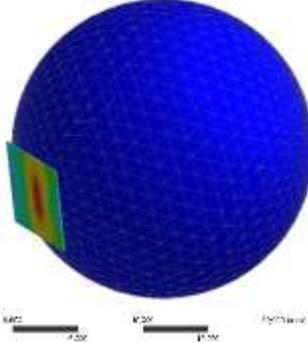
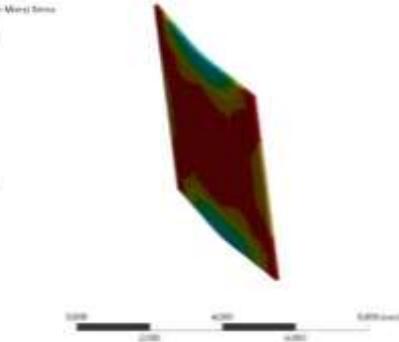
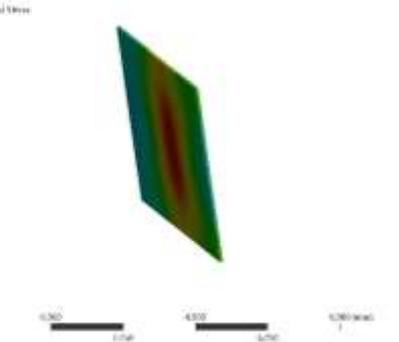
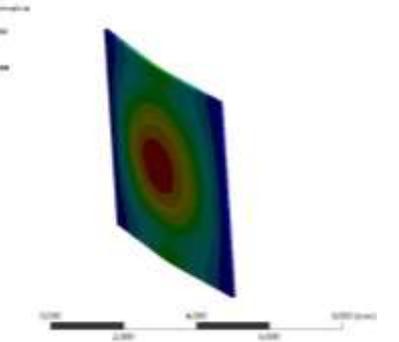
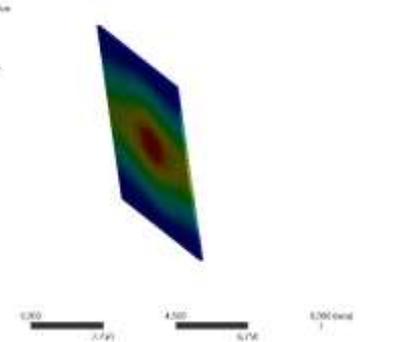
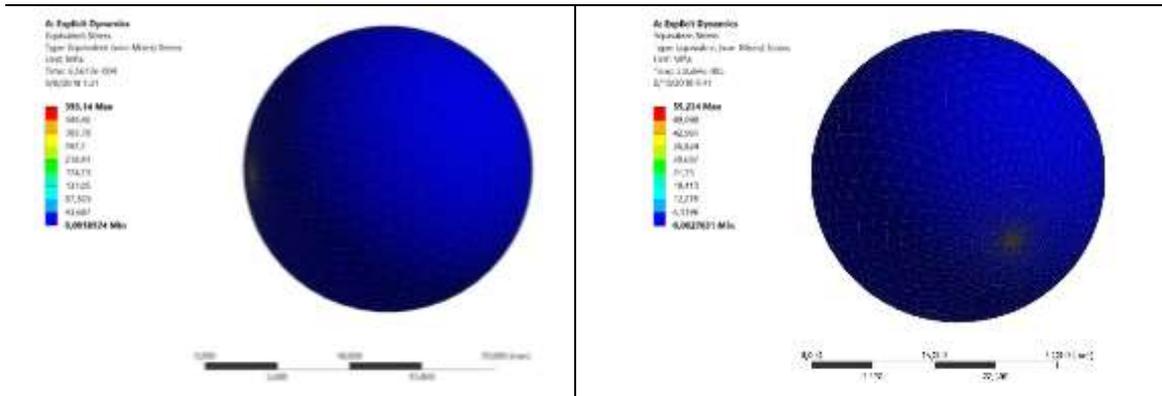
Simulación Tungsten – AISI 304	Simulación AISI 4340 – AISI 304
Impacto entre bola y viruta	
	
Esfuerzos en la viruta	
<p>A1 Explicit Dynamics Equivalent Stress Type: Equivalent (von Mises) Stress Unit: MPa Time: 0.001000000 Iteration: 1.000</p>  <p>330.14 Max 305.40 282.36 262.5 238.81 194.71 131.25 67.569 0.00000</p>	<p>A1 Explicit Dynamics Equivalent Stress Type: Equivalent (von Mises) Stress Unit: MPa Time: 0.001000000 Iteration: 1.000</p>  <p>55.234 Max 49.048 42.558 36.608 30.657 24.707 18.757 12.797 6.836 0.00000</p>
Deformaciones en la viruta	
<p>A1 Explicit Dynamics Total Deformation Type: Total Deformation Unit: mm Time: 0.001000000 Iteration: 1.000</p>  <p>0.00022 Max 0.00012 0.00007 0.00004 0.00002 0.00001 0.00000</p>	<p>A1 Explicit Dynamics Total Deformation Type: Total Deformation Unit: mm Time: 0.001000000 Iteration: 1.000</p>  <p>0.000513 Max 0.000311 0.000188 0.000111 0.000066 0.000039 0.000022 0.000013 0.000007 0.000004 0.000002 0.000001</p>

Tabla 4-4: Resumen de resultados obtenidos en ANSYS(Continuación)
Esfuerzos en la bola de molienda



Realizado por: Autores 2018
Fuente: ANSYS

Al finalizar el análisis se puede visualizar en la figura el impacto de la bola de molienda con la viruta, distinguiéndose una deformación considerable en la viruta, pero sin llegar a observar su fragmentación, sin embargo, se puede concluir que, en un estudio de mayores recursos de procesamiento de datos, los impactos sobre la misma serían sucesivos llegando a una deformación mayor hasta terminar en su ruptura.

En cuanto a la bola de molienda observamos que se presentan esfuerzos poco representativos, llegando a no ocasionar ningún daño sobre la misma, sin embargo, de igual manera se debe tomar en cuenta los impactos sucesivos que realizará este elemento llegando en alguna ocasión a presentar algún defecto, suponiendo entonces un reemplazo del elemento.

Se concluye entonces que a la velocidad ensayada en ADAMS View y con el número de bolas de molienda mencionadas se dan resultados favorables en la molienda por medio del sistema planteado.

4.3 Selección de la potencia necesaria

Para la selección del motor se toma en cuenta la inercia a vencer de la masa del sistema de molienda y contrapeso la misma que determina cuanta potencia es necesaria para lograr el movimiento del mecanismo.

Para la determinación de la inercia, utilizamos en SOLIDWORKS la opción de propiedades físicas creando sistemas de referencia adecuados para la obtención de este valor, se analiza entonces dos casos, por un lado, la inercia necesaria para el giro del sistema de molienda con respecto al eje del tanque y a su vez la originada en la rotación alrededor del eje de transmisión.

4.3.1 *Momento de inercia del sistema de molienda con respecto al eje del tanque*

Mediante el software se pueden hallar los siguientes valores de momentos de inercia entre los cuales el de interés correspondería al eje y.



Figura 21-4: Momento de inercia del sistema de molienda con respecto a su eje
Fuente: Software Solidworks 2017

El momento de inercia con respecto al centro del eje del tanque de molienda corresponde al valor $I_{sm} = 19613.3224 \text{ Kg. mm}^2$

4.3.2 *Momento de inercia del tanque y contrapeso con respecto al centro del eje de transmisión*



Figura 22-4: Momento de inercia con respecto al centro del eje de transmisión
Fuente: Software Solidworks 2017

El momento de inercia con respecto al centro del eje del tanque de molienda corresponde al valor $I_{sm} = 190433.2491 \text{ Kg. mm}^2$.

4.3.3 Aceleración angular del tanque

Para la aceleración angular del tanque se toma en cuenta la velocidad angular máxima a la cual va a trabajar el engranaje planeta y un tiempo de Arranque del motor en función de la gráfica 2-4 y de acuerdo a la ecuación 10.

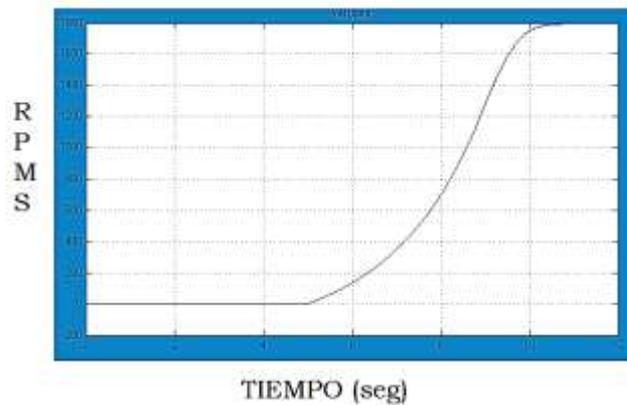


Gráfico 2-4: Tiempo estabilización de arranque de un motor eléctrico
Fuente: (Erick Moreno, 2016)

$$\alpha = \frac{n_p}{t_a} \quad (11)$$

Donde:

n_p = Velocidad angular planeta

t_a = Tiempo de estabilización del motor

$$\alpha_t = \frac{650 \frac{\text{rev}}{\text{min}} * \frac{\text{min}}{60 \text{ s}} * \frac{2\pi \text{ rad}}{1\text{rev}}}{7 \text{ s}}$$

$$\alpha_t = 9.72 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

4.2.1 Aceleración angular del tanque con respecto al centro

$$\alpha_{rc} = \frac{325 \frac{\text{rev}}{\text{min}} * \frac{\text{min}}{60 \text{ s}} * \frac{2\pi \text{ rad}}{1\text{rev}}}{7 \text{ s}}$$

$$\alpha_{rc} = 4.86 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

4.2.2 Torque en el planeta

$$T_p = \alpha_t * I_{sm} \quad (12)$$

$$T_p = 9.72 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} * 19613.3224 \text{ Kg. mm}^2 = 0.19 \text{ N. m}$$

4.3.4 Torque del tanque con respecto al centro

Tomaremos en cuenta el doble de torque necesario para su movimiento debido a la masa del contrapeso.

$$T_{rc} = 2 * \alpha_{rc} * I_{rc} \quad (13)$$

$$T_{rc} = 2 * 4.86 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} * 190433.2491 \text{ Kg. mm}^2 * \frac{1\text{m}^2}{(1000 \text{ mm})^2} = 1.85 \text{ N. m}$$

4.3.5 Potencia necesaria para el tanque

$$P_t = T_p * n_p \quad (14)$$

$$P_t = 0.19 \text{ N. m} * 650 \frac{\text{rev}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} * \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}}$$

$$P_t = 12.93 \text{ W}$$

4.3.6 Potencia necesaria para el tanque con respecto al centro

$$P_{rc} = T_{rc} * n_b \quad (15)$$

$$P_{rc} = 1.85 \text{ N. m} * 325 \frac{\text{rev}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} * \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}}$$

$$P_{rc} = 62.99 \text{ W}$$

4.3.7 Potencia total necesaria para el movimiento del mecanismo

$$\begin{aligned}P_{nec} &= P_{rc} + P_t \\P_{nec} &= 62.99 \text{ W} + 12.93 \text{ W} \\P_{nec} &= 75.92 \text{ W} = 0.13 \text{ HP}\end{aligned}\tag{16}$$

Tomando en cuenta este valor escogemos un motor de 0.5 HP para un factor de seguridad de 3.84.

4.4 Diseño de engranajes planetarios

El tren de engranajes planetarios consta de una corona, sol, planeta y brazo para la transmisión del movimiento, en su diseño se analiza la velocidad necesaria de 325 rpm en el brazo y mediante relaciones de transmisión conseguir el doble de velocidad en el planeta y por lo tanto en el tanque de molienda. La relación de transmisión en engranajes planetarios viene definida por:

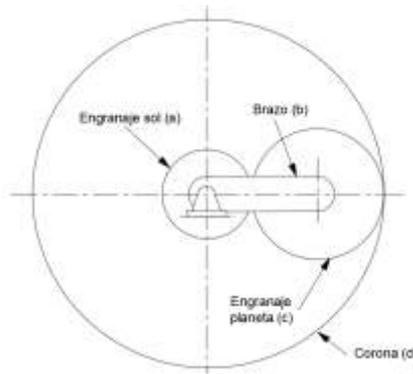


Figura 23-4: Configuración de engranajes planetarios
Fuente: Autores

$$e = \frac{z_r - z_b}{z_s - z_b}\tag{17}$$

Donde:

z_c = Número de dientes de la corona (d)

z_b = Número de dientes del brazo (b)

z_s = Número de dientes del sol (a)

z_p = Número de dientes del planeta (c)

El número de dientes de la corona está dado por la siguiente ecuación:

$$z_c = (2 * z_p) + z_s \quad (18)$$

La distancia de centros entre la corona y el planeta se fija en 78.5 mm con el fin de obtener la fuerza centrípeta necesaria en el tanque de molienda, además se opta por 15 dientes en el planeta y en el sol, obteniendo entonces el número de dientes en la corona:

$$z_c = (2 * 15) + 15 \quad z_c = 45 \text{ Dientes}$$

Por lo tanto, la relación de transmisión se calcula:

$$e = \frac{45 - 0}{15 - 0} \quad e = 3$$

En cuanto a la velocidad en los engranajes la relación de transmisión se mantiene y guarda analogía con las velocidades angulares de cada engranaje de la siguiente manera:

$$e = \frac{n_r - n_b}{n_s - n_b} = \frac{0 - 325}{n_s - 325} \quad (19)$$

$$n_s = 216.66 \text{ rpm}$$

$$n_p = n_s * \frac{z_c}{z_p} \quad n_p = 650 \text{ rpm}$$

Para facilitar el proceso de fabricación se puede prescindir del engranaje sol ya que este no cumple ninguna función al no tener conexión con los elementos del prototipo. Para los cálculos de resistencia en los engranajes corona y planeta, y a su vez para su diseño geométrico se asume la condición de 2 engranajes rectos en contacto con la distancia entre centros mencionada además de la consideración de un motor de 0.5 HP estudiada en la sección anterior. Empezaremos definiendo un ángulo de presión en función del número de dientes de los engranajes a través de la siguiente tabla:

Tabla 5-4: Ángulos de presión y número mínimo de dientes

Ángulo de presión	Número mínimo de dientes
14.5	32
20	18
25	12

Realizado por: Autores, 2018
Fuente: Realización propia

Escogemos entonces 25 grados como ángulo de presión en relación a 15 dientes del engranaje planeta. Para el módulo métrico se adopta un valor de 5 en función de la distancia de ejes que debe existir obteniendo a partir de la ecuación:

$$m = \frac{D_p}{z_p} = \frac{D_c}{z_c} \quad (20)$$

Donde:

m = módulo

D_p = Diámetro del planeta

D_c = Diámetro de la corona

Obteniendo entonces:

$$D_p = m * z_p$$

$$D_p = 5 * 15$$

$$D_p = 75$$

Con el número de dientes de la corona calculamos su diámetro.

$$D_c = m * z_c$$

$$D_c = 5 * 45$$

$$D_c = 225$$

El cálculo geométrico en cada uno de los engranajes se resume en la siguiente tabla.

Tabla 6-4: Resumen cálculo geométrico de los engranajes

Valor geométrico	Ecuación	Planeta (mm)	Corona (mm)
Diámetro exterior	$d_e = m * (z + 2)$	85	235
Paso circular	$P_c = \pi * m$	15.707	15.707
Espesor del diente	$e = \frac{P_c}{2}$	7.854	7.854
Altura del diente	$h = 2.25 * m$	8	8
Addendum	$ac = m$	5	5
Deddendum	$ap = 1.25 * m$	6.25	6.25

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Realización propia

Para el cálculo del ancho del diente existe una condición dada por la siguiente ecuación

$$8m < b < 16m$$

$$40 < b < 80$$

El valor más adecuado sería 60mm tomando en cuenta el módulo y relación de transmisión, debido a que el diseño de estos engranajes será basado principalmente en la distancia entre ejes, este valor resulta en un sobredimensionamiento del conjunto planetario adoptando, en conclusión, un valor de 25 mm a fin de cumplir de mejor manera con el factor de seguridad para las cargas que recibirán los engranes. En la siguiente figura se muestra la configuración final del engranaje planeta y corona.



Figura 24-4: Engranaje planeta y engranaje corona
Fuente: Autores

4.4.1 *Calculo fuerzas resultantes en el diente*

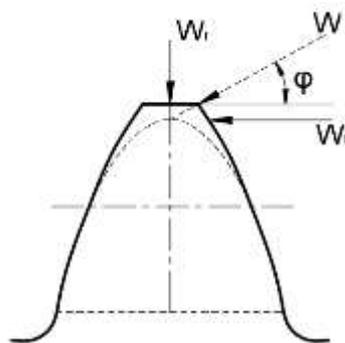


Figura 25-4: Fuerzas en el diente del engranaje
Fuente: Autores

4.4.2 Fuerza tangencial

$$W_{tan} = \frac{2T}{D_p} \quad (21)$$

Donde:

W_t = Fuerza tangencial

T = torque

$$P = T * n_b$$

$$T = \frac{P}{n_b}$$

$$T = \frac{0.5HP}{325rpm} * \frac{735.49 Watt}{1 HP} * \frac{1rev}{2\pi rad} * \frac{60s}{1min}$$

$$T = 10.80 N.m$$

$$W_{tan} = \frac{2 * 10.8 N.m}{75mm} * \frac{1000mm}{1m} = 288.13 N$$

4.4.3 Fuerza radial

$$W_r = W_t * \tan \varphi \quad (22)$$

Donde:

φ = Ángulo de presión

$$W_r = 288.13 N * \tan 25^\circ$$

$$W_r = 134.361 N$$

4.4.4 Fuerza resultante

$$W = \sqrt{W_t^2 + W_r^2} \quad (23)$$

$$W = \sqrt{288.13^2 + 134.361^2}$$

$$W = 317.917 N$$

4.4.5 Análisis de esfuerzo de fatiga por flexión

4.4.5.1 Diámetros de paso del planeta y corona

$$d_{wp} = \frac{2a}{e-1} = \frac{2 * 78.5}{3-1} = 78.5$$

Donde:

d_w = Diámetro de paso
 a = Distancia entre centros

4.4.5.2 Velocidad en la línea de paso

$$V = \frac{\pi * d_{wp} * n_p}{60000} = 2.67 \frac{m}{s}$$

4.4.5.3 Carga de trabajo

$$F_t = \frac{1000 * Pot}{V} = \frac{1000 * 0.36}{2.67} = 134.83 N$$

4.4.6 Análisis de la flexión

$$\sigma_f = F_t * K_o * K_v * K_s * \frac{1}{b * m_t} * \frac{K_H * K_B}{Y_j} \quad (24)$$

Donde:

σ_f = Esfuerzo de trabajo por flexión en los dientes

Y_j = Factor geométrico de cada engranaje

K_o = Factor de sobrecarga

K_v = Factor dinámico

K_s = Factor de tamaño

m_t = Módulo métrico

K_B = Factor de espesor del aro

K_H = Factor de distribución de carga

$K_o = 2$ (Anexo A)

$$K_v = \left(\frac{C}{C + \sqrt{196.85 * V}} \right)^{-B} = 1.044 \left\{ \begin{array}{l} C = 50 + 56(1 - B) = 70.708 \quad Q_v \text{ (Anexo B)} \\ B = 0.25 * (Q_v - 5)^{0.667} = 0.6302 \end{array} \right.$$

$$K_s = 1.192 * \left(\frac{b * \sqrt{Y}}{m} \right)^{0.052} \left\{ \begin{array}{l} Y_p = 0.290 \quad \text{(Anexo C)} \\ Y_c = 0.4 \end{array} \right.$$

$$K_{sp} = 1.192 * \left(\frac{b * \sqrt{Y_p}}{m} \right)^{0.052} = 1.062$$

$$K_{sc} = 1.192 * \left(\frac{b * \sqrt{Y_c}}{m} \right)^{0.052} = 1.07$$

$$K_H = 1 + K_{Hmc}(K_{Hpf} \cdot K_{Hpm} + K_{Hma} \cdot K_{He}) \quad (25)$$

$K_{Hmc} = 1$ 1 Dientes sin coronar
0.8 Dientes coronados

$$K_{Hpf} = \frac{b}{10 \cdot d_{wp}} - 0.025 \quad b \leq 25 \text{ mm}$$

$$K_{Hpfp} = \frac{25}{10 \cdot (78.5)} - 0.025 = 0.00684 \quad K_{Hpm} = 1$$

$$\frac{S_1}{S} < 0.175 \quad \frac{S_1}{S} = \frac{12.7}{79.7} = 0.159$$

$$K_{Hpa} = A + B \cdot b + C \cdot b^2$$

$$\left. \begin{array}{l} A = 0.247 \\ B = 0.00657 \\ C = -1.186 \times 10^{-7} \end{array} \right\} \text{Engranajes abiertos (Anexo D)}$$

$$K_{Hpa} = 0.247 + 0.00657(25) + (-1.186 \times 10^{-7})(25)^2 = 0.411$$

$K_{He} = 1$ Condiciones normales

$$K_{Hp} = 1.417$$

$$K_b = \begin{cases} 1.6 \ln \frac{1.242}{m_b} & m_b < 1.2 \\ 1 & m_b \geq 1.2 \end{cases}$$

$$m_b = \frac{t}{h} \quad (26)$$

Donde:

m_b = Relación detrás del pie del diente

t = Espesor del rim desde el diámetro de dendeo al diámetro interior del rim

h = Altura total del diente (Suma de adendo mas dedendo)

$$m_b = \frac{11.25 \text{ mm}}{6.25 \text{ mm}}$$

$$m_b = 1.8$$

$$K_b = 1$$

$$Y_{Jp} = 0.34$$

(Anexo E)

$$Y_{Jc} = 0.46$$

$$\sigma_{f-planeta} = 9.96 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{f-corona} = 7.42 \text{ MPa}$$

4.4.6.1 Coeficiente de seguridad por flexión

$$S_f = \frac{\sigma_{FP} * Y_N}{\sigma_f * Y_\theta * Y_Z} \quad (27)$$

Donde:

σ_{FP} = Número de esfuerzo de flexión permisible

Y_N = Factor de ciclos de esfuerzo

Y_θ = Factor de temperatura

Y_Z = Factor de confiabilidad

S_f = Factor de seguridad

$$\sigma_{FP} = 0.533 * HB + 88.3$$

$$\sigma_{FP} = 205.56 \text{ MPa} \quad (\text{Anexo F})$$

$$Y_Z = 0.85 \quad (\text{Anexo G})$$

$Y_\theta = 1$ Para temperaturas de hasta 120°C

$$Y_{Np} = 1.3558 (N_L)^{-0.0178} \qquad Y_{Nc} = 1.3558 \left(\frac{N_L}{i}\right)^{-0.0178}$$

$$Y_{Np} = 0.977 \qquad Y_{Nc} = 0.996$$

Valores de acuerdo al (Anexo H)

Factores de seguridad a flexión

Planeta	Corona
$S_{fp} = 23.7$	$S_{fc} = 31.84$

4.4.7 Análisis a desgaste superficial

$$\sigma_c = Z_E \left(F_T * K_O * K_V * K_S * \frac{K_H}{d_w * b} * \frac{Z_R}{Z_I} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (28)$$

Donde:

σ_c = Esfuerzo por contacto superficial

Z_E = Coeficiente elástico

Z_I = Factor geométrico

Z_R = Factor de condición superficial

$$Z_I = \frac{\cos(\varphi) * \text{sen}(\varphi)}{2m_N} * \frac{m_G}{m_G - 1} \quad (29)$$

$$m_G = \frac{N_C}{N_P} = 3 \qquad m_N = 1$$

$$Z_I = 0.287$$

$$Z_{Ec} = 191 \qquad Z_{Ep} = 191$$

(Anexo I)

Esfuerzo de contacto planeta	Esfuerzo de contacto corona
165.65 MPa	83.27 MPa

4.4.7.1 Coeficiente de seguridad por desgaste superficial

$$S_H = \frac{\sigma_{HP} * Z_N * Z_W * (Y_\theta * Y_Z)}{\sigma_c} \quad (30)$$

Donde:

σ_{HP} = Numero de esfuerzo de contacto permisible

Z_N = Factor de ciclos de esfuerzo

Z_W = Factor de relación de la dureza

$$\sigma_{HP} = 2.22 * HB + 200 = 688.4 \text{ MPa} \quad (\text{Anexo J})$$

$$HB = 220$$

Para calcular el valor de S_T se utiliza la siguiente ecuación con una dureza del material igual a 220 en escala Brinell, medida obtenida a través de un ensayo de rebote dinámico, con el método de impedancia de contacto ultrasónico, en el equipo EQUOTIP proceq.

$$Z_W = 1 \quad \text{Al tratarse del mismo material en el engranaje y corona}$$

$$Z_{Np} = 1.4488 N_L^{-0.023} = 0.948 \quad Z_{Nc} = 1.4488 * \left(\frac{N_L}{i}\right)^{-0.023} = 0.973$$

(Anexo K)

Factores de seguridad a desgaste superficial

Planeta	Corona
$S_{Hp} = 4.63$	$S_{Hc} = 9.46$
$S_{Hp}^2 = 21.43$	$S_{Hc}^2 = 89.49$

4.5 Cálculo de la fuerza centrípeta

En base a esta fuerza se calculan la mayor parte de elementos presentes en el sistema de molienda por lo cual resulta de suma importancia su cálculo, el valor de esta fuerza será

objeto de recalcular al utilizar un valor de referencia de masa. La fuerza mencionada se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$F_{c-sm} = m_{sm} * n_b^2 * r \quad (31)$$

Donde:

F_{c-sm} = Fuerza centrípeta del sistema de molienda

m_{sm} = Masa del sistema de molienda

n_b = Velocidad angular sistema de molienda relativo al centro

r_e = Distancia al centro del eje de transmisión

$$F_{c-sm} = 7.63 \text{ Kg} * \left(34.03 \frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)^2 * 0.078\text{m}$$

$$F_{c-sm} = 688.58 \text{ N}$$

El punto de aplicación de esta fuerza se encuentra en el centro de masa del conjunto de los elementos causantes de la misma, obteniendo este valor de SOLIDWORKS 2017 con la herramienta de propiedades físicas. Coordenadas que se presentan desde el origen tomado por el software en el ensamblaje. A su vez se realiza el cálculo de la fuerza centrípeta de masa dentro del tanque tomando este valor de sobre medida de 1.25 indicado en el cálculo de la masa total.

$$F_{c-m} = m_m * n_p^2 * r_t \quad (32)$$

Donde:

F_{c-sm} = Fuerza centrípeta de masa dentro del tanque

m_m = Masa dentro del tanque

n_p = Velocidad angular del planeta

r_t = Distancia al centro del tanque

$$F_{c-m} = 2.12 \text{ Kg} * \left(68.06 \frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)^2 * 0.0425\text{m}$$

$$F_{c-m} = 392,785 \text{ N}$$

Esta fuerza tendrá como punto de aplicación el centro de masa del tanque obtenido de la misma manera antes expuesta.

4.6 Selección de poleas y bandas

Tabla 7-4: Datos para la selección de la polea

Potencia motor	0.5 HP
Velocidad en el eje del motor	1750 rpm
Velocidad necesaria en el eje	875 rpm

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Realización propia

4.6.1 Relación de transmisión

$$i = \frac{W_1}{W_2} = \frac{1750}{875} = 2 \quad (33)$$

4.6.2 Potencia de diseño

$$P_D = P_{elec} * C_2 \quad (34)$$

Tabla 8-4: Factor de carga

Ejemplo de máquinas accionadas	Ejemplo de máquinas motrices					
	Factor de carga c_2 para servicio diario (horas)			Factor de carga c_2 para servicio diario (horas)		
	hasta 10	más de 10 hasta 16	a partir de 16	up to 10	más de 10 hasta 16	a partir de 16
Transmisiones ligeras Bombas centrífugas y compresores, byas transportadoras (cargas ligeras) ventiladores y bombas de hasta 7,5 kW	1,1	1,1	1,2	1,1	1,2	1,3
Transmisiones medias Guillotinas, prensas, transportadores de cadena y bya (cargas pesadas), tamices vibradores, generadores y excitadores, amasadoras, máquinas herramienta (tornos, esmeriladoras), lavadoras, impresoras, ventiladores y bombas de más de 7,5 kW	1,1	1,2	1,3	1,2	1,3	1,4
Transmisiones pesadas Molinos, compresores de pistón, transportadores de carga pesada, expulsores (transportadores helicoidales, cintas de placas, cangilones y pala), ascensores, prensas de ladrillos, maquinaria textil, maquinaria del papel, bombas de pistón, bombas draga, aserraderos, molinos de machacado	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	1,6

Realizado por: Optibelt

Fuente: Catálogo de productos Optibelt

$$P_D = 0.5 \text{ HP} * 1.2$$

$$P_D = 0.6 \text{ HP} = 0.44 \text{ KW}$$

4.6.3 Selección del perfil de la banda

Por medio del gráfico 2-4 seleccionamos el perfil de la banda Tipo A para las condiciones del prototipo.

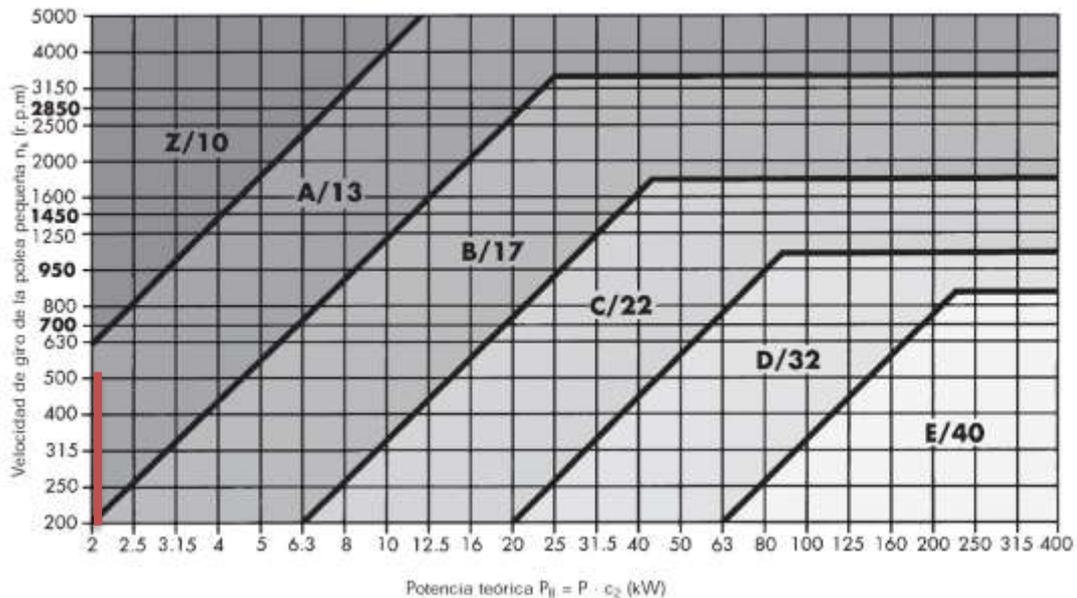


Gráfico 3-4: Perfil de correas trapeciales clásicas OPTIBELT

Fuente: (Optibelt pág. 72)

4.6.4 Diámetros de poleas

$$i = \frac{D_{p-eje}}{d_{p-motor}} \quad (35)$$

Los diámetros de las poleas son escogidos con el fin de minimizar el espacio a utilizar y cumplir con la relación de transmisión dada por la velocidad.

$$D_{p-eje} = 132 \text{ mm (normalizada)}$$

$$i = 2 = \frac{132 \text{ mm}}{d_{p-motor}}$$

$$d_{p-motor} = 66 \text{ mm}$$

4.6.5 *Distancia entre centros*

$$C_{c-min} = 0.7 * (D_{p-eje} + d_{p-motor}) \quad (36)$$

$$C_{c-min} = 0.7 * (132 + 65)$$

$$C_{c-min} = 98.5 \text{ mm}$$

$$C_{c-min} = 2 * (D_{p-eje} + d_{p-motor}) \quad (37)$$

$$C_{c-min} = 2 * (132 + 65)$$

$$C_{c-min} = 394 \text{ mm}$$

La distancia entre centros por recomendación del catálogo de OPTIBELT se encontrará entre estos valores y es escogido un valor de 250 mm con el fin de optimizar el espacio interior utilizado.

4.6.6 *Longitud de la correa*

$$L = 2 * C_c + (1.57 * (D_{p-eje} + d_{p-motor})) + \frac{(D_{p-eje} - d_{p-motor})^2}{4 * C_c} \quad (38)$$

$$L = 2 * 250\text{mm} + (1.57 * (132\text{mm} + 65\text{mm})) + \frac{(132 \text{ mm} - 65 \text{ mm})^2}{4 * 250 \text{ mm}}$$

$$L = 813.17 \text{ mm}$$

La longitud normalizada en catalogo se encuentra como:

$$L_N = 812 \text{ mm}$$

4.6.7 Arco de contacto

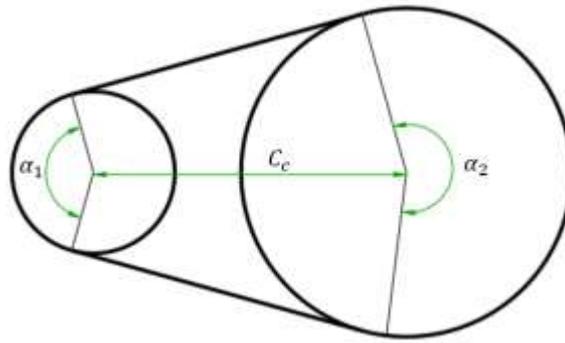


Figura 26-4: Ángulos de contacto

Fuente: autores

$$\alpha_1 = 180 - 57 * \left(\frac{D_{p-eje} - d_{p-motor}}{C_c} \right) > 120 \quad (39)$$

$$\alpha_1 = 180 - 57 * \left(\frac{132 \text{ mm} - 65 \text{ mm}}{250 \text{ mm}} \right) > 120$$

$$\alpha_1 = 160.92^\circ$$

$$\alpha_2 = 180 + 57 * \left(\frac{D_{p-eje} - d_{p-motor}}{C_c} \right)$$

$$\alpha_2 = 180 + 57 * \left(\frac{132 \text{ mm} - 65 \text{ mm}}{250 \text{ mm}} \right)$$

$$\alpha_2 = 199.07^\circ$$

4.6.8 Número de correas necesarias

$$Z = \frac{P_D}{C_1 * C_3 * P_N} \quad (40)$$

Donde:

C_1 = Factor de ángulo de carga

C_3 = Factor de desarrollo

P_N = Potencia máxima que puede soportar una banda

$C_1 = 0.99$ para un ángulo de contacto de 160°

$C_3 = 0.87$ para una longitud nominal de 812 mm

$P_N = 1.28 \text{ KW}$ para una velocidad angular de 1750 rpm

$$Z = \frac{0.44}{0.99 * 0.87 * 1.28}$$

$$Z = 0.399$$

Obteniendo entonces que una sola banda sería necesaria para cumplir con los requerimientos de transmisión.

4.6.9 Factor de seguridad

$$n = \frac{Z * P_N * C_1 * C_3}{P_D} \quad (41)$$

$$n = \frac{1 * 1.28 * 0.99 * 0.8724}{0.44}$$

$$n = 2.5$$

4.6.10 Velocidad

$$V = \frac{d_{p-motor} * W_1}{19100} \quad (42)$$

$$V = \frac{65mm * 1750rpm}{19100}$$

$$V = 4.12 \frac{m}{s}$$

4.6.11 Tensión debido a fuerza centrífuga

$$T_C = \rho_b * V^2 \quad (43)$$

T_C = Tensión debido a fuerza centrífuga

ρ_b = Densidad de la banda (Tipo A 0.115 kg/m) (Anexo L)

$$T_C = 0.115 \frac{kg}{m} * \left(4.12 \frac{m}{s}\right)^2$$

$$T_C = 0.494 N$$

4.6.12 Tensiones en el lado tirante y lado flojo

Para este cálculo se realiza un sistema de ecuaciones con la fórmula de potencia y la ecuación descrita a continuación, calculada en función del ángulo de contacto para cada polea obteniendo de ellas las tensiones de mayor valor con interés para la resolución de cargas en el eje central.

$$\frac{T_1 - T_C}{T_2 - T_C} = e^{\frac{f * \alpha_{1-2}}{\text{sen}(\emptyset/2)}} \quad (44)$$

Donde:

T_1, T_2 = Tensiones lado flojo y tirante

T_C = Tension debido a fuerza centrifuga

f = Coeficiente de friccion del material de la correa ()

α_{1-2} = Ángulos de contacto en rad

\emptyset = Angulo de garganta de la correa (34°)

$$P_D = (T_1 - T_2) * V \quad (45)$$

$$0.5 HP = (T_1 - T_2) 4.12 \frac{m}{s}$$

$$T_1 - T_2 = 90.49 N$$

Para α_1 :

$$\alpha_1 = 160.92 * \frac{\pi rad}{180} = 2.808 rad$$

$$\frac{T_1 - 0.494N}{T_2 - 0.494N} = e^{\frac{0.13 * 2.808 rad}{\text{sen}(34/2)}}$$

$$3.48 * T_2 - T_1 = 1.22$$

Para α_2 :

$$\alpha_2 = 199.07 * \frac{\pi rad}{180} = 3.47 rad$$

$$\frac{T_1 - 0.494N}{T_2 - 0.494N} = e^{\frac{0.13 * 3.47 rad}{\text{sen}(34/2)}}$$

$$4.67 * T_2 - T_1 = 1.81$$

α_1 – Potencia

$$T_1 = 127.46 N$$

α_2 – Potencia

$$T_1 = 115.63 N$$

$$T_2 = 36.97 \text{ N}$$

$$T_2 = 25.14 \text{ N}$$

4.7 Diseño del eje del tanque de molinenda

Para el diseño de este eje se toma en consideración la fuerza centrípeta generada por la masa de la viruta junto con los elementos moledores y el sistema de molinenda. A continuación, se muestran las cargas a las que está sometido el eje del tanque, dadas por la fuerza centrípeta existente en el sistema de molinenda, torque y fuerzas en el planeta, acompañado de sus respectivos diagramas de momento flector y fuerzas cortantes obtenidos en ANSYS.

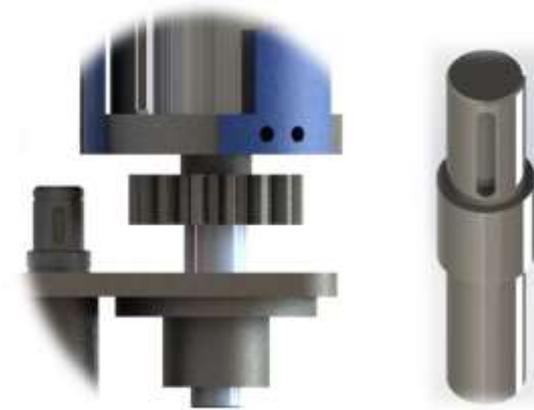


Figura 27-4: Pre diseño geométrico y ubicación del eje del tanque de molinenda de molinenda
Fuente: Autores

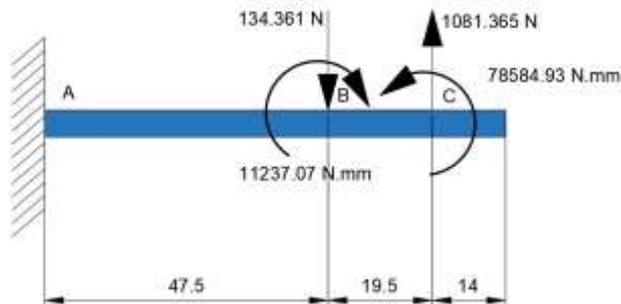


Figura 28-4: Diagrama de cuerpo libre XY
Fuente: Autores

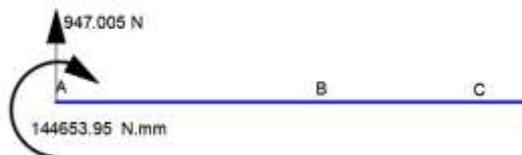


Figura 29-4: Reacciones del eje XY
Fuente: Autores

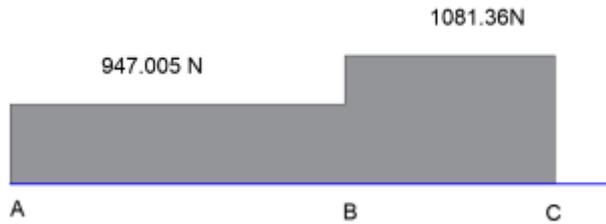


Gráfico 4-4: Diagrama de cortantes en el eje XY
Fuente: Autores

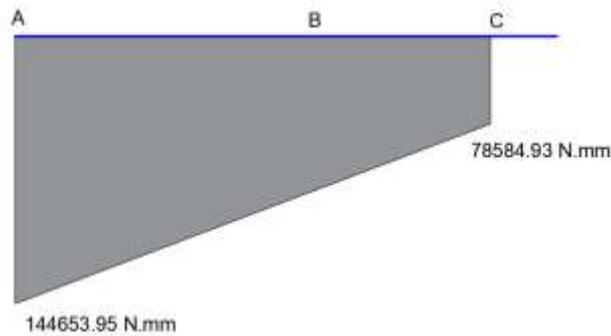


Gráfico 5-4: Diagrama de momentos flectores en XY
Fuente: autores

El momento flexionante máximo tiene un valor de $M_{fA} = 144653.95 \text{ N.mm}$.

4.7.1 *Análisis estático*

El material seleccionado es un acero AISI 4140 que cumple con las propiedades mecánicas necesarias siendo usado para aplicaciones como, ejes, pasadores, cigüeñales, engranajes, arboles de transmisión entre otros, afianzando con esto, su correcto funcionamiento. Las propiedades principales de este acero se resumen en la siguiente tabla

Tabla 9-4: propiedades mecánicas acero AISI 4140

Dureza	28-34 HRC
Esfuerzo fluencia	690 Mpa
Esfuerzo tensión	1050 Mpa

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Catálogo Iván Bohman

Empezamos realizando un análisis estático mediante la teoría de Von Misses:

$$\frac{S_y}{n} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2} \quad (46)$$

$$\frac{S_y}{n} = \sqrt{\left(\frac{32 * M_{fm}}{\pi d^3}\right)^2 + 3\left(\frac{16T}{\pi d^3}\right)^2}$$

$$\frac{690}{1.5} = \sqrt{\left(\frac{32 * 144653.95}{\pi d^3}\right)^2 + 3\left(\frac{16 * 11237.07}{\pi d^3}\right)^2}$$

$$d = 14.75 \text{ mm}$$

4.7.2 Análisis dinámico

En el estudio dinámico se realiza el estudio de resistencia a la fatiga del eje mediante la ecuación de Soderberg para esfuerzos combinados y la ecuación de Marín (4) para ajustar el límite de resistencia mecánica del material de acuerdo a la manufactura, diseño, forma geométrica entre otros. Asumimos un valor en la multiplicación de k resultante de 0.3, recomendado para condiciones de esfuerzos concentrados.

$$S_e = 0.6 * 0.5 * S_{ut}$$

$$S_e = 0.6 * 0.5 * 1050 \text{ Mpa}$$

$$S_e = 315 \text{ Mpa}$$

Para obtener el diámetro adecuado en condiciones de fatiga se usa la ecuación de Soderberg (5) reemplazando los valores de esfuerzo amplitud y medio equivalente.

$$\sigma a_{eq} = \sqrt{(k f_a * \sigma a_a + k f_f * \sigma a_f)^2 + 3(k f_t * \tau a_t + k f_c * \tau a_c)^2} \quad (47)$$

$$\sigma m_{eq} = \sqrt{(\sigma m_a + \sigma m_f)^2 + 3(\tau m_t + \tau m_c)^2} \quad (48)$$

Donde:

n = Factor de seguridad

$k f_f$ = Factor de concentración de esfuerzos por fatiga a flexión

$k f_a$ = Factor de concentración de esfuerzos por fatiga a cargas axiales

σa_{eq} = Esfuerzo amplitud equivalente

σm_{eq} = Esfuerzo medio equivalente

σa_a = Esfuerzo amplitud de cargas axiales

σa_f = Esfuerzo amplitud de flexión

τa_t = Esfuerzo amplitud de torsión

τa_c = Esfuerzo amplitud de corte

σm_a = Esfuerzo medio de cargas axiales

σm_f = Esfuerzo medio de flexión

τm_t = Esfuerzo medio de torsión

τm_c = Esfuerzo medio de corte

Al ser un momento flexionante completamente reversible el valor σm_f y τa_t son igual a cero en la ecuación 56 y 57 respectivamente, el esfuerzo de corte y axial se desprecian debido a su bajo valor en comparación con los demás encontrados, simplificando de esta manera las ecuaciones a:

$$\sigma a_{eq} = \sqrt{(kff * \sigma a_f)^2}$$

$$\sigma a_{eq} = \sqrt{\left(2 * 32 * \frac{144654.23}{\pi * d^3}\right)^2}$$

$$\sigma a_{eq} = \frac{2946871.77}{d^3}$$

$$\sigma m_{eq} = \sqrt{3(\tau m_t)^2}$$

$$\sigma m_{eq} = \sqrt{3\left(\frac{16 * T}{\pi * d^3}\right)^2}$$

$$\sigma m_{eq} = \sqrt{3\left(\frac{16 * 11237.3}{\pi * d^3}\right)^2}$$

$$\sigma m_{eq} = \sqrt{3\left(\frac{57231.09}{d^3}\right)^2}$$

$$\frac{\frac{2946871.77}{d^3}}{315} + \frac{\sqrt{3\left(\frac{57231.09}{d^3}\right)^2}}{690} = \frac{1}{1.5}$$

$$d = 30.505 \text{ mm}$$

4.7.3 Recalculo del límite de fatiga

k_a Factor de modificación de la condición superficial

Para el factor de condición superficial se emplea la siguiente ecuación

$$k_a = a * S_{ut}^b \quad (49)$$

Los coeficientes a y b se obtienen de la tabla 6-4

Tabla 10-4: Factor de modificación de la condición superficial

Acabado superficial	Factor a		Exponente
	S _{ut} (Kpsi)	S _{ut} (MPa)	b
Esmerilado	1,34	1,58	-0,085
Máquina o laminado en frío	2,70	4,51	-0,265
Laminado en caliente	14,4	57,7	-0,718
Como sale en la forja	39,9	272	-0,995

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Shigley (Budynas, y otros, 2008 pág. 280)

$$k_a = 4.51 * 1050^{-0.265} = 0.71$$

- k_b Factor de modificación del tamaño

La ecuación que determina el factor de tamaño se obtiene a partir de la siguiente tabla de acuerdo al diámetro del eje.

Tabla 11-4: Factor de Tamaño

K_b	
$\left(\frac{d}{0,3}\right)^{-0,107} = 0,879d^{-0,107}$	$0,11 \leq d \leq 2 \text{ in}$
$0,91d^{-0,157}$	$2 \leq d \leq 10 \text{ in}$
$\left(\frac{d}{7,62}\right)^{-0,107} = 1,24d^{-0,107}$	$2,79 \leq d \leq 51 \text{ mm}$
$1,51d^{-0,157}$	$51 \leq d \leq 254 \text{ mm}$

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Shigley (Budynas, y otros, 2008 pág. 280)

$$K_b = 1,24d^{-0,107} \quad (50)$$

$$K_b = 1,24(30)^{-0,107}$$

$$K_b = 0.86$$

- Factor de confiabilidad

Tabla 12-4: Factor de confiabilidad

Confiabilidad %	Factor de confiabilidad Kc
50	1
90	0.897
95	0.868
99	0.814

Realizado por: Autores, 2018
Fuente: Shigley (Budynas, y otros, 2008 pág. 280)

Para una confiabilidad del 99% el factor Kc es igual a 0.814

- Factor de temperatura

Para una temperatura menor a 450°C el factor no tiene relevancia por lo tanto adquiere el valor de 1

- Factor de modificación de efectos varios

Para este factor se necesita el cálculo de factor de carga que se considera $\frac{D}{d} = 1.25$ y $\frac{r}{d} = 0.15$ encontrando en la siguiente tabla el valor de k_t

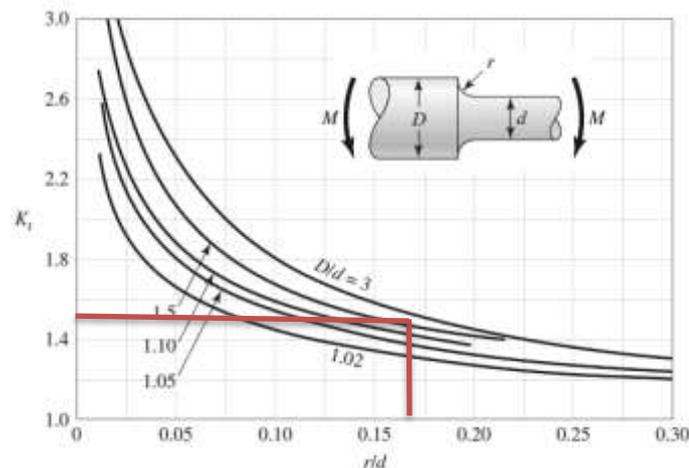


Gráfico 6-4: Factor K_t
Fuente: Shigley (Budynas, y otros, 2008 pág. 1008)

El valor de K_t es entonces 1.5.

Procedemos a obtener el valor de “q” mediante el siguiente grafico ingresando con los valores de $S_{ut} = 1050 \text{ Mpa}$ y $r = 2.25$.

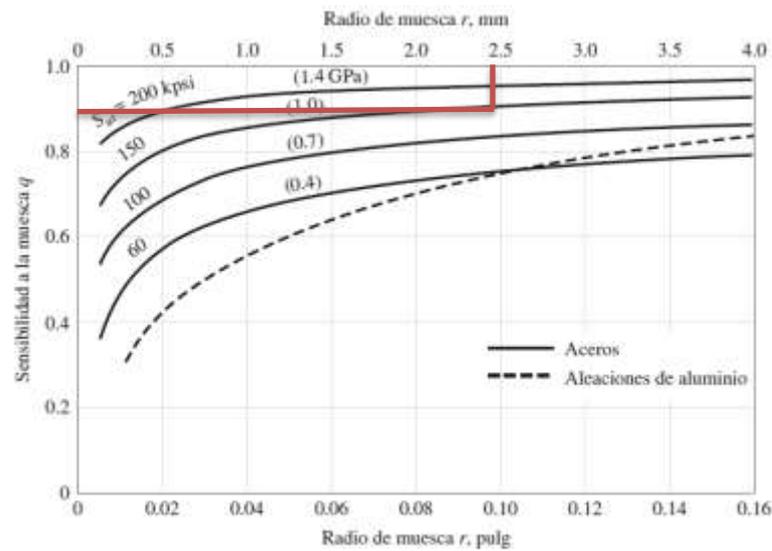


Gráfico 7-4: Factor “q”
Fuente: Shigley (Budynas, y otros, 2008 pág. 387)

Tenemos un valor de $q = 0.88$ valor utilizado en la siguiente ecuación

$$k_e = \frac{1}{q * (k_t - 1) + 1} \quad (51)$$

$$k_e = \frac{1}{0.88 * (1.5 - 1) + 1}$$

$$k_e = 0.6944$$

El nuevo valor de S_e es entonces

$$S_e = 0.71 * 0.86 * 0.814 * 1 * 0.694 * 0.5 * 1050 \text{ Mpa}$$

$$S_e = 181.09 \text{ Mpa}$$

Realizamos entonces el cálculo de los factores de concentración del esfuerzo de por fatiga de flexión y torsión.

Para flexión tenemos $K_t = 1.5$ y $q = 0.8$ con lo cual:

$$k_{ff} = 1 + 0.8 * (1.5 - 1)$$

$$k_{ff} = 1.4$$

Para torsión:

$$k_{ft} = 1 + q_{tt} * (k_{ts} - 1) \quad (52)$$

Para el valor de q_{tt} se evalúa la siguiente gráfica

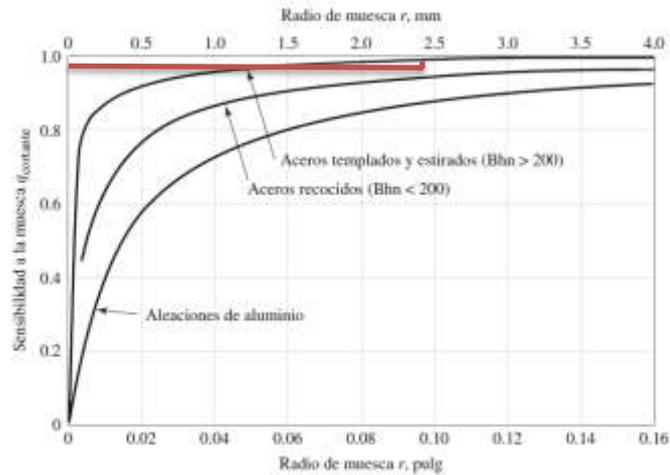


Gráfico 8-4: Factor q cortante

Fuente: Shigley (Budynas, y otros, 2008 pág. 387)

$$q_{tt} = 0.98$$

$$k_{ts} = 1.3$$

$$k_{ft} = 1 + 0.98 * (1.3 - 1)$$

$$k_{ft} = 1.294$$

$$\sigma a_{eq} = \sqrt{(k_{ff} * \sigma a_f)^2}$$

$$\sigma a_{eq} = \sqrt{\left(1.4 * 32 * \frac{144654.23}{\pi * d^3}\right)^2}$$

$$\sigma a_{eq} = \frac{2062810.2426}{d^3}$$

$$\sigma m_{eq} = \sqrt{3(k_{ft} * \tau m_t)^2}$$

$$\sigma m_{eq} = \sqrt{3\left(1.294 * \frac{16 * 11237.3}{\pi * d^3}\right)^2}$$

$$\sigma m_{eq} = \sqrt{3\left(\frac{74057.04}{d^3}\right)^2}$$

$$\frac{2062810.2426}{d^3} + \frac{\sqrt{3\left(\frac{74057.04}{d^3}\right)^2}}{690} = \frac{1}{1.5}$$

$$d = 25.89\text{mm}$$

Por lo tanto, su construcción se realiza en un diámetro de 25.4 mm obteniendo un factor de seguridad de 1.45.

4.7.4 *Análisis por MEF del eje*

Para este estudio se utiliza el software ANSYS, en el módulo “static structural” con la herramienta “fatigue tool”, con el fin de ratificar los resultados obtenidos. Empezamos con la definición de las propiedades del material seleccionado, la importación del modelado en SOLIDWORKS y con la definición de las cargas y soportes del eje. Para obtener resultados adecuados se traslada las fuerzas y momentos a la cara inicial del eje mediante su equivalente fuerza par.

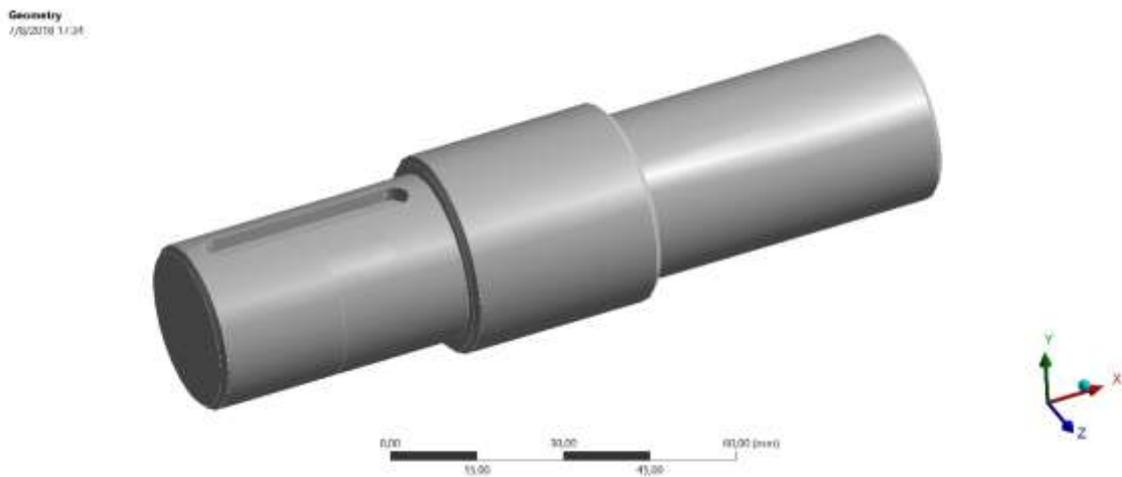


Figura 30-4: Modelado del eje en ANSYS

Fuente: Software ANSYS – Modulo Static Structural

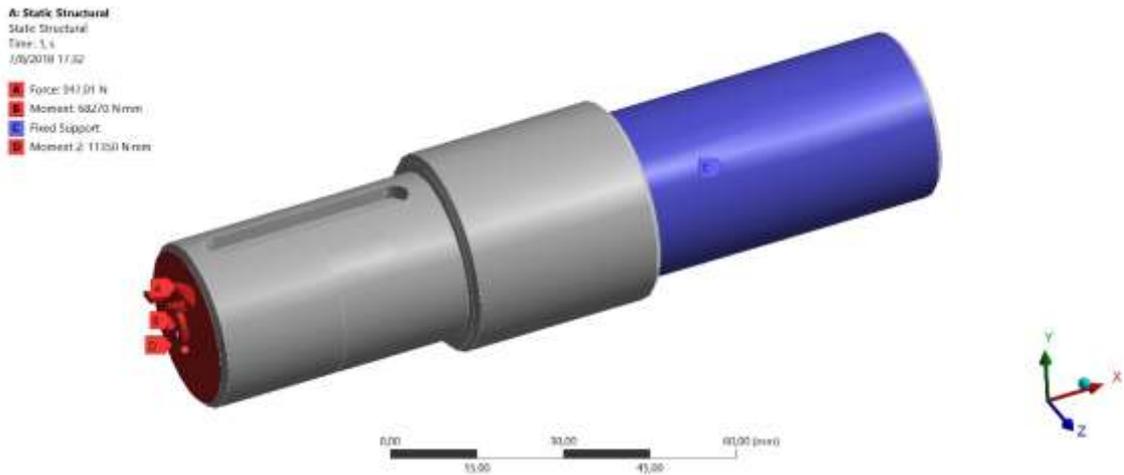


Figura 31-4: Aplicación de cargas en ANSYS

Fuente: Software ANSYS – Modulo Static Structural

A continuación, se procede al mallado del elemento; con el fin de obtener el tamaño de malla más adecuado se realiza el estudio de convergencia de resultados, para esto se compara el resultado del factor de seguridad con diferentes tamaños de elementos en la malla. En la siguiente figura se puede observar que el punto de convergencia se da al utilizar elementos de 2.5 mm en adelante.

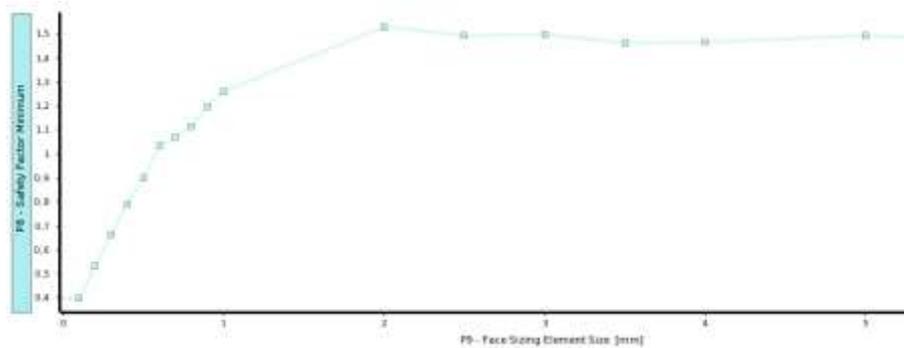


Gráfico 9-4: Análisis de convergencia en ANSYS

Fuente: Software ANSYS – Modulo Static Structural

Obteniendo un mallado final como se muestra en la siguiente figura:

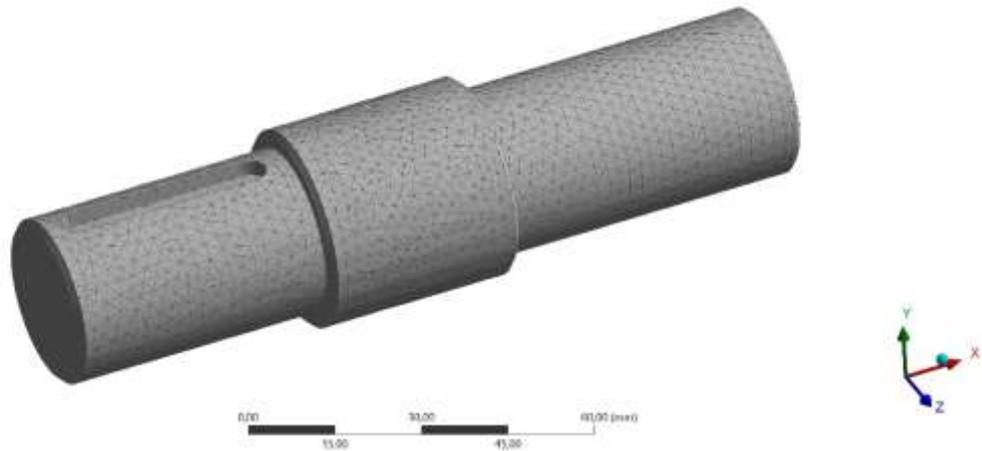


Figura 32-4: Mallado de eje
Fuente: Software ANSYS – Modulo Static Structural

Una vez obtenido el tamaño correcto de los elementos en la malla se procede con el análisis de resultados, a continuación, se muestra el factor de seguridad obtenido y la deformación máxima que presenta el elemento.

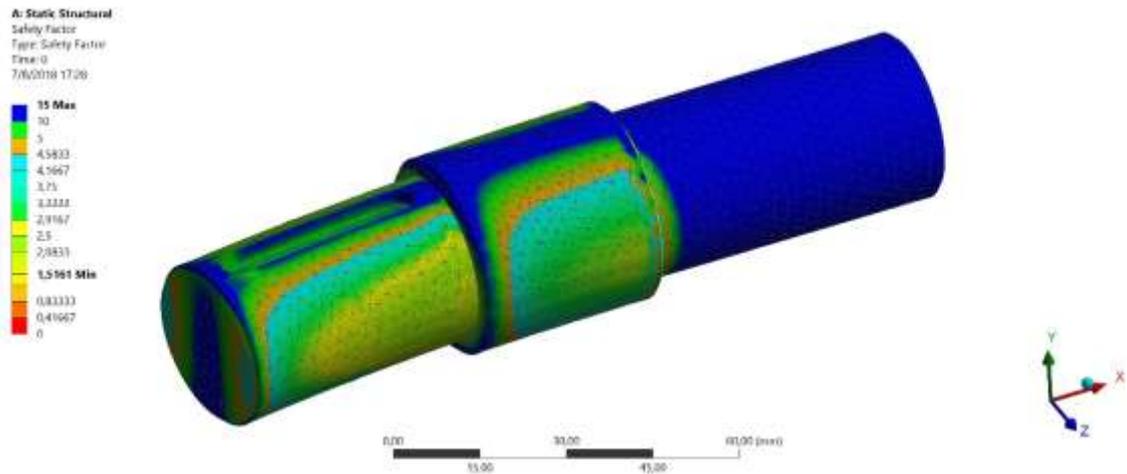


Figura 33-4: Factor de seguridad a fatiga
Fuente: Software ANSYS – Modulo Static Structural

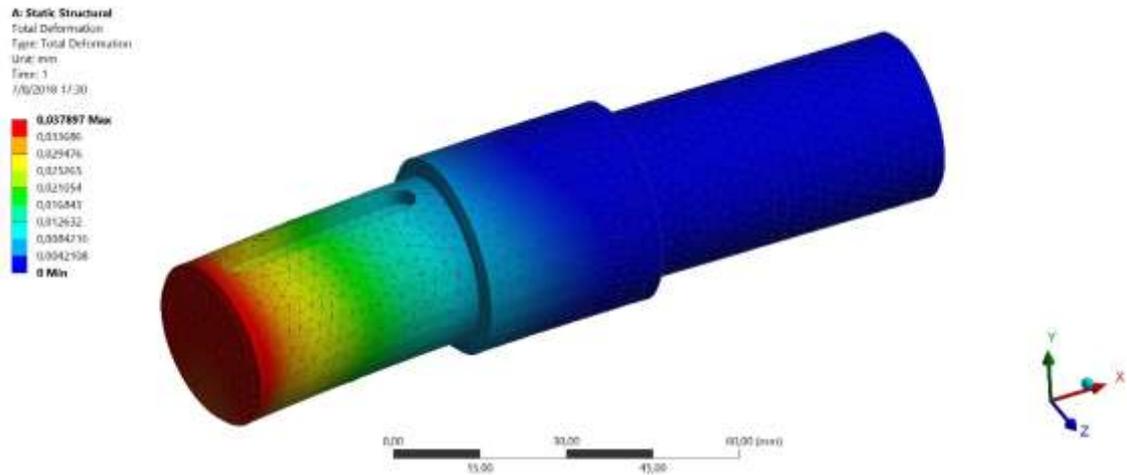


Figura 34-4: Deformación máxima del eje
Fuente: Software ANSYS – Modulo Static Structural

Se puede apreciar que los resultados obtenidos en ANSYS concuerdan con lo calculado anteriormente y verifican su validez de diseño.

4.7.5 *Diseño de chaveta en el eje del tanque de molienda*

Del libro Diseño de máquinas de Juan M. Marín extraemos la siguiente tabla con valores normalizados de espesor y ancho de una chaveta de acuerdo al diámetro del eje en el cual será instalado.

Tabla 13-4: Dimensiones de chaveta de acuerdo al diámetro de eje

d		b	h	f	L	r	Kt	Kts
Más de	Hasta							
8	10	3	3	d-1.8	6-36	0.2	2.2	2.6
10	12	4	4	d-2.5	8-45	0.2	2.4	2.8
12	17	5	5	d-3	10-56	0.3	2.4	2.8
17	22	6	6	d-3.5	14-70	0.3	2.6	3
22	30	8	7	d-4	18-90	0.3	2.9	3.2
30	38	10	8	d-5	22-110	0.5	2.4	2.8
38	44	12	8	d-5	28-140	0.5	2.8	3.1
44	50	14	9	d-5.5	36-160	0.5	2.9	3.2
50	58	16	10	d-6	45-180	0.5	3.2	3.5
58	65	18	11	d-7	50-200	0.5	3.5	3.8

Comprobación de distorsión normalizadas
 0.18, 0.12, 0.14, 0.16, 0.20, 0.22, 0.24, 0.26, 0.28, 0.30, 0.32, 0.34, 0.36, 0.38, 0.40, 0.42, 0.44, 0.46, 0.48, 0.50, 0.52, 0.54, 0.56, 0.58, 0.60, 0.62, 0.64, 0.66, 0.68, 0.70, 0.72, 0.74, 0.76, 0.78, 0.80, 0.82, 0.84, 0.86, 0.88, 0.90, 0.92, 0.94, 0.96, 0.98, 1.00, 1.02, 1.04, 1.06, 1.08, 1.10, 1.12, 1.14, 1.16, 1.18, 1.20, 1.22, 1.24, 1.26, 1.28, 1.30, 1.32, 1.34, 1.36, 1.38, 1.40, 1.42, 1.44, 1.46, 1.48, 1.50, 1.52, 1.54, 1.56, 1.58, 1.60, 1.62, 1.64, 1.66, 1.68, 1.70, 1.72, 1.74, 1.76, 1.78, 1.80, 1.82, 1.84, 1.86, 1.88, 1.90, 1.92, 1.94, 1.96, 1.98, 2.00, 2.02, 2.04, 2.06, 2.08, 2.10, 2.12, 2.14, 2.16, 2.18, 2.20, 2.22, 2.24, 2.26, 2.28, 2.30, 2.32, 2.34, 2.36, 2.38, 2.40, 2.42, 2.44, 2.46, 2.48, 2.50, 2.52, 2.54, 2.56, 2.58, 2.60, 2.62, 2.64, 2.66, 2.68, 2.70, 2.72, 2.74, 2.76, 2.78, 2.80, 2.82, 2.84, 2.86, 2.88, 2.90, 2.92, 2.94, 2.96, 2.98, 3.00, 3.02, 3.04, 3.06, 3.08, 3.10, 3.12, 3.14, 3.16, 3.18, 3.20, 3.22, 3.24, 3.26, 3.28, 3.30, 3.32, 3.34, 3.36, 3.38, 3.40, 3.42, 3.44, 3.46, 3.48, 3.50, 3.52, 3.54, 3.56, 3.58, 3.60, 3.62, 3.64, 3.66, 3.68, 3.70, 3.72, 3.74, 3.76, 3.78, 3.80, 3.82, 3.84, 3.86, 3.88, 3.90, 3.92, 3.94, 3.96, 3.98, 4.00, 4.02, 4.04, 4.06, 4.08, 4.10, 4.12, 4.14, 4.16, 4.18, 4.20, 4.22, 4.24, 4.26, 4.28, 4.30, 4.32, 4.34, 4.36, 4.38, 4.40, 4.42, 4.44, 4.46, 4.48, 4.50, 4.52, 4.54, 4.56, 4.58, 4.60, 4.62, 4.64, 4.66, 4.68, 4.70, 4.72, 4.74, 4.76, 4.78, 4.80, 4.82, 4.84, 4.86, 4.88, 4.90, 4.92, 4.94, 4.96, 4.98, 5.00, 5.02, 5.04, 5.06, 5.08, 5.10, 5.12, 5.14, 5.16, 5.18, 5.20, 5.22, 5.24, 5.26, 5.28, 5.30, 5.32, 5.34, 5.36, 5.38, 5.40, 5.42, 5.44, 5.46, 5.48, 5.50, 5.52, 5.54, 5.56, 5.58, 5.60, 5.62, 5.64, 5.66, 5.68, 5.70, 5.72, 5.74, 5.76, 5.78, 5.80, 5.82, 5.84, 5.86, 5.88, 5.90, 5.92, 5.94, 5.96, 5.98, 6.00, 6.02, 6.04, 6.06, 6.08, 6.10, 6.12, 6.14, 6.16, 6.18, 6.20, 6.22, 6.24, 6.26, 6.28, 6.30, 6.32, 6.34, 6.36, 6.38, 6.40, 6.42, 6.44, 6.46, 6.48, 6.50, 6.52, 6.54, 6.56, 6.58, 6.60, 6.62, 6.64, 6.66, 6.68, 6.70, 6.72, 6.74, 6.76, 6.78, 6.80, 6.82, 6.84, 6.86, 6.88, 6.90, 6.92, 6.94, 6.96, 6.98, 7.00, 7.02, 7.04, 7.06, 7.08, 7.10, 7.12, 7.14, 7.16, 7.18, 7.20, 7.22, 7.24, 7.26, 7.28, 7.30, 7.32, 7.34, 7.36, 7.38, 7.40, 7.42, 7.44, 7.46, 7.48, 7.50, 7.52, 7.54, 7.56, 7.58, 7.60, 7.62, 7.64, 7.66, 7.68, 7.70, 7.72, 7.74, 7.76, 7.78, 7.80, 7.82, 7.84, 7.86, 7.88, 7.90, 7.92, 7.94, 7.96, 7.98, 8.00, 8.02, 8.04, 8.06, 8.08, 8.10, 8.12, 8.14, 8.16, 8.18, 8.20, 8.22, 8.24, 8.26, 8.28, 8.30, 8.32, 8.34, 8.36, 8.38, 8.40, 8.42, 8.44, 8.46, 8.48, 8.50, 8.52, 8.54, 8.56, 8.58, 8.60, 8.62, 8.64, 8.66, 8.68, 8.70, 8.72, 8.74, 8.76, 8.78, 8.80, 8.82, 8.84, 8.86, 8.88, 8.90, 8.92, 8.94, 8.96, 8.98, 9.00, 9.02, 9.04, 9.06, 9.08, 9.10, 9.12, 9.14, 9.16, 9.18, 9.20, 9.22, 9.24, 9.26, 9.28, 9.30, 9.32, 9.34, 9.36, 9.38, 9.40, 9.42, 9.44, 9.46, 9.48, 9.50, 9.52, 9.54, 9.56, 9.58, 9.60, 9.62, 9.64, 9.66, 9.68, 9.70, 9.72, 9.74, 9.76, 9.78, 9.80, 9.82, 9.84, 9.86, 9.88, 9.90, 9.92, 9.94, 9.96, 9.98, 10.00, 10.02, 10.04, 10.06, 10.08, 10.10, 10.12, 10.14, 10.16, 10.18, 10.20, 10.22, 10.24, 10.26, 10.28, 10.30, 10.32, 10.34, 10.36, 10.38, 10.40, 10.42, 10.44, 10.46, 10.48, 10.50, 10.52, 10.54, 10.56, 10.58, 10.60, 10.62, 10.64, 10.66, 10.68, 10.70, 10.72, 10.74, 10.76, 10.78, 10.80, 10.82, 10.84, 10.86, 10.88, 10.90, 10.92, 10.94, 10.96, 10.98, 11.00, 11.02, 11.04, 11.06, 11.08, 11.10, 11.12, 11.14, 11.16, 11.18, 11.20, 11.22, 11.24, 11.26, 11.28, 11.30, 11.32, 11.34, 11.36, 11.38, 11.40, 11.42, 11.44, 11.46, 11.48, 11.50, 11.52, 11.54, 11.56, 11.58, 11.60, 11.62, 11.64, 11.66, 11.68, 11.70, 11.72, 11.74, 11.76, 11.78, 11.80, 11.82, 11.84, 11.86, 11.88, 11.90, 11.92, 11.94, 11.96, 11.98, 12.00, 12.02, 12.04, 12.06, 12.08, 12.10, 12.12, 12.14, 12.16, 12.18, 12.20, 12.22, 12.24, 12.26, 12.28, 12.30, 12.32, 12.34, 12.36, 12.38, 12.40, 12.42, 12.44, 12.46, 12.48, 12.50, 12.52, 12.54, 12.56, 12.58, 12.60, 12.62, 12.64, 12.66, 12.68, 12.70, 12.72, 12.74, 12.76, 12.78, 12.80, 12.82, 12.84, 12.86, 12.88, 12.90, 12.92, 12.94, 12.96, 12.98, 13.00, 13.02, 13.04, 13.06, 13.08, 13.10, 13.12, 13.14, 13.16, 13.18, 13.20, 13.22, 13.24, 13.26, 13.28, 13.30, 13.32, 13.34, 13.36, 13.38, 13.40, 13.42, 13.44, 13.46, 13.48, 13.50, 13.52, 13.54, 13.56, 13.58, 13.60, 13.62, 13.64, 13.66, 13.68, 13.70, 13.72, 13.74, 13.76, 13.78, 13.80, 13.82, 13.84, 13.86, 13.88, 13.90, 13.92, 13.94, 13.96, 13.98, 14.00, 14.02, 14.04, 14.06, 14.08, 14.10, 14.12, 14.14, 14.16, 14.18, 14.20, 14.22, 14.24, 14.26, 14.28, 14.30, 14.32, 14.34, 14.36, 14.38, 14.40, 14.42, 14.44, 14.46, 14.48, 14.50, 14.52, 14.54, 14.56, 14.58, 14.60, 14.62, 14.64, 14.66, 14.68, 14.70, 14.72, 14.74, 14.76, 14.78, 14.80, 14.82, 14.84, 14.86, 14.88, 14.90, 14.92, 14.94, 14.96, 14.98, 15.00, 15.02, 15.04, 15.06, 15.08, 15.10, 15.12, 15.14, 15.16, 15.18, 15.20, 15.22, 15.24, 15.26, 15.28, 15.30, 15.32, 15.34, 15.36, 15.38, 15.40, 15.42, 15.44, 15.46, 15.48, 15.50, 15.52, 15.54, 15.56, 15.58, 15.60, 15.62, 15.64, 15.66, 15.68, 15.70, 15.72, 15.74, 15.76, 15.78, 15.80, 15.82, 15.84, 15.86, 15.88, 15.90, 15.92, 15.94, 15.96, 15.98, 16.00, 16.02, 16.04, 16.06, 16.08, 16.10, 16.12, 16.14, 16.16, 16.18, 16.20, 16.22, 16.24, 16.26, 16.28, 16.30, 16.32, 16.34, 16.36, 16.38, 16.40, 16.42, 16.44, 16.46, 16.48, 16.50, 16.52, 16.54, 16.56, 16.58, 16.60, 16.62, 16.64, 16.66, 16.68, 16.70, 16.72, 16.74, 16.76, 16.78, 16.80, 16.82, 16.84, 16.86, 16.88, 16.90, 16.92, 16.94, 16.96, 16.98, 17.00, 17.02, 17.04, 17.06, 17.08, 17.10, 17.12, 17.14, 17.16, 17.18, 17.20, 17.22, 17.24, 17.26, 17.28, 17.30, 17.32, 17.34, 17.36, 17.38, 17.40, 17.42, 17.44, 17.46, 17.48, 17.50, 17.52, 17.54, 17.56, 17.58, 17.60, 17.62, 17.64, 17.66, 17.68, 17.70, 17.72, 17.74, 17.76, 17.78, 17.80, 17.82, 17.84, 17.86, 17.88, 17.90, 17.92, 17.94, 17.96, 17.98, 18.00, 18.02, 18.04, 18.06, 18.08, 18.10, 18.12, 18.14, 18.16, 18.18, 18.20, 18.22, 18.24, 18.26, 18.28, 18.30, 18.32, 18.34, 18.36, 18.38, 18.40, 18.42, 18.44, 18.46, 18.48, 18.50, 18.52, 18.54, 18.56, 18.58, 18.60, 18.62, 18.64, 18.66, 18.68, 18.70, 18.72, 18.74, 18.76, 18.78, 18.80, 18.82, 18.84, 18.86, 18.88, 18.90, 18.92, 18.94, 18.96, 18.98, 19.00, 19.02, 19.04, 19.06, 19.08, 19.10, 19.12, 19.14, 19.16, 19.18, 19.20, 19.22, 19.24, 19.26, 19.28, 19.30, 19.32, 19.34, 19.36, 19.38, 19.40, 19.42, 19.44, 19.46, 19.48, 19.50, 19.52, 19.54, 19.56, 19.58, 19.60, 19.62, 19.64, 19.66, 19.68, 19.70, 19.72, 19.74, 19.76, 19.78, 19.80, 19.82, 19.84, 19.86, 19.88, 19.90, 19.92, 19.94, 19.96, 19.98, 20.00, 20.02, 20.04, 20.06, 20.08, 20.10, 20.12, 20.14, 20.16, 20.18, 20.20, 20.22, 20.24, 20.26, 20.28, 20.30, 20.32, 20.34, 20.36, 20.38, 20.40, 20.42, 20.44, 20.46, 20.48, 20.50, 20.52, 20.54, 20.56, 20.58, 20.60, 20.62, 20.64, 20.66, 20.68, 20.70, 20.72, 20.74, 20.76, 20.78, 20.80, 20.82, 20.84, 20.86, 20.88, 20.90, 20.92, 20.94, 20.96, 20.98, 21.00, 21.02, 21.04, 21.06, 21.08, 21.10, 21.12, 21.14, 21.16, 21.18, 21.20, 21.22, 21.24, 21.26, 21.28, 21.30, 21.32, 21.34, 21.36, 21.38, 21.40, 21.42, 21.44, 21.46, 21.48, 21.50, 21.52, 21.54, 21.56, 21.58, 21.60, 21.62, 21.64, 21.66, 21.68, 21.70, 21.72, 21.74, 21.76, 21.78, 21.80, 21.82, 21.84, 21.86, 21.88, 21.90, 21.92, 21.94, 21.96, 21.98, 22.00, 22.02, 22.04, 22.06, 22.08, 22.10, 22.12, 22.14, 22.16, 22.18, 22.20, 22.22, 22.24, 22.26, 22.28, 22.30, 22.32, 22.34, 22.36, 22.38, 22.40, 22.42, 22.44, 22.46, 22.48, 22.50, 22.52, 22.54, 22.56, 22.58, 22.60, 22.62, 22.64, 22.66, 22.68, 22.70, 22.72, 22.74, 22.76, 22.78, 22.80, 22.82, 22.84, 22.86, 22.88, 22.90, 22.92, 22.94, 22.96, 22.98, 23.00, 23.02, 23.04, 23.06, 23.08, 23.10, 23.12, 23.14, 23.16, 23.18, 23.20, 23.22, 23.24, 23.26, 23.28, 23.30, 23.32, 23.34, 23.36, 23.38, 23.40, 23.42, 23.44, 23.46, 23.48, 23.50, 23.52, 23.54, 23.56, 23.58, 23.60, 23.62, 23.64, 23.66, 23.68, 23.70, 23.72, 23.74, 23.76, 23.78, 23.80, 23.82, 23.84, 23.86, 23.88, 23.90, 23.92, 23.94, 23.96, 23.98, 24.00, 24.02, 24.04, 24.06, 24.08, 24.10, 24.12, 24.14, 24.16, 24.18, 24.20, 24.22, 24.24, 24.26, 24.28, 24.30, 24.32, 24.34, 24.36, 24.38, 24.40, 24.42, 24.44, 24.46, 24.48, 24.50, 24.52, 24.54, 24.56, 24.58, 24.60, 24.62, 24.64, 24.66, 24.68, 24.70, 24.72, 24.74, 24.76, 24.78, 24.80, 24.82, 24.84, 24.86, 24.88, 24.90, 24.92, 24.94, 24.96, 24.98, 25.00, 25.02, 25.04, 25.06, 25.08, 25.10, 25.12, 25.14, 25.16, 25.18, 25.20, 25.22, 25.24, 25.26, 25.28, 25.30, 25.32, 25.34, 25.36, 25.38, 25.40, 25.42, 25.44, 25.46, 25.48, 25.50, 25.52, 25.54, 25.56, 25.58, 25.60, 25.62, 25.64, 25.66, 25.68, 25.70, 25.72, 25.74, 25.76, 25.78, 25.80, 25.82, 25.84, 25.86, 25.88, 25.90, 25.92, 25.94, 25.96, 25.98, 26.00, 26.02, 26.04, 26.06, 26.08, 26.10, 26.12, 26.14, 26.16, 26.18, 26.20, 26.22, 26.24, 26.26, 26.28, 26.30, 26.32, 26.34, 26.36, 26.38, 26.40, 26.42, 26.44, 26.46, 26.48, 26.50, 26.52, 26.54, 26.56, 26.58, 26.60, 26.62, 26.64, 26.66, 26.68, 26.70, 26.72, 26.74, 26.76, 26.78, 26.80, 26.82, 26.84, 26.86, 26.88, 26.90, 26.92, 26.94, 26.96, 26.98, 27.00, 27.02, 27.04, 27.06, 27.08, 27.10, 27.12, 27.14, 27.16, 27.18, 27.20, 27.22, 27.24, 27.26, 27.28, 27.30, 27.32, 27.34, 27.36, 27.38, 27.40, 27.42, 27.44, 27.46, 27.48, 27.50, 27.52, 27.54, 27.56, 27.58, 27.60, 27.62, 27.64, 27.66, 27.68, 27.70, 27.72, 27.74, 27.76, 27.78, 27.80, 27.82, 27.84, 27.86, 27.88, 27.90, 27.92, 27.94, 27.96, 27.98, 28.00, 28.02, 28.04, 28.06, 28.08, 28.10, 28.12, 28.14, 28.16, 28.18, 28.20, 28.22, 28.24, 28.26, 28.28, 28.30, 28.32, 28.34, 28.36, 28.38, 28.40, 28.42, 28.44, 28.46, 28.48, 28.50, 28.52, 28.54, 28.56, 28.58, 28.60, 28.62, 28.64, 28.66, 28.68, 28.70, 28.72, 28.74, 28.76, 28.78, 28.80, 28.82, 28.84, 28.86, 28.88, 28.90, 28.92, 28.94, 28.96, 28.98, 29.00, 29.02, 29.04, 29.06, 29.08, 29.10, 29.12, 29.14, 29.16, 29.18, 29.20, 29.22, 29.24, 29.26, 29.28, 29.30, 29.32, 29.34, 29.36, 29.38, 29.40, 29.42, 29.44, 29.46, 29.48, 29.50, 29.52, 29.54, 29.56, 29.58, 29.60, 29.62, 29.64, 29.66, 29.68, 29.70, 29.72, 29.74, 29.76, 29.78, 29.80, 29.82, 29.84, 29.86, 29.88, 29.90, 29.92, 29.94, 29.96, 29.98, 30.00, 30.02, 30.04, 30.06, 30.08, 30.10, 30.12, 30.14, 30.16, 30.18, 30.20, 30.22, 30.24, 30.26, 30.28, 30.30, 30.32, 30.34, 30.36, 30.38, 30.40, 30.42, 30.44, 30.46, 30.48, 30.50, 30.52, 30.54, 30.56, 30.58, 30.60, 30.62, 30.64, 30.66, 30.68, 30.70, 30.72, 30.74, 30.76, 30.78, 30.80, 30.82, 30.84, 30.86, 30.88, 30.90, 30.92, 30.94, 30.96, 30.98, 31.00, 31.02, 31.04, 31.06, 31.08, 31.10, 31.12, 31.14, 31.16, 31.18, 31.20, 31.22, 31.24, 31.26, 31.28, 31.30, 31.32, 31.34, 31.36, 31.38, 31.40, 31.42, 31.44, 31.46, 31.48, 31.50, 31.52, 31.54, 31.56, 31.58, 31.60, 31.62, 31.64, 31.66, 31.68, 31.70, 31.72, 31.74, 31.76, 31.78, 31.80, 31.82, 31.84, 31.86, 31.88, 31.90, 31.92, 31.94, 31.96, 31.98, 32.00, 32.02, 32.04, 32.06, 32.08, 32.10, 32.12, 32.14, 32.16, 32.18, 32.20, 32.22, 32.24, 32.26, 32.28, 3

unir al eje con la base del tanque de molienda y a su vez con el engranaje planeta la dimensión de estos elementos define la longitud de la chaveta en 40 mm.

El material de fabricación de la chaveta deberá ser de las mismas o menores características que las del eje en el cual será montada con el fin de evitar el deterioro del alojamiento y a su vez actuar como fusible en caso de vibraciones o cargas de impacto mayores a las cuales fue diseñado el eje.

Consecuentemente se realiza el cálculo para la obtención del factor de seguridad en el elemento; una chaveta está sometida principalmente a aplastamiento y a corte para lo cual se realiza los cálculos para cada esfuerzo.

Esfuerzo de aplastamiento

$$\sigma_a = \frac{F}{A} = \frac{F}{l * h/2} = \frac{S_y}{n} \quad (53)$$

Donde:

σ_a = Esfuerzo de aplastamiento

F = Fuerza debido al momento torsor en el eje

h = Altura de la chaveta

l = Longitud de la chaveta

n = Factor de seguridad

$$\frac{749.138 \text{ N}}{40 \text{ mm} * 7/2 \text{ mm}} = \frac{690 \text{ MPa}}{n}$$

$$n = 110.5$$

Esfuerzo de corte

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{F}{b * (l - b) + \frac{\pi}{4} * b^2} = \frac{749.138 \text{ N}}{8 \text{ mm} * (40 \text{ mm} - 8 \text{ mm}) + \frac{\pi}{4} * (8 \text{ mm})^2} = 2.44 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_c = \sqrt{3} \tau = \frac{S_y}{n} \quad (54)$$

$$\sqrt{3} (2.44) \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = \frac{690 \text{ MPa}}{n}$$

$$n = 163.26$$

Donde:

b = Ancho de la chaveta

$$\frac{2 * 11237.07 \text{ Nmm}}{8 \text{ mm} * 40 \text{ mm} * 30 \text{ mm}} = \frac{690 \text{ MPa}}{\sqrt{3} * n} \quad n = 171.6$$

4.7.6 Selección de rodamientos para eje de tanque

Para la selección de rodamientos se toma en cuenta las cargas a las que están sometidos, es decir, a las reacciones presentes en el soporte del eje, el cual está compuesto por tres rodamientos en línea tomados como un soporte de empotramiento.

La elección se realiza en base al catálogo del fabricante NTN Corporation que toma como principales requerimientos, vida nominal, factor de vida, factor de velocidad cuyas ecuaciones se describen a continuación:

$$L_{10} = 500 f_h^3 \quad (55)$$

$$f_h = f_n \frac{C}{P} \quad (56)$$

$$f_n = \left(\frac{33.3}{n} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (57)$$

Donde:

L_{10} = Vida nominal básica 10^6 revoluciones (horas)

C = Capacidad básica de carga dinámica (N)

P = Carga dinámica (N)

n = Velocidad de rotación (RPM)

f_h = Factor de vida

f_n = Factor de velocidad

$$f_n = \left(\frac{33.3}{650} \right)^{\frac{1}{3}} = 0.37$$

Definiendo 10000 horas de vida debido a las condiciones de operación en un molino de este tipo.

$$L_{10} = 500 f_h^3$$

$$f_h = \left(\frac{10000}{500}\right)^{\frac{1}{3}} = 2.88$$

Obteniendo entonces una capacidad básica a partir de:

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

$$C = \frac{2.88}{0.37} * 947.15 N = 7.45KN$$

Seleccionando entonces el rodamiento número 6205 ZZ con tapas, con una capacidad de 13.2 KN, se opta por 3 rodamientos con el fin de brindar estabilidad al ser el único soporte del eje; No se eligen rodamientos de dos hileras debido a la disponibilidad en el lugar al ser fabricado el prototipo.

Tabla 14-4: Dimensiones rodamientos NTN

d	mm			r _{mi} mm	kN		kgf		f _i	grasa		aceite		r.p.m.		tipo abierto	con tapas	con sello de no contacto	con sello de bajo torque	con sello de contacto	
	D	B	r _{max} ¹⁾		C _r	C _{0r}	C _r	C _{0r}		ZZ	LLB	Z	LB	LLH	LLU						
20	72	19	1.1	—	28.5	13.9	2 900	1 420	11.4	12 000	14 000	—	—	6404	—	—	—	—	—	—	
22	44	12	0.6	0.5	9.40	5.05	955	515	13.9	17 000	20 000	13 000	10 000	60/22	ZZ	LLB	LLH	LLU	LLU	LLU	
	50	14	1	0.5	12.9	6.80	1 320	690	13.5	14 000	17 000	12 000	9 700	62/22	ZZ	LLB	LLH	LLU	LLU	LLU	
	56	16	1.1	0.5	18.4	9.25	1 880	945	12.4	13 000	15 000	11 000	9 200	63/22	ZZ	LLB	LLH	LLU	LLU	LLU	
25	32	4	0.2	—	1.10	0.840	112	86	15.8	4 000	4 600	—	—	6705	—	LLF	—	—	—	—	
	37	7	0.3	0.3	4.30	2.95	435	300	16.1	18 000	21 000	—	10 000	6805	ZZ	LLB	—	—	—	LLU	
	42	9	0.3	0.3	7.05	4.55	715	460	15.4	16 000	19 000	—	9 800	6905	ZZ	LLB	—	—	—	LLU	
	47	8	0.3	—	8.35	5.10	855	520	15.1	15 000	18 000	—	—	16005	—	—	—	—	—	—	
	47	12	0.6	0.5	10.1	5.85	1 030	595	14.5	15 000	18 000	11 000	9 400	6005	ZZ	LLB	LLH	LLU	LLU	LLU	
	52	15	1	0.5	14.0	7.85	1 430	800	13.9	13 000	15 000	11 000	8 900	6205	ZZ	LLB	LLH	LLU	LLU	LLU	LLU
	62	17	1.1	0.5	21.2	10.9	2 160	1 110	12.6	12 000	14 000	9 700	8 100	6305	ZZ	LLB	LLH	LLU	LLU	LLU	LLU
80	21	1.5	—	34.5	17.5	3 550	1 780	11.6	10 000	12 000	—	—	6405	—	—	—	—	—	—	—	

Realizado por: NTN Corporation

Fuente: Catálogo rodamientos NTN

Se calcula la carga radial dinámica equivalente con ayuda de la ecuación 94 y la tabla 12-4:

$$P = xF_r + yF_a \quad (58)$$

Tabla 15-4: Carga radial dinámica equivalente

$$P_r = XF_r + YF_a$$

$\frac{f_o \cdot F_a}{C_{or}}$	e	$\frac{F_a}{F_r} \leq e$		$\frac{F_a}{F_r} > e$	
		X	Y	X	Y
		0.172	0.19		
0.345	0.22				1.99
0.689	0.26				1.71
1.03	0.28				1.55
1.38	0.30	1	0	0.56	1.45
2.07	0.34				1.31
3.45	0.38				1.15
5.17	0.42				1.04
6.89	0.44				1.00

Realizado por: NTN Corporation

Fuente: NTN Corporation. (NTN, 2004 pág. A17)

De la tabla se determina los factores “x” e “y”. Con la fuerza axial de 110.44 N correspondiente al peso de los elementos montados sobre el rodamiento.

Empezamos calculando

$$\frac{f_o * F_a}{C_{or}} = \frac{14.8 * 0.110}{8.3} = 0.196$$

$$0.172 \quad 0.19$$

$$0.196 \quad e$$

$$0.345 \quad 0.22$$

$$e = 0.1941$$

$$\frac{F_a}{F_r} = \frac{110.44N}{947.15} = 0.11$$

Al ser $\frac{F_a}{F_r} \leq e$, el valor de $x = 1$ e $y = 0$, por lo tanto $P_r = 1 * 947.15N + 110.44 * 0 = 947.15N$ ratificando entonces la selección del rodamiento previamente estudiado.

4.8 Diseño caja de rodamientos para el eje del tanque de molinenda

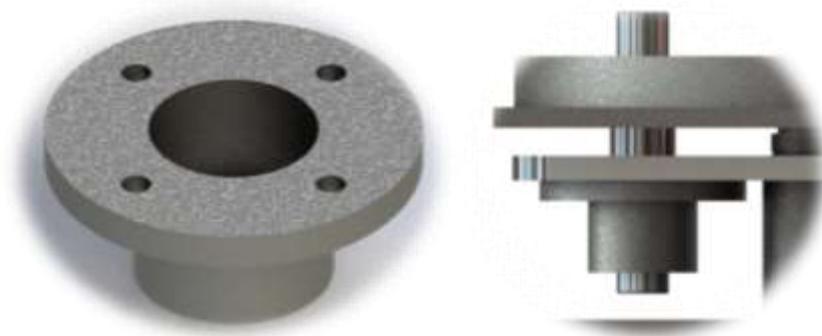


Figura 35-4: Pre diseño y ubicación de la caja de rodamientos
Fuente: Autores

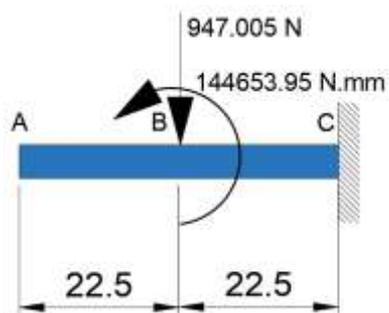


Figura 36-4: Diagrama de cuerpo libre XY
Fuente: Autores

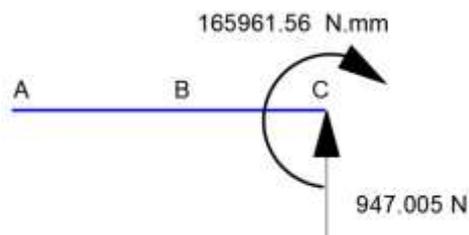


Figura 37-4: Reacciones del eje XY
Fuente: Autores

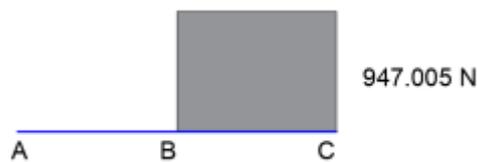


Gráfico 10-4: Diagrama de cortantes en el eje XY
Fuente: Autores

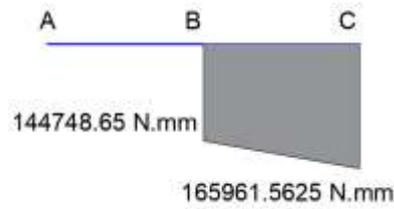


Gráfico 11-4: Diagrama de momentos flectores en XY
Fuente: Autores

El momento flexionante máximo tiene un valor de $M_{fm} = 165961.562 \text{ N.mm}$

4.8.1 Análisis estático

El material seleccionado es un acero AISI 1045 que cumple con las propiedades mecánicas necesarias para este elemento. Las propiedades principales de este acero se resumen en la siguiente tabla

Tabla 16-4: Propiedades mecánicas acero AISI 1045

Dureza	220 – 235 HB
Esfuerzo fluencia	314 Mpa
Esfuerzo tensión	638 Mpa

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Catálogo Iván Bohman

Empezamos realizando un análisis estático mediante la teoría de Von Misses:

$$\frac{S_y}{n} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2} \quad (59)$$

$$\frac{S_y}{n} = \sqrt{\left(\frac{32 * M_{fm} * D_e}{\pi(D_e^4 - d_i^4)}\right)^2 + 3 * \left(\frac{4 * F}{\pi(D_e^2 - d_i^2)}\right)^2}$$

El valor de d_i es tomado del diámetro externo del rodamiento 6205 ZZ seleccionado previamente

$$\frac{314}{2} = \sqrt{\left(\frac{32 * 165961.562 \text{ Nmm} * D_e}{\pi(D_e^4 - (55\text{mm})^4)}\right)^2 + 3 * \left(\frac{4 * 947.005 \text{ N}}{\pi(D_e^2 - (55\text{mm})^2)}\right)^2}$$

$$D_e = 55.2\text{mm}$$

4.8.2 *Análisis dinámico*

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

$$S_e = 0.3 * 0.5 * S_{ut}$$

$$S_e = 0.3 * 0.5 * 638 \text{ Mpa}$$

$$S_e = 95.7 \text{ Mpa}$$

Al ser un momento flexionante completamente reversible el valor σm_f y τa_t son igual a cero, el esfuerzo de corte y axial se desprecian debido a su bajo valor en comparación con los demás encontrados, simplificando de esta manera las ecuaciones a:

$$\sigma a_{eq} = \sqrt{(k f f * \sigma a_f)^2}$$

$$\sigma a_{eq} = \sqrt{\left(2 * \frac{32 * 165961.562 \text{ Nmm} * D_e}{\pi(D_e^4 - (55\text{mm})^4)}\right)^2}$$

$$\sigma m_{eq} = \sqrt{3(k f_t * \tau m_t)^2}$$

$$\sigma m_{eq} = \sqrt{3 \left(1.5 * \frac{4 * 947.005 \text{ N}}{\pi(D_e^2 - (55\text{mm})^2)}\right)^2}$$

$$D_e = 60.7101 \text{ mm}$$

Se opta entonces por un diámetro exterior de 65 mm obteniendo un factor de seguridad de 3.65.

4.8.3 *Recalculo del límite de fatiga*

- k_a Factor de modificación de la condición superficial

$$k_a = 4.51 * 638^{-0.265}$$

$$k_a = 0.814$$

- k_b Factor de modificación del tamaño

La ecuación que determina el factor de tamaño se obtiene a partir de la siguiente tabla de acuerdo al diámetro del eje.

$$K_b = 1,51d^{-0,157}$$

$$K_b = 1,24(65)^{-0,107}$$

$$K_b = 0.793$$

- Factor de confiabilidad

Para una confiabilidad del 99% el factor K_c es igual a 0.814

- Factor de temperatura

Para una temperatura menor a 450°C el factor no tiene relevancia por lo tanto adquiere el valor de 1

- Factor de modificación de efectos varios

Para este factor se necesita el cálculo de factor de carga que se considera $\frac{D}{d} = 1.25$ y $\frac{r}{d} = 0.15$ encontrando en la siguiente tabla el valor de k_t

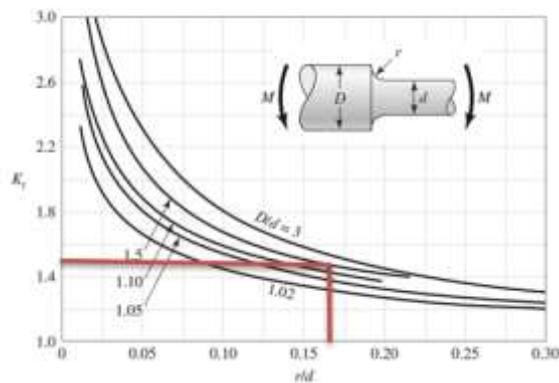


Gráfico 12-4: Factor K_t
Fuente: Shigley (Budynas, y otros, 2008 pág. 1008)

El valor de K_t es entonces 1.5

Procedemos a obtener el valor de “q” mediante el gráfico 6-4 ingresando con los valores de $S_{ut} = 638$ Mpa y $r = 2.25$.

Tenemos un valor de $q = 0.8$ valor utilizado en la siguiente ecuación

$$k_e = \frac{1}{q * (k_t - 1) + 1} = \frac{1}{0.8 * (1.5 - 1) + 1}$$

$$k_e = 0.714$$

El nuevo valor de S_e es entonces

$$S_e = 0.814 * 0.793 * 0.814 * 0.714 * 0.5 * 638 \text{ Mpa}$$

$$S_e = 111.67 \text{ Mpa}$$

Realizamos entonces el cálculo de los factores de concentración del esfuerzo de por fatiga de flexión y torsión. Para flexión tenemos $K_t = 1.5$ y $q = 0.8$ con lo cual:

$$k_{ff} = 1 + 0.8 * (1.5 - 1) = 1.4$$

Para torsión:

$$k_{ft} = 1 + q_{tt} * (k_{ts} - 1)$$

Para el valor de q_{tt} se evalúa el gráfico 7-4

$$q_{tt} = 0.98$$

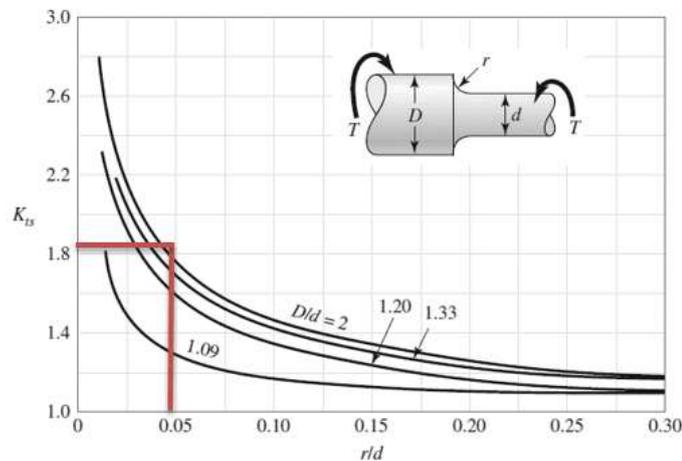


Gráfico 13-4: Factor k_{ts}

Fuente: Shigley (Budynas, y otros, 2008 pág. 1008)

$$k_{ts} = 1.82$$

$$k_{ft} = 1 + 0.98 * (1.82 - 1)$$

$$k_{ft} = 1.8$$

$$\sigma_{a_{eq}} = \sqrt{(k_{ff} * \sigma_a)^2}$$

$$\sigma_{a_{eq}} = \sqrt{\left(1.4 * \frac{32 * 165961.562 \text{ Nmm} * D_e}{\pi(D_e^4 - (55\text{mm})^4)}\right)^2}$$

$$\sigma_{m_{eq}} = \sqrt{3(kf_t * \tau m_t)^2}$$

$$\sigma_{m_{eq}} = \sqrt{3 \left(1.8 * \frac{4 * 947.005 \text{ N}}{\pi(D_e^2 - (55\text{mm})^2)} \right)^2}$$

$$D_e = 58.6 \text{ mm}$$

Su construcción se realiza entonces en un diámetro de 65 mm obteniendo un factor de seguridad de 5.8.

4.8.4 *Análisis por MEF de la caja de rodamientos*

Se realiza un proceso similar al antes mencionado en el eje, al ser una unión empernada se toma esta base como un apoyo empotrado y a su vez a la caja como una viga en cantiléver, estableciendo, dichas condiciones en ANSYS.

Luego de realizar el mallado más adecuado conforme a la geometría del elemento a ensayar se procede con la obtención de resultados presentados en la consecuente imagen.

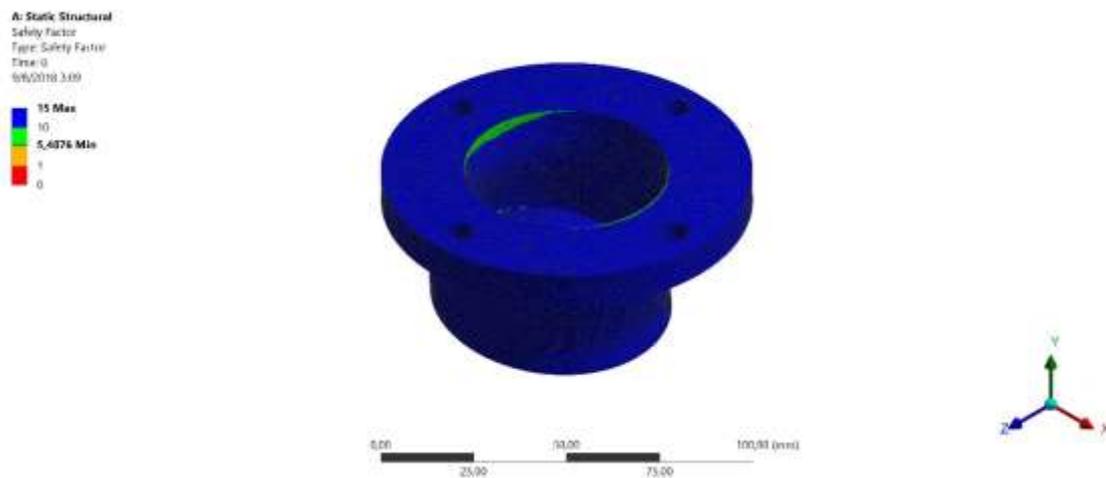


Figura 38-4: Resultados de factor de seguridad en ANSYS
Fuente: Software ANSYS – Modulo Static Structural

4.8.5 *Selección de pernos de la caja de rodamientos*

Para la selección de pernos se realiza el estudio con las reacciones en la caja de rodamientos con sus dimensiones definidas en su plano respectivo.

El análisis empieza definiendo el número de pernos en 4, los mismos que irán sometidos a tracción primaria dada por el peso de los elementos, tracción secundaria debido al momento flexionante, y corte primario debido a la reacción presente; el cálculo se realiza mediante las siguientes ecuaciones.

Corte primario

$$V' = \frac{F_c}{\# \text{ pernos}} \quad (60)$$

Donde:

V' = Fuerza cortante en cada perno

F_c = Fuerza cortante

$\# \text{ pernos}$ = Número de pernos

$$V' = \frac{947.005 \text{ N}}{4} = 236.75 \text{ N}$$

Los esfuerzos de corte medio y amplitud para el estudio a fatiga, se calculan a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\tau_a = \frac{n * V_a}{A_r} \quad \tau_m = \frac{n * V_m}{A_r} \quad (61)$$

$$V_a = \frac{V'_{max} - V'_{min}}{2} \quad V_m = \frac{V'_{max} + V'_{min}}{2} \quad (62)$$

Donde:

τ_a = Esfuerzo amplitud de corte

τ_m = Esfuerzo medio de corte

A_r = Área del diámetro menor

V_a = Carga amplitud

V_m = Carga media

Al ser un esfuerzo completamente reversible el valor de esfuerzo medio es igual a cero.

$$\tau_a = \frac{n * V_a}{A_r} \quad (63)$$

$$\tau_a = \frac{473.5 \text{ N}}{A_r}$$

Tracción primaria

$$F' = \frac{F_a}{\# \text{ pernos}} \quad (64)$$

Donde:

F^{\wedge} = Fuerza axial en cada perno

F_a = Carga axial

$$F^{\wedge} = \frac{95.03 \text{ N}}{4} = 23.75 \text{ N}$$

Tracción secundaria

$$F f'' = \frac{M * r_i}{\sum r_i^2} \quad (65)$$
$$F'' = \frac{F f''}{\# \text{ pernos en la fila}}$$

Donde:

$F f''$ = Carga axial en la fila

M = Momento flexionante

r_i = Distancia desde el punto de apoyo a la fila de pernos

F'' = Carga axial en cada perno

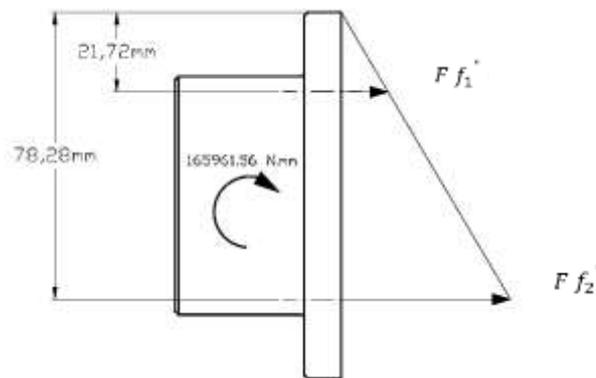


Figura 39-4: Distribución tracción secundaria en la caja de rodamientos
Fuente: Autores

$$F f_1'' = \frac{165961.56 \text{ Nmm} * 21.72 \text{ mm}}{(21.72)^2 + (78.28)^2} = 546.204 \text{ N}$$

$$F_1'' = \frac{546.204}{2} = 273.10 \text{ N}$$

$$F f_2'' = \frac{165961.56 \text{ Nmm} * 78.28 \text{ mm}}{(21.72)^2 + (78.28)^2} = 1968.54 \text{ N}$$

$$F_2'' = \frac{1968.54}{2} = 984.27 \text{ N}$$

La fuerza de tracción resultante en cada perno se obtiene al sumar la carga mayor de tracción secundaria con la fuerza en tracción primaria dando el siguiente resultado.

$$P_{max} = 984.27N + 23.75 N = 1008.02 N$$

Al ser una carga completamente reversible P_{min} adquiere el mismo valor. El esfuerzo medio y amplitud de tracción se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_a = \frac{n * c}{2 * A_t} (P_{max} - P_{min}) \quad (66)$$

$$\sigma_m = \frac{F_i}{A_t} + \frac{n * c}{2 * A_t} (P_{max} + P_{min}) \quad (67)$$

Considerando una junta reutilizable (68)

$$F_i = 0.75 S_p * A_t$$

Donde:

c = Constante elástica de la junta (0.3 al no existir empaque)

A_t = Área de esfuerzo de tensión

F_i = Carga de pretensión

S_p = Resistencia de prueba mínima

$$\sigma_a = \frac{2 * 0.3}{2 * A_t} (2 * 1008.2 N)$$

$$F_i = 0.75 S_p * A_t$$

Seleccionando una clase métrica 5.8, $S_p = 380 MPa$

$$\sigma_a = \frac{604.92}{A_t}$$

$$F_i = 285 * A_t$$

$$\sigma_m = 285$$

Para el cálculo del área se toma la relación $\frac{A_t}{A_r} = 1.15$

$$\sigma_{a-eq} = \sqrt{\left(\frac{604.92}{A_t}\right)^2 + 3\left(\frac{1.15 * 473.5 N}{A_t}\right)^2}$$

$$\sigma_{m-eq} = 285$$

$$S_e = k_c * \frac{1}{k_f} * 0.45 * S_{ut}$$

$$S_e = 0.814 * \frac{1}{2.2} * 0.45 * 520 MPa = 86.58 MPa$$

$$n = 2 \quad \frac{\sigma_{m-eq}}{S_y} + \frac{\sigma_{a-eq}}{S_e} = \frac{1}{n}$$

$$A_t = 39.36 \text{ mm}^2$$

Seleccionamos cuatro pernos $M8 \times 1$ con un $A_t = 39.2 \text{ mm}^2$ sin afectar con mayor relevancia al factor de seguridad.

4.9 Diseño de la base del tanque de molienda

La base del tanque de molienda estará diseñada según las dimensiones del tanque para su diámetro interior y del eje para el área de acople al mismo.



Figura 40-4: Pre diseño base del tanque de molienda
Fuente: Autores

El área de acople en la base es un cilindro el cual será tomado como empotrado al eje, para el estudio de resistencia estática y dinámica; a continuación, se detallan las cargas a las que está sometida, junto con sus respectivos diagramas de fuerzas cortantes y momentos flectores.

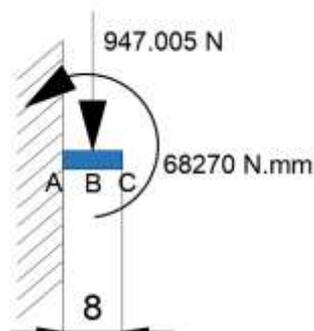


Figura 41-4: Diagrama de cuerpo libre XY

Fuente: Autores

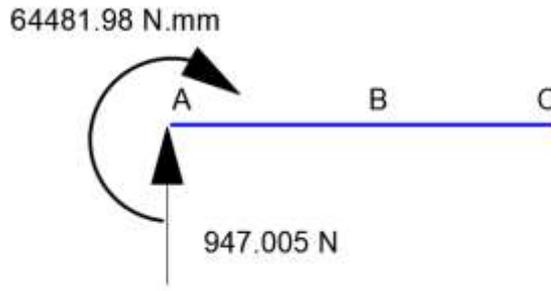


Figura 42-4: Reacciones del eje XY
Fuente: Autores

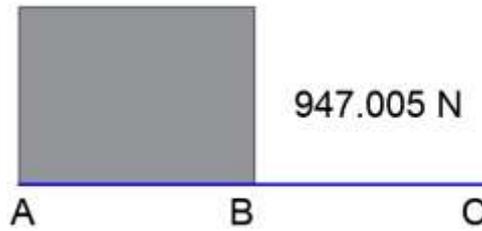


Gráfico 14-4: Diagrama de cortantes en el eje XY
Fuente: Autores

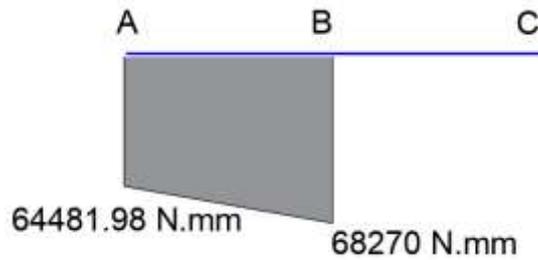


Gráfico 15-4: Diagrama de momentos flectores en XY
Fuente: Autores

El momento flexionante máximo tiene un valor de $M_{fm} = 68270 \text{ N.mm}$

4.9.1 *Análisis estático*

El material seleccionado es un acero inoxidable AISI 304 que cumple con las propiedades mecánicas necesarias para este elemento. Las propiedades principales de este acero se resumen en la siguiente tabla

Tabla 17-4: Propiedades mecánicas acero AISI 304	
Dureza	235 HB

Esfuerzo fluencia	220 Mpa
Esfuerzo tensión	520 Mpa

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Catalogo Iván Bohman

Empezamos realizando un análisis estático mediante la teoría de Von Misses:

$$\frac{S_y}{n} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

$$\frac{S_y}{n} = \sqrt{\left(\frac{32 * M_{fm} * D_e}{\pi(D_e^4 - d_i^4)}\right)^2 + 3 * \left(\frac{4 * F}{\pi(D_e^2 - d_i^2)}\right)^2}$$

El valor de d_i es tomado del diámetro externo del tanque de molienda previamente definido.

$$\frac{220}{2} = \sqrt{\left(\frac{32 * 68270 \text{ Nmm} * D_e}{\pi(D_e^4 - (105\text{mm})^4)}\right)^2 + 3 * \left(\frac{4 * 947.005 \text{ N}}{\pi(D_e^2 - (105\text{mm})^2)}\right)^2}$$

$$D_e = 105.26 \text{ mm}$$

4.9.2 Análisis dinámico

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

$$S_e = 0.3 * 0.5 * S_{ut}$$

$$S_e = 0.3 * 0.5 * 520 \text{ Mpa}$$

$$S_e = 78 \text{ Mpa}$$

$$\frac{\sigma_{aeq}}{S_e} + \frac{\sigma_{meq}}{S_y} = \frac{1}{n}$$

$$\sigma_{aeq} = \sqrt{(k_{ff} * \sigma_{af})^2}$$

$$\sigma_{aeq} = \sqrt{\left(2 * \frac{32 * 68270 \text{ Nmm} * D_e}{\pi(D_e^4 - (105 \text{ mm})^4)}\right)^2}$$

$$\sigma_{meq} = \sqrt{3(k_{ft} * \tau_{mt})^2}$$

$$\sigma_{meq} = \sqrt{3 \left(1.5 * \frac{4 * 947.005 \text{ N}}{\pi(D_e^2 - (105\text{mm})^2)}\right)^2}$$

$$D_e = 106.96 \text{ mm}$$

Para la sujeción de la base al eje del tanque de molienda se emplean 3 prisioneros Allen M6x1 para lo cual se requiere un espacio de acuerdo a la longitud de rosca de los mismos, de igual manera para la sujeción de los brazos que fijaran el tanque de molienda sobre esta base, consecuentemente se fija el diámetro exterior de la base en 120 mm.

4.10 Diseño de Soportes de fijación

El diseño de los soportes de fijación se realizará principalmente en base a la altura previamente definida para el tanque de molienda, cada uno de ellos es estudiado como una viga en voladizo fijada a la base del tanque por medio de los pernos anteriormente definido.



Figura 43-4: Pre diseño de brazo sujetador
Fuente: Autores

Estos elementos estarán sometidos principalmente a la acción de la fuerza centrípeta generada por la masa del sistema. Este soporte será estudiado como una viga en voladizo en este caso empotrado a la base del tanque de molienda. A continuación, se muestra el diagrama de cuerpo libre del componente.

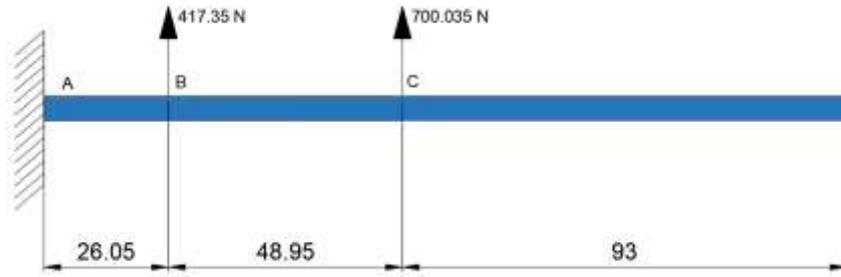


Figura 44-4 Diagrama de cuerpo libre XY
Fuente: Autores

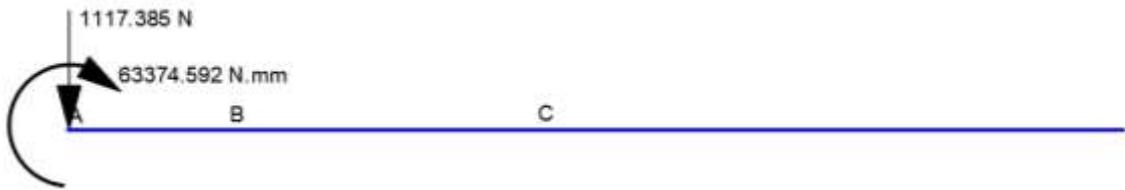


Figura 45-4: Reacciones del eje XY
Fuente: Autores

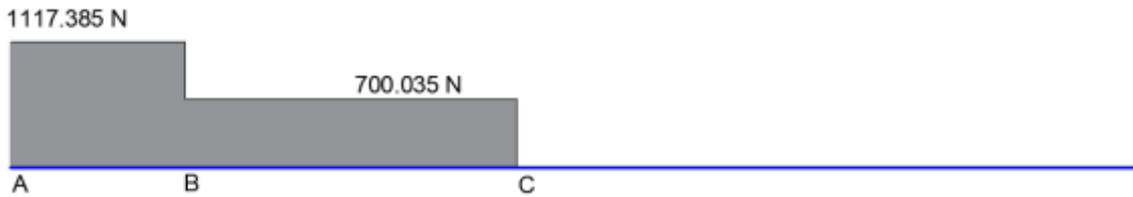


Gráfico 16-4: Diagrama de cortantes en el eje XY
Fuente: Autores

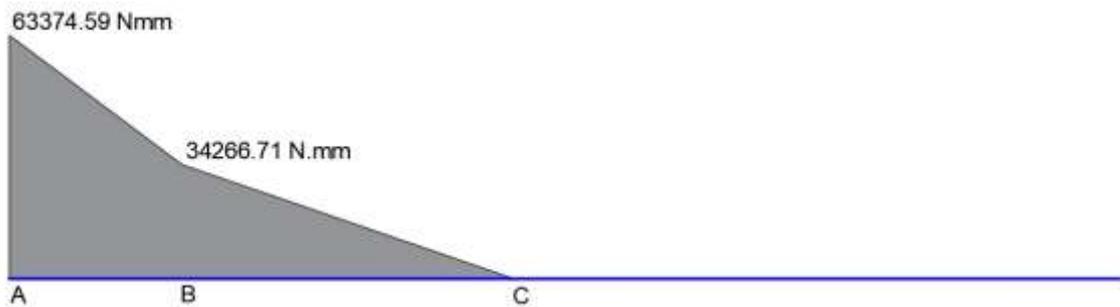


Gráfico 17-4: Diagrama de momentos flectores en XY
Fuente: Autores

El momento flexionante máximo tiene un valor de $M_{fA} = 63374.59 \text{ N}\cdot\text{mm}$.

Los soportes de fijación están sometidos principalmente a flexión, el esfuerzo flexionante para una sección rectangular se describe a continuación:

$$\sigma_{fa} = \frac{M_f * c}{I} \quad (69)$$

Donde:

M_f = Momento flector

c = Distancia desde la sección transversal al centro de gravedad

I = Momento de inercia respecto a la sección transversal.

$$I = \frac{base * h^3}{12} \quad (70)$$

Donde:

$base$ = Dimensión tomada como base para la flexión de acuerdo a la sección transversal tomada

h = Dimensión perpendicular a la base

Flexión por peso del sistema de molienda (W_{sm})

<p>Inercia</p> $I = \frac{45 \text{ mm} * (h)^3}{12}$	<p>Esfuerzo de flexión</p> $\sigma_{fa} = \frac{63374.59 \text{ N.mm}}{2 * 3.75 * (h)^2}$
--	--

El material seleccionado para este elemento es el acero AISI 1045 templado en aceite a 850 °C y revenido a 320 °C, que se utiliza en fabricación de piezas estructurales o en maquinaria de mediana resistencia. Las propiedades principales de este acero se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 18-4: Propiedades mecánicas acero AISI 1045

Dureza	220 – 235 HB
Esfuerzo fluencia	786 Mpa
Esfuerzo tensión	1034 Mpa

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Catálogo Iván Bohman

Utilizando la ecuación de Marín con un factor $k = 0.6$ debido a los concentradores de esfuerzos presentes se obtiene un valor de $S_e = 310.2 \text{ MPa}$.

Utilizando la ecuación de Soderberg y al ser una carga totalmente reversible, el esfuerzo de flexión medio se iguala a cero reduciendo la ecuación a:

$$\frac{1.5 * \frac{8449.94}{h^2}}{310.2 \text{ Mpa}} = \frac{1}{2}$$

$$h = 9.03 \text{ mm}$$

4.10.1 Recalculo del límite de fatiga

- k_a Factor de modificación de la condición superficial

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

$$k_a = 4.51 * 1034^{-0.265}$$

$$k_a = 0.716$$

- k_b Factor de modificación del tamaño

La ecuación que determina el factor de tamaño se obtiene a partir de la siguiente tabla 30-4 de acuerdo al diámetro del eje.

Para una sección rectangular se debe obtener un diámetro equivalente a partir de la siguiente ecuación.

$$d_e = 0.808(hb)^{\frac{1}{2}}$$

$$d_e = 0.808(9 \text{ mm} * 170 \text{ mm})^{\frac{1}{2}}$$

$$d_e = 31.605 \text{ mm}$$

Para este diámetro se utiliza la siguiente ecuación en base a la tabla 13-4

$$k_b = 1,24d^{-0,107}$$

$$k_b = 0.856$$

- Factor de confiabilidad

Para una confiabilidad del 99% el factor K_c es igual a 0.814

- Factor de temperatura

Para una temperatura menor a 450°C el factor no tiene relevancia por lo tanto adquiere el valor de 1

- Factor de modificación de efectos varios

Para este factor se necesita el cálculo de factor de carga que se considera $\frac{D}{d} = 1.25$ y $\frac{r}{d} = 0.15$ encontrando en la siguiente tabla el valor de k_t

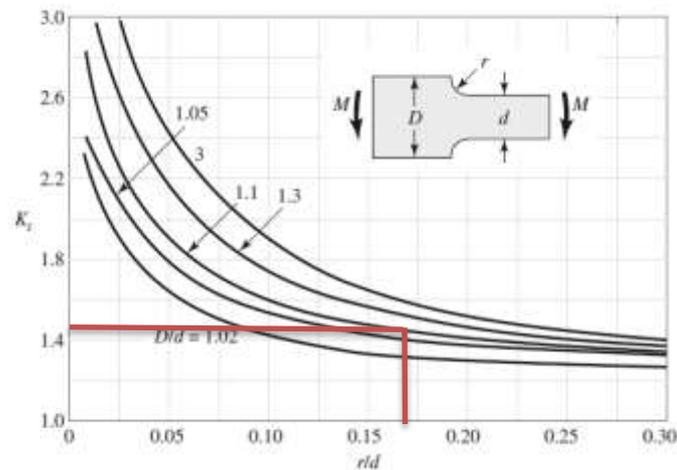


Gráfico 18-4: Factor K_t
Fuente: Shigley (Budynas, y otros, 2008 pág. 1008)

El valor de K_t es entonces 1.5.

Procedemos a obtener el valor de “q” mediante el gráfico 6-4 ingresando con los valores de $S_{ut} = 1034 \text{ Mpa}$ y $r = 2.25$.

Tenemos un valor de $q = 0.88$

$$k_e = \frac{1}{0.88 * (1.5 - 1) + 1}$$

$$k_e = 0.6944$$

El nuevo valor de S_e es entonces

$$S_e = 0.716 * 0.856 * 0.814 * 1 * 0.694 * 0.5 * 1034 \text{ Mpa}$$

$$S_e = 179.003 \text{ Mpa}$$

$$\frac{1.5 * \frac{8449.94}{h^2}}{179.003 \text{ Mpa}} = \frac{1}{2}$$

$$h = 10.3 \text{ mm}$$

Pudiendo mantener 9 mm para un factor de seguridad de 1.47 sin mayor afectación.

4.10.2 Selección de pernos para los soportes de fijación

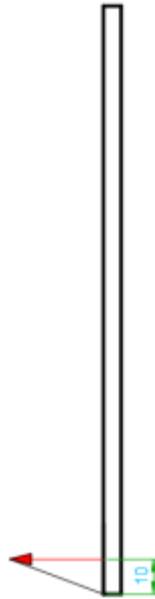


Figura 46-4: Distribución tracción secundaria en los soportes de fijación
Fuente: Autores

$$F f_1'' = \frac{63374.59 \text{ Nmm} * 10 \text{ mm}}{(10 \text{ mm})^2} = 6337.459 \text{ N}$$

$$F_1'' = \frac{6337.459}{2} = 3168.729 \text{ N}$$

$$P_{max} = 3168.729 \text{ N}$$

Al ser una carga completamente reversible P_{min} adquiere el mismo valor.

$$\sigma_a = \frac{2 * 0.3}{2 * A_t} (2 * 3168.72 \text{ N})$$

$$\sigma_a = \frac{1901.232}{A_t}$$

$$F_i = 0.75 S_p * A_t$$

Seleccionando una clase métrica 5.8,

$$S_p = 380 \text{ MPa}$$

$$F_i = 285 * A_t$$

$$\sigma_m = 285$$

$$\sigma_{a-eq} = \sqrt{\left(\frac{1091.232}{A_t}\right)^2}$$

$$\sigma_{m-eq} = 285$$

$$S_e = k_c * \frac{1}{k_f} * 0.45 * S_{ut}$$

$$S_e = 0.814 * \frac{1}{2.2} * 0.45 * 520 \text{ MPa} = 86.58 \text{ Mpa}$$

$$\frac{\sigma_{m-eq}}{S_y} + \frac{\sigma_{a-eq}}{S_e} = 1$$

$$A_t = 39.202 \text{ mm}^2$$

Seleccionamos dos pernos $M8 \times 1$ con un $A_t = 39.2 \text{ mm}^2$.

4.11 Diseño del brazo

El brazo constituye el soporte para el sistema de molienda y contrapeso además es el encargado de transmitir la velocidad y torque en el eje hacia el planeta y de esta manera alcanzar la relación de velocidad deseada. A continuación, se muestran las cargas a las que está sometido el brazo, correspondientes al peso del sistema de molienda y contrapeso.



Figura 47-4: Pre diseño del brazo
Fuente: Autores

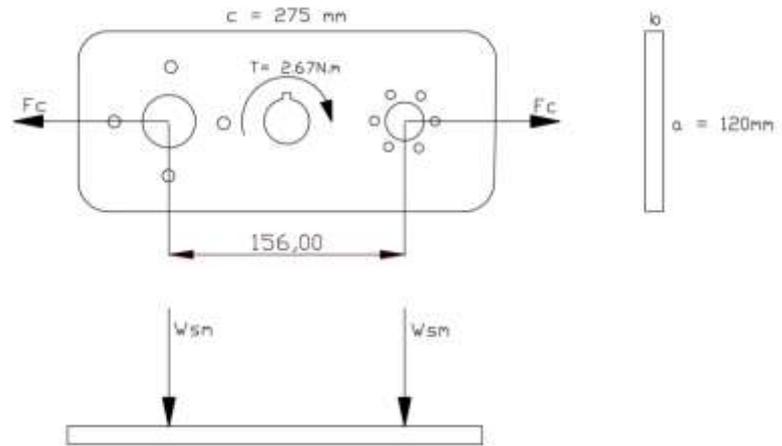


Figura 48-4: Dimensionamiento parcial del brazo
Fuente: Autores

Para la dimensión b de la sección transversal del brazo se asume un valor de 120 mm tomando en cuenta el espacio utilizado por los pernos de sujeción para la caja de rodamientos y contrapeso, bajo la misma justificación el lado c adquiere un valor de 275 mm.

Tracción

$$\sigma_t = \frac{F_{c-t}}{A}$$

$$\sigma_t = \frac{F_{c-t}}{a * b}$$

$$\sigma_t = \frac{1613.49 \text{ N}}{b * 120 \text{ mm}}$$

$$\sigma_t = \frac{13.44 \text{ N}}{b \text{ mm}}$$

$$\sigma_{fa} = \frac{M_f * c}{I}$$

$$I = \frac{\text{base} * h^3}{12}$$

Flexión por peso del sistema de molienda (W_{sm})

Inercia Ecuación (76)

$$I = \frac{120 \text{ mm} * b^3}{12}$$

Esfuerzo de flexión Ecuación (75)

$$\sigma_{fa} = \frac{100.44 \text{ N} * 78 \text{ mm} * b}{10 \text{ mm} * b^3}$$

$$I = 10 \text{ mm} * b^3$$

$$\sigma_{fa} = \frac{783.43N}{b^2}$$

Torsión

La torsión la genera el torque del motor en el centro del brazo transmitida a través del eje de transmisión.

$$\tau = \frac{M_t}{\alpha * a * b^2} \quad (71)$$

Donde:

M_t = Momento torsor

α = Coeficiente de torsión para barra rectangular

a = Lado más largo de la sección transversal

b = Lado más corto de la sección transversal

$$\tau = \frac{2670 \text{ N} \cdot \text{mm}}{2.29 * 275 * 120^2}$$

$$\tau = 2.94 \times 10^{-4} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

El material seleccionado para este elemento es el acero AISI 1045 con características mencionadas en la tabla 36-4

Utilizando la ecuación de Marín con un factor $k = 0.3$ debido a los concentradores de esfuerzos presentes se obtiene un valor de $S_e = 95.7 \text{ MPa}$.

Empleando la ecuación de Soderberg se obtiene:

$$\sigma_{aeq} = \sqrt{\left(2 * \frac{783.43N}{b^2}\right)^2}$$

$$\sigma_{meq} = \sqrt{+3(1.5 * 2.94 \times 10^{-4})^2}$$

$$\frac{\sqrt{\left(2 * \frac{783.43N}{b^2}\right)^2}}{95.7} + \frac{\sqrt{+3(1.5 * 2.94 \times 10^{-4})^2}}{314} = \frac{1}{2}$$

$$b = 5.72 \text{ mm}$$

Fijando el espesor entonces en 6 mm.

Recalculo del límite de fatiga

- k_a Factor de modificación de la condición superficial

$$k_a = a * S_{ut}^b$$
$$k_a = 4.51 * 638^{-0.265}$$
$$k_a = 0.814$$

- k_b Factor de modificación del tamaño

La ecuación que determina el factor de tamaño se obtiene a partir de la tabla 30-4 de acuerdo al diámetro del eje.

Para una sección rectangular se debe obtener un diámetro equivalente a partir de la siguiente ecuación.

$$d_e = 0.808(hb)^{\frac{1}{2}} \quad (72)$$
$$d_e = 0.808(120 \text{ mm} * 275 \text{ mm})^{\frac{1}{2}}$$
$$d_e = 146.78 \text{ mm}$$

Para este diámetro se utiliza la siguiente ecuación en base a la tabla 15-4

$$k_b = 1,51d^{-0,157}$$
$$k_b = 0.689$$

- Factor de confiabilidad

Para una confiabilidad del 99% el factor Kc es igual a 0.814

- Factor de temperatura

Para una temperatura menor a 450°C el factor no tiene relevancia por lo tanto adquiere el valor de 1

- Factor de modificación de efectos varios

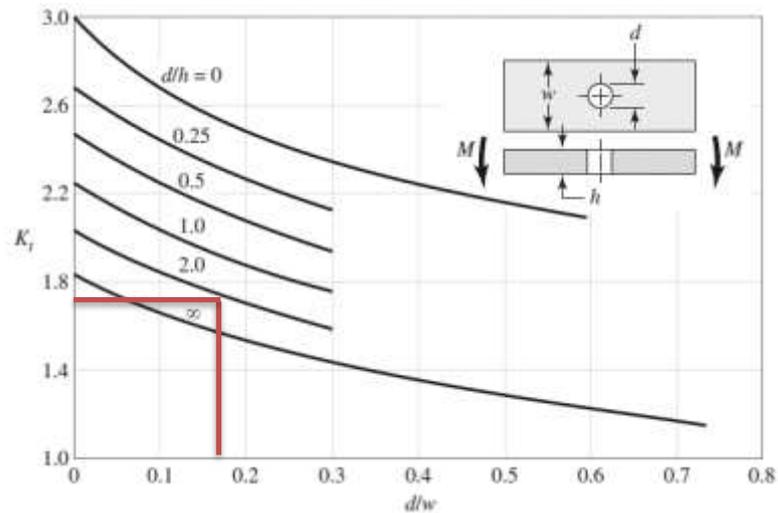


Gráfico 19-4: Factor K_t
Fuente: Shigley (Budynas, y otros, 2008 pág. 1008)

El valor de K_t es entonces 1.76

Procedemos a obtener el valor de “q” mediante el gráfico 6-4 ingresando con los valores de $S_{ut} = 638 \text{ Mpa}$ y $r = 2.25$.

Tenemos un valor de $q = 0.8$ valor utilizado en la siguiente ecuación

$$k_e = \frac{1}{q * (k_t - 1) + 1}$$

$$k_e = \frac{1}{0.8 * (1.76 - 1) + 1}$$

$$k_e = 0.62$$

El nuevo valor de S_e es entonces

$$S_e = 0.814 * 0.689 * 0.814 * 1 * 0.62 * 0.5 * 638 \text{ Mpa}$$

$$S_e = 90.29 \text{ Mpa}$$

$$\frac{\sqrt{\left(2 * \frac{783.43 \text{ N}}{b^2}\right)^2}}{90.29} + \frac{\sqrt{+3(1.5 * 2.94 * 10^{-4})^2}}{314} = \frac{1}{2}$$

$$b = 5.89$$

Se escoge un espesor de la placa de 8 mm debido a la longitud de rosca para los pernos que se utilizaran para el montaje de los diferentes componentes sobre este elemento.

4.12 Diseño del eje principal de transmisión.

El diseño de este eje resulta de suma importancia ya que sirve de comunicación entre el motor y el sistema de engranajes planetarios, por lo tanto, es el encargado de transmitir la velocidad y torque necesarios para la molienda del material dentro del tazón.

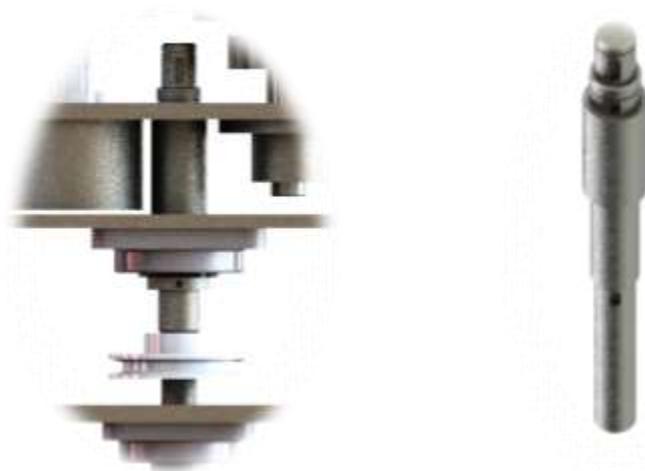


Figura 49-4: Pre diseño y ubicación del eje principal de transmisión
Fuente: Autores

A continuación, se muestran las cargas a las que está sometido el eje de transmisión dados por la torsión del motor, tensiones en la banda y el peso del sistema de molienda y contrapeso, acompañado de sus diagramas de momento flector y fuerzas cortantes para este eje.

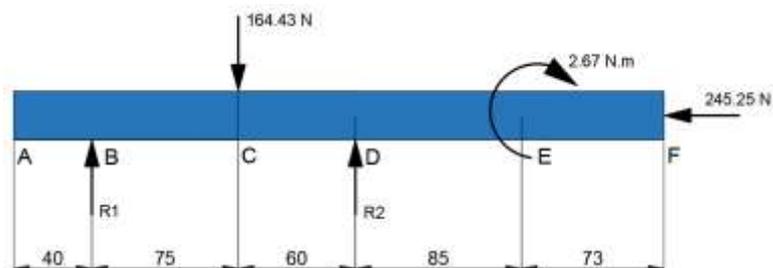


Figura 50-4: Diagrama de cuerpo libre XY
Fuente: Autores

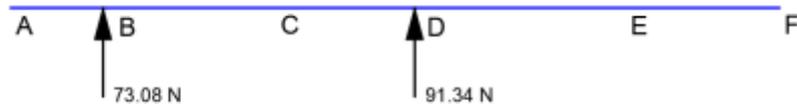


Figura 51-4: Reacciones del eje XY

Fuente: Autores

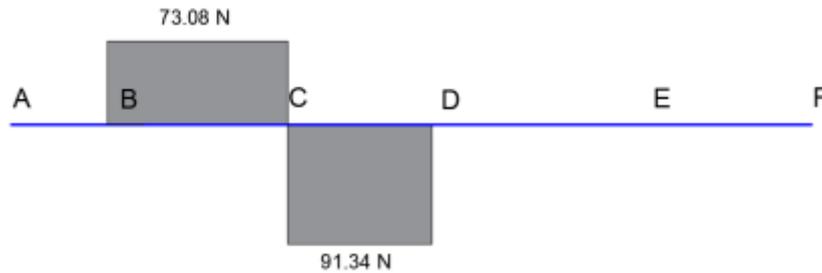


Gráfico 20-4: Diagrama de cortantes en el eje XY

Fuente: Autores

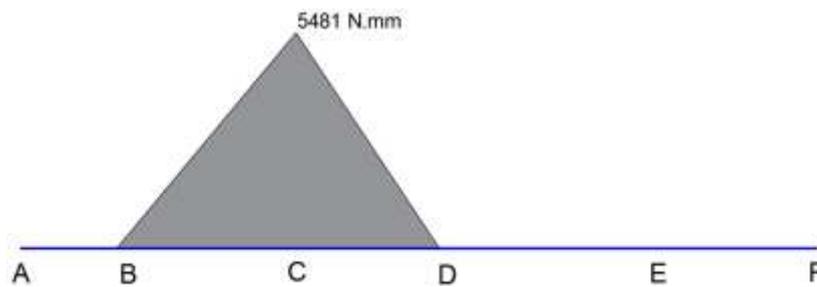


Gráfico 21-4: Diagrama de momentos flectores en XY

Fuente: Autores

El momento flexionante máximo tiene un valor de $M_{fm} = 5481$ N.mm

4.12.1 Análisis estático

El material seleccionado es un acero AISI 4140 por las condiciones anteriormente detalladas.

Empezamos realizando un análisis estático mediante la teoría de Von Misses:

$$\frac{S_y}{n} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

$$\frac{S_y}{n} = \sqrt{\left(\frac{32 * M_{fm}}{\pi d^3}\right)^2 + 3\left(\frac{16T}{\pi d^3}\right)^2}$$

$$\frac{690}{2} = \sqrt{\left(\frac{32 * 5481 \text{ N} \cdot \text{mm}}{\pi d^3}\right)^2 + 3 \left(\frac{16 * 2670 \text{ N} \cdot \text{mm}}{\pi d^3}\right)^2}$$

$$d = 6.93 \text{ mm}$$

4.12.2 Análisis dinámico

Al ser un momento flexionante completamente reversible el valor σm_f y τa_t son igual a cero, el esfuerzo de corte y axial se desprecian debido a su bajo valor en comparación con los demás encontrados, simplificando de esta manera las ecuaciones a:

$$\sigma a_{eq} = \sqrt{(kff * \sigma a_f)^2}$$

$$\sigma a_{eq} = \sqrt{\left(2 * 32 * \frac{5481}{\pi * d^3}\right)^2}$$

$$\sigma a_{eq} = \frac{111658.01}{d^3}$$

$$\sigma m_{eq} = \sqrt{(\sigma m_a)^2 + 3(kf_t * \tau m_t)^2}$$

$$\sigma m_{eq} = \sqrt{\left(\frac{4F}{\pi * d^2}\right)^2 + 3 \left(1.5 * \frac{16 * T}{\pi * d^3}\right)^2}$$

$$\sigma m_{eq} = \sqrt{\left(\frac{4F}{\pi * d^2}\right)^2 + 3 \left(1.5 * \frac{16 * 2670}{\pi * d^3}\right)^2}$$

$$\sigma m_{eq} = \sqrt{\left(\frac{4 * 245.25}{\pi * d^2}\right)^2 + 3 \left(\frac{20397.29}{d^3}\right)^2}$$

$$d = 14.49 \text{ mm}$$

Debido a la posible presencia de desbalanceo en el sistema, por acción del contrapeso el factor de seguridad se considera de mayor relevancia, optando entonces por un eje de diámetro 25 mm teniendo un factor de seguridad de 11.2; además tomando en cuenta que el eje de transmisión sirve de soporte para el brazo y consecuentemente para los elementos ensamblados en él, el área de apoyo debe ser mayor pero sin existir concentradores de esfuerzos significativos al tener cambios bruscos de diámetro. Fijando las dimensiones del eje como se muestra a continuación.

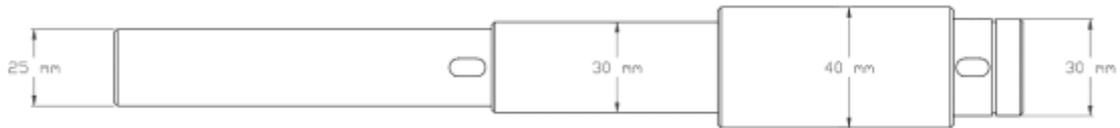


Figura 52-4: Dimensiones finales eje de transmisión

Fuente: Autores

4.12.3 Selección de rodamientos para eje de transmisión

$$f_n = \left(\frac{33.3}{325} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$f_n = 0.467$$

Definiendo 10000 horas de vida debido a las condiciones de operación en un molino de este tipo.

$$L_{10} = 500 f_h^3$$

$$f_h = \left(\frac{10000}{500} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$f_h = 2.88$$

Obteniendo entonces una capacidad básica a partir de:

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

$$C = \frac{2.88}{0.46} * 94.12N$$

$$C = 0.589 KN$$

De la misma manera evitando inconvenientes debido a que el balanceo entre sistema de molienda y contrapeso no necesariamente es perfecto escogemos un rodamiento de mayor capacidad asegurando que su funcionamiento sea correcto y por lo tanto posea mayor vida útil.

Seleccionando entonces el rodamiento número 6006 ZZ con tapas con una capacidad de 13.2 KN

Tabla 19-4: Rodamientos de bolas NTN

30	37	4	0.2	—	1.14	0.950	117	97	15.7	3 300	3 800	—	—	6706	—	LLF	—	—
	42	7	0.3	0.3	4.70	3.65	480	370	16.5	15 000	18 000	—	8 800	6806	ZZ	LLB	—	LLU
	47	9	0.3	0.3	7.25	5.00	740	510	15.8	14 000	17 000	—	8 400	6906	ZZ	LLB	—	LLU
	55	9	0.3	—	11.2	7.35	1 150	750	15.2	13 000	15 000	—	—	16006	—	—	—	—
	55	13	1	0.5	13.2	8.3	1 350	845	14.8	13 000	15 000	9 200	7 700	6006	ZZ	LLB	LLH	LLU
	62	16	1	0.5	19.5	11.3	1 980	1 150	13.8	11 000	13 000	8 800	7 300	6206	ZZ	LLB	LLH	LLU
	72	19	1.1	0.5	26.7	15.0	2 720	1 530	13.3	10 000	12 000	7 900	6 600	6306	ZZ	LLB	LLH	LLU
	90	23	1.5	—	43.5	23.9	4 400	2 440	12.3	8 800	10 000	—	—	6406	—	—	—	—

Realizado por: NTN Corporation

Fuente: Catálogo rodamientos NTN

4.13 Diseño caja de rodamientos para el eje de transmisión



Figura 53-4: Pre diseño de la caja de rodamientos

Fuente: Autores

Se utiliza para el estudio el valor de la reacción en el punto D y el momento resultante de no tener contrapeso considerado como el caso más crítico para su selección.

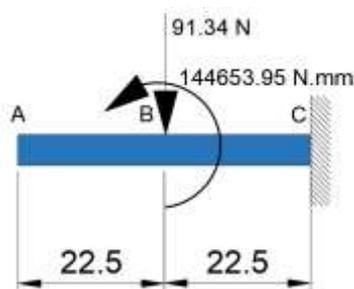


Figura 54-4: Diagrama de cuerpo libre XY

Fuente: Autores

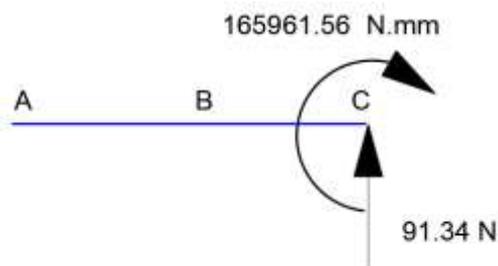


Figura 55-4: Reacciones del eje XY

Fuente: Autores

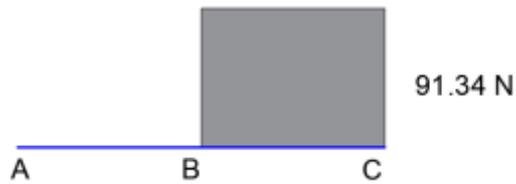


Gráfico 22-4: Diagrama de cortantes en el eje XY

Fuente: Autores

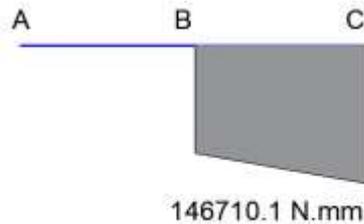


Gráfico 23-4: Diagrama de momentos flectores en XY

Fuente: Autores

El momento flexionante máximo tiene un valor de $M_{fm} = 146710 \text{ N.mm}$

4.13.1 *Análisis estático*

El material seleccionado es un acero AISI 1045 que cumple con las propiedades mecánicas necesarias para este elemento. Las propiedades principales de este acero se resumen en la tabla 36-4. Empezamos realizando un análisis estático mediante la teoría de Von Misses:

$$\frac{S_y}{n} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

$$\frac{S_y}{n} = \sqrt{\left(\frac{32 * M_{fm} * D_e}{\pi(D_e^4 - d_i^4)}\right)^2 + 3 * \left(\frac{4 * F}{\pi(D_e^2 - d_i^2)}\right)^2}$$

El valor de d_i es tomado del diámetro externo del rodamiento 6205 ZZ seleccionado previamente

$$\frac{314}{2} = \sqrt{\left(\frac{32 * 146710 \text{ Nmm} * D_e}{\pi(D_e^4 - (55\text{mm})^4)}\right)^2 + 3 * \left(\frac{4 * 91.43 \text{ N}}{\pi(D_e^2 - (55\text{mm})^2)}\right)^2}$$

$$D_e = 55.78\text{mm}$$

4.13.2 Análisis dinámico

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

$$S_e = 0.6 * 0.5 * S_{ut}$$

$$S_e = 0.6 * 0.5 * 638 \text{ Mpa}$$

$$S_e = 191.4 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{a_{eq}} = \sqrt{(k_{ff} * \sigma_{a_f})^2}$$

$$\sigma_{m_{eq}} = \sqrt{3(\tau_{m_t})^2}$$

$$\sigma_{m_{eq}} = \sqrt{3 \left(\frac{4 * 91.43 \text{ N}}{\pi(D_e^2 - (55\text{mm})^2)} \right)^2}$$

$$D_e = 59.98 \text{ mm}$$

Se opta entonces por un diámetro exterior de 65 mm obteniendo un factor de seguridad de 4.27

4.14 Dimensionamiento del contrapeso

Para un correcto funcionamiento del sistema de molienda se opta por un contrapeso con el fin de evitar vibraciones y esfuerzos excesivas debido al desequilibrio presente al concentrar la masa de los elementos a un solo lugar del brazo y del eje de transmisión.



Figura 56-4: Configuración sistema de molienda y contrapeso

Fuente: Autores

Una vez recalculado los valores para cada elemento que conforma el sistema de molienda, basados en el diseño realizado para cada uno de ellos se procede con el diseño del contrapeso se evalúa entonces la masa presente de un lado del brazo, y a su vez el centro de masa para la ubicación de la fuerza centrípeta al momento de girar, para lograr un completo equilibrio de los elementos, su soporte es un eje y una base, de dimensiones similares al eje y base del tanque de molienda respectivamente al contar con las mismas

cargas. A continuación, se muestra un resumen de las propiedades obtenidas en el software para la verificación del correcto equilibrio a cada lado del brazo, el centro de masa se examina en el eje de coordenadas y al ser el punto de interés para la actuación de la fuerza centrípeta presente debido al giro.

Tabla 20-4: Resumen valores de centro de gravedad en Y masa del sistema de molienda y contrapeso

	Sistema de molienda	Contrapeso
Masa	9.87 Kg	9.85 Kg
Centro de gravedad (Y)	114.95 mm	115.12 mm

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Realización propia

4.15 Selección del motor

Para la selección del motor se recalcula los valores de inercia con la nueva masa correspondiente a cada elemento diseñado previamente; contando ahora con un valor de 12.02 Kg para el sistema de molienda y de la misma manera para el contrapeso, obteniendo a su vez un nuevo valor de momento de inercia con respecto al centro de 238362.61 $Kg \cdot mm^2$ ratificando la elección de un motor de 0.5HP.

Tabla 21-4: Selección del Motor eléctrico Weg

Potencia	Carcasa	Por nominal (kgm)	Corriente con rotor trabado I _T /I _n	Par con rotor trabado T _T /T _n	Par máximo T _M /T _n	Momento de inercia J (kgm ²)	Tiempo máximo con rotor trabado (s)		Peso (kg)	Nivel de ruido d(B)	RPM	% de la potencia nominal						Corriente nominal I _n (A)
							Cableado	Frio				Rendimiento			Factor de potencia			
												50	75	100	50	75	100	
0.06	0.12	63	0.051	5.2	3.4	0.0003	22	48	7.0	48	1725	45.0	53.0	55.0	0.44	0.52	0.61	0.704
0.12	0.16	63	0.068	4.5	2.1	0.0004	25	55	8.0	48	1730	53.0	60.0	62.0	0.43	0.55	0.64	0.794
0.18	0.25	63	0.103	4.9	2.9	0.0004	26	57	8.0	48	1710	56.0	63.0	66.0	0.40	0.54	0.65	1.10
0.25	0.35	63	0.145	4.5	2.3	0.0005	28	44	8.0	48	1680	64.0	66.0	68.0	0.50	0.64	0.73	1.32
0.37	0.5	71	0.212	4.6	2.4	0.0007	12	26	10.5	47	1700	63.0	68.0	70.0	0.44	0.56	0.67	2.07
0.55	0.75	71	0.323	5.3	2.5	0.0009	12	26	11.5	47	1660	73.0	73.5	74.0	0.50	0.63	0.72	2.71

Realizado por: WEG

Fuente: Catálogo Motores eléctricos WEG

4.16 Diseño de la estructura para el prototipo

Para el análisis de la estructura del prototipo se utiliza el software SAP 2000, bajo recomendación empírica de un técnico mecánico escogemos un perfil angular de 30 x 3 de material ASTM A36 para el sistema estructural principal y de 25 x 2 para el secundario unidos mediante soldadura MIG con un electrodo ER70S-3, a continuación, se muestra una figura de la estructura completa.



Figura 57-4: Diseño de la Estructura del prototipo
Fuente: Autores

4.16.1 Cálculo de cargas en la estructura

Tabla 22-4: Masa de los componentes en el prototipo

Elemento	Peso unitario (Kg)	Cantidad	Peso total (Kg)
Tanque de molienda	2.94	1	2.94
Base del Tanque	1.35	1	1.35
Planeta	0.84	1	0.84
Tapa del tanque de molienda	1.038	1	1.038
Brida inferior	0.16	1	0.16
Brida superior	0.44	1	0.44
Sujeción	0.69	1	0.69
Perno de sujeción	0.016	1	0.016
Barras de sujeción	0.3321	3	0.9964
Bola	0.079	25	1.975
Viruta		1	1.33
Eje del tanque de molienda	0.6141	1	0.6141
Caja de rodamientos	0.747	2	1.494
Brazo	2.84	1	2.84
Eje de transmisión	1.82	1	1.82
Base	3.5	2	7
Contrapeso	7.63	1	7.63
Base del contrapeso	1.35	1	1.35
Eje del contrapeso	0.89	1	0.89
Polea	0.129	1	0.129
Total			37.88

Realizado por: Autores 2018
Fuente: Realización propia

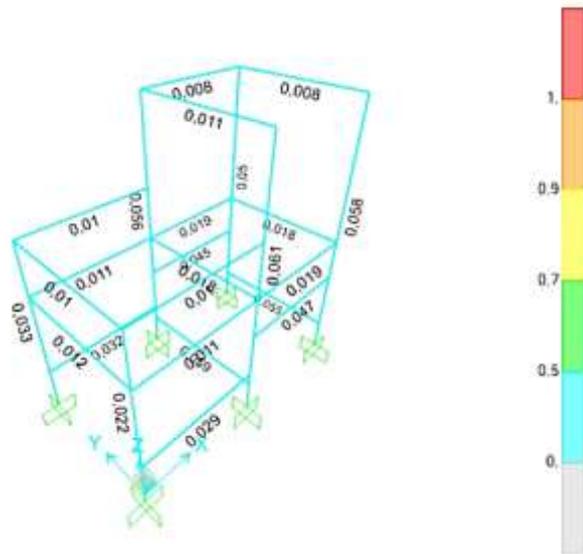


Figura 59-4: Factores demanda capacidad en la estructura
 Fuente: Autores

Se puede observar entonces que la estructura planteada cumple con la resistencia necesaria para los elementos montados sobre ella.

CAPITULO V

5. CONSTRUCCION Y MONTAJE DEL PROTOTIPO DE MOLINO PLANETARIO DE BOLAS.

El presente capitulo tiene como objetivo describir las máquinas y herramientas, modo, tiempo de construcción, fabricación y montaje del prototipo de molino planetario de bolas, así como la realización de las pruebas de funcionamiento y verificación de los requerimientos del cliente.

5.1 Máquinas y herramientas.

Para el proceso de construcción y montaje del molino de bolas planetario se usaron las siguientes máquinas y herramientas:

Máquinas

- Torno horizontal.
- Centro de mecanizado.
- Fresadora.
- Cortadora plasma y de cinta.
- Soldadora MIG.
- Rectificadora.
- Prensa.
- Esmeril.
- Compresor.

Herramientas

- Calibrador pie de rey.
- Micrómetro.
- Alexometro.
- Flexómetro.
- Escuadras.
- Brocas
- Fresas.

- Machuelos.
- Prensas manuales.
- Martillos.
- Llaves.
- Amoladora.

5.2 Componentes del prototipo.

Con el fin de identificar de forma clara los componentes de la máquina y su posterior ensamblaje, se clasifican estos elementos en cinco sistemas. En la tabla que se muestra a continuación se mencionan estos con sus respectivos elementos.

Tabla 1-5: Sistemas del molino planetario de bolas

Sistemas	Grafico	Elemento
Sistema Estructural		<ol style="list-style-type: none"> 1. Estructura 2. Base del motor 4. Carcasa
Sistema motriz		<ol style="list-style-type: none"> 1. Engranaje planeta 2. Engranaje corona 3. Eje de transmisión 4. Eje de contrapeso 5. Eje del tazón de molienda 6. Brazo 7. Contrapeso 8. Caja de rodamientos 9. Base del tanque de molienda y contrapeso 10. Chumacera de pared 11. Base para la caja de rodamientos 12. Base para la chumacera

Tabla 1-5: Sistemas del molino planetario de bolas (Continuación)

Sistema de alimentación y seguridad de molienda



1. Tanque de molienda
2. Tapa del tanque de molienda
3. Bridas de seguridad
4. Soportes de fijación
5. Sujeción del tazón de molienda

Sistema de transmisión.



1. Chavetas
2. Chumaceras
3. Poleas
4. Motor
5. Bandas

Sistema de eléctrico.



1. Variador
2. PLC
3. Caja de control

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Realización propia

5.3 Material de construcción de los componentes del prototipo.

En base a los sistemas mostrados en la tabla anterior, se muestra a continuación el material de cada elemento que conforma cada sistema, así como su cantidad.

Tabla 2-5: Materiales de construcción y cantidad de los elementos del prototipo.

Sistemas	Cantidad	Material
Sistema Estructural	Estructura Base	1 ASTM A-36/Perfil angular L 30x4
	Estructura superior	1 ASTM A-36/Perfil angular L 30x4
	Base del motor	1 Plancha de acero ASTM A-36
	Carcasa	1 Plancha de acero inoxidable AISI 304 espesor 1mm
Sistema motriz	Engranaje planeta	1 AISI 4140
	Engranaje corona	1 AISI 4140
	Eje de transmisión	1 AISI 4140
	Eje de contrapeso	1 AISI 4140
	Eje del tazón de molienda	1 AISI 4140
	Brazo	1 Acero de transmisión AISI 1018
	Contrapeso	1 Acero de transmisión AISI 1018
	Caja de rodamientos	2 Acero de transmisión AISI 1018
	Base del tanque de molienda y contrapeso	2 Acero inoxidable AISI 304
	Chumacera de pared	1 Hierro fundido
	Base para la caja de rodamientos	1 Acero de transmisión AISI 1018
	Base para la chumacera	1 Acero de transmisión AISI 1018
	Sistema de alimentación y seguridad de molienda	Tanque de molienda
Tapa del tanque de molienda		1 Acero inoxidable AISI 304
Bridas de seguridad		1 Acero de transmisión AISI 1018
Soportes de fijación		3 Acero de transmisión AISI 1018
Sujeción del tazón de molienda		1 Acero de transmisión AISI 1018
Sistema de transmisión.	Chavetas	3 Acero 4140
	Poleas	2 Aluminio
	Motor	1 WEG
	Bandas	1 De caucho trapecoidales tipo A
Sistema de eléctrico.	Variador	1 SIEMENS
	PLC	1 SIEMENS
	Caja de control	1

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Realización propia

5.4 Tiempo de construcción para cada sistema.

En la tabla siguiente se detallan los tiempos aproximados de construcción de cada elemento que forman los sistemas del molino planetario de bolas, así también se establece los procesos de fabricación generando un código en cada operación, los cuales posteriormente se usaran en los flujogramas de construcción del prototipo.

Tabla 3-5 : Tiempos de construcción del molino planetario de bolas.

Sistemas	Elementos	N°	Operación	Tiempo (h:m:s)	Total (h:m:s)
	Estructura	1	Toma de medidas	0:30:00	
		2	Corte	0:30:00	
		3	Pre soldado	1:00:00	
		4	Escuadrado	2:00:00	
		5	Soldado	1:30:00	
		6	Pulido	0:40:00	
		7	Pintado	0:30:00	6:40:00
Sistema Estructural	Base del motor	8	Toma de medidas	0:10:00	
		9	Corte	0:25:00	
		10	Taladrado	0:20:00	
		11	Escuadrado	0:30:00	
		12	Limado de los agujeros	0:10:00	
		13	Pulido	0:10:00	
		14	Pintado	0:20:00	2:05:00
	Carcasa	15	Toma de medidas	1:00:00	
		16	Corte	2:00:00	
		17	Doblado	2:00:00	
		18	Escuadrado	0:30:00	
		19	Ensamblado total de la carcasa	0:30:00	
		20	Fijación	1:00:00	
		21	Pulido	0:25:00	7:25:00
Sistema Motriz	Piñón	22	Toma de medidas	0:20:00	
		23	Corte	0:30:00	
		24	Mecanizado	5:00:00	
		25	Templado	5:00:00	10:50:00

Tabla 4-5 : Tiempos de construcción del molino planetario de bolas (continuación)

Engrane corona	26	Toma de medidas	0:20:00	
	27	Corte	1:00:00	
	28	Mecanizado	24:00:00	
	29	Templado	5:00:00	30:20:00
Eje de transmisión	30	Toma de medidas	0:05:00	
	31	Corte	0:10:00	
	32	Torneado	6:00:00	
	33	Canal para 2 anillos de seguridad	0:20:00	
	34	Fresado de 2 chaveteros	0:30:00	7:05:00
Eje de contrapeso	35	Toma de medidas	0:05:00	
	36	Corte	0:10:00	
	37	Torneado	4:00:00	
	38	Taladrado 6 agujeros \varnothing 6mm	0:20:00	
	39	Limado de los agujeros	0:10:00	4:45:00
Eje del tazón de molienda	40	Toma de medidas	0:05:00	
	41	Corte	0:10:00	
	42	Torneado	2:00:00	
	43	Canal para anillo de sujeción	0:10:00	
	44	Fresado de chavetero	0:20:00	2:45:00
Brazo	45	Toma de medidas	0:20:00	
	46	Corte	0:30:00	
	47	Rectificado	0:30:00	
	48	Taladrado de agujero \varnothing 30mm	0:30:00	
	49	Taladrado de agujero \varnothing 35mm	0:30:00	
	50	Taladrado de agujero \varnothing 25mm	0:30:00	
	51	Taladrado de 6 agujeros \varnothing 5mm	0:30:00	
	52	Taladrado de 4 agujeros \varnothing 7mm	0:20:00	

Tabla 5-5 : Tiempos de construcción del molino planetario de bolas (continuación)

	53	Taladrado de 4 agujeros Ø 8mm	0:20:00	
	54	Roscado 6M6x1	0:20:00	
	55	Roscado 4M8x1	0:20:00	
	56	Fresado para chavetero	0:20:00	5:00:00
Contrapeso	57	Toma de medidas	0:10:00	
	58	Corte	0:30:00	
	59	Torneado	0:30:00	
	60	Taladrado de 4 agujeros Ø 7mm	0:30:00	
	61	Roscado 4M8x1	0:50:00	2:30:00
Caja de Rodamientos para el eje del tazón de molienda	62	Toma de medidas	0:10:00	
	63	Corte	0:30:00	
	64	Torneado	2:00:00	
	65	Taladrado de 4 agujeros Ø 8mm	0:20:00	
	66	Limado de los agujeros	0:10:00	3:10:00
Caja de Rodamientos para el eje de transmisión.	67	Toma de medidas	0:10:00	
	68	Corte	0:30:00	
	69	Torneado	2:00:00	
	70	Taladrado de 4 agujeros Ø 12mm	0:20:00	
	71	Limado de los agujeros	0:10:00	3:10:00
Base del tanque de molienda	72	Toma de medidas	0:10:00	
	73	Corte	2:00:00	
	74	Torneado	3:00:00	
	75	Taladrado de 6 agujeros Ø 7mm	0:30:00	
	76	Roscado 6M8x1	1:00:00	
	77	Taladrado 3 agujeros Ø 5mm	0:20:00	
	78	Roscado 3M6x1	0:30:00	7:30:00
Base del contrapeso	79	Toma de medidas	0:10:00	
	80	Corte	2:00:00	
	81	Torneado	3:00:00	

Tabla 6-5 : Tiempos de construcción del molino planetario de bolas (continuación)

		82	Taladrado 3 agujeros Ø 5mm	0:20:00		
		83	Roscado 3M6x1	0:30:00	6:00:00	
Sistema de alimentación y seguridad del tanque de molienda	Tanque de molienda	84	Toma de medidas	0:20:00		
		85	Corte	2:00:00		
		86	Torneado	7:00:00	9:20:00	
	Tapa del tanque de molienda	87	Toma de medidas	0:10:00		
		88	Corte	2:00:00		
		89	Torneado	2:00:00	4:10:00	
	Bridas de Seguridad	90	Toma de medidas	0:30:00		
		91	Corte	0:40:00		
		92	Torneado	2:00:00		
			93	Taladrado de 3 agujeros Ø 6mm	0:30:00	
			94	Esmerilado	3:00:00	6:40:00
	Soportes de fijación	95	Toma de medidas	0:30:00		
96		Torneado	0:30:00			
97		Corte	1:00:00			
98		Fresado de 3 agujeros	1:30:00			
99		Taladrado de 6 agujeros Ø 8mm	0:40:00			
100		Templado	5:00:00	9:10:00		
Sujeción del tanque de molienda.		101	Toma de medidas	0:15:00		
	102	Corte	0:30:00			
	103	Torneado	0:30:00			
	104	Esmerilado	1:00:00	2:15:00		
Chavetas	105	Toma de medidas	0:10:00			
	106	Corte	0:30:00			
	107	Fresado	0:30:00	1:10:00		
Sistema de transmisión.	Chumacera	108	Ensamble en estructura	0:30:00	0:30:00	
	Poleas	109	Creación de chavetero	0:30:00	0:30:00	
	Motor	110	Fijación a la base del motor	0:20:00	0:20:00	
	Banda	111	Ensamble en las poleas	0:20:00		
		112	Templado de la banda	0:30:00	0:50:00	

Tabla 7-5 : Tiempos de construcción del molino planetario de bolas (continuación)

Sistema eléctrico	Variador	113	Conexión al computador y PLC	0:30:00		
		114	Establecer comunicación con el computador	0:30:00	1:0:00	
	PLC	115	Conexión al computador y variador	2:00:00		
		116	Programación de PLC en labview	16:00:00	18:00:00	
	Caja de	117	Taladrado de los agujeros	0:20:00		
	control	118	Fijación de PLC	0:40:00		
		119	Colocación de pulsadores e indicadores	1:00:00		
		120	Cableado de circuitos	1:30:00	3:30:00	
	Total horas (h)				153:20:00	
	Total día (8 horas laborables días, h, min)				19:01:20	

Realizado por: Autores, 2018

Fuente: Realización propia

En base a todas las operaciones realizadas para la obtención de los componentes del molino, el tiempo total que conlleva toda su construcción es de 153 h y 20 min, considerando que un día tiene 8 horas y una semana 5 días laborables, se tiene que en 19 días una hora y 20 minutos se construye el prototipo.

5.5 Flujograma para la construcción.

Con el objetivo de construir el prototipo de molienda de forma adecuada y eficiente, se presenta los flujogramas de construcción para cada sistema, formada por los códigos de las tareas realizadas en cada uno de ellas, a continuación, se muestra estos cinco flujogramas:

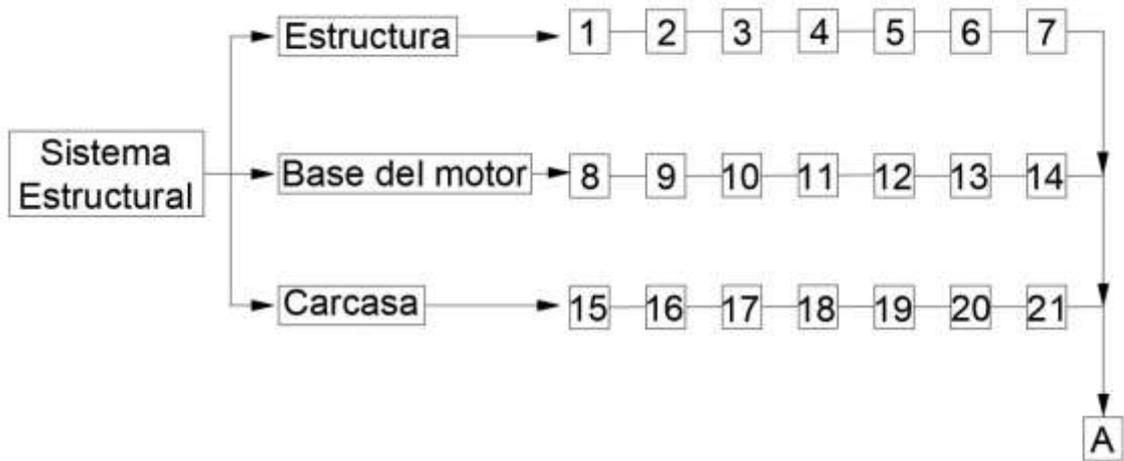


Figura 1-5: Flujograma de construcción del sistema estructural.
Fuente: Autores

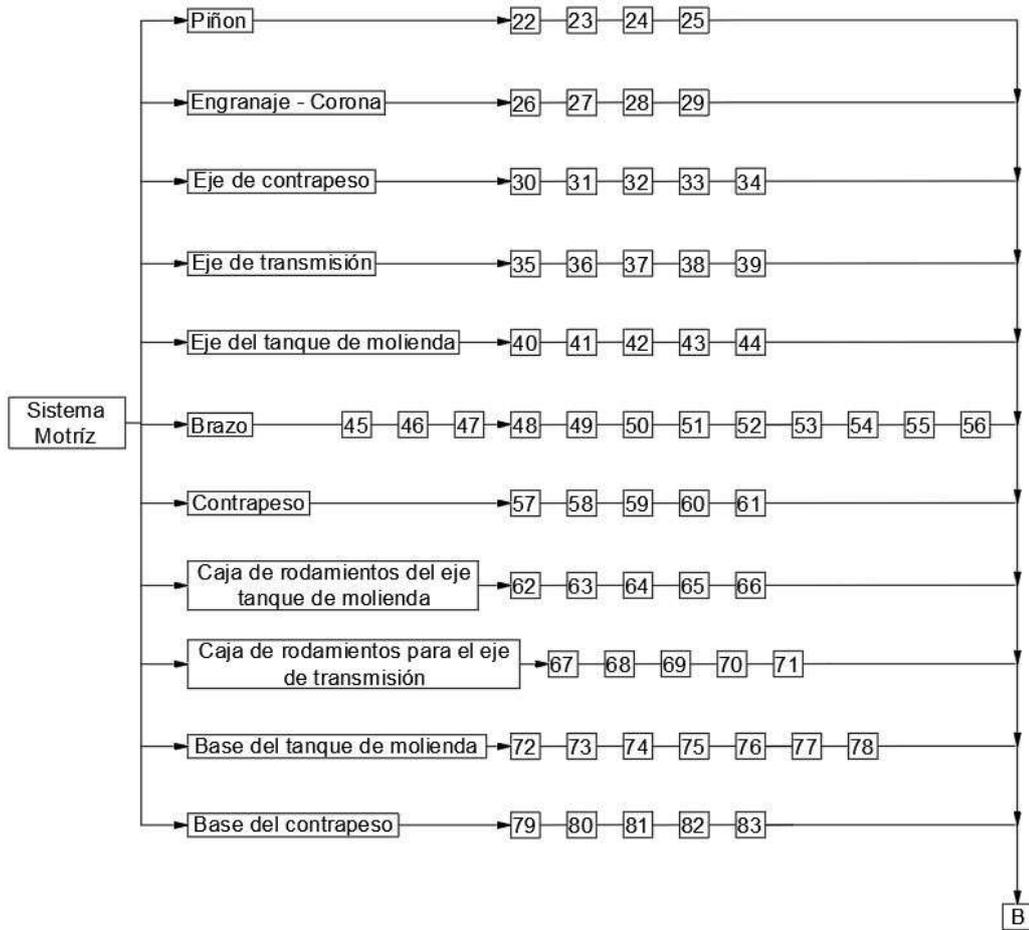


Figura 2 -5:Flujograma de construcción del sistema motriz.
Fuente: Autores

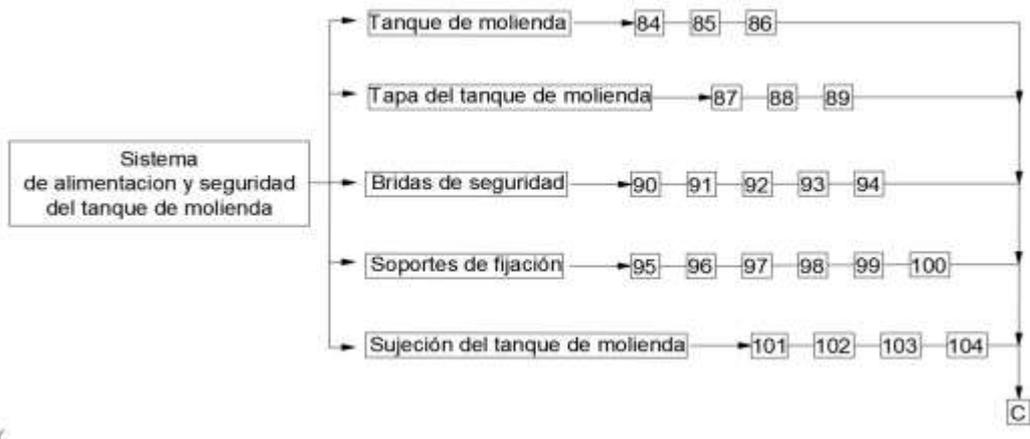


Figura 3-5: Flujograma de construcción del sistema de alimentación y seguridad de molienda.
Fuente: Autores

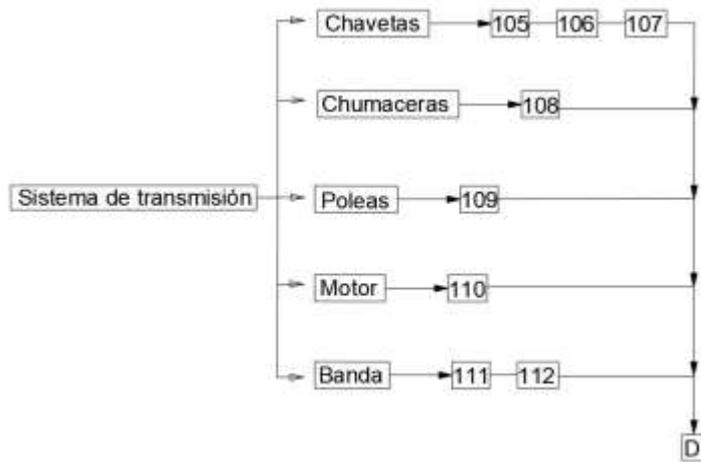


Figura 4-5: Flujograma de construcción del sistema de transmisión.
Fuente: Autores

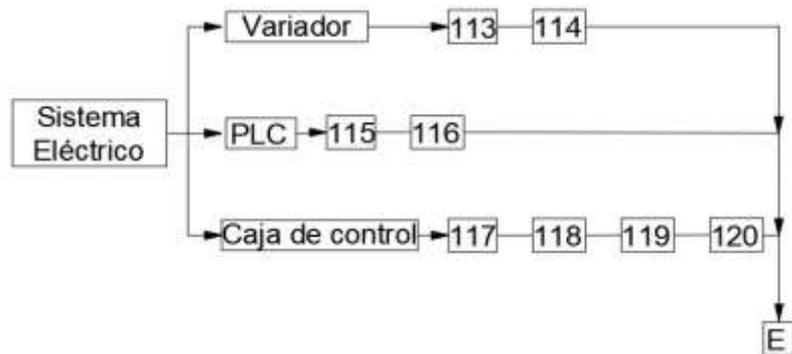


Figura 5-5: Flujograma de construcción del sistema eléctrico.
Fuente: Autores

5.6 Montaje del molino planetario de bolas.

A continuación, se muestra el proceso de montaje realizado en cada sistema del molino, así como el tiempo que conlleva realizarlo. La simbología usada se tomará en cuenta en el flujograma del ensamble final que se realizará posteriormente.

Tabla 8-5 : Montaje del sistema estructural.

Operación	Simbología	Total (h:m:s)
Traslado de los elementos al sitio de ensamble	M1	0:25:00
Montaje de la estructura	M2	1:00:00
Montaje de la base del motor	M3	0:20:00
Ensamble de la tapa de la carcasa a la estructura	M4	1:00:00
Fijación del cuerpo de la carcasa	M5	2:00:00
	Subtotal	4:45:00

Realizado por: Autores 2018

Fuente: Realización propia

En la tabla 5-5 se muestra el tiempo requerido en el montaje de los elementos que conforma el sistema motriz del molino planetario de bolas.

Tabla 9-5: Montaje del sistema motriz.

Operación	Simbología	Total (h:m:s)
Traslado de los elementos al sitio de ensamble	M6	0:30:00
Montaje de los rodamientos en sus cajas	M7	0:30:00
Montaje del planeta en el eje del tazón de molienda	M8	0:20:00
Montaje de la base del tazón de molienda sobre su eje ajustando 3 prisioneros M6x1	M9	0:30:00
Montaje de la caja de rodamientos en el brazo ajustando 4 pernos M8x1	M10	0:30:00
Montaje del eje del tazón de molienda en la caja de rodamientos colocada en el brazo	M11	0:10:00
Colocar la vincha de sujeción en el eje de la base del tazón	M12	0:20:00
Montaje del brazo en el eje de transmisión	M13	0:10:00
Colocar la vincha de sujeción en el eje de transmisión.	M14	0:20:00
Montaje del eje del contra peso en el brazo ajustando 4 pernos M8x1.	M15	0:40:00

Tabla 10-5: Montaje del sistema motriz. (continuación)

Montaje de la base del contra peso en su eje ajustando 3 prisioneros M6x1.	M16	0:20:00
Montaje del contra peso en su base ajustando 4 pernos M8X1	M17	0:30:00
Montaje de la caja de rodamientos sobre su placa ajustando 4 pernos M12x1,5	M18	0:30:00
Montaje del eje de transmisión en la placa de la caja de rodamientos	M19	0:20:00
Montaje la chumacera en su base ajustando 4 pernos M12x1,5	M20	0:20:00
Montaje del eje de transmisión sobre la chumacera montada en su placa	M21	0:20:00
	Subtotal	6:20:00

Realizado por: Autores 2018

Fuente: Realización propia

El tiempo invertido en el montaje del sistema de alimentación y seguridad del tanque de molienda se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 11-5: Montaje del sistema de alimentación y seguridad del tanque de molienda.

Operación	Simbología	Total (h:m:s)
Traslado de los elementos al sitio de ensamble	M22	0:10:00
Montaje de los soportes de fijación en la base del tazón ajustando 6 pernos M6X1	M23	0:30:00
Colocación de la tapa del tanque de molienda	M24	0:03:00
Colocación de las bridas de seguridad en el tanque de molienda con 3 pernos M6X1	M25	0:10:00
Colocación del tanque de molienda en su base	M26	0:05:00
Colocar la sujeción del tanque de molienda, ajustando su perno a los soportes de fijación.	M27	0:05:00
	Subtotal	1:03:00

Realizado por: Autores 2018

Fuente: Realización propia

En el sistema de transmisión se realiza las operaciones mostradas a continuación:

Tabla 12-5 : Montaje del sistema de transmisión.

Operación	Simbología	Total (h:m:s)
Traslado de los elementos al sitio de ensamble	M28	0:10:00
Montaje del motor sobre su base	M29	0:30:00
Montaje de las poleas en el eje del motor y el de transmisión.	M30	0:30:00
Colocación de la banda en las poleas.	M31	0:10:00
Tensado de la banda	M32	0:30:00
	Subtotal	1:50:00

Realizado por: Autores 2018

Fuente: Realización propia

Mientras que, para el sistema eléctrico, el tiempo usado para su montaje se detalla a continuación.

Tabla 13-5 : Montaje del sistema eléctrico.

Operación	Simbología	Total (h:m:s)
Traslado de los elementos al sitio de ensamble	M33	0:15:00
Conexión del Motor a la caja de control	M34	0:15:00
Montaje de la caja de control en el prototipo	M35	0:30:00
Montaje del variador	M36	0:15:00
	Subtotal	1:15:00

Realizado por: Autores 2018

Fuente: Realización propia

Para mejorar la estética de la máquina es necesario realizar otras operaciones fuera de los sistemas antes mencionados, estos se mencionan a continuación:

Tabla 14-5 : Tiempo empleado en operaciones de estética.

Operación	Simbología	Total (h:m:s)
Masillado de la máquina	M37	0:20:00
Lijado de la carcasa	M38	0:30:00
Pintado y secado	M39	0:45:00
	Subtotal	1:35:00

Realizado por: Autores 2018

Fuente: Realización propia

Entonces, el tiempo de montaje más las operaciones de estética de la maquina requiere de 17 horas, 3 minutos, es decir de 2 días, 1 hora y 3 minutos.

La sumatoria del tiempo total que conlleva la construcción y montaje del prototipo, se resume en la tabla siguiente:

Tabla 15-5: Tiempo total empleado en la construcción del molino planetario.

Denominación	Total (h:m:s)
Tiempo de construcción	153:20:00
Tiempo de montaje	17:03:00
Tiempo total	170:23:00
Tiempo días laborables (días:h:m)	21:02:23

Realizado por: Autores 2018

Fuente: Realización propia

El tiempo que se necesita para la construcción y montaje del prototipo de molino planetario de bolas es de 170:23:00 (h:m:s), es decir que en 21 días, 2 horas y 23 minutos se podrá construir y montar nuestro equipo, debido a errores que pudieron haberse presentado en los tiempos, se puede decir que en 22 días se fabricara el molino.

5.7 Flujograma del montaje del molino planetario de bolas.

Con el fin de especificar el proceso de montaje del molino planetario de bolas a continuación se muestra el diagrama de flujo que resume las actividades que se realizan en cada sistema para finalmente lograr el ensamble final de nuestro prototipo.

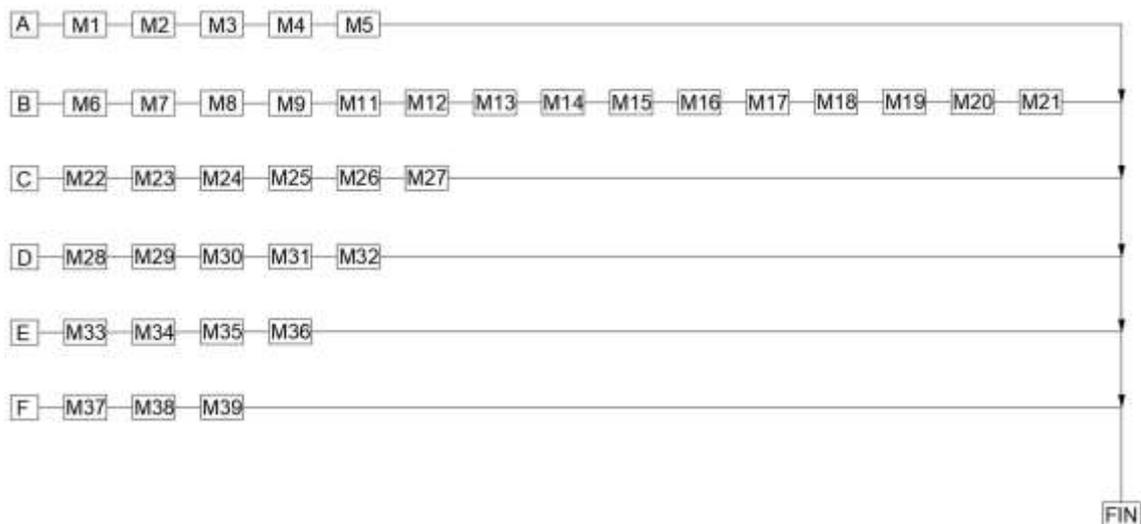


Figura 6-5: Flujograma del montaje del molino planetario de bolas.

Fuente: Autores.

5.8 Pruebas del molino planetario de bolas.

El objetivo de la construcción de nuestro molino planetario de bolas es la obtención de polvo de la viruta generada en los procesos de mecanizado del CIRT, como se dijo anteriormente estos residuos son de alta calidad y alto valor económico, pues mecanizan materiales como bronce, aceros de transmisión y acero inoxidable ASTM-A 743 principalmente. Para determinar con mayor exactitud y tener datos confiables del tamaño de polvo obtenido, se desarrollará un análisis estadístico que permita determinar el promedio y rangos permisibles del producto obtenido, para lo cual se utilizarán las siguientes herramientas:

- Graficas de control \bar{X} -R (medias-rangos)

Este tipo de grafico es usado para determinar si los valores obtenidos dentro de un proceso son constantes o no, es decir si se encuentra o no en una condición estable de operación, es una herramienta efectiva para detectar anomalías al encontrar datos que se sitúen fuera de los límites permisibles de control. El grafico de medias permite mostrar el cambio en la media del proceso mientras que la de rangos la dispersión del proceso. (Control estadístico de la calidad de un servicio mediante graficas X y R, 2009)

Su estructura está dada por la línea central LC, el límite superior de control LCS y el límite inferior de control LCI, estas líneas marcan el límite de confianza en la cual se espera que se encuentren las mediciones del proceso desarrollado tanto para la gráfica de rangos como para la de medias. (spcgroup, 2013).

Las fórmulas que permiten determinarlas se resume en la tabla siguiente:

Tabla 16-5: fórmulas de las gráficas de control de medias y rangos.

Tipo de grafica	Línea central	Límite de control inferior (LCI)	Límite de control superior (LCS)
Medias \bar{X}	$\bar{\bar{X}}$	$\bar{\bar{X}} - A_2\bar{R}$	$\bar{\bar{X}} + A_2\bar{R}$
Rangos R	\bar{R}	$D_3\bar{R}$	$D_4\bar{R}$

Realizado por: Autores 2018

Fuente: (Control estadístico de la calidad de un servicio mediante graficas X y R, 2009)

Donde:

$\bar{\bar{X}}$: Promedio de las medias de las muestras.

\bar{R} : Promedio de los rangos de las muestras.

A_2, D_3, D_4 : Constantes de graficas de control.

En función al número de muestras, se usan las constantes A2, D3 y D4, las mismas que se muestran en el anexo M

- Histograma

Este grafico de distribución de frecuencias, permitirá determinar el porcentaje de cierto tamaño de polvo obtenido, para lo cual será necesario calcular a partir de los valores máximos y mínimos de los n datos que se tiene en la muestra lo siguiente:

- Numero de intervalos(n_i): indica el número de subgrupos que se creara con todos los datos de la muestra. Se calcula mediante:

$$n_i = 1 + 1.332 \log n \quad (73)$$

- Amplitud(Amp): es la diferencia existente entre el límite máximo y mínimo de la muestra.
- Marca de clase (x): no es más que el promedio entre el límite inferior y superior de cada intervalo.
- Frecuencia absoluta (f): señala el número de valores que se encuentra dentro de dicho intervalo.
- Varianza y desviación estándar (s^2, s): la varianza es la media aritmética de los cuadrados de las desviaciones de los datos respecto a la media mientras que la desviación estándar es su raíz cuadrada, la cual indica cuan separados se encuentran los datos (González, 2013).

$$s^2 = \frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{n} \quad (74)$$

$$s = \sqrt{s^2} \quad (75)$$

5.8.1 Viruta de Bronce

En este tipo de viruta no fue necesaria su limpieza, puesto que se obtuvo de forma directa de un torno convencional, donde no se usó ningún tipo de lubricante o estaba expuesta a alguna contaminación.

Antes de la molienda, se tienen los siguientes datos:

Tabla 17-5: Datos de la viruta antes de la molienda

Parámetro	Valor
Cantidad de material a moler:	230 gr
Granulometría inicial:	7-10 mm
Numero de bolas de molienda:	25 bolas de ϕ 20 mm 100 bolas de ϕ 10 mm
Velocidad de operación:	400 RPM

Realizado por: Autores 2018

Fuente: Realización propia

La molienda se realizó inicialmente con 25 bolas de 20 mm de diámetro, a partir de la segunda hora es necesario cambiar dichas bolas por 100 de 10 mm puesto que se tiene partículas más pequeñas y se busca que llegue a existir contacto entre los elementos molidores y las partículas de menor tamaño.

Con el objetivo de determinar como el tamaño de la viruta va cambiando, se toma una cierta cantidad de la misma en cada hora, obteniendo las imágenes que se muestran:

Tabla 18-5: Proceso de molienda de bronce

Ingreso



1 hora de molienda



2 horas de molienda



Realizado por: Autores 2018
Fuente: Realización propia

- En la primera hora de molienda, se obtiene viruta de bronce en un tamaño de 1 a 3 mm
- En el lapso de dos horas se puede observar partículas muy pequeñas de viruta, en una muestra se observa que es menor a 1 mm, sin embargo, es necesario tamizar para determinar si todo el producto está dentro del rango que pueda ser llamado polvo (1 a 1000 μm)

Debido a que no se cuenta con tamices propios para polvo metálico, se usan los tamices DIN 1171. En la tabla 14-5, se muestran dichos tamices con su apertura de malla correspondiente, el peso de polvo de bronce y porcentaje retenido en cada uno de ellos.

Tabla 19-5: Resultado del tamizado.

N° de tamiz DIN 1171	Apertura de la malla [mm]	Peso retenido (gr)	% Obtención
4	1,5	0	0,00
6	1	0	0,00
10	0,6	2	0,90
16	0,4	4	1,80
20	0,3	8	3,60
30	0,25	14	6,31
40	0,15	21	9,46
60	0,1	26	11,71
80	0,08	37	16,67
100	0,06	41	18,47
Base		69	31,08
Total		222	96,52

Realizado por: Autores 2018

Fuente: Realización propia

El tamizaje realizado muestra que el 100% del producto de la molienda es $\leq 0,6$ mm, obteniéndose en la base de la serie de tamices un porcentaje de 31,08% de polvo de bronce, para determinar el tamaño de las partículas más pequeñas de la molienda se procedió a medirlas en el microscopio electrónico de barrido.

A continuación, se muestra una captura del polvo de la base de los tamices con ampliación de 200x.

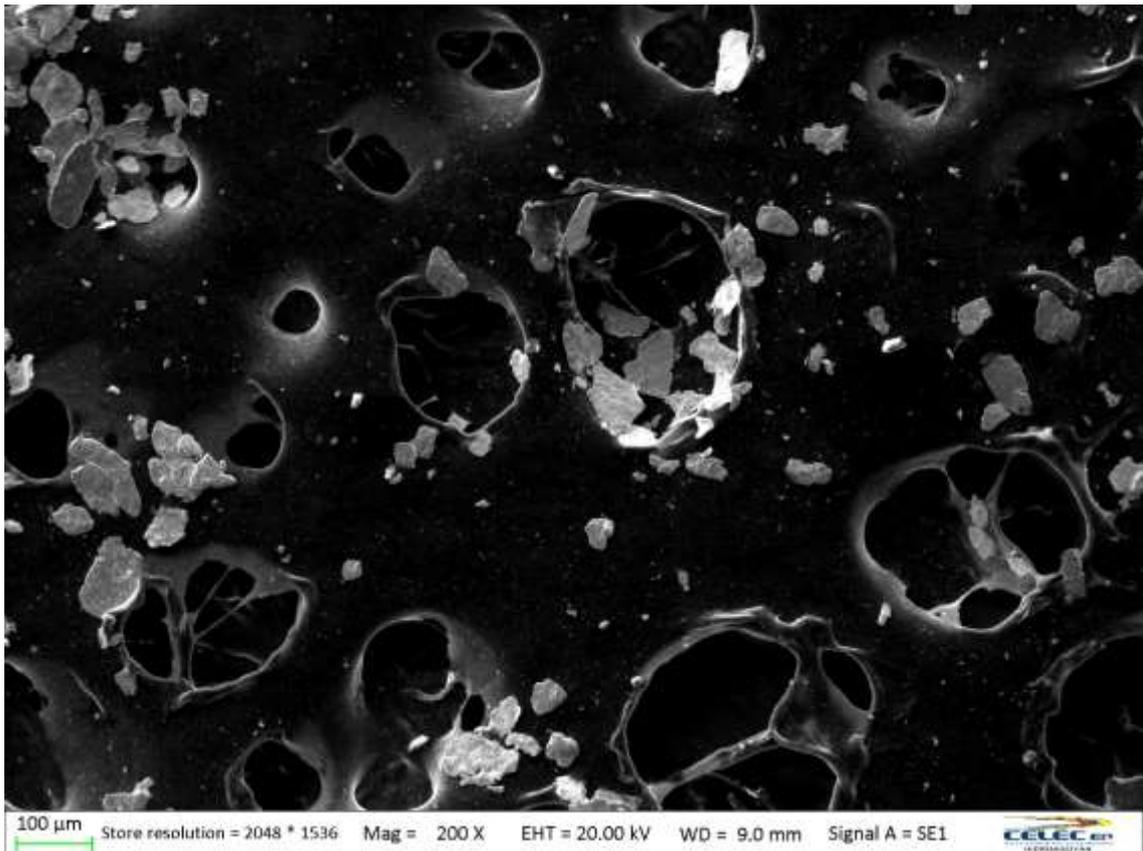


Figura 7-5: Polvo de bronce, 200x

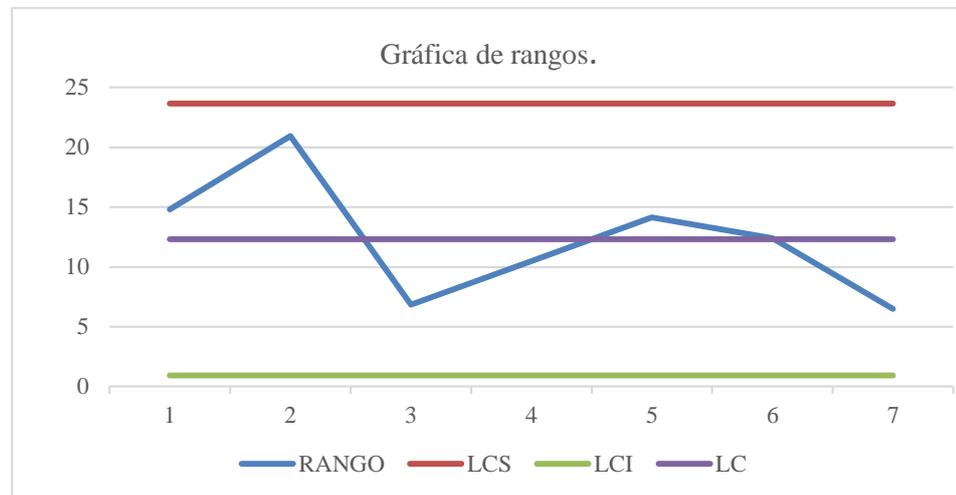
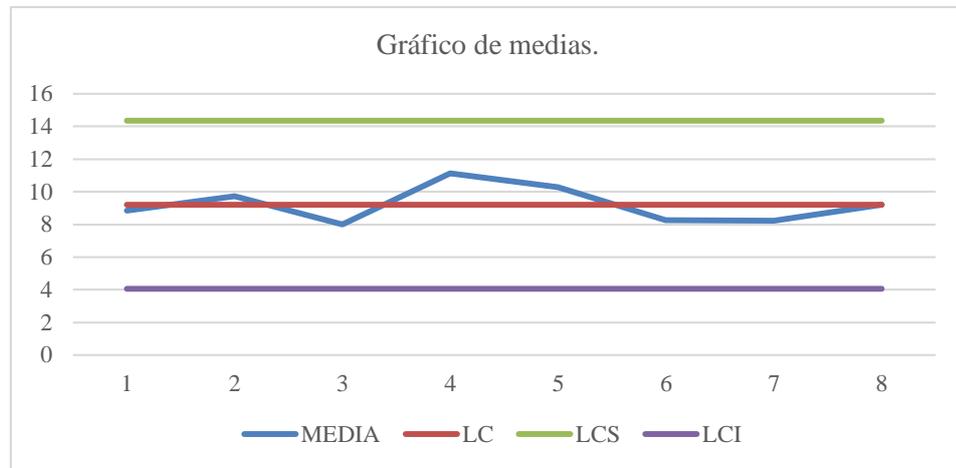
Fuente: Autores.

- Gráficas X-R (medias-rangos)

A través de las mediciones realizadas en un número determinado de muestras se estipulará si el tamaño de grano obtenido está dentro de los límites de control permisibles del proceso, de ser el caso se concluirá que durante la molienda efectuada no existió ningún problema que produzca la alteración del tamaño de polvo, caso contrario se analizará las causas que alteren las disparadas desviaciones que se presenten. Se tomó siete muestras del polvo retenido en la base de los tamices, como se muestra en el anexo N, en las cuales se realizaron cinco mediciones del tamaño de polvo obtenido, con ellas se realizó las gráficas de control que se muestran:

Tabla 20-5: Graficas de control X - R

BRONCE



Muestra	Medidas					\bar{X}	\bar{R}	
1	8.56	4.81	8.17	18.76	3.94	8.85	14.82	
2	3.94	11.10	24.23	3.29	6.02	9.72	20.94	
3	11.14	8.91	4.31	5.98	9.64	8.00	6.83	
4	4.74	15.23	11.47	12.58	11.54	11.11	10.49	
5	16.63	10.69	9.73	2.49	11.87	10.28	14.14	
6	15.99	4.23	6.01	11.49	3.57	8.26	12.42	
7	6.53	5.15	10.54	11.64	7.28	8.23	6.49	
Constantes						Limites		
	A2	0.42				LC	9.21	12.30
	D3	0.08				LCS	14.36	23.67
	D4	1.92				LCI	4.05	0.94

Realizado por: Autores 2018

Fuente: Autores

En la gráfica de medias se observa que el polvo de la base de los tamices tienen un valor promedio de 9.21 μm y está dentro de los límites de control superior 14.36 μm e inferior de 4.05 μm , es decir las medidas del tamaño del polvo son estables y el proceso de molienda no ha presentado ninguna anomalía que cause una variación considerable

del tamaño de las partículas de viruta obtenido, en cuanto a la gráfica de rangos se observa que en la muestra 2 se tiene un incremento considerable que si bien es cierto esta debajo del LCS indica que en dichas mediciones existieron dispersiones de tamaño que según lo observado en la molienda sucede porque el tamiz dejo pasar dichas partículas solamente por su ancho mas no por su medida de largo.

- Histograma

Tomando como muestra todas las mediciones tomadas en el microscopio electrónico de barrido, se calcula lo siguiente para determinar el porcentaje de tamaño de polvo obtenido.

Tabla 21-5: Estudio estadístico del tamaño de viruta de bronce.

Límite inferior	Límite superior	Marca de clase (x)	Frecuencia absoluta (f)	%	$(x - \bar{x})^2$	$(x - \bar{x})^2 \cdot f$
2.49	9.74	6.11	20.00	57.14	9.56	191.22
9.74	16.98	13.36	13.00	37.14	17.26	224.38
16.98	24.23	20.61	2.00	5.71	129.99	259.98
Total			35.00	100		675.58

Realizado por: Autores 2018
Fuente: Realización propia

En función de la frecuencia y porcentaje del tamaño de polvo dentro de cada intervalo, se puede graficar el siguiente histograma:

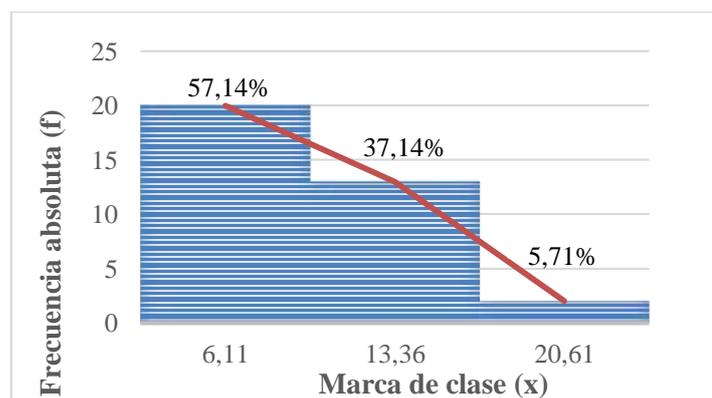


Gráfico 1-6: Histograma Bronce
Fuente: Realización propia

Como se observa el 57,14% del polvo obtenido tiene un tamaño de 2,49 a 9,74 μm ; el 37,14 % de 9,74 a 16,98 μm y el 5,71% entre 16,98 y 24,23 μm .

De los datos obtenidos en la tabla anterior se calcula la varianza de la muestra (s^2) y desviación estándar (s) con un valor de 19.87 y 4.45 respectivamente. Lo que significa

que en un valor de 4,45 μm se alejan los valores del tamaño de la muestra de su promedio, lo que se confirma en el gráfico de control de medias en sus límites superior e inferior. Todo lo desarrollado y analizado, se resume en la tabla siguiente:

Tabla 22-5: Resultados de molienda de bronce.

Dato:	Valor:
Masa de entrada:	230 g
Granulometría inicial:	7 a 10 mm
Granulometría final:	100% \leq 0,6 mm 31,08% en un rango de 14,36 a 4,05 μm con un promedio de 9,21 μm
Velocidad de molienda:	400 RPM
Bolas de molienda:	Acero templado
Masa final:	215 g
Tiempo de molienda:	2 hr
Pérdida:	6,52 %

Realizado por: Autores 2018

Fuente: Realización propia

5.8.2 *Viruta del acero de transmisión AISI 1018.*

Debido al lubricante que se usa en el mecanizado del acero de transmisión, es necesario antes de la molienda someterlo a un proceso de limpieza, para lo cual se usa desengrasante industrial para lavarlo y se deja secar en un tiempo aproximado de treinta minutos. Una vez limpia la viruta se procede a determinar los datos que se muestran en la tabla:

Tabla 23-5: Datos de la viruta de transmisión antes de la molienda

Parámetro	Valor
Cantidad de material a moler:	230 gr
Granulometría inicial:	10 mm
Numero de bolas de molienda:	25 bolas de ϕ 20 mm 100 bolas de ϕ 10 mm
Velocidad de operación:	400 RPM

Realizado por: Autores 2018

Fuente: Realización propia

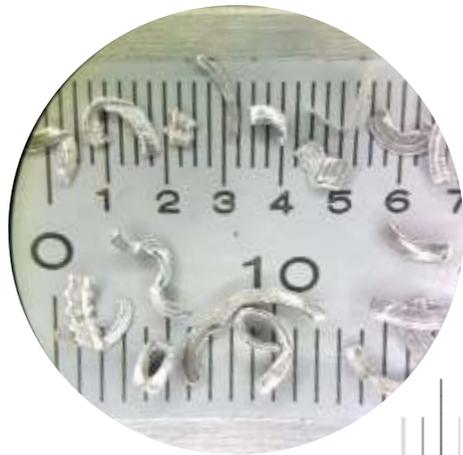
Puesto en marcha el molino planetario de bolas con la viruta de acero de transmisión y 25 bolas de 20 mm de diámetro durante dos horas de molienda, y 100 bolas de 10 mm se tienen las siguientes muestras en función del tiempo.

Tabla 24-5: Proceso de molienda del acero de transmisión AISI 1018.

Ingreso



1 hora de molienda



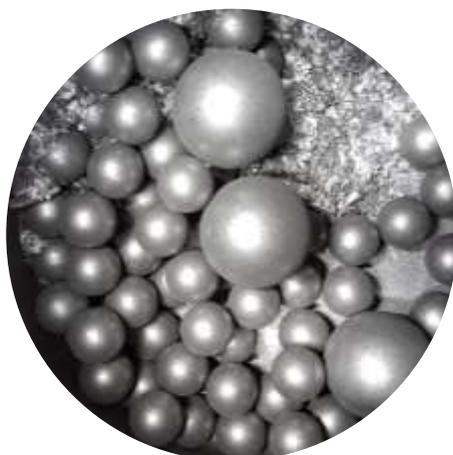
2 horas de molienda



Realizado por: Autores 2018
Fuente: Realización propia

Tabla 19-5: Proceso de molienda del acero AISI 1018 (Continuación)

3 horas de molienda



4 horas de molienda



Realizado por: Autores 2018

Fuente: Realización propia

- La viruta de acero de transmisión durante la primera hora de molienda tiene un tamaño de 2 a 4 mm longitudinalmente, en la cual se observan pequeños puntos de impacto de las bolas contra este residuo.
- En la segunda hora de molienda el tamaño de la viruta según la muestra seleccionada presenta un promedio de tamaño de 2 mm, lo que indica que los puntos de impacto presentados durante la primera hora se han formado consecutivamente tal que han permitido romperla casi a la mitad de su tamaño, presentando en estos pedazos impactos tal como la primera hora de molienda.

- Al final de la tercera hora la viruta tiene un tamaño de 1 mm, el proceso de molienda se hace entonces repetitivo al formarse puntos de impacto que por la fuerza de los elementos molidores van convirtiéndola en tamaños cada vez más pequeños.
- A la cuarta hora se tiene partículas muy pequeñas que debido a su tamaño algunas permanecen unidas, para lo cual es necesario tamizarla y así definir su tamaño.

En la tabla 20-5, se muestran el peso y su porcentaje retenido en los tamices DIN 1171, a partir de los cuales se determinará si es o no polvo.

Tabla 25-5: Resultado del tamizado.

N° de tamiz DIN 1171	Apertura de la malla [mm]	Peso retenido (gr)	% Obtención
4	1,5	0	0,00
6	1	0	0,00
10	0,6	0	0,00
16	0,4	3	1,30
20	0,3	5	2,17
30	0,25	11	4,78
40	0,15	19	8,26
60	0,1	27	11,74
80	0,08	34	14,78
100	0,06	44	19,13
Base		76	33,04
Total		219	95,22

Realizado por: Autores 2018

Fuente: Realización propia

El 100% de partículas obtenidas tienen un tamaño $\leq 0,4$ mm, por lo cual se ha demostrado que se puede obtener polvo metálico a partir de la viruta de acero de transmisión, sin embargo, para obtener un criterio de calidad y los límites de confianza del tamaño de residuos generados en la molienda se realiza las tablas de control X-R

En la imagen siguiente se muestra el polvo de acero de transmisión, obtenido en el microscopio electrónico de barrido a una ampliación de 67x.

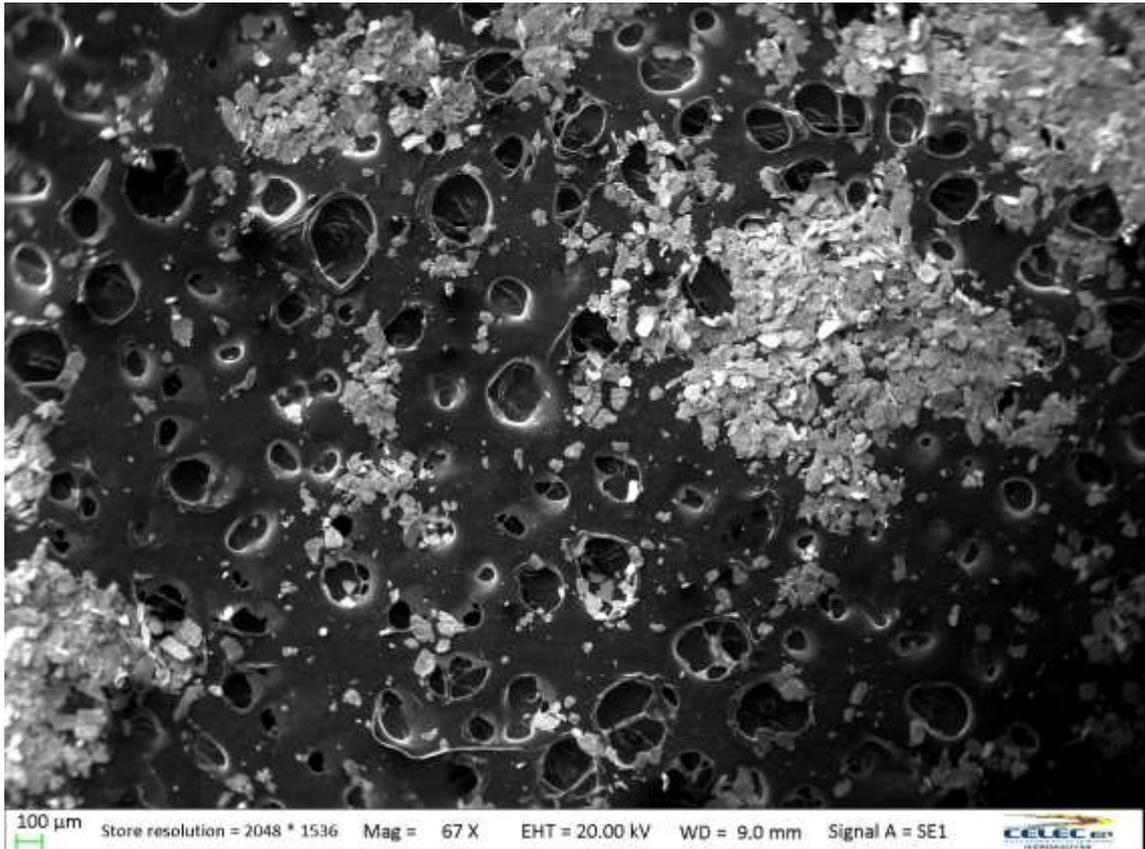


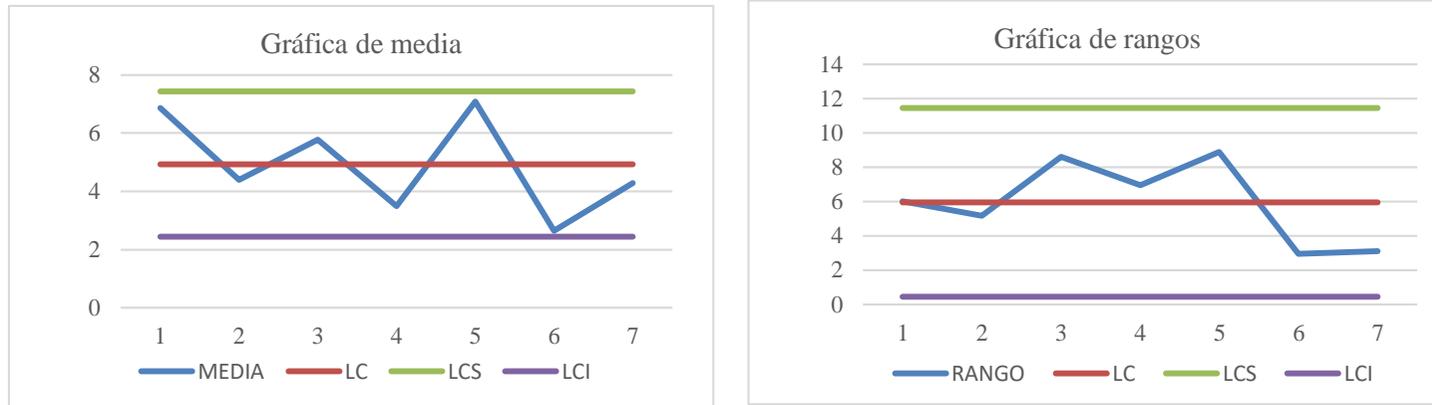
Figura 8-5: Polvo de acero de transmisión AISI 1018, 67x

Fuente: Autores.

- Gráficas X-R (medias-rangos)

A partir de las diez mediciones realizadas de siete muestras del polvo obtenido de acero de transmisión 1018 mostradas en el anexo O, se pudieron desarrollar las siguientes graficas de control.

Tabla 26-5: Graficas de control X – R, polvo de acero de transmisión
ACERO DE TRANSMISION AISI 1018



Muestra	Medidas										\bar{X}	\bar{R}	
1	8.31	9.84	5.179	5.266	3.946	3.844	7.041	7.498	8.578	9.133	6.8635	5.996	
2	4.541	3.314	3.845	2.857	7.92	4.019	4.665	4.845	2.748	5.208	4.3962	5.172	
3	8.173	11.62	6.163	3.006	6.671	6	4.072	4.527	3.714	3.767	5.7713	8.614	
4	3.193	3.246	2.834	3.294	3.676	2.812	1.761	8.696	2.162	3.163	3.4837	6.935	
5	12.11	4.237	4.85	5.453	12.05	11.45	3.487	5.225	4.865	8.084	7.0811	8.885	
6	1.961	3.181	1.022	2.121	3.317	3.637	2.749	2.112	1.731	1.545	2.6376	2.939	
7	4.113	4.987	4.465	3.547	3.717	2.421	5.518	4.738	4.11	5.252	4.2868	3.097	
Constantes											Límites:		
	A2	0.42									LC	4.90	5.86
	D3	0.08									LCS	7.42	11.44
	D4	1.92									LCI	2.44	0.45

Realizado por: Autores 2018
Fuente: Realización propia

Del 33,04% de polvo retenido en la base de los tamices se tiene que está en un rango de 7,42 a 2,44 μm con un promedio de 4,90 μm , según la gráfica de medias todas las mediciones están dentro de estos límites existiendo una desviación en la muestra cinco al casi llegar al LCS y la muestra seis al acercarse al LCI, lo que significa que se en esas muestras existen tamaños de partículas muy grandes y muy pequeñas en referencia al promedio esto se refleja en la gráfica de rangos cuyo promedio es de 5,86 μm en límites permisibles de 0,45 a 11,44 μm .

- Histograma

Para determinar el porcentaje de polvo obtenido dentro de un rango de tamaño, se desarrolla el histograma del polvo de acero AISI 1018 mediante los cálculos que se muestran en la tabla 22-5.

Tabla 27-5: Estudio estadístico del tamaño de viruta del acero AISI 1018.

Límite inferior	Límite superior	Marca de clase (x)	Frecuencia absoluta (f)	%	$(x - \bar{x})^2$	$(x - \bar{x})^2 \cdot f$
1.02	4.72	2.87	41.00	58.57	4.13	169.44
4.72	8.41	6.57	21.00	30.00	2.77	58.08
8.41	12.11	10.26	8.00	11.43	28.72	229.76
Total			70.00	100		457.28

Realizado por: Autores 2018

Fuente: Realización propia

En función de la frecuencia y porcentaje del tamaño de polvo dentro de cada intervalo, se tiene:

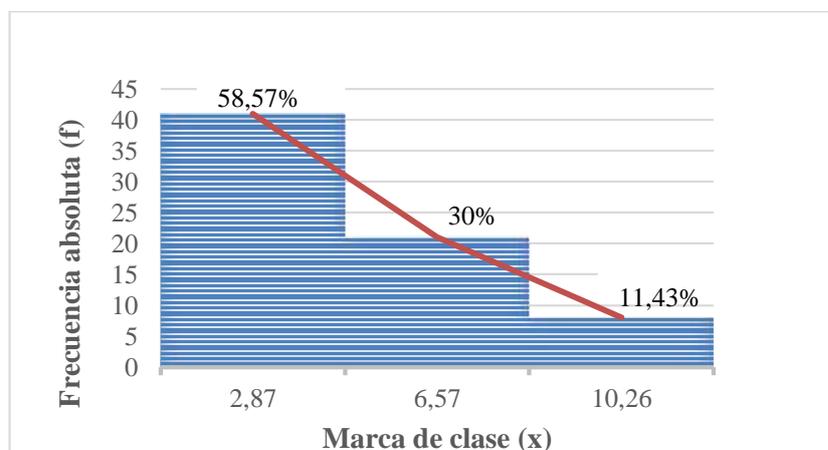


Gráfico 2-6: Histograma Acero de transmisión

Fuente: Realización propia

Como se observa el 58,57% del polvo obtenido tiene un tamaño de 1,02 a 9,74 μm ; el 4,72% de 4,72 a 8,41 μm y el 11,43% entre 8,41 y 12.11 μm . En la tabla siguiente se muestran los resultados de la molienda del acero de transmisión:

Tabla 28-5: Resultados de molienda Acero de transmisión 1018.

Dato:	Valor:
Masa de entrada:	230 g
Granulometría inicial:	10 mm
Granulometría final:	100% \leq 0,4 mm 33,04% en un rango de 2,44 a 7,42 μm , con un promedio de 4,9 μm
Velocidad de molienda:	400 RPM
Bolas de molienda:	Acero templado
Masa final:	216 g
Tiempo de molienda:	4 hr
Perdida:	6,09 %

Realizado por: Autores 2018
Fuente: Realización propia

5.8.3 Viruta acero ASTM A-743

Esta viruta fue recolectada del mecanizado de la turbina Francis en el torno vertical del CIRT, se realizó una limpieza de la misma debido a los lubricantes usados en él proceso. Es así que antes de la molienda se tienen los siguientes datos:

Tabla 29-5: Datos de la viruta antes de la molienda acero ASTM A-743

Parámetro	Valor
Cantidad de material a moler:	230 gr
Granulometría inicial:	10 mm
Numero de bolas de molienda:	25 bolas de ϕ 20 mm 100 bolas de ϕ 10 mm
Velocidad de operación:	400 RPM

Realizado por: Autores 2018
Fuente: Realización propia

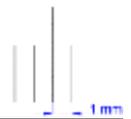
Para este proceso de molienda utilizamos inicialmente 25 bolas de 20 mm de diámetro en un tiempo de 2hr, en el que se logró la disminución del tamaño de la viruta en un promedio de la mitad de su tamaño inicial, siendo un referente para realizar un cambio de bolas de molienda a 100 bolas de 10 mm de diámetro, logrando mayor número de impactos en espacios más pequeños, este proceso se muestra en las imagines de la siguiente tabla:

Tabla 30-5: Proceso de molienda del acero ASTM A743 CA 6 NM.

Ingreso



1 hora de molienda



2 horas de molienda

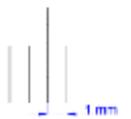
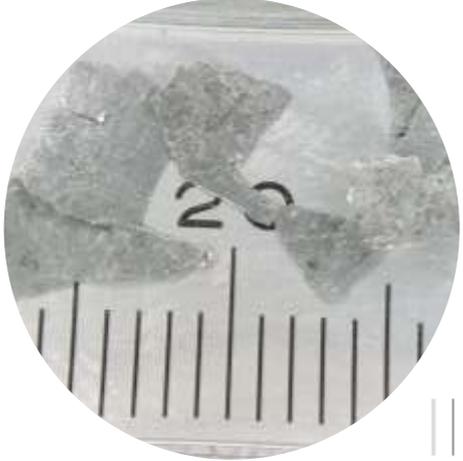
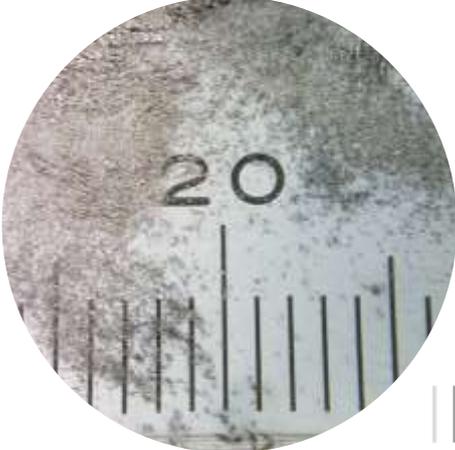


Tabla 25-5: Proceso de molienda del acero ASTM A743 CA 6 NM. (Continuación)

3 horas de molienda	
	
4 horas de molienda	
	
5 horas de molienda	
	

Realizado por: Autores 2018
Fuente: Realización propia

- Durante la primera hora de molienda, las bolas aplanan la viruta y generan pequeños puntos de impacto en su superficie.
- En la segunda hora, los puntos de impacto se repiten cada vez más en la viruta, de tal forma que las uniones de estos van generando pequeñas fisuras en la misma.
- Las fisuras, durante la tercera hora de molienda adoptan tamaños más grandes y alargados, lo que provoca el fraccionamiento de la viruta en otras más pequeñas.
- Durante la cuarta y quinta hora de molienda se repite lo sucedido anteriormente, en partículas de viruta más pequeñas, hasta que se vaya generando así polvo metálico.

Para determinar con exactitud la cantidad y tamaño del producto obtenido, se procede a tamizar y medir los granos atrapados en cada tamiz.

Tabla 31-5: Resultado del tamizado del acero ASTM A-743.

N° de tamiz DIN 1171	Apertura de la malla [mm]	Peso retenido (gr)	% Obtención
4	1,5	0	0,00
6	1	3	1,30
10	0,6	4	1,74
16	0,4	4	1,74
20	0,3	8	3,48
30	0,25	9	3,91
40	0,15	11	4,78
60	0,1	12	5,22
80	0,08	24	10,43
100	0,06	54	23,48
Base		86	37,39
Total		215	93,48

Realizado por: Autores 2018

Fuente: Realización propia

De los datos obtenidos, se tiene que el 40% del polvo se encuentra en la base de los tamices, lo que significa que los granos son menores a 0,06 mm; se opta entonces por medir el tamaño de los granos en el microscopio electrónico de barrido, consecuentemente, se realiza un análisis estadístico del tamaño de los residuos.

En la imagen se muestra el polvo obtenido de acero inoxidable ASTM A-743 con una ampliación de 250x en el microscopio electrónico de barrido.

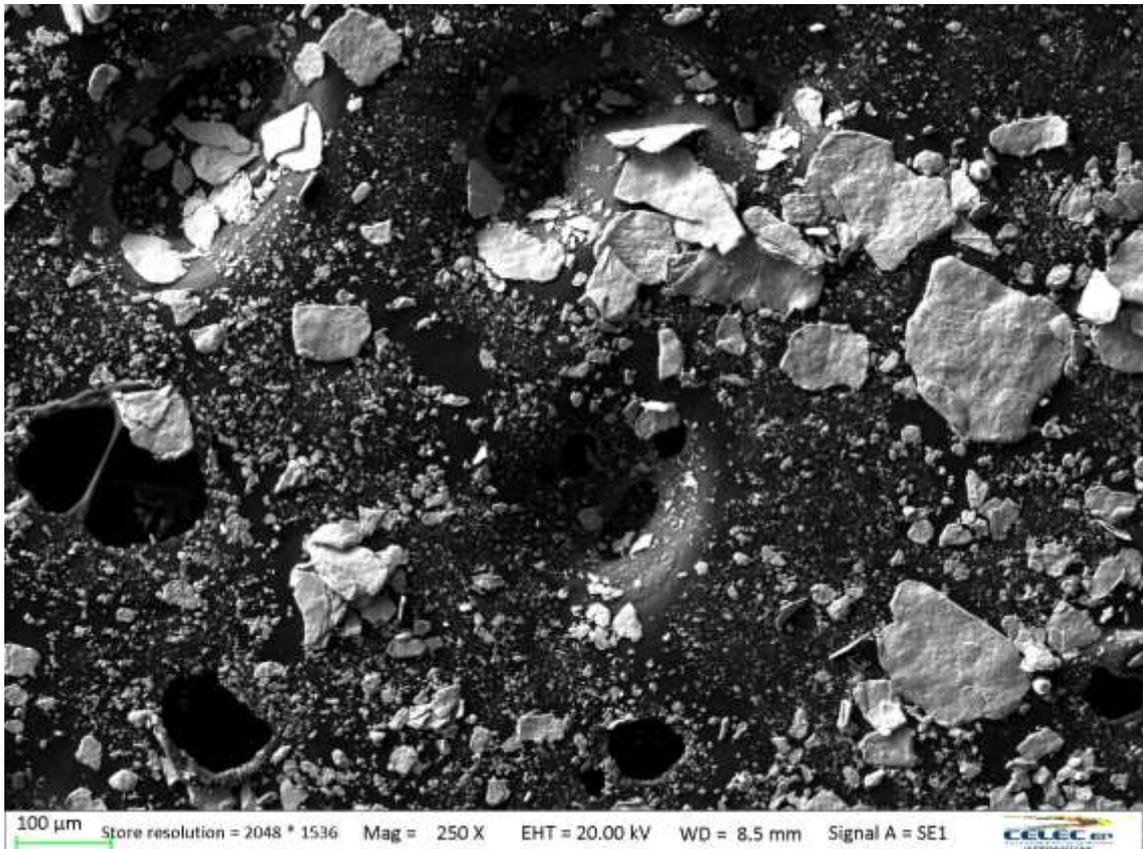


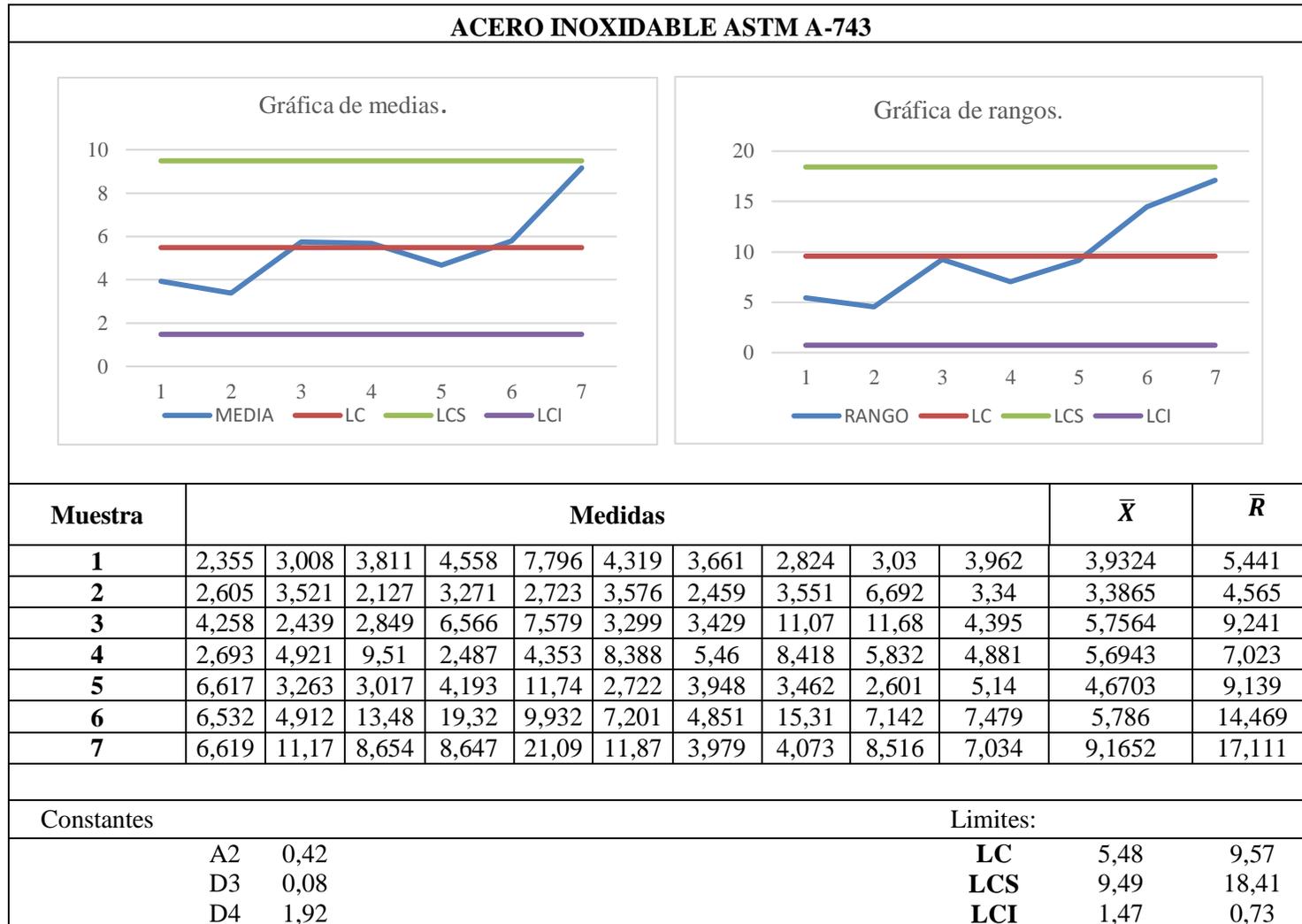
Figura 9-5: Polvo de acero inoxidable ASTM A 743, 250x
Fuente: Autores.

Como se observa en la figura se tienen partículas de diferente tamaño, por lo que se tratara de obtener un promedio en cada muestra.

- Gráficas X-R (medias-rangos)

En un número de siete muestras se realizaron diez mediciones del polvo obtenido, como se muestra en el Anexo P, a partir de las cuales se desarrollará las gráficas de control, teniendo así la tabla que se muestra a continuación:

Tabla 32-5: Graficas de control X – R, polvo de acero inoxidable ASTM A-743



Realizado por: Autores 2018

Fuente: Realización propia

En la gráfica de medias mostrada se puede concluir que el polvo tiene un promedio de 5,48 μm señalando que todo el proceso realizado es estable debido a que todas las mediciones están dentro de los límites de control de 9,49 y 1,47 μm , la variación que se presenta en la muestra siete a pesar de que está bajo del límite de control superior se da por la medición cinco, la cual sale del promedio de las otras nueve medidas tomadas, lo que indica que existió una incrustación de esta partícula durante el proceso de tamización o medición, esto pudo haber sucedido al no realizar una limpieza exhaustiva de los tamices y/o del porta muestras del microscopio, aunque no se descarta una incrustación en la muestra por la volatilidad que el polvo presenta, si bien es cierto no es una señal de error en la molienda, es una alerta para tener más control del proceso.

En cuanto a las dispersiones que se observan en la gráfica de rangos, se tiene un promedio de 9,57 μm , con rangos permisibles de 0,73 hasta 18,41 μm , el rango es considerable debido a que no se tiene granos de medidas uniformes, esto sucede principalmente en las muestras seis y siete, lo que confirma la variación presentada en el gráfico de medias.

- Histograma

Para mostrar que porcentaje de tamaño de polvo de acero inoxidable ASTM A-743 se obtuvo, procedemos a desarrollar la tabla 28-5,

Tabla 33-5: Análisis estadístico del polvo de acero inoxidable ASTM A-743.

Límite inferior	Límite superior	Marca de clase (x)	Frecuencia absoluta (f)	%	$(x - \bar{x})^2$	$(x - \bar{x})^2 \cdot f$
2,13	8,45	5,29	55,00	78,57	0,04	2,13
8,45	14,77	11,61	11,00	15,71	37,50	412,54
14,77	21,09	17,93	4,00	5,71	154,88	619,52
Total			70,00	100		1034,20

Realizado por: Autores 2018
Fuente: Realización propia

En función de la frecuencia y porcentaje del tamaño de polvo dentro de cada intervalo, se puede graficar el siguiente histograma:

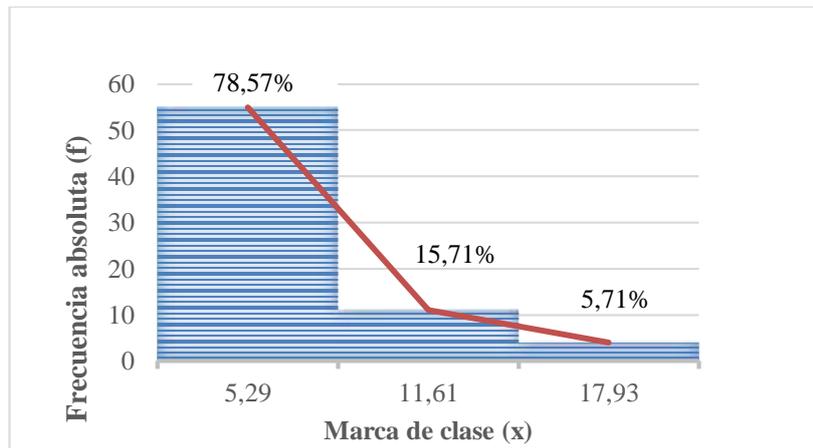


Gráfico 3-6: Histograma ASTM A743
Fuente: Realización propia

Se tiene entonces que el 78,57 % del polvo obtenido tiene un tamaño de 2,13 a 8,45 μm , el 15,71% de 8,45 a 14,77 μm y el 5,71% entre 14,77 a 21,09 μm . Una vez desarrollado todo el análisis estadístico de las muestras de molienda, se presenta la tabla siguiente:

Tabla 34-5: Resultados de molienda Acero ASTM A743.

Dato:	Valor:
Masa de entrada:	230 g
Granulometría inicial:	10 mm
Granulometría final promedio:	100% \leq 0,6 mm 40% en un rango de 1,47 a 9,49 μm con un promedio de 5,48 μm
Velocidad de molienda:	400 RPM
Bolas de molienda:	Acero templado
Masa final:	205 g
Tiempo de molienda:	5 hr
Perdida:	10,86 %

Realizado por: Autores 2018
Fuente: Realización propia

En los tres casos de análisis la pérdida de masa pudo presentarse por el cambio de las bolas de molienda, puesto que las partículas de la viruta pudieron adherirse a ellas, también pudo generarse al trasladar el polvo en la serie de tamices ya que al tratarse de elementos tan pequeños se puede ocasionar su dispersión en el aire.

5.9 Análisis de defectos en bolas y tanque posterior a la molienda

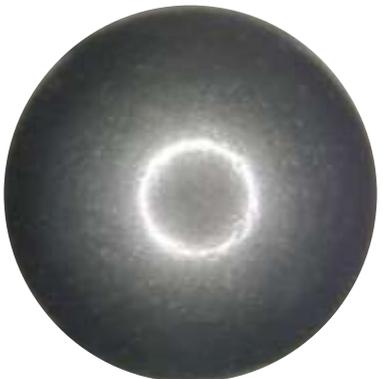
- Defectos en la bola de molienda

Para el análisis de defectos en la bola de molienda se utilizó el estereoscopio Zeiss Discovery V12 con lente de 1.5 x las imágenes capturadas se muestran a continuación:



Figura 10-5: Bola de molienda en estereoscopio
Fuente: Autores

Tabla 35-5: Defectos en la bola de molienda

0 horas de molienda	Aproximadamente 30 horas de molienda
	

Realizado por: Autores
Fuente: Autores

Como se puede observar en la imagen se presentan algunos defectos en la bola de molienda justificados debido a los impactos recibidos durante la operación, sin embargo no se es necesario un cambio de bolas al mantener aun sus características de forma y seguir cumpliendo con su función de cuerpos moledores de manera óptima, también se puede concluir que existe cierta contaminación del producto final debido a la presencia

de estos deterioros en las bolas de molienda pero no se consideran de relevancia debido al poco porcentaje en el cual se encontrarían junto con la muestra. De igual manera se resumen las imágenes para el tanque de molienda en la siguiente tabla:

Tabla 36-5: Defectos en el tanque de molienda

0 horas de molienda	30 horas de molienda
----------------------------	-----------------------------



Realizado por: Autores
Fuente: Autores

El tanque presenta, al igual que las bolas de molienda algunos impactos marcados sobre su superficie, sin embargo, no existe presencia de fisuras solo deformaciones debido al choque entre las paredes, material y bolas de molienda sin afectar de manera significativa sobre los resultados de la molienda.

5.10 Verificación de los requerimientos.

A continuación, se verificará si el prototipo de molino planetario de bolas cumple con los requerimientos y necesidades del cliente, a través de los materiales y tiempos usados para su construcción y montaje, así como de las pruebas de funcionamiento realizadas.

- *Verificación de los requerimientos del usuario.*

En la tabla siguiente se realiza un análisis de verificación de los requerimientos del usuario expuestas inicialmente para la selección de alternativas.

Tabla 37-5: Verificación de los requerimientos del usuario

Requerimiento del cliente	Cumple	No cumple
Capacidad de molienda 500 ml	X	
Disponibilidad de los materiales de construcción	X	
Costo razonable	X	
Fabricación con la tecnología de la empresa	X	
Fácil Mantenimiento	X	
Considerable vida útil	X	
Tamaño de la máquina acorde a un prototipo	X	
Molienda rápida	X	
Prototipo manual y automático	X	
Tamaño de grano fino	X	
Para materiales metálicas	X	

Realizado por: Autores 2018

Fuente: Realización propia

- *Verificación de los requerimientos del ingeniero.*

Al igual que la tabla anterior, se verifica a continuación si el prototipo desarrollado cumple o no con lo indicado por el ingeniero.

Tabla 38-5 : Verificación de los requerimientos del usuario

Requerimiento del cliente	Cumple	No cumple
Capacidad de molienda 500 ml	X	
Costo < \$3000	X	
Peso < 150 Kg	X	
Dimensiones considerables a un prototipo	X	
Seguridad y ergonomía	X	
Nivel de automatización	X	

Realizado por: Autores 2018

Fuente: Realización propia

CAPITULO VI

6. MANUAL DE OPERACIONES, MANTENIMIENTO Y ANALISIS DE COSTOS DEL PROTOTIPO DE MOLINO PLANETARIO DE BOLAS.

6.1 Manual de operaciones.

El manual de operaciones del prototipo ayudara al operario a tener un mejor manejo de ella, a conocer e identificar sus elementos, características y modo de funcionamiento de tal forma que se evite accidentes de cualquier tipo durante el encendido y puesta en marcha del molino planetario de bolas.

6.1.1 Características principales del molino planetario de bolas.

Tabla 1-6: Características principales del prototipo
MOLINO PLANETARIO DE BOLAS.

Dimensiones:	
Altura hasta la carcasa de la máquina:	0.6m
Largo:	0.6 m
Ancho:	0.3 m
Peso:	132 Kg
Materiales de construcción:	
Estructura:	Angulo de 40x4 mm acero A36
Ejes, tren de engranajes :	Acero AISI 4140
Tazón, tapa, base del mismo y contrapeso:	Acero AISI 304
Seguridad del tanque de molienda, caja de rodamientos, planchas de fijación:	Acero de transmisión AISI 1018
Carcasa:	Plancha de acero inoxidable.
Tamaño y material de las bolas de molienda:	
	Bolas de acero templado ϕ 10 mm, ϕ 5mm
Sistema de transmisión:	
	Por banda
Capacidad de molienda:	
	500 ml
Motor:	
	Trifásico de 0,5 Hp
Velocidad de operación:	
	máxima: 650 RPM

Realizado por: Autores 2018

Fuente: Realización propia

6.1.2 *Requisitos necesarios para el funcionamiento del molino.*

Con el objetivo de lograr un correcto funcionamiento del equipo, se recomienda para su instalación y rápido desenvolvimiento lo siguiente:

- ✓ Llevar y colocar el prototipo sobre una superficie lisa, sin desniveles que pueda ocasionar excesivas vibraciones, ruido o imperfecciones que modifiquen el producto de la máquina y la integridad del operador.

- ✓ Suministro de corriente trifásica de 460 V

6.1.3 *Instrucciones antes de la molienda.*

Antes de empezar el funcionamiento del prototipo, es necesario tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- ✓ Verificar que todo el sistema este con el ajuste apropiado para su puesta en marcha.
- ✓ Comprobar que la conexión entre el computador, variador y prototipo sea la correcta.
- ✓ Revisar que no exista ningún elemento extraño que interrumpa el correcto funcionamiento del molino.

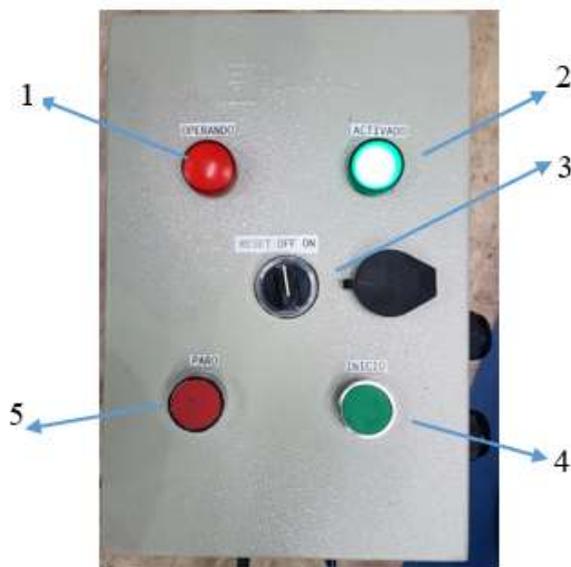
En cuanto el operario, el deberá cumplir las normas de seguridad correspondientes, es decir, uso de casco, guantes, mascarilla y gafas.

6.1.4 *Puesta en marcha.*

Para su puesta en marcha el operario deberá decidir si el control del equipo será semiautomático o automático. El tablero de control que se muestra en la parte frontal del prototipo se usara si el manejo es semiautomático es decir si va a funcionar a una sola velocidad, en este caso la programada fue la mínima de 100 RPM, por un tiempo indefinido lo que significa que para el paro de la máquina se usara el pulsador de la caja de control. En la tabla que se muestra a continuación se indica los elementos que forman dicho tablero de control, así como su función.

Tabla 2-6: Tablero de control del molino planetario de bolas.

PANEL DE CONTROL



Elemento	Ilustración	Función						
<p>1. Luz Roja</p> <p>2.Luz verde</p>		<p>Luz roja. - Indicativo de que el equipo está en operación.</p> <p>Luz verde. -Muestra que el prototipo está listo para usarse.</p>						
<p>3. Perilla central</p>		<p>Consta de tres fases:</p> <table border="1"> <tr> <td>1. Reset</td> <td>Útil para activar y desactivar el variador.</td> </tr> <tr> <td>2. Off</td> <td>Si el control se realiza desde el computador.</td> </tr> <tr> <td>3. On</td> <td>Si el control se realiza desde el tablero.</td> </tr> </table>	1. Reset	Útil para activar y desactivar el variador.	2. Off	Si el control se realiza desde el computador.	3. On	Si el control se realiza desde el tablero.
1. Reset	Útil para activar y desactivar el variador.							
2. Off	Si el control se realiza desde el computador.							
3. On	Si el control se realiza desde el tablero.							
<p>4. Botón Verde</p> <p>5.Boton Rojo</p>		<p>Botón verde. - El tanque de molienda girara a 200 RPM, en un tiempo indefinido.</p> <p>Botón rojo.- Paro de emergencia.</p>						

Realizado por: Autores 2018
Fuente: Realización propia

En el caso de que el control sea automático, se usará el programa de LABVIEW conectando el variador al computador. La figura que se muestra a continuación indica la pantalla del programa, donde se introducirá la velocidad y tiempo de operación, el programa no correrá si la velocidad está fuera de los rangos permitidos y el tiempo es igual a cero, en la segunda pantalla del programa se introducirá la dirección IP para establecer comunicación con el variador.



Figura 1-6: Pantalla del programa de LABVIEW
Fuente: Autores

6.2 Pasos a seguir para la molienda y tamización.

Para iniciar la molienda en el prototipo se seguirán los pasos que se mencionan en la tabla siguiente:

Tabla 3-6: Pasos para la molienda.

Actividad	Descripción
1. Colocar la viruta a moler en el tanque de molienda.	
2. Introducir los elementos moledores al tanque.	
3. Colocar la tapa del tanque de molienda.	
4. Colocar y ajustar las bridas de sujeción del tanque de molienda.	

Tabla 3-6: Pasos para la molienda. (Continuación)

5. Ubicar el tanque de molienda en el prototipo de molino planetario.



6. Fijar el tanque en su base con el tornillo de sujeción.



6. Bajar la tapa de protección del molino planetario de bolas.



7. Controlar la velocidad y tiempo de molienda desde el computador o caja de control.



Realizado por: Autores 2018
Fuente: Realización propia

Una vez realizada la molienda se procede al tamizado del polvo obtenido como se enumera a continuación.

Tabla 4-6: Pasos para la tamización del polvo metálico.

Actividad	Descripción.
1. Separar las bolas de molienda del polvo obtenido.	
2. Verter el polvo obtenido en el tamizador.	
3. Pesar la cantidad de polvo obtenido	

Realizado por: Autores 2018
Fuente: Realización propia

6.3 Manual de mantenimiento del molino planetario de bolas.

El mantenimiento del molino planetario de bolas es de suma importancia si lo que se quiere evitar es el deterioro de los elementos que lo conforman o más aun el paro total de la máquina de molienda. Se opta entonces por establecer un cronograma de mantenimiento en donde se señala la frecuencia con la que cada elemento debe ser limpiado, inspeccionado, lubricado y revisado.

Tabla 5-6: Cronograma de mantenimiento.

SECCION	N°	ACTIVIDAD	RECURSO	HERRAMIENTAS E INSUMOS	FRECUENCIA
Tanque de molienda	1	Limpieza	1 persona	Desengrasante, guaipe	Diario
Engranajes planeta y corona	2	Lubricación	1 persona	Grasa	Semanal
Ejes	3	Alineación	2 personas	Instrumentos de alineación	Mensual
Chumaceras y cajas de rodamientos	4	Reemplazo	1 persona	Llaves, prensa	10000 hr
Sistema de transmisión por banda	5	Tensado	1 persona	Llaves	25000 hr
Pernos y tuercas	6	Revisión de ajuste	1 persona	Llaves	Trimestral
Estructura	7	Pintura	1 persona	Compresor/pintura	Anual

Realizado por: Autores 2018

Fuente: Realización propia

6.4 Riesgos y medidas preventivas.

Los riesgos son eventos que se deben evitar, ninguna operación justifica la integridad del operario, debido a ello se toman en cuenta los tipos de riesgos que pueden presentarse en el molino planetario de bolas, estos son:

- *Riesgos físicos*

Los riesgos físicos involucran todas aquellas acciones que pueden perjudicar físicamente al operario, es así que se evalúan los siguientes aspectos:

- *Atrapamiento*

El atrapamiento se da cuando una parte del cuerpo queda atrapada en cualquier elemento del molino, este riesgo se puede presentar en:

- Los engranes corona y planeta, no introducir la mano o cualquier otro elemento en la transmisión de movimiento del tazón de molienda.
- En la banda de transmisión, mientras esta en movimiento no mantener ningún contacto alguno con este elemento, si lo que se quiere es tensarla o cambiarla tomar en cuenta las normas de seguridad correspondientes.

- *Corte*

Este riesgo puede presentarse principalmente en la manipulación de viruta al introducirla en el tanque de molienda, por tanto, se debe usar medidas de prevención, en este caso para evitar cortes se usará guantes.

- *Ergonomía*

La postura del operador debe ser la correcta para evitar este tipo de riesgo, en nuestro prototipo se podrá evitarla al tener cuidado en la recolección de viruta, alimentación de la misma en el molino y modo de ajuste del equipo.

Cualquier riesgo físico se evitará con el uso de las medidas correspondientes, es decir gafas para protección de los ojos por la posible dispersión de polvo que puede existir, mascarilla para evitar la absorción de las pequeñas partículas de polvo al cuerpo a través de la nariz y boca, tapones en los oídos para eliminar el ruido que puede generar el entorno.

- Riesgos mecánicos

Para evitar estos riesgos se deberá revisar que todo el equipo este con el ajuste necesario para que no genere accidentes durante la operación, la banda deberá estar tensada para que el movimiento sea lo más uniforme posible, no presente vibraciones y ruido excesivo.

- Riesgos eléctricos

Se produce por instalaciones eléctricas que al estar mal realizadas o conectadas puede producir electrocución y quemaduras.

Para evitar este tipo de riesgos se revisará la conexión eléctrica del equipo antes de operar, así como el correcto estado de toda la instalación.

6.5 Análisis de costos del prototipo de molino planetario de bolas.

A continuación, se detalla todos los costos que involucra la construcción del prototipo.

6.5.1 Costos directos.

Son todos aquellos gastos que intervienen de forma directa en la construcción del molino, estos son: materia prima, mano de obra, máquinas y herramientas.

6.5.1.1 Costos de materia prima.

La materia prima corresponde a todos aquellos materiales necesarios para la construcción del prototipo, en la tabla 6-6 se detalla su cantidad, valor unitario y total.

Tabla 6-6: Costos de materia prima.

Denominación	Cantidad	Unidades	Valor unitario (USD)	Valor total (USD)
Perfil ASTM A36 L30x4	2	U	6	12
Perfil ASTM A36 L20x4	1	U	3,5	3,50
Plancha de acero inoxidable 2400x1200x1 mm	1	U	17	17
Eje AISI 4140 ϕ 40 y L=580 mm	3,5	Kg	3,6	12,60
Eje AISI 4140 ϕ 350 y L=40 mm	25	Kg	3,6	90
Plancha de acero ASTM A 36 de 1/2 in	3,5	Kg	1,97	6,90
Eje de transmisión AISI 1018 ϕ 150 y L=200 mm	10	Kg	1,89	18,90
Polea trapezoidal tipo A ϕ 65 mm	1	U	1,8	1,80
Polea trapezoidal tipo A ϕ 132 mm	1	U	3,5	3,50
Banda Trapezoidal OPTIBELT 812 mm	1	U	10,64	10,64
Eje de acero inoxidable AISI 304 ϕ 150 y L=200 mm	5,5	Kg	5,7	31,35
Chumacera de pared Normalizado F705	1	U	8,9	8,90
Motor trifásico 0,5 HP	1	U	114,1	114,10

Tabla 6-6: Costos de materia prima (continuación)

Simamics G120 power module PM240-2	1	U	319,9	319,9
Simatic S7-1200, CPU 1214C, CPU Compacta	1	U	347,9	347,9
Simatic G120 basic operator panel BOP-2	1	U	45,5	45,5
Simatic G120 control unit CU240E-2 PN E-TYPE	1	U	331,8	331,8
Caja para exteriores de policarbonato anti choque de 30 cmx20cmx10cm	1	U	22,4	22,4
Pulsadores 1NC de 6-3A, 125 VAC-300 VAC	1	U	10,04	10,04
Pulsadores 1NA, 1NC de 6-3A, 125 VAC-300 VAC	1	U	10,04	10,04
Selector de 3 posiciones 1NA+NC Tipo ASN-111 IZUMI	1	U	22,5	22,5
Lámpara de señalización color rojo, MOD XB2 TELEMECANIQUE de 6 W, 125-250VAC	1	U	11,09	11,09
Lámpara de señalización color verde, MOD XB2 TELEMECANIQUE de 6 W, 125-250VAC	1	U	10,8	10,8
Enchufe blindado polarizado de 15A 125 VAC	1	U	1,94	1,94
Porta fusible de 32A, 690 VAC	1	U	4,5	4,5
Fusible tipo cartucho GL de 2A, 500 VAC de 10mm x 38mm	1	U	1,51	1,51
Cable ethernet	6	M	0,25	1,5
Cable de conexiones	2	M	0,1	0,2
Perno Prisioneros tipo ALLEN de acero M6x12mm	6	U	0,05	0,3

Tabla 6-6: Costos de materia prima (continuación)

Perno cabeza hexagonal de acero				
inoxidable A2-80 M12x25mmx1,75	26	U	0,77	20,02
Tuerca de acero inoxidable A2-70 M12x1.75				
	26	U	0,34	8,84
Pernos de cabeza hexagonal de acero A2-80 M8x30mmx1				
	14	U	0,2	2,8
Tuerca de acero M8x1				
	4	U	0,13	0,52
Pernos de cabeza hexagonal A2-80 M6x50 mm x1				
	3	U	0,22	0,66
Anillo de retención 30 mm				
	2	U	1,2	2,4
Perno de cabeza hexagonal de acero 7/26x2 in grado 8.8				
	4	U	0,34	1,36
Perno de cabeza hexagonal de M20x60 mmx2.5				
	1	U	3,33	3,33
Tuerca hexagonal M20x2.5 M8.8				
	2	U	1,31	2,62
Arandelas planas M12				
	26	U	0,15	3,9
Arandelas planas M8				
	14	U	0,12	1,68
Arandelas planas M6				
	6	U	0,1	0,60
Arandelas de presión de acero inoxidable M12				
	18	U	0,27	6,48
Arandelas de presión de acero inoxidable M8				
	14	U	0,26	3,64
Arandelas de presión M6				
	6	U	0,23	1,38
Rodamientos NTN 6205 ZZ				
	3	U	7,26	21,78
Rodamientos NTN 6805 ZZ				
	2	U	6,24	12,48
Bisagra de hierro tropicalizado				
	4	U	0,43	1,72
Acrílico transparente				
	1	U	8	8
Mango en PLA				
	1	U	5	5
Seguridad para la carcasa PLA				
	1	U	5	5
Tornillos auto perforantes				
	35	U	0,06	2,10
Tuerca hexagonal de acero inoxidable M20x2,5				
	1	U	1,21	1,21
Pintura azul				
	¼	lt	55,07	13,78

Tabla 6-6: Costos de materia prima (continuación)

Pintura negra	¼	lt	14,36	3,59
Thinner para pinturas con resina acrílica	¼	lt	2,5	0,63
Bolas de molienda ϕ 20 mm	25	U	0,5	12,50
Bolas de molienda ϕ 10 mm	100	U	0,15	15
Total				1547,13

Realizado por: Autores 2018

Fuente: HIDROAGOYAN CELEC.EP

6.5.1.1. *Costos de mano de obra, máquinas y herramientas.*

En las tablas siguientes se muestran los costos que involucra el uso de máquinas y herramientas útiles para la fabricación y montaje del molino, así como el costo por hora de mano de obra.

Tabla 7-6: Costos por el uso de máquinas y herramientas.

Máquina herramienta	Número de horas	Costo x hora (USD)	Total (USD)
Torno	30	7	210
Centro de mecanizado	30	15	450
Fresadora	5	7	35
Cortadora plasma	1	3	3
Cortadora de cinta	10	1,15	11,5
Soldadora	5	8	40
Rectificadora	0,5	1,5	0,75
Prensa	3	0,7	2,1
Esmeril	5	1	5
Taladro	6	1	6
Amoladora	6	1,1	6,6
Dobladora manual	4	1,6	6,4
Herramientas manuales	15	0,8	12
Total			778,35

Realizado por: Autores 2018

Fuente: HIDROAGOYAN CELEC EP.

Para determinar el costo de mano de obra se toma el salario mínimo señalado por el Ministerio de trabajo del Ecuador, el cual se muestra en el anexo Q, a partir de este se

calcula el costo por hora de trabajo de un técnico mecánico y su ayudante, tomando en cuenta el tiempo de construcción y montaje del equipo.

Tabla 8-6: Costos de mano de obra.

Detalle	Número de horas	Costo x hora (USD)	Total (USD)
Técnico mecánico	136	2,5	340,00
Ayudante mecánico	40	2,48	99,20
Total:			439,2

Realizado por: Autores 2018

Fuente: MINISTERIO DE TRABAJO. (2018).

6.5.1.2 Costos directos totales

El costo total directo resultara de la suma de los costos de materia prima, mano de obra y el uso de máquinas y herramientas, así se obtiene:

Tabla 9-6: Costos directos totales.

Costo por	Valor (USD)
Materia prima	1547,13
Mano de obra	439,2
Máquinas y herramientas	778,35
Total:	2764,68

Realizado por: Autores 2018

Fuente: Autores

6.5.1.3 Costos indirectos.

Los costos indirectos involucran aquellos materiales que influyen en la construcción del prototipo de molienda pero que directamente no forman parte de ella. Así se tiene:

Tabla 10-6: Costos indirectos.

Costo por	Cantidad	Valor unitario (USD)	Valor (USD)
Guantes	2 Pares	3,25	6,5
Gafas de seguridad	2	2,00	4
Mascarilla	2	3,50	7
Discos de desbaste	4	2,5	10
Lijas	5	0,5	2,5
Waype	10	1	10
Total:			40

Realizado por: Autores 2018

Fuente: Autores

6.5.2 *Costo total.*

Los costos totales de construcción es la suma de los costos directos e indirectos. La tabla siguiente muestra dicha operación que representa el costo total del molino

Tabla 11-6: Costo total.

Costo	Valor (USD)
Directo	2764,68
Indirecto	40
Total:	2804,68

Realizado por: Autores 2018

Fuente: Autores

CAPITULO VII

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones.

Dentro de los procesos mecánicos para la obtención de polvo metálico se tiene las trituradoras y molinos, donde en la primera se genera partículas gruesas y en la segunda se puede obtener granos finos y ultra finos de allí su selección.

Existen diferentes tipos de molinos para la obtención de partículas ultra finas entre ellos se encuentran vibratorio, atritor y planetario, la selección de la mejor alternativa para nuestra investigación se realizó bajo la metodología de Charles Ribba y uso de la matriz QFD.

El molino planetario de bolas es la mejor opción para la obtención de polvos metálicos a partir de la viruta obtenida de los procesos de mecanizado, por el impacto, fricción y corte que puede generar las bolas sobre los residuos producto del movimiento planetario dado, velocidad que puede alcanzar, fácil mantenimiento, fabricación y costo razonable.

El diseño del prototipo se sustentó en los ensayos realizado en ANSYS y ADAMS View donde se pudo obtener una pauta del impacto de las bolas de molienda sobre la viruta, brindándonos una herramienta para verificar la validez del proceso.

Construido el prototipo de molienda se tiene que sus dimensiones son de 0,6x0,6x0,31 m con un peso de 132 Kg, volumen de alimentación del tanque de 500 ml y capacidad de 220gr, pudiendo usarse 25 y 100 bolas de diámetro 20 y 10 mm respectivamente.

Se realizaron pruebas del molino con virutas de bronce, acero de transmisión 1018 y acero inoxidable ASTM A743, a una velocidad de 400 RPM, durante dos, cuatro y cinco horas en donde al tamizarlo se puede obtener partículas $\leq 0,6$ mm, $\leq 0,4$ mm y ≤ 1 mm respectivamente, usando bolas de 20 mm de diámetro durante la primera hora en el caso de bronce y en el acero de transmisión e inoxidable en las dos primeras horas de molienda, por este tamaño se puede concluir entonces que se ha obtenido polvo.

Del polvo tamizado se tiene en la base del mismo un peso de 69, 76 y 86 gr correspondiente al 31.08, 33.04 y 40% de bronce, acero de transmisión y acero inoxidable ASTM A743 lo que indica que mide menos de 0,06 mm, por lo que se usa el microscopio electrónico de barrido para determinar de la forma más exacta posible el tamaño real de estos granos.

Las gráficas de control de medias y rangos muestran en los tres casos que en el proceso de molienda no se ha presentado ninguna anomalía que cause que los tamaños de las partículas sean muy dispersas, es así que en el bronce existen partículas con un tamaño promedio de 9.21 μm con límites permisibles de 4.05 a 14,36 μm , en el acero 1018 se tiene una media de 4,9 μm en un rango de 2,44 a 7,42 μm mientras que en el ASTM A743 un promedio de 5,48 μm entre 1,47 y 9,49 μm .

En el bronce se tiene una masa de 153 gr en un rango de 0,6 a 0,06 mm, de los 69 gr que queda en la base del tamiz el 57,14% tiene un tamaño de 2,49 a 9,74 μm , el 37,14% entre 9,74 a 16,78 μm mientras que el 5,71% entre 16,98 a 24,23 μm ; en el acero de transmisión 143 gr están entre 0,4 a 0,06 mm, de los 86 gr de la base resultante del tamizaje se tiene que el 58,57 % están partículas de 1,02 a 4,72 μm , el 30% de 4,72 a 8,41 μm y el 11,43% está de 8,41 a 12,41 μm , en el acero inoxidable 129 gr de la molienda tienen de 1 a 0,06 mm, mientras que el 78,57% de los 86 gr de la base de los tamices están en un rango de 2,13 a 8,45 μm del tamaño de polvo.

Las pérdidas que se dan en el proceso de molienda se presentan principalmente por el intercambio de los elementos moledores puesto que cierta cantidad de partículas quedan adheridas a ellos otro motivo por el que pueden suceder, es que al abrir el tanque de molienda o al trasladar el producto obtenido a los tamices el polvo debido a su tamaño tiende a dispersarse en el aire.

El costo de la máquina de molienda es de \$2804.68 , siendo menor al valor designado por el cliente de \$3000, lo que significa que al compararlo con la máquina fabricada por Retsch de \$3500 y Fritsch de \$3750 se tiene un ahorro de 19,86 % y 25,2 % respectivamente, sin tomar en cuenta los valores que costaría importarla.

Realizando un análisis de calidad del engranaje corona de acuerdo a la norma DIN 3962:1978 se confirmó un número de calidad 8, obteniendo una equivalencia en la norma AGMA de Q=9.

7.2 Recomendaciones.

El diseño y construcción del prototipo de molino planetario de bolas se centró en la obtención de polvo metálico a través de la viruta del proceso de mecanizado, principalmente acero ASTM A743, comprobado su factibilidad, a futuro se puede plantear la modificación de ciertas variables del molino como número de tanques de molienda lo que aumentaría su capacidad y velocidad de funcionamiento de forma que se pueda obtener partículas de menor tamaño.

El material de los elementos moledores es una de las principales características que definen el tamaño y tiempo de obtención del polvo metálico, por ello será conveniente usar bolas de molienda de mayores características que el acero templado usado en este proyecto, pudiendo ser estas carburo de tungsteno y óxido de zirconio, por ejemplo.

La viruta deberá ser clasificada de acuerdo al material que se mecanice, de forma que facilite la obtención de polvo de un material en específico generando polvo no contaminado y propio de residuo del material que se obtuvo.

El molino planetario puede ampliar su utilización ya que con él se pueden obtener aleaciones mecánicas y materiales compuestos.

Se recomienda que para la tamización del polvo obtenido se use tamices manométricos como señala la norma ASTM B214, lo cual permitirá clasificar el polvo de forma más rápida y eficaz.

Una vez obtenido polvo metálico se recomienda que se investigue las aplicaciones de este producto en procesos como pulvimetalurgia para a través de la sinterización obtener nuevas piezas, uso de polvos metálicos para el recubrimiento de fisuras de elementos mecánicos y uso de este producto como materia prima para la impresión 3D, por ejemplo, todos estos procesos con el fin de evitar el almacenamiento innecesario de estos residuos y reducir la contaminación ambiental que genera su desecho.

BIBLIOGRAFÍA

BUDYNAS, RICHARD Y KEITH., NISBETT. 2008. *Shigley's Mechanical Engineering Desing*. Novena Edición. s.l. : Mc Graw Hill, 2008.

BUDYNAS, RICHARD, NISBETT, KEITH. 2008. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México : Mc Graw Hill, 2008. 1092.

CASCO., ERIK ANDRES CABEZAS. 2017. *Diseño y construccion de un molino de bolas*. Ambato : s.n., 2017.

CASTRO, ING. GUILLERMO ORLANDO. Facultad de Ingenieria. [En línea] http://materias.fi.uba.ar/6715/Material_archivos/Apuntes%20Ing.%20Castro/67.15%20Unidad%202.pdf.

CELEC EP. 2013. GENSUR. [En línea] Corporación Eléctrica del Ecuador, 2013. [Citado el: 14 de Junio de 2018.] Disponible en: <https://www.celec.gob.ec/gensur/index.php/84-central-eolica-villonaco-la-de-mayor-produccion-por-turbina-en-el-mundo>.

Control estadístico de la calidad de un servicio mediante graficas X y R. **Rodríguez, Alberto**

ISAAC PIERDANT. 2009. 151-169, 2009, Vol. 32.

COROMANT, SANDVICK. 2015. De máquinas y herramientas. [En línea] 26 de Abril de 2015. <http://www.demáquinasyherramientas.com/mecanizado/materiales-segun-la-norma-iso>.

GONZÁLEZ, JORGE ROJAS. 2013. *Formulario de estadística*. México : s.n., 2013.

INDUSTRIAS, I. 2015. Molienda. [En línea] 2015. http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/06_Apunte%20Molienda.pdf.

KRAHMER, DANIEL MARTINEZ. 2017. Guia practica para la selección de insertos de mecanizado. [En línea] 02 de Abril de 2017 https://www.researchgate.net/publication/315741844_Guia_practica_para_la_seleccion_de_inseros_de_mecanizado.

MONSTERMILL. 2017. Interempresas net. [En línea] 8 de Junio de 2017. <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/187681-MonsterMill-PCR-UN-la-especialista-en-rampas-inmersion-y-fresado-de-WNT.html>.

- NTN, CORPORATION. 2004.** *Rodamiento de Bolas y Rodillos*. 2004.
- OPTIBELT.** *Manual técnico para transmisiones por correas trapeciales*.
- PROCESO DE CORTE.** [En línea]
<http://wikifab.dimf.etsii.upm.es/wikifab/images/f/f2/GeometriaMecanizado.pdf>.
- PROCESS, UNION. 2012.** Grinding Media. [En línea] 2012.
<http://unionprocess.com/spanish/grinding.html>.
- RETSCH.** Molino Planetario de bolas PM100. [En línea]
<https://www.retsch.es/es/productos/molienda/molinos-de-bolas/molinos-planetarios-bolas-pm-100/funcionamiento-caracteristicas/>.
- 2018.** Retsch. [En línea] 2018. <https://www.retsch.es/es/empresa/>.
- RIBA, CARLE. 2002.** *Diseño concurrente*. 2002. pág. 12.
- RIBAS, CARLES. 2002.** *Herramientas para el diseño concurrente*. 2002.
- RUIZ, ARTURO. 2009.** Despliegue de la función calidad (QFD). [En línea] Abril de 2009.
[Citado el: 16 de Mayo de 2018.] <http://web.cortland.edu/matresearch/QFD.pdf>.
- SCHULZ, BERND. 2003.** Introducción a la metalurgia. Chile : s.n., 2003, págs. 277-288.
- SPCGROUP. 2013.** Graficas de control. [En línea] 6 de 02 de 2013.
<https://spcgroup.com.mx/grafica-de-control/>.
- UNION PROCESS. 2018.** Union Process. [En línea] 2018.
<https://www.unionprocess.com/spanish/index.html>.
- VALLADARES, JUAN RAMÓN ALCÁNTARA. 2008.** *Diseño práctico de un molino de bolas*. Mexico, D.F : s.n., 2008.