



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN
MOLINO TRITURADOR PARA PRODUCIR DE 50 a 100 kg/hr DE
ESCAMA DE HASTA 20 mm PARA PROCESAR PET

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO

ELABORADO POR:

ALEJANDRO MUÑOZ

GUILLERMO SANUNGA

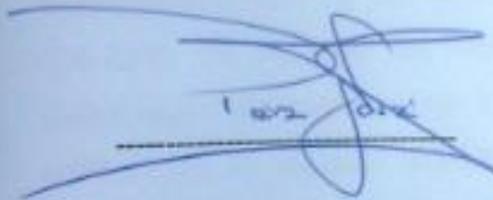
DIRECTOR: ING. JOSE PEREZ

CODIRECTOR: M.Sc. CARLOS NARANJO

Enero 2015

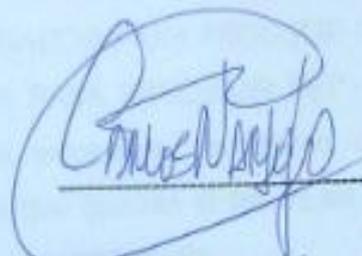
CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto "DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN MOLINO TRITURADOR PARA PRODUCIR DE 50 a 100 kg/hr. DE ESCAMA DE HASTA 20 mm PARA PROCESAR PET", fue realizado en su totalidad por ALEJANDRO DAVID MUÑOZ MOYA y GUILLERMO ALBERTO SANUNGA PULGAR, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.



Ing. José Pérez

DIRECTOR



M.Sc. Carlos Naranjo

CODIRECTOR

Sangolquí, Enero 2015

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Muñoz Moya Alejandro David

Sanunga Pulgar Guillermo Alberto

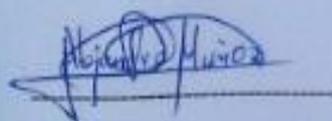
DECLARAMOS QUE:

El proyecto de grado denominado "DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN MOLINO TRITURADOR PARA PRODUCIR DE 50 a 100 kg/hr. DE ESCAMA DE HASTA 20 mm PARA PROCESAR PET", ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan el pie de las páginas correspondiente, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

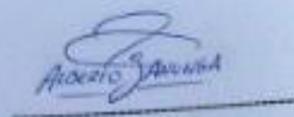
Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangoquí, Enero 2015



Alejandro David Muñoz Moya



Guillermo Alberto Sanunga Pulgar

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Muñoz Moya Alejandro David

Sanunga Pulgar Guillermo Alberto

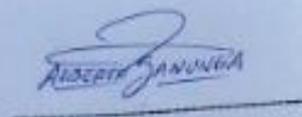
AUTORIZAMOS QUE:

El proyecto de grado denominado "DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN MOLINO TRITURADOR PARA PRODUCIR DE 50 a 100 kg/hr. DE ESCAMA DE HASTA 20 mm PARA PROCESAR PET", sea publicado en la biblioteca virtual de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Sangolquí, Enero 2015



Alejandro David Muñoz Moya



Guillermo Alberto Sanunga Pulgar

DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico a mis padres, grandes pero humildes personas que supieron guiarme, que con su paciencia y consejos he podido crecer como persona y gracias a que me inculcaron buenos valores he logrado crecer como profesional responsable de mis actos.

A mis hermanos que son lo más preciado que la vida me pudo dar, que a base de esfuerzo están levantando su propio imperio en su rama, siendo un ejemplo a seguir por su profesionalismo y responsabilidad.

A mi sobrina que me cambio la vida cuando llego, que me da fuerzas cuando se me acaban y es un impulso constante para cumplir mis metas y objetivos.

Alejandro David Muñoz Moya

DEDICATORIA

Este proyecto lo dedico a mis padres: Félix y Fanny, que hicieron posible todo este logro, por su sacrificio, dedicación, honestidad, paciencia y apoyo durante toda mi vida y mis años de estudio, a quienes estaré eternamente agradecido por todo lo que me han brindado incondicionalmente pero sobre todo por su gran ejemplo de vida y por haberme dado un hogar junto a mis hermanos Christian y Nataly.

Guillermo Alberto Sanunga Pulgar

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Ingeniero Carlos Sntaxi quien con sus conocimientos supo orientarme e impulsarme para poder culminar este proyecto.

A mis profesores, laboratoristas y de más personal de la institución que gracias a su acertada labor supieron impulsarme a adquirir nuevos conocimientos y a la vez experiencias que me han servido en el campo laboral.

A mis amigos, casi hermanos, que gracias a su apoyo se pudieron solucionar inconvenientes a nivel personal y estudiantil, con sus consejos que me ayudaron a seguir adelante a pesar de las adversidades y tener grandes y buenos recuerdos que los llevaremos para siempre.

A mis tutores de tesis ya que sin sus valiosos aportes en conocimiento y tiempo para este proyecto no habría sido posible el desarrollo y ejecución del mismo, guiándome constantemente a la búsqueda de nuevos conocimientos varias alternativas de solución a un mismo problema.

Por último agradezco a la Universidad Politécnica del Ejército por brindarme la oportunidad de realizarme como profesional inculcándome su disciplina y valores que las resaltan a ser una de las mejores de nuestro país.

Alejandro David Muñoz Moya

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme la vida y permitirme alcanzar esta meta.

A mi familia por el apoyo, paciencia y dedicación a lo largo de toda mi vida.

A mi compañero de tesis por su apoyo y amistad brindada desde el colegio.

Al Ingeniero Carlos Sntaxi por la guía, conocimiento y experiencias brindadas durante el desarrollo de este proyecto.

A mis amigos, compañeros y profesores de la carrera de Ingeniería Mecánica, por los momentos compartidos durante mi vida estudiantil.

Guillermo Alberto Sanunga Pulgar

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO	i
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	¡Error! Marcador no definido.
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN	¡Error! Marcador no definido.
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	vi
CAPÍTULO I	1
DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y GENERALIDADES.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Definición del problema.....	4
1.3 Objetivos	5
1.3.1 Objetivo general.	5
1.3.2 Objetivos específicos.	5
1.4 Alcance del proyecto.....	5
1.5 Justificación e importancia	6
CAPÍTULO II	8
MARCO TEÓRICO	8
2.1. Caracterización del reciclado de PET.....	8
2.2. Etapas del reciclado de PET.....	12
2.3 Equipos que se utilizan para el proceso de reciclado de PET.	16
2.4 Estudio del impacto ambiental que genera las etapas de reciclado de PET.....	24
CAPÍTULO III	41
DISEÑO DEL PROCESO DE RECICLADO	41
3.1 Diseño y capacidad del sistema de producción.....	41
3.1.1 Capacidad de diseño.	41
3.1.2 Capacidad del sistema.....	43
3.1.3 Estrategia de operación.	46
3.2 Distribución de las instalaciones.....	47
3.2.1 Tipo de producto.	49
3.2.2 Tipo de proceso.	49

3.2.3 Factores determinantes de la distribución.	50
3.2.4 Volumen de producción.	51
3.2.5 Balance de la línea de producción.	51
CAPÍTULO IV.....	53
DISEÑO DEL MOLINO	53
4.1. Características de la máquina a diseñarse.....	53
4.1.2. Presentación de alternativas.....	53
4.2. Parámetros de diseño.	62
4.2.1. Capacidad de producción.	62
4.2.2. Componentes del molino triturador	62
4.2.3. Geometría y dimensionamiento	62
4.3. Cálculo de la potencia del molino.	64
4.3.1. Fuerza de corte (Rossi, 2012).....	64
4.3.2. Fuerza de impacto.....	65
4.3.3. Fuerza de arrastre (tangencial) y fuerza normal (radial).....	66
4.3.4. Análisis de fuerzas y torque que actúan sobre el eje en la cámara de corte.	69
4.3.4.1. Análisis de fuerzas que actúan en los conjuntos	70
4.3.4.1.1. Análisis de fuerza del conjunto 1	70
4.3.4.1.2. Análisis de fuerzas en el conjunto 2	72
4.3.4.1.3. Análisis de fuerzas en el conjunto 3	74
4.3.4.2. Análisis de las fuerzas que actúan sobre el eje en la cámara de corte.....	75
4.3.4.3. Análisis del torque que actúa en cada conjunto	78
4.3.4.3.1. Análisis del torque que actúa en el conjunto 1	78
4.3.4.3.2. Análisis del torque que actúa en el conjunto 2	80
4.3.4.3.3. Análisis del torque que actúa en el conjunto 3	82
4.3.4.4. Análisis de los torques que actúan sobre el eje en la cámara de corte.....	84
4.3.5. Cálculo del torque total del sistema.	85
4.3.6. Relación de transmisión de velocidades y cálculo de los diámetros de las poleas....	86
4.3.7. Fuerzas que actúan en el eje en la posición de las poleas	87
4.3.8. Cálculo de la potencia requerida del sistema y selección del motor eléctrico.....	89

4.3.9.	Selección de tipo de banda.....	90
4.3.10.	Cálculo de número de bandas para la transmisión de potencia.....	92
4.4.	Espesor de las paredes del molino.....	94
4.5.	Diseño de juntas en el cuerpo.....	94
4.5.1.	Determinación del punto crítico.....	94
4.5.2.	Diseño del eje.....	101
4.5.3.	Selección de rodamientos o cojinetes.	129
4.5.4.	Juntas soldadas	131
4.5.4.1.	Disco portacuchillas a placa portacuchillas	131
4.5.4.2.	Disco portacuchillas al eje.....	135
4.5.5.	Juntas empernadas.....	137
4.5.5.1.	Cuchillas fijas a bastidor.	137
4.5.5.2.	Cuchillas móviles a placas portacuchillas	143
4.6.	Diseño de la seguridad	147
4.6.1.	Seguridad mecánica.	147
4.6.2.	Seguridad eléctrica.	149
CAPÍTULO V.....		150
CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE MOLINO.....		150
5.1.	Análisis del proceso de manufactura.....	150
5.2.	Construcción de partes del cuerpo.	155
5.3.	Conformado de cuchillas.....	157
5.4.	Soldadura y ubicación de conexiones.	159
5.5.	Diagrama de proceso de cada uno de los elementos del molino.	163
5.6.	Inspección durante el proceso de fabricación.....	164
5.7.	Proceso de ensamblaje de la máquina.....	168
5.8.	Pruebas del molino	184
5.9.	Validación de resultados.	188
CAPITULO 6		193
ANALISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO.....		193
6.1.	Análisis financiero.	193

6.1.1 Inversión.....	193
6.1.2. Costo de Producción.....	196
6.2. Análisis económico	199
6.3. Análisis de sensibilidad	200
CAPITULO 7	201
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	201
7.1. Conclusiones.....	201
7.2. Recomendaciones.	202
BIBLIOGRAFIA	203
ANEXOS	207

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 . Proceso mecánico de reciclaje.....	3
Figura 2. PET.	10
Figura 3. Esquema del proceso de reciclado de PET.....	13
Figura 4. Compactadora y Fardo.	17
Figura 5. Banda transportadora para separación manual de PET.....	18
Figura 6. Molino de cuchillas rotatorias.	19
Figura 7. Cuchillas de corte oblicuo.....	20
Figura 8. Porta cuchillas.	20
Figura 9 . Eje rotatorio, un par de chumaceras y poleas.	20
Figura 10 . Componentes de la trituradora.	21
Figura 11. Cribas de 1, 1.5, 2, 2.5, 5, 15, 20 mm.	21
Figura 12. Hidrociclón para la limpieza del PET.	22
Figura 13. Secador Centrífugo.	23
Figura 14. Secador de aire.	24
Figura 15. Relación entre capacidad de diseño, capacidad de producción y producción real.	44
Figura 16. Plano de distribución de la planta para reciclar PET.	49
Figura 17. Secuencia de actividades en el reciclaje de PET.	51
Figura 18. Cámara de corte del molino triturador de plásticos con rotor abierto.	54
Figura 19. Molino triturador de plásticos con rotor abierto, 3 cuchillas móviles y 2 fijas.	55
Figura 20. Cámara de corte del molino triturador de plásticos con 4 x 3 cuchillas escalonadas y 2 fijas.	56
Figura 21. Molino triturador de plásticos con rotor escalonado, con 4x3 cuchillas escalonadas móviles y 2 fijas..	57
Figura 22. Esquema de tolva de alimentación.	63
Figura 23. Ángulos de corte de cuchillas.	64
Figura 24. Triángulo sobre el cual se aplica la fuerza de corte.....	64
Figura 25. Esquema de fuerzas que actúan en la cámara de corte.	69
Figura 26. Esquema de las fuerzas que actúan en el conjunto 1.	70
Figura 27. Esquema de las fuerzas que actúan en el conjunto 2.	72
Figura 28. Esquema de las fuerzas que actúan en el conjunto 3.	74
Figura 29. Disposición de los discos portacuchillas en la cámara de corte.	76
Figura 30. Distancias para el cálculo de torque del conjunto 1.....	78
Figura 31. Distancias para el cálculo de torque del conjunto 2.....	80
Figura 32. Distancias para el cálculo de torque del conjunto 3.....	83
Figura 33. Fuerzas sobre poleas.	87
Figura 34. Bandas convencionales.....	92
Figura 35. Diagrama de cuerpo libre del eje.....	95
Figura 36. Configuración del eje.....	95
Figura 37. Diagramas de fuerza cortante y momento flexionante plano X-Z.....	96
Figura 38. Diagramas de fuerza cortante y momento flexionante plano Y-Z.	98
Figura 39. Gráfica de torsión del eje.....	99
Figura 40. Fuerza en la cuña.....	123
Figura 41. Soldadura del disco portacuchillas.	131

Figura 42. Esquema de la placa portacuchilla y cuchilla.	131
Figura 43. Fuerzas y distancias para la evaluación de la soldadura	133
Figura 44. Distancia del centro de gravedad a la aplicación de las fuerzas.	134
Figura 45. Unión empernada de la cuchilla fija al bastidor.	137
Figura 46. Unión empernada de la cuchilla móvil a la placa portacuchillas.	143
Figura 47. Herramientas de corte: cizalla y amoladora.....	151
Figura 48. Herramientas de taladrado: taladro de pedestal	152
Figura 49. Máquina rectificadora marca: ELLIOTT	152
Figura 50. Máquina fresadora marca: ADCOCK & SHIPLEY LTD.	153
Figura 51. Máquina Torno marca: M3.....	153
Figura 52. Baroladora	154
Figura 53. Hoja de procesos: Criba	156
Figura 54. Diagrama de proceso cuchilla fija.....	158
Figura 55. Corte a 45° del ángulo de 60x60x8mm	160
Figura 56. Conexiones y soldadura en la estructura principal	160
Figura 57. Conexiones y soldadura base del motor.....	160
Figura 58. Conexiones y soldadura tolva de carga.....	161
Figura 59. Conexiones y soldadura tolva de descarga.	161
Figura 60. Conexiones y soldadura protección de bandas y poleas.....	162
Figura 61. Conexiones y soldadura conjunto: Eje – Discos porta cuchillas – Barras porta cuchillas..	162
Figura 62. Simbología para diagramas de procesos según la ASME y ANSI.....	163
Figura 63. Diagrama de procesos de fabricación cuchillas móvil.	164
Figura 64. Cámara de corte: eje de transmisión – discos porta cuchillas.	165
Figura 65. Cámara de corte terminada.	166
Figura 66. Fabricación cuchillas.	167
Figura 67. Fabricación: Estructura principal.	167
Figura 68. Fabricación: tolvas de carga, descarga y protectora de bandas y poleas.	168
Figura 69. Proceso de ensamble: Estructura principal.	169
Figura 70. Proceso de ensamble: Base del motor.	170
Figura 71. Proceso de ensamble: Estructura general.....	171
Figura 72. Proceso de ensamble: Eje de transmisión – discos portacuchillas.....	172
Figura 73. Proceso de ensamble: Discos portacuchillas – placas portacuchillas.	173
Figura 74. Ensamble: Chumaceras a la cámara de corte.....	174
Figura 75. Ensamble de la cámara de corte a la estructura general.....	175
Figura 76. Ensamble de la criba a la estructura general.....	176
Figura 77. Ensamble del motor a la estructura general.	177
Figura 78. Ensamble de las poleas de 20 in y 5 in.	178
Figura 79. Ensamble de las bandas tipo B y alineación de las poleas.	179
Figura 80. Calibración de la cámara de corte.	180
Figura 81. Ensamble y calibración de las cuchillas fijas y móviles.	181
Figura 82. Ensamble de la tolva de descarga.....	182
Figura 83. Ensamble de la tolva de carga.	183
Figura 84. Ensamble de la protección de bandas y poleas.	184

Figura 85. Botellas PET aplastadas.....	185
Figura 86. Hoja de pruebas y tabulación de resultados de producción de escama.....	186
Figura 87. Funda de escama de PET triturada en 5 min.	189
Figura 88. Tamaño de escama de PET triturada.....	189

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos Técnicos del PET	9
Tabla 2. Comparación de características del PET y RPET.	12
Tabla 3. Evaluación y cuantificación de impactos ambientales de las etapas de reciclaje de PET	29
Tabla 4. Criterios de evaluación de impactos ambientales.	36
Tabla 5. Valoración de la magnitud e importancia del impacto.	38
Tabla 6. Valoración de la severidad del impacto	39
Tabla 7. Matriz de calificación de impacto ambiental de las actividades del reciclaje de PET.....	40
Tabla 8. Descripción de las actividades para reciclaje de PET.	52
Tabla 9. Matriz de evaluación de alternativas.....	61
Tabla 10. Factor de servicio.....	91
Tabla 11. Resumen del diseño del eje.....	128
Tabla 12. Hoja de prueba de potencia ocupada	188
Tabla 13. Datos obtenidos en las pruebas realizadas al molino triturador de botellas PET.	190
Tabla 14. Porcentaje que se ocupa del motor eléctrico a diferentes cargas.....	192
Tabla 15. Costo de materiales mecánicos.....	193
Tabla 16. Costo de materiales eléctricos.....	194
Tabla 17. Costo de manufactura del molino triturador de PET.....	195
Tabla 18. Costos indirectos.....	195
Tabla 19. Costo total de fabricación de molino triturador de PET	195
Tabla 20. Costos relacionados con la materia prima.....	197
Tabla 21. Estado de Resultados Integral.....	198
Tabla 22. Inversión total para la creación de la empresa	198
Tabla 23. Datos para el cálculo del VAN	199

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Descripción de las actividades de procesos y de aspectos medioambientales. ..	28
Cuadro 2. Medidas correctivas para evitar impactos ambientales	31
Cuadro 3. Carácter de un impacto ambiental	33
Cuadro 4. Intensidad del impacto ambiental.....	33
Cuadro 5. Extensión del impacto ambiental.	34
Cuadro 6. Duración del impacto ambiental.....	34
Cuadro 7. Reversibilidad del impacto ambiental.....	35
Cuadro 8. Riesgo del impacto ambiental	35
Cuadro 9. Ventajas y desventajas de la distribución por producto.....	48
Cuadro 10. Riesgos en la operación del molino.	148
Cuadro 11. Alternativas para evitar accidentes.	148
Cuadro 12. Elementos del molino triturador de botellas de PET con su respectivo proceso de construcción y ensamble. ..	150

GLOSARIO DE TÉRMINOS

σ_R : Resistencia de rotura a la tracción, MPa o GPa.

Freq: Fuerza requerida para el corte de PET, N o kN.

F_i: Fuerza de impacto, N o kN.

E: Módulo de Young, MPa o GPa.

μ : Coeficiente de rozamiento dinámico, adimensional.

F_{total}: Fuerza total generada en el instante del corte, N o kN.

T: Torque, Nm o Nmm.

r: Radio, mm o m.

n₁, n₂: Velocidad de giro, r.p.m.

i: relación de transmisión, adimensional.

d: Diámetro menor de una sección del eje, mm o m.

D: Diámetro mayor de una sección del eje, mm o m.

Pot: Potencia del motor eléctrico, kW o hp.

η_{motor} : eficiencia del motor eléctrico, %.

f_{ser}: Factor de servicio, adimensional.

f_{corrección}: Factor de corrección por longitud y arco, adimensional.

HP_{banda}: Número de hp por banda, adimensional.

N_{bandas}: Número de bandas.

M_a: Momento flexionante alternante, Nm o Nmm.

T_m: Torsión media.

k_t: Factor geométrico de concentración de esfuerzos por flexión, adimensional.

k_t: Factor geométrico de concentración de esfuerzos por torsión, adimensional.

- kf: Factor de concentración de esfuerzos por flexión, adimensional.
- kfs: Factor de concentración de esfuerzos por torsión, adimensional.
- Sut: Resistencia a la tracción, MPa o GPa.
- Sy: Resistencia a la fluencia, MPa o GPa.
- ka: Factor de superficie, adimensional.
- kb: Factor de tamaño, adimensional.
- kc: Factor de carga, adimensional.
- kd: Factor de temperatura, adimensional.
- ke: Factor de confiabilidad, adimensional.
- Cw: Factor de soldadura, adimensional.
- Se: Resistencia del material a la fatiga, MPa o GPa.
- q: Sensibilidad a la muesca por flexión, adimensional.
- qs: Sensibilidad a la muesca por torsión, adimensional.
- σ_a' : Esfuerzo alternante por flexión, MPa o GPa.
- σ_m' : Esfuerzo medio por torsión, MPa o GPa.
- nf: Factor de seguridad, adimensional.
- Ssy: Resistencia máxima a esfuerzo cortante, MPa o GPa.
- tmax: Esfuerzo cortante máximo, MPa o GPa.
- Taplastamiento: Esfuerzo por aplastamiento máximo, MPa o GPa.
- lch: Longitud de la chaveta, mm o m.
- PC: Carga dinámica en rodamientos, N o kN.
- fl: Factor de esfuerzos dinámicos, adimensional.
- fn: Factor de velocidad, adimensional.
- Cc: Capacidad de carga dinámica, N o kN.
- Ju: Segundo momento polar unitario de área, mm³.

- J: Segundo momento polar, mm⁴.
- τ ": Esfuerzo cortante, MPa o GPa.
- li: Longitud de agarre efectivo en una junta empernada, mm.
- Lt: Longitud del perno, mm.
- lt: Parte roscada en el agarre, mm.
- Kb: Rigidez del perno, N/mm.
- Km: Rigidez de los elementos, N/mm.
- Cr: Constante de rigidez de la unión, adimensional.
- Sp: Resistencia de prueba del perno, MPa o GPa.
- Npu: Número de pernos requeridos en la unión.
- n1: Factor de carga, adimensional.
- no: Separación de la unión, adimensional.
- Sep: Resistencia a la fatiga del perno, MPa o GPa.
- TIR: Tasa interna de retorno, %.
- VAN: Valor actual neto, USD.

RESUMEN

Este proyecto está enfocado al cuidado del medio ambiente, ya que permite reutilizar desechos de PET que contaminan y deterioran la naturaleza, por lo que este proyecto se alinea al plan del buen vivir planteado por el Gobierno Central del Ecuador. El proyecto desarrolla una máquina capaz de iniciar el proceso de reciclaje de botellas de PET; cuenta con los cálculos de fuerzas necesarias para poder lograr la trituración de botellas PET, mediante un ensayo de laboratorio se obtuvo que el PET es capaz de absorber 7.6 kJ/m^2 de energía por unidad de área para poder cortarlo, el diseño de los elementos del molino triturador se lo encuentra en el Capítulo 4. En el capítulo 3 se puede ver un estudio básico del diseño de producción y distribución de planta. Los diagramas de procesos y hojas de procesos de la fabricación de los elementos del molino se encuentran en el Capítulo 5. Se construyó el molino triturador con una inversión de aproximadamente de 4800 USD, se realizaron dos tipos de pruebas, la primera para poder determinar la capacidad de producción y tamaño de la escama de PET, alcanzando una producción de 67 kg/h de escama de PET con un tamaño máximo de 20 mm, y la segunda para conocer cuánto de la potencia del motor eléctrico se ocupa, llegando a ocupar hasta el 65.94% de la potencia nominal del motor eléctrico. Con la producción alcanzada se podría procesar gran cantidad de botellas de PET lo que ayuda a disminuir la contaminación ambiental.

PALABRAS CLAVES:

PET

MOLINO

TRITURADOR

CUCHILLA

CORTE

ABSTRACT

This project is focused on the caring of the environment because it allows reuse PET wastes that pollute and degrade the nature, that's why this project is aligned to the good life plan proposed by the Central Government of Ecuador. The project develops a machine capable of initiating the process of recycling PET bottles; it has the necessary calculations to the forces to achieve crushing PET bottles through a laboratory test it was obtained that PET is able to absorb $7.6 \text{ kJ} / \text{m}^2$ of energy per unit area to cut, design of the elements mill grinder is found in Chapter 4. In chapter 3 we can see a basic studio of the design of production and the distribution plant. The process diagrams sheets and the manufacturing processes of the elements of the mill are in Chapter 5. The grinding mill was built with an investment of approximately 4800 USD, two types of tests were performed, the first to determine the production capacity and size of PET flake, reaching a production of $67 \text{ kg} / \text{h}$ PET flake with a maximum size of 20 mm, and the second to know how much power the electric motor is concerned, occupying up to 65.94% of the nominal power of the electric motor. With the production achieved it could process a large amount of PET bottles which helps to reduce environmental pollution.

KEY WORDS:

PET

MILL

CRUSHING MACHINE

BLADE

CUTTING

CAPÍTULO I

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y GENERALIDADES

1.1 Antecedentes

De acuerdo a datos oficiales, apenas el 40% de los productos plásticos se recicla en el Ecuador, anualmente se reciclan aproximadamente 80.000 toneladas de materiales elaborados con polietileno y PET. En el reciclaje de PET existen unas 50.000 personas, tomando en cuenta desde recogedores hasta fábricas que procesan este material.

Cabe mencionar que en la última década la industria del reciclaje tomó fuerza en el Ecuador, a pesar que dicha industria fue concebida en el país en la década de los 80. Debido al crecimiento de la industria del reciclaje, actualmente existen cerca de 2.000 microempresas dedicadas a la recolección y tratamiento de los materiales reciclados.

La cantidad que se recicla anualmente en el Ecuador es de 670.000 toneladas de material, que incluye papel, cartón, metal, plástico y vidrio. Del total de material reciclado el 53% es de metales ferrosos y apenas el 12,2% pertenece al reciclaje de resinas plásticas (polietileno, polipropileno, PET).

Uno de los principales inconvenientes del reciclaje de PET en el Ecuador es la diferencia en los precios del material virgen comparado con el del reciclado, puesto que el precio de la tonelada de PET virgen tiene un costo entre \$1.600 y 2.000, mientras que el PET reciclado tiene un costo de hasta en \$1.200 y 1.300 por tonelada.

Adicional al precio, otro de los inconvenientes es que las leyes en el país no obligan a las empresas a utilizar el producto reciclado, como en otros países en los que tanto la conciencia ambiental y leyes apoyan el reciclaje. Por lo que la industria local que se dedica al reciclaje de PET se mantiene gracias a las exportaciones de la escama de PET.

Los empresarios no se dedican al reciclaje porque no hay la tecnología, ni la inversión para hacerlo, de acuerdo a esto es que desarrollamos este proyecto para poder tener la tecnología, reduciendo costos en su adquisición ya que es desarrollada por ecuatorianos. Adicional al desarrollar la tecnología en el país, se necesitaría la ayuda de leyes que obliguen a la utilización de PET reciclado con el propósito de que la industria del reciclaje se vuelva rentable.

Lamentablemente en el país se hace muy poco para fomentar la conciencia ambiental del reciclaje, las campañas que se llevan a cabo son pocas y únicamente por mantener la imagen de una empresa.

Según datos del ministerio de industrias y productividad, la industria plástica tiene un importante crecimiento que alcanza hasta el 7% anual. A pesar de su crecimiento, sólo hace un reciclaje del 40% de todos los productos elaborados.

Existen empresas que aseguran que sí está fomentando el reciclaje pero esto debería verse reflejado en importar menos materia prima virgen, lo cual generaría más plazas de trabajo para la recolección y procesamiento del PET.

Hay que tener en cuenta que solo el 46% del PET son botellas que se reciclan y que cuando se trata de otras resinas el porcentaje de reciclaje se

reduce hasta el 15%, por lo que el sobrante va a la contaminación del ambiente. Para fomentar la conciencia ambiental hay que tener presente que sí se llega a incrementar solo un 1% del reciclaje habrá un ahorro de 4 millones de dólares en la importación de materia prima, ahí radica la importancia del crecimiento de la industria del reciclaje (análisis, 2011).

Existe varias maneras de reciclar PET, en la que nos vamos a centrar es en el reciclaje mecánico, el cual es el proceso de reciclaje más utilizado que consiste en varias etapas que son la de separación, limpieza, trituración y extrusión como se muestra en la Figura 1.

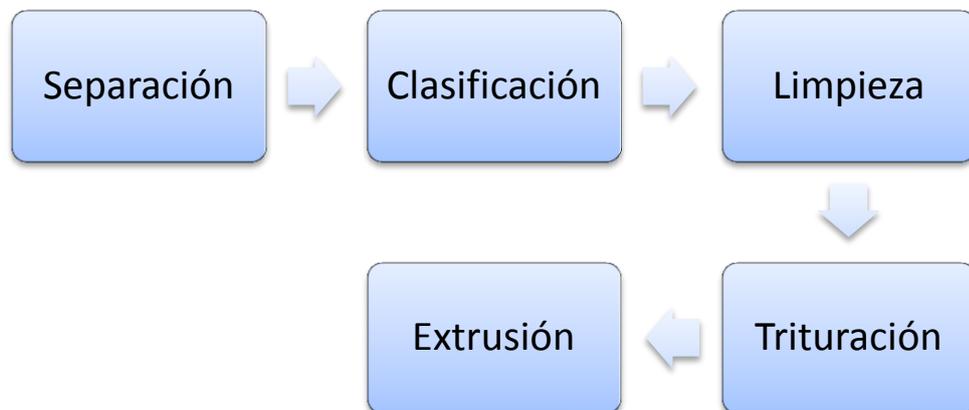


Figura 1 . Proceso mecánico de reciclaje.

El PET a ser reciclados se los clasifica de acuerdo a su color con el propósito de obtener un producto de mayor calidad, el siguiente paso es limpiarlo retirando etiquetas, papeles y cualquier tipo de residuo que pueda contener y pueda afectar con la calidad final del producto, una vez que el PET esté limpio se procede a la trituración o molienda del mismo. La limpieza puede repetirse después de la molienda dependiendo el grado de contaminación del producto molido, es decir, que la limpieza puede aplicarse en varias instancias durante el proceso de reciclado de acuerdo a la necesidad y calidad que se pretende obtener. La extrusión es el paso final

del reciclaje mecánico, se lo realiza mediante procesos termodinámicos y mecánicos.

PROPIEDADES DEL PET RECICLADO MECÁNICAMENTE

Las propiedades del PET reciclado mecánicamente difieren a las del PET virgen principalmente a la exposición térmica a la que el material reciclado recibe durante el proceso de obtención del mismo, por dicha exposición térmica el PET reciclado presenta un decremento en su peso molecular y también un incremento en el ácido carboxílico, color y nivel de acetaldehído.

Varios estudios realizados a las propiedades mecánicas del PET reciclado indican que posee el módulo de Young menor, mayor elongación a la rotura y mayor resistencia al impacto que el PET virgen. Con lo que se puede decir que el PET reciclado es más dúctil y que el PET virgen es más frágil debido a las diferencias en la cristalinidad entre los materiales.

1.2 Definición del problema.

Actualmente, en los cantones aledaños al cantón Sucre y en el mismo cantón, no se ha implementado el proceso de reciclaje y trituración de botellas (PET), por lo que se vuelve un problema ambiental.

Se ha tomado en consideración la necesidad que tienen los habitantes, ya que el proceso de recolección de botellas (PET) lo realizan pocas personas por el motivo de que les toma demasiado trabajo recogerlas y empacarlas y su labor no es muy bien remunerada económicamente, se podría decir que el reciclaje de botellas (PET) es precario y se realiza de una manera poco técnica, es así que se pone a consideración, un molino

triturador para producir de 50 a 100 kg/h, que procesa una escama de PET de hasta 20 mm, para que pueda ser adoptado y llevado a su diseño, construcción e implementación; y ser empleado en el proceso de trituración de botellas PET, teniendo en cuenta la economía de la fabricación de este equipo, frente a equipos con fines similares, en el mercado.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general.

Diseñar y construir un molino triturador para producir de 50 a 100 kg/h de escama de PET de hasta 20 mm, a fin de colaborar en el reciclaje y tratamiento de desechos plásticos PET.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Estudio del proceso de reciclaje de PET.
- Diseño, construcción y pruebas del molino triturador.
- Diseñar un plan de mantenimiento para el molino con la finalidad de evitar daños tempranos, posibles accidentes y por sobre todo alargar la vida útil del motor a utilizarse.
- Estudiar los requerimientos de dotación de equipo de seguridad personal y colectiva para riesgos en la operación del molino.

1.4 Alcance del proyecto.

Tener un estudio de la energía por unidad de área necesaria para el corte de botellas PET.

Diseño y construcción del molino triturador de PET.

Elaborar un procedimiento de mantenimiento correctivo, preventivo, predictivo y proactivo para alargar la vida útil del molino tomando en cuenta el ambiente corrosivo al que va estar expuesto.

Generar el estudio económico y financiero de la construcción del molino triturador.

1.5 Justificación e importancia

Viabilidad técnica

- El Proyecto reúne características, condiciones técnicas y operativas que aseguran el cumplimiento de sus metas y objetivos para el diseño, construcción e implementación de un molino triturador de PET.
- La existencia de insumos (PET), materiales e infraestructura para la construcción de la máquina.

Viabilidad social

- El proyecto de tesis planteado contribuirá directamente al reciclaje y buen vivir de la población ubicadas en el cantón Sucre- Provincia de Manabí.

Viabilidad ambiental

- Al no contar con un adecuado sistema de reciclaje de plástico PET, la contaminación existente no permite a la población mantener un nivel de vida sanitario bueno, por lo que este proyecto de tesis se lo puede denominar como vital para este sector del país.

Viabilidad económica

- En este tipo de proyectos, no es posible cuantificar todos los beneficios, por consiguiente la tasa de retorno calculada representa

un nivel mínimo del resultado a obtenerse con la inversión. El impacto de carácter social esperado es considerable, puesto que mejorará sustancialmente las condiciones de vida de la población del área.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Caracterización del reciclado de PET.

Polietileno Tereftalato (PET), J. R. Whinfield y J. T. Dickinson en 1941 lo patentaron como un polímero para fibra. Catorce años después inició la producción comercial de fibra de poliéster.

El PET posee gran estabilidad dimensional, rigidez, buenas propiedades mecánicas y resistencia a la abrasión. En cuanto a su procesamiento tiene buena calidad de moldeado, siendo este posible mediante extrusión e inyección, debido a que tiene tendencia de absorber agua y sufrir procesos de hidrólisis su transformación es compleja.

En la década de los 70 se empezó a utilizar el PET para la fabricación de envases ligeros principalmente para bebidas, los primeros envases eran gruesos y rígidos, a diferencia de los de ahora, que sin perder sus excelentes propiedades como envase, son mucho más delgados y ligeros.

La fórmula química del polietileno tereftalato o politereftalato de etileno, en resumen, PET, es la siguiente:



Otras características del PET son su gran ligereza y resistencia mecánica a la compresión y al impacto, alto grado de transparencia y brillo, capaz de conservar el sabor y aroma de los alimentos, totalmente reciclable y con posibilidad de producir envases reutilizables. Presenta una demanda creciente en todo el mundo.

En la Tabla 1 se presentan algunas de las propiedades que posee el PET.

Tabla 1.

Datos Técnicos del PET

DATOS TECNICOS PET				
POLIETILENTEREFTALAO				PET
PROPIEDADES MECANICAS	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
A 23°C				
PESO ESPECIFICO	gr/cm ³	D-792	53479	1.39
RESIST. A LA TRACC.	Kg/cm ²	D-638	53455	900
(FLUENCIA / ROTURA)				
RES. A LA COMPRESION (1 Y 2 % DEF)	Kg/cm ²	D-695	53454	260 / 480
RESISTENCIA A LA FLEXION	Kg/cm ²	D-790	53452	1450
RES. AL CHOQUE SIN ENTALLA	Kg.cm/cm ²	D-256	53453	> 50
ALARGAMIENTO A LA ROTURA	%	D-638	53455	15
MODULO DE ELASTICIDAD (TRACCION)	Kg/cm ²	D-638	53457	37000
DUREZA	Shore D	D-2240	53505	85 - 87
COEF. DE ROCE ESTATICO S/ACERO		D-1894		--
COEF. DE ROCE DINAMICO S/ACERO		D-1894		0.2
RES. AL DESGASTE POR ROCE				MUY BUENA

Fuente: (JQ, Datos técnicos: Industrias JQ, 2013)

El PET, en resumen, es un plástico de alta calidad que se identifica con el número uno, o las siglas PET (Ver Fig. 2), rodeado por tres flechas en el fondo de los envases fabricados con este material, según sistema de identificación SPI (Moli de la Vall Major, 2012).



Figura 2. PET.

Fuente: (espiral, 2008)

La fabricación de los envases se obtiene mediante un proceso de inyección-estirado-soplado teniendo como materia prima la resina de PET.

El PET es el resultado de dos materias primas derivadas del petróleo; etileno y paraxileno, cuya forma es de pequeños cilindros o chips, los cuales, tras un proceso de secado se funden e inyectan a presión en máquinas de múltiples cavidades dándoles preformas. Por último son soplados con aire limpio a presión hasta llegar a su forma final.

Durante su procesamiento las moléculas de PET se acomodan en forma de red, orientándose en forma longitudinal y paralela al eje del envase, esta orientación molecular incrementa la resistencia mecánica del envase.

Tiempo atrás existía muy poco reciclaje de PET, principalmente a partir del material recuperado en plantas de reciclaje de RSU.

Existen dos métodos mediante los cuales se pueden reciclar envases de PET, estos son el químico y el mecánico.

El reciclado químico se realiza a través de cuatro procesos que son pirolisis (separación de moléculas mediante calentamiento en el vacío), hidrogenación (se trata el PET mediante hidrógeno y calor), gasificación (el

PET es calentado con gases y oxígeno), chemólisis (utiliza procesos solvolíticos) y metanólisis (con el uso de metanol separa las moléculas del PET), después de cualquiera de los procesos mencionados el producto debe ser tratado en una refinería o planta química para culminar con el reciclaje del PET.

Por otra parte el reciclado mecánico tiene un costo menor que el reciclado químico, teniendo en cuenta que tras el reciclado mecánico el producto final es de menor calidad y su mercado es reducido, adicional que existe un mayor número de producto no conforme. La principal aplicación del producto final incoloro de este proceso es para envases de líquidos como agua, aceites, etc., el producto final de color verde sirve para bebidas refrescantes y agua.

El reciclado mecánico se vuelve más fácil si se emplean envases transparentes de PET, debido a que el PET sin pigmentos tiene mayor variedad de aplicaciones en el mercado, al reciclar se debe evitar recubrimientos de otros materiales, los cuales causan un efecto negativo en la capacidad de reciclaje del PET, se debe procurar retirar etiquetas fácilmente desprendibles en el proceso de lavado, se debe evitar la impresión xerográfica debido a la pigmentación que puede absorber el PET disminuyendo así su aplicación, venta y precio.

PROPIEDADES DEL PET RECICLADO MECÁNICAMENTE.

Como ya se menciona en el primer capítulo las propiedades del PET reciclado mecánicamente difieren a las del PET virgen principalmente a la exposición térmica a la que el material reciclado recibe durante el proceso de obtención del mismo, por dicha exposición térmica el PET reciclado presenta un decremento en su peso molecular y también un incremento en el ácido carboxílico, color y nivel de acetaldehído.

En la Tabla 2 se muestran algunas propiedades mecánicas del PET virgen y del reciclado.

Tabla 2.

Comparación de características del PET y RPET.

COMPARACIÓN ENTRE PET Y RPET		
PROPIEDAD	PET VIRGEN	RPET
Módulo de Young [MPa]	1890	1630
Resistencia a la rotura [MPa]	47	24
Elongación a la rotura [%]	3,2	110
Resistencia al impacto [J m⁻¹]	12	20
Temperatura de fusión (°C)	244 – 254	247 - 253
Peso molecular (g mol⁻¹)	81600	58400

Fuente: (Pattabiraman, Dr. Sbarski, & Prof. Spurling, 2007).

2.2. Etapas del reciclado de PET.

Como ya se mencionó anteriormente existen básicamente dos maneras de reciclar, mecánicamente y químicamente, debido a que el presente proyecto tiene que ver con el reciclaje mecánico, el enfoque será sólo a este tipo de reciclaje.

Anteriormente se explicó que el reciclaje mecánico consiste en una secuencia de procesos a los que el PET va a estar sometido, siendo su limpieza y procesamiento posibles sin un cambio químico en la estructura del mismo. En el reciclaje mecánico hay que tomar en cuenta la procedencia del residuo, y para que aplicación se va a utilizar, con el propósito de establecer un adecuado control de calidad.

En la Figura 3 se muestra una secuencia de pasos para reciclaje de PET.

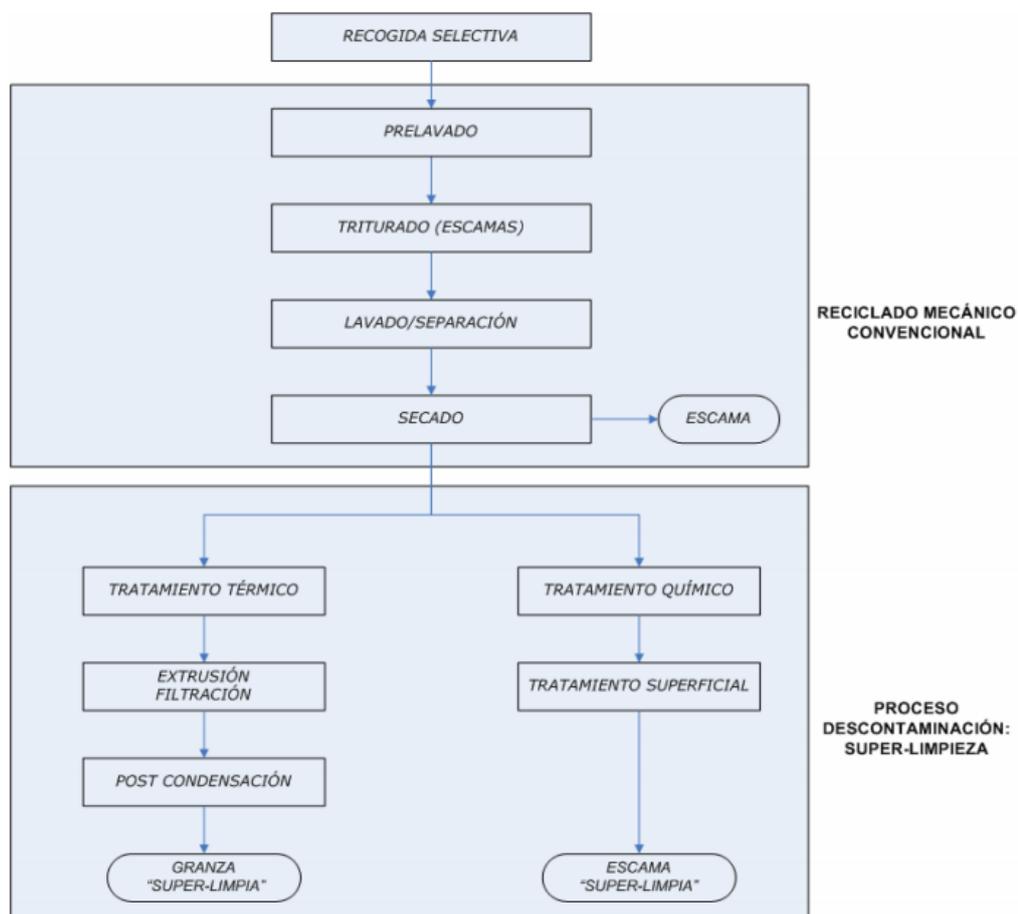


Figura 3. Esquema del proceso de reciclado de PET

Fuente: (Mariano, 2011)

SELECCIÓN / SEPARACION

En esta etapa lo que se procura es retirar impurezas pos consumo o materiales diferentes al PET. Esta etapa puede ser desarrollada de manera manual o automática, teniendo en cuenta que se debe procurar seleccionar los envases que no tengan pigmentación, retirar materiales que no son PET como las tapas y etiquetas, incluso se puede tomar en cuenta la forma por facilidad de procesamiento.

Cuando existe separación automática se tiene separadores colorimétricos, de infrarrojo cercano, ultravioletas, Foucault o corrientes de Eddy, etc. Adicionalmente también se hace una detección y separación de elementos metálicos férricos mediante imanes para prevenir el desgaste de los componentes del molino triturador.

Los procesos de separación antes mencionados se los pueden disponer a lo largo de la línea de producción, siendo necesarios o no de acuerdo a la procedencia y condiciones del PET a reciclarse.

LAVADO O LIMPIEZA

Una vez culminado el proceso de selección y separación se procede a realizar la etapa del lavado o limpieza del PET que posteriormente será triturado. Para esta etapa se puede utilizar agua, tensioactivos y/o sosa diluida. La limpieza puede ser manual o mediante maquinaria, dicha maquinaria puede ser una sola o varias ubicadas en serie en la línea de producción.

Al no tener una adecuada limpieza, las impurezas que quedan afectan directamente al producto final, por lo que un proceso eficaz y eficiente da como resultado un producto final de mayor calidad.

Los métodos de limpieza más utilizados son de fricción, centrifugación, ciclón, etc. Para una mejor limpieza y la eliminación de elementos no deseados.

El proceso de limpieza se puede repetir las veces que sea necesario, es recomendable tener otro proceso de limpieza después de la trituración para

posteriormente obtener un producto limpio y secarlo (150-180°C), para su almacenamiento.

TRITURADO

El objetivo de esta etapa es reducir de tamaño los envases de PET, este proceso se lo realiza mediante molinos de cuchillas, el reducir de tamaño los envases ayuda a un manejo más sencillo del PET.

El reducir de tamaño los envases de PET es el resultado de los procesos de triturado y molido, una vez reducido de tamaño el PET ocupa menos espacio de almacenamiento y facilita su posterior procesamiento.

El triturado del PET es netamente un proceso mecánico, en el cual se aplican fuerzas de corte, arrastre e impacto. De acuerdo al polímero a triturar se debe elegir la máquina con las prestaciones adecuadas.

Una alternativa para la reducción del tamaño del PET, previo al triturado, es utilizar máquinas tales como guillotinas de láminas (en caso de productos sumamente duros), cortadoras manuales (para ajustar al tamaño requerido para ser triturado).

Tomando en cuenta la cantidad de PET que se quiere procesar, la velocidad de alimentación al molino y el transporte de la escama, se puede determinar la capacidad de producción que se puede obtener. Partiendo de las consideraciones anteriores se puede elegir el sistema de alimentación de PET, tamaño de la cámara de corte, velocidad de giro de las cuchillas, potencia del motor, configuración de la criba y el sistema de desfogue del producto final.

EXTRUSION / GRANCEADO

Es el proceso final del reciclado del PET, en dicho proceso, ya con la escama del tamaño requerido, realizada una limpieza adecuada de la misma y secada, se somete a un proceso de extrusión con la ayuda de calor y presión para obtener la granza o chip de PET.

Esta etapa final del reciclado de PET es de tratamiento térmico principalmente, ya que con el incremento de la temperatura se modificará características de la escama así como se eliminan elementos contaminantes.

Los procesos anteriores (selección, limpieza y triturado) se pueden repetir y alternar de acuerdo a la calidad de escama que se pretenda obtener, el proceso de extrusión puede darse o no dependiendo del producto final que se va a obtener y que depende de las características y exigencias de la calidad para el mercado que va dirigido.

2.3 Equipos que se utilizan para el proceso de reciclado de PET.

Los equipos que se utilizan en las diferentes etapas de reciclado de PET son diversos dependiendo del tamaño del espacio físico que se dispone y de la cantidad a procesarse, se presentarán los equipos más comúnmente utilizados y se hará un breve explicación de su funcionamiento.

PACADO.

El pacado puede definirse como un subproceso de la selección o separación, ya que se puede aplicar si es una gran empresa de reciclado, se

suele compactar el PET con la ayuda de una máquina igual o similar a la de la Figura 4, con el propósito de reducir su volumen y así facilitar su transporte y almacenamiento.

Después de pasar por la máquina compactadora de PET, el producto final tiene forma cúbica y se las suele denominar pacas, fardo o balas de PET que generalmente tienen las siguientes medidas 153 x 130 x 85 cm., dependiendo de la maquinaria utilizada, el peso que pueden llegar a tener cada bloque de PET varía entre 200 hasta 600 kg, según el grado de compactación o la eficiencia del prensado.

Debido a la elevada recuperación elástico-plástica que posee el PET, su prensado se dificulta. Al utilizar este subproceso, los bloques una vez abiertos deben ser triturados tal como llegan a la planta, es decir con tapas y etiquetas, teniendo en cuenta que es una alternativa, ya que si se desea mayor calidad se debe realizar la selección y limpieza previos al triturado.



Figura 4. Compactadora y Fardo.

Fuente: (Prensas, 2014)

SEPARACIÓN

Como ya se mencionó con anterioridad el propósito de la separación es tratar de retirar todas las impurezas grandes, tales como etiquetas, metales, vidrio o papel.

En el proceso de separación se utiliza máquinas cuando esta se realiza a gran escala. La macro separación se realiza sobre la materia prima tal como llega de la recolección, cabe mencionar que este proceso, así se utilice maquinaria, no es automático, porque se necesita de el reconocimiento óptico del color o la forma de una persona.

La maquinaria más común que se utiliza en este proceso es una cinta de transportación para clasificación y separación manual de materia prima igual o similar a la de la Figura 5.



Figura 5. Banda transportadora para separación manual de PET

Fuente: (Herrera, 2013)

REDUCCIÓN DE TAMAÑO

En la reducción de tamaño del PET, como se mencionó anteriormente se lo realiza mediante trituración, se la realiza utilizando molinos trituradores, siendo el más común para este propósito el molino de cuchillas rotatorias para PET igual o similar al de la Figura 6.



Figura 6. Molino de cuchillas rotatorias.

Fuente: (Gumar, 2014)

Ya que el enfoque del proyecto es hacia este proceso de reducción de tamaño del PET, se profundiza más acerca de los diferentes componentes que pueden tener los molinos trituradores.

Para realizar el corte o triturado del PET existen diferentes tipos de sistemas de cuchillas rotatorias, un ejemplo es el sistema de cuchillas de corte oblicuo cuya cualidad es realizar corte suave y limpio, como se puede observar en la Figura 7, las cuchillas tienen una curvatura, no son totalmente rectas, para completar la configuración de la cámara de corte de este tipo de sistema, se tienen los portacuchillas, como se muestra en la Figura 8, donde

se sujetan las cuchillas oblicuas, a su vez los portacuchillas van fijos en un eje rotatorio el cual está soportado en medio de chumaceras e impulsado por un motor eléctrico, que conduce su potencia mediante poleas, generalmente el conjunto queda como se muestra en la Figura 9.



Figura 7. Cuchillas de corte oblicuo.

Fuente: (mezcladoras, 2013).



Figura 8. Porta cuchillas.

Fuente: (Martinez, 2013)



Figura 9 . Eje rotatorio, un par de chumaceras y poleas.

Fuente: (innovación, 2014)

Para la alimentación de PET al molino, este posee una tolva de alimentación la cual está ubicada en la parte superior del molino, después de la tolva de alimentación se encuentra la tobera, la cual permite posicionar al PET directamente en la cámara de corte, en la Figura 10 se muestra un esquema general de un molino y su respectiva cámara de corte. Dependiendo la calidad y aplicación del producto final (escama), de ser necesaria la obtención un tamaño específico de escama es necesario incluir al sistema una criba, que puede ser igual o similar a la mostrada en la Figura 11.



Figura 10 . Componentes de la trituradora.

Fuente: (plástica, 2014)



Figura 11. Cribas de 1, 1.5, 2, 2.5, 5, 15, 20 mm.

Fuente: (innovación, 2014)

LIMPIEZA

El proceso de limpieza después de la reducción de tamaño del PET se lo puede realizar mediante hidrociclones, como el que se muestra en la Figura 12, dichos hidrociclones realizan la limpieza en un medio acuoso con la ayuda de la diferencia de densidades de los contaminantes y la escama, la escama al ser menos densa flota en la superficie donde se la extrae, mientras que los contaminantes siendo más densos caen al fondo y se descargan.

Para este proceso se debe tomar en cuenta que el uso de detergentes se encuentra limitado debido razones ambientales ya que para poder reutilizar la mezcla con detergentes estos se deben procesar, al igual que si se pretende desechar se debe darle otro tipo de tratamiento de purificación del agua para evitar posteriores efectos ambientales.

El mejor elemento para realizar la limpieza es la sosa cáustica por las bajas concentraciones necesarias para la limpieza y porque el remanente de sosa cáustica presente se puede reutilizar para otros lavados, simplemente reponiendo la que se pierde en el proceso de lavado.



Figura 12. Hidrociclón para la limpieza del PET.

Fuente: (Valladolid, 2012)

SECADO

Para eliminar la humedad de la escama después de ser lavada, se utiliza un proceso de secado con el propósito de procesarla o comercializarla.

En el proceso de secado se puede utilizar secadores centrifugados, como el que se muestra en la Figura 13, dicho secador está compuesto por tambores especialmente diseñados para extraer la humedad por las paredes externas del equipo.



Figura 13. Secador Centrífugo.

Fuente: (Valladolid, 2012)

Otros equipos que se pueden utilizar para realizar el secado de la escama son los secadores de aire, como el que se muestra en la Figura 14, ya sea utilizando aire caliente o frío, que mediante la circulación del aire entre las escamas elimina la humedad hasta lo requerido.



Figura 14. Secador de aire.

Fuente: (Valladolid, 2012)

Los equipos más sofisticados para este proceso, combinan ambos procesos y los realizan simultáneamente, es decir, sistemas que operan al mismo tiempo en forma centrífuga con aire en contracorriente.

2.4 Estudio del impacto ambiental que genera las etapas de reciclado de PET.

En la clasificación, preparación y limpieza de las botellas de PET recicladas se considera las notables diferencias existentes (como: color, forma, composición, resistencia, dimensión, utilidad, etc.), con la finalidad de desarrollar un tratamiento de los desperdicios más eficiente desde los puntos de vista operacionales y de medio ambiente.

Para poder clasificar, preparar y limpiar el PET de una manera más amigable tanto para el medio ambiente como para el personal que realizan los diferentes procesos, se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- 1) Contenido de líquidos o suspensiones en diferentes botellas de PET.
- 2) Vertidos efluentes no programados.

- 3) Emisión de gases de productos que contaminan a los demás y al sitio de operaciones.
- 4) Contaminación y corrosión de los elementos mecánicos de los equipo.
- 5) Utilización de detergentes para limpieza de botellas, equipos y áreas en circunstancias no previstas.

Para efectos propios de clasificación, se han establecido grupos de desechos que reúnen características similares.

- Grupo I BOTELLAS PET
- Grupo II TAPAS DE BOTELLAS PET
- Grupo III ETIQUETAS DE DIFERENTES MARCAS DE BOTELLAS PET

Las botellas de PET que van a ser procesadas por el molino triturador deben ser debidamente separadas de sus etiquetas y tapas, las etiquetas y tapas deben ser almacenadas para efectos de reciclaje, teniendo como prioridad una adecuada capacitación responsable del personal.

Para realizar la clasificación y previa preparación se debe tomar en cuenta los siguientes aspectos:

1) El GRUPO I, una vez que ingresa a la línea de producción dará inicio a la clasificación de los desperdicios.

2) Una vez identificados los desperdicios, se procederá a colocarlos en fundas correctamente selladas para su posterior tratamiento.

3) Las botellas de PET previamente seleccionadas y que se les va a triturar, deben pasar por el proceso de limpieza, que comúnmente se lo realiza de manera manual por los operadores, los cuales serán dotados de toda la implementación y equipo de seguridad como son: casco, gafas de seguridad, mascarilla, orejeras, guantes, botas de seguridad, mandil u overol; para realizar el lavado se utiliza: detergente en polvo o líquido, cepillos y estopas.

4) En la duración del proceso de trituración, los operarios deberán tomar todas las medidas de precaución para evitar accidentes como atascamientos o cortaduras, teniendo en cuenta que la exposición al ruido excesivo también se transforma en un riesgo, por lo que previo a la operación del equipo triturador se debe capacitar al personal sobre seguridad industrial y riesgos asociados con la operación del equipo.

5) Una vez culminado el proceso de trituración, la escama se colocará en fundas de lona que se sellarán y se enviarán a bodega y luego al área de carga.

Adicionalmente, se debe tener en cuenta que el cantón Sucre, provincia de Manabí, posee un clima seco y polvoriento, por lo que se califica al terreno en general como parcialmente árido, la profundidad aproximada donde puede emerger agua es de 110m (Gobierno Provincial de Manabí, 2013).

De acuerdo con las ISO 14001-2004 “la dirección debe asegurarse de la disponibilidad de recursos esenciales para establecer, implementar, mantener y mejorar el sistema de gestión ambiental. Estos, incluyen los recursos humanos y habilidades especializadas, infraestructura de la organización, y los recursos financieros y tecnológicos. Las funciones, las responsabilidades y la autoridad se deben definir, documentar y comunicar

para facilitar una gestión ambiental eficaz” (Normas ISO), se ha dispuesto el Cuadro 1 que contiene la descripción de cada etapa del reciclaje de PET y sus aspectos medioambientales para lograr una mejor identificación de posibles impactos ambientales y documentar dichos impactos. Y en la Tabla 3 se hace una evaluación y cuantificación de posibles impactos ambientales a los diferentes componentes, ya sean estos físicos, bióticos o sociales, que generan cada etapa y sub-etapa del reciclaje.

Cuadro 1.

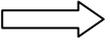
Descripción de las actividades de procesos y de aspectos medioambientales.

EVALUACIÓN DE ASPECTOS E IMPACTOS AL MEDIOAMBIENTE DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS DE RECICLADO DE PET Y DE ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES			
ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES			
PASOS INDIVIDUALES DEL PROCESO	DESCRIPCIÓN DE LOS PASOS INDIVIDUALES DEL PROCESO	CONDICIONES NORMALES	CONDICIONES ANORMALES
CLASIFICACIÓN Y ALMACENAJE	La clasificación es el primer paso, por cuanto las botellas de PET deben ser identificadas según el requerimiento necesario, para luego ser almacenadas en espera del lavado y triturado.	Almacenaje de botellas PET, de tapas de botellas y etiquetas.	Riesgo de incendio para la seguridad y salud ocupacional.
LIMPIEZA Y LAVADO	Después de ser clasificadas y almacenadas se procede a la limpieza y lavado, de esta manera se consigue aminorar la incidencia de efectos contaminantes y a los mecanismos del molino.	Uso de agua procedente de fuentes municipales, uso de detergentes, vertido de afluentes a un servicio de tratamiento de olores.	Riesgo para la seguridad y salud ocupacional.
TRITURACIÓN	Las botellas de PET son llevadas al molino triturador de acuerdo a la planificación y requerimiento en nuestro caso producir de 50 a 100 kg/hr de escama de hasta 20 mm	Vibraciones y ruidos.	Riesgo para la seguridad y salud ocupacional.
DISPOSICION FINAL DE LA ESCAMA EMPACADA Y DESPERDICIOS	La escama de PET al ser empacada es llevada a la bodega para luego ser puesta a disposición de los clientes; los desperdicios luego de ser tratados y empacados se los lleva hacia el exterior, para ser puestos a disposición (según el tipo de desecho) a la empresa recicladora, o a los camiones municipales.	Uso de material para embalaje, almacenaje de escama y residuo.	Riesgo de incendio para la seguridad y salud ocupacional.

Tabla 3.

Evaluación y cuantificación de impactos ambientales de las etapas de reciclaje de PET

COMPONENTES AMBIENTALES	FISICO										BIOTICO		SOCIAL		TOTAL
	ATMOSFERA			AGUA				MEDIO PERCEPTUAL			RELACIONES ECOLOGICAS		SOCIAL		
ACTIVIDADES	CALIDAD DE AIRE	NIVEL SONORO	CLIMA	AGUAS SUPERFICIALES	AGUAS SUBTERRANEAS	INTERRUPCION DE DRENAJES	VISTAS Y PAISAJES	ATRATIVOS NATURALES Y FACTORES FÍSICOS	VECTORES, INSECTOS Y ENFERMEADES	INVASIÓN DE MALEZAS	EUTROFIZACIÓN	SALUD	SEGURIDAD INDUSTRIAL		
Todas las actividades en las etapas de reciclaje de PET															
	Recepción de botellas PET						X			X		X	X		4
Almacenamiento y clasificación de botellas PET	Almacenamiento de botellas PET			X				X	X			X	X	5	
	Clasificación de botellas PET								X	X		X	X	4	
Separación manual de tapas y etiquetas	Separación manual de tapas								X	X		X	X	4	
	Separación manual de etiquetas								X	X		X	X	4	

Continua 

COMPONENTES AMBIENTALES		FÍSICO							BIOTICO			SOCIAL		TOTAL	
		ATMOSFERA			AGUA				RELACIONES ECOLÓGICAS			SOCIAL			
ACTIVIDADES		CALIDAD DE AIRE	NIVEL SONORO	CLIMA	AGUAS SUPERFICIALES	AGUAS SUBTERRANÉAS	INTERRUPCIÓN DE OBRAS	VISTAS Y PAISAJES	ATRATIVOS NATURALES Y FACTORES FÍSICOS	VECTORES, INSECTOS Y ENFERMEDADES	INVACIÓN DE MALEZAS	EUTROFIZACIÓN	SALUD	SEGURIDAD INDUSTRIAL	
		Lavado manual de botellas PET	Mezcla de agua con detergente				X								X
Limpieza de botellas PET					X								X	X	3
Desecho de agua utilizada					X								X	X	3
Almacenamiento de botellas PET limpias	Almacenamiento de botellas limpias							X					X	X	3
Triturado de botellas PET	Alimentación de PET al molino												X	X	2
	Triturado de PET		X										X	X	3
Almacenamiento e inspección de escama	Inspección de escama												X	X	2
	Almacenamiento de escama							X					X	X	3
TOTAL DE IMPACTOS AMBIENTALES														51	

Una vez identificados los impactos ambientales, en el Cuadro 2 se presentarán posibles medidas correctivas, las cuales se aplicarían con el propósito de disminuir el impacto de cada actividad.

Cuadro 2.

Medidas correctivas para evitar impactos ambientales

ETAPA	MEDIDA CORRECTIVA
Almacenamiento y clasificación	Socializar el proyecto con la comunidad, con la finalidad de no causar molestias en cuanto al impacto de vista y paisaje. En el caso de la salud y seguridad industrial sería dotar de equipos de seguridad apropiados al personal encargado de dicha etapa. Adicional tener un programa periódico de eliminación de vectores, insectos y enfermedades.
Separación manual de tapas y etiquetas	Al igual que en la etapa anterior la medida correctiva sería socializar el proyecto con la comunidad, con la finalidad de no causar molestias en cuanto al impacto de vista y paisaje. En el caso de la salud y seguridad industrial sería dotar de equipos de seguridad apropiados al personal encargado de dicha etapa. Adicional tener un programa periódico de eliminación de vectores, insectos y enfermedades.
Lavado manual de botellas PET	Pretender que los detergentes a usar para el lavado sean amigables con el ambiente, salud y seguridad de los trabajadores. Al momento de desechar el agua después de la limpieza, darle un buen seguimiento al tratamiento de dicha agua (competencia de empresas encargadas de tratamiento de desechos).
Almacenamiento de botellas PET limpias	Socializar el proyecto con la comunidad, con la finalidad de no causar molestias en cuanto al impacto de vista y paisaje. En el caso de la salud y seguridad industrial sería dotar de equipos de seguridad apropiados al personal encargado de dicha etapa.
Triturado de botellas PET	La ubicación de la empresa debe ser en un sector no residencial para evitar la contaminación auditiva. Se deberá dotar de EPP (Equipo de Protección Personal) a los trabajadores para evitar deterioro en la salud de los mismos.
Almacenamiento e inspección de la escama	Socializar el proyecto con la comunidad, con la finalidad de no causar molestias en cuanto al impacto de vista y paisaje. Tratar que el proceso de inspección de la escama sea lo más ergonómico posible por la salud y seguridad de los trabajadores.
Embarque y despacho	La ubicación de la empresa debe ser en un sector no residencial para evitar la contaminación auditiva. Socializar el proyecto con la comunidad, con la finalidad de no causar molestias en cuanto al impacto de vista y paisaje.

Adicionalmente se puede realizar una ponderación de los efectos provocados por cada una de las etapas, nos vamos a apoyar en la matriz de Leopold (Cevallos & Mera, 2010), teniendo en cuenta que:

1) Hay que identificar los diferentes factores ambientales que están involucrados en el proyecto.

2) Una vez identificados los factores se calificará los impactos.

Para poder realizar la valoración cualitativa de los impactos ambientales se realizará calificando el grado de magnitud e importancia que este tenga, mediante los siguientes criterios:

- Carácter
- Intensidad
- Extensión
- Duración
- Reversibilidad
- Riesgo

CARÁCTER

Este criterio se refiere, a si el impacto va a ser positivo o negativo al momento de la ejecución de la actividad, como se indica en el Cuadro 3.

Cuadro 3.

Carácter de un impacto ambiental

CARÁCTER	
Positivo (+)	Si la actividad presenta una mejora relativa a su estado previo a la ejecución del proyecto.
Negativo (-)	Si la actividad presenta deterioro relativo a su estado previo a la ejecución del proyecto.

INTENSIDAD

Este término toma en cuenta el grado de incidencia de cada etapa sobre el entorno, teniendo una intensidad alta, moderada o baja como se muestra en el Cuadro 4.

Cuadro 4.

Intensidad del impacto ambiental

INTENSIDAD	
Alta	Cuando expresa una destrucción total en el área en la que se produce, que puede recuperarse a corto o mediano plazo.
Moderada	Cuando expresa una destrucción mediana producida por la acción de una actividad determinada, donde el impacto es reducido.
Baja	Cuando se refiere a una afección mínima y el impacto se pueda dar de manera natural o con utilización mínima de recursos e intervención del hombre.

EXTENSIÓN

La extensión involucra al área de influencia teórica del impacto en relación con el entorno de la actividad, la extensión puede ser regional, local y puntual como se muestra en el Cuadro 5.

Cuadro 5.

Extensión del impacto ambiental.

EXTENSIÓN	
Regional	El impacto no admite una ubicación precisa dentro del entorno de la etapa, teniendo influencia generalizada.
Local	Aproximadamente tres kilómetros a la redonda de donde se realiza la actividad del proyecto.
Puntual	Si la acción produce un efecto en un espacio pequeño, se considerará que el impacto tiene un carácter puntual.

DURACIÓN

Este factor tiene que ver con el tiempo que permanecerá el efecto desde su aparición, y a partir del cual, el factor afectado retornaría a las condiciones iniciales previas, teniendo una duración permanente, temporal o fugaz como se muestra en el Cuadro 6.

Cuadro 6.

Duración del impacto ambiental

DURACIÓN	
Permanente	Si el efecto tiene duración superior a los 10 años, se considera un efecto permanente
Temporal	Si dura entre 1 y 10 años, se lo toma como una acción temporal
Fugaz	Si la permanencia del efecto tiene lugar durante menos de un año, se considera una acción fugaz.

REVERSIBILIDAD

La reversibilidad se refiere a la posibilidad de reconstrucción del factor afectado como consecuencia de la acción realizada, es decir, la posibilidad de retornar a las condiciones iniciales previas a la acción, una vez que esta deja de actuar sobre el medio, teniendo una reversibilidad irrecuperable, poco recuperable y recuperable como se muestra en el Cuadro 7.

Cuadro 7.

Reversibilidad del impacto ambiental

REVERSIBILIDAD	
Irrecuperable	Si el impacto ambiental no permite que el factor afectado retorne a la normalidad.
Poco recuperable	Cuando el impacto ambiental ocasionado al factor afectado puede ser recuperable con la intervención humana.
Recuperable	Si el factor afectado puede volver a un estado similar al inicial sin necesidad de intervención externa alguna.

RIESGO

Este criterio tiene que ver con la probabilidad de ocurrencia del impacto ambiental, siendo el riesgo alto, medio o bajo como se muestra en el Cuadro 8.

Cuadro 8.

Riesgo del impacto ambiental

RIESGO	
Alto	Se tiene la seguridad de que el impacto se produzca en forma real.
Medio	Cuando se tiene la posibilidad de que se produzca o no el impacto.
Bajo	Cuando no hay la posibilidad de que el impacto se produzca.

De acuerdo a valores de escala que se dará a las siguientes variables se calculará la magnitud y la importancia, en la Tabla 4 se detallan los criterios de valoración de impactos ambientales.

Tabla 4.

Criterios de evaluación de impactos ambientales.

EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES			
VARIABLE	SIMBOLOGÍA	CARÁCTER	VALOR
Intensidad	I	Alta	3
		Moderada	2
		Baja	1
Extensión	E	Regional	3
		Local	2
		Puntual	1
Duración	D	Permanente	3
		Temporal	2
		Fugaz	1
Reversibilidad	RV	Irrecuperable	3
		Poco recuperable	2
		Recuperable	1
Riesgo	RG	Alto	3
		Medio	2
		Bajo	1

La magnitud de los impactos será cuantificada en base a la suma de los criterios de intensidad, extensión y duración. Para dicha cuantificación se dará pesos a los criterios ya mencionados, de la siguiente manera:

- Peso del criterio de intensidad: 0,45
- Peso del criterio de extensión: 0,45
- Peso del criterio de duración: 0,10

De los pesos asignados a los diferentes criterios incluidos para cuantificar la magnitud del impacto, la ecuación para calcular la magnitud es:

$$M = (0,45I) + (0,45E) + (0,10D)$$

Ecuación (1)

Donde:

- M: Magnitud del impacto ambiental.
- I: Intensidad del impacto ambiental.
- E: Extensión del impacto ambiental.
- D: Duración del impacto ambiental.

En cuanto a la importancia del impacto ambiental (IM) se cuantificará conforme la suma de la extensión, reversibilidad y riesgo del impacto ambiental. Al igual que en el cálculo de la magnitud del impacto ambiental se asumirán pesos a los criterios incluidos para la cuantificación de la importancia:

- Peso del criterio de extensión: 0,25
- Peso del criterio de reversibilidad: 0,30
- Peso del criterio de riesgo: 0,45

Quedando de la siguiente manera la ecuación para cuantificar la importancia del impacto ambiental:

$$IM = (0,25E) + (0,30RV) + (0,45RG)$$

Ecuación (2)

Donde:

- IM: Importancia del impacto ambiental.
- E: Extensión del impacto ambiental.
- RV: Reversibilidad del impacto ambiental.
- RG: Riesgo del impacto ambiental.

Una vez cuantificados, tanto magnitud como importancia del impacto ambiental, se procederá con la interpretación de los datos obtenidos. La interpretación se dará de acuerdo a la Tabla 5, en la que se detallan las escalas para la valoración del impacto ambiental de los resultados obtenidos, de la magnitud e importancia del impacto se deberán valorar de acuerdo a la Escala de Valoración de la Magnitud e Importancia del Impacto.

Tabla 5.

Valoración de la magnitud e importancia del impacto.

ESCALA DE VALORACIÓN DE LA MAGNITUD E IMPORTANCIA DEL IMPACTO AMBIENTAL	
Valor estimado	Valor del impacto
1,0 – 1,6	Bajo
1,7 – 2,3	Medio
2,4 – 3,0	Alto

Y por último, para saber que tan severo es el impacto ambiental se tiene la escala de la Tabla 6, y los valores de comparación saldrán del producto de la magnitud e importancia calculadas previamente.

Tabla 6.

Valoración de la severidad del impacto

ESCALA DE VALORACIÓN DE LA SEVERIDAD DEL IMPACTO AMBIENTAL	
VALORES ESTIMADOS	SEVERIDAD DEL IMPACTO
1,0 – 3,0	Poco Significativo
3,1 – 6,0	Medianamente Significativo
6,1 – 9,0	Altamente Significativo

Teniendo en cuenta todo lo expuesto anteriormente, y aplicando cada criterio a cada actividad del reciclaje del PET se tiene la Tabla 7.

Como se puede ver en la Tabla 7, la mayoría de impactos ambientales son poco significativos, a excepción de la fase de lavado que es medianamente significativo, esto ocurre debido a que existe utilización de agua y que podría ocurrir gran impacto ambiental si no se toman las precauciones adecuadas. Teniendo en cuenta todo esto, se puede decir que el impacto que tendría el reciclaje de PET será positivo.

Tabla 7.

Matriz de calificación de impacto ambiental de las actividades del reciclaje de PET.

ETAPA	ACTIVIDADES	MEDIO	FACTOR	CALIFICACION DE IMPACTOS AMBIENTALES											TOTAL (M*I)	SEVERIDAD		
				C	MAGNITUD (M)				IMPORTANCIA (I)				TOTAL (M*I)	SEVERIDAD				
					I	E	D	CALIF.	ESCALA	E	RV	RG					CALIF.	ESCALA
Almacenamiento y clasificación de botellas PET	Recepción de botellas PET	Físico	Vistas y Paisaje	-1	1	1	3	1.2	BAJO	1	1	1	1.0	BAJO	-1.20	POCO SIGNIFICATIVO		
		Biótico	Vectores, Insectos y Enfermedades	-1	3	1	2	2.0	MEDIO	1	1	2	1.5	BAJO	-2.90	POCO SIGNIFICATIVO		
	Almacenamiento de PET	Social	Salud		1	3	2	2	2.5	ALTA	2	1	1	1.3	BAJO	3.06	POCO SIGNIFICATIVO.	
			Seguridad industrial		-1	1	1	1	1.0	BAJO	1	1	1	1.0	BAJO	-1.00	POCO SIGNIFICATIVO	
		Físico	Calidad del aire		-1	1	1	1	1.0	BAJO	1	1	1	1.0	BAJO	-1.00	POCO SIGNIFICATIVO	
			Vistas y Paisaje		-1	2	1	1	1.5	BAJO	1	1	1	1.0	BAJO	-1.45	POCO SIGNIFICATIVO	
			Biótico	Vectores, Insectos y Enfermedades		-1	3	1	2	2.0	MEDIO	1	1	2	1.5	BAJO	-2.90	POCO SIGNIFICATIVO
			Social	Salud		1	3	2	2	2.5	ALTA	2	1	1	1.3	BAJO	3.06	POCO SIGNIFICATIVO.
	Clasificación de botellas PET	Social	Seguridad industrial		-1	1	1	1	1.0	BAJO	1	1	1	1.0	BAJO	-1.00	POCO SIGNIFICATIVO	
			Vistas y Paisaje		-1	2	1	1	1.5	BAJO	1	1	1	1.0	BAJO	-1.45	POCO SIGNIFICATIVO	
		Físico	Biótico	Vectores, Insectos y Enfermedades		-1	3	1	2	2	MEDIO	1	1	2	1.5	BAJO	-2.90	POCO SIGNIFICATIVO
			Social	Salud		1	3	2	2	2.5	ALTA	2	1	1	1.3	BAJO	3.06	POCO SIGNIFICATIVO.
			Seguridad industrial		-1	2	1	1	1.5	BAJO	1	1	1	1.0	BAJO	-1.45	POCO SIGNIFICATIVO	
			Vistas y Paisaje		-1	2	1	1	1.5	BAJO	1	1	1	1.0	BAJO	-1.45	POCO SIGNIFICATIVO	
Separación manual de tapas y etiquetas	Separación manual de tapas	Físico	Vistas y Paisaje		-1	2	1	1	1.5	BAJO	1	1	1	1.0	BAJO	-1.45	POCO SIGNIFICATIVO	
		Biótico	Vectores, Insectos y Enfermedades		-1	3	1	2	2	MEDIO	1	1	2	1.5	BAJO	-2.90	POCO SIGNIFICATIVO	
		Social	Salud		1	3	2	2	2.5	ALTA	2	1	1	1.3	BAJO	3.06	POCO SIGNIFICATIVO.	
			Seguridad industrial		-1	2	1	1	1.5	BAJO	1	1	1	1.0	BAJO	-1.45	POCO SIGNIFICATIVO	
	Separación manual de etiquetas	Físico	Vistas y Paisaje		-1	2	1	1	1.5	BAJO	1	1	1	1.0	BAJO	-1.45	POCO SIGNIFICATIVO	
		Biótico	Vectores, Insectos y Enfermedades		-1	3	1	2	2.0	MEDIO	1	1	2	1.5	BAJO	-2.90	POCO SIGNIFICATIVO	
		Social	Salud		1	3	2	2	2.5	ALTA	2	1	1	1.3	BAJO	3.06	POCO SIGNIFICATIVO.	
			Seguridad industrial		-1	2	1	1	1.5	BAJO	1	1	1	1.0	BAJO	-1.45	POCO SIGNIFICATIVO	
Lavado manual de botellas PET	Mezcla de agua con detergente	Físico	Aguas Superficiales		-1	2	2	2	2.0	MEDIO	2	2	2	2.0	MEDIO	-4.00	MEDIANAMENTE SIGNIFICATIVO	
		Social	Salud		1	2	2	2	2.0	MEDIO	2	2	2	2.0	MEDIO	4.00	MEDIANAMENTE SIGNIFICATIVO.	
			Seguridad industrial		-1	2	1	1	1.5	BAJO	1	1	1	1.0	BAJO	-1.45	POCO SIGNIFICATIVO	
	Limpieza de botellas PET	Físico	Aguas Superficiales		-1	2	2	2	2.0	MEDIO	2	2	2	2.0	MEDIO	-4.00	MEDIANAMENTE SIGNIFICATIVO	
		Social	Salud		1	2	2	2	2.0	MEDIO	2	2	2	2.0	MEDIO	4.00	MEDIANAMENTE SIGNIFICATIVO.	
			Seguridad industrial		-1	2	1	1	1.5	BAJO	1	1	1	1.0	BAJO	-1.45	POCO SIGNIFICATIVO	
			Físico	Aguas Superficiales		-1	2	2	2	2.0	MEDIO	2	2	2	2.0	MEDIO	-4.00	MEDIANAMENTE SIGNIFICATIVO
	Desecho de agua utilizada	Físico	Aguas Superficiales		-1	2	2	2	2.0	MEDIO	2	2	2	2.0	MEDIO	-4.00	MEDIANAMENTE SIGNIFICATIVO	
		Social	Salud		1	2	2	2	2.0	MEDIO	2	2	2	2.0	MEDIO	4.00	MEDIANAMENTE SIGNIFICATIVO.	
	Seguridad			-1	2	1	1	1.5	BAJO	1	1	1	1.0	BAJO	-1.45	POCO SIGNIFICATIVO		
Triturado de botellas PET	Alimentación de PET al molino	Social	Salud		1	1	1	1	1.0	BAJO	1	1	1	1.0	BAJO	1.00	POCO SIGNIFICATIVO.	
		Seguridad industrial		-1	1	1	1	1.0	BAJO	1	1	1	1.0	BAJO	-1.00	POCO SIGNIFICATIVO		
			Físico	Nivel sonoro		-1	2	1	1	1.5	BAJO	1	1	1	1.0	BAJO	-1.45	POCO SIGNIFICATIVO
	Social	Salud		1	2	1	1	1.5	BAJO	1	1	1	1.0	BAJO	1.45	POCO SIGNIFICATIVO.		
		Seguridad industrial		-1	2	1	1	1.5	BAJO	1	1	1	1.0	BAJO	-1.45	POCO SIGNIFICATIVO		
Almacenamiento e inspección de escama	Inspección de escama	Social	Salud		1	2	1	1	1.5	BAJO	1	1	1	1.0	BAJO	1.45	POCO SIGNIFICATIVO.	
		Seguridad industrial		-1	1	1	1	1.0	BAJO	1	1	1	1.0	BAJO	-1.00	POCO SIGNIFICATIVO		
	Almacenamiento de escama	Físico	Vistas y Paisaje		-1	2	1	1	1.5	BAJO	1	1	1	1.0	BAJO	-1.45	POCO SIGNIFICATIVO	
		Social	Salud		1	3	2	2	2.5	ALTA	2	1	1	1.3	BAJO	3.06	POCO SIGNIFICATIVO.	
			Seguridad industrial		-1	1	1	1	1.0	BAJO	1	1	1	1.0	BAJO	-1.00	POCO SIGNIFICATIVO	

CAPÍTULO III

DISEÑO DEL PROCESO DE RECICLADO

3.1 Diseño y capacidad del sistema de producción.

Las decisiones relacionadas con el diseño y la capacidad conjuntan las consideraciones sobre la localización y la distribución de planta. En el diseño de una instalación puede afectar la ubicación, y ésta a su vez, afecta la capacidad. Las capacidades deben ser establecidas en unidades físicas, tiempos de servicio, u horas de trabajo, más que un volumen de ventas en dinero.

3.1.1 Capacidad de diseño.

La capacidad de diseño de una instalación es la tasa de salida de productos estandarizados en condiciones normales de operación. Esto se deriva de un conocimiento de la demanda de los consumidores y de establecer una política para satisfacer esa demanda.

Al ser esta una época en la que el reciclaje es fundamental para la optimización de recursos, la demanda del PET molido (escama) es elevada, ya que es utilizada en la industrial textil en la elaboración de hilo, calzado, camisetas, etc.

En el país una de las principales empresas pioneras en el reciclaje de PET es ENKADOR S.A., empresa que recicla el PET para procesarlo a chips de polietileno y con el tratamiento adecuado utilizarlo para la fabricación de hilo. Es por esto que la demanda se va a concentrar a la necesidad de esta empresa.

Para tomar la decisión de direccionar nuestra demanda total hacia la necesidad de ENKADOR S.A. se tuvo en cuenta los siguientes factores proporcionados por el Ing. Fernando Carrera, Gerente de Resinas:

- La capacidad de producción del equipo que produce el chip de polietileno: Este equipo transforma la escama en chip de polietileno para poder producir hilo. La capacidad de producción es de 30 toneladas diarias, lo que significa que para producir esta cantidad de chips, se necesita una cantidad similar de escama.
- La capacidad de producción de escama a ser procesada: El equipo que produce la escama tiene una capacidad de producción de 6 toneladas diarias.

Al tener en cuenta ambas capacidades tenemos que la demanda de escama es aproximadamente de 24 toneladas diarias.

$$\textit{Demanda total de escama} = \textit{Demanda de escama} - \textit{Capacidad de producir escama}$$

Ecuación (3)

$$\textit{Demanda total de escama} = 30 \textit{ toneladas} - 6 \textit{ toneladas}$$

$$\textit{Demanda total de escama} = 24 \textit{ toneladas}$$

El criterio que se usa generalmente para determinar la demanda a la que se va a enfocar el producto, es tomar solamente el 40% de la demanda total o insatisfecha. Debido a que hay que tomar en cuenta una posible competencia que produce el mismo producto y con esto asegurar una parte de la demanda total o insatisfecha.

$$\textit{Demanda considerada} = \textit{Demanda total de escama} * 40\%$$

Ecuación (4)

$$\text{Demanda considerada} = 24 \text{ toneladas} * 40\%$$

$$\text{Demanda considerada} = 9.6 \text{ toneladas}$$

De acuerdo al criterio aplicado se debería producir 9.6 toneladas de escama diarias. Pero al tomar en cuenta la provisión de materia prima para obtener la escama (botellas PET), tenemos que no abastece esta demanda, por lo que, construir un molino para esa capacidad sería sobredimensionarlo y costoso. La provisión de materia prima posible a utilizar se lo calculó en base a la encuesta realizada (Ver Anexo 1) en el cantón Sucre provincia de Manabí, siendo la capacidad de diseño de entre 50 a 100 kg por hora.

3.1.2 Capacidad del sistema.

La capacidad del sistema es la máxima producción de un producto específico o mezcla de productos que el sistema de trabajadores y máquinas es capaz de generar como un todo integrado. De la capacidad del sistema depende la eficiencia (ES) del mismo, que es una medida de la producción real de bienes y servicios como porcentaje de la capacidad del sistema.

$$ES = \frac{\text{producción real}}{\text{capacidad del sistema}}$$

Ecuación (5)

La Figura 15 muestra la relación que tiene la capacidad de diseño, la capacidad del sistema y la producción real.

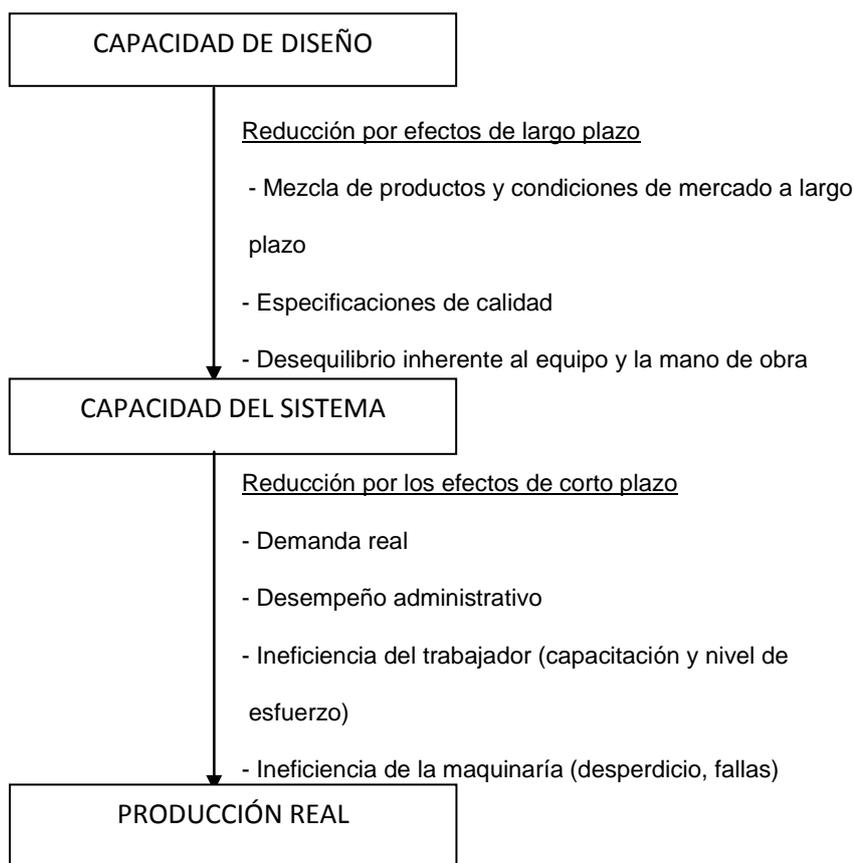


Figura 15. Relación entre capacidad de diseño, capacidad de producción y producción real.

En cuanto a la capacidad de diseño calculada de 50 a 100 kg por hora, asumiendo una eficiencia del sistema del 94% y una producción real de 67 kg por hora (un aproximado a cantidades que se pueden producir) la capacidad del sistema se calcula:

$$\text{Capacidad del sistema} = \frac{\text{producción real}}{ES}$$

Ecuación (6)

$$\text{Capacidad del sistema} = \frac{67}{0.94}$$

$$\text{Capacidad del sistema} = 71.28 \text{ kg/h}$$

Se tomará una capacidad del sistema de 71.28 kg por hora, siempre y cuando la eficiencia del sistema y la producción real se mantengan constantes.

Adicionalmente se debe tomar en cuenta que el trabajo de producción no siempre será continuo, es decir, habrá tiempos muertos en los cuales la producción se detendrá o no será la acostumbrada.

Dentro de los tiempos muertos se pueden tener:

- Trabamientos: Cuando exista un excedente en la alimentación de materia prima y esta no pueda ser procesada con la brevedad necesaria, este tiempo muerto será aproximadamente de 30 minutos por trabamiento (0.5 hora/ por trabamiento).
- Mantenimiento preventivo: Siempre que exista un mantenimiento debidamente programado, habrá la necesidad de parar los trabajos de producción.
- Puesta en marcha de la máquina: Este tiempo muerto se lo tendrá todos los días, ya que al encender la máquina no se la puede alimentar de materia prima inmediatamente, siempre se necesitará un tiempo de estabilización de los componentes de la máquina, se asume un tiempo de 5 minutos (0.08 horas).
- Limpieza al final de la jornada de trabajo: Con el propósito de alargar la vida útil de los componentes de la máquina, se realizará una limpieza total de la máquina, esto tomará 15 minutos (0.25 horas).
- Posibles cortes de fluido eléctrico: Este tiempo muerto vendría a ser el que no se puede controlar, ya que se depende directamente del fluido eléctrico público.

- Necesidades de los operarios: Este tiempo muerto será cuando los operarios tengan necesidades biológicas, que son inherentes de cada ser humano, y que se asume un tiempo de 20 minutos (0.33 horas).
- Daños o fallas que se presentan en las máquinas: Este tiempo muerto será el más crítico, ya que al existir alguna falla se detiene la producción por un intervalo de tiempo mayor que el resto de tiempos muertos, y debido a la disponibilidad de repuestos en la zona a trabajar, el tiempo estimado es de 5 horas.
- Reproceso de material que no cumple con las características necesarias: El reproceso de material se puede dar debido a descalibración de las máquinas, es otro tiempo muerto que se lo puede denominar crítico, y que podría llegar a tener espacio de 1 hora.

3.1.3 Estrategia de operación.

Para poder mantener una eficiencia del sistema del 94% y una producción real de 67 kg por hora, se deben aplicar las siguientes estrategias:

- Contando con el espacio físico adecuado para el almacenamiento tanto de materia prima como de escama.
- Teniendo personal calificado y capacitado en la operación de las máquinas para evitar tener contratiempos en la parte operativa del sistema.
- Siendo responsables en el trato de desechos y desperdicios.
- Cumpliendo con el mantenimiento preventivo programado.

- Implementando un sistema de seguridad industrial y salud ocupacional adecuado de acuerdo a nuestra actividad.
- Logrando abrirnos mercado para poder tener una buena posición en el mercado, y tener flujo de caja para poder permitir que todo lo programado se desarrolle de manera adecuada.
- Manteniendo un sistema de calidad acorde a las especificaciones del cliente.

3.2 Distribución de las instalaciones.

Las decisiones de distribución están relacionadas en el arreglo de las instalaciones de producción, soporte, servicio al cliente, y otras. Las distribuciones pueden ser inversiones costosas, pero afectan al manejo de materiales, la utilización del equipo, los niveles de inventarios en almacén, la productividad de los trabajadores e inclusive la comunicación del grupo y la moral de los empleados. Cualquier cambio significativo que se haga en las operaciones puede hacer necesario que se revise la distribución existente.

Existen varios tipos de distribuciones, pero la más conveniente para el presente sistema, es la distribución por producto, que es la que agrupa a los trabajadores y el equipo de acuerdo con la secuencia de operaciones realizadas sobre el producto. Esto facilita la movilización de materia prima en sus diferentes procesos, y deja una posibilidad de que con los recursos económicos necesarios se pueda llegar a la automatización total o de un proceso, también permite dejar a los trabajadores tareas comunes y repetitivas.

En el Cuadro 9 se pueden apreciar las ventajas y desventajas de este tipo de distribución.

Cuadro 9.

Ventajas y desventajas de la distribución por producto

DISTRIBUCIÓN POR PRODUCTO	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
Alta utilización de personal y equipo	Sistema inflexible
Menor costo del manejo de materiales	Alto costo de equipos especializados
Menor costo de la mano de obra no calificada	Aburrimiento, trabajos monótonos
Control de producción más simple	Operaciones interdependientes

Un esquema de la distribución de planta por producto para el reciclaje de PET se muestra en la Figura 16, siendo los cuadrados una representación del personal mínimo requerido para cada proceso o actividad.

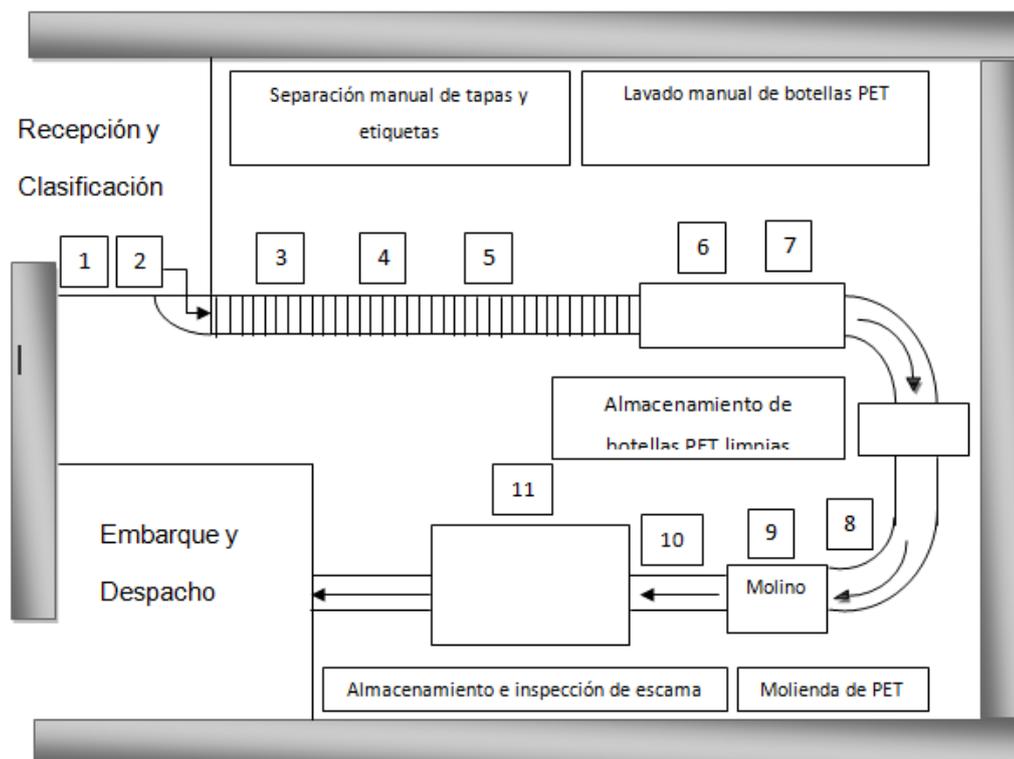


Figura 16. Plano de distribución de la planta para reciclar PET.

3.2.1 Tipo de producto.

El producto es un bien, y va a ser la escama que se obtiene del proceso de molienda de botellas plásticas de PET, esta escama tendrá un tamaño máximo de 20 mm de longitud, sin alguna forma geométrica definida. La prioridad va a ser la escama obtenida de las botellas PET transparente de paredes delgadas.

3.2.2 Tipo de proceso.

En un principio todo el proceso va a ser manual a excepción de la molienda del PET. Pero con el tiempo se puede ir adquiriendo la tecnología necesaria para la automatización de todos los procesos, pudiendo eliminar así el fallo humano.

3.2.3 Factores determinantes de la distribución.

Los factores determinantes de la distribución son en gran parte determinado por los siguientes:

- Tipo de producto.
- Tipo de proceso.
- Volumen de producción.

El tipo de producto es un factor a tomar muy en cuenta, si es bien o servicio, ya que la disposición y distribución de la maquinaria dependen de eso, como se va a realizar el producto y cuáles son los estándares de calidad que el producto debe cumplir para poder introducirlo en el mercado.

Otro factor importante es el tipo de proceso ya que dentro de este factor se encuentra la tecnología que se va a utilizar en el proceso de producción, los requerimientos mínimos de la materia prima a utilizarse si es bien o de los servicios a entregar.

El volumen de producción es otro factor determinante ya que si se producen volúmenes grandes se necesitaría espacio para el almacenamiento tanto de la materia prima como del producto final, y si se producen volúmenes pequeños el movimiento tanto de materia prima como de producto final deberá ser el menor posible para no incurrir en gastos de movilización.

3.2.4 Volumen de producción.

El volumen de producción está directamente relacionado con la demanda que genere el mercado.

Lo que se pretende es tener volúmenes grandes-continuos y no pequeños-intermitentes, porque se logra un posicionamiento en el mercado adicionalmente se pueden optimizar recursos. El volumen de producción constante que se espera tener es de 67 kg/ h.

3.2.5 Balance de la línea de producción.

El balanceo de línea es una distribución de las actividades secuenciales de trabajo en los centros laborales para lograr el máximo aprovechamiento posible de la mano de obra y equipo, y de ese modo reducir o eliminar el tiempo ocioso. Las actividades que son compatibles entre sí, se combinan en grupos de tiempos aproximadamente iguales, que no violan la procedencia de las relaciones.

Una manera gráfica de representar las tareas precedentes y su secuencia desde la recepción de materia prima hasta el producto final que es la escama se elaboró la Figura 17.

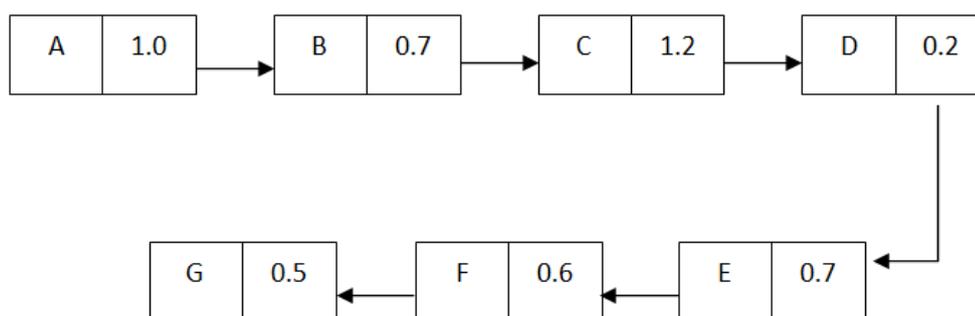


Figura 17. Secuencia de actividades en el reciclaje de PET.

En la Figura 17 se detallan las actividades con sus respectivos tiempos de duración (expresado en minutos/ kg) cabe tener en cuenta que existe una ruta crítica en todo el proceso, es decir, que se debe procurar evitar demoras en cualquiera de las actividades las mismas que se detallan en la Tabla 8.

Tabla 8.

Descripción de las actividades para reciclaje de PET.

ACTIVIDADES DEL RECICLAJE DE PET		
NOMBRE	ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN
A	Recepción y clasificación de botellas PET.	En esta actividad se captará las botellas de PET, se las almacenará y clasificará para iniciar con el procesamiento.
B	Separación manual de tapas y etiquetas.	Una vez clasificadas las botellas a utilizarse en el reciclaje de PET, se procede a realizar la separación manual de tapas y etiquetas, ya que estas son agentes contaminantes en el reciclaje del PET.
C	Lavado manual de botellas PET.	Ya separados los agentes contaminantes (tapas y etiquetas), se procede a realizar el lavado manual de las botellas PET mediante la utilización de una mezcla de detergente y agua.
D	Almacenamiento de botellas PET limpias.	Teniendo las botellas PET sin impurezas, se procede al almacenamiento de las mismas, con el propósito de tener una alimentación continua al molino triturador de PET.
E	Molienda de PET.	Se toman las botellas limpias y se alimenta al molino triturador de PET para obtener la escama.
F	Almacenamiento e inspección de escama.	Para poder comercializar la escama producida se debe hacer una inspección de la misma previo a su almacenamiento.
G	Embarque y despacho de escama.	Una vez que la escama superó el control de calidad se procede al embarque y despacho de la misma.

CAPÍTULO IV

DISEÑO DEL MOLINO

4.1. Características de la máquina a diseñarse.

4.1.2. Presentación de alternativas.

Las siguientes alternativas fueron tomadas de un catálogo de molinos trituradores de PET existentes en el mercado, la evaluación de las alternativas va estar enfocada al tipo de cámara de corte que posee cada alternativa, ya que para el diseño y construcción, la cámara de corte es lo fundamental.

- a) Presentación alternativa 1: MOLINOS MODELO MAS 1 Y MAS 2 CON ROTOR ABIERTO, CON 3 CUCHILLAS MÓVILES Y 2 FIJAS (Wittman, 2012)

VENTAJAS:

- Los molinos producen un material triturado de alta calidad y un mínimo de polvo.
- Todo molino lleva incorporado un calibre de pre-ajuste que permite el ajuste fácil y rápido de las cuchillas para una distancia de corte óptima.
- Las cuchillas móviles sesgadas del rotor abierto, combinadas con dos cuchillas fijas inclinadas ofrecen un doble corte tipo tijera que mejora aún más la calidad del triturado y minimiza el polvo.

- La circulación óptima del aire dentro de la cámara de corte previene la degradación térmica de la estructura molecular o la fundición del material.
- Los discos porta cuchillas del rotor aseguran un fácil procedimiento de limpieza y mantenimiento.
- Limpieza rápida y fácil.
- Trituración de alta calidad gracias a la baja velocidad del rotor (200 rpm) (Wittman, 2012), dato estipulado por el fabricante.
- Las cuchillas móviles y fijas se pueden afilar.

En cuanto a la cámara de corte se tiene:

- 3 cuchillas móviles y 2 fijas, como se indica en la figura 18.



Figura 18. Cámara de corte del molino triturador de plásticos con rotor abierto.

Fuente: (Wittman, 2012).

Los elementos que posee el molino triturador de plásticos con rotor abierto se muestran en la figura 19.

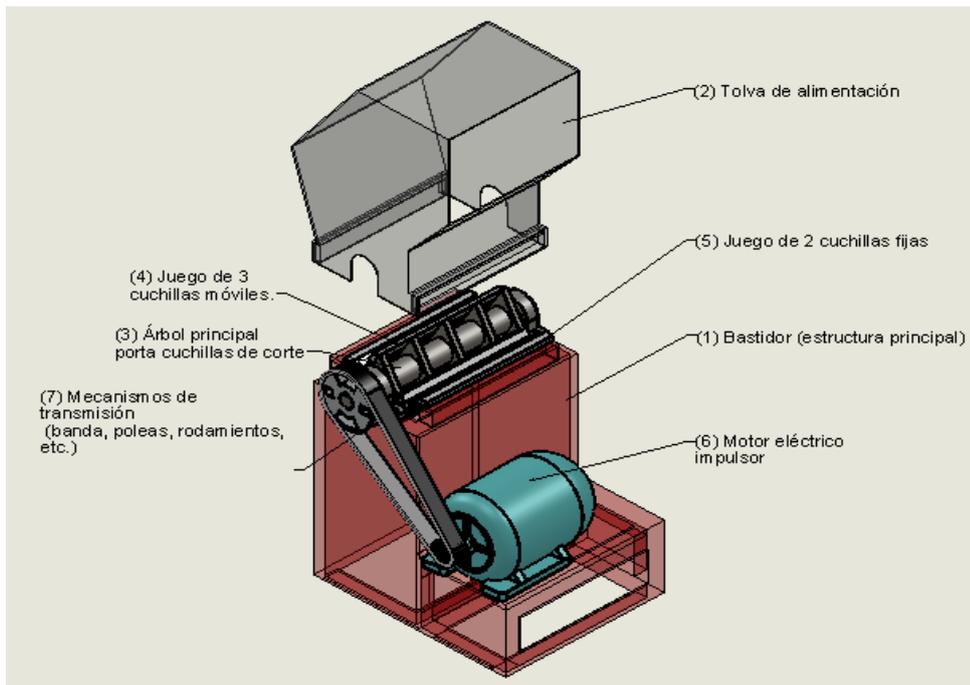


Figura 19. Molino triturador de plásticos con rotor abierto, 3 cuchillas móviles y 2 fijas.

b) Presentación alternativa 2: MOLINO CON ROTOR ESCALONADO, CON 4x3 CUCHILLAS ESCALONADAS MÓVILES Y 2 FIJAS

VENTAJAS:

- Trituración de excelente calidad.
- Las cuchillas escalonadas del rotor ofrecen la solución óptima para “empujar” las piezas hacia la cámara de corte.
- La fuerza de corte es distribuida a través de varias cuchillas giratorias de alta aleación y endurecidas, que ofrecen un corte tipo tijera simple para mayor ahorro de energía, junto con una operación silenciosa y alto rendimiento de corte.
- Las cuchillas giratorias se pueden afilar varias veces dependiendo del desgaste.

- La geometría de corte de las cuchillas permite que sean cambiadas sin necesidad de ajustes adicionales.
- El tiempo de parada al cambiar cuchillas se reduce a un mínimo.
- Limpieza fácil y simple.
- Trituración de alta calidad gracias a la baja velocidad del rotor (200 a 700 rpm) (Wittman, 2012), dato estipulado por el fabricante.

En cuanto a la cámara de corte se tiene:

- Con 4 x 3 cuchillas escalonadas y 2 fijas como se indica en la figura 20.

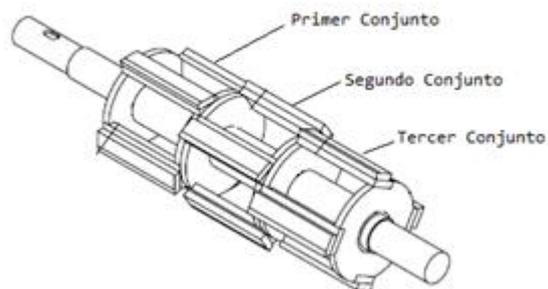


Figura 20. Cámara de corte del molino triturador de plásticos con 4 x 3 cuchillas escalonadas y 2 fijas.

Los elementos que posee el molino triturador de plásticos con rotor escalonado se pueden ver en la Figura 21.

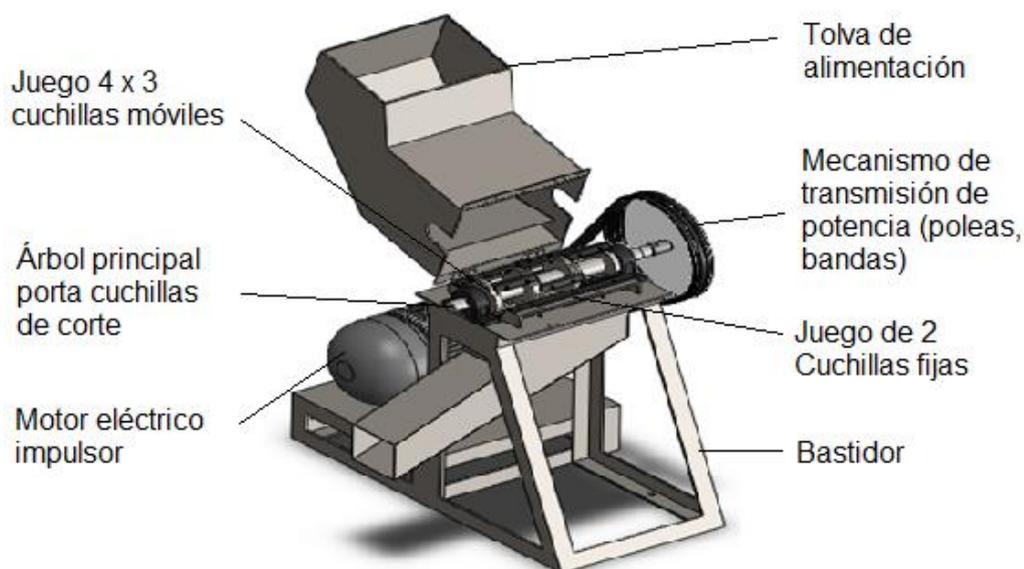


Figura 21. Molino triturador de plásticos con rotor escalonado, con 4x3 cuchillas escalonadas móviles y 2 fijas.

4.1.2.1. Evaluación de alternativas

Para la evaluación de las alternativas se va a utilizar el método de suma ponderada, este es un método cuantitativo para clasificar y priorizar las opciones.

CRITERIOS DE CALIFICACIÓN:

1. Costos de construcción.
2. Riesgos de seguridad.
3. Costo de mantenimiento.
4. Tiempo de mantenimiento.

EVALUACIÓN Y PONDERACIÓN DE CADA CRITERIO GENERAL.

Ponderación de una escala de 0 (menos factible) a 10 (más factible) para cada criterio.

1. Costos de construcción.

El costo de construcción tiene mucha importancia al momento de diseñar el equipo, ya que se debe tomar en cuenta en cada alternativa la cantidad de elementos que conforman la cámara de corte, también se debe tomar en cuenta el desempeño en la producción de cada alternativa, por todo lo antes mencionado y por el presupuesto estimado, se asigna al costo de construcción una ponderación de 70%.

2. Riesgos de seguridad.

Los riesgos de seguridad que se tienen al momento de la puesta en marcha del molino, se pueden clasificar como riesgos mecánicos y riesgos asociados al ruido generado en la operación de la máquina.

Los riesgos mecánicos: choques con los equipos en movimiento, especialmente en marcha (cuchillas), rotura de poleas, rotura de bandas, y el enredamiento de la ropa.

Ruido: fatiga y daños físicos en el oído, al estar sujeto a niveles de ruido que excedan las normas recomendadas (por ejemplo, un nivel de ruido ponderado por el tiempo durante un período de 8 horas que sea mayor de 90 dB).

A pesar de que los riesgos de seguridad son importantes, estos se pueden contrarrestar con una adecuada capacitación y dotación de equipo de seguridad a los operarios, es por eso que su ponderación será de 10%.

3. Costo de mantenimiento.

Los costos de mantenimiento están estrechamente ligados con el rendimiento de la empresa y serán bajos si la conservación de los equipos es mejor, tiene una gran influencia la cantidad de tiempo que opera el equipo y la atención que este requiere, es por eso que su ponderación será de 10%.

4. Tiempo de mantenimiento.

El tiempo de mantenimiento se puede asociar a los costos de tiempos perdidos o muertos, ya que al no tener un mantenimiento adecuado o al realizar el mantenimiento programado se incurrirá en paros de producción, baja efectividad, desperdicios de material, mala calidad, demoras en la entregas del producto final, etc. De acuerdo a lo mencionado, el tiempo de mantenimiento tiene una alta importancia, pero si se realiza un programa adecuado de mantenimiento se puede contrarrestar su efecto, por lo que tiene una ponderación de 10%.

EVALUACIÓN Y PONDERACIÓN DE LOS CRITERIOS DE CADA ALTERNATIVA.

1. Costos de construcción.

ALTERNATIVA 1

Como se mencionó anteriormente el costo de construcción de la cámara de corte es muy importante, en la alternativa 1, el costo de construcción es medianamente factible debido al número y costo de partes a construir (11 partes), su evaluación será de 7.

ALTERNATIVA 2

En esta alternativa si bien el número de partes de la cámara de corte es de 30, el costo de dichos elementos no resulta ser muy significativo comparado con los de la alternativa 1, es por eso que su evaluación es 7.

2. Riesgos de seguridad.

El riesgo de la seguridad en las dos alternativas posee un alto nivel de importancia, su valor de evaluación será de 9, para que el operador no sufra algún tipo de accidente, es por eso que para el diseño y construcción del molino debemos tomar en cuenta el tipo de seguridad que se implementa en cada alternativa.

3. Costo de mantenimiento.

ALTERNATIVA 1.

El costo de mantenimiento es medianamente elevado y se concentrará fundamentalmente en el desgaste que puedan experimentar las cuchillas. Al existir tres cuchillas a lo largo del eje, cuando existe desgaste de las mismas el mantenimiento se hará por toda la longitud de las cuchillas, siendo una longitud considerable (420 mm) puede incrementar los costos de maquinado, por lo que su valor de evaluación será de 6.

ALTERNATIVA 2

Esta alternativa posee cuchillas con la tercera parte de la longitud (140 mm), sería necesario un maquinado de una longitud menor, pero se tendría que incrementar el costo del proceso de corte a la que la cuchilla debería ser sometida, por lo que su mantenimiento sería, en costo, similar o menor al de la alternativa 1, su valor de evaluación será de 8.

4. Tiempo de mantenimiento.

ALTERNATIVA 1.

El tiempo de mantenimiento está ligado con la producción de la máquina, como se mencionó anteriormente la cámara de corte de esta alternativa posee cuchillas que al momento de cambiarlas o afilarlas tomarían un tiempo considerable, su valor de evaluación es de 5.

ALTERNATIVA 2

A diferencia de la alternativa 1, al cambiar o afilar las cuchillas pequeñas no tomaría mucho tiempo, su valor de evaluación es de 7.

Tabla 9.

Matriz de evaluación de alternativas.

MATRIZ DE EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS							
CRITERIO	PONDERACIÓN	VALOR OPTIMO	ALTERNATIVA		EVA. POND.	ALTERNATIVA	EVA. POND.
	a	b	axb	1	A1	2	A2
				c	a x c	d	a x d
1	70%	10	7	7	4.9	7	4.9
2	10%	10	1	9	0.9	9	0.9
3	10%	10	1	6	0.6	8	0.8
4	10%	10	1	5	0.5	7	0.7
SUMA	100%		10		6.9		7.3

4.1.2.2. Selección de alternativa.

Con un análisis de las dos alternativas; gracias a la matriz de evaluación, se ha propuesto llevar a término la idea presentada en la alternativa 2 (7.3 puntos); es decir, se proyectará desde este momento el diseño y la construcción, como principio la alternativa 2 MOLINO CON ROTOR ESCALONADO, CON 4x3 CUCHILLAS ESCALONADAS MÓVILES Y 2 FIJAS. Esta aplicación con una cámara de corte de PET de 4x3 cuchillas

escalonadas móviles y dos fijas, siendo la alternativa que posee ventajas muy buenas, su costo de construcción no es tan elevado y su mantenimiento es medianamente económico.

4.2. Parámetros de diseño.

4.2.1. Capacidad de producción.

Como se menciona anteriormente en el Capítulo 3, de acuerdo a las encuestas realizadas la capacidad de producción será de 50 a 100 kg/h.

4.2.2. Componentes del molino triturador

De acuerdo a la figura 21, se tendrá la alimentación del molino triturador en la parte superior mediante la tolva de alimentación, la cual está conectada a la tobera que permite la conducción del material a triturarse hacia la cámara de corte, la cual está compuesta por el eje principal en el cual se encuentran los 4 discos portacuchillas, 12 placas portacuchillas ubicadas en los discos portacuchillas, 12 cuchillas móviles, 2 cuchillas fijas, 2 chumaceras, criba que permite el paso del material triturado de hasta 20 mm, el ducto de expulsión de producto final, todo esto sobre la estructura o bastidor del molino, para impulsar el molino se utilizará un motor eléctrico con un juego de poleas y bandas.

4.2.3. Geometría y dimensionamiento

Para la tolva de alimentación se elige una geometría como la de la Figura 22, que nos permite tener una alimentación necesaria de producto para alcanzar nuestra producción.

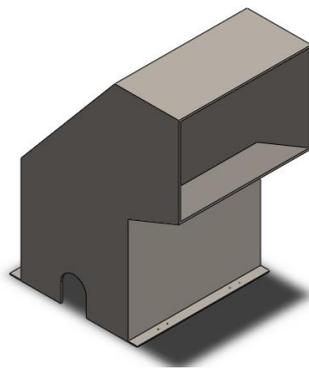


Figura 22. Esquema de tolva de alimentación.

Se elige el ancho de 436 mm debido a que la alimentación del molino debe ser continua y de botellas pequeñas (500 ml), la altura seleccionada de 300 mm nos garantiza una buena alimentación de materia prima (PET), las dimensiones de la tolva de alimentación se eligieron tomando en cuenta que las botellas de PET que se van a procesar deben ser ingresadas lo más compactadas posibles.

Las dimensiones de la cámara de corte se toman de acuerdo a las medidas recomendadas del catálogo de molinos Catálogo de Molinos Wittmann de acuerdo a la capacidad de producción requerida, y será de 420 mm de largo y de 196 mm de ancho.

Debido a que la tolva de alimentación va a estar sometida a esfuerzos que van a ser despreciables, se elige un espesor de pared de 3 mm, siendo este espesor mínimo para la aplicación de soldadura. Y para la cámara de corte se tomará un espesor de 3 mm, debido a que los esfuerzos a los que está sometida siguen siendo despreciables.

4.3. Cálculo de la potencia del molino.

4.3.1. Fuerza de corte (Rossi, 2012)

Para producir el efecto de cizallamiento, las cuchillas van a tener una disposición para que sus planos inclinados sean los filos de corte. Teniendo en cuenta que el ángulo de corte β debe ser entre 70° a 80° , mientras que el ángulo de ataque α estará entre 4° a 6° . El ángulo de apertura entre los filos cortantes γ será de 8° a 10° . En la Figura 23 se muestra un esquema de los ángulos en las cuchillas.

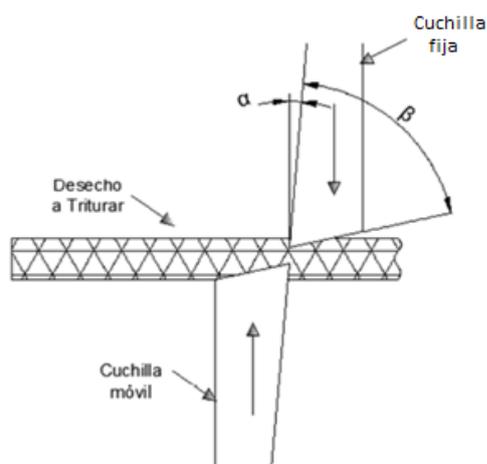


Figura 23. Ángulos de corte de cuchillas.

La fuerza de corte está dada por el producto del área del triángulo que se forma en el PET (con el ángulo de apertura entre filos cortantes γ) y el esfuerzo generado para realizar el corte, el triángulo se muestra en la Figura 24.

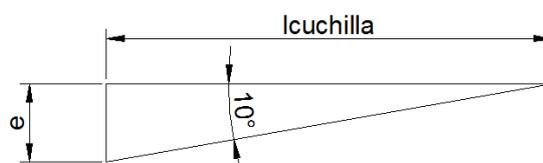


Figura 24. Triángulo sobre el cual se aplica la fuerza de corte.

El ángulo entre filos cortantes adquiere el valor de 10° , tomando un espesor de pared de botella PET de 1 mm (espesor más grueso de la botella localizado en la parte de la rosca de la botella), el esfuerzo a la rotura del PET (σ_R) tiene un valor de 9kg/mm^2 (88.26 MPa), reemplazando en las siguientes ecuaciones se tiene:

$$ep = 1\text{ mm}$$

Espesor del PET, en la zona de roscado en mm.

$$\sigma_R = 88.26\text{ MPa}$$

Carga de Rotura por tracción en MPa.

$$\gamma a = 10^\circ$$

Ángulo de abertura entre los filos cortantes.

Por lo tanto se tiene que la fuerza de corte se calcula:

$$F_{\text{corte}} = 0.5 * \sigma_R * \frac{ep^2}{\tan \gamma a}$$

Ecuación (7)

$$F_{\text{req}} = F_{\text{corte}} = 250.27\text{ N}$$

La fuerza necesaria para el corte de PET es de 250.27 N.

4.3.2. Fuerza de impacto.

Se ha incluido el cálculo de la fuerza de impacto debido a que al momento que se alimenta de PET al molino, en la cámara de corte existe un impacto instantáneo de forma súbita entre las cuchillas fijas y móviles al momento de atrapar el PET.

El cálculo de la fuerza de impacto se lo realizará utilizando la energía que absorbe el PET por unidad de área, dicha energía se la obtuvo mediante ensayos de laboratorio que se los puede revisar en el Anexo 2.

$$t = 50 \text{ mm}$$

Longitud del material que es cortado por la cuchilla.

$$G_c = 7563 \frac{\text{J}}{\text{m}^2}$$

Energía absorbida por unidad de área.

Se calcula la fuerza de impacto que se genera en el momento del corte.

$$F_i = 1.5 * G_c * t$$

Ecuación (8)

$$F_i = 567.23 \text{ N}$$

4.3.3. Fuerza de arrastre (tangencial) y fuerza normal (radial).

La fuerza de arrastre será la que se debe aplicar por las cuchillas móviles, para llevar el PET procesado y no procesado por la criba. El cálculo de la fuerza normal se lo realizará con una aproximación al cálculo del módulo de Young, con lo que se tiene:

$$h_{\text{arastre}} = 0.56 \text{ mm}$$

Alto de material de arrastre

$$h_{\text{olgura}} = 0.28 \text{ mm}$$

Holgura entre cuchilla y criba

De la diferencia de la altura del material de arrastre y la holgura entre cuchillas y criba se obtiene el desplazamiento del PET.

$$\delta_1 = \text{harastre} - \text{holgura}$$

Ecuación (9)

$$\delta = 0.28 \text{ mm}$$

$$L_1 = 140 \text{ mm}$$

Longitud de la cuchilla

$$ecuchilla = 1 \text{ mm}$$

Espesor de la punta de la cuchilla

Con estos datos se calcula el área de desplazamiento de material de arrastre.

$$A\delta_1 = L_1 * ecuchilla$$

Ecuación (10)

$$A\delta_1 = 140 \text{ mm}^2$$

$$E = 3628.46 \text{ MPa}$$

Módulo de Young del PET

Se calcula la fuerza normal.

$$Normal = \frac{(\delta_1 * A\delta_1 * E)}{L_1}$$

Ecuación (11)

$$Normal = 1015.97 \text{ N}$$

$$\mu = 0.2$$

Coefficiente de rozamiento dinámico del PET sobre el acero.

Mediante el producto de la fuerza normal con el coeficiente de rozamiento se encuentra la fuerza de arrastre.

$$Fr = \mu * Normal$$

Ecuación (12)

$$Fr = 203.19 N$$

El alto de material de arrastre se lo asume como el total de 2 espesores normales de botella de PET, es decir, 0.56 mm, la holgura entre cuchilla y criba será de un solo espesor de PET que es 0.28 mm, teniendo que el desplazamiento de PET que va a realizar la fuerza de arrastre, es la resta de la altura de material de arrastre menos la holgura entre cuchilla y criba. Como se mencionó cada cuchilla móvil tendrá una longitud de 140 mm. Una vez calculada la fuerza de normal o radial, se la multiplica por el coeficiente de fricción entre el PET y el acero, se asume una superficie totalmente liza y su valor es de 0.2, para obtener la fuerza de arrastre o tangencial, dando como resultado una fuerza normal o radial de 1015.97 N y una fuerza de arrastre o tangencial de 203.19 N.

Habiendo obtenido las fuerzas de arrastre y normal, se calcula la fuerza resultante entre estas dos fuerzas.

$$Rs = \sqrt{Fr^2 + Normal^2}$$

Ecuación (13)

$$Rs = 1036.09 N$$

$$\theta = 76^\circ$$

Ángulo formado entre la fuerza de arrastre y normal

4.3.4. Análisis de fuerzas y torque que actúan sobre el eje en la cámara de corte.

El análisis de las fuerzas y torques que actúan sobre el eje en la cámara de corte, se lo realizará tomando en cuenta la mayor cantidad de cuchillas que se encuentren actuando, y la posición que genere el mayor torque.

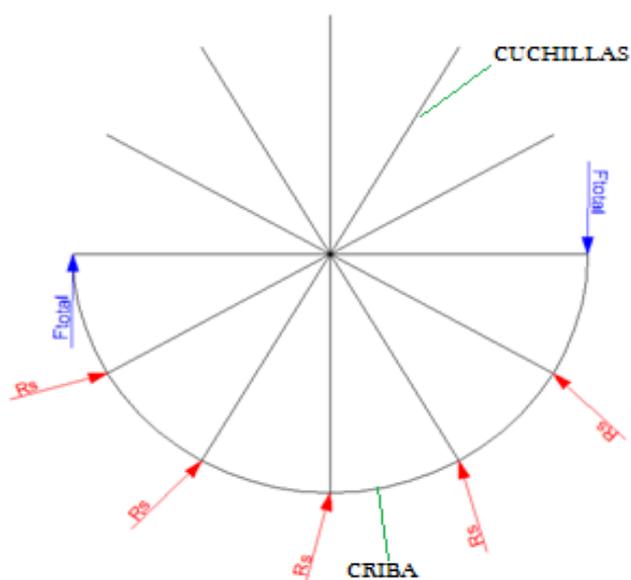


Figura 25. Esquema de fuerzas que actúan en la cámara de corte.

Teniendo en cuenta que la cámara de corte está formada por tres conjuntos de cuatro cuchillas móviles cada uno, la posición del eje en la que existe la mayor cantidad de cuchillas trabajando es la que se muestra en el esquema de la Figura 25, es decir, cinco cuchillas móviles se encuentran produciendo fuerzas de arrastre y normal, dos cuchillas móviles se encuentran produciendo fuerzas de corte e impacto, y las cinco cuchillas restantes no producen fuerzas significativas.

El análisis de fuerzas se lo va a realizar desde el conjunto más cercano a la polea hasta el más alejado, enumerando los conjuntos progresivamente empezando desde 1 hasta el 3.

4.3.4.1. Análisis de fuerzas que actúan en los conjuntos

4.3.4.1.1. Análisis de fuerza del conjunto 1

En el primer conjunto actúan dos cuchillas móviles produciendo fuerzas de arrastre y normal, y dos cuchillas que producen fuerzas no significativas como se muestra en el esquema de la Figura 26.

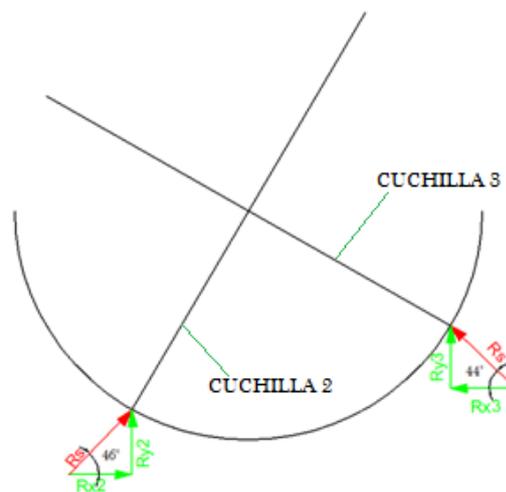


Figura 26. Esquema de las fuerzas que actúan en el conjunto 1.

CUCHILLA 2

$$\theta_2 = 46^\circ$$

Ángulo de la fuerza resultante.

Se descompone la fuerza resultante en sus componentes X e Y.

$$Rx_2 = R_s * \cos \theta_2$$

Ecuación (14)

$$Rx2 = 719.73 \text{ N}$$

$$Ry2 = Rs * \sin \theta 2$$

Ecuación (15)

$$Ry2 = 745.3 \text{ N}$$

CUCHILLA 3

$$\theta 3 = 44^\circ$$

Ángulo de la fuerza resultante.

Al igual que en la cuchilla 2 se descompone la fuerza resultante de acuerdo al ángulo.

$$Rx3 = Rs * \cos \theta 3$$

Ecuación (16)

$$Rx3 = 745.3 \text{ N}$$

$$Ry3 = Rs * \sin \theta 3$$

Ecuación (17)

$$Ry3 = 719.73 \text{ N}$$

Se realiza la sumatoria de fuerzas en cada uno de los ejes.

$$Ftotalc1 = Ry2 + Ry3$$

Ecuación (18)

$$Ftotalc1 = 1465.03 \text{ N}$$

$$Fxtotalc1 = Rx2 - Rx3$$

Ecuación (19)

$$Fxtotalc1 = -25.57 \text{ N}$$

4.3.4.1.2. Análisis de fuerzas en el conjunto 2

En el segundo conjunto actúan dos cuchillas móviles produciendo fuerzas de arrastre y normal, y dos cuchillas producen fuerzas no significativas como se muestra en el esquema de la Figura 27.

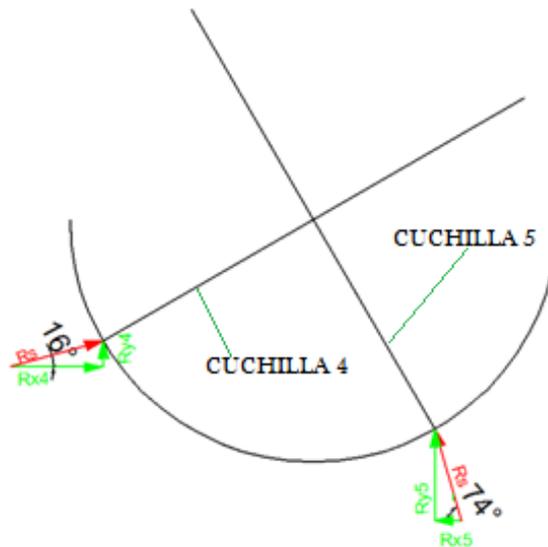


Figura 27. Esquema de las fuerzas que actúan en el conjunto 2.

CUCHILLA 4

$$\theta = 16^\circ$$

Ángulo de la fuerza resultante.

Se descompone la resultante de acuerdo al ángulo.

$$Rx4 = Rs * \cos \theta$$

Ecuación (20)

$$Rx4 = 995.95 \text{ N}$$

$$Ry4 = Rs * \sin \theta4$$

Ecuación (21)

$$Ry4 = 285.58 N$$

CUCHILLA 5

$$\theta5 = 74^\circ$$

Ángulo de la fuerza resultante.

Se descompone de acuerdo al ángulo.

$$Rx5 = Rs * \cos \theta5$$

Ecuación (22)

$$Rx5 = 285.58 N$$

$$Ry5 = Rs * \sin \theta5$$

Ecuación (23)

$$Ry5 = 995.95 N$$

De acuerdo a la sumatoria de fuerzas en cada uno de los ejes tenemos:

$$Ftotalc2 = Ry4 + Ry5$$

Ecuación (24)

$$Ftotalc2 = 1281.54 N$$

$$Fxtotalc2 = Rx4 - Rx5$$

Ecuación (25)

$$Fxtotalc2 = 710.37 N$$

4.3.4.1.3. Análisis de fuerzas en el conjunto 3

En el tercer conjunto actúan dos cuchillas produciendo fuerzas de corte e impacto, una cuchilla produciendo fuerzas de arrastre y normal, y una cuchilla que produce fuerzas no significativas como se muestra en el esquema de la Figura 28.

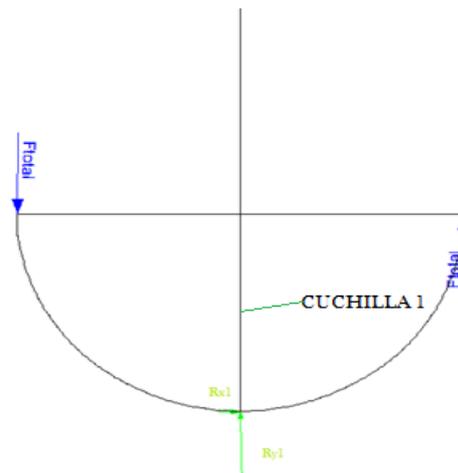


Figura 28. Esquema de las fuerzas que actúan en el conjunto 3.

La fuerza total que se muestra en la Figura 28, es el resultado de la suma de la fuerza de corte e impacto.

$$F_{total} = F_{req} + F_i$$

Ecuación (26)

$$F_{total} = 817.5 \text{ N}$$

CUCHILLA 1

$$\theta_1 = 76^\circ$$

Ángulo de la fuerza resultante.

Se descompone la fuerza resultante de acuerdo al ángulo.

$$Rx1 = Rs * \cos \theta 1$$

Ecuación (27)

$$Rx1 = 250.65 N$$

$$Ry1 = Rs * \sin \theta 1$$

Ecuación (28)

$$Ry1 = 1005.3 N$$

Teniendo así la sumatoria de fuerzas en cada eje:

$$Ftotalc3 = Ry1 + Ftotal - Ftotal$$

Ecuación (29)

$$Ftotalc3 = 1005.3 N$$

$$Fxtotalc3 = Rx1$$

Ecuación (30)

$$Fxtotalc3 = 250.65 N$$

4.3.4.2. Análisis de las fuerzas que actúan sobre el eje en la cámara de corte

El análisis previo realizado de las fuerzas que actúan sobre las cuchillas, se asume una distribución uniforme de las fuerzas sobre las cuchillas, y por simetría de cada conjunto en su arreglo de cuchillas, las fuerzas totales aplicadas en cada cuchilla se transmiten a los discos portacuchillas en la mitad de su magnitud. Teniendo la disposición de los discos portacuchillas como se muestra en la Figura 29.

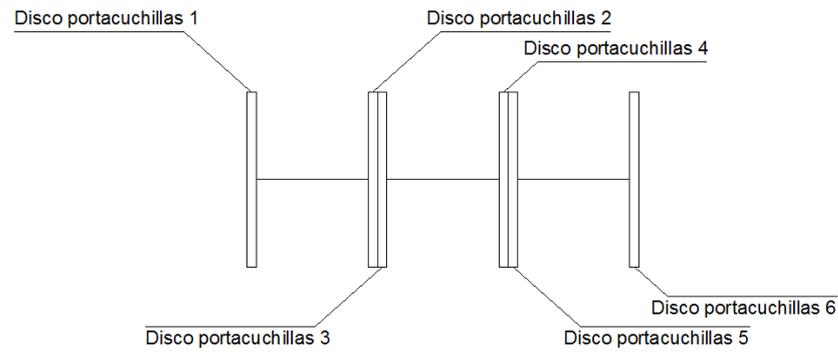


Figura 29. Disposición de los discos portacuchillas en la cámara de corte.

FUERZA EN EL DISCO PORTACUCHILLAS 1

$$F_{ytotal1} = \frac{F_{totalc1}}{2}$$

Ecuación (31)

$$F_{ytotal1} = 732.51 \text{ N}$$

$$F_{xtotal1} = \frac{F_{xtotalc1}}{2}$$

Ecuación (32)

$$F_{xtotal1} = -12.79 \text{ N}$$

FUERZA EN LOS DISCOS PORTACUCHILLAS 2 Y 3

Como los discos portacuchillas 2 y 3 son solidarios en un extremo, se asume la aplicación de las fuerzas (que actúan en los discos 2 y 3) en dicho extremo solidario.

$$F_{ytotal23} = \frac{F_{totalc1}}{2} + \frac{F_{totalc2}}{2}$$

Ecuación (33)

$$F_{ytotal23} = 1373.28 \text{ N}$$

$$F_{xtotal23} = \frac{F_{xtotalc1}}{2} + \frac{F_{xtotalc2}}{2}$$

Ecuación (34)

$$F_{xtotal23} = 342.4 \text{ N}$$

FUERZA EN LOS DISCOS PORTACUCHILLAS 4 Y 5

Como los discos portacuchillas 4 y 5 son solidarios en un extremo, se asume la aplicación de las fuerzas (que actúan en los discos 4 y 5) en dicho extremo solidario.

$$F_{ytotal45} = \frac{F_{totalc2}}{2} + \frac{F_{totalc3}}{2}$$

Ecuación (35)

$$F_{ytotal45} = 1143.43 \text{ N}$$

$$F_{xtotal45} = \frac{F_{xtotalc2}}{2} + \frac{F_{totalc3}}{2}$$

Ecuación (36)

$$F_{xtotal45} = 480.51 \text{ N}$$

FUERZA EN EL DISCO PORTACUCHILLAS 6

$$F_{ytotal6} = \frac{F_{totalc3}}{2}$$

Ecuación (37)

$$F_{ytotal6} = 502.66 \text{ N}$$

$$F_{xtotal6} = \frac{F_{xtotalc3}}{2}$$

Ecuación (38)

$$F_{xtotal6} = 125.33 \text{ N}$$

4.3.4.3. Análisis del torque que actúa en cada conjunto

4.3.4.3.1. Análisis del torque que actúa en el conjunto 1

Al igual que las fuerzas, los torques serán calculados mediante la mitad de las fuerzas aplicadas. La sumatoria de torques tendrá su pivote en el centro del eje, en la Figura 30 se muestran las longitudes del pivote hasta las fuerzas.

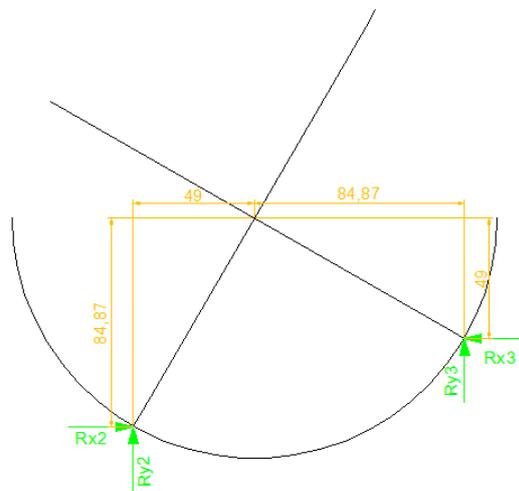


Figura 30. Distancias para el cálculo de torque del conjunto 1.

CUCHILLA 2

$$r1x = 84.87 \text{ mm}$$

Radio de Rx2

Con el radio se calcula el torque que genera la fuerza Rx2.

$$Tx2 = \frac{Rx2}{2} * r1x$$

Ecuación (39)

$$Tx2 = 30.54 \text{ N} * m$$

$$r_{2y} = 49 \text{ mm}$$

Radio de R_{y2}

De acuerdo al radio se calcula el torque que genera la fuerza R_{y2} .

$$T_{y2} = \frac{R_{y2}}{2} * r_{2y}$$

Ecuación (40)

$$T_{y2} = 18.26 \text{ N} * m$$

CUCHILLA 3

$$r_{3x} = 49 \text{ mm}$$

Radio de R_{x3}

Se calcula el torque generado por la fuerza R_{x3} .

$$T_{x3} = \frac{R_{x3}}{2} * r_{3x}$$

Ecuación (41)

$$T_{x3} = 18.26 \text{ N} * m$$

$$r_{3y} = 84.87 \text{ mm}$$

Radio de R_{y3}

Con este radio se calcula el torque generado por la fuerza R_{y3} .

$$T_{y3} = \frac{R_{y3}}{2} * r_{3y}$$

Ecuación (42)

$$T_{y3} = 30.54 \text{ N} * m$$

TORQUE TOTAL DEL CONJUNTO 1

$$T_{totalc1} = -Tx2 + Ty2 + Tx3 - Ty3$$

Ecuación (43)

$$T_{totalc1} = -24.56 \text{ N} * \text{m}$$

4.3.4.3.2. Análisis del torque que actúa en el conjunto 2

Al igual que en el conjunto 1, el pivote será el centro del eje y las distancias del pivote a las fuerzas se muestra en la Figura 31.

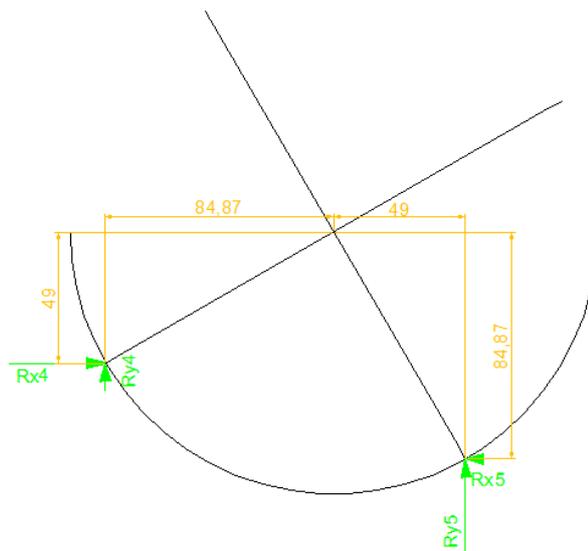


Figura 31. Distancias para el cálculo de torque del conjunto 2.

CUCHILLA 4

$$r_{4x} = 49 \text{ mm}$$

Radio de Rx4

Se calcula el torque generado por la fuerza Rx4.

$$Tx4 = \frac{Rx4}{2} * r4x$$

Ecuación (44)

$$Tx4 = 24.4 N * m$$

$$r4y = 84.87 mm$$

Radio de Ry4

Mediante el producto del radio y la fuerza Ry4 se calcula el torque que dicha fuerza genera.

$$Ty4 = \frac{Ry4}{2} * r4y$$

Ecuación (45)

$$Ty4 = 12.12 N * m$$

CUCHILLA 5

$$r5x = 84.87 mm$$

Radio de Rx5

Teniendo el radio y la fuerza Rx5 se calcula el torque que esta fuerza genera.

$$Tx5 = \frac{Rx5}{2} * r5x$$

Ecuación (46)

$$Tx5 = 12.12 N * m$$

$$r5y = 49 mm$$

Radio de Ry5

Se calcula el torque que genera la fuerza R_{y5} .

$$T_{y5} = \frac{R_{y5}}{2} * r_{5y}$$

Ecuación (47)

$$T_{y5} = 24.4 \text{ N} * \text{m}$$

TORQUE TOTAL DEL CONJUNTO 2

$$T_{totalc2} = -T_{x4} + T_{y4} + T_{x5} - T_{y5}$$

Ecuación (48)

$$T_{totalc2} = -24.56 \text{ N} * \text{m}$$

4.3.4.3.3. Análisis del torque que actúa en el conjunto 3

En este conjunto el pivote también será el centro del eje, en la Figura 32 se muestran las distancias del pivote a las fuerzas que producen torque.

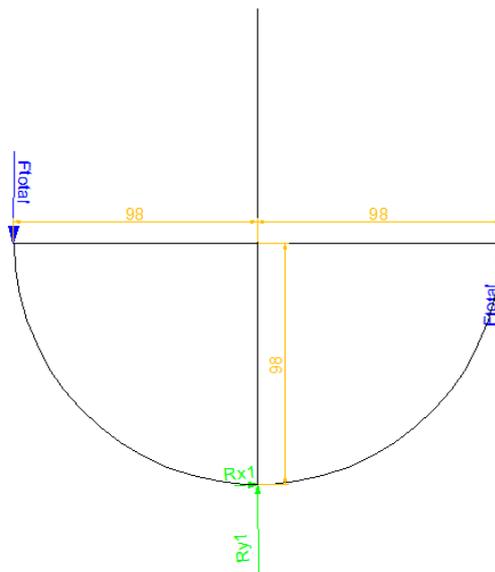


Figura 32. Distancias para el cálculo de torque del conjunto 3.

CUCHILLA 1

$$rg = 98 \text{ mm}$$

Radio de Rx1

Se calcula el torque generado por la fuerza Rx1.

$$Tx1 = \frac{Rx1}{2} * rg$$

Ecuación (49)

$$Tx1 = 12.28 \text{ N} * m$$

Se calcula el torque generado por la fuerza de corte y de impacto.

$$Tci = \frac{Ftotal}{2} * rg$$

Ecuación (50)

$$T_{ci} = 40.06 \text{ N} * m$$

TORQUE TOTAL DEL CONJUNTO 3

$$T_{totalc3} = -2 * T_{ci} - T_{x1}$$

Ecuación (51)

$$T_{totalc3} = -92.4 \text{ N} * m$$

4.3.4.4. Análisis de los torques que actúan sobre el eje en la cámara de corte

TORQUE DEL DISCO PORTACUCHILLAS 1

$$T_{pc1} = T_{totalc1}$$

Ecuación (52)

$$T_{pc1} = -24.56 \text{ N} * m$$

TORQUE DE LOS DISCOS PORTACUCHILLAS 2 Y 3

Como los discos portacuchillas 2 y 3 son solidarios en un extremo, el torque aplicado en este punto será la suma de los torques generados en los discos portacuchillas 2 y 3.

$$T_{pc23} = T_{totalc1} + T_{totalc2}$$

Ecuación (53)

$$T_{pc23} = -49.13 \text{ N} * m$$

TORQUE DE LOS DISCOS PORTACUCHILLAS 4 Y 5

Como los discos portacuchillas 4 y 5 son solidarios en un extremo, el torque aplicado en este punto será la suma de los torques generados en los discos portacuchillas 4 y 5.

$$T_{pc45} = T_{totalc2} + T_{totalc3}$$

Ecuación (54)

$$T_{pc45} = -116.96 \text{ N} * m$$

TORQUE DEL DISCO PORTACUCHILLAS 6

$$T_{pc6} = T_{totalc3}$$

Ecuación (55)

$$T_{pc6} = -92.4 \text{ N} * m$$

4.3.5. Cálculo del torque total del sistema.

Una vez obtenidos los torques que se generan en cada disco portacuchillas por la acción de las fuerzas, se calcula el torque total generado para posteriormente poder obtener la potencia necesaria del motor eléctrico. Este torque total se ubicará en el extremo del eje, donde se encuentra la polea de transmisión.

$$T_{total} = T_{pc1} + T_{pc23} + T_{pc45} + T_{pc6}$$

Ecuación (56)

$$T_{total} = -283.05 \text{ N} * m$$

4.3.6. Relación de transmisión de velocidades y cálculo de los diámetros de las poleas.

De acuerdo a molinos Wittmann existentes en el mercado, para tener un corte de PET rápido y de buena calidad, la velocidad a la que debe girar el eje debe ser mayor a 200 r.p.m. y menor a 700 r.p.m., por lo que se asume una velocidad de 440 r.p.m. y teniendo en cuenta que la velocidad nominal del motor eléctrico es de 1750 r.p.m., se calcula la relación de transmisión de la siguiente manera:

$$n1 = 1750 \text{ rpm}$$

Velocidad nominal del motor eléctrico.

$$n2 = 440 \text{ rpm}$$

Velocidad de giro del eje.

$$i = \frac{n1}{n2}$$

Ecuación (57)

$$i = 3.98$$

Se tomará una relación de transmisión de velocidades de 4 para que el diámetro de las poleas sean las existentes en el mercado. Con la relación de transmisión (i_c) de 4, se recalcula la velocidad a la que va a girar el eje.

$$n2c = \frac{n1}{i_c}$$

Ecuación (58)

$$n2c = 437.5 \text{ rpm}$$

Por facilidad de adquisición de las poleas, es decir, por su disponibilidad en el mercado, se elige un diámetro (d_1) de la polea que va en el motor eléctrico de 5 in, y se calcula el diámetro de la polea que se ubica en el eje o polea conducida.

$$d_2 = ic * d_1$$

Ecuación (59)

$$d_2 = 20 \text{ in}$$

4.3.7. Fuerzas que actúan en el eje en la posición de las poleas

Se va a realizar un análisis de las fuerzas en la polea de acuerdo a Diseño de Elementos de Máquinas de Robert L. Mott cuarta edición, esto quiere decir considerando que tanto la fuerza del lado tenso como la del lado flojo son paralelas y sin inclinación alguna.

Se debe tomar en cuenta que en este análisis se asume que la fuerza del lado tenso (F_1) es 5 veces el valor de la del lado flojo (F_2), y que la fuerza que va actuar sobre el eje (F_B) es igual a la suma de las fuerzas del lado tenso y del lado flojo. En la Figura 33 se muestran las ecuaciones para el cálculo de las fuerzas que actúan sobre el eje en la posición de la polea.

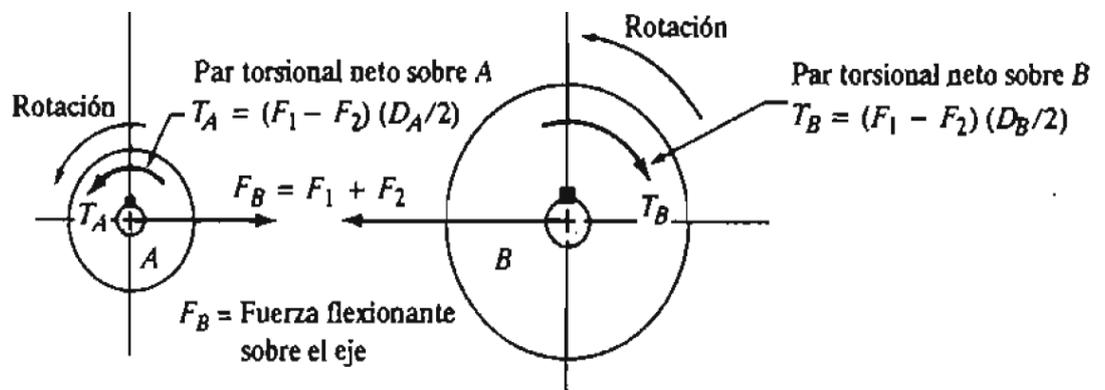


Figura 33. Fuerzas sobre poleas.

Fuente: (Mott R. L., Diseño de Elementos de Máquinas, 2006).

Para el cálculo de las fuerzas sobre las poleas, el torque total que actúa sobre la polea ubicada en el eje es el torque total del sistema, que ya se calculó, con signo contrario.

$$TB = -T_{total}$$

Ecuación (60)

$$TB = 283.05 \text{ N} * m$$

$$F2 = \frac{TB}{2 * d2}$$

Ecuación (61)

$$F2 = 278.59 \text{ N}$$

$$F1 = 5 * F2$$

Ecuación (62)

$$F1 = 1392.96 \text{ N}$$

$$FB = F1 + F2$$

Ecuación (63)

$$FB = 1671.55 \text{ N}$$

Debido a que la pendiente entre las poleas es de 70 grados, se descompone la fuerza flexionante que actúa sobre el eje con este ángulo.

$$Fxp = FB * \cos 70$$

Ecuación (64)

$$Fxp = 571.7 \text{ N}$$

$$Fyp = -FB * \sin 70$$

Ecuación (65)

$$Fyp = -1570.74 \text{ N}$$

4.3.8. Cálculo de la potencia requerida del sistema y selección del motor eléctrico.

Una vez que se tienen en cuenta todas las fuerzas que actúan sobre el eje, se puede calcular el torque generado en la polea del motor eléctrico (TA) debido a la transmisión por bandas, con la velocidad angular nominal del motor (n_1) y teniendo en cuenta el rendimiento del motor eléctrico (η_{motor}), se puede calcular la potencia requerida y seleccionar un motor eléctrico adecuado.

$$TA = (F_1 - F_2) * \left(\frac{d_1}{2}\right)$$

Ecuación (66)

$$TA = 70.76 \text{ N} * \text{m}$$

$$Pot = TA * n_1$$

Ecuación (67)

$$Pot = 12.97 \text{ kw}$$

$$\eta_{motor} = 0.902$$

Rendimiento del motor eléctrico.

$$Pot_{req} = \frac{Pot}{\eta_{motor}}$$

Ecuación (68)

$$Pot_{req} = 14.38 \text{ kw}$$

De acuerdo a los cálculos la potencia mínima requerida del sistema es de 14.38 kw, en el mercado existen motores de 15 Kw (20 hp), por lo que se selecciona un motor eléctrico de 15 Kw (20 hp) de potencia, velocidad nominal de 1750 r.p.m., trifásico, con rendimiento de 90.2%.

4.3.9. Selección de tipo de banda.

Teniendo una potencia del motor eléctrico seleccionado, el siguiente paso es seleccionar el tipo de banda que se va a utilizar para transmitir la potencia del motor eléctrico al sistema, para lo cual se debe tomar en cuenta el régimen de trabajo que tendrá la máquina, se propone que tenga un trabajo continuo de 8 horas diarias.

En la Tabla 10 se muestran algunos factores de servicio que sirven para obtener la potencia efectiva, dicha potencia se obtiene del producto de la potencia de motor eléctrico seleccionado, con el factor de servicio. La potencia efectiva (P_{banda}) nos ayuda para la selección del tipo de banda. De la Tabla 10 se toma un valor del factor de servicio de 1.6, debido a que el tipo de máquina es un molino y que va a prestar un servicio normal.

Tabla 10.

Factor de servicio.

EL FACTOR DE SERVICIO CORRECTO ES DETERMINADO POR:		SERVICIO INTERMITENTE — DE 1.0 A 1.5							
1. El grado y frecuencia de las cargas pico.		a. Trabajo Ligero — No más de 6 horas al día.							
2. El número de horas de operación al año, divididas en un promedio de horas al día de servicio continuo.		b. No debe exceder la carga promedio.							
3. La categoría adecuada de servicio, (intermitente, normal o continuo). Seleccione aquella que más se aproxime a las condiciones de su aplicación.		SERVICIO NORMAL — DE 1.1 A 1.6							
		a. Servicio diario de 6 a 16 horas al día.							
		b. Donde las cargas de arranque o pico no excedan el 200% de la carga total.							
		SERVICIO CONTINUO — DE 1.2 A 1.8							
		a. Donde la carga de arranque o pico sea mayor en un 200% a la carga total o donde las cargas de arranque o pico y las sobrecargas ocurran frecuentemente.							
		b. Servicio continuo 16 a 24 horas.							
FACTORES DE SERVICIOS TÍPICOS									
TIPOS DE MÁQUINAS DE TRANSMISIÓN				TIPOS DE UNIDADES MOTRICES					
Los tipos de máquinas impulsadas aquí listadas son solo una muestra representativa. Seleccione el equipo que se aproxime más a su aplicación. SI SE UTILIZAN RUEDAS LOCAS, AÑADA LO SIGUIENTE AL FACTOR DE SERVICIO: Rueda Loca en el lado suelto (adentro) Ninguno Rueda Loca en el lado suelto (afuera) 0.1 Rueda Loca en el lado apretado (adentro) 0.1 Rueda Loca en el lado apretado (afuera) 0.2				MOTORES ELÉCTRICOS AC Torque Normal Jaula de Ardilla y Síncrono AC Fase Dividida DC Devanado en Derivación Motores de Combustión Interna			MOTORES ELÉCTRICOS AC Alto Torque AC Hi-Fase Dividida AC Repulsión-Inducción AC Mono-fásico Devanado en Serie AC Anillo de Deslizamiento DC Devanado Compuesto		
				SERVICIO INTERMITENTE	SERVICIO NORMAL	SERVICIO CONTINUO	SERVICIO INTERMITENTE	SERVICIO NORMAL	SERVICIO CONTINUO
Agitadores para Líquidos Sopladores y Aspiradoras Bombas centrífugas y Compresoras Ventiladores hasta 10 HP Transportadores de Trabajo Ligero				1.0	1.1	1.2	1.1	1.2	1.3
Transportadores de Banda para arena, grano, etc. Amasadora Ventiladores de más de 10 HP Generadores Ejes de Línea Máquinas de Lavandería Máquinas-Herramientas Taladros, Prensas, Cortadores Máquinas de Imprenta Bombas Rotatorias de Desplazamiento Positivo Cribas Giratorias y Vibratorias				1.1	1.2	1.3	1.2	1.3	1.4
Máquinas para Ladrillos Elevadores de Cangilones Excitadores Compresores de Pistones Transportadores (Rastras, Helicoidales, Tablillas) Molinos de Martillos Hidropulper Bombas de Pistones Sopladores de Desplazamiento Positivo Pulverizadores Máquinas para Madera y Sierras Maquinaria Textil				1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6
Quebradoras (Giratorias-Montaña-Rodillos) Molinos (Bolas, Rodillos) Grúas Calandrias de hule — Extrusoras — Molinos				1.3	1.4	1.5	1.5	<u>1.6</u>	1.6
Equipo con Ahogador				2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

Fuente: (Martin, 2012)

$$f_{ser} = 1.6$$

Factor de servicio.

$$P_{banda} = P_{otmotor} * f_{ser}$$

Ecuación (69)

$$P_{banda} = 23.86 \text{ kw} = 32 \text{ hp}$$

Se tiene que la potencia efectiva es de 23.86 kw o 32 hp, con este dato de potencia efectiva y con la velocidad nominal del motor eléctrico se ingresa a la Figura 34, y se obtiene el tipo de banda que se debe utilizar.

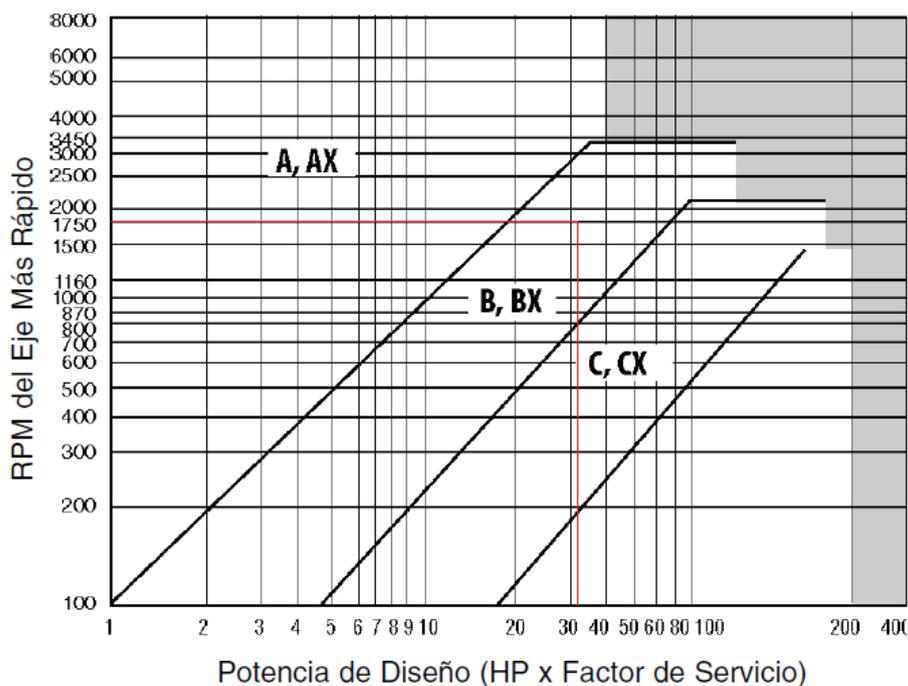


Figura 34. Bandas convencionales.

Fuente: (Martin, 2012).

Como se observa en la Figura 34, el tipo de banda que se selecciona es tipo B, BX.

4.3.10. Cálculo de número de bandas para la transmisión de potencia.

Para poder calcular el número de bandas necesarias para la transmisión de potencia, se debe considerar el tipo de banda, la relación de transmisión, la distancia entre centros de poleas, la velocidad nominal del motor eléctrico y velocidad del elemento impulsado. Teniendo todos estos datos se ingresa a la tabla del Anexo 3, y se obtiene cuantos hp por banda se pueden

transmitir. Tomando la distancia entre centros disponible, del Anexo 4 se obtiene el factor de corrección por longitud y arco.

Con la multiplicación del número de hp por banda (HPbanda) y el factor de corrección por longitud y arco, se obtiene la potencia corregida por banda (Pcorregida), y dividiendo la potencia del motor eléctrico (Potmotor) entre la potencia corregida por banda, se obtiene el número necesario de bandas (Nbandas) para la transmisión de la potencia.

$$HPbanda = 6.44 \text{ hp} = 4.8 \text{ KW}$$

hp por banda.

$$f_{correccion} = 1.05$$

Factor de corrección por longitud y arco.

$$P_{corregida} = HPbanda * f_{correccion}$$

Ecuación (70)

$$P_{corregida} = 5.04 \text{ kW}$$

$$N_{bandas} = \frac{Potmotor}{P_{corregida}}$$

Ecuación (71)

$$N_{bandas} = 2.96$$

El número de bandas que se van a utilizar para la transmisión de potencia es de 3 bandas. La longitud de cada banda se obtiene del Anexo 4 y es de 128 in (aproximadamente 3.25 m).

4.4. Espesor de las paredes del molino.

Como se mencionó anteriormente en los parámetros de diseño, los espesores de las paredes del molino, es decir, tolva de alimentación, tobera, cámara de corte y tolva de expulsión, serán de 3 mm, puesto a como se explicó dichos elementos no están sometidos a esfuerzos importantes y por requerimientos de espesor mínimo para la aplicación de soldadura. Hay que tomar en cuenta que los esfuerzos mayores van a ser producidos en las cuchillas y dichos esfuerzos serán transmitidos al eje.

4.5. Diseño de juntas en el cuerpo.

Para el diseño de juntas en el cuerpo del eje del molino, se debe determinar la configuración del eje y todos sus componentes. Adicionalmente, se necesita conocer el momento flector y el par torsional que actúa sobre el elemento a soldarse o empernarse.

Para poder conocer la configuración del eje y sus respectivos componentes, se realizará el diseño del eje para conocer sus dimensiones, y posteriormente poder realizar el diseño de las juntas soldadas y empernadas.

4.5.1. Determinación del punto crítico.

Todas las fuerzas calculadas y torques obtenidos que actúan sobre el eje se muestran en la Figura 35, con su respectiva ubicación de acuerdo a la configuración del eje mostrada en el esquema de la Figura 36.

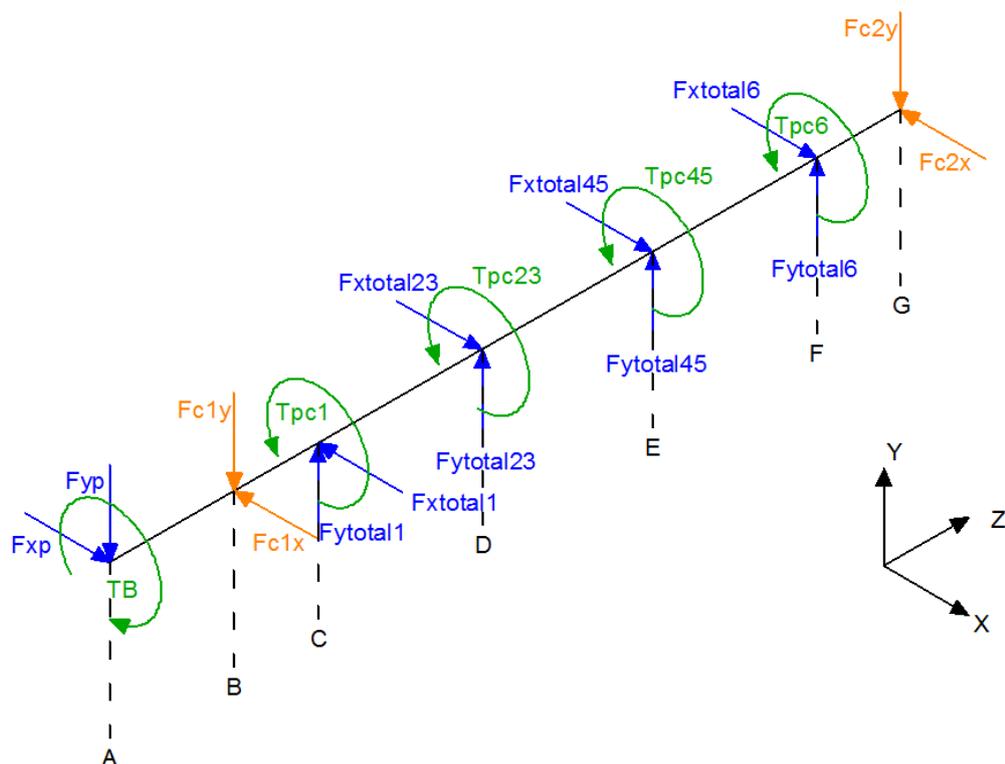


Figura 35. Diagrama de cuerpo libre del eje.

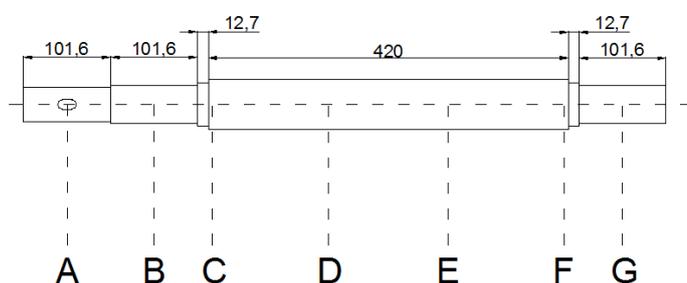


Figura 36. Configuración del eje.

De acuerdo a la configuración mostrada en la Figura 36, tenemos que en el punto A va ubicada la polea conducida y para su sujeción tiene un cuñero. En los puntos B y G se ubican los cojinetes o rodamientos.

En la Figura 35, en color anaranjado se muestran las fuerzas de reacción que se producen en los cojinetes o rodamientos. Con la ayuda de un software, se encontrarán dichas fuerzas de reacción, y los diagramas de fuerza cortante y momento flexionante.

Para el primer análisis mediante el software, se considera que el eje Z está a lo largo del eje, por lo que se realizará el análisis en el plano X-Z, es decir con las fuerzas que actúan en el eje X. Estos datos calculados se ingresan al software y da como resultado lo que se muestra en la Figura 37, en la cual se pueden observar los diagramas de fuerza cortante y momento flexionante en el plano X-Z.

$$P_1 = F_{xp}$$

$$P_2 = F_{xtotal1}$$

$$P_3 = F_{xtotal23}$$

$$P_4 = F_{xtotal45}$$

$$P_5 = F_{xtotal6}$$

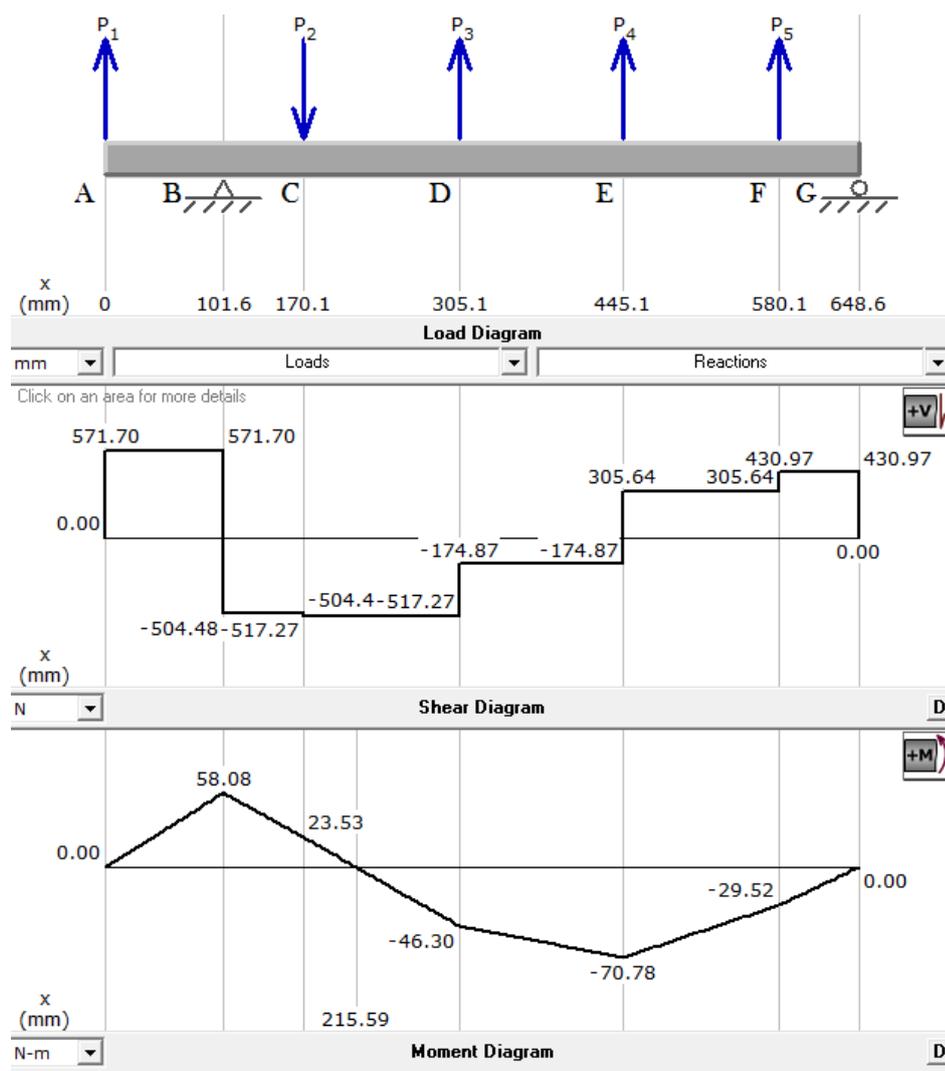


Figura 37. Diagramas de fuerza cortante y momento flexionante plano X-Z

De acuerdo al diagrama de fuerza cortante, se tiene que las reacciones en los cojinetes son:

$$Fc1x = -1075.18 N$$

Reacción en el primer cojinete, punto B.

$$Fc2x = -430.97 N$$

Reacción en el segundo cojinete, punto G

Así mismo, para el análisis del plano Y-Z, se toma que el eje Z se encuentra a lo largo del eje, y que las fuerzas calculadas actúan sobre el eje en el sentido del eje Y. Conociendo estos datos se ingresan al software y se obtiene lo que se muestra en la Figura 38, en la cual se pueden observar los diagramas de fuerza cortante y momento flexionante en el plano Y-Z.

$$P1 = F_{yp}$$

$$P2 = F_{ytotal1}$$

$$P3 = F_{ytotal23}$$

$$P4 = F_{ytotal45}$$

$$P5 = F_{ytotal6}$$

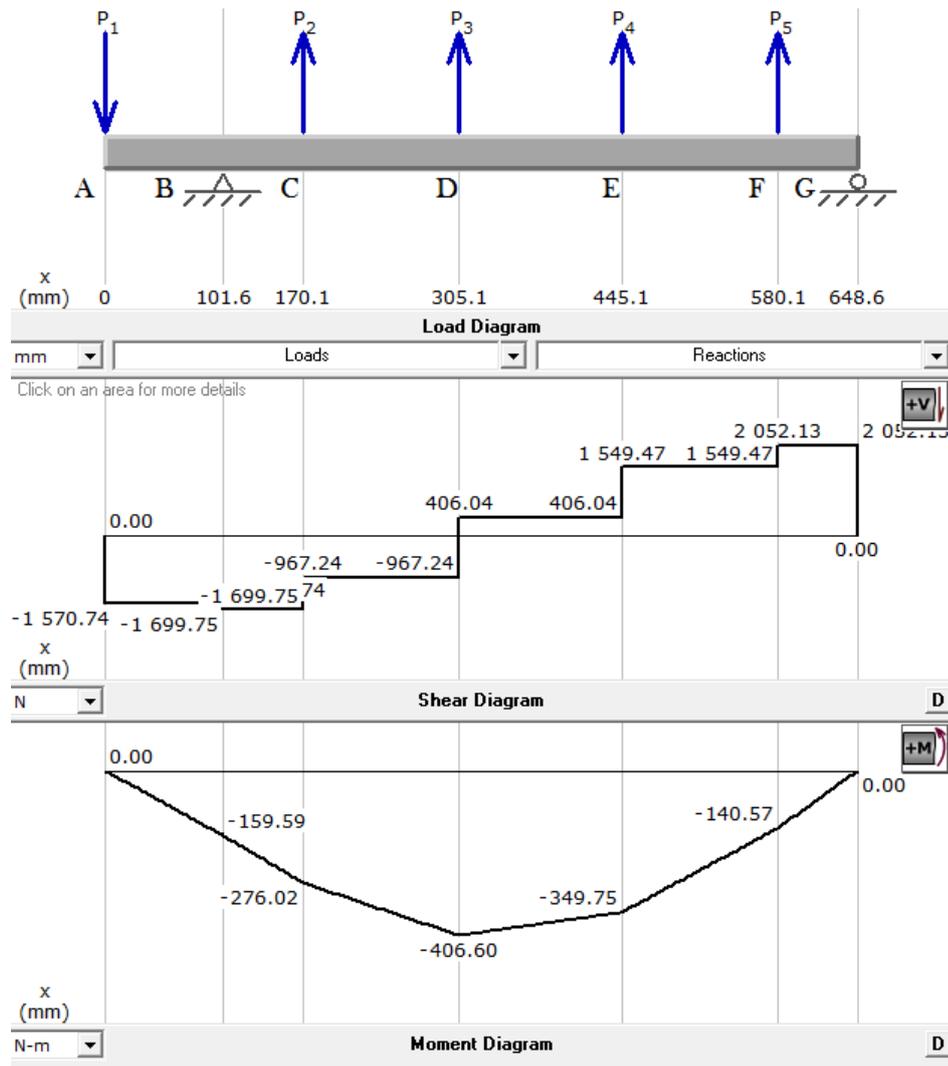


Figura 38. Diagramas de fuerza cortante y momento flexionante plano Y-Z.

Como se puede observar en el diagrama de fuerza cortante de la Figura 38, se tiene que las reacciones en los cojinetes son:

$$F_{c1y} = -129.01 \text{ N}$$

Reacción en el primer cojinete, punto B.

$$F_{c2y} = -2052.13 \text{ N}$$

Reacción en el segundo cojinete, punto G.

Por último para poder identificar el punto crítico, se realiza la gráfica de torsión que se produce en el eje, en la Figura 39 se muestra el diagrama de torsión del eje, de acuerdo a los cálculos realizados.

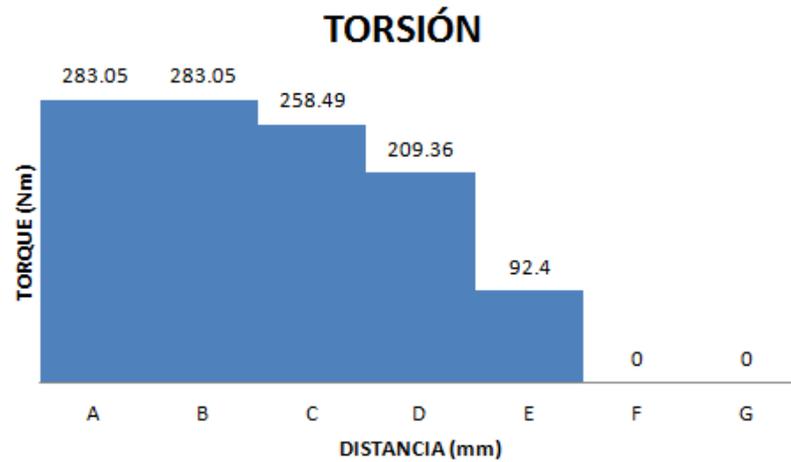


Figura 39. Gráfica de torsión del eje.

De acuerdo a los diagramas de las Figuras 37, 38 y 39, se tiene que en cada punto del eje existe:

Punto A

$$MaA = 0$$

Momento flexionante alternante.

$$TmA = 283.05 \text{ N} * m$$

Torsión media.

Punto B

$$MaB = \sqrt{(580.08 \text{ N} * m)^2 + (-159.59 \text{ N} * m)^2} = 169.83 \text{ N} * m$$

Momento flexionante alternante.

$$TmB = 283.05 \text{ N} * m$$

Torsión media.

Punto C

$$MaC = \sqrt{(23.53 N * m)^2 + (-276.02 N * m)^2} = 277.02 N * m$$

Momento flexionante alternante.

$$TmC = 258.49 N * m$$

Torsión media.

Punto D

$$MaD = \sqrt{(-46.30 N * m)^2 + (-406.60 N * m)^2} = 409.23 N * m$$

Momento flexionante alternante.

$$TmD = 209.36 N * m$$

Torsión media.

Punto E

$$MaE = \sqrt{(-70.78 N * m)^2 + (-349.75 N * m)^2} = 356.84 N * m$$

Momento flexionante alternante.

$$TmE = 92.40 N * m$$

Torsión media.

Punto F

$$MaF = \sqrt{(-29.52 N * m)^2 + (-140.57 N * m)^2} = 143.64 N * m$$

Momento flexionante alternante.

$$TmF = 0$$

Torsión media.

Punto G

$$MaG = 0$$

Momento flexionante alternante.

$$TmG = 0$$

Torsión media.

Como es un eje giratorio con esfuerzo flexionante totalmente reversible y torsión constante, a lo largo del eje se tendrá que el momento flexionante medio (M_m) y la torsión alternante (T_a) van a ser igual a 0.

Realizando un análisis de los datos obtenidos en cada punto del eje y teniendo en cuenta la configuración del eje (Figura 36), se determina que el punto crítico del eje, y del cual el diseño va a partir, es el punto C, ya que en este punto existe momento flexionante, par torsional y concentración de esfuerzos por cambio de sección.

4.5.2. Diseño del eje.

Para la elección de la teoría de diseño que se utilizará se debe tomar en cuenta el tipo de cargas, en nuestro caso son cargas dinámicas, por lo que hemos elegido realizar un análisis por fatiga con la teoría de la energía de la distorsión y criterio de Goodman (Budynas & Nisbett, Criterio de Goodman, 2008) para cargas combinadas, siendo esta una teoría de falla no conservadora y que se ajusta al tipo de cargas que tenemos.

Para iniciar con el diseño, se considera que en el cambio de sección existe un filete de hombro bien redondeado, de la Tabla del Anexo 5 se obtiene los valores de los factores geométricos de concentración de esfuerzos a flexión y a torsión.

Consideración:

$$r/d=0.1$$

Donde:

r= radio del filete del hombro.

d= diámetro del eje

Teniendo así:

$$ktC = 1.7$$

Factor geométrico de concentración de esfuerzos a flexión.

$$ktsC = 1.5$$

Factor geométrico de concentración de esfuerzos a torsión.

Se iniciará con un diseño un tanto conservador, por lo que se va a asumir que los concentradores de esfuerzo a flexión y a torsión, son los mismos que los factores geométricos de concentración de esfuerzos a flexión y a torsión (Budynas & Keith, Factores geométricos de concentración de esfuerzos, 2008) respectivamente.

$$kfC = ktC$$

Ecuación (72)

$$kfsC = ktsC$$

Ecuación (73)

De acuerdo a nuestra necesidad de utilizar un elemento de transmisión, el material que se va utilizar para el eje es acero AISI 1018 HR, cuyas propiedades se encuentran en la Tabla del Anexo 6.

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

Resistencia a la tracción.

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

Resistencia a la fluencia.

Para continuar con el diseño, se va a calcular los factores que disminuyen la resistencia del material cuando existen cargas dinámicas.

FACTOR DE SUPERFICIE (k_a) (Budynas & Keith, Factor de superficie, 2008)

Para este caso, el eje tiene que ser maquinado, por lo que de la Tabla del Anexo 7 se toman los siguientes datos:

$$a_C = 4.51$$

Factor a de superficie maquinada.

$$b_C = -0.265$$

Exponente b de superficie maquinada.

$$k_a C = a_C * S_{ut}^{b_C}$$

Ecuación (74)

$$k_a C = 0.92$$

FACTOR DE TAMAÑO (k_b) (Budynas & Keith, Factor de tamaño, 2008)

Debido a que no se conoce el tamaño del eje, se asumirá un valor de 0.9 para el factor de tamaño.

$$k_b C = 0.9$$

Factor de tamaño.

FACTOR DE CARGA (k_c) (Budynas & Keith, Factor de carga, 2008)

Como en este punto se tiene combinación de cargas, es decir, existe flexión y torsión el factor de carga es igual a 1.

$$kcC = 1$$

Factor de carga.

FACTOR DE TEMPERATURA (k_d) (Budynas & Keith, Factor de temperatura, 2008)

Debido a que ninguno de los elementos del molino va a operar a temperaturas elevadas, de la Tabla del Anexo 8 se tiene que el factor de temperatura es igual a 1.

$$kdC = 1$$

Factor de temperatura.

FACTOR DE CONFIABILIDAD (k_e) (Budynas & Keith, Factor de confiabilidad, 2008)

Pretendiendo tener una confiabilidad del 99% del material, de la Tabla del Anexo 9 se tiene que el factor de confiabilidad es de 0.814.

$$ke = 0.814$$

Factor de confiabilidad.

Como la resistencia a la tracción del material seleccionado (AISI 1018 HR) es menor a 1400 MPa, la resistencia a la fatiga del material es el producto de la resistencia a la tracción del material por 0.5.

$$Se = 0.5 * Sut$$

Ecuación (75)

$$Se = 200 \text{ MPa}$$

Se debe tener en cuenta los factores que disminuyen la resistencia a la fatiga del material seleccionado, mediante la aplicación de la ecuación de Marín (Budynas & Keith, Ecuación de Marín, 2008) se tiene que:

$$SeC = kaC * kbC * kcC * kdC * ke * Se$$

Ecuación (76)

$$SeC = 135.06 \text{ MPa}$$

Cabe mencionar que de acuerdo al tipo de carga a la que está sometido un elemento, este tendrá un rango del factor de seguridad (Mott R. , 2006), como existen cargas dinámicas el rango es de 2 a 2.5.

Utilizando el método de ED-Goodman, teniendo en cuenta que $Mm=Ta=0$ y asumiendo un factor de seguridad de $nC1=2.5$ por las cargas dinámicas a las que está sometido el eje se tiene un diámetro de:

$$dC1 = \left[\frac{16 nC1}{\pi} \cdot \left[\frac{2 \cdot kIC \cdot MaC}{SeC} + \frac{[3 \cdot (kIC \cdot TmQ)^2]^{\frac{1}{2}}}{Sut} \right]^{\frac{1}{3}} \right]^{\frac{1}{3}}$$

Ecuación (77)

$$dC1 = 47.94 \text{ mm}$$

Como se tomaron consideraciones un tanto conservadoras, el diámetro elegido para esta sección será de $dC = 45 \text{ mm}$, habiendo elegido este

diámetro se procede a comprobar si cumple con los requerimientos del sistema.

VERIFICACIÓN DEL DIÁMETRO DE 45 mm

Para reducir la concentración de esfuerzos se asume un radio bien redondeado del filete de hombro, es decir, $r/d=0.1$.

$$rC = 0.1 * dC$$

Ecuación (78)

$$rC = 4.5 \text{ mm}$$

Conocido el diámetro del eje se calcula únicamente el factor de tamaño, ya que el resto de factores que disminuyen la resistencia a la fatiga no cambian.

FACTOR DE TAMAÑO (k_b)

En una primera iteración se asumió un valor de 0.9, ahora como ya se conoce el diámetro del eje, se aplica la ecuación para obtener el factor de tamaño.

$$k_bC = 1.24 * dC^{-0.107}$$

Ecuación (79)

$$k_bC = 0.83$$

Se aplica nuevamente la ecuación de Marín (Ecuación 76) y se tiene que:

$$SeC = 123.83 \text{ MPa}$$

Como en el punto C existe un cambio de sección, se debe tomar en cuenta la relación entre diámetros de dicha sección, ya que existe una recomendación de que dicha relación debe estar entre 1.2 a 1.5 (Budynas & Keith, Estimación de concentración de esfuerzos, 2008). Para el presente diseño se tomará una relación de 1.3.

$$D/d=1.3$$

Donde:

D=diámetro mayor.

d=diámetro menor.

Con $r/d=0.1$ y $D/d=1.3$, de la Figura del Anexo 10 se obtiene el factor geométrico de concentración de esfuerzos a flexión.

$$ktC1 = 1.65$$

Con $rC=4.5\text{mm}$ y $Sut=0.40 \text{ GPa}$, de la Figura del Anexo 11 se obtiene la sensibilidad a la muesca por flexión.

$$qC = 0.8$$

Una vez que se tiene el factor geométrico de concentración de esfuerzos y la sensibilidad a la muesca, ambos por flexión, se calcula la concentración de esfuerzos por flexión.

$$k_{fC1} = 1 + q_C * (k_{tC1} - 1)$$

Ecuación (80)

$$k_{fC1} = 1.52$$

De igual manera, con $r/d=0.1$ y $D/d=1.3$, de la Figura del Anexo 12 se obtiene el factor geométrico de concentración de esfuerzos a torsión.

$$k_{tC1} = 1.42$$

Con $r_C=4.5\text{mm}$ y como el material seleccionado tiene una dureza Brinell menor a 200, de la Figura del Anexo 13 se obtiene la sensibilidad a la muesca por torsión.

$$q_{sC} = 0.95$$

Teniendo el factor geométrico de concentración de esfuerzos y la sensibilidad a la muesca, ambos por torsión, se calcula la concentración de esfuerzos por torsión.

$$k_{fsC1} = 1 + q_{sC} * (k_{tC1} - 1)$$

Ecuación (81)

$$k_{fsC1} = 1.40$$

Se calcula el esfuerzo alternante generado por la flexión.

$$\sigma_a' C = \frac{32 * k_f C_1 * M_a C}{\pi * d C^3}$$

Ecuación (82)

$$\sigma_a' C = 47.07 \text{ MPa}$$

Se calcula el esfuerzo medio generado por la torsión.

$$\sigma_m' C = \left[3 \cdot \left(\frac{16 k_f C_1 \cdot T_m C}{\pi \cdot d C^3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación (83)

$$\sigma_m' C = 35.01 \text{ MPa}$$

Usando ED- criterio de Goodman se tiene que el factor de seguridad es:

$$n_f C = \frac{S_e C * S_{ut}}{\sigma_a' C * S_{ut} + \sigma_m' C * S_e C}$$

Ecuación (84)

$$n_f C = 2.14$$

Como se puede observar, el factor de seguridad para el diámetro de 45 mm está dentro del rango que se menciona para cargas dinámicas, por lo que se procederá a realizar el análisis en el diámetro mayor en este cambio de sección.

Para el análisis en el diámetro mayor se tomará el mismo par de torsión y momento que en diámetro menor, debido a que la diferencia de valores es despreciable.

De acuerdo a lo asumido $D/d=1.3$, y conociendo el diámetro menor (45 mm), se calcula el diámetro mayor.

$$DC = 1.3 * dC$$

Ecuación (85)

$$DC = 58.5 \text{ mm}$$

FACTOR DE SUPERFICIE (k_a)

Debido a que en esta sección se suelda el primer disco portacuchillas, y posterior a la soldadura se va a esmerilar, de la Tabla del Anexo 7 se toma tanto el factor “a” como el exponente “b” correspondientes a superficie esmerilada.

$$aC = 1.58$$

Factor a de la superficie esmerilada.

$$bC = -0.085$$

Exponente b de la superficie esmerilada.

Utilizando la Ecuación 74 se tiene que el factor de superficie es:

$$kaC = 0.95$$

FACTOR DE TAMAÑO (k_b)

Conociendo que el diámetro es de 58.5 mm, se aplica la respectiva ecuación del factor de tamaño.

$$k_b C = 1.51 * DC^{-0.157}$$

Ecuación (86)

$$k_b C = 0.8$$

El resto de factores que disminuyen la resistencia a la fatiga (carga, temperatura y confiabilidad), son iguales a los utilizados en el cálculo del diámetro menor, debido a que son similares condiciones de carga y de operación.

FACTOR DE SOLDADURA (C_w) (Deutschman, Michels, & Wilson, 1975)

Como es una zona afectada por soldadura, y de acuerdo con la Tabla del Anexo 14, se toma el factor de una soldadura a tope reforzada.

$$C_w = 0.835$$

Al aplicar la ecuación de Marín, en este caso, se debe incrementar el factor que disminuye la resistencia a la fatiga del material por soldadura.

$$SeC2 = k_a C * k_b C * k_c C * k_d C * k_e * C_w * Se$$

Ecuación (87)

$$SeC2 = 102.64 \text{ MPa}$$

En el punto C de diámetro mayor, sólo existe concentración de esfuerzos a torsión por soldadura a tope reforzada, cuyo valor se obtiene de la Tabla del Anexo 15.

$$k_{fsC2} = 1.2$$

Se calcula el esfuerzo alternante generado por el momento flexionante, no se toma en cuenta concentración de esfuerzos porque no existe cambio de sección.

$$\sigma_{a'C1} = \frac{32 * MaC}{\pi * DC^3}$$

Ecuación (88)

$$\sigma_{a'C} = 14.09 \text{ MPa}$$

Se calcula el esfuerzo medio generado por la torsión con la Ecuación 83.

$$\sigma_{m'C1} = 13.67 \text{ MPa}$$

Usando ED- criterio de Goodman (Ecuación 84) se tiene que el factor de seguridad es:

$$n_{fC} = 5.83$$

De acuerdo a la configuración del eje mostrada en la Figura 35, el diámetro de 58.5 mm se mantiene por los puntos D, E y F, por lo que se comprobará dicho diámetro en cada punto.

Todos los factores que disminuyen la resistencia a la fatiga del material serán iguales, en los puntos D, E y F, a los factores obtenidos en el punto C para el diámetro de 58.5 mm, es decir, la única variación será el par torsional y momento flexionante.

COMPROBACIÓN PUNTO D

Se calcula el esfuerzo alternante generado por el momento flexionante con la Ecuación 82, no se toma en cuenta concentración de esfuerzos porque no existe cambio de sección.

$$\sigma a'D = 20.82 \text{ MPa}$$

Se calcula el esfuerzo medio generado por la torsión con la Ecuación 83

$$\sigma m'D = 11.07 \text{ MPa}$$

Usando ED- criterio de Goodman (Ecuación 84) se tiene que el factor de seguridad es:

$$nfD = 4.34$$

COMPROBRACIÓN EN EL PUNTO E

Se calcula el esfuerzo alternante generado por el momento flexionante con la Ecuación 88, no se toma en cuenta concentración de esfuerzos porque no existe cambio de sección.

$$\sigma_a'E = 18.16 \text{ MPa}$$

Se calcula el esfuerzo medio generado por la torsión con la Ecuación 83.

$$\sigma_m'E = 4.89 \text{ MPa}$$

Usando ED- criterio de Goodman (Ecuación 84) se tiene que el factor de seguridad es:

$$n_fE = 5.29$$

COMPROBACIÓN PUNTO F

Se calcula el esfuerzo alternante generado por el momento flexionante con la Ecuación 88, no se toma en cuenta concentración de esfuerzos porque no existe cambio de sección.

$$\sigma_a'F = 7.31 \text{ MPa}$$

Se calcula el esfuerzo medio generado por la torsión con la Ecuación 83.

$$\sigma_m'F = 0$$

Usando ED- criterio de Goodman (Ecuación 84) se tiene que el factor de seguridad es:

$$n_fF = 14.04$$

En el punto F también existe un cambio de sección, al igual que en el punto C, se tomará el mismo momento flexionante que en el diámetro mayor del punto F, adicionalmente por simetría la relación entre diámetros será la misma que la que se utilizó en el punto C, $D/d=1.3$.

$$DF = DC$$

Ecuación (89)

$$DF = 58.5 \text{ mm}$$

$$dF1 = \frac{DF}{1.3}$$

Ecuación (90)

$$dF1 = 45 \text{ mm}$$

En el cambio de sección se considera un radio bien redondeado del filete de hombro, es decir, $r/d=0.1$.

Con $r/d=0.1$ y $D/d=1.3$, de la Figura del Anexo 10 se obtiene el factor geométrico de concentración de esfuerzos a flexión.

$$ktF = 1.65$$

Con $rF=4.5 \text{ mm}$ y $Sut=0.40 \text{ GPa}$, de la Figura del Anexo 11 se obtiene la sensibilidad a la muesca a flexión.

$$qF1 = 0.8$$

Teniendo el factor geométrico de concentración de esfuerzos y la sensibilidad a la muesca, ambas a flexión, se calcula el concentrador de esfuerzos a flexión con la Ecuación 80.

$$ktF = 1.52$$

Se calculan los factores de superficie y de tamaño que son los únicos que cambian.

FACTOR DE SUPERFICIE (k_a)

Como tiene que pasar por un proceso de maquinado, de la Tabla del Anexo 7 se obtiene los valores del factor "a" y del exponente "b".

$$aF1 = 4.51$$

Factor a de la superficie maquinada.

$$bF1 = -0.265$$

Exponente b de la superficie maquinada

Utilizando la Ecuación 74 se calcula el factor de superficie.

$$kaF1 = 0.92$$

FACTOR DE TAMAÑO (k_b)

De acuerdo al diámetro de 45 mm, con la Ecuación 79 se tiene:

$$kbF1 = 0.83$$

Ya que los demás factores que disminuyen la resistencia a la fatiga del material se mantienen en valores, debido a las condiciones similares de operación y carga, se aplica la ecuación de Marín (Ecuación 76).

$$SeF1 = 123.83 \text{ MPa}$$

Se calcula el esfuerzo alternante generado por la flexión con la Ecuación 82.

$$\sigma'F1 = 24.4 \text{ MPa}$$

Al no existir torsión, el esfuerzo medio generado por la torsión es igual a 0. Usando ED- criterio de Goodman (Ecuación 84) se tiene que el factor de seguridad es:

$$nfF1 = 5.07$$

Ahora se va a realizar la debida comprobación en el punto B donde se encuentra el cojinete.

COMPROBACIÓN EN EL PUNTO B

Todos los factores que disminuyen la resistencia a la fatiga del material son los mismos que se obtuvieron en el Punto C en el diámetro de 45 mm. Por lo que aplicando la ecuación de Marín, con la Ecuación 76 se tiene:

$$SeB = 123.83 \text{ MPa}$$

Se calcula el esfuerzo alternante generado por el momento flexionante con la Ecuación 88, no se toma en cuenta concentración de esfuerzos porque no existe cambio de sección.

$$\sigma a'B = 18.98 \text{ MPa}$$

Se calcula el esfuerzo medio generado por la torsión.

$$\sigma m'B = \left[3 \cdot \left(\frac{16 T m B}{\pi \cdot DB^3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación (91)

$$\sigma m'B = 27.4 \text{ MPa}$$

Usando ED- criterio de Goodman (Ecuación 84) se tiene que el factor de seguridad es:

$$nfB = 4.51$$

Adicionalmente en el Punto B existe un cambio de sección, para el análisis se tomará los mismos valores del momento flexionante y par torsional que se utilizaron en el diámetro de 45 mm en el punto B.

Se asume un radio de filete de hombro bien redondeado, es decir $r/d=0.1$, de la Tabla del Anexo 5 se obtiene los valores de los factores geométricos por flexión y torsión.

$$ktB = 1.7$$

Factor geométrico de concentración de esfuerzos a flexión.

$$ktsB = 1.5$$

Factor geométrico de concentración de esfuerzos a torsión.

Para realizar un diseño conservador se asume que los factores geométricos de concentración de esfuerzos, son iguales a los concentradores de esfuerzos.

$$kfB = ktB$$

Ecuación (92)

$$kfB = 1.7$$

$$kfsB = ktsB$$

Ecuación (93)

$$kfsB = 1.5$$

Los factores que disminuyen la resistencia a la fatiga del material son los mismos que en el diámetro mayor del punto B, a excepción del factor de tamaño, dicho factor se asume que es 0.9, debido a que no se conoce el diámetro menor.

Aplicando la ecuación de Marín (Ecuación 76) se tiene:

$$SeB1 = 135.06 \text{ MPa}$$

Asumiendo un factor de seguridad de 2.5 y utilizando ED-Goodman, con la Ecuación 77 se tiene:

$$dB1 = 42.7 \text{ mm}$$

Debido a consideraciones conservadoras que se realizaron, se tomará un diámetro de 40 mm, y se realiza la debida comprobación.

Se calcula únicamente el factor de tamaño, con el diámetro de 40 mm, ya que el resto permanecen sin variación alguna, con la Ecuación 79 se tiene:

$$kbB1 = 0.84$$

Se aplica la ecuación de Marín (Ecuación 76).

$$SeB11 = 125.4 \text{ MPa}$$

Como se conoce los valores del diámetro mayor y menor, se calcula la relación que existe entre ellos.

$$\frac{DB}{dB} = 1.13$$

Ecuación (94)

Se tiene $r/d=0.1$ y $D/d=1.13$, de la Figura del Anexo 10 se obtiene el valor del factor geométrico de concentración de esfuerzos a flexión.

$$ktB1 = 1.60$$

Con la Ecuación 78 se calcula el radio de filete de hombro en el cambio de sección.

$$r = 4mm$$

Como $r=4$ mm y $S_{ut}=0.40$ GPa, de la Figura del Anexo 11 se obtiene el valor de la sensibilidad a la muesca por flexión.

$$q_B = 0.8$$

Se calcula el concentrador de esfuerzos a flexión con la Ecuación 80.

$$k_{fB1} = 1.48$$

Con $r/d=0.1$ y $D/d=1.13$, de la Figura del Anexo 12 se obtiene el valor del factor geométrico de concentración de esfuerzos a torsión.

$$k_{tsB1} = 1.28$$

Como $r=4$ mm y la dureza Brinell del material es menor a 200, de la Figura del Anexo 13 se obtiene el valor de la sensibilidad a la muesca por torsión.

$$q_{sB} = 0.99$$

Se calcula el concentrador de esfuerzos a torsión con la Ecuación 81.

$$kfsB1 = 1.28$$

Se calcula el esfuerzo alternante generado por el momento flexionante con la Ecuación 82.

$$\sigma a' B1 = 40 \text{ MPa}$$

Se calcula el esfuerzo medio generado por la torsión con la Ecuación 84.

$$\sigma m' B1 = 49.83 \text{ MPa}$$

Usando ED- criterio de Goodman (Ecuación 84) se tiene que el factor de seguridad es:

$$nfB1 = 2.25$$

Como la sujeción de la polea con el eje será una chaveta, primero se diseñará la cuña y ranura, y después se comprobará si existe falla en la zona de la ranura del eje.

De la Tabla del Anexo 16, con el diámetro de 40 mm tenemos:

$$w = 12 \text{ mm}$$

Ancho del cuñero en el eje.

$$d = 4.7 \text{ mm}$$

Altura del cuñero en el eje.

$$ac = 12 \text{ mm}$$

Ancho de la cuña.

$$hc = 8 \text{ mm}$$

Altura de la cuña.

Para el diseño de la cuña se elige un acero AISI 1010 CD y se asume un factor de seguridad de $n_{ch}=2.5$, las propiedades del AISI 1010 CD se obtienen de la Tabla del Anexo 6, con estos datos se calculará la longitud mínima de la cuña para la condición de cargas a la que está sometida.

$$S_y = 300 \text{ MPa}$$

Resistencia a la fluencia de AISI 1010 CD.

En la Figura 40, se puede observar la fuerza que actúa sobre la cuña, dicha fuerza se utiliza para el diseño de la cuña.

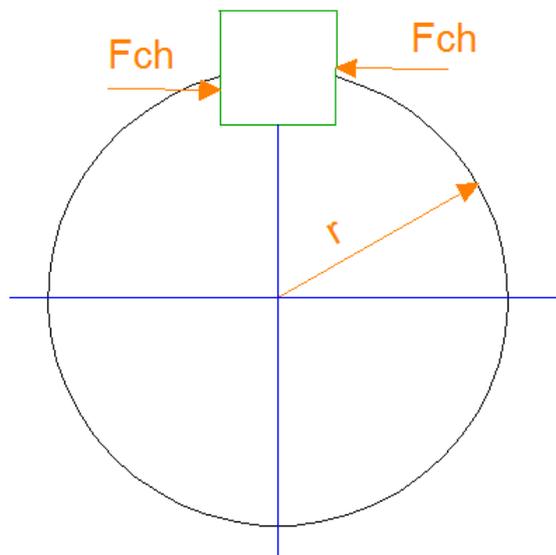


Figura 40. Fuerza en la cuña.

Teniendo en cuenta que sobre la zona que se encuentra la chaveta (cuñero) el par de torsión que actúa es el mismo que en el punto A, y con el radio de 20 mm se calcula fuerza que actúa sobre la cuña.

$$rB = \frac{dB}{2}$$

Ecuación (95)

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

$$Fch = \frac{TmA}{rB}$$

Ecuación (96)

$$Fch = 14152.5 \text{ N}$$

De acuerdo a la teoría de la Energía de la Distorsión (Budynas & Keith, Teoría de la energía de la distorsión para materiales dúctiles, 2008), la resistencia máxima al cortante de la cuña será:

$$Ssy = 0.577 * Sy$$

Ecuación (97)

$$Ssy = 173.1 \text{ MPa}$$

Por lo que el esfuerzo cortante y por aplastamiento máximo será de:

$$\tau_{max} = \frac{Ssy}{nch}$$

Ecuación (98)

$$\tau_{max} = 69.24 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\text{aplastamiento}} = \frac{S_y}{nch}$$

Ecuación (99)

$$\tau_{\text{aplastamiento}} = 120 \text{ MPa}$$

Para conocer la longitud mínima de la cuña, se iguala el esfuerzo cortante máximo al esfuerzo generado por la fuerza de la superficie del eje, despejando la longitud de la cuña se tiene:

$$lch = \frac{Fch}{\tau_{\text{max}} * ac}$$

Ecuación (100)

$$lch = 17.03 \text{ mm}$$

Para que la cuña pueda resistir al aplastamiento se tomará la mitad del área de la cara de la cuña.

$$lch = \frac{Fch}{\tau_{\text{aplastamiento}} * \frac{W}{2}}$$

Ecuación (101)

$$lch = 19.66 \text{ mm}$$

Con el propósito de que la cuña no falle fácilmente. Se la construirá con una longitud de 30 mm.

Una vez conocidas las dimensiones de la cuña y ranura, se analiza la influencia de la ranura en el eje. Para analizar en el borde de la ranura más cercano al cambio de sección, se toman los momentos:

$$Maxz = 8.57 N * m$$

Momento flexionante en la ranura en el plano X-Z.

$$Mayz = -23.56 N * m$$

Momento flexionante en la ranura en el plano Y-Z

$$Mach = \sqrt{Maxz^2 + Mayz^2}$$

Ecuación (102)

$$Mach = 126.7 N * m$$

Para el análisis se asume que el radio en la parte inferior de la ranura es estándar, de la Tabla del Anexo 5 se tiene que la relación entre el radio de la parte inferior del cuñero y el diámetro del eje es 0.02, de la misma Tabla se obtienen los valores de los factores geométricos de concentración de esfuerzos a flexión y a torsión.

$$ri = 0.02 * dB$$

Ecuación (103)

$$ri = 0.8 mm$$

$$ktch = 2.2$$

Factor geométrico de concentración de esfuerzos a flexión de un cuñero fresado.

$$ktsch = 3$$

Factor geométrico de concentración de esfuerzos a torsión de un cuñero fresado.

Como $r=0.8\text{mm}$ y $S_{ut}=0.40\text{ GPa}$, de la Figura del Anexo 11 se obtiene la sensibilidad de la muesca a la flexión del cuñero.

$$q_{ch} = 0.65$$

Con el factor geométrico de concentración de esfuerzos y la sensibilidad de la muesca, ambos a flexión, se puede calcular la concentración de esfuerzos por flexión del cuñero utilizando la Ecuación 80.

$$k_{fch} = 1.78$$

Teniendo $r=0.08\text{mm}$ y $Bh<200$, de la Figura del Anexo 13 se obtiene la sensibilidad de la muesca a la torsión del cuñero.

$$q_{sch} = 0.85$$

Se procede a calcular la concentración de esfuerzos por torsión del cuñero utilizando la Ecuación 81.

$$k_{fsch} = 2.7$$

Se calcula el esfuerzo alternante generado por el momento flexionante en el cuñero con la Ecuación 82.

$$\sigma'_{ch} = 7.1\text{ MPa}$$

Se calcula el esfuerzo medio generado por la torsión en el cuñero con la Ecuación 83.

$$\sigma_{m'ch} = 105.34 \text{ MPa}$$

Usando ED- criterio de Goodman (Ecuación 84) se tiene que el factor de seguridad es:

$$n_{fch} = 3.13$$

Como se puede observar en los cálculos, los factores de seguridad no son críticos, por lo que podemos decir que el diseño es aceptable para la condición de cargas establecidas.

En la Tabla 11 se muestran los diferentes diámetros calculados en cada punto, de acuerdo a la configuración del eje, con su respectivo factor de seguridad.

Tabla 11.

Resumen del diseño del eje.

DIÁMETROS DEL EJE Y SUS FACTORES DE SEGURIDAD		
PUNTO	DIÁMETRO (mm)	FACTOR DE SEGURIDAD
B	40	2.25
	45	4.51
C	45	2.14
	58.5	5.83
D	58.5	4.34
E	58.5	5.29
F	58.5	14.04
	45	5.07

4.5.3. Selección de rodamientos o cojinetes.

Para la selección de rodamientos se va a utilizar el Catálogo de Rodamientos FAG WL 41 520/3 SB (FAG, 2012). De acuerdo a las cargas que va a soportar el molino, el tipo de rodamiento seleccionado será de bolas de una hilera, ya que puede soportar cargas radiales y axiales, adicionalmente este tipo de rodamientos son apropiados para altas velocidades y giran silenciosamente. De acuerdo al Catálogo utilizado se calcula la capacidad de carga dinámica, la cual está relacionada a la carga dinámica equivalente (la fuerza resultante que actúa en la posición del rodamiento o cojinete), el factor de esfuerzos dinámicos (valor tabulado en el catálogo de acuerdo a la actividad que realiza la máquina o equipo), y el factor de velocidad (este valor también está tabulado pero depende de la velocidad a la que gira el eje).

Para el cálculo de la carga dinámica, se toma en cuenta las reacciones en el punto G, ya que es donde la fuerza resultante es más crítica.

$$PC = \sqrt{F_c^2 x^2 + F_c^2 y^2}$$

Ecuación (104)

$$PC = 2.1 \text{ kN}$$

El valor del factor de esfuerzos dinámicos se obtiene de la Tabla del Anexo 18, donde de acuerdo a la aplicación se puede asignar un valor entre 3 y 3.5, se le asigna un valor de 3.42, con el propósito de obtener un valor directo del catálogo de cuantas horas puede trabajar en condiciones normales el rodamiento sin presentar daños, la cantidad de horas se puede ver en la Tabla del Anexo 19 y es de 20000 horas.

$$fl = 3.42$$

Factor de esfuerzos dinámicos.

El factor de velocidad se obtiene de la Tabla del Anexo 19, de acuerdo a la velocidad del eje, que es de 437.5 rpm, como no existe este valor tabulado se procede a realizar una interpolación para obtener el factor de velocidad (f_n) de acuerdo a la velocidad que se tiene.

$$f_n = 0.423 - \left[\left(\frac{440\text{rpm} - n_{2c}}{440\text{rpm} - 420\text{rpm}} \right) \cdot (0.423 - 0.43) \right]$$

Ecuación (105)

$$f_n = 0.42$$

Una vez que se tiene la carga dinámica equivalente, el factor de esfuerzos dinámicos y el factor de velocidad, se calcula la capacidad de carga dinámica (C_c).

$$C_c = \frac{fl}{f_n} * PC$$

Ecuación (106)

$$C_c = 16.92 \text{ kN}$$

Con el valor de la capacidad de carga dinámica de 16.92 kN, y para un eje de 45 mm de diámetro, de la Tabla del Anexo 20 se elige el rodamiento que soporta hasta 31 KN de carga dinámica.

Para la sujeción de los rodamientos se elegirá un soporte de pie, el cual se puede elegir de acuerdo a la Tabla del Anexo 21.

4.5.4. Juntas soldadas

4.5.4.1. Disco portacuchillas a placa portacuchillas

En la Figura 41 se muestra de color amarillo la soldadura entre los discos portacuchillas y la placa portacuchillas. Por otra parte en la Figura 42 se muestra el esquema dimensionado de la placa portacuchilla y la cuchilla.

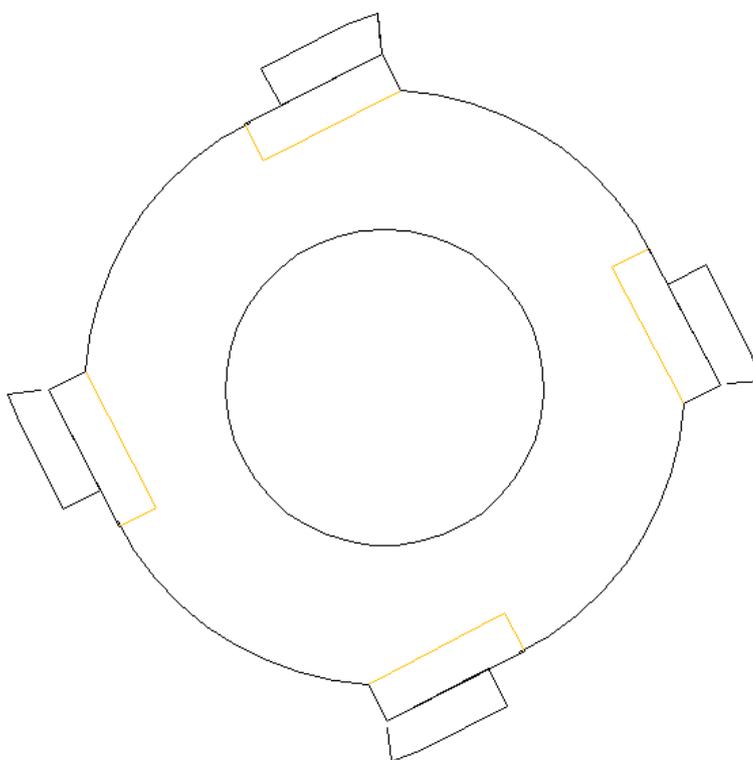


Figura 41. Soldadura del disco portacuchillas.

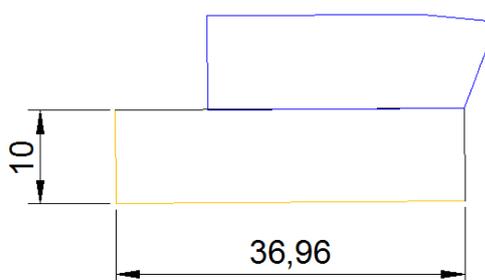


Figura 42. Esquema de la placa portacuchilla y cuchilla.

En base al esquema de soldadura, se calcula el centro de gravedad y segundo momento polar unitario de área (J_u).

$$b = 36.96 \text{ mm}$$

Medida de la base de la placa portacuchilla.

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

Medida del espesor de la placa portacuchilla.

$$X = \frac{b^2}{2 * (b + ds)}$$

Ecuación (107)

$$X = 14.54 \text{ mm}$$

$$Y = \frac{ds^2}{2 * (b + ds)}$$

Ecuación (108)

$$Y = 1.06 \text{ mm}$$

$$J_u = \frac{(b + ds)^4 - 6 * b^2 * ds^2}{12 * (b + ds)}$$

Ecuación (109)

$$J_u = 7175.37 \text{ mm}^3$$

Tomando en cuenta que el espesor seleccionado para la placa de 10mm, de la Tabla del Anexo 22 se obtiene el tamaño de la soldadura.

$$hs = 5 \text{ mm}$$

Tamaño de la soldadura.

Se calcula el segundo momento polar.

$$J_s = 0.707 * h_s * J_u$$

Ecuación (110)

$$J_s = 25364.94 \text{ mm}^4$$

Se evaluará la soldadura para el caso más crítico, dicho caso está en la cuchilla 5 del segundo conjunto. Con las fuerzas y distancias mostradas en la Figura 43, se calculará el momento que generan sobre el punto D, el esfuerzo cortante generado por las fuerzas se va a despreciar debido a la disposición de la soldadura y teniendo en cuenta la forma del disco portacuchilla la cual ofrece suficiente soporte a la soldadura.

En la Figura 44, se muestra la distancia del centro de gravedad hasta el extremo de la cuchilla donde se aplican las fuerzas.

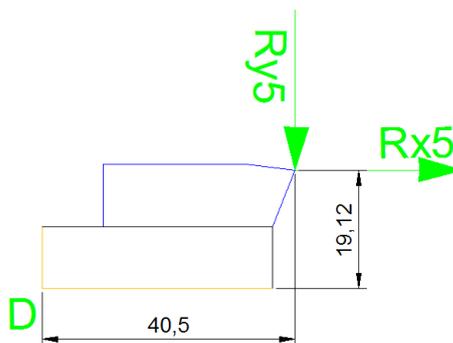


Figura 43. Fuerzas y distancias para la evaluación de la soldadura

$$dy = 40.5 \text{ mm}$$

Distancia del punto D hasta la fuerza Ry5.

$$dx = 19.12 \text{ mm}$$

Distancia del punto D hasta la fuerza Rx5.

Se realiza la sumatoria de momentos en el punto D.

$$MD = Ry5 * dy + Rx5 * dx$$

Ecuación (111)

$$MD = 45.8 N * m$$

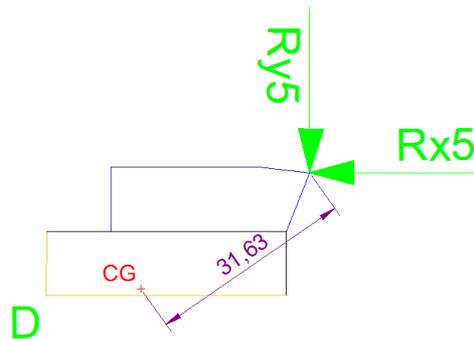


Figura 44. Distancia del centro de gravedad a la aplicación de las fuerzas.

Se calcula el esfuerzo cortante generado por el momento flexionante MD.

$$\tau'' = \frac{MD * rCG}{2 * Js}$$

Ecuación (4.112)

$$\tau'' = 28.55 MPa$$

Se elige como material de aporte electrodo E7018 debido a su elevada resistencia y a que la soldadura va a estar sometida a fatiga, de la Tabla del Anexo 23 se obtiene el valor de la resistencia a la tensión del electrodo seleccionado.

$$Sut = 482 MPa$$

De acuerdo con la Tabla del Anexo 24, el esfuerzo permisible a esfuerzo cortante es:

$$S_{sy} = 0.30 * S_{ut}$$

Ecuación (113)

$$S_{sy} = 144.6 \text{ MPa}$$

De acuerdo al criterio de que el esfuerzo cortante generado por el momento flexionante debe ser menor al esfuerzo permisible a cortante ($\tau < S_{sy}$), se puede concluir que es una soldadura satisfactoria, es decir, no falla.

4.5.4.2. Disco portacuchillas al eje

Al igual que en el caso anterior, se analizará la soldadura para el caso más crítico, dicho caso se encuentra en el disco portacuchillas número 6, debido a que es el que posee mayor momento flexionante (M_s).

$$M_s = -Tpc6$$

Ecuación (114)

$$M_s = 92.4 \text{ N} * m$$

$$r_6 = \frac{DF}{2}$$

Ecuación (115)

$$r_6 = 29.25 \text{ mm}$$

Tomando en cuenta que el espesor seleccionado para el disco portacuchillas de 10mm, de la Tabla del Anexo 22 se obtiene el tamaño de la soldadura.

$$hsd = 5 \text{ mm}$$

Tamaño de soldadura.

Se calcula el segundo momento polar unitario de área.

$$Jud = 2 * \pi * r^3$$

Ecuación (116)

$$Jud = 157237.99 \text{ mm}^3$$

Con el tamaño de soldadura y el segundo momento polar unitario de área, y utilizando la Ecuación 110, se calcula el segundo momento polar.

$$Jd = 555836.29 \text{ mm}^4$$

Con la Ecuación 111, se calcula el esfuerzo cortante generado por el momento flexionante.

$$\tau^{\prime\prime}d = 4.86 \text{ MPa}$$

Para la soldadura del disco portacuchillas el material de aporte va a ser el electrodo E7018. Como se mencionó anteriormente el esfuerzo cortante generado por el momento flexionante debe ser menor al esfuerzo permisible a cortante ($\tau^{\prime\prime} < Ssy$), y teniendo en cuenta los resultados obtenidos se puede decir que es una soldadura satisfactoria, es decir, no falla.

4.5.5. Juntas empernadas

4.5.5.1. Cuchillas fijas a bastidor.

Para poder realizar el análisis de la unión con pernos entre las cuchillas fijas y el bastidor, se calcula la fuerza de separación asumiendo que la junta está floja. En la Figura 45 se muestra la cuchilla fija unida al bastidor mediante un perno con su debido dimensionamiento.

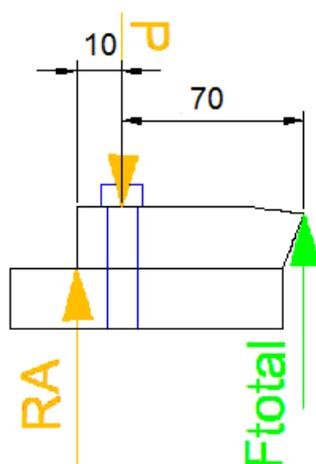


Figura 45. Unión empernada de la cuchilla fija al bastidor.

La fuerza de separación será P , se calcula mediante la sumatoria de momentos en el punto de la reacción RA , se va a tomar tres veces la fuerza, debido a que a lo largo de la cuchilla fija se aplica dicha fuerza por cada conjunto, despejando P tenemos:

$$F_{total1} = 3 * F_{total}$$

Ecuación (117)

$$F_{total1} = 2452.49 \text{ N}$$

$$P = \frac{F_{total1} * (10 \text{ mm} + 70 \text{ mm})}{10 \text{ mm}}$$

Ecuación (118)

$$P = 19619.96 \text{ N}$$

Teniendo en cuenta que los espesores tanto del bastidor ($ep1$) como de la cuchilla (ec) son 6 mm, se procede al cálculo de la rigidez de la junta y el número de pernos necesarios, se tomará un perno M 8 x 1.25 paso grueso grado 4.8.

Iniciamos calculando la longitud de agarre efectivo.

$$li = ep1 + ec$$

Ecuación (119)

$$li = 12 \text{ mm}$$

La longitud de agarre efectivo se toma de la Tabla del Anexo 25. Para poder saber la longitud del perno (Lt), existe una recomendación, de que se debe sumar a la longitud de agarre efectivo 2 roscas más para poder tener un buen agarre.

$$p = 1.25 \text{ mm}$$

Paso del perno.

$$Lt = li + 2 * p$$

Ecuación (120)

$$Lt = 14.5 \text{ mm}$$

Según los cálculos, la longitud del perno es de 14.5 mm, pero de acuerdo a la Tabla del Anexo 26, el tamaño estándar es 15 mm, pero por facilidad de adquisición del perno, la longitud del perno será de 20 mm.

Como los pernos de esa dimensión no poseen parte no roscada, la parte roscada en el agarre será la misma de la longitud de agarre efectivo.

$$l_t = l_i$$

Ecuación (121)

$$l_t = 12 \text{ mm}$$

De la Tabla del Anexo 27 se obtiene el área del perno sujeto a tensión, y con el módulo de Young del acero (E_a) de 207 GPa, se puede calcular la rigidez del perno (K_b).

$$A_t = 36.6 \text{ mm}^2$$

Área de esfuerzo de tensión.

$$K_b = \frac{A_t * E_a}{l_t}$$

Ecuación (122)

$$K_b = 631350 \frac{N}{mm}$$

Una vez conocida la rigidez del perno, se calcula la rigidez de los elementos (K_m) y la constante de rigidez de la unión (C_r).

$$K_m = \frac{0.5774\pi \cdot E_a \cdot d_p}{2 \cdot \ln \left[\frac{5 \cdot (0.5774l_i + 0.5 d_p)}{0.5774l_i + 2.5 d_p} \right]}$$

Ecuación (123)

$$K_m = 2122475.71 \frac{N}{mm}$$

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

Ecuación (124)

$$C_r = 0.23$$

Ya calculadas la rigidez del perno, elementos y unión, se procede a obtener la resistencia de prueba del perno de la Tabla del Anexo 28. Adicionalmente se puede calcular la precarga recomendada (Fir) que es el 75% de la carga de prueba para conexiones no permanentes (Budynas & Keith, Precarga recomendada, 2008).

$$S_p = 310 \text{ MPa}$$

Resistencia de prueba.

$$F_{ir} = 0.75 * A_t * S_p$$

Ecuación (125)

$$F_{ir} = 8509.5 \text{ N}$$

Se va a asumir un factor de carga de $n=3$, debido a que la unión de la cuchilla fija debe estar completamente asegurada, el factor de carga mayor a

uno asegura que el esfuerzo en los pernos no se va a igualar a la resistencia de prueba.

Se calcula el número de pernos requeridos (N_{pu1}) para garantizar la unión empernada.

$$N_{pu1} = \frac{Cr * n * P}{Sp * At - Fir}$$

Ecuación (126)

$$N_{pu1} = 4.76$$

Una vez calculado el número de pernos, se comprobará el factor de carga (n_1) y de separación de la unión (n_0) para $N_{pu2}=5$ pernos.

$$n_1 = \frac{(Sp \cdot At) - Fir}{Cr \cdot \left(\frac{P}{N_{pu2}} \right)}$$

Ecuación (127)

$$n_1 = 3.15$$

$$n_0 = \frac{Fir}{\left(\frac{P}{N_{pu2}} \right) \cdot (1 - Cr)}$$

Ecuación (128)

$$n_0 = 2.81$$

Para la unión emperrada entre el bastidor y la cuchilla fija, se utilizarán 5 pernos M 8 x 1.25 paso grueso, grado 4.8, el número de pernos se comprobará para fatiga que es el estado de cargas a las que está sometido el sistema.

El análisis de la junta se la realizará de acuerdo con el criterio de Goodman modificado. De la Tabla del Anexo 29, se tiene la resistencia a la fatiga (Sep) para el grado 4.8, y de la Tabla del Anexo 28 se obtiene la resistencia mínima a la tensión del perno ($Sutp$).

$$Sep = 66.65 \text{ MPa}$$

$$Sutp = 420 \text{ MPa}$$

Para poder determinar el factor de seguridad por fatiga se debe primero calcular los esfuerzos de la precarga (σ_{ip1}) y de la fuerza de separación (σ_{ap1}).

$$\sigma_{ip1} = \frac{F_{ir}}{A_t}$$

Ecuación (129)

$$\sigma_{ip1} = 232.5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ap1} = \frac{Cr * \frac{P}{N_{pernos}}}{2 * A_t}$$

Ecuación (130)

$$\sigma_{ap1} = 12.29 \text{ MPa}$$

Se calcula el factor de seguridad del perno a fatiga.

$$nfp1 = \frac{Sep * (Sutp - \sigma ip1)}{\sigma ap1 * (Sutp + Sep)}$$

Ecuación (131)

$$nfp1 = 2.09$$

4.5.5.2. Cuchillas móviles a placas portacuchillas

Para el cálculo de los elementos de la junta empernada entre las cuchillas móviles y las placas portacuchillas se tendrá en cuenta la misma consideración que en la junta entre las cuchillas fijas al bastidor, es decir, asumiendo que la junta está floja. En la Figura 46, se muestra la cuchilla móvil unida a la placa portacuchillas mediante un perno, con su debido dimensionamiento.

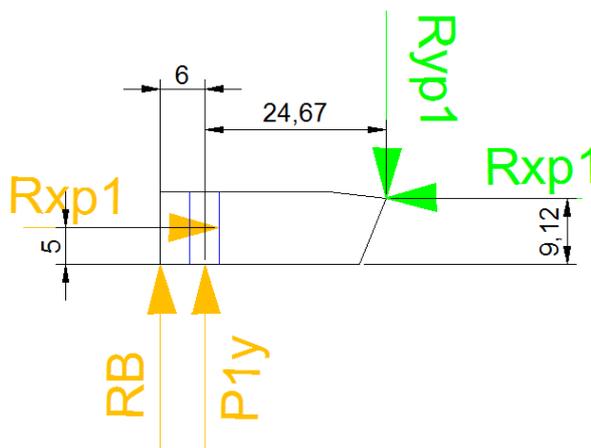


Figura 46. Unión empernada de la cuchilla móvil a la placa portacuchillas.

Las fuerzas Ryp1 y Rxp1 se calculan a partir de la resultante de la fuerza normal y de arrastre (Rs), y tomando un ángulo (θ_p) de 50 grados para las

cuchillas que arrastran. La fuerza de separación será P_{1y} , se calcula mediante la sumatoria de momentos en el punto de la reacción RB.

$$R_{xp1} = R_s * \cos \theta_p$$

Ecuación (132)

$$R_{xp1} = 665.99 \text{ N}$$

$$R_{yp1} = R_s * \sin \theta_p$$

Ecuación (133)

$$R_{yp1} = 793.69 \text{ N}$$

$$P_{1y} = \frac{R_{yp1} * (6 \text{ mm} + 24.67 \text{ mm}) + R_{xp1} * (5 \text{ mm}) - R_{px1} * (9.12 \text{ mm})}{6 \text{ mm}}$$

Ecuación (134)

$$P_{1y} = 3599.77 \text{ N}$$

Teniendo en cuenta que los espesores tanto de la placa portacuchillas (epm) como de la cuchilla móvil (ecm) son 10 mm, se procede al cálculo de la rigidez de la junta y el número de pernos necesarios, se tomará un perno M 8 x 1.25 paso grueso, grado 4.8.

Se calcula la longitud de agarre efectivo con la Ecuación 119.

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

Como se mencionó anteriormente la longitud de agarre efectivo se toma de la Tabla del Anexo 25. De acuerdo a lo ya expuesto, para conocer la longitud del perno (L_{tm}) se aplica la Ecuación 120.

$$L_{tm} = 22.5 \text{ mm}$$

Según los cálculos, la longitud del perno es de 22.5 mm, pero de acuerdo a la Tabla del Anexo 26 el tamaño estándar es 25 mm.

Utilizando la Ecuación 121, se tiene que la parte roscada en el agarre (l_{tm}), será la misma de la longitud de agarre efectivo.

$$l_{tm} = 20 \text{ mm}$$

De la Tabla del Anexo 27 se obtiene el área del perno sujeto a tensión, y con el módulo de Young del acero (E_a) de 207 GPa, se puede calcular la rigidez del perno (K_{bm}) utilizando la Ecuación 122.

$$A_t = 36.6 \text{ mm}^2$$

Área de esfuerzo de tensión.

$$K_{bm} = 378810 \frac{N}{mm}$$

Una vez conocida la rigidez del perno, se calcula la rigidez de los elementos (K_{mm}) con la Ecuación 123, y la constante de rigidez de la unión (C_{rm}) con la Ecuación 124.

$$K_{mm} = 1665397.83 \frac{N}{mm}$$

$$C_{rm} = 0.19$$

Se procederá de la misma forma que en las cuchillas fijas, es decir, se obtendrá la resistencia de prueba del perno de la Tabla del Anexo 28 y se calculará la precarga recomendada (F_{irm}) que es el 75% de la carga de prueba para conexiones no permanentes utilizando la Ecuación 125.

$$S_p = 310 \text{ MPa}$$

Resistencia de prueba.

$$F_{irm} = 8509.5 \text{ N}$$

Para esta unión se asumirá un factor de carga de $n_{cm}=5$, debido a que se debe considerar que las cuchillas móviles estarán sujetas a rotación y por lo tanto a un mayor esfuerzo, y como se mencionó anteriormente, el factor de carga mayor a uno asegura que el esfuerzo en los pernos no se va a igualar a la resistencia de prueba.

De igual manera se calcula el número de pernos (N_{pum}) requeridos para garantizar la unión empernada utilizando la Ecuación 126.

$$N_{pum} = 1.18$$

De acuerdo al cálculo, el número de pernos requerido es $N_{pum}=2$, se comprueba para conocer el factor de carga (n_{m1}) utilizando la Ecuación 127, y el de separación (n_{mo}) utilizando la Ecuación 128.

$$n_{m1} = 8.5$$

$$n_{mo} = 5.8$$

Para la unión emperrada entre la placa portacuchillas y la cuchilla móvil se utilizarán 2 pernos M 8 x 1.25 paso grueso, grado 4.8, el número de pernos se comprobará para fatiga que es el estado de cargas de nuestro caso.

Se utilizará el mismo análisis que se utilizó en la unión del bastidor con la cuchilla fija, y utilizando las mismas resistencias a la tensión y a la fatiga se calculan el esfuerzo de precarga (σ_{im}) utilizando la Ecuación 129, y el esfuerzo de la fuerza de separación (σ_{am}) utilizando la Ecuación 130.

$$\sigma_{im} = 232.5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{am} = 4.56 \text{ MPa}$$

Se calcula el factor de seguridad del perno a fatiga utilizando la Ecuación 131.

$$n_{fm} = 5.64$$

4.6. Diseño de la seguridad

Para el diseño de la seguridad se tomará en cuenta la parte mecánica y la eléctrica, ya que son las que más riesgos pueden presentar.

4.6.1. Seguridad mecánica.

Se deben identificar los riesgos que pueden ocasionar accidentes durante la operación del molino. En el Cuadro 10 se muestra los riesgos en el funcionamiento del molino.

Cuadro 10.

Riesgos en la operación del molino.

RIESGOS EN LA OPERACIÓN DEL MOLINO	
RIESGO	
Bandas y poleas	El desprendimiento de una banda puede ocasionar graves lesiones al operador o personas que se encuentren cercanas al molino
Tolva de alimentación	Al existir rebote de materia prima (PET) el operador puede estar expuesto a lesiones en los ojos.
Cámara de corte	Puede existir atrapamiento o mutilaciones.
Exceso de ruido	El operador puede resultar con lesiones auditivas por la exposición prolongada al ruido

Una vez identificados los riesgos en la operación del molino, en el Cuadro 11 se muestran las alternativas para evitar accidentes.

Cuadro 11.

Alternativas para evitar accidentes.

ALTERNATIVAS PARA EVITAR ACCIDENTES	
ALTERNATIVA	
Bandas y poleas	Implementar una protección de poleas y bandas fabricada en plancha de acero de 3mm de espesor.
Tolva de alimentación	Dotar al operador de gafas protección y guantes. Adicionalmente implementar una protección plástica en la tolva de alimentación que evite la expulsión de la materia prima.
Cámara de corte	El operador debe evitar ponerse en contacto con las cuchillas mientras el molino esté en operación.
Exceso de ruido	Para evitar lesiones auditivas se debe dotar al operador con protección auditiva y tener en cuenta el tiempo de exposición del operador al ruido.

4.6.2. Seguridad eléctrica.

El principal riesgo, al que el operador y las personas que se encuentren cerca del molino están expuestas, es que pueden tener es una descarga eléctrica debido al mal estado de cables o conexiones en el tablero de control.

La principal alternativa para evitar accidentes, es realizar un buen mantenimiento tanto a cables como a conexiones.

Cabe mencionar que a pesar de tomar en cuenta todas las alternativas para evitar accidentes, la capacitación al operador es la mejor herramienta en la prevención de accidentes.

CAPÍTULO V

CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE MOLINO.

5.1. Análisis del proceso de manufactura.

En este proyecto es muy importante el análisis del proceso de manufactura, ya que de este depende la construcción de cada elemento del molino triturador de botellas de PET, es por eso que se va a analizar cada proceso que se utilizará para la fabricación de los elementos, en el Cuadro 12 podemos observar cada elemento del molino con su respectivo proceso de construcción.

Cuadro 12.

Elementos del molino triturador de botellas de PET con su respectivo proceso de construcción y ensamble.

ELEMENTO	PROCESO DE CONSTRUCCIÓN
Eje de transmisión	PROCESO DE REMOCIÓN DE MATERIAL (corte, torneado)
Cuchillas fijas y móviles	PROCESO DE REMOCIÓN DE MATERIAL (corte, limado, fresado, rectificado, taladrado). PROCESO CON CAMBIO DE ESTRUCTURA (Tratamiento térmico).
Discos porta cuchillas	PROCESO DE REMOCIÓN DE MATERIAL (torneado, fresado, rectificado, taladrado, limado).
Barras porta cuchillas	PROCESO DE REMOCIÓN DE MATERIAL (corte, limado, taladrado, fresado, rectificado)
Criba	PROCESO DE REMOCIÓN DE MATERIAL (corte, limado, taladrado). PROCESO DE DEFORMACIÓN (rolado)
CÁMARA DE CORTE: (Eje de transmisión- discos porta cuchillas- barras porta cuchillas- cuchillas móviles)	PROCESO DE UNIÓN Y ENSAMBLADO (soldadura, pernos)
TOLVA DE CARGA	PROCESO DE UNIÓN Y ENSAMBLADO (soldadura, pernos)
TOLVA DE DESCARAGA	PROCESO DE UNIÓN Y ENSAMBLADO (soldadura, pernos)
ESTRUCTURA PRINCIPAL	PROCESO DE UNIÓN Y ENSAMBLADO (soldadura)
BASE DEL MOTOR	PROCESO DE UNIÓN Y ENSAMBLADO (soldadura)

PROCESO DE REMOCIÓN DE MATERIAL

Este proceso es el más utilizado en la fabricación de elementos ya que permite obtener un cambio en la geometría del elemento, en este caso se lo utiliza en la construcción de varios elementos, como se puede observar en el Cuadro 12, se va hacer referencia a los sub procesos que contiene la remoción de material, como son:

- **CORTE:** Este subproceso trata en extraer material de una pieza para ajustarlo a una medida deseada, teniendo como guía un plano de taller, para este subproceso se utilizan herramientas como sierras eléctricas o manuales, amoladora, cizalla (Ver figura 47).



Figura 47. Herramientas de corte: cizalla y amoladora

- **LIMADO:** El objetivo de este subproceso es remover de forma manual pequeñas cantidades de material, para que la pieza tenga una forma y medidas deseadas, también se lo conoce como técnicas de ajuste mecánicas, para este subproceso se utilizó una lima plana paralela y lima redondas.
- **TALADRADO:** Este subproceso permite mecanizar los agujeros mediante un taladro manual o de pedestal (Ver figura 48), en el molino

se lo utilizó para perforar las cuchillas móviles, cuchillas fijas, barras portacuchillas, estructura principal, base del motor, criba, tolvas de carga, descarga y protección de bandas y poleas.



Figura 48. Herramientas de taladrado: taladro de pedestal

- **RECTIFICADO:** En este subproceso se rectifica las caras de un elemento, después que este haya pasado por un proceso de remoción de gran cantidad de material, en el molino se lo utilizó en la rectificación de cuchillas fijas y móviles, barras portacuchillas. Se utilizó una rectificadora planeadora (Ver figura 49).

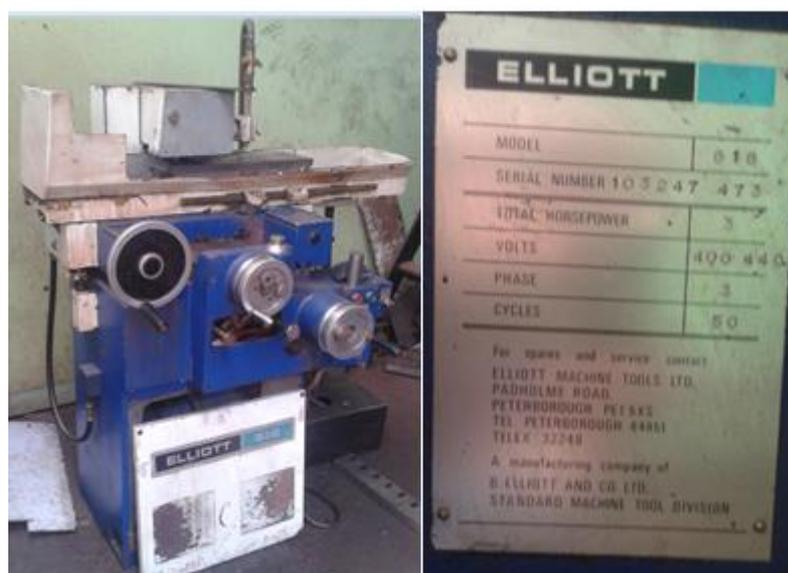


Figura 49. Máquina rectificadora marca: ELLIOTT

- **FRESADO:** Este subproceso consiste en el corte de material mediante una herramienta rotativa (Fresadora), ver figura 50, que puede moverse en los tres ejes, mediante la programación de la mesa de trabajo, en el molino tuvo gran aporte ya que con el fresado se logró construir los filos de las cuchillas fijas y móviles a 75° , en los discos portacuchillas se pudo cortar las bases a 90° para las barras portacuchillas.



Figura 50. Máquina fresadora marca: ADCOCK & SHIPLEY LTD.

- **TORNEADO:** el subproceso de torneado se refiere al desbaste, refrentado, acabado de una pieza, en este caso un eje de transmisión, para la fabricación de este elemento se utilizó un torno paralelo (Ver figura 51), en el cual se fija el elemento a un plato giratorio de cuatro garras, y mediante el movimiento longitudinal o transversal de la herramienta de corte se puede lograr la forma y acabado de cada pieza según el plano de taller.

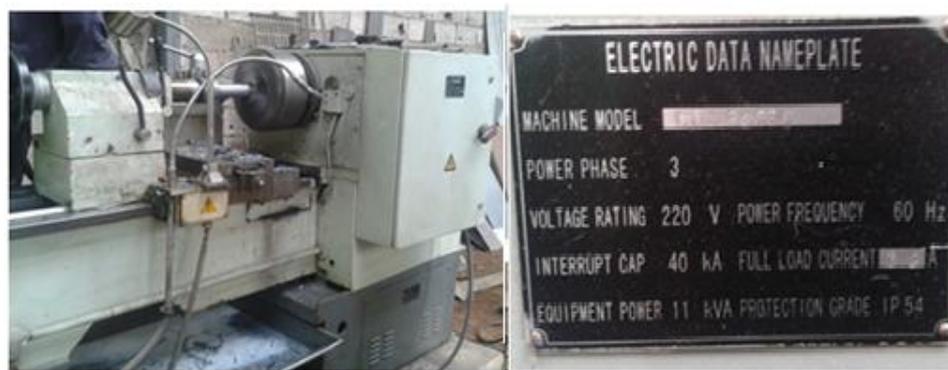


Figura 51. Máquina Torno marca: M3.

PROCESO DE CAMBIO DE ESTRUCTURA

Mediante tratamientos térmicos se logra alterar la estructura del material logrando así mayor tenacidad, dureza y durabilidad en la pieza tratada, en el molino se lo utilizó en las cuchillas fijas y móviles, ya que estas están sometidas a fuerzas de corte y por ende necesitan mayor dureza para que puedan tener una vida útil más larga, es por eso que se las sometió a un tratamiento térmico, dicho tratamiento se lo va a explicar en el apartado 5.3

PROCESO DE DEFORMACIÓN

El proceso de deformación utilizado, es de deformación plástica, ya que no se cambia la masa del material, que es lo que se necesita en este proyecto para la fabricación de la criba, mediante una baroladora (Ver figura 52), se pudo alcanzar la forma de una media luna.



Figura 52. Baroladora

PROCESO DE UNIÓN Y ENSAMBLADO

Este proceso se lo utiliza para unir varias piezas y obtener una forma requerida, en el molino las uniones se las realizaron mediante energía

mecánica y térmica, los subprocesos utilizados para la unión fueron soldadura y pernos.

- Unión mediante soldadura: Este es un sub proceso de unión permanente de los elementos, en el molino existen juntas y uniones de soldadura en: tolva de carga, tolva de descarga, estructura principal, cámara de corte.
- Unión mediante pernos: Este sub proceso permite unir dos o más elementos mediante pernos, dicha unión no es de tipo permanente, se puede realizar ajustes y calibraciones según las exigencias de operación del molino triturador de botellas PET, en el molino cabe mencionar que las uniones empernadas están presentes en la sujeción de las cuchillas móviles con las barras portacuchillas, sujeción entre las cuchillas fijas con la estructura principal, sujeción entre la tolva de carga con la estructura principal, sujeción entre la criba con la estructura principal, sujeción de la tolva de descarga con la estructura principal, sujeción del motor a la estructura principal.

5.2. Construcción de partes del cuerpo.

Para la construcción de las partes se utilizaron los procesos de manufactura ya mencionados en el apartado 5.1, tomando en cuenta que nos referimos como “cuerpo” al molino triturador de botellas de PET.

Dicha construcción se realizó en un taller mecánico el cual está previsto de maquinaria y personal calificado, los cuales en base a su experiencia, planos de taller e instrucciones, pudieron realizar y completar la construcción del molino, cabe tomar en cuenta que en base a lo aprendido en la universidad se pudo seguir y dirigir el proceso de construcción.

En la figura 53 se indica un ejemplo de hoja de procesos de la construcción de la criba:

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO		HOJA DE PROCESOS			CRIBA								
					FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA								
Escala	Material	Dimensiones en bruto	Norma	Tolerancia									
1:1	ASTM A-36	425 x 275 x 2 mm	DIN 7168	± 0.1									
Fase	Subfa.	Oper.	Designación	Croquis	Util	Cont.	N. ^o pasadas	V min	n r.p.m.	A mm/m	a mm/rev	P mm	tiempo seg.
Corte	1	1.1	Fijar la plancha en la cizalla		Ent.								
		1.2	Cortar la plancha 420 x 275 x 2 mm		Cz.	Pr.	1					2	900
Taladro	2	2.1	Fijar la plancha en la entena		Ent.								
		2.2	Perforar agujeros de Ø20 según el detalle A			Pr.	1	40	1600	0.3		2	1200
Rolado	3	3.1	Fijar la plancha en la roladora		Rd.								
		3.2	Rolar plancha según el plano				2						1200

Figura 53. Hoja de procesos: Criba

Para mayor facilidad de entendimiento sobre la construcción de partes del cuerpo, se realizaron hojas de procesos de cada elemento construido (Ver Anexo 30).

5.3. Conformado de cuchillas.

El conformado de las cuchillas móviles y fijas es muy importante en el molino, ya que anteriormente se mencionó que estos elementos van a trabajar bajo fuerzas de corte, fuerzas de impacto, fuerzas radiales y fuerzas de arrastre, es por eso que se tomó la decisión de realizar un tratamiento térmico para alcanzar un cierto grado de dureza el cual garantiza una mayor vida útil de estos elementos.

El material que se utilizó para la construcción de las cuchillas fijas y móviles es AISI 01 el cual es utilizado para herramientas de corte, este es un: “acero al manganeso-cromo-tungsteno, templable en aceite para uso general. Apto para una gran variedad de aplicaciones de trabajo en frío, buena maquinabilidad, estabilidad dimensional en el temple y buena combinación de dureza y tenacidad tras temple y revenido, suministrado a 190 HB aproximadamente” (Ivan Bohman C. A., 2012).

Antes de realizar el tratamiento térmico en la cuchilla, se sigue el siguiente proceso de fabricación. Ver figura 54.

PLATINA: AISI 01
420 x 27,12 x 8mm

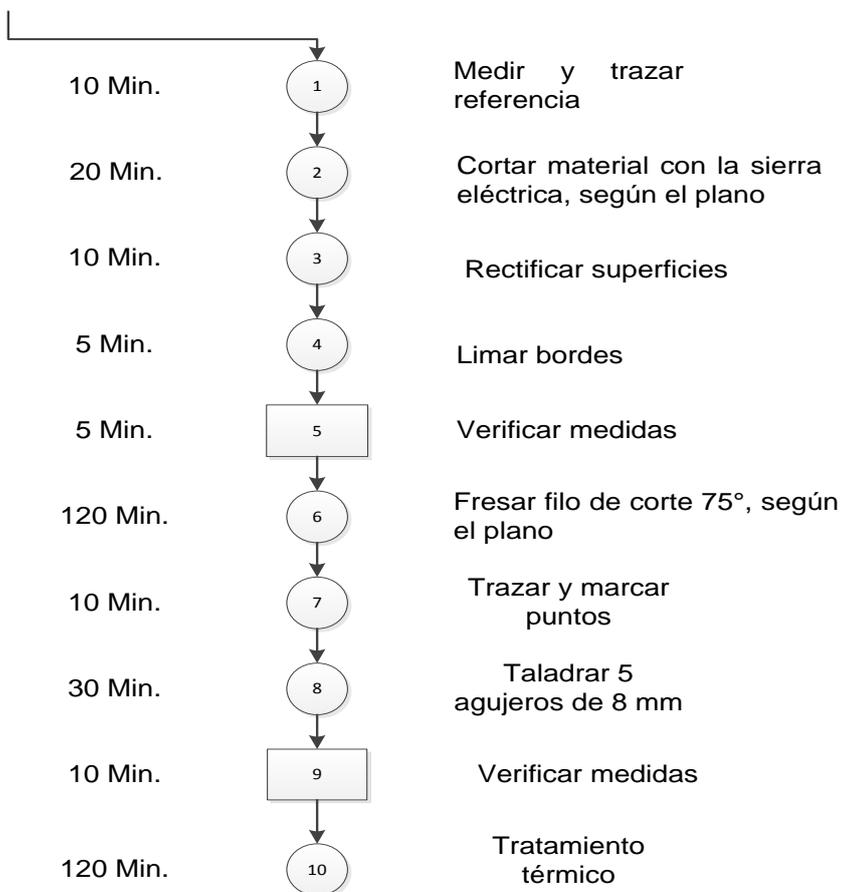


Figura 54. Diagrama de proceso cuchilla fija.

TRATAMIENTO TÉRMICO

El proceso de tratamiento térmico consta de cuatro fases las cuales son:

1. Recocido blando.
2. Eliminación de tensiones.
3. Temple.
4. Enfriamiento.

Recocido blando:

En este proceso se calienta el acero en toda su masa hasta 780°C, el calentamiento debe ser constante, posterior a esto se lo enfría en el horno a una tasa de 15°C/h hasta llegar a los 650°C y por último libremente al aire.

Eliminación de tensiones:

Una vez que la cuchilla ha sido maquinada con el propósito de eliminar esfuerzos residuales producidos por dicho maquinado, se calienta hasta 650°C, el calentamiento se realizará a una tasa constante, una vez alcanzada dicha temperatura se deberá mantener durante 2 horas, para el enfriamiento se debe realizarlo lentamente hasta 500°C y después libremente al aire.

Temple:

Para poder realizar el temple se debe precalentar el acero a una temperatura entre 600 y 700 °C para posteriormente llevar el acero a una temperatura de entre 790 a 850 °C (temperatura de austenización).

Enfriamiento:

Los agentes generalmente utilizados para el enfriamiento son el aceite y el temple escalonado martensítico.

5.4. Soldadura y ubicación de conexiones.

En la fase de diseño se mencionó el tipo de soldadura, sin embargo se debe ubicar de forma gráfica las conexiones y uniones, que van a ser expuestas a la soldadura, a continuación se indica la preparación de la junta a ser soldada de cada elemento del molino triturador de botellas PET que fue ensamblado y unido mediante soldadura:

ESTRUCTURA PRINCIPAL Y BASE DEL MOTOR:

Para las uniones soldadas de la estructura principal y la base del motor de debe realizar en los extremos del ángulo L 60 x 60 x 8 mm un corte a 45° como se indica en la figura 55, con un bisel de 45°, en la figura 56 y 57 se indica la ubicación de las conexiones en la estructura principal y base del motor respectivamente.

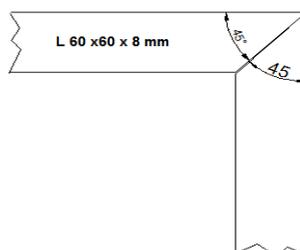


Figura 55. Corte a 45° del ángulo de 60x60x8mm

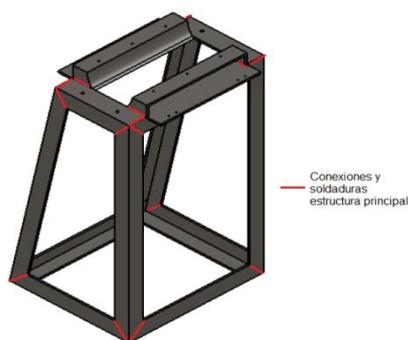


Figura 56. Conexiones y soldadura en la estructura principal

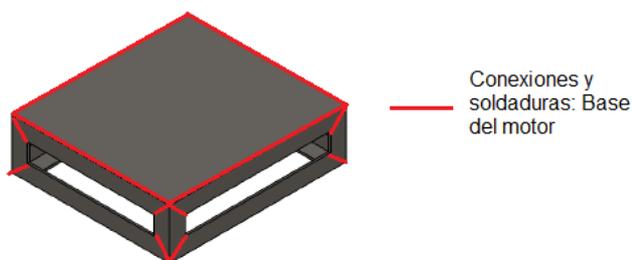


Figura 57. Conexiones y soldadura base del motor

TOLVAS DE CARGA, DESCARGA Y PROTECCIÓN DE BANDAS Y POLEAS:

El material de estos tres elementos es: ASTM A-36 espesor de 3 mm, en la figura 58, 59 y 60, se indica la ubicación de las conexiones en la tolva de carga, descarga y protección de bandas y poleas respectivamente, la soldadura de estos elementos es a tope verificando que los ángulos en las juntas estén de acuerdo a los planos de taller.

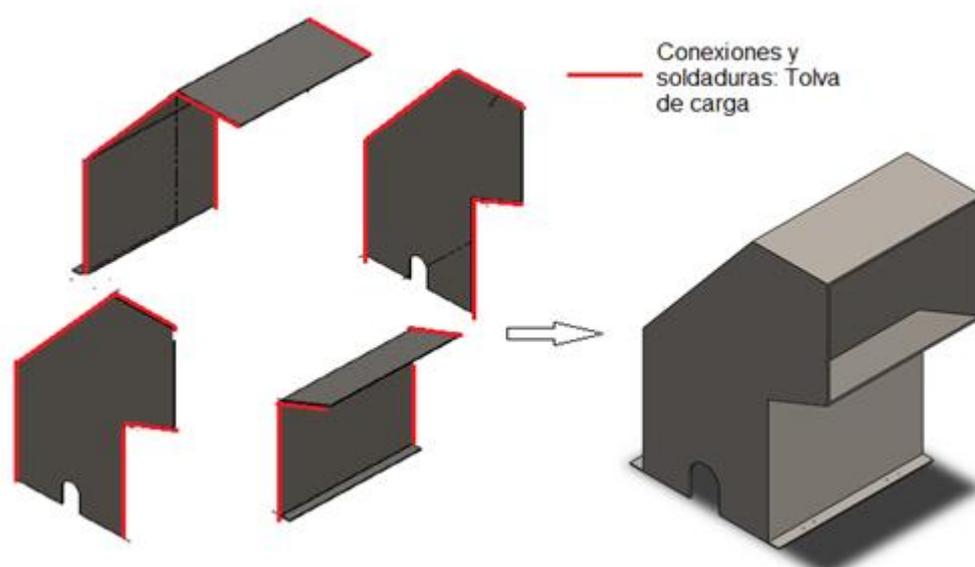


Figura 58. Conexiones y soldadura tolva de carga.

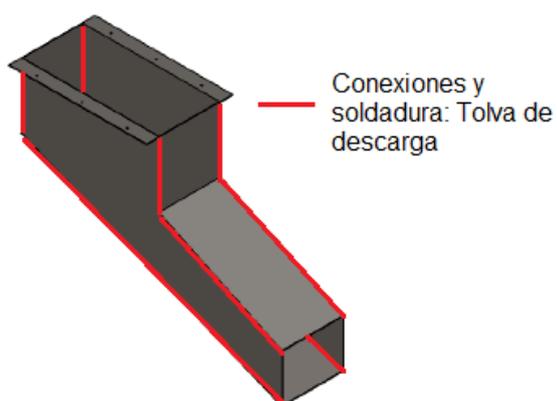


Figura 59. Conexiones y soldadura tolva de descarga.

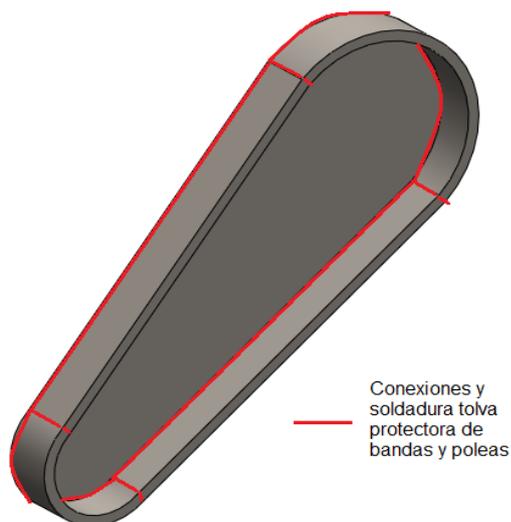


Figura 60. Conexiones y soldadura protección de bandas y poleas.

EJE – DISCOS PORTA CUCHILLAS – BARRAS PORTA CUCHILLAS

El ensamble de estos tres elementos es mediante soldadura, el material del eje: AISI 1018 HR, material del disco porta cuchillas: ASTM A-36, material de las barras porta cuchillas: ASTM A-36, en la figura 61, se indica la ubicación de las conexiones de todo el conjunto, se debe tomar en cuenta que para realizar la soldadura del disco portacuchillas al eje, se deberá biselar a 45° los bordes del agujero del disco portacuchillas, en la unión de la placa portacuchillas al disco portacuchillas se debe realizar un bisel a 45°.

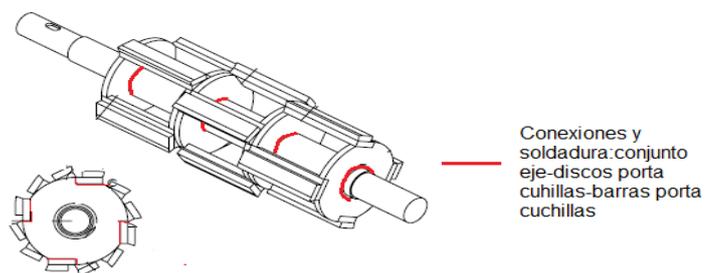


Figura 61. Conexiones y soldadura conjunto: Eje – Discos porta cuchillas – Barras porta cuchillas.

5.5. Diagrama de proceso de cada uno de los elementos del molino.

El diagrama de procesos, es un diagrama de flujo en el cual se indica el tipo de material y la secuencia de las operaciones con las instrucciones para fabricar el elemento.

Se utiliza la simbología según la ASME y la ANSI, en la figura 62 se indica los símbolos utilizados para los diagramas de procesos:

SIMBOLOGÍA ASME		SIMBOLOGÍA ANSI	
Símbolo	Significado	Símbolo	Significado
	Operación		Líneas de flujo
	Inspección		Conector de página
	Almacenamiento		
	Almacenamiento Temporal		

Figura 62. Simbología para diagramas de procesos según la ASME y ANSI.

Fuente: (POLITICA, 2009)

A continuación se indica un ejemplo del diagrama de procesos de la barra portacuchillas móviles, figura 63, los demás diagramas de procesos de los elementos del molino triturador de botellas PET se encuentran en el Anexo 31.

DIAGRAMA DE PROCESO DE FABRICACIÓN

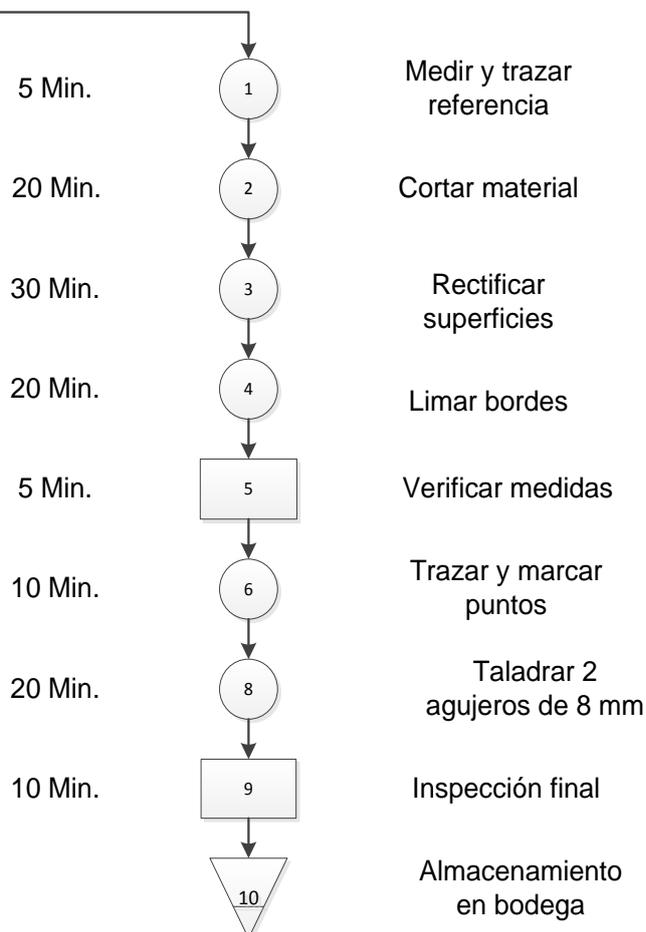
NOMBRE PRODUCTO: BARRA PORTACUCHILLAS MÓVILES

CANTIDAD: 12

DIAGRAMADORES: ALEJANDRO MUÑOZ, ALBERTO SANUNGA

PLATINA: ASTM A-36

140 x 45 x 12.7mm



Tiempo total: 120 Min.

Figura 63. Diagrama de procesos de fabricación cuchillas móvil.

5.6. Inspección durante el proceso de fabricación.

Para comenzar el proceso de fabricación del molino triturador de botellas PET, se clasificó por grupos a los elementos del molino, los cuales se fabricaron según el siguiente orden:

- Primer Grupo:
Cámara de corte: la conforman el eje de transmisión, discos porta cuchillas y barras porta cuchillas, cuchillas fijas y móviles.
- Segundo Grupo:
Estructura principal y base del motor.
- Tercer Grupo:
Tolva de carga, tolva de descarga, tolva protectora de bandas y poleas.

PRIMER GRUPO:

En este grupo consta la cámara de corte, como se indica en la figura 64, como primer paso se desbaste todo el eje a un diámetro de 58.5 mm, este diámetro se controló mediante el uso de un pie de rey marca "Mitutoyo" que tiene un rango de 300 mm y una apreciación de 0.01 mm. Para la ubicación de los discos portacuchillas se realizó un trazo previo en el eje utilizando el mismo pie de rey ya mencionado, también se verificó que los biseles del disco portacuchillas se encuentren de acuerdo a la preparación de juntas ya especificadas anteriormente.



Figura 64. Cámara de corte: eje de transmisión – discos porta cuchillas.

En la figura 65, se puede observar que luego de soldar los discos portacuchillas al eje de transmisión, se debe fresar los discos según el plano,

logrando bases planas que se controlaron con un nivel torpeda, para colocar las barras portacuchillas que van soldadas en los discos, al igual que en las otras uniones soldadas se verificó biseles y ángulos en la preparación de juntas. Para el control de los diámetros de 45 y 40 mm se utilizó el pie de rey ya mencionado. En lo que se refiere a la sujeción de la polea al eje se inspeccionó que tanto cuña como cuñero cumplan las especificaciones del plano.

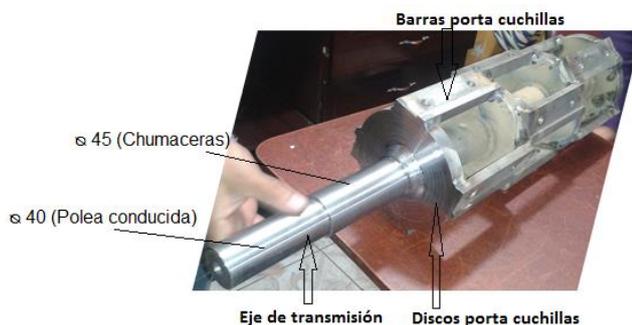


Figura 65. Cámara de corte terminada.

En la figura 66, se pueden observar la manera de cómo se maquina las cuchillas fijas y móviles, una vez afiladas se procede a verificar si los ángulos son los adecuados de acuerdo a los planos de taller. Para la perforación de los agujeros se trazó su ubicación de acuerdo a planos y se verificó con el pie de rey ya mencionado.



Figura 66. Fabricación cuchillas.

SEGUNDO GRUPO:

Este grupo está conformado por la estructura principal y la base del motor, los cuales fueron fabricados con un ángulo ASTM A36 de 60 x 60 x 8 mm, como primer control se realizó la medición de acuerdo a planos de los ángulos utilizando para esto un flexómetro de rango de 3 m y apreciación de 1 mm. El segundo control se lo realizó en la preparación de juntas comprobando ángulos y biseles. En la figura 67, se indica la fabricación de la estructura principal.



Figura 67. Fabricación: Estructura principal.

TERCER GRUPO:

En este grupo se fabrican las tolvas de carga, descarga y protección de bandas y poleas, para estos elementos se utilizó el material ASTM A36 espesor de 3 mm, en la construcción de las tolvas se verificó el trazo de medidas en las planchas de acero según los planos con el flexómetro ya mencionado. Posteriormente se realizó el doblado de las planchas, y se verificó los ángulos según el plano, para obtener las formas de las tolvas, en la figura 68, se indica la fabricación de la tolva de carga y descarga, y la fabricación de la protección de bandas y poleas.



Figura 68. Fabricación: tolvas de carga, descarga y protectora de bandas y poleas.

5.7. Proceso de ensamblaje de la máquina.

Luego de terminar con la fabricación y la inspección de cada elemento de la máquina, el siguiente proceso es el de ensamblaje.

ENSAMBLE DE LA ESTRUCTURA GENERAL:

La estructura general está compuesta de dos elementos los cuales son: la estructura principal y la base del motor. En las figuras 69 y 70 se indican el diagrama de proceso de ensamble de estos dos elementos respectivamente:

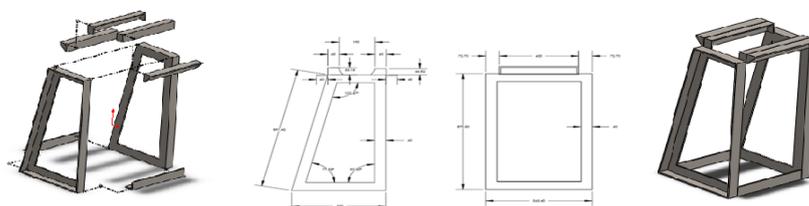
DIAGRAMA DE PROCESO DE FABRICACIÓN

NOMBRE PRODUCTO: ENSAMBLE ESTRUCTURA PRINCIPAL

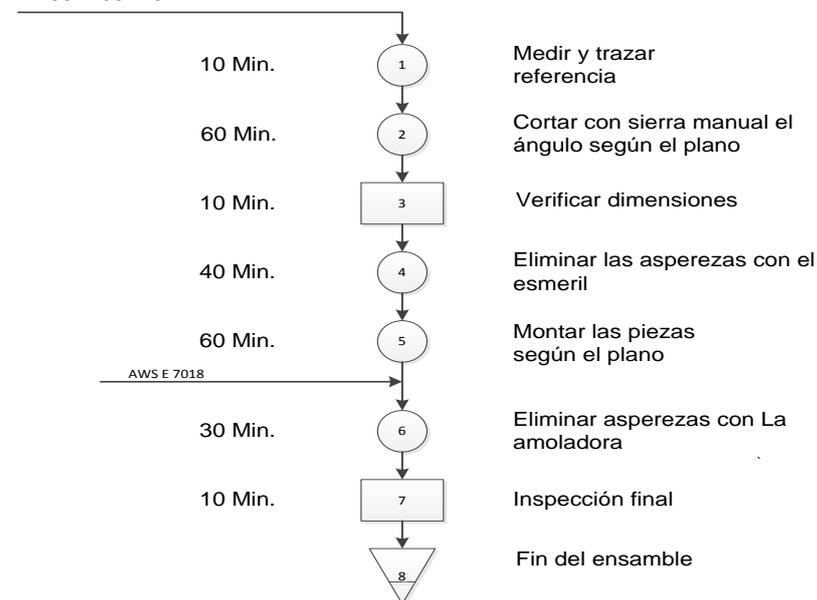
CANTIDAD: 1

DIAGRAMADORES: ALEJANDRO MUÑOZ, ALBERTO SANUNGA

PLANO:



**ÁNGULO ASTM A36
L 60 x 60 x 8 mm**



Tiempo total: 220 Min.

Figura 69. Proceso de ensamble: Estructura principal.

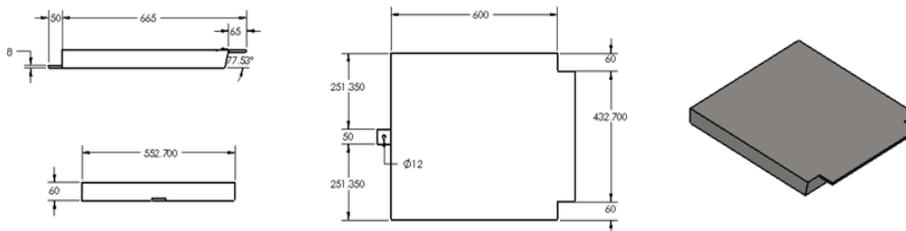
DIAGRAMA DE PROCESO DE FABRICACIÓN

NOMBRE PRODUCTO: ENSAMBLE ESTRUCTURA - BASE DEL MOTOR TRIFASICO

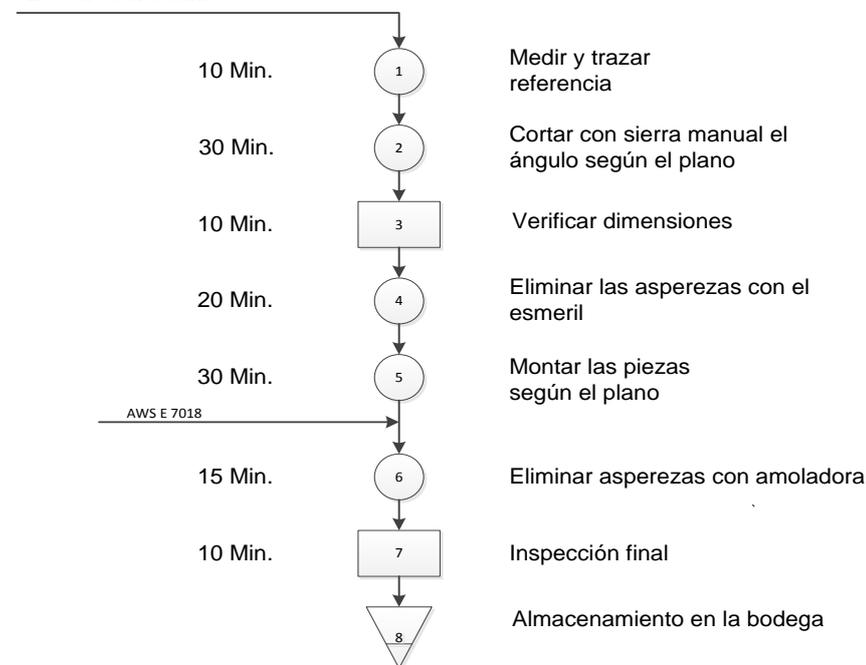
CANTIDAD: 1

DIAGRAMADORES: ALEJANDRO MUÑOZ, ALBERTO SANUNGA

PLANO:



**ÁNGULO ASTM A36
L 60 x 60 x 8 mm**



Tiempo total: 125 Min.

Figura 70. Proceso de ensamble: Base del motor.

Una vez terminado el ensamble de los dos elementos ya mencionados, se procede a unirlos mediante soldadura para formar la estructura general. En la figura 71, se indica el ensamble de la estructura general.

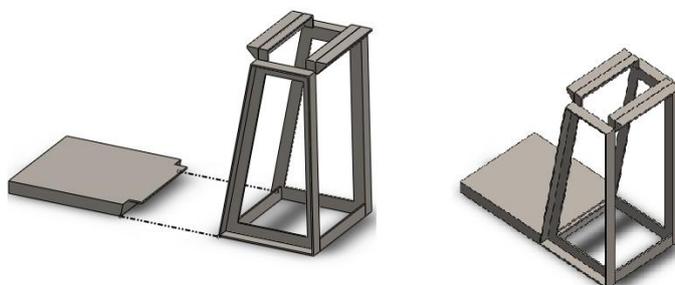
DIAGRAMA DE PROCESO DE FABRICACIÓN

NOMBRE PRODUCTO: ENSAMBLE ESTRUCTURA GENERAL

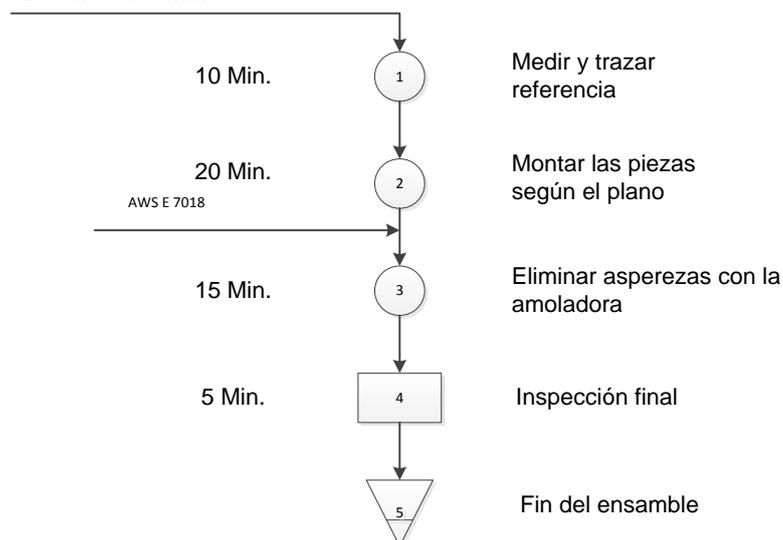
CANTIDAD: 1

DIAGRAMADORES: ALEJANDRO MUÑOZ, ALBERTO SANUNGA

PLANO:



ÁNGULO ASTM A36
L 60 x 60 x 8 mm



Tiempo total: 50 Min.

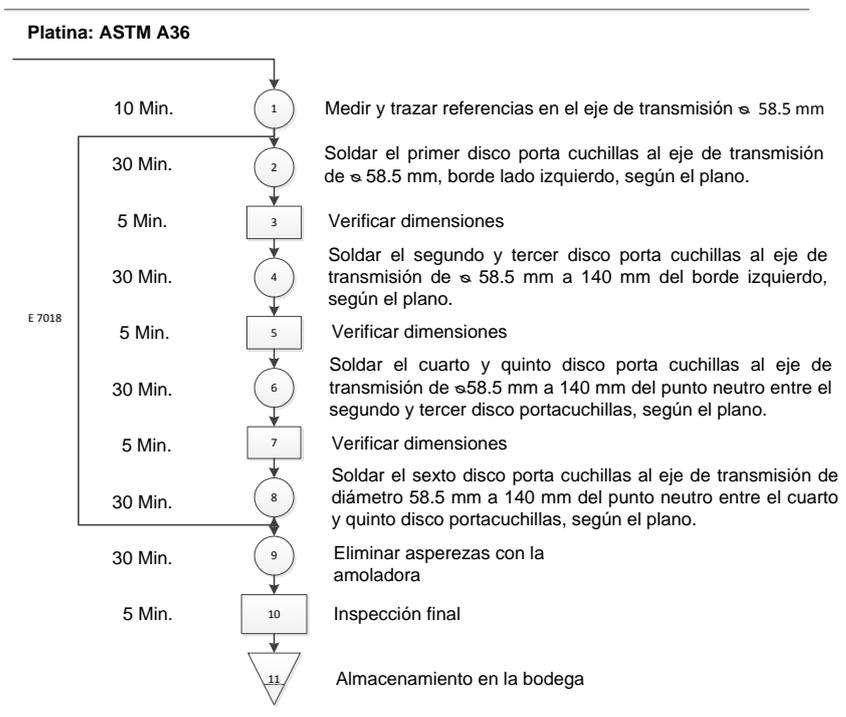
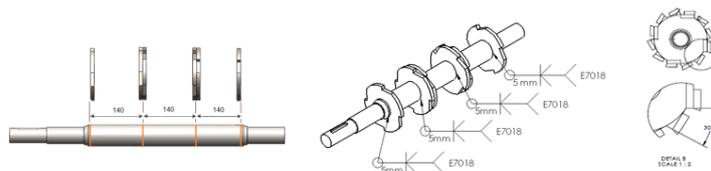
Figura 71. Proceso de ensamble: Estructura general.

ENSAMBLE DE LA CÁMARA DE CORTE:

La cámara de corte está compuesta por un conjunto de elementos, los cuales fueron ensamblados por partes para una mayor facilidad de montaje

en la estructura general, el ensamble de las cuchillas fijas y móviles se lo realiza después, por la calibración de las mismas. En la figura 72, se indica el procedimiento para ensamblar los discos portacuchillas al eje de transmisión mediante soldadura.

DIAGRAMA DE PROCESO DE FABRICACIÓN
NOMBRE PRODUCTO: ENSAMBLE: EJE DE TRANSMISIÓN – DISCOS PORTACUCHILLAS
DIAGRAMADORES: ALEJANDRO MUÑOZ, ALBERTO SANUNGA
CANTIDAD: 1
PLANO:



Tiempo total: 180 Min.

Figura 72. Proceso de ensamble: Eje de transmisión – discos portacuchillas.

Al terminar el ensamble de los discos portacuchillas al eje, se procede a unir mediante soldadura las placas portacuchillas como se indica en la figura 73:

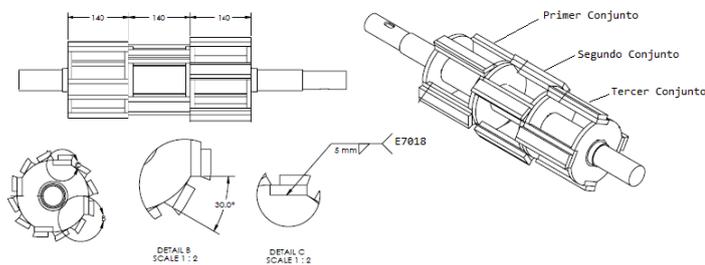
DIAGRAMA DE PROCESO DE FABRICACIÓN

NOMBRE PRODUCTO: ENSAMBLE: DISCOS PORTA CUCHILLAS – PLACAS PORTACUCHILLAS

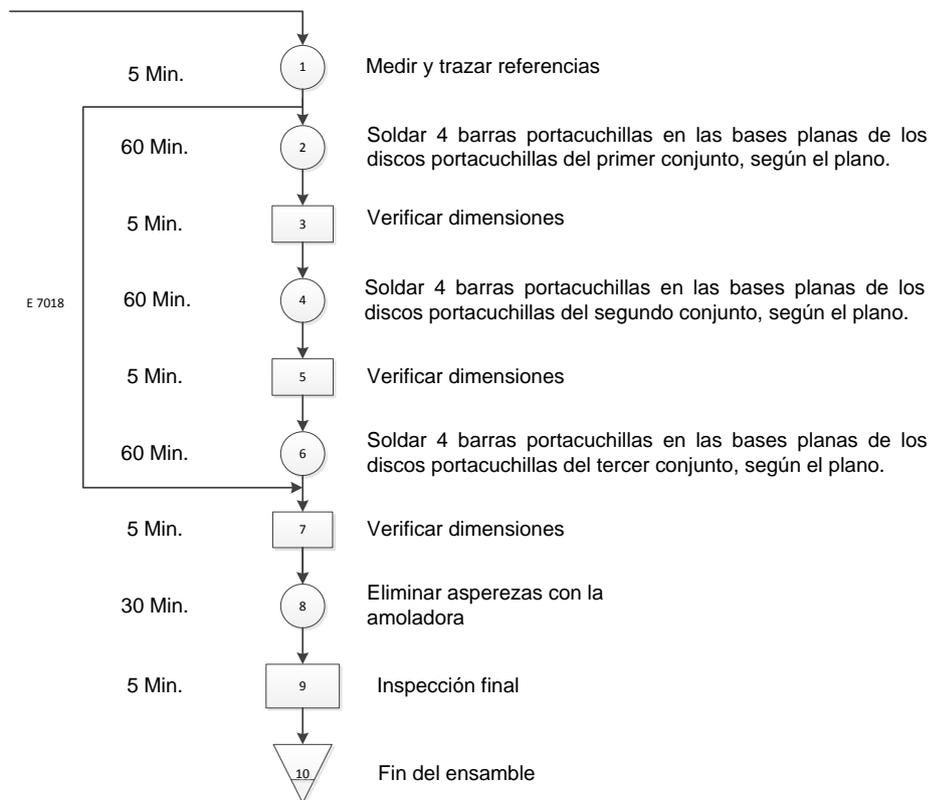
CANTIDAD: 1

DIAGRAMADORES: ALEJANDRO MUÑOZ, ALBERTO SANUNGA

PLANO:



Platina: ASTM A36



Tiempo total: 235 Min.

Figura 73. Proceso de ensamble: Discos portacuchillas – placas portacuchillas.

Para completar el ensamble de la cámara de corte, en la figura 74, se muestra el ensamble de la cámara de corte (eje de transmisión– discos portacuchillas, barras portacuchillas) a las chumaceras, estas van colocadas y sujetadas una a cada extremo del eje de diámetro de 45 mm.

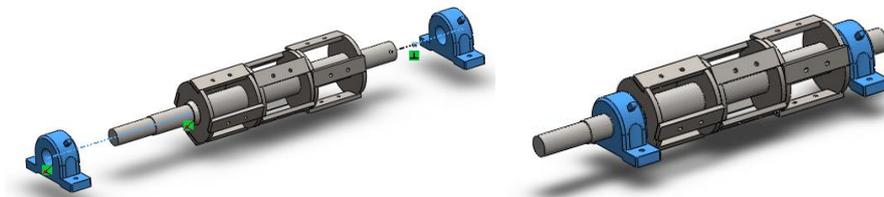
DIAGRAMA DE PROCESO DE FABRICACIÓN

NOMBRE PRODUCTO: ENSAMBLE: CHUMACERAS A LA CÁMARA DE CORTE

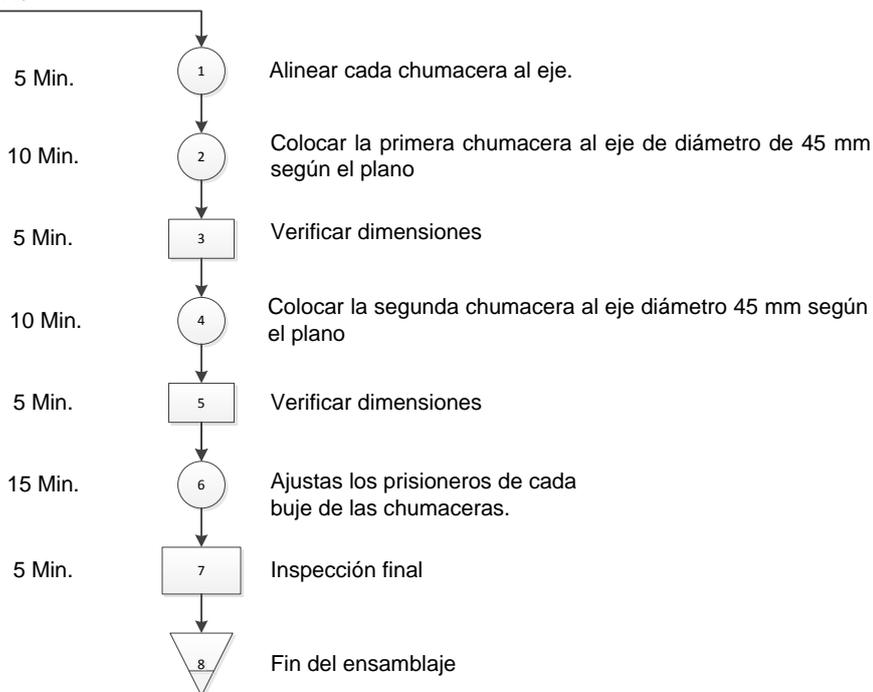
CANTIDAD: 1

DIAGRAMADORES: ALEJANDRO MUÑOZ, ALBERTO SANUNGA

PLANO:



Ensamble cámara de corte



Tiempo total: 55 Min.

Figura 74. Ensamble: Chumaceras a la cámara de corte.

ENSAMBLE DE LA CÁMARA DE CORTE A LA ESTRUCTURA GENERAL:

En la estructura general se acopla la cámara de corte, que se sujeta mediante pernos M 10 x 1.5 mm en las chumaceras, en la figura 75, se

indica la cámara de corte ya ensamblada y empernada a la estructura general.

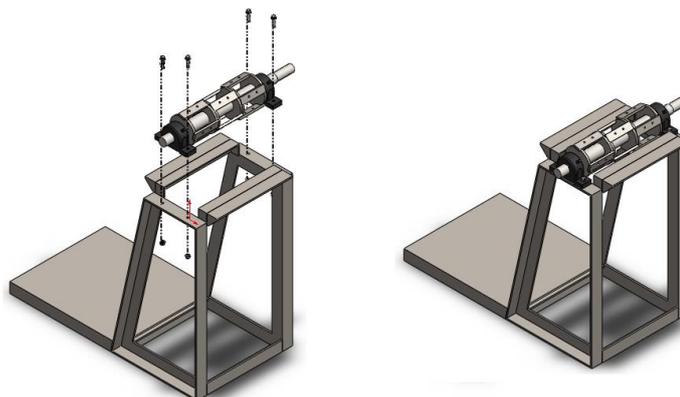
DIAGRAMA DE PROCESO DE FABRICACIÓN

NOMBRE PRODUCTO: ENSAMBLE: CÁMARA DE CORTE – ESTRUCTURA GENERAL

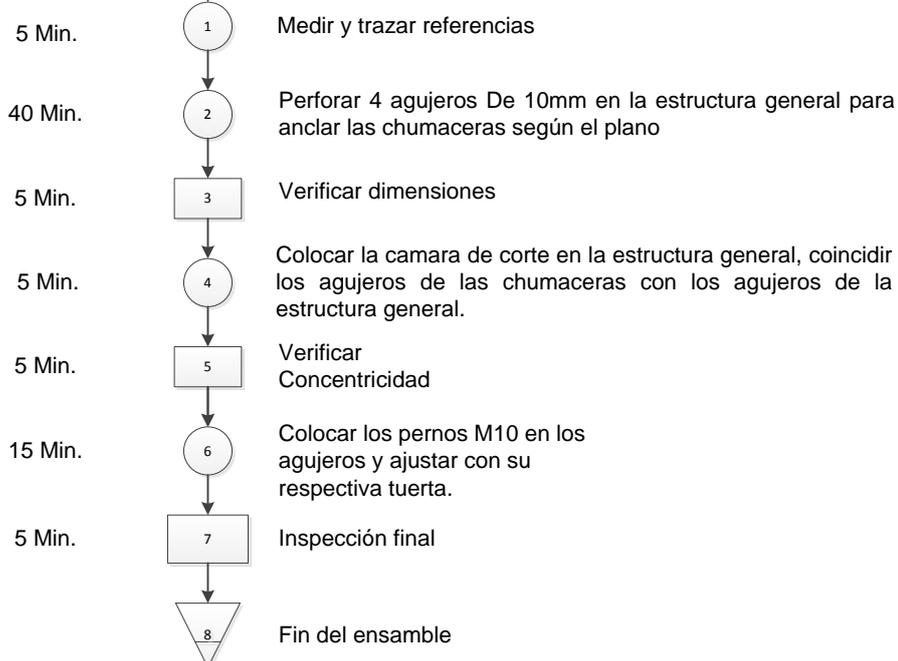
CANTIDAD: 1

DIAGRAMADORES: ALEJANDRO MUÑOZ, ALBERTO SANUNGA

PLANO:



Ensamble cámara de corte a la estructura general



Tiempo total: 80 Min.

Figura 75. Ensamble de la cámara de corte a la estructura general.

ENSAMBLE DE LA CRIBA A LA ESTRUCTURA GENERAL:

La sujeción de la criba a la estructura general, es por medio de pernos M4 x 0.7 mm, el ensamble se lo indica en la figura 76.

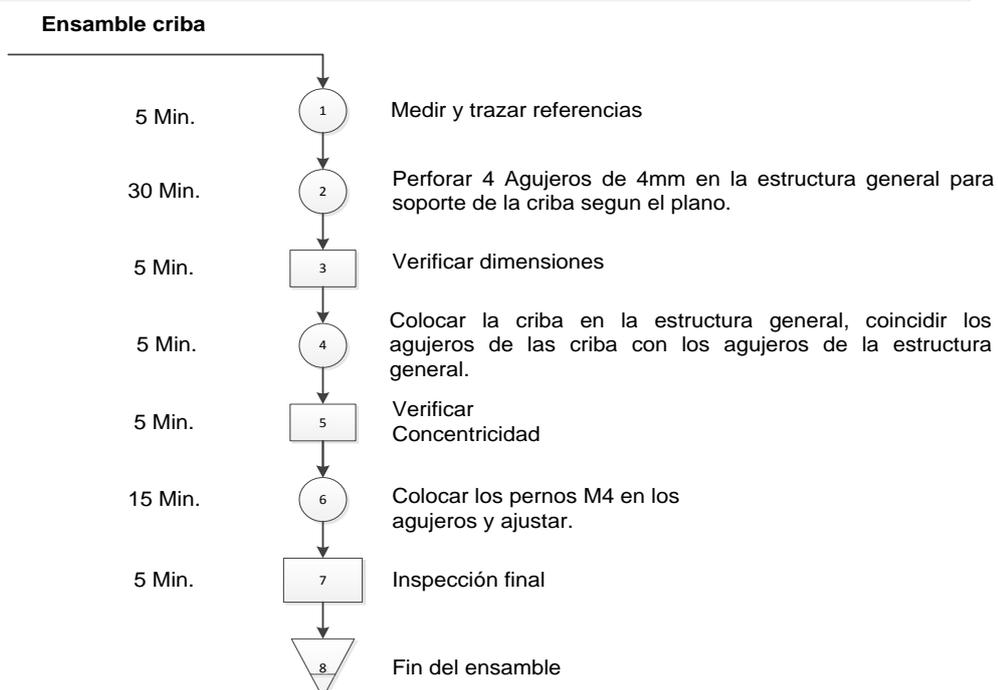
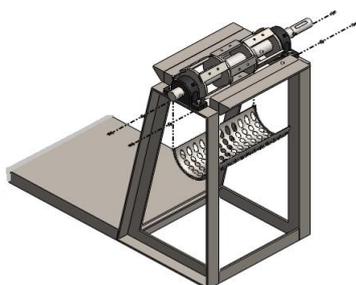
DIAGRAMA DE PROCESO DE FABRICACIÓN

NOMBRE PRODUCTO: ENSAMBLE: CRIBA – ESTRUCTURA GENERAL

CANTIDAD: 1

DIAGRAMADORES: ALEJANDRO MUÑOZ, ALBERTO SANUNGA

PLANO:



Tiempo total: 70 Min.

Figura 76. Ensamble de la criba a la estructura general.

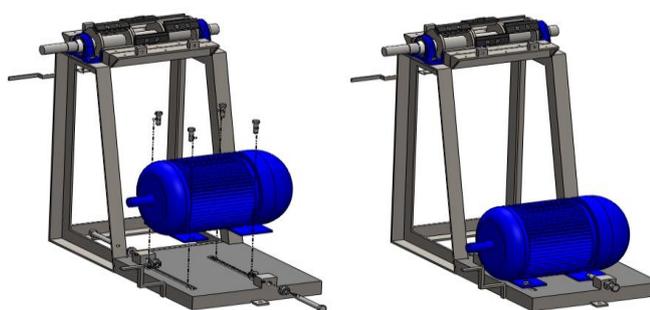
ENSAMBLE DEL MOTOR A LA ESTRUCTURA GENERAL:

La fijación del motor a la estructura general, se lo realiza con pernos M16 x 2mm, para la alineación del motor se utilizan pernos guía M16 x 2mm, el proceso de fijación del motor se indica en la figura 77.

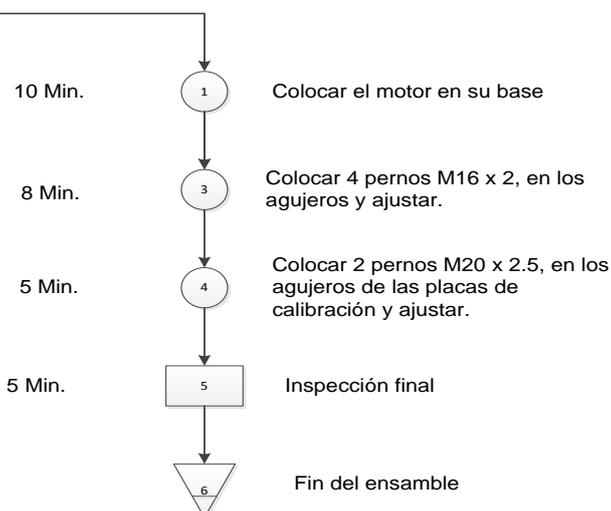
DIAGRAMA DE PROCESO DE FABRICACIÓN

NOMBRE PRODUCTO: ENSAMBLE: MOTOR – ESTRUCTURA GENERAL
DIAGRAMADORES: ALEJANDRO MUÑOZ, ALBERTO SANUNGA

CANTIDAD: 1
PLANO:



Montaje del motor



Tiempo total: 28 Min.

Figura 77. Ensamble del motor a la estructura general.

ENSAMBLE DE LAS POLEAS DE 20 in Y 5 in:

Para fijar las poleas de 20 in y 5 in en sus respectivos ejes de transmisión, se utilizaron cuñeros, en la figura 78, se indica el proceso de ensamble.

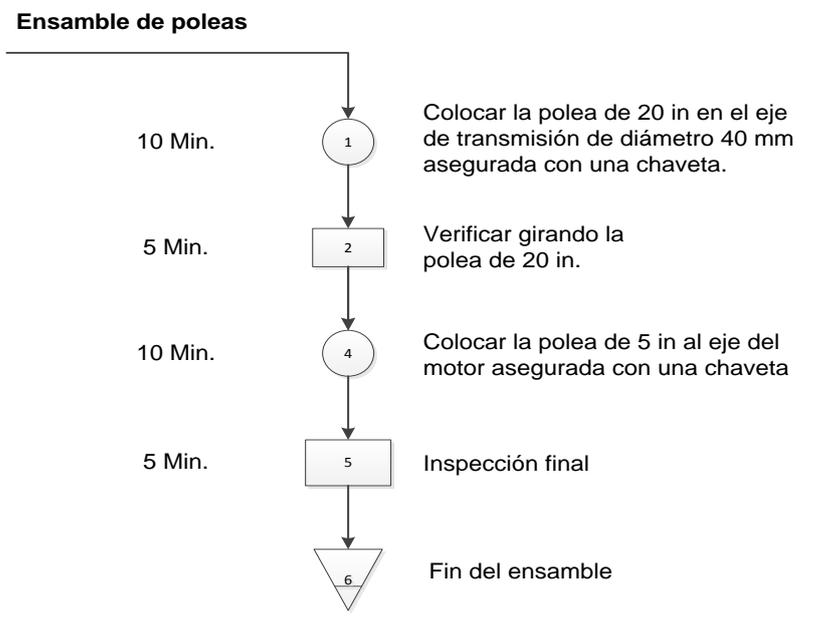
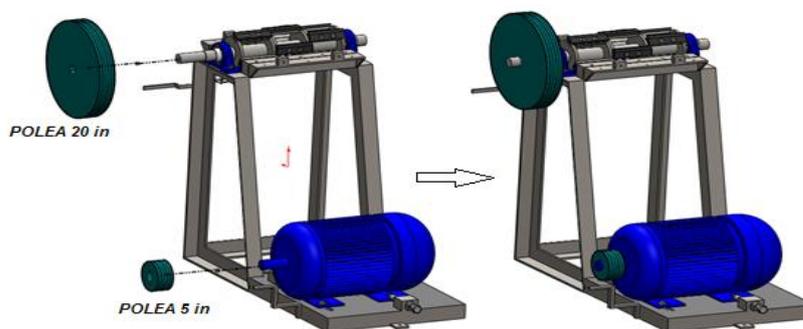
DIAGRAMA DE PROCESO DE FABRICACIÓN

NOMBRE PRODUCTO: ENSAMBLE: POLEA DE 20 in. Y POLEA DE 5 in.

CANTIDAD: 1

DIAGRAMADORES: ALEJANDRO MUÑOZ, ALBERTO SANUNGA

PLANO:



Tiempo total: 30 Min.

Figura 78. Ensamble de las poleas de 20 in y 5 in.

ENSAMBLE DE LAS BANDAS TIPO B Y ALINEACIÓN DE LAS POLEAS:

Se debe colocar las 3 bandas tipo B, entre la polea de 20 in y la polea de 5 in, cada polea posee 3 ranuras, una vez colocadas las bandas, se alinean las poleas y se procede al ajuste de la tensión de las bandas, este proceso de ensamblaje se indica en la figura 79.

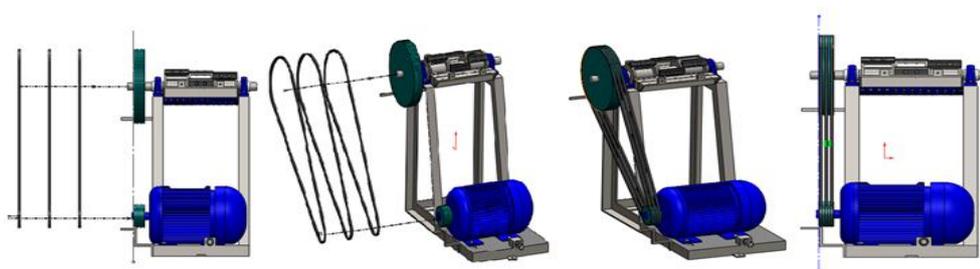
DIAGRAMA DE PROCESO DE FABRICACIÓN

NOMBRE PRODUCTO: ENSAMBLE DE BANDAS Y ALINEACIÓN DE POLEAS

CANTIDAD: 1

DIAGRAMADORES: ALEJANDRO MUÑOZ, ALBERTO SANUNGA

PLANO:



Ensamble de bandas y alineación de poleas

10 Min.

1

Colocar las 3 bandas tipo B, cada una entre las ranuras de la polea de 20 in y la polea de 5 in.

5 Min.

2

Verificar girando la polea de 20 in.

10 Min.

3

Alinear poleas

10 Min.

4

Ajustar la tensión en las bandas

5 Min.

5

Inspección final

6

Fin del ensamble

Tiempo total: 40 Min.

Figura 79. Ensamble de las bandas tipo B y alineación de las poleas.

ENSAMBLE DE LAS CUCHILLAS FIJAS Y MÓVILES:

Como primer paso, se deben colocar las 12 cuchillas móviles, una por una sobre la placa portacuchillas de la cámara de corte, cada cuchilla esta sujeta con 2 pernos M 8 x 1.25mm, luego de fijar las cuchillas móviles, se procede a la colocación de las cuchillas fijas, que están sujetas a la estructura, cada una con 5 pernos M 8 x 1.25mm, antes del ajuste de las cuchillas fijas estas se calibran con los pernos de calibración con el objetivo de obtener una distancia de 0.28 mm entre los filos de corte de la cuchilla fija y móvil, durante la calibración se debe girar la las cuchillas móviles para que no exista interferencia o choque entre cuchillas. En la figuras 80 y 81 se indican el proceso de calibración y ensamblaje.



Figura 80. Calibración de la cámara de corte.

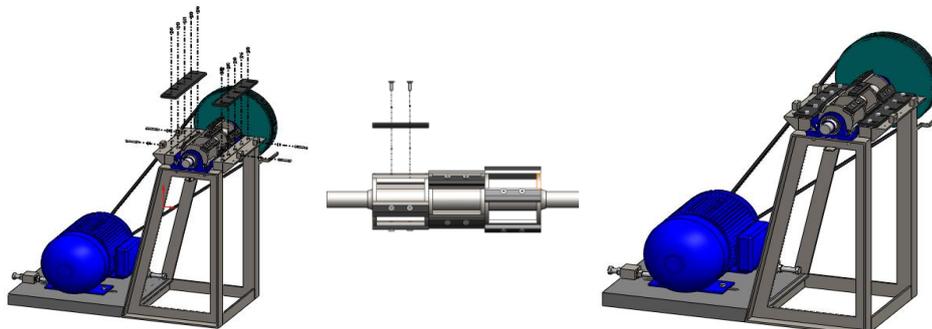
DIAGRAMA DE PROCESO DE FABRICACIÓN

NOMBRE PRODUCTO: ENSAMBLE DE LAS CUCHILLAS FIJAS Y MÓVILES

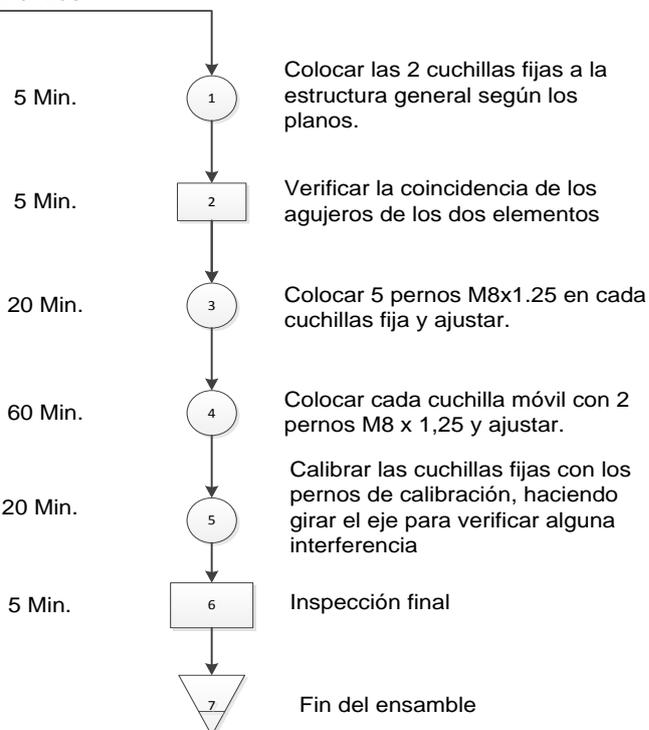
CANTIDAD: 1

DIAGRAMADORES: ALEJANDRO MUÑOZ, ALBERTO SANUNGA

PLANO:



Ensamble de cuchillas fijas y móviles



Tiempo total: 115 Min.

Figura 81. Ensamble y calibración de las cuchillas fijas y móviles.

ENSAMBLE DE LA TOLVA DE DESCARGA:

La tolva de descarga está sujeta a la estructura general por 2 pernos M 5 x 0.8 mm, esta tolva se la ubica por debajo de la cámara de corte, en la figura 82, se indica el proceso de ensamblaje.

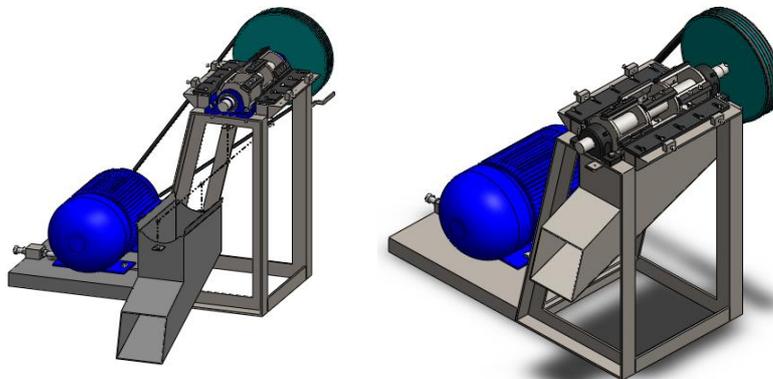
DIAGRAMA DE PROCESO DE FABRICACIÓN

NOMBRE PRODUCTO: ENSAMBLE DE LA TOLVA DE DESCARGA

CANTIDAD: 1

DIAGRAMADORES: ALEJANDRO MUÑOZ, ALBERTO SANUNGA

PLANO:



Ensamble de la tolva de descarga

2 Min.

1

Alinear la tolva de descarga en la parte baja de la estructura general.

2 Min.

2

Verificar la coincidencia de los agujeros de los dos elementos

10 Min.

3

Colocar 2 pernos M5 y ajustar.

3 Min.

4

Inspección final

5

Fin del ensamble

Tiempo total: 17 Min

Figura 82. Ensamble de la tolva de descarga.

ENSAMBLE DE LA TOLVA DE CARGA:

Una vez calibrada la cámara de corte, y que se haya verificado que no existe interferencia entre las cuchillas móviles y fijas, se coloca la tolva de carga, que se ubica sobre la estructura general, sujeta con 6 pernos M 5 x 0.8 mm, este ensamble se indica en la figura 83.

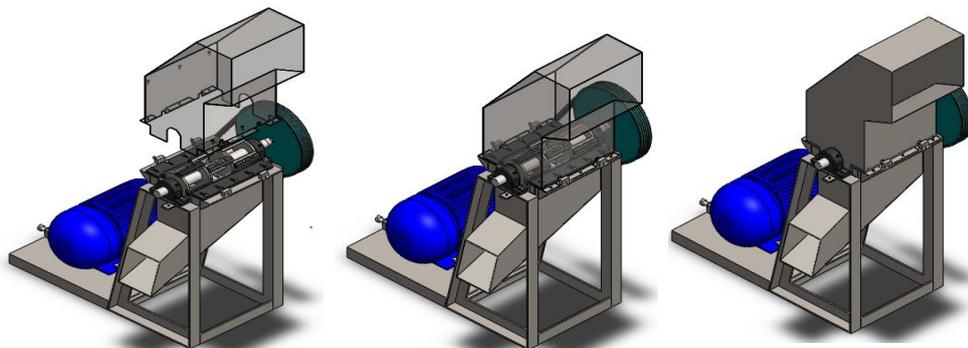
DIAGRAMA DE PROCESO DE FABRICACIÓN

NOMBRE PRODUCTO: ENSAMBLE DE LA TOLVA DE CARGA

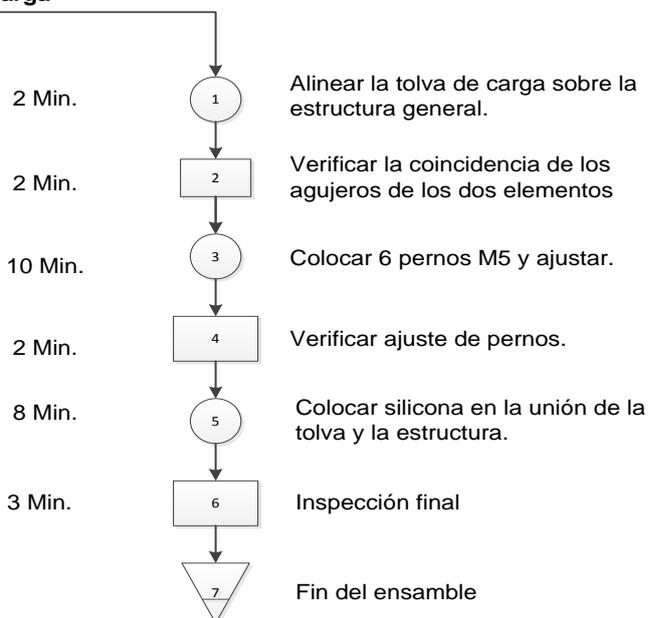
CANTIDAD: 1

DIAGRAMADORES: ALEJANDRO MUÑOZ, ALBERTO SANUNGA

PLANO:



Ensamble de la tolva de carga



Tiempo total: 27 Min

Figura 83. Ensamble de la tolva de carga.

ENSAMBLE DE LA PROTECCIÓN DE BANDAS Y POLEAS:

Como último elemento de ensamble, es la protección de bandas y poleas, esta protección está sujeta a la estructura general por 3 pernos M 5 x 0.8 mm como se indica en la figura 84.

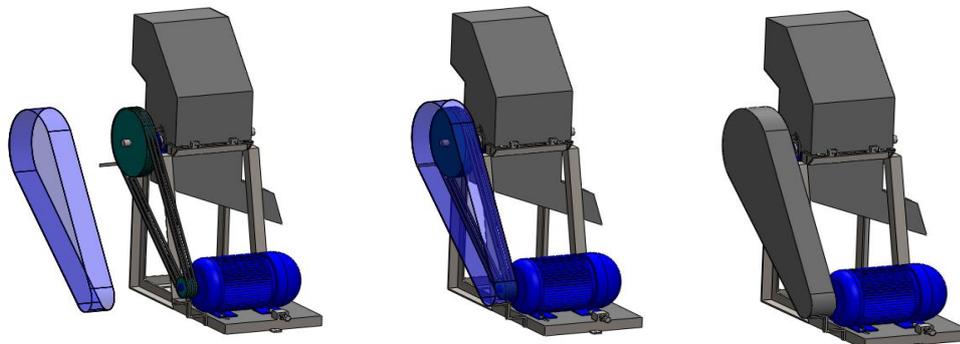
DIAGRAMA DE PROCESO DE FABRICACIÓN

NOMBRE PRODUCTO: ENSAMBLE DE LA PROTECCION DE BANDAS Y POLEAS.

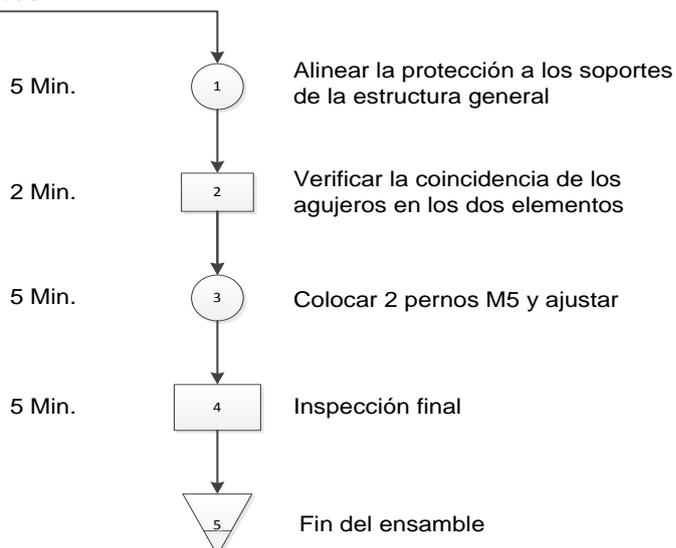
CANTIDAD: 1

DIAGRAMADORES: ALEJANDRO MUÑOZ, ALBERTO SANUNGA

PLANO:



Ensamble de la protección de poleas y bandas



Tiempo total: 17 Min.

Figura 84. Ensamble de la protección de bandas y poleas.

5.8. Pruebas del molino

Como primer paso para las pruebas del molino se debe tomar en cuenta el material a triturar, en este caso son botellas de PET.

RESTRICCIONES DEL MATERIAL A TRITURAR:

Como restricciones obligatorias para la trituración se tiene:

- Botellas de PET, capacidad de 500 ml.
- Las botellas de PET deben ser lo más posible compactadas. Figura 85.
- Para la trituración se recomienda que las botellas ingresen sin tapas y sin etiquetas. Figura 85.

Se debe tomar en cuenta estas restricciones para mejorar la producción y alcanzar al máximo el rendimiento del molino triturador.



Figura 85. Botellas PET aplastadas

Como segundo paso se debe llenar una hoja de pruebas y tabulación de resultados de producción de escama durante la trituración de las botellas de PET, esta hoja está compuesta de los siguientes parámetros:

- Número de pruebas a realizarse.
- Tiempo en minutos de cada prueba.
- Como resultados se tiene:

- La capacidad producida en cada prueba (kg).
- El tamaño de la escama triturada en cada prueba (mm).

- Observaciones.

En la figura 86, se indica el formato de la hoja de pruebas y tabulación de resultados de producción de escama.

HOJA DE PRUEBAS Y TABULACIÓN DE RESULTADOS

NÚMERO DE PRUEBA	TIEMPO (min)	PRODUCCIÓN (kg)	TAMAÑO (mm)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
PROMEDIO			

OBSERVACIONES:

.....

.....

.....

.....

.....

Figura 86. Hoja de pruebas y tabulación de resultados de producción de escama.

NOTA:

Cada prueba realizada al molino triturador de botellas PET durante la trituración, fue tabulada en la hoja de pruebas y resultados, tomando en cuenta las restricciones previas al proceso de trituración (Ver Anexo 32).

Adicional a las pruebas de producción, se realizó pruebas para determinar el porcentaje de ocupación que se le da al motor eléctrico. Dichas pruebas, se realizaron desde que el molino está funcionando en el vacío (sin carga), al 25%, al 50%, al 75% y al 100% de carga plena, tomando como carga plena 5 kg.

En cada una de las pruebas, se midió voltaje entre fases, amperaje de cada fase, y mediante la ecuación 135 se calculó la potencia ocupada.

$$P = \sqrt{3} * V * I * \cos \emptyset$$

Ecuación (135)

Donde:

P= Potencia ocupada (w).

V= Voltaje entre fases (v).

I= Intensidad de fase (A).

Cos \emptyset = Factor de potencia (dato de placa del motor).

En la Tabla 12, se muestra la hoja de prueba de potencia ocupada, con sus respectivos datos obtenidos.

Tabla 12.

Hoja de prueba de potencia ocupada

HOJA DE PRUEBAS DE POTENCIA OCUPADA				
Carga plena: 5 kg				
CARGA	VOLTAJE	AMPERAJE	FACTOR DE POTENCIA	POTENCIA
(%)	(v)	(A)		(w)
VACÍO	206	7.7	0.83	2280.32
	206	7.6		2250.71
	206	7.7		2280.32
AL 25%	206	10.3		3050.30
	206	10.3		3050.30
	206	10.3		3050.30
AL 50%	206	18.7		5537.93
	206	18.6		5508.32
	206	18.6		5508.32
AL 75%	206	25.3		7492.49
	206	25.3		7492.49
	206	25.3		7492.49
AL 100%	206	33.4		9891.28
	206	33.4		9891.28
	206	33.4		9891.28
VACIO	206	7.8		2309.94
	206	7.8	2309.94	
	206	7.8	2309.94	

5.9. Validación de resultados.

Para validar los resultados de las pruebas de producción, se debe tomar en cuenta cada prueba realizada, en este caso se realizó 10 pruebas, tuvo una duración de 5 minutos cada una, se recogieron 10 fundas de escama triturada, estas fueron inspeccionadas tanto en tamaño y peso, para luego mediante una regla de tres simple, calcular la producción de escama que debe ser triturada en una hora.

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE PRODUCCIÓN

Los resultados de las pruebas de producción realizadas, tanto en peso como tamaño deben cumplir con los siguientes parámetros obligatorios del presente proyecto:

Peso: La capacidad de producción de escama del molino, debe ser de 50 a 100 kg/h. Ver figura 87.



Figura 87. Funda de escama de PET triturada en 5 min.

Tamaño: El tamaño de la escama ya triturada, debe ser hasta 20 mm de longitud. Ver figura 88.



Figura 88. Tamaño de escama de PET triturada.

A continuación, se realiza un análisis de la producción de escama triturada con el promedio de pruebas realizadas al molino, los datos fueron tomados de la hoja de pruebas y tabulación de resultados de producción del Anexo 32.

ANÁLISIS DE PRODUCCIÓN DE ESCAMA TRITURADA

En cada prueba se evaluó el peso y el tamaño de la escama después de la trituración, en la tabla 13 podemos observar los datos obtenidos en cada prueba, para el análisis de producción trabajamos con el valor promedio de la capacidad (kg) y obtenemos los siguientes resultados:

Tabla 13.

Datos obtenidos en las pruebas realizadas al molino triturador de botellas PET.

RESULTADOS			
NÚMERO DE PRUEBAS	TIEMPO	CAPACIDAD	TAMAÑO
	min	kg	mm
1	5	5.4	0-20
2	5	5.5	0-20
3	5	5.45	0-20
4	5	5.6	0-20
5	5	5.62	0-20
6	5	5.47	0-20
7	5	5.43	0-20
8	5	5.53	0-20
9	5	5.57	0-20
10	5	5.63	0-20
PROMEDIO	5	5.52	0-20

PESO:

El peso promedio en las 10 pruebas realizadas fue de: 5.52 kg en 5 minutos.

Al tener una capacidad mínima en el alcance del proyecto de 50 kg por hora, con este dato se alcanza los 66.24 kg por hora, valor que se lo encuentra de la siguiente forma:

TIEMPO DE PRODUCCIÓN	CAPACIDAD
(Min)	(Kg)
5	5.52
60	X

$$X_{\text{Capacidad por hora}} = \frac{60 (\text{Min}) \times 5.52 (\text{kg})}{5 (\text{Min})}$$

$$X_{\text{Capacidad por hora}} = 66,24 \text{ kg}$$

TAMAÑO:

El tamaño obtenido de la escama triturada durante las 10 pruebas realizadas, no excede los 20 mm, tamaño que cumple con el alcance del proyecto ya que es: escama de hasta 20 mm de longitud.

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DEL PORCENTAJE DE OCUPACIÓN DE LA POTENCIA DEL MOTOR ELÉCTRICO

En cuanto a las pruebas realizadas de porcentaje que se ocupa de la potencia del motor eléctrico, se tiene que:

Con los datos de potencia ocupada, se procede a calcular el porcentaje que ocupan del motor eléctrico para cada caso de carga. La potencia nominal del motor eléctrico es de 15000 w.

$$\eta_{\text{vacío}} = \frac{2280.32\text{w}}{15000\text{w}} * 100\%$$

Ecuación (136)

$$\eta_{\text{vacío}} = 15.20\%$$

Se tiene que en vacío el molino ocupa el 15.20% de la capacidad total del motor eléctrico, es decir, que aquí se puede considerar la pérdida de potencia por la transmisión y la potencia que se ocupa en el movimiento de los elementos del molino.

Para conocer la potencia ocupada (Poc) en cada caso de carga, se resta la potencia de vacío, de la potencia calculada en cada caso de carga, y se calcula el porcentaje que se ocupa en cada caso con la ecuación 136.

$$P_{oc} = P_{25} - P_{vacío}$$

Ecuación (137)

$$P_{oc} = 3050.30w - 2280.32w$$

$$P_{oc} = 769.98w$$

$$\eta_{25} = 5.13\%$$

En la Tabla 14, se muestra el porcentaje que se ocupan en cada caso de carga.

Tabla 14.

Porcentaje que se ocupa del motor eléctrico a diferentes cargas.

PORCENTAJE QUE SE OCUPA DEL MOTOR ELÉCTRICO			
CARGA	POTENCIA OCUPADA	POTENCIA NOMINAL DEL MOTOR	PORCENTAJE OCUPADO
%	w	w	%
VACÍO	2280.32	15000	15.20
	2250.71	15000	15.00
	2280.32	15000	15.20
AL 25%	769.98	15000	5.13
	799.59	15000	5.33
	769.98	15000	5.13
AL 50%	3257.61	15000	21.72
	3257.61	15000	21.72
	3227.99	15000	21.52
AL 75%	5212.17	15000	34.75
	5241.79	15000	34.95
	5212.17	15000	34.75
AL 100%	7610.95	15000	50.74
	7640.57	15000	50.94
	7610.95	15000	50.74

El porcentaje máximo que se llega a ocupar del motor eléctrico es de 65.94%, que resulta de la suma de lo que se ocupa en vacío, y lo que se ocupa a carga plena. Llegando así a la conclusión de que la potencia del motor eléctrico es la adecuada para realizar el trabajo de molienda.

CAPITULO 6

ANALISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO

6.1. Análisis financiero.

6.1.1 Inversión

Para el estudio financiero de construcción del molino triturador de PET, se ha considerado los siguientes componentes para identificar los costos directos e indirectos en los que se han incurrido. Como costos directos se tiene, el costo de materiales mecánicos, el costo de materiales eléctricos, y la mano de obra de manufactura del molino, como costos indirectos se ha considerado todos los costos que se han generado de manera inherente en el proyecto. Dichos costos se encuentran detallados en las tablas 15, 16, 17 y 18.

Tabla 15.

Costo de materiales mecánicos

MATERIALES MECÁNICOS	COSTO UNITARIO	CANTIDAD	COSTO TOTAL
CONARCO 7018 1/8"	2.90	1	2.90
PLANCHA A-36, 4x8 3mm	56.94	2	113.88
PLANCHA A-36 4x8 20mm	410.34	1	410.34
ÁNGULO A-36 60 x 60 x 8 mm	50.00	2	100.00
ACERO AISI/SAE 1018 HR Rd. 60 MM (S)	2.71	22.4	60.70
ACERO AISI 01 – BOHLER K460 ESPESOR 12.00mm	9.66	24.2	233.77
Polea Tipo B 3 canales 20 pulg. Con buje	280.00	1	280.00
Polea Tipo B 3 canales 5 pulg.	45.00	1	45.00
Motor de 20 HP Trifásico WEG Br	1 211.83	1	1 211.83
Rodelas de presión 5/16 pulg	0.01	30	0.30
Perno Grado 4.8 M8 x 30 mm	0.15	30	4.50
Tuercas original M8mm	0.10	30	3.00
Bandas TIPO B 128	21.00	3	63.00
SUBTOTAL			2 529.23

Tabla 16.

Costo de materiales eléctricos

MATERIALES ELÉCTRICOS	COSTO UNITARIO	CANTIDAD	COSTO TOTAL
Contactador 25A	57.04	1	57.04
Relé de tiempo 0.05S...100HS	38.74	1	38.74
Pulsador verde NA	8.72	1	8.72
Pulsador rojo NA	8.72	1	8.72
Breaker 80 ^a	96.40	1	96.40
Relé térmico 30-36A	69.39	1	69.39
Bornera riel 16AWG	1.26	10	12.60
Bornera riel 6AWG	2.11	20	42.20
Riel din	2.50	1	2.50
Gabinete metálico 60*40*20	68.95	1	68.95
Canaleta ranurada 25*40	5.60	1	5.60
Luz piloto LED rojo	9.64	1	9.64
Cable superflex 6AWG	3.55	10	35.50
Cable flexible 16AWG	0.32	20	6.40
Base porta fusibles	2.68	2	5.36
Fusible 2 ^a	1.50	2	3.00
Pieza Final	1.90	2	3.80
Contactador 38A	81.69	2	163.38
Amarras plásticas	1.79	1	1.79
Enchufe 3*50A	5.01	1	5.01
Cable sucre 3*8	4.21	9	37.89
SUBTOTAL			682.63

Tabla 17.

Costo de manufactura del molino triturador de PET

MATERIALES MECÁNICOS	COSTO UNITARIO	CANTIDAD	COSTO TOTAL
Hora Hombre Maquinas Herramientas	8.00	40	320.00
Hora Maquina Torno	12.00	20	240.00
Hora Maquina Fresadora	17.00	10	170.00
Hora Maquina Rectificadora	22.00	10	220.00
Hora Hombre Latonería	5.20	80	416.00
SUBTOTAL			1 366.00

Tabla 18.

Costos indirectos

DESCRIPCIÓN	VALOR
Internet, computadoras	60
Anillados, copias y útiles de escritorio	80
Otros	50
TOTAL	190

Después del análisis de costos generados en la construcción del molino triturador, se procede a calcular el costo total de fabricación, que es la inversión inicial del proyecto (Tabla 19).

Tabla 19.

Costo total de fabricación de molino triturador de PET

	Valor en USD
Costo de materiales (a)	3 211.86
Costo de manufactura del molino triturador de PET (b)	1 366.00
Costos Indirectos (c)	190.00
Inversión Inicial (a+b+c)	4 767.86

6.1.2. Costo de Producción

Una vez identificada la inversión inicial, y de acuerdo a los datos obtenidos en la pruebas, se calcula los ingresos de manera anual para posteriormente obtener la tasa interna de retorno, y saber cuándo se recuperará la inversión inicial.

INGRESOS ESTIMADOS

H/año 1040 h/año

Producción/h 67kg/h

$$producción\ anual = \frac{h}{año} * \frac{producción}{h}$$

Ecuación (138)

Producción anual= 69680 kg/año

PVP Escama PET 1.50 USD/kg

$$Ingresos\ estimados = Producción\ Anual * PVP\ Escama\ PET$$

Ecuación (139)

(A) Ingresos estimados = 104520 USD

EGRESOS

MATERIA PRIMA

Tabla 20.

Costos relacionados con la materia prima

(a) Materia Prima	280/día
(b) Costo de Materia prima	1.50 USD
(c) Días de producción anual	240 días

$$\text{Costo Total de Materia Prima} = a * b * c$$

Ecuación (140)

$$\text{Costo Total de Materia Prima} = 33600 \text{ USD/año}$$

MANO DE OBRA

Mano de obra 340 USD

$$\text{Costo de mano de obra} = \text{mano de obra} * \text{meses}$$

Ecuación (141)

$$\text{Costo de mano de obra} = 4080 \text{ USD/año}$$

COSTOS INDIRECTOS

(a) Servicios básicos y otros 100 USD

$$\text{Costos Indirectos} = a * \text{meses}$$

Ecuación (142)

Costos Indirectos = 1200 USD/año

(B) Egresos = 38880 USD

Cálculo de la utilidad neta

Tabla 21.

Estado de Resultados Integral

Ingresos (A)	104520 USD
Egresos (B)	38880 USD
UTILIDAD (A- B)	65640 USD

Como se puede observar en la tabla 21, la utilidad esperada es de USD 65640 en operación, para el análisis del valor actual neto (VAN), se tomará en cuenta como inversión inicial el costo total de fabricación, la adquisición de un predio, la infraestructura, y costos de la parte jurídica de la creación de la empresa.

Tabla 22.

Inversión total para la creación de la empresa

Inversión Inicial	4 767.86
Predio	15000
Infraestructura	10000
Costos Jurídicos	5000
Inversión Total	34767.86

CÁLCULO DEL VAN

Para el cálculo del VAN, se consideró 5 años para la recuperación de la inversión, con una tasa de interés del 20%, debido a que el mercado de la

producción de escama de PET no tiene mayor competencia en el medio, la utilidad se tomará como renta fija debido a la necesidad del reciclaje de PET.

Tabla 23.

Datos para el cálculo del VAN

Periodos	1	2	3	4	5
Ingresos	104520	104520	104520	104520	104520
Egresos	38880	38880	38880	38880	38880
Flujos	65640	65640	65640	65640	65640

VAN = USD 161535.92

TIR = 188%

El VAN obtenido indica que el valor presente necesario para obtener una utilidad constante por 5 periodos de USD 65640, al un crecimiento anual del 20%, es de USD 161535.92.

La TIR de 188%, representa la tasa de crecimiento anual que debería tener la empresa para que con la inversión inicial total pueda producir una utilidad constante por 5 periodos de USD 65640.

En conclusión, el proyecto es viable pero requiere de una gran inversión, ya que es un proyecto ambicioso de cuidado ambiental, que asegura su sostenibilidad y sustentabilidad.

6.2. Análisis económico

En el país, de acuerdo a datos obtenidos por el INEC, se tiene que en la industria de caucho y plástico existe un crecimiento, desde septiembre 2013 al septiembre de 2014, de 18.53%, que comparando con la industria de artículos textiles (excepto prendas de vestir), que es un sector tradicional, en el mismo periodo, solamente tuvo un crecimiento del 12.57%, lo que indica,

que económicamente sería mejor invertir en la industria de caucho y plástico, ya que el crecimiento de dicha industria está en auge.

Para mayor información acerca de las variaciones en lo que va del año de los índices de volumen físico de la producción industrial, se adjunta el Anexo 34.

6.3. Análisis de sensibilidad

Teniendo en cuenta que el análisis de sensibilidad se debe realizar a los puntos más críticos para poder conocer los efectos de su variación y cómo afectan o benefician a determinado proceso, en este caso el punto más crítico para el análisis, será la disponibilidad de la materia prima, analizando la variación de la misma con respecto a la producción.

Producción= 67kg/h

Requerimiento mínimo de materia prima= 72kg/h

$$\text{Disponibilidad de materia prima} = \frac{\text{producción}}{\text{requerimiento de mp}}$$

Ecuación (143)

Disponibilidad de la materia =0.93

Es decir que por cada 0.93kg de producción se necesita una disponibilidad de materia prima de 1kg, lo que quiere decir que la eficiencia del sistema es aproximadamente del 93%.

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones.

- Se realizó el diseño y la construcción de un molino triturador, capaz de producir 67 kg/h de escama de PET de hasta 20 mm.
- Se hizo un estudio del proceso de reciclaje del PET, de cada una de sus etapas, y de la maquinaria que se utiliza en cada etapa. La etapa de limpieza se puede repetir las veces necesarias de acuerdo al requerimiento de calidad del producto.
- De acuerdo a la función y desgaste de cada elemento del molino, se elaboró un manual de mantenimiento y un manual de usuario.
- Con la evaluación de los riesgos mecánicos y eléctricos que se pueden generar en la operación del molino, se llega a la conclusión de que el operario del molino se le debe dotar de gafas de seguridad, protección auditiva, casco, mandil u overol, y zapatos de seguridad dieléctricos con punta de acero, todo esto para evitar lesiones o enfermedades laborales.
- Según el ensayo de laboratorio realizado, se tiene que el PET que se utiliza en las botellas es capaz de absorber 7.6 kJ/m^2 de energía antes de ser cortado, lo que implica una aplicación alta de trabajo para poder cortar las botellas.
- La construcción del molino se realizó con una inversión de 4800 USD, en dicha inversión están incluidos los costos de materiales mecánicos, eléctricos y de mano de obra.

7.2. Recomendaciones.

- Para tener una producción máxima de escama de PET, se debería realizar un estudio de la velocidad de giro óptima, de la cámara de corte.
- Se recomienda, el análisis de automatización de las etapas del reciclaje del PET, y de igual manera realizar un análisis sobre la sostenibilidad de dicha automatización.

BIBLIOGRAFIA

- análisis, B. d. (8 de Septiembre de 2011). *Noticias: elproductor.com*. Obtenido de elproductor.com: <http://elproductor.com/2011/09/08/ecuador-el-40-de-los-productos-plasticos-se-recicla/>
- Budynas, R. G., & Keith, N. (2008). Ecuación de Marín. En R. G. Budynas, & N. Keith, *Diseño en Ingeniería mecánica de Shigley* (pág. 279). México: Mc Graw Hill.
- Budynas, R. G., & Keith, N. (2008). Estimación de concentración de esfuerzos. En R. G. Budynas, & N. Keith, *Diseño en Ingeniería mecánica de Shigley* (pág. 360). México: Mc Graw Hill.
- Budynas, R. G., & Keith, N. (2008). Factor de confiabilidad. En R. G. Budynas, & N. Keith, *Diseño en Ingeniería mecánica de Shigley* (pág. 284). México: Mc Graw Hill.
- Budynas, R. G., & Keith, N. (2008). Factor de superficie. En R. G. Budynas, & N. Keith, *Diseño de Ingeniería mecánica de Shigley* (pág. 279). México: Mc graw Hill.
- Budynas, R. G., & Keith, N. (2008). Factor de tamaño. En R. G. Budynas, & N. Keith, *Diseño en Ingeniería mecánica de Shigley* (pág. 280). México: Mc Graw Hill.
- Budynas, R. G., & Keith, N. (2008). Factor de temperatura. En R. G. Budynas, & N. Keith, *Diseño en Ingeniería mecánica de Shigley* (pág. 282). México: Mc Graw Hill.
- Budynas, R. G., & Keith, N. (2008). Factores geométricos de concentración de esfuerzos. En R. G. Budynas, & N. Keith, *Diseño en Ingeniería mecánica de Shigley* (pág. 287). México: Mc Graw Hill.
- Budynas, R. G., & Keith, N. (2008). Precarga recomendada. En R. G. Budynas, & N. Keith, *Diseño en Ingeniería mecánica de Shigley* (pág. 427). México: Mc Graw Hill.
- Budynas, R. G., & Keith, N. (2008). Teoría de la energía de la distorsión para materiales dúctiles. En R. G. Budynas, & N. Keith, *Diseño en Ingeniería mecánica de Shigley* (pág. 213). México: Mc Graw Hill.
- Budynas, R. G., & Keith, N. (2008). Factor de carga. En R. G. Budynas, & N. Keith, *Diseño en Ingeniería mecánica de Shigley* (pág. 282). México: Mc Graw Hill.
- Budynas, R. G., & Nisbett, K. (2008). Criterio de Goodman. En R. G. Budynas, & K. Nisbett, *Diseño en Ingeniería mecánica de Shigley* (pág. 295). México: Mc Graw Hill.

- Cevallos, L., & Mera, J. (2010). *Identificación y evaluación de impactos ambientales durante la etapa de construcción de la refinería del pacífico "Eloy Alfaro" sector del Aromo, Provincia de Manabí*. Sangolquí.
- Deutschman, A., Michels, W., & Wilson, C. (1975). Factor de soldadura. En A. Deutschman, W. Michels, Wilson, & Charles, *Diseño de Máquinas - Teoría y práctica* (pág. 128). New Jersey: Macmillan Publishing Co.
- espiral, R. e. (26 de Abril de 2008). *Símbolos de reciclaje: cartón, vidrio, metales y plástico*. Recuperado el 20 de Abril de 2014, de Reciclando en espiral:
<http://reciclandoen espiral.com/blogreciclaje/2008/04/simbolos-de-reciclaje-vidrio-metales-y-plastico/>
- FAG. (2012). *Rodamientos FAG*.
- Gobierno Provincial de Manabí. (5 de Enero de 2013). *Sucre: Gobierno Provincial de Manabí*. Obtenido de Gobierno Provincial de Manabí:
<http://www.manabi.gob.ec/cantones/sucre>
- Gumar. (05 de 01 de 2014). *Molinos para plásticos: Gumar*. Obtenido de Gumar:
<http://gumar.com.mx/equipos/molinos/>
- Herrera, R. (7 de Enero de 2013). *Tecnología: lanacion.com*. Obtenido de lanacion.com:
<http://www.lanacion.com.ar/1542844-una-visita-al-interior-de-la-nueva-planta-de-tratamiento-de-basura>
- innovación, A. e. (08 de 01 de 2014). *Refacciones molinos: Molinos Azteca y Juper*. Obtenido de Ergomix: http://www.engormix.com/molinos-azteca-juper/refacciones-repuestos-molinos-verticales-horizontales-sh4112_pr28213.htm
- Ivan Bohman C. A. (2012). *Materiales de Ingeniería*. Quito.
- JQ, I. (20 de Marzo de 2013). *Datos técnicos: Industrias JQ*. Recuperado el 17 de Abril de 2014, de Industrias JQ:
<http://www.jq.com.ar/Imagenes/Productos/PET/dtecnicos/dtecnicos.htm>
- JQ, I. (20 de Marzo de 2013). *Datos técnicos: Industrias JQ*. Obtenido de Industrias JQ:
<http://www.jq.com.ar/Imagenes/Productos/PET/dtecnicos/dtecnicos.htm>
- Mariano. (30 de Mayo de 2011). *Proceso de reciclaje del PET: Tecnología de los plásticos*. Obtenido de Tecnología de los plásticos:

<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/proceso-de-reciclaje-del-pet.html>

Martin. (2012). Catálogo de transmisión por bandas. En *Matin, Catálogo de transmisión por bandas* (págs. D-43). México.

Martinez, G. (22 de Noviembre de 2013). *Molino para PET: mexventas.com*. Obtenido de mexventas.com: <http://mexventas.com/dirhogar/zjqhq-molinopara.htm>

mezcladoras, V. m. (16 de Junio de 2013). *Molinos de cuchillas: Veyco molinos & mezcladoras*. Obtenido de Veyco molinos & mezcladoras: <http://www.molinosymezcladoras.com/molinos3.html>

Moli de la Vall Major. (02 de Enero de 2012). *El reciclaje: Sistemas de codificación SPI*.

Obtenido de Moli de la Vall Major:

<http://www.molidelavallmajor.es/es/produccion-ecologica/el-reciclaje/sistema-de-codificacion-spi>

Mott, R. (2006). Factores de diseño. En R. Mott, *Diseño de Elementos de máquinas* (pág. 185). México: Pearson Educación.

Mott, R. L. (2006). *Diseño de Elementos de Máquinas*. México: Pearson Educación.

Mott, R. L. (2006). Diseño de Elementos de Máquinas. En R. L. Mott, *Diseño de Elementos de Máquinas* (pág. 539). México: Pearson Educación.

Normas ISO. (s.f.). *ISO 14001-2004*.

Pattabiraman, P., Dr. Sbarski, I., & Prof. Spurling, T. (5 de Mayo de 2007). *Artículo:*

Tecnología del plástico. Recuperado el 10 de Febrero de 2014, de Tecnología del plástico: <http://www.plastico.com/temas/Propiedades-termicas-y-mecanicas-del-PET-reciclado-y-sus-mezclas+3056093?pagina=1>

plástica, C. (09 de Enero de 2014). *molinos: CPI plástica*. Obtenido de CPI plástica:

<http://www.cpiplastika.com/productis/pagani/1.jpg>

POLITICA, M. D. (1 de Julio de 2009). *Documentos: Mideplan*. Obtenido de Mideplan:

<http://documentos.mideplan.go.cr/alfresco/d/d/workspace/SpacesStore/6a88ebe4-da9f-4b6a-b366-425dd6371a97/guia-elaboracion-diagramas-flujo-2009.pdf>

Prensas, L. (26 de Abril de 2014). *Prensa Compactadora Carton Papel Pet Borra Chatarra Bote Pet: Preciolandia*. Obtenido de Preciolandia:

<http://www.preciolandia.com/mx/prensa-compactadora-carton-papel-pet-bor-7dsymx-a.html>

Rossi. (2012). *Estampado en frío de la chapa*. México: HOEPLI.

Valladolid, U. d. (15 de Febrero de 2012). *Reciclado: Universidad de Valladolid*. Obtenido de www.eis.uva.es: http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05-06/pet/reciclado_reciclado%20mecanico.htm

Wittman. (2012). *Reciclaje Optimo del Material*. México.

ANEXOS