Diseño y construcción de una máquina trituradora compacta de llantas para la gestión de residuos en talleres de pequeña escala.

Nikoll Dayana Martínez Bautista

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Mecánica

Director

Andrés Fabián Solano Pérez

Magister en Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2026

Tabla de contenido

Pág.

Introducción 13
1. Justificación 14
2. Objetivos 15
2.1 Objetivo General 15
2.2 Objetivos Específicos 15
3. Marco Teórico 15
3.1 Antecedentes 15
4. Alcance 17
5. Diseño Conceptual 18
6. Análisis de alternativas 29
7. Diseño a detalle 29
7.1 Requerimientos de diseño para el desarrollo a detalle 31
7.2 Configuración final del sistema 32
7.3 Criterios de dimensionamiento y selección 33
7.4 Diseño mecánico del sistema de corte 34
7.4.1 Configuración del sistema de corte 34
7.4.2 Geometría de los elementos de corte 34
7.4.3 Disposición de los elementos de corte sobre los ejes 36
7.4.4 Determinación de la fuerza de trituración 37
7.4.5 Determinación del torque requerido 38
7.4.6 Verificación mecánica de los elementos de corte 38
7.4.7 Análisis de desgaste 40
7.5 Diseño del sistema de transmisión 42
7.5.1 Requerimientos del sistema de trasmisión 42
7.5.2 Selección del motor eléctrico 44
7.5.3 Diseño de la transmisión por poleas y correa 45

7.5.4 Selección de la caja reductora....46
7.5.5 Diseño de acoples....46
7.5.6 Diseño de ejes....48
7.5.7 Diseño de engranajes sincronizadores....51
7.5.8 Elección de rodamientos....52
7.5.9 Selección de elementos de unión y transmisión....52
7.6 Diseño estructural del bastidor....53
7.6.1 Requerimientos estructurales....53
7.6.2 Configuración y geometría del bastidor....54
7.6.3 Selección del material y perfiles estructurales....55
7.6.4 Determinación de cargas....56
7.6.5 Análisis estructural del bastidor....56
7.6.6 Verificación de estabilidad del bastidor....60
7.7 Diseño de Sistema de alimentación y descarga....61
7.7.1 Requerimientos del sistema....61
7.7.2 Diseño de la tolva de alimentación....62
7.7.3 Diseño del sistema de descarga....63
7.7.4 Verificación del diseño....64
7.8 Sistema de control....65
7.8.1 Requerimientos del sistema de control....65
7.8.2 Selección de los elementos de control....65
8. Construcción y Manufactura....66
8.1 Adquisición y recepción de componentes principales....67
8.1.1 Componentes importados....67
8.1.2 Recepción de los componentes....67
8.2 Cámara de trituración....68
8.3 Caja reductora de velocidades....68
8.4 Motor....69

8.5 Fabricación de la estructura 69
8.5.1 Adquisición y preparación de materiales 70
8.5.2 Soldadura de la estructura 70
8.5.3 Ensamble preliminar de la estructura 71
8.5.4 Instalación eléctrica del motor 72
8.6 Limpieza y acondicionamiento de la caja reductora 74
8.7 Fabricación de la tolva de alimentación 77
8.7.1 Corte y preparación de la lámina 77
8.7.2 Ensamblaje de la tolva 78
8.7.3 Acabado y pintura 78
8.7.4 Ensamble y acabado final de la máquina 80
9. Pruebas y Validación 81
9.1 Protocolo de pruebas 81
9.2 Evaluación del triturado 84
9.3 Cumplimiento de los criterios de diseño 86
10. Análisis de Viabilidad 87
11. Conclusiones y recomendaciones 90
11.1 Conclusiones 90
11.2 Recomendaciones 90
Referencias bibliográficas 91
Apéndices 92

Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1. Matriz 1 Objetivo estratégico....19
Tabla 2. Matriz 2 Prioridad de competencias básicas....21
Tabla 3. Matriz 3 Competencia básica vs segmento de clientes....22
Tabla 4. Matriz 4 Solicitud previa del cliente....23
Tabla 5. Matriz 5 Cualidades demandas vs Características....24
Tabla 6. Matriz Requerimientos del cliente con las funciones principales....26
Tabla 7. Matriz 7 de Función vs Mecanismo....27
Tabla 8. Diagrama morfológico....28
Tabla 9. Estudio de alternativas....29
Tabla 10. Requerimientos principales del diseño de la máquina....31
Tabla 11. Sistemas funcionales de la trituradora compacta de llantas....33
Tabla 12. Parámetros y resultados obtenidos de los elementos de corte. 38
Tabla 13. Principales parámetros y resultados de la verificación mecánica de la cuchilla....39
Tabla 14. Propiedades utilizadas para estimar el desgaste....40
Tabla 15. Principales resultados obtenidos en la estimación del desgaste y la vida útil de las cuchillas. 42
Tabla 16. Requerimientos para el diseño del sistema de transmisión....43
Tabla 17. Especificaciones de la trasmisión de potencia por correa....45
Tabla 18. Especificaciones del acople rígido entre la cámara y caja reductora. 48
Tabla 19. Resultados analíticos de capacidad torsional y factores de seguridad en el eje....49
Tabla 20. Parámetros y resultados principales de los engranajes sincronizadores. 51
Tabla 21. Dimensiones de las cuñas de sujeción para los elementos de transmisión. 53
Tabla 22. Requerimientos para el diseño del bastidor. 54
Tabla 23. Cargas muertas y cargas vivas consideradas en el análisis estructural. 56
Tabla 24. Propiedades físicas del bastidor. 57
Tabla 25. Propiedades del material del bastidor. 57

Tabla 26. Criterios de verificación de estabilidad del bastidor. 61
Tabla 27. Criterios y resultados en la verificación del diseño del bastidor. 65
Tabla 28. Componentes comerciales adquiridos para la construcción de la máquina. 67
Tabla 29. Registro de medidas de llantas a triturar. 83
Tabla 30. Resultados de las pruebas de trituración. 83
Tabla 31. Resultados de las pruebas de trituración. 84
Tabla 32. Parámetros estadísticos de la distribución. 86
Tabla 33. Verificación de los criterios de diseño. 87
Tabla 34. Análisis de costos de la trituradora de llantas. 88
Tabla 35. Comparativa de Viabilidad Económica y Técnica 89

Lista de Figuras

Pág.

Figura 1. Gráfica de resultados del estudio de los objetivos estratégicos.....20

Figura 2. Gráfica de Prioridad de competencias.....21

Figura 3. Gráfica de Prioridad de segmento de cliente.....22

Figura 4. Gráfica de la Prioridad de requerimientos del cliente 23

Figura 5. Gráfica de Prioridad de características.....25

Figura 6. Gráfica de Prioridad de funciones.....26

Figura 7. Gráfica de Prioridad de mecanismos.....27

Figura 8. El sistema final de la trituradora de llantas. 32

Figura 9. Configuración del sistema de corte de la trituradora.....34

Figura 10. Elemento de corte.....35

Figura 11. Geometría del elemento de corte.....36

Figura 12. Geometría del eje hexagonal.....36

Figura 13. Disposición de los elementos de corte y separadores sobre los ejes. 37

Figura 14. Esquema general motor, poleas y correa, y caja reductora. 44

Figura 15. Motor eléctrico seleccionado para el accionamiento de la máquina. 44

Figura 16. Caja reductora ZQ400. 46

Figura 17. Acople utilizado entre los elementos del sistema de transmisión. 47

Figura 18. Distribución de desplazamientos y deflexión máxima del eje. 50

Figura 19. Distribución de esfuerzos combinados de Von Mises y localización del esfuerzo pico en el eje.....50

Figura 20. Sistema de fijación de la polea mediante contratuerca.....53

Figura 21. Modelo tridimensional del bastidor.....55

Figura 22. Dimensiones generales del bastidor. 55

Figura 23. Localización de cargas distribuidas sobre el bastidor. 58

Figura 24. Distribución de desplazamientos totales y deflexión máxima en la estructura 59

Figura 25. Distribución de tensiones normales máximas. 60

Figura 26. Esquema del flujo del sistema de descarga 62
Figura 27. Modelo 3D de la tolva de alimentación.....63
Figura 28. Dimensiones principales de la tolva. 63
Figura 29. Diseño del sistema de descarga y dirección de salida del material. 64
Figura 30. Esquema de elementos del sistema de control. 65
Figura 31. Cámara de trituración de dos ejes recibida. 68
Figura 32. Caja reductora recibida. 69
Figura 33. Motor recibido. 69
Figura 34. Cortes de tubo para la estructura. 70
Figura 35. Proceso de soldadura y conformación del bastidor de la máquina.....71
Figura 36. Ensamble preliminar de los elementos estructurales y verificación de dimensiones. .72
Figura 37. Motor, arrancador y parada de emergencia instalados 72
Figura 38. Unión de ejes de la cámara y caja reductora. 73
Figura 39. Soldadura de rigidizadores. 74
Figura 40. Elemento con fluido para proteger componentes. 74
Figura 41. Proceso de limpieza y acondicionamiento de la caja reductora. 75
Figura 42. Aceite Starmax ISO 220. 76
Figura 43. Grasa Rowe con bisulfuro de molibdeno. 76
Figura 44. Aplicación de aceite industrial sobre las cuchillas-.....77
Figura 45. Corte y preparación de las láminas utilizadas para la fabricación de la tolva. 77
Figura 46. Proceso de ensamblaje y soldadura de la tolva. 78
Figura 47. Proceso de cubrimiento de elementos que no requieren pintura. 79
Figura 48. Preparación superficial mediante lijado. 79
Figura 49. Aplicación de antioxidante alquídico. 80
Figura 50. Máquina trituradora completamente ensamblada y terminada.....81
Figura 51. Llantas para triturar sin su flanco. 82
Figura 52. Diferencia en el ripio del caucho obtenido. 85
Figura 53. Gráfica de distribución normal de tamaños de ripio saliente de la trituración. 85

Figura 54. Cálculo de fuerza de corte....92
Figura 55. Plano del eje hexagonal....93
Figura 56. Plano de la estructura....94
Figura 57. Plano del rotor y espaciador....95
Figura 58. Plano Cámara de trituración....96
Figura 59. Plano Tolva....97

Lista de Apéndices

Pág.

Apéndice A. Cálculo de fuerza de corte 92
Apéndice B. Plano del eje hexagonal.....93
Apéndice C. Plano de la estructura.....94
Apéndice D. Plano del rotor y espaciador.....95
Apéndice E. Plano Cámara de trituración.....96
Apéndice F. Plano Tolva.....97

Resumen

Título: Diseño y construcción de una máquina trituradora compacta de llantas para la gestión de residuos en talleres de pequeña escala.*

Autor: Nikoll Dayana Martínez Bautista**

Palabras clave: Neumáticos fuera de uso, diseño mecánico, reciclaje de caucho, gestión de residuos, construcción de maquinaria.

Descripción:

El presente proyecto tiene como objetivo diseñar y construir una máquina trituradora compacta de llantas que contribuya a mejorar la gestión de neumáticos fuera de uso (NFU) en talleres de pequeña escala de Bucaramanga. La propuesta surge ante la necesidad de reducir el volumen de estos residuos, optimizar los espacios de almacenamiento y facilitar su transporte para el aprovechamiento de sus materiales.

El desarrollo del proyecto comprendió las etapas de diseño conceptual, diseño detallado, construcción, manufactura y validación experimental. Durante el diseño conceptual se aplicaron herramientas de despliegue de la función de calidad (QFD) y diagramas morfológicos para identificar los requerimientos del cliente y seleccionar las alternativas más adecuadas. Posteriormente, se dimensionaron y verificaron los principales componentes mecánicos, incluyendo el sistema de corte de dos ejes contrarrotantes, la transmisión de potencia, el bastidor, los sistemas de alimentación y descarga, y los elementos de control y seguridad. Asimismo, se realizaron análisis estructurales y verificaciones mecánicas para evaluar la resistencia de los componentes críticos.

La máquina construida incorpora un motor eléctrico de 10 HP y una caja reductora ZQ400. Las pruebas experimentales demostraron su capacidad para triturar llantas de motocicletas y automóviles de hasta 22 pulgadas de diámetro exterior y 8 pulgadas de ancho, obteniendo fragmentos de caucho de aproximadamente 50 × 50 mm. El análisis económico estableció un costo total de fabricación de $22.650.000 COP, inferior al de las alternativas comerciales evaluadas. Se concluye que la solución desarrollada constituye una alternativa técnica y económicamente viable para pequeños talleres, con potencial para favorecer el aprovechamiento de los NFU y promover prácticas de gestión ambiental sostenible.

---

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Andrés Fabián Solano Pérez.

Abstract

Title: Design and Construction of a Compact Tire-Shredding Machine for Waste Management in Small-Scale Workshops*

Author: Nikoll Dayana Martínez Bautista**

Keywords: End-of-life tires, mechanical design, rubber recycling, waste management, machinery manufacturing.

Description:

This project aims to design and construct a compact tire-shredding machine to improve the management of end-of-life tires (ELTs) in small-scale automotive workshops in Bucaramanga, Colombia. The proposal addresses the need to reduce the volume of these waste materials, optimize storage space, and facilitate their transportation for material recovery.

The project involved conceptual design, detailed design, manufacturing, construction, and experimental validation. During the conceptual design stage, Quality Function Deployment (QFD) and morphological diagrams were used to identify customer requirements and select the most suitable design alternatives. Subsequently, the main mechanical components were dimensioned and verified, including the counter-rotating dual-shaft cutting system, power transmission, frame, feeding and discharge systems, and control and safety components. Structural analyses and mechanical verifications were also performed to evaluate the strength of critical components.

The constructed machine incorporates a 10 hp electric motor and a ZQ400 gearbox. Experimental tests demonstrated its ability to shred motorcycle and passenger car tires with an outer diameter of up to 22 inches and a width of up to 8 inches, producing rubber fragments approximately 50 × 50 mm in size. The economic assessment established a total manufacturing cost of COP 22,650,000, which is lower than that of the commercial alternatives evaluated. It is concluded that the developed machine represents a technically and economically viable solution for small-scale automotive workshops, with the potential to promote ELT material recovery and encourage sustainable waste management practices.

---

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Andrés Fabián Solano Pérez.

Introducción

El crecimiento del parque automotor en Bucaramanga ha incrementado proporcionalmente la generación de neumáticos fuera de uso (NFU), un residuo sólido de difícil manejo debido a su resistencia, volumen y lenta degradación. La acumulación de llantas desechadas se ha convertido en una problemática que trasciende el ámbito ambiental, pues no solo contamina suelos, fuentes de agua y aire cuando son quemadas, sino que también representa un riesgo para la salud pública al convertirse en criaderos de vectores y focos de incendios.

En el ámbito local, los talleres de pequeña escala carecen de herramientas prácticas y económicas para tratar adecuadamente estos residuos. Ante la ausencia de alternativas tecnológicas accesibles, los NFU suelen permanecer almacenados durante largos periodos de tiempo en espacios reducidos, generando desorden, limitando la operatividad de los talleres y afectando su seguridad. Esta situación evidencia una brecha entre la necesidad de una gestión ambiental responsable y la capacidad real de los pequeños generadores para cumplir con dicho objetivo.

La problemática radica, entonces, en la falta de soluciones de bajo costo, compactas y funcionales que respondan a la realidad de los talleres pequeños, donde la acumulación de llantas usadas continúa siendo una carga tanto ambiental como operativa. Mientras no se disponga de tecnologías adecuadas para reducir el volumen de estos residuos y facilitar su aprovechamiento, el problema de la disposición inadecuada de NFU en Bucaramanga seguirá vigente.

1. Justificación

En Bucaramanga, la ausencia de iniciativas firmes para la correcta gestión de los neumáticos fuera de uso (NFU) constituye un grave problema tanto ambiental como económico. La acumulación descontrolada de estos desechos es causante de contaminación en el suelo, agua y aire, además de ocupar espacios significativos dentro de talleres relacionados con esta industria, afectando la funcionalidad y seguridad de estos lugares.

En este contexto, el diseño y construcción de una máquina trituradora de llantas compacta de bajo costo, se propone como una alternativa que dé solución a las problemáticas mencionadas tomando como referencia un taller de pequeña escala ubicado en la ciudad de Bucaramanga, apuntando a disminuir considerablemente el volumen de los NFU, mejorando su almacenamiento y simplificando su traslado hacia centros de reciclaje autorizados. La solución que se plantea también optimizará el reciclado de las llantas separando metales de no metales, puesto que el valor de estos componentes por separado es mayor.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Diseñar y construir una máquina trituradora de llantas para talleres pequeños en Bucaramanga que mejore la gestión de residuos y contribuya a prácticas ambientales sostenibles, considerando los requerimientos de diseño y seguridad.

2.2 Objetivos Específicos

Diseñar una trituradora de llantas de vehículos del sector urbano con capacidad de procesar 200 kg/h de llantas con tamaños de hasta 22 pulgadas de diámetro exterior y 8 pulgadas de ancho, considerando requerimientos de diseño y seguridad, y que sea de bajo costo.

Construir una trituradora de llantas conforme a los planos, especificaciones técnicas y criterios de diseño previamente establecidos, garantizando la correcta integración de los sistemas mecánicos, eléctricos y de seguridad.

Evaluar el desempeño operativo de la trituradora de llantas mediante ensayos experimentales, con el fin de validar el cumplimiento de los criterios de diseño planteados.

3. Marco Teórico

3.1 Antecedentes

Como se mencionó anteriormente, hay varias dificultades que emergen de la mala gestión de las ruedas usadas, pues si no se gestionan adecuadamente, pueden provocar contaminación ambiental hacia el suelo y los cuerpos de agua, además de convertirse en focos de nichos transmisores de enfermedades (Algarín y Álvarez, 2018). Adicionalmente, la incineración ilícita

de estos desechos produce gases nocivos, que deterioran la calidad del aire y amenazan la salud pública (Pasqualino et al., 2015).

De acuerdo con estudios e investigaciones previas, el reciclaje de ruedas mediante su trituración permite el uso de materiales como goma, acero y textiles, los cuales pueden ser reutilizados en la fabricación de asfaltos, suelos de seguridad y combustibles alternativos (Blanco y Pereira, 2020).

Sin embargo, en ciudades con poco avance tecnológico como Bucaramanga, los talleres mecánicos y vulcanizadores enfrentan dificultades para conseguir maquinaria para el procesamiento de ruedas, debido a los altos costos y la gran cantidad de equipos disponibles en el mercado (García et al., 2013).

En términos regulatorios, Colombia ha progresado en la regulación de los desechos de ruedas a través de proyectos como el Programa Posconsumo de Ruedas, promovido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Cortés y Londoño, 2017). No obstante, estos esfuerzos del gobierno no han conseguido satisfacer las necesidades de los pequeños generadores de desechos, que no cuentan con recursos suficientes para encontrar opciones asequibles para el tratamiento de estos materiales (Giraldo et al., 2018).

Pasqualino et al. (2015) resaltan que la aplicación de tecnologías de reciclaje sustentables disminuye el impacto ecológico y promueve la creación de modelos empresariales más eficaces. Igualmente, Giraldo et al. (2018) determinan que optimizar los procedimientos de eliminación de NFU no solo reduciría los gastos relacionados con el almacenamiento y la eliminación de estos desechos, sino que también crearía oportunidades económicas al fomentar la venta del caucho reciclado.

En Bucaramanga, el problema de las ruedas en desecho impacta cada vez más debido a un gran número de vehículos y talleres de mantenimiento, también es verdad que se han tomado medidas para el manejo de este tipo de residuos en la ciudad de Bucaramanga, sin embargo, aún no se implementan las trituradoras en talleres pequeños. La Secretaría de Medio Ambiente de Bucaramanga ha presentado modelos basados en una máquina trituradora de ruedas para la recolección del triturado de ruedas para ser comercializados como insumo secundario. Con lo anterior mencionado surge la necesidad de diseñar una máquina trituradora compacta de ruedas que sea accesible para pequeños talleres.

4. Alcance

El presente proyecto abarca el diseño, construcción y evaluación experimental de una trituradora de llantas para vehículos del sector urbano, con capacidad de procesar 200 kg/h de llantas con tamaños de hasta 22 pulgadas de diámetro exterior y 8 pulgadas de ancho. El desarrollo incluye la elaboración de planos y especificaciones técnicas, la selección y dimensionamiento de los componentes mecánicos y eléctricos, así como la integración de sistemas de seguridad que garanticen un funcionamiento confiable.

El alcance comprende la fabricación de la maquina funcional a escala real, la implementación de pruebas de desempeño orientadas a validar parámetros de diseño y seguridad, y que sea de bajo costo.

El proyecto se orienta a aplicaciones en talleres de pequeña escala, priorizando soluciones técnicas de bajo costo relativo y fácil mantenimiento, sin considerar la producción masiva ni la explotación industrial a gran escala.

5. Diseño Conceptual

En este proyecto, se implementaron herramientas de diseño sistemático con el objetivo de definir la configuración de una máquina trituradora de llantas compacta, que responda a las necesidades de talleres de pequeña escala en Bucaramanga.

Para ello, en primera instancia se aplicó la metodología QFD (Quality Function Deployment), elaborando una serie de matrices que permitió priorizar los requerimientos del cliente y traducirlos en parámetros de diseño medibles. Posteriormente, se emplearon diagramas morfológicos para la generación y comparación de alternativas en los principales subsistemas de la máquina, evaluando criterios como eficiencia de corte, facilidad de fabricación, costos, seguridad y mantenimiento.

El uso combinado de estas herramientas permitió seleccionar las configuraciones más adecuadas para cada subsistema y establecer un diseño conceptual sólido, factible y coherente con los objetivos del proyecto. Este diseño constituye la base para el desarrollo detallado y la construcción de la máquina trituradora compacta de llantas, concebida como una solución práctica y asequible para la gestión de residuos en talleres de pequeña escala.

La Primera matriz, ver Tabla 1, busca alinear los objetivos estratégicos del proyecto con el propósito de la máquina, considerando las pretensiones de un taller de referencia pequeño ubicado en el área metropolitana de Bucaramanga. Se evalúa la importancia relativa de cada objetivo y cómo se relacionan entre sí.

Los objetivos definidos fueron:

1. Ampliar el mercado: lograr que más talleres pequeños puedan acceder a un servicio de tratamiento especial de residuos.

2. Aumentar los ingresos: generar viabilidad económica tanto para el dueño de la máquina como para aquellos que adquieran su servicio.
3. Reducir el volumen de neumáticos: impacto ambiental y mejora en la gestión de residuos.

Se asignan valores de 1 a 7:

- 7 = Mucho más importante
- 5 = Más importante
- 3 = Ligeramente importante
- 1 = Igual importante
- 0.33-0.11: Rango de valores de menor importancia

Tabla 1

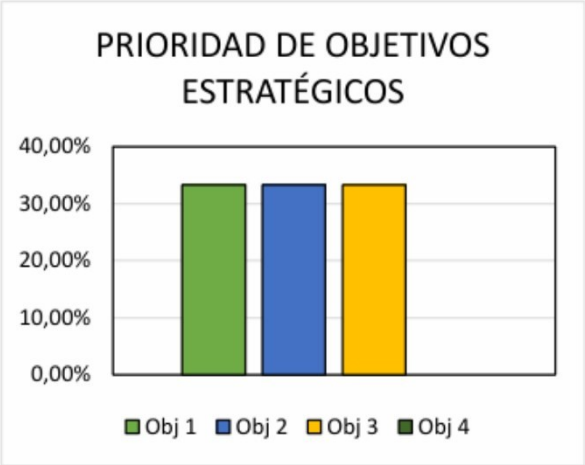
Matriz 1 Objetivo estratégico

MATRIZ 1 - OBJETIVO ESTRATÉGICO											
			OBJETIVOS ESTRATÉGICOS								
			A	B	C	a	b	c			
1=igual impor, 3=lig. Mas impor, 5=mas impor, 7=mucho mas impor, 0.33, 0.2, 0.14, 0.11			Ampliar el mercado	Aumentar ingresos	Reducir volumen	Evaluación normalizada			Peso absoluto	Prioridad de objetivo estratégico
DESPLIEGUE DE OBJETIVOS ESTRATEGICOS	1	Ampliar el mercado	1,00	3,00	0,33	0,23	0,69	0,08	1,00	**33,33%**
	2	Aumentar los ingresos	0,33	1,00	3,00	0,08	0,23	0,69	1,00	**33,33%**
	3	Reducir el volumen de neumáticos	3,00	0,33	1,00	0,69	0,08	0,23	1,00	**33,33%**
		TOTAL	4,33	4,33	4,33	1,00	1,00	1,00	3,00	

La gráfica asociada (Figura 1) permite identificar que todos los objetivos estratégicos tienen el mismo peso relativo del 33,3%**,** lo que significa que el modelo de decisión los está considerando igual de importantes. Esto refleja que tanto el mercado, como los ingresos y la reducción de residuos son pilares equivalentes del proyecto.

Figura 1

Gráfica de resultados del estudio de los objetivos estratégicos



La siguiente matriz, ver Tabla 2, tiene como fin identificar y priorizar las competencias clave necesarias para que el proyecto tenga éxito, y cómo se relacionan con los objetivos estratégicos definidos en la Matriz 1.

Se asignan valores de 0 a 9:

- 9 = relación fuerte
- 3 = relación media
- 1 = relación débil
- 0 = sin relación

Esta asignación de valores también se usará en las siguientes matrices de la Tabla 2 a la Tabla 7, exceptuando la Tabla 4. De esta forma, se puede determinar cuáles competencias son críticas y deben fortalecerse más durante el desarrollo del proyecto.

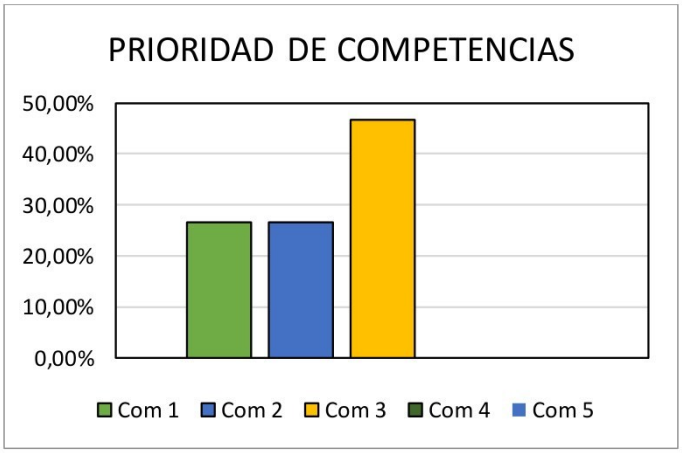
Tabla 2

Matriz 2 Prioridad de competencias básicas

MATRIZ 2 - COMPETENCIA BÁSICA PRIORITARIA						
		DESPLIEGUE DE COMPETENCIAS BÁSICAS				
			A	B	C	
9=relacion fuerte, 3=relacion media, 1=relación débil, 0=sin relación		Prioridad de objetivo	Buena capacidad financiera	Conocemos a nuestros clientes	experiencia técnico y conocimientos espec	TOTAL
DESPLIEGUE DE OBJETIVOS ESTRATEGICOS						
1	Ampliar el mercado	33,33%	1,00	3,00	3,00	
2	Aumentar los ingresos	33,33%	3,00	1,00	3,00	
3	Reducir el volumen de neumáticos	33,33%	0,00	0,00	1,00	
	Peso absoluto		1,33	1,33	2,33	5,00
	PRIORIDAD DE COMPETENCIAS BÁSICAS		**26,67%**	**26,67%**	**46,67%**	100,00%

Figura 2

Gráfica de Prioridad de competencias



Según la gráfica, (Figura 2) la competencia 3 tiene la mayor prioridad con un 46%, seguida por las competencias 1 y 2, ambas con un valor cercano al 26%, mientras que las competencias 4 y 5 no aparecen con peso significativo. Esto significa que, dentro del desarrollo de la máquina trituradora, labores asociadas al diseño mecánico eficiente y la selección adecuada de componentes críticos son las que más incidirán en el éxito del proyecto, siendo prácticamente el pilar técnico del diseño.

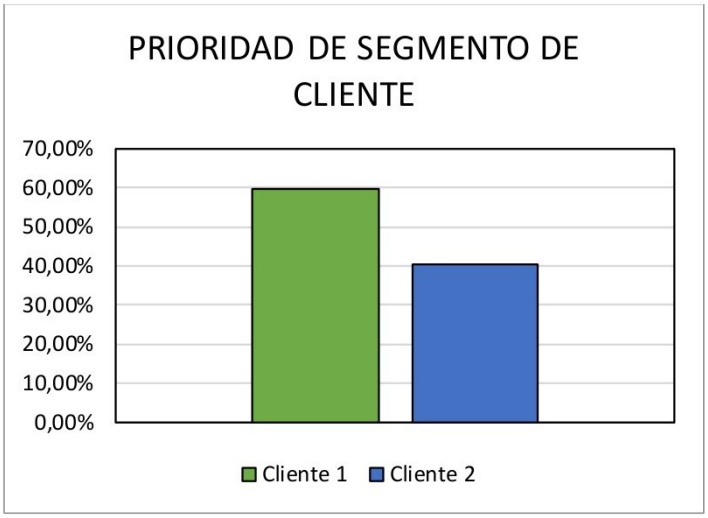
Tabla 3

Matriz 3 Competencia básica vs segmento de clientes

MATRIZ 3- COMPETENCIA BÁSICA - SEGMENTO DE CLIENTES					
9=relacion fuerte, 3=relacion media, 1=relación débil, 0=sin relación			CLIENTES		TOTAL
			1A	2B	
		Prioridad de la competencia	Pequeños talleres	Pequeñas y medianas entidades de tratamientode residuos	
DESPLIEGUE DE COMPETENCIAS BÁSICAS					
A	Buena capacidad financiera	26,67%	3,00	3,00	
B	Conocemos a nuestros clientes	26,67%	9,00	0,00	
C	experiencia técnico y conocimientos espec	46,67%	9,00	9,00	
	Peso absoluto		7,40	5,00	12,40
	PRIORIDAD DE COMPETENCIAS BÁSICAS		**59,68%**	**40,32%**	100,00%

Figura 3

Gráfica de Prioridad de segmento de cliente



Para la matriz 4 (Tabla 4) recopila los requerimientos del cliente (Customer Demands o CRs) y los traduce en demandas de calidad (Design Qualities o DQs)**.** Cada DQ se pondera según la importancia que le asigna el cliente, para lo cual se efectuaron reuniones del equipo de

trabajo. El objetivo es identificar cuáles aspectos del diseño deben priorizarse en las siguientes fases de conceptualización y desarrollo.

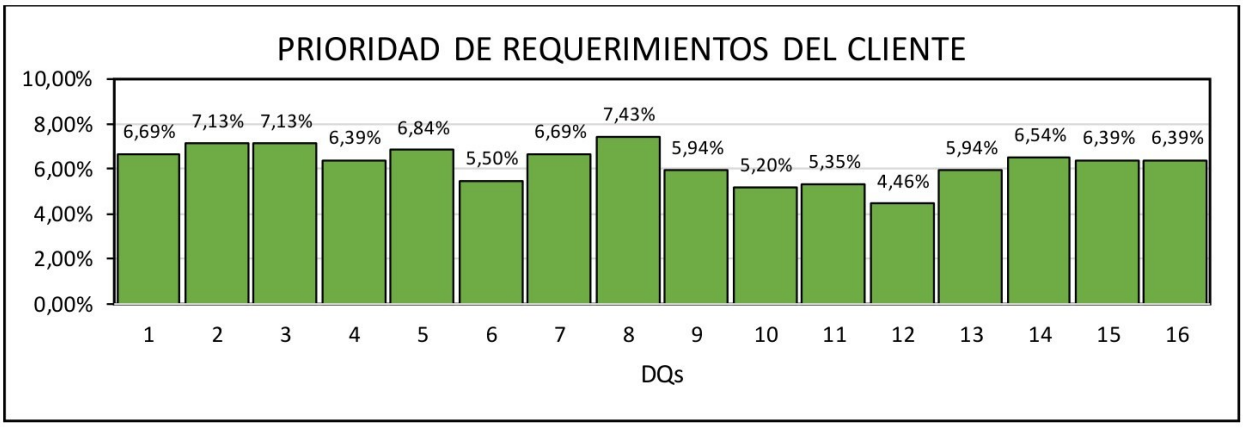
Tabla 4

Matriz 4 Solicitud previa del cliente

		MATRIZ 4 - SOLICITUD DEL CLIENTE - PLANIFICACIÓN PREVIA		
		Grado de importancia	Peso	
	Demanded Quality DQs		Peso absoluto	Customer request priority DQW (%)
1	Facilidad de uso	4,5	4,5	6,69%
2	Alta capacidad de trituracion	4,8	4,8	7,13%
3	Compatibilidad con diferentes tamaños	4,8	4,8	7,13%
4	Compatibilidad con diferentes tipos de llantas	4,3	4,3	6,39%
5	Ciclo rápido	4,6	4,6	6,84%
6	Durabilidad	3,7	3,7	5,50%
7	Tamaño y portabilidad	4,5	4,5	6,69%
8	Seguridad	5	5	7,43%
9	Precio competitivo	4	4	5,94%
10	Fácil mantenimiento	3,5	3,5	5,20%
11	Tamaño de salida ajustable	3,6	3,6	5,35%
12	Estética	3	3	4,46%
13	Garantía	4	4	5,94%
14	Capacidad de separación	4,4	4,4	6,54%
15	Control de residuos (filtracion)	4,3	4,3	6,39%
16	Control de ruido	4,3	4,3	6,39%

Figura 4

Gráfica de la Prioridad de requerimientos del cliente



La gráfica (Figura 4) muestra el peso relativo de cada requerimiento (DQ) en forma de porcentaje. Estos porcentajes indican la prioridad que el cliente otorga a cada característica, con un rango entre el 4,46 % y el 7,43 %.

- Requerimiento más prioritario (DQ8**)**: con 7,43 %, es el de mayor importancia para el cliente.
- Segundo nivel de prioridad (DQ2 y DQ3): ambos con **7,**13 %, seguidos de cerca por DQ5 (6,84 %).
- Requerimientos de prioridad media (DQ1, DQ4, DQ6, DQ7, DQ14, DQ16**)**: oscilan entre 6,39 % y 6,84 %, lo que significa que son importantes, pero no críticos.
- Requerimientos de baja prioridad relativa (DQ10, DQ11, DQ12**)**: entre 4,46 % y 5,35 %, representan aspectos deseables, pero no decisivos.

La quinta matriz (Tabla 5) muestra cómo las características técnicas de la máquina se relacionan con los requerimientos previos del cliente y cuáles son más determinantes. La gráfica de la (Figura 5) permite ver de forma cuantitativa qué características sobresalen.

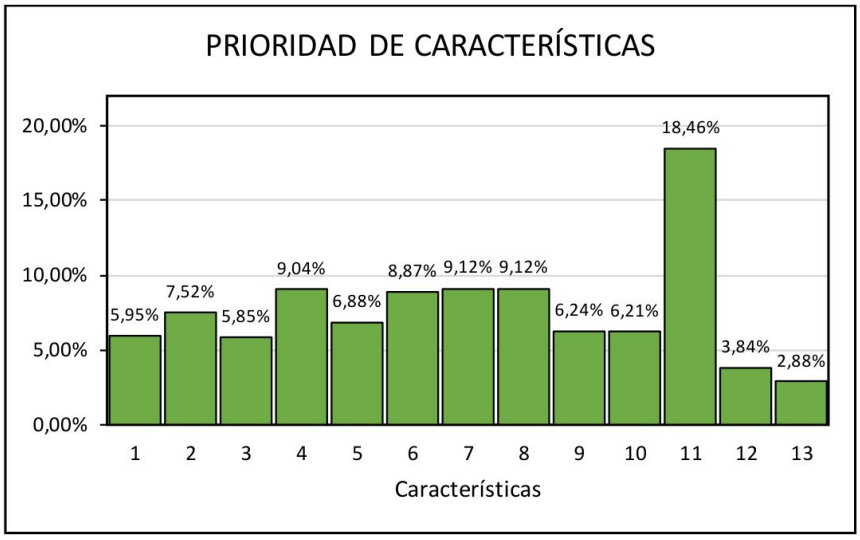
Tabla 5

Matriz 5 Cualidades demandas vs Características

		MATRIZ 5 - CARACTERÍSTICAS- HoQ													
		Despliegue de características													
		Rendimiento y capacidad operativa				Facilidad de uso y MTTO			Seguridad y cumplimiento			Calidad y durabilidad	Valor económico y comercial		
Demanded Quality DQs	Prioridad solicitudes del cliente	1) Múltiples neumaticos por ciclo	2) Dif. Tamaños de llanta	3) Tamaño de salida ajustable	4) Separacion	5) Diseño modular	6) Bajo MTTO	7) Compacto y portable	8) Proteccion física	9) Parada de emergencia	10) Filtración de residuos	11) Calidad de materiales	12) Bajo costo	13) Diseño estético	
Facilidad de uso	6,69%	0	0	3	9	1	1	3	9	3	1	0	0	0	
Alta capacidad de trituracion	7,13%	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	
Compatibilidad con diferentes tamaños	7,13%	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Compatibilidad con diferentes tipos de llantas	6,39%	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Ciclo rápido	6,84%	9	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Durabilidad	5,50%	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	9	0	0	
Tamaño y portabilidad	6,69%	0	0	0	0	3	0	9	0	0	0	0	0	0	
Seguridad	7,43%	0	0	0	0	0	0	0	9	9	3	9	0	0	
Precio competitivo	5,94%	0	0	0	0	3	9	3	0	0	0	3	9	0	
Fácil mantenimiento	5,20%	0	0	0	0	9	9	3	0	0	0	1	0	0	
Tamaño de salida ajustable	5,35%	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Estética	4,46%	0	0	0	0	1	0	3	0	0	0	0	0	9	
Garantía	5,94%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	
Capacidad de separación	6,54%	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Control de residuos (filtracion)	6,39%	0	0	1	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	
Control de ruido	6,39%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	TOTAL
Peso absoluto		0,829	1,048	0,814	1,259	0,958	1,235	1,270	1,270	0,869	0,865	2,571	0,535	0,401	13,9242199
PRIORIDAD DE CARACTERÍSTICAS		5,95%	7,52%	5,85%	9,04%	6,88%	8,87%	9,12%	9,12%	6,24%	6,21%	18,46%	3,84%	2,88%	100,00%

Figura 5

Gráfica de Prioridad de características



La gráfica (Figura 5) muestra que la característica con mayor prioridad es la calidad de materiales (C11) con un 18,46%**,** lo que indica que el cliente valora principalmente la resistencia y durabilidad del sistema.

La matriz 6 (Tabla 6) vincula los requerimientos del cliente con las funciones principales que debe cumplir la máquina trituradora de llantas. A diferencia de matrices anteriores, aquí se hace un cruce directo entre lo que el cliente espera y las funciones que el producto debe garantizar.

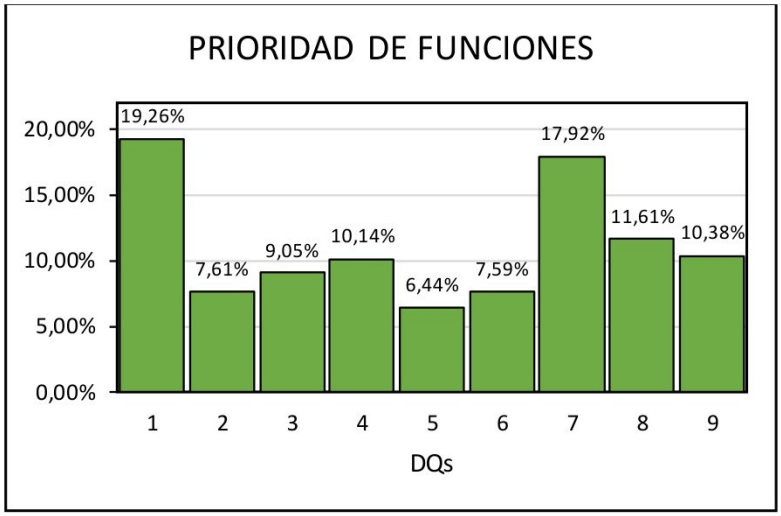
Tabla 6

Matriz Requerimientos del cliente con las funciones principales

	MATRIZ 6 - SOLICITUD DEL CLIENTE: FUNCIÓN										
		Despliegue de funciones									
Demanded Quality DQs	**Prioridad solicitudes del cliente**	1) Triturar neumáticos	2) Ajustar el tamaño del material triturado	3) Operar de forma continua-ciclo rapido	4) Controlar resiudos secundarios	5) Proteger al operario	6) Permitir manejo sencillo	7) Facilitar MTTO y limpieza	8) Ser movil	9) Garantizar durabilidad	
Facilidad de uso	6,69%	0	1	3	0	1	9	9	9	0	
Alta capacidad de trituracion	7,13%	9	0	0	0	0	0	0	0	0	
Compatibilidad con diferentes tamaños	7,13%	9	1	0	0	0	0	0	0	0	
Compatibilidad con diferentes tipos de llantas	6,39%	9	1	1	0	0	0	0	0	0	
Ciclo rápido	6,84%	3	1	9	0	0	0	0	0	0	
Durabilidad	5,50%	0	0	0	1	0	0	3	0	9	
Tamaño y portabilidad	6,69%	0	0	0	0	0	0	0	9	0	
Seguridad	7,43%	0	0	0	3	9	3	9	0	1	
Precio competitivo	5,94%	0	1	3	1	1	1	1	3	3	
Fácil mantenimiento	5,20%	0	0	0	1	0	0	9	1	0	
Tamaño de salida ajustable	5,35%	0	9	0	0	0	1	0	0	0	
Estética	4,46%	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
Garantía	5,94%	1	0	1	3	0	0	1	0	9	
Capacidad de separación	6,54%	0	1	0	1	0	0	0	0	0	
Control de residuos (filtracion)	6,39%	3	1	0	9	0	0	3	0	0	
Control de ruido	6,39%	1	0	0	0	0	0	0	0	0	TOTAL
Peso absoluto		2,379	0,941	1,117	1,253	0,795	0,938	2,214	1,434	1,282	12,3521545
PRIORIDAD DE FUNCIONES		19,26%	7,61%	9,05%	10,14%	6,44%	7,59%	17,92%	11,61%	10,38%	100,00%

Figura 6

Gráfica de Prioridad de funciones



los resultados de la gráfica (Figura 6) evidencian que el diseño debe priorizar la eficiencia de trituración, la facilidad de mantenimiento y la movilidad, sin descuidar la seguridad del operario y la sostenibilidad operativa.

La siguiente Matriz, ver Tabla 7, busca relacionar las funciones que debe cumplir la máquina con los mecanismos que permitirán ejecutarlas. Aquí se evalúa el grado de contribución de cada mecanismo a las funciones clave.

Esto permite identificar qué mecanismos son críticos y deben ser priorizados en el diseño de la trituradora de llantas.

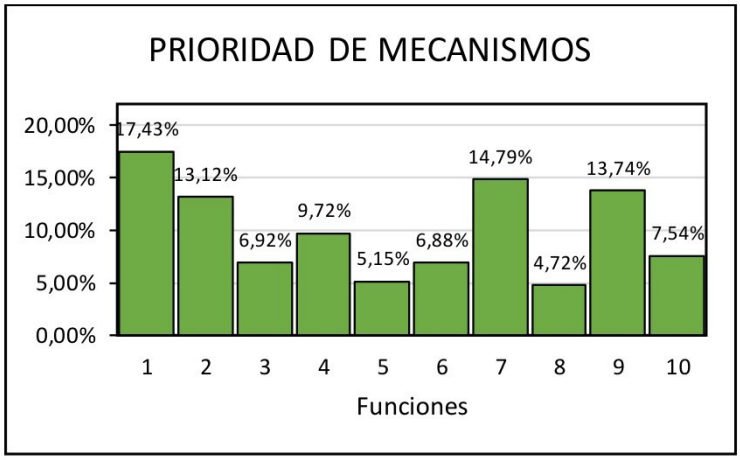
Tabla 7

Matriz 7 de Función vs Mecanismo

		MATRIX 7 -FUNCIÓN-MECANISMO										
		Despliegue de mecanismos										
Despliegue de funciones	**Prioridad de funciones**	1) Corte-trituracion	2) Transmisión de potencia	3) Separación de materiales	4)Alimentación	5) Ajuste tamaño de salida	6) Extracción y transporte	7)Control de polvo	8) Seguridad	9)Bastidor-estructura	10) Control	
1) Triturar neumáticos	19,26%	9	9	0	3	1	0	0	0	3	3	
2) Ajustar el tamaño del material triturado	7,61%	3	0	1	0	9	0	0	0	3	0	
3) Operar de forma continua-ciclo rapido	9,05%	9	3	3	9	0	9	0	0	0	1	
4) Controlar resiudos secundarios	10,14%	3	0	3	0	1	3	9	0	0	0	
5) Proteger al operario	6,44%	0	3	0	3	0	1	3	9	3	3	
6) Permitir manejo sencillo	7,59%	0	0	3	3	1	3	0	1	3	9	
7) Facilitar MTTO y limpieza	17,92%	1	1	3	1	0	0	9	0	3	0	
8) Ser movil	11,61%	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
9) Garantizar durabilidad	10,38%	3	3	0	0	0	0	3	3	9	0	
												TOTAL
Peso absoluto		3,571	2,688	1,417	1,992	1,055	1,410	3,030	0,967	2,815	1,544	20,4904367
PRIORIDAD DEMECANISMOS		17,43%	13,12%	6,92%	9,72%	5,15%	6,88%	14,79%	4,72%	13,74%	7,54%	100,00%

Figura 7

Gráfica de Prioridad de mecanismos



Los resultados muestran que los tres mecanismos más importantes (1, 7 y 9) concentran casi el 46% de la prioridad total, lo que significa que el diseño de la trituradora debe centrarse en:

- Mecanismo de corte robusto y eficiente.
- Sistema de transmisión confiable.
- Estructura y alimentación segura y estable.

Los demás mecanismos deben diseñarse de manera funcional, pero con un enfoque en simplicidad y bajo costo, ya que su impacto en el cumplimiento de funciones es menor.

Una vez ejecutado el análisis QFD se consiguió tener una visión más clara de lo que pasarán a ser las especificaciones y detalles de la trituradora. Asimismo, contar con una serie de mecanismos que conforman a la máquina permitió realizar un proceso de toma de decisiones por medio de diagramas morfológicos. El proceso evaluó un número significativo de diagramas, por tanto, se presenta el esquema de un solo diagrama, con la metodología de plantear y seleccionar las alternativas más adecuadas según el consenso del equipo de trabajo (cliente, estudiante, director). La totalidad de diagramas se adjuntan en los apéndices del trabajo final del proyecto.

En la Tabla 8, se aprecia el diagrama morfológico para evaluar el medio de trituración, donde se expusieron las alternativas, su principio de funcionamiento, sus ventajas y desventajas y aplicación en triturado de llantas. Las franjas verdes denotan que son las alternativas preferidas por el equipo de trabajo.

Tabla 8

Diagrama morfológico

Medio de triturado	Cómo trabaja	Ventajas en llantas	Desventajas en llantas	Uso típico en reciclaje de llantas
Cizallado entre rodillos	Dos ejes contrarrotantes con cuchillas dentadas atrapan y cortan como tijera.	- Muy robusto y tolerante a acero.- Alto torque, baja velocidad.- Puede tragar llantas completas.	- Produce trozos grandes e irregulares.- No separa materiales.- Necesita etapa secundaria.	Etapa primaria para reducir volumen de llantas enteras (50-300 mm).
Desgarrado por ganchos	Cuchillas tipo gancho muerden y desgarran el neumático.	- Gran capacidad de arrastre.- Menor atascamiento.- Más agresivo para estructuras reforzadas.	- Tienen desgaste rápido.- Trozos irregulares.- No produce granulado.	Pretrituración agresiva en llantas OTR o de camión.
Corte por cuchillas rotativas	Rotor rápido con cuchillas afiladas corta el material contra una contra-cuchilla fija.	- Chips uniformes.- Permite controlar tamaño con cribas.- Ideal para segunda etapa.	- No soporta llantas completas (debe estar pretriturada).- Mayor consumo energético.- Desgaste alto en acero.	Etapa secundaria, convierte chips en granulado (10-50 mm).
Triturado por martillos	Tambor o rotor con martillos que golpean y rompen el material por impacto.	- Excelente para refinar material semiduro.- Reduce a tamaños muy pequeños.- Maneja mezclas de caucho y metal.	- Mucho ruido y polvo.- Alto mantenimiento.- Necesita cribas y extracción de polvo.	Etapa final, produce polvo de caucho (<10 mm).
Compresión y fractura	Dos rodillos lisos o prensas aplastan para reducir volumen.	- Barato y simple.- Útil solo para compactar llantas.	- No tritura, solo deforma.- No separa acero.- Poco útil para reciclaje real.	Pretratamiento o transporte, solo compacta para ocupar menos espacio.

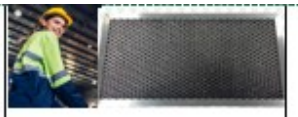
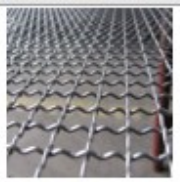
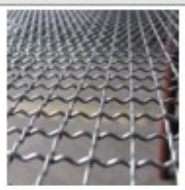
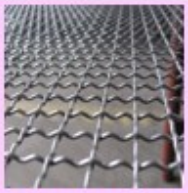
6. Análisis de alternativas

Una vez planteadas las alternativas, se optó por la alternativa 3 la cual se aprecia con color rosado en la Tabla 9, donde también se aprecian las respectivas especificaciones. Esta elección se llevó a cabo después de reuniones con el equipo de trabajo y evaluarla como aquella que mejor cumple los requerimientos del cliente.

Tabla 9

Estudio de alternativas

	Sistemas	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
A	Trituración	 Dos ejes contrarrotantes con cuchillas tipo gancho	 Cuatro ejes contrarrotantes con cuchillas tipo gancho	 Dos ejes contrarrotantes con cuchillas tipo gancho
B	Transmisión	   Alimentación con motor electrico con regulación de velocidad electrica(Variador)	   Alimentación con motor electrico con transmisión completamente mecánica	   Alimentacion con motor electrico con transmisión completamente mecánica

C	**Separación**	 Cribas y labor del operario	 Separación magnetica	 Cribas y labor del operario
D	**Alimentanción**	 Tolva y labor del operario	 Tolva y labor del operario	 Tolva y labor del operario
E	**Ajuste de Tamaño**	 Cribas de diferentes tamaños	 Cribas de diferentes tamaños	 Cribas de diferentes tamaños
F	**Extración**	 Recipiente móvil y labor del operario	 Recipiente móvil y labor del operario	 Recipiente móvil y labor del operario
G	**Polvo**	 Barreras metálicas con lámina	 Barreras metálicas con lámina	 Barreras metálicas con lámina
H	**Seguridad**	 Botón de parada de emergencia	 Botón de parada de emergencia	 Botón de parada de emergencia
I	**Bastidor**	 Tuberia y ángulos estructurales metálicos	 Tuberia y ángulos estructurales metálicos	 Tuberia y ángulos estructurales metálicos
J	**Control**	 Botonera para control de motor	 Botonera para control de motor	 Botonera para control de motor

7. Diseño a detalle

7.1 Requerimientos de diseño para el desarrollo a detalle

Esta sección parte de los requerimientos establecidos durante la etapa del diseño conceptual, los cuales se obtuvieron a partir de las necesidades del taller pequeño que se tomó como referencia y que se priorizó mediante la metodología QFD. Estos requerimientos deben satisfacer los sistemas de la máquina durante su dimensionamiento, selección y construcción.

En la Tabla 10 se muestra los aspectos de mayor relevancia como la capacidad de triturar, compatibilidad con distintos tamaños de llanta, seguridad, facilidad del mantenimiento y dimensiones de la máquina

Tabla 10

Requerimientos principales del diseño de la máquina.

Requerimiento	Condición de diseño
Capacidad de trituración	200 kg/h
Aplicación	Talleres de pequeña escala
Tipo de NFU	Llantas de vehículos del sector urbano
Tamaño máximo	22 in de diámetro exterior × 8 in de ancho
Tipo de trituración	Primaria
Seguridad	acceso a las cuchillas en funcionamiento.
Mantenimiento	Fácil acceso y limpieza
Dimensiones	2 mts Largo x 1.5 mts ancho x 2.20 mts alto

Los 200 kg/h se especificaron buscando un equilibrio entre adquirir el equipo de bajo costo y mantener rentable la producción de ripio. Esta rentabilidad se evaluó mediante un presupuesto operativo el cual se especifica en el apartado de costos, y principalmente fue pensado en la recolección de NFU de por lo menos 10 talleres del área metropolitana. Este requerimiento y todas las demás especificaciones de la tabla fueron propuestos y analizados en la serie de reuniones con el equipo de trabajo.

7.2 Configuración final del sistema

A partir de los requerimientos establecidos y la evaluación de alternativas que se desarrolló en la etapa de diseño conceptual se definió la configuración final de la trituradora. La propuesta integra seis sistemas: alimentación, corte, estructura, motriz y transmisión, descarga y control los cuales trabajan de forma conjunta para realizar una trituración primaria de las llantas. La configuración diseñada con el señalamiento de cada sistema se presenta en la Figura 8. En la Tabla 11 se resume la función de cada sistema dentro del proceso de trituración.

Figura 8

El sistema final de la trituradora de llantas.

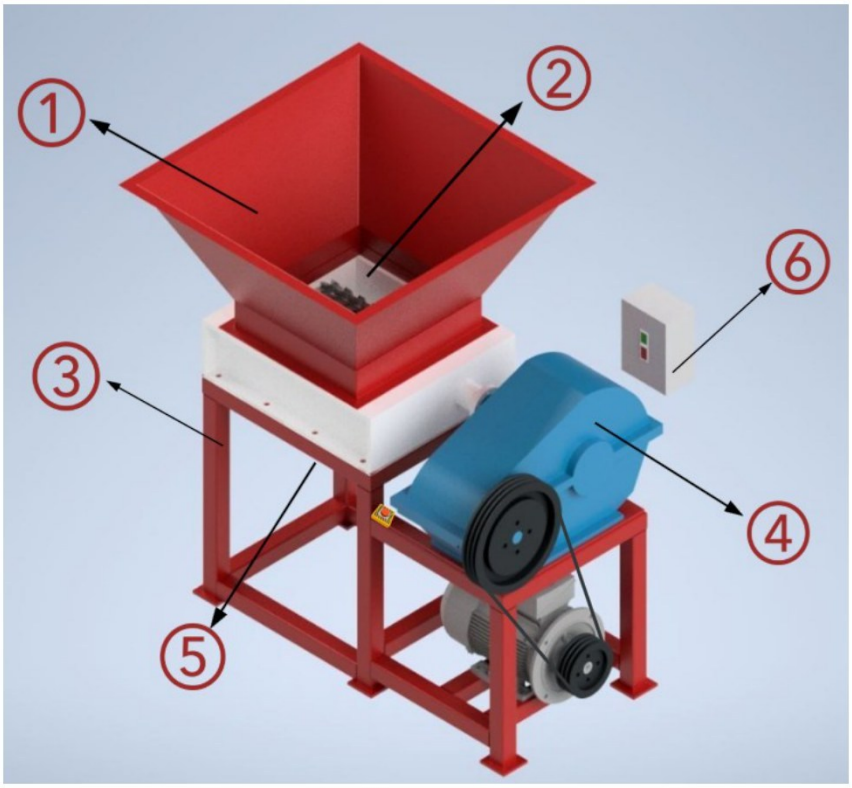


Tabla 11

Sistemas funcionales de la trituradora compacta de llantas.

#	Sistema	Función principal
1	Alimentación	Introducir el NFU en la cámara de trituración
2	Corte	Atrapar, cortar y desgarrar el neumático
3	Estructura	Soportar y mantener integrados los sistemas
4	Transmisión	Transmitir potencia y torque hacia los ejes
5	Descarga	Permitir la evacuación del material triturado
6	Control y seguridad	Permitir operación y protección del equipo

El concepto final corresponde a los requerimientos definidos para el proyecto, en términos de capacidad de trituración, compacidad, seguridad, facilidad de operación y costo. Sus ejes en contra rotación permiten un alto torque a una baja velocidad. Además, su configuración compacta facilita su implementación en el taller de pequeña escala que se tomó de referencia, permitiendo reducir el volumen de los neumáticos fuera de uso y darle una mejor condición de almacenaje y manejo, a la vez que se saca un provecho económico al vender el triturado.

7.3 Criterios de dimensionamiento y selección

Las medidas de los componentes se realizaron tomando como referencia los requerimientos de desempeño y las condiciones de operación definidas en el diseño conceptual.

Para los sistemas se determinaron parámetros de funcionamiento necesarios para luego realizar los cálculos de dimensionamiento, selección de materiales, elementos comerciales y las debidas simulaciones de resistencia, para así mantener una continuidad lógica entre el desarrollo a detalle, las necesidades del cliente, las especificaciones del diseño y la configuración finalmente construida.

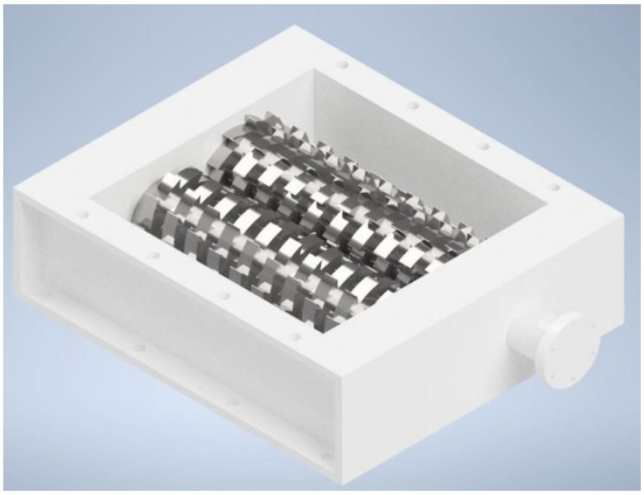
7.4 Diseño mecánico del sistema de corte

7.4.1 Configuración del sistema de corte

El sistema de corte es el mecanismo principal que se encarga de realizar la trituración de los NFU. Está compuesta por dos ejes hexagonales que giran en contra rotación y sobre ellos se disponen los elementos de corte que se separan mediante espaciadores. Durante la operación las cuchillas realizan el atrapamiento que permite cortar y desgarrar el neumático que se introduce por la tolva para realizar la trituración primaria, manteniendo una velocidad de operación reducida y un gran torque en los ejes. En la Figura 9 se muestra la configuración final del sistema de corte. Nótese que todos los elementos mencionados anteriormente van soportados en una cámara de trituración que le brindan esa compacidad y rigidez.

Figura 9

Configuración del sistema de corte de la trituradora.



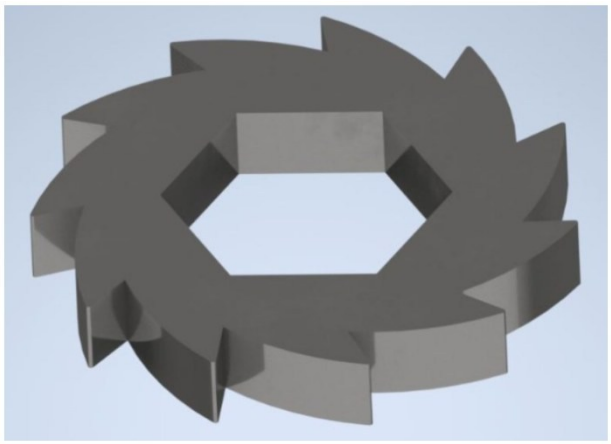
7.4.2 Geometría de los elementos de corte

La geometría de los elementos de corte fue definida considerando las medidas disponibles en la cámara de trituración, las condiciones de carga necesarias para triturar los NFU especificados y la capacidad de 200 kg/h.

Cada rotor cuenta con once dientes distribuidos alrededor de su perímetro como se muestra en la Figura 10, los cuales son los elementos de corte por cizalla, y cumplen una función de gancho que hala el caucho después del corte por cizalla durante la rotación de los ejes.

Figura 10

Elemento de corte.



En la Figura 11 se presenta un modelo del elemento de corte con sus principales medidas, a su vez que en la Figura 12 se muestra el eje hexagonal desde una vista lateral y frontal con sus dimensiones.

Figura 11

Geometría del elemento de corte.

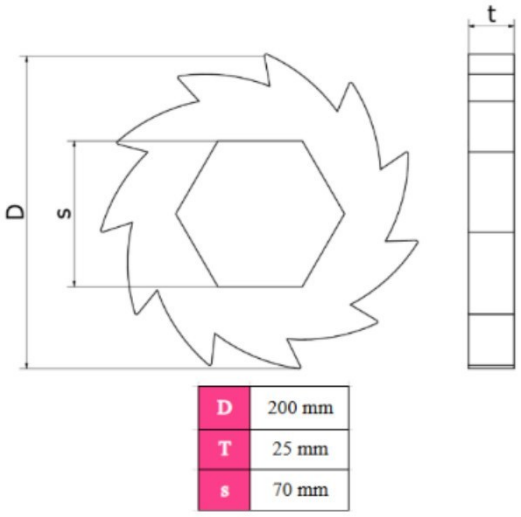
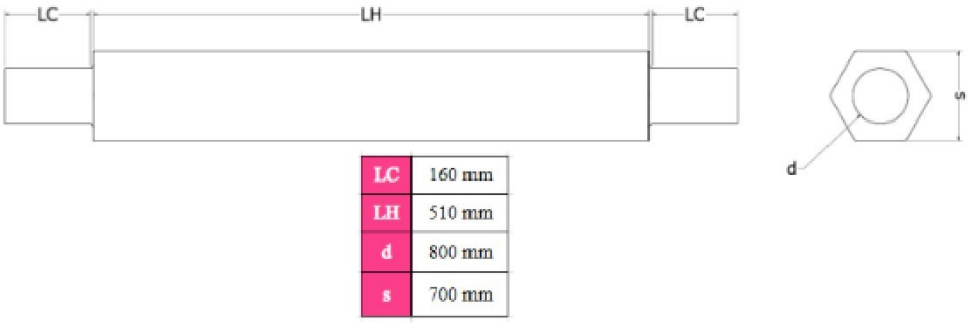


Figura 12

Geometría del eje hexagonal.



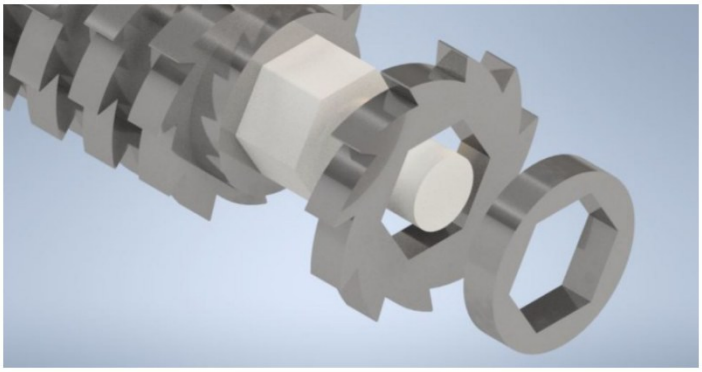
7.4.3 Disposición de los elementos de corte sobre los ejes

Los rotores y los separadores se distribuyen a lo largo de cada eje, permitiendo mantener una posición relativa de las cuchillas y establecer una correcta separación dentro de la cámara de trituración. Se tienen 2 ejes hexagonales, y cada uno de ellos porta 10 cuchillas y 10

espaciadores, conformando un conjunto de 20 elementos por eje. La forma en la que se disponen los elementos de corte, ejes y separadores se muestra en la Figura 13.

Figura 13

Disposición de los elementos de corte y separadores sobre los ejes.



7.4.4 Determinación de la fuerza de trituración

La fuerza requerida para realizar la trituración se determinó a partir de la capacidad de procesamiento, considerando una capacidad objetivo de 200 kg/h, una velocidad de rotación de los ejes de 15 a 20 rpm, 11 contactos de corte por revolución y un espesor de corte de 2,5 cm.

En primer lugar, se determinó el flujo volumétrico que corresponde a la capacidad. Luego, ese flujo se relacionó con la velocidad de giro para obtener el volumen de material para cada revolución y finalmente, al volumen correspondiente a cada mordida. A partir de ese volumen se obtuvo el área efectiva de corte que se utilizó para estimar la fuerza necesaria durante la trituración. El cálculo completo se presenta en el Apéndice A, mientras que en la Tabla 12 se muestran los principales parámetros y resultados obtenidos.

Tabla 12

Parámetros y resultados obtenidos de los elementos de corte.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Capacidad de procesamiento	ṁ	200	kg/h
Densidad adoptada	ρ	1200	kg/m³
Velocidad de los ejes	n	15	rpm
Dientes por elemento	N	11	Dientes
Espesor de corte	t	25	mm
Área de corte	A_c	673,4	mm²
Fuerza de corte	F_c	5,05	kN
Factor de servicio	K_s	1,5	-
Fuerza de diseño	F_d	7,58	kN

7.4.5 Determinación del torque requerido

A partir de la fuerza de diseño para el proceso de triturado se determinó el torque requerido en los rotores. Se consideró el radio de aplicación de la fuerza que es de 100 mm y la condición de tres enganches simultáneos en los cálculos realizados.

Se obtuvo un torque de diseño de 2,27 kN.m, este valor se usó como referencia para la selección y verificación del sistema de transmisión de potencia.

7.4.6 Verificación mecánica de los elementos de corte

Una vez se determina la fuerza y el torque requerido para el funcionamiento del sistema de corte, se realiza una verificación mecánica de los rotores con el propósito de evaluar la capacidad para soportar cargas generadas en la operación.

La verificación se realizó teniendo en cuenta la geometría que se define para las cuchillas y las propiedades mecánicas del material seleccionado. Se consideró la raíz del diente como sección crítica ya que es ahí donde la fuerza de trituración hace un momento flector y como consecuencia se tiene mayores esfuerzos de flexión. Los resultados se utilizaron para determinar

si la configuración que se propuso presenta una resistencia suficiente para operar bajo las condiciones establecidas de diseño.

La altura de las cuchillas es de 30 mm, y el momento flector en la raíz de 227,27 N.m. A partir de esto se determinó un esfuerzo nominal de 60,61MPa y se empleó un factor concentrador de esfuerzos (Kt) de 2,5 debido a la geometría con filete en la raíz, obteniendo así un esfuerzo de diseño de 151,52MPa.

Debido a la repetitividad del proceso de trituración se realizó una evaluación de fatiga, considerando un esfuerzo flexionante fluctuante en la base del gancho, y usando como criterio de falla el método de Goodman, se obtuvo un factor de seguridad de 2,15 lo que indica que la cuchilla presenta un margen de seguridad superior a la unidad bajo condiciones de carga consideradas.

Los resultados del procedimiento recién descrito se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13

Principales parámetros y resultados de la verificación mecánica de la cuchilla.

Ítem	Símbolo	Fórmula	Valor	Unidades
Alto de cuchilla	L_c	NA	30	mm
Fuerza de diseño	F_cd	NA	7,57576	kN
Momento flexionante en la raíz	M_r	F_cd * L_c	227,27	Nm
Espesor de corte	t	NA	25	mm
Esfuerzo normal en la raiz	σr'	(6*M.r)/(t*L.c^2)	60,60606	MPa
Concentrador de esfuerzos en raíz:	K_t	NA	2,5	-
Esfuerzo real en la raiz	σr	σr'*K_t	151,52	MPa
Resistencia última a tensión	S_ut	NA	2100	MPa
Límite de fatiga sin corregir	S_e'	0,5*S_ut	1050	MPa
Factores modificadores	K_sup	NA	0,45	-
	K_tam	NA	0,85	-
	K_R	NA	0,81	-
Límite de fatifa corregido	S_e	S_e'*k_sup*k_tam*k_R	325,31625	MPa

7.4.7 Análisis de desgaste

Se tuvo en cuenta el deterioro de las cuchillas como un criterio para determinar el mantenimiento y la calidad del corte, a causa del contacto reiterado. Este análisis permitió saber cómo se ve afectada la capacidad de corte cuando se desgasta el filo de la cuchilla y así establecer también una referencia para su inspección y reemplazo.

Dentro del análisis, se consideró un acero 9CrSi, con dureza de 57 HRC, Siendo un material típico en máquinas trituradoras por poseer muy buenas propiedades de dureza y tenacidad, tal como se muestra en la Tabla 14. Se estableció un criterio de que la vida útil de cada rotor termina una vez pierda 2 mm de material en el borde de corte. Entendiéndose en este caso por vida útil el espacio entre sucesos de afilamiento.

Las propiedades que se usaron para estimar el comportamiento en el desgaste se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14

Propiedades utilizadas para estimar el desgaste.

Propiedad	Valor	Unidades
Material	Acero 9CrSi	-
Dureza	57	HRC
Resistencia última a tensión	2100	MPa
Límite de fatiga sin corregir	1050	MPa
Factor de superficie	0,45	-
Factor de tamaño	0,85	-
Factor de confiabilidad	0,81	-
Límite de fatiga corregido	325,32	MPa

Como se mencionó anteriormente se consideró como límite de servicio una pérdida de 2 mm del borde de corte para establecer un criterio de mantenimiento.

Para estimar la pérdida de material se empleó el modelo de desgaste de Archard basado en el volumen desgastado, la fuerza aplicada, la distancia recorrida, la dureza del material y el coeficiente de desgaste, siguiendo la ecuación de volumen desgastado:

$$V_{des} = K\frac{0,2\ F_{real}\ S}{H}$$

donde K corresponde al coeficiente de desgaste y H=6,3 GPa a la dureza utilizada en el modelo (Propios del material) y Freal la fuerza de corte.

El volumen máximo de material establecido para alcanzar la condición de desgaste fue:

$$V_{lim} = 500\ mm^3$$

A partir del volumen límite de desgaste y de las condiciones de operación de la máquina, se determinó el tiempo necesario para alcanzar la condición de fin de vida.

$$t_{fallo} = \frac{2\ V_{\lim}\ H}{K\ F_{cd}\ V_c}$$

$$t_{fallo} = 882355,5\ s$$

Considerando que no todas las cuchillas se encuentran haciendo cortes de forma simultánea se estableció un factor de uso:

$$t_{fallo} = 882355,5\ s$$

se obtuvo una vida útil de:

$$T_{vida} = 306,37\ h$$

Para una operación de 6 h/día y 22 días/mes:

$$T_{vida} = 2,32\ meses$$

Considerando un espesor disponible de 7 mm para operaciones de afilado y una pérdida de 1,5 mm por cada operación, se estimó el número de afilados posibles antes de alcanzar el límite establecido que fue de 4,67 afilados.

Los principales resultados obtenidos en la estimación del desgaste y la vida útil de los elementos de corte se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15

Principales resultados obtenidos en la estimación del desgaste y la vida útil de las cuchillas.

Parámetro	Resultado	Unidades
Material	Acero 9CrSi	-
Dureza	57	HRC
Pérdida de borde límite	2	mm
Volumen límite de desgaste	500	mm^3
Vida útil estimada	306,37	h
Vida útil estimada	2,32	meses
Número de afilados	4,67	-

De acuerdo con las condiciones de operación y los criterios de desgaste establecidos, los elementos de corte presentan una vida útil estimada de 306,37 h, con posibilidad de realizar aproximadamente 4 afilados antes de requerir su reemplazo. Es importante resaltar que el desgaste de las cuchillas depende fuertemente del tipo de llanta triturada, en especial por el contenido de alambres en los mismos.

7.5 Diseño del sistema de transmisión

7.5.1 Requerimientos del sistema de trasmisión

El sistema de trasmisión debe reducir la velocidad del motor hasta alcanzar una condición requerida por los ejes de trituración, asimismo debe trasmitir el torque necesario para triturar los NFU.

En cuanto al diseño, se consideró una velocidad nominal del motor entre 1700 y 1750 rpm y una velocidad de operación de los ejes entre 15 y 20 rpm.

En la Tabla 16 se muestran los principales requerimientos considerados para el diseño del sistema de transmisión, además de los parámetros y resultados para obtener la relación de transmisión global.

Tabla 16

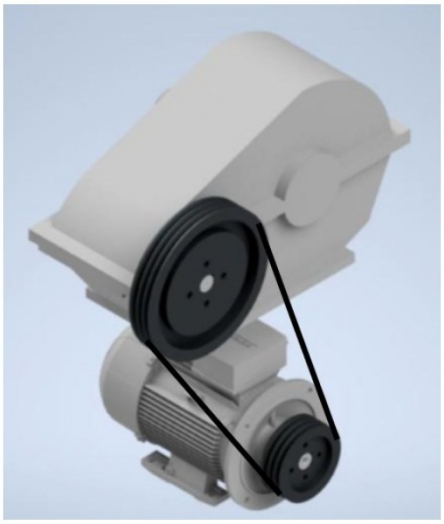
Requerimientos para el diseño del sistema de transmisión.

Ítem	Símbolo	Fórmula	Valor	Unidades
Potencia del motor	P_motor	NA	10	hp
Velocidad de ejes	n_ejes	NA	15	rpm
Velocidad del motor	n_motor	NA	1700	rpm
Velocidad de rotores	n_rotores	NA	15	rpm
Relación de velocidades	VR	n_motor/n_ejes	113,3333	-

Con los requerimientos de velocidad rotativa y torque se decidió como mejor alternativa reducir la velocidad en dos etapas; una etapa por correas y otra por engranajes (caja reductora). En la Figura 14, se puede observar un esquema general del motor, poleas y correa y caja reductora.

Figura 14

Esquema general motor, poleas y correa, y caja reductora.



7.5.2 Selección del motor eléctrico

Se seleccionó un motor eléctrico trifásico de 10 HP y 220 V como se ve en la Figura 15, con una velocidad nominal aproximada de 1700 rpm. La selección se realizó considerando los requerimientos de potencia y velocidad establecidos para el proceso de trituración.

Figura 15

Motor eléctrico seleccionado para el accionamiento de la máquina.



7.5.3 Diseño de la transmisión por poleas y correa

Debido a la alta reducción de velocidad, se realizó una primera etapa de trasmisión por medio de correa y poleas. Esto permite reducir la velocidad antes de la entrada a la caja reductora.

Para esta etapa se adoptó una relación aproximada de:

$$VR_r = 2$$

Considerando un factor de servicio de:

$$FS_T = 1,5$$

la potencia de diseño se determinó como:

$$P_d = P_{motor} \cdot FS_T$$

A partir de la potencia de diseño y la velocidad de operación, se seleccionó una transmisión por medio de correa tipo 3V, con una polea motriz de 5,55 pulgadas y una polea conducida de 11,7 pulgadas. Los resultados principales se exponen en la Tabla 17.

Tabla 17

Especificaciones de la trasmisión de potencia por correa.

Elemento	Valor	Unidades
Número de correas	3	-
Tipo de correa	3V	-
Polea motriz	5,55	in
Polea conducida	11,7	in
Relación aproximada	2,11	-
Potencia de diseño	15	HP
Longitud de correa	87,4	in
Distancia entre centros	28,8	in

La longitud de la correa y la distancia entre centros se determinaron de acuerdo con la geometría de las poleas y las condiciones de montaje seleccionadas.

7.5.4 Selección de la caja reductora

Como segunda etapa de reducción se seleccionó una caja reductora con una relación de transmisión de 48:1, encargada de disminuir la velocidad proveniente de la primera etapa e incrementar el torque disponible para el accionamiento de los ejes de trituración. Se realizo un exhaustivo estudio del mercado y se decidió como mejor alternativa una caja reductora de engranajes helicoidales de dos etapas tipo ZQ400, la cual se muestra en la figura 16. La capacidad de torque máximo para esta relación de velocidad es superior a los 2000 Nm, soportando picos de hasta unos 3000 Nm.

Figura 16

Caja reductora ZQ400.



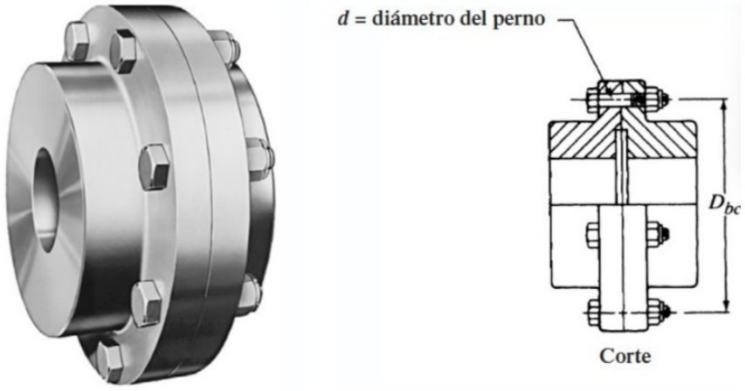
Nota. Fotografía tomada del *Catálogo técnico de reductores cilíndricos de velocidad serie ZQ/JZQ* (JXSC Mining Machinery, 2024).

7.5.5 Diseño de acoples

Se utilizó un acople rígido con brida y pernos tal como se muestra en la Figura 17 para la unión entre la salida de la caja reductora y la entrada a la cámara de trituración. La selección se hizo tomando en cuenta el par transmitido y las condiciones de montaje.

Figura 17

Acople utilizado entre los elementos del sistema de transmisión.



Nota. Adaptado de *Diseño de elementos de máquinas* (4.ª ed.), por R. L. Mott, 2006, Pearson Educación.

El dimensionamiento del acople se realizó mediante la ecuación de diámetro de perno requerido que se muestra en la Tabla 18, la cual determina el diámetro mínimo necesario para resistir la falla por corte provocada por el torque transmitido, teniendo como resultado una brida de 22 cm diámetro de Acero AISI 1045 con 6 tornillos M14 grado 5. La entrada al acople del eje de salida de la caja reductora tiene sección circular y acople con chaveta, mientras que la entrada al acople del eje de la cámara de trituración tiene sección hexagonal que encaja con el eje.

Tabla 18

Especificaciones del acople rígido entre la cámara y caja reductora.

Ítem	Símbolo	Fórmula	Valor	Unidades
Torque	T	NA	4.747	Nm
Diámetro de círculo de perno	D_bc	NA	8	Pulg
Número de pernos	N	NA	6	Unidades
Resistencia al cortante de diseño	τ_d	NA	40	-
Diámetro de perno requerido	d_req	$\sqrt{\frac{8 \cdot T}{D_{bc} \cdot N \cdot \pi \cdot t_d}}$	1/4	Pulg
Diámetro de perno escogido	d_esc	-	4/5	Pulg

Se escogió ese valor de diámetro de perno (M14) para no utilizar demasiados tornillos y hacer que la unión permanezca unida en toda la superficie.

7.5.6 Diseño de ejes

Considerando una geometría hexagonal nominal de (s) 70 mm, una longitud (L) de 600 mm y las cargas de operación de (M) 2000 N.m y (T) de 4,74 kN.m, se obtuvieron los siguientes parámetros y criterios de falla mostrados en la Tabla 19.

Tabla 19

Resultados analíticos de capacidad torsional y factores de seguridad en el eje.

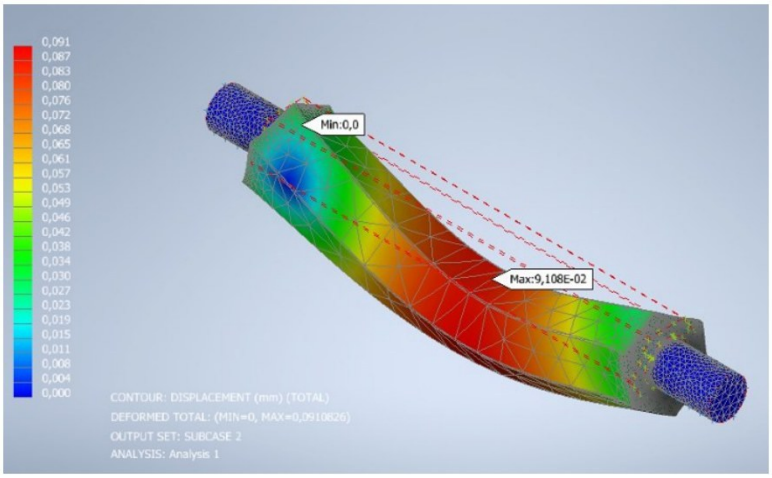
Criterio de Evaluación	Propiedad / Fórmula	Valor	Unidad	Factor de Seguridad (n)	Estado / Observación
Módulo de sección polar	Q = 0,115 * s^3	3,95E-05	m³	—	Propiedad geométrica del perfil
Resistencia a Torsión Pura	T_Hex = τ_max * Q	7,966	kN·m	1,68	Satisface la torsión nominal
Rigidez Torsional (θ = 1°)	T_hex2 = θ * J * (G/L)	10,56	kN·m	2,22	Satisface el límite de rigidez
Efecto de Aristas (Kt = 1,8)	T_esq = (Sy * Q) / (Kt * √3)	4,428	kN·m	0,93	Crítico (n < 1,0) para Sy = 350 MPa
Carga Combinada (Flexión + Torsión)	T_límite con K_flexion = 2,2	4,217	kN·m	0,89	Condición de falla en material estándar

Los ejes se diseñaron para transferir el torque y sostener las fuerzas originadas en el operativo de la trituradora. Dentro del diseño se evaluaron los criterios de falla estática y por fatiga para ejes hexagonales evaluándose como piezas sometidas a esfuerzo flexionante fluctuante y torque fluctuante, tomando como referencia las teorías de energía de distorsión y Goodman. Para el análisis estático se simularon las cargas en inventor Nastran. El estudio contempla la condición crítica de trabajo, sometiendo al componente a un momento torsor simultáneo de 18,16 kN·m y una carga radial cortante de 55,03 kN.

Como se muestra en la Figura 18, la deformación máxima registrada en el eje es de 0,091 mm. Este valor tan reducido confirma una excelente rigidez flexional.

Figura 18

Distribución de desplazamientos y deflexión máxima del eje.

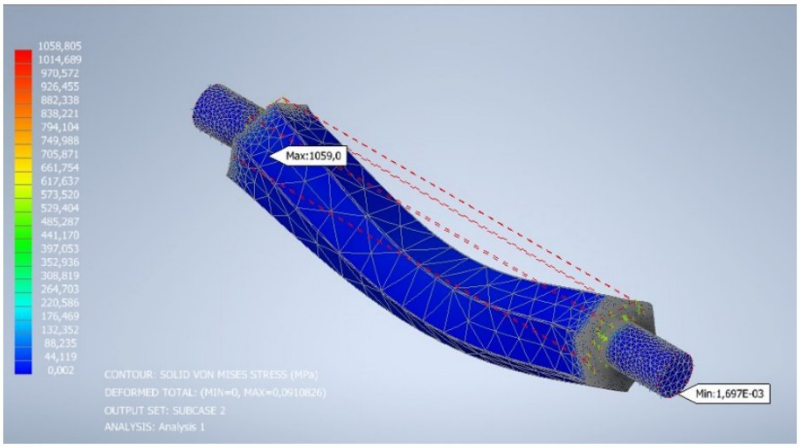


El mapa de esfuerzos combinados de Von Mises (Figura 19) muestra la concentración de tensiones a lo largo del perfil hexagonal.

Se registra un esfuerzo pico de 1059,0 MPa, localizado de forma puntual en las aristas del perfil hexagonal y en la transición geométrica hacia los cuellos de los rodamientos. El resto del cuerpo del eje opera a niveles de esfuerzo considerablemente menores.

Figura 19

Distribución de esfuerzos combinados de Von Mises y localización del esfuerzo pico en el eje.



El comportamiento del eje responde adecuadamente a las demandas mecánicas del equipo. Para soportar con un margen de seguridad adecuado los picos de tensión concentrados (1059 MPa) dentro del régimen elástico y resistir la fatiga por cargas cíclicas, se selecciona un acero aleado de alta resistencia AISI 4140.

7.5.7 Diseño de engranajes sincronizadores

Se siguió el proceso de diseño de engranes rectos sugerido por la norma AGMA, y en la Tabla 20 se presentan los datos y resultados más importantes.

Tabla 20

Parámetros y resultados principales de los engranajes sincronizadores.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Potencia de diseño	P	10	hp
Velocidad de giro	n	17,5	rpm
Relación de transmisión	i	1	—
Número de dientes	Z_1=Z_2	36	dientes
Paso diametral	P_d	4	dientes/in
Ancho de cara	F	3	in
Ángulo de presión	ϕ	20	°
Diámetro primitivo	D_1=D_2	9	in
Distancia entre centros	C	9	in
Material	—	AISI/SAE 8620	—
Tratamiento térmico	—	Cementado, templado y revenido	—
Carga tangencial	W_t	8003,22	—
Esfuerzo de flexión	σ_t	54575,59	—
Esfuerzo admisible a flexión	σ_adm	54342,34	—
Esfuerzo de contacto	σ_c	161442,36	—
Esfuerzo admisible de contacto	σ_adm	164217,75	—

Los resultados obtenidos mediante el procedimiento de cálculo basado en AGMA permitieron verificar los engranajes frente a los esfuerzos de flexión y contacto considerados en el diseño.

Los engranajes seleccionados presentan una relación de transmisión de 1:1, permitiendo sincronizar la velocidad y el sentido de giro de los dos ejes de la cámara de trituración.

El cuerpo de los engranajes conservó el acabado superficial proveniente del tratamiento térmico, realizándose únicamente el mecanizado de las superficies funcionales.

7.5.8 Elección de rodamientos

Para soportar cargas radiales y axiales se sugirieron rodamientos de rodillos cilíndricos de referencia NU 210 ECP, (según especificación del catálogo SKF), el cual cuenta con un diámetro interior de 50 mm y exterior de 90 mm, una capacidad dinámica de 156 kN y estática de 143 kN. Se aclara que este rodamiento marca principalmente una referencia y tamaño sugerido, pero estuvo sujeto a ligeros cambios, principalmente por la disposición, geometría y tamaño de los ejes porta cuchillas.

La capacidad de carga dinámica requerida se evaluó para una vida útil nominal superior a 20.000 horas a una velocidad operativa de 15 a 20 rpm. Esta configuración asegura la absorción de impactos mecánicos y mantiene el descentramiento del eje.

7.5.9 Selección de elementos de unión y transmisión

Para garantizar la transmisión de torque entre los componentes del sistema, se emplearon cuñas rectangulares en las uniones eje–elemento de transmisión, en la Tabla 21 se muestran las medidas de cada chaveta. Adicionalmente, la polea cuenta con una contratuerca para asegurar su posición axial sobre el eje, ver Figura 20.

Tabla 21

Dimensiones de las cuñas de sujeción para los elementos de transmisión.

Elemento	Tipo	Ancho [mm]	Alto [mm]	Longitud [mm]
Eje de salida de caja reductora	Cuña rectangular	28,00	7,50	100,00
Polea conducida	Cuña rectangular	12,45	7,00	82,00
Polea motriz	Cuña rectangular	6,35	4,76	62,00

Figura 20

Sistema de fijación de la polea mediante contratuerca.



7.6 Diseño estructural del bastidor

7.6.1 Requerimientos estructurales

La estructura mantiene la posición y la alineación de los elementos de la maquina durante la operación. El diseño soporta cada uno de los componentes de los sistemas, como motor, tolva, cámara de trituración, caja de velocidades y demás elementos instalados, así como las cargas que se generan durante la trituración.

Se buscó una configuración rígida, compacta y compatible con las condiciones de espacio disponibles en el taller y con los requerimientos de fabricación ya establecidos.

Los principales requerimientos considerados para el diseño estructural se presentan en la Tabla 22.

Tabla 22

Requerimientos para el diseño del bastidor.

Requerimiento	Consideración
Soporte de componentes	Motor, reductor, cámara y tolva
Resistencia	Cargas estáticas y de operación
Rigidez	Mantener la alineación de los componentes
Compacidad	Adaptación a un taller de pequeña escala
Fabricación	Corte, soldadura y mecanizado local
Montaje	Facilitar instalación y mantenimiento

7.6.2 Configuración y geometría del bastidor

El bastidor incorpora los elementos de todos los sistemas de la máquina. La geometría se desarrolló en entorno CAD, con el objetivo de mantener compactos los elementos, facilitar la operación de montaje, mantenimiento y fabricación.

Se presenta en la Figura 21, el modelo del bastidor donde se apoyan los demás sistemas.

Las medidas generales de la estructura en milímetros se muestran en la Figura 22, estas se realizaron teniendo en cuenta las otras dimensiones de elementos como la cámara de cuchillas, la caja de velocidades y demás componentes y con las condiciones del espacio que esté disponible en el taller de referencia para la máquina.

Figura 21

Modelo tridimensional del bastidor.

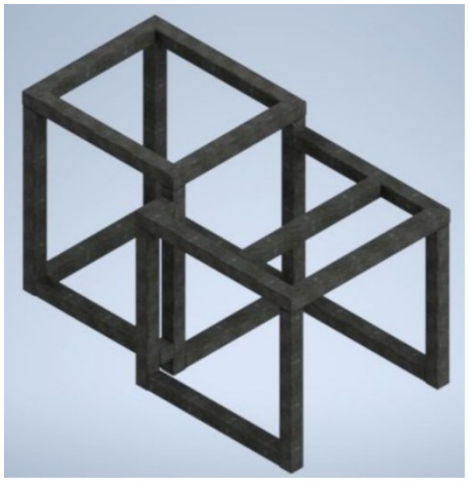
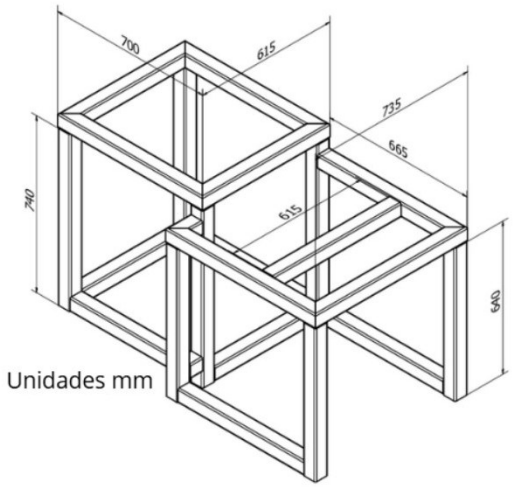


Figura 22

Dimensiones generales del bastidor.



La configuración adquirida posibilita la integración de los elementos principales en una estructura compacta, conservando condiciones adecuadas para su funcionamiento y ensamblaje.

7.6.3 Selección del material y perfiles estructurales

Para la fabricación del bastidor se seleccionó un perfil estructural de acero grado C con las siguientes propiedades mecánicas: un límite elástico de 345 MPa, una resistencia a la tracción

de 425 MPa, y un alargamiento alrededor del 21% (en 2 pulgadas) o 19% (en 8 pulgadas), según el perfil. Estas propiedades se emplearon posteriormente como referencia para la verificación de resistencia y rigidez del bastidor.

De los elementos estructurales, también se tuvieron en cuenta su capacidad para soportar las cargas del conjunto, la disponibilidad comercial y la facilidad de fabricación mediante procesos de corte y soldadura teniendo en claro mantener una estructura compacta y de fácil fabricación local.

7.6.4 Determinación de cargas

Las cargas sobre la estructura corresponden a dos grupos que son las cargas muertas y las cargas vivas. Las cargas muertas correspondieron a pesos de motor, caja reductora, cámara de trituración, tolva y demás componentes. Mientras que las cargas vivas correspondieron a la carga operativa, es decir las fuerzas de corte, y cargas adiciones por el manejo de la máquina. Los resultados del procedimiento recién descrito se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23

Cargas muertas y cargas vivas consideradas en el análisis estructural.

Tipo de carga	Componente	Masa [kg]	Fuerza [kN]	Naturaleza
Carga muerta	Motor	65	0.638	Permanente
	Caja reductora	240	2.354	Permanente
	Cámara+Tolva	600	5.886	Permanente
Carga viva	Carga operativa	—	47.473	Variable
	Otras cargas	100	0.981	Variable
	Total carga muerta	905	8.878	
	Total carga viva	100 kg + carga operativa	48.454	
	Carga total	—	57.332	

7.6.5 Análisis estructural del bastidor

Se llevó a cabo el análisis de la estructura del bastidor para determinar cómo se comporta bajo las condiciones de carga establecidas, una vez que se definieron las cargas de diseño. Se

examinaron las deformaciones de la estructura y los esfuerzos producidos, utilizando como base las propiedades mecánicas del material elegido. El estudio de cargas fue desarrollado en el programa Inventor, considerando las cargas vivas y muertas ya mencionadas, especificada principalmente como cargas distribuidas por unidas de longitud (N/mm) según la longitud de cada elemento cargado y las 7 patas de la estructura se especificaron como puntos fijos en la simulación.

Para llevar a cabo la simulación por elementos finitos (FEA), se definieron inicialmente las características geométricas y las propiedades mecánicas del material empleado en su estructura. La Tabla 24 resume las propiedades físicas y volumétricas del bastidor, mientras que la Tabla 25 detalla las propiedades del acero estructural seleccionado para garantizar la rigidez y soportar las cargas operativas del equipo.

Tabla 24

Propiedades físicas del bastidor.

Ítem	Valor	Unidades
Masa	105,586	Kg
Área	73425,281	mm^2
Volumen	13450,43	mm^3
Centro de gravedad	x=91,007 y=77,405 z=37,841	mm

Tabla 25

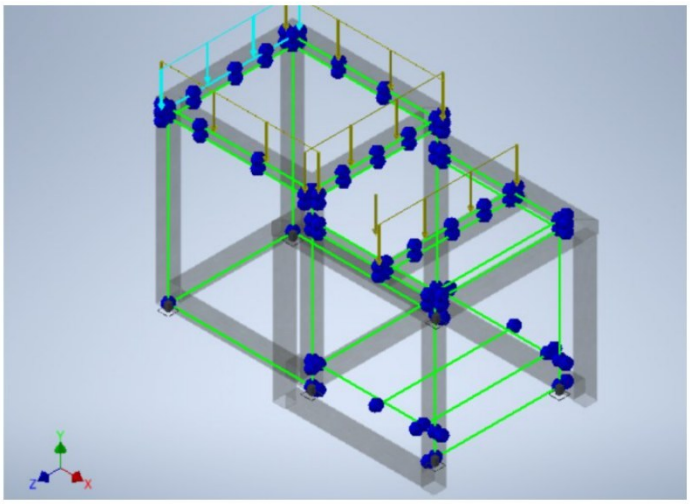
Propiedades del material del bastidor.

Nombre	Acero ASTM A36	
General	Densidad de masa	7,850 g/cm^3
	Límite de elasticidad	248,225 MPa
	Resistencia máxima a tracción	399,900 MPa

En la Figura 23 se muestra un esquema de las cargas sobre el bastidor. Estas cargas están distribuidas a los largos de los perfiles, mientras que los puntos de anclaje de la patas se tomaron como unas restricciones fijas, para así poder garantizar una estabilidad en todo el conjunto.

Figura 23

Localización de cargas distribuidas sobre el bastidor.

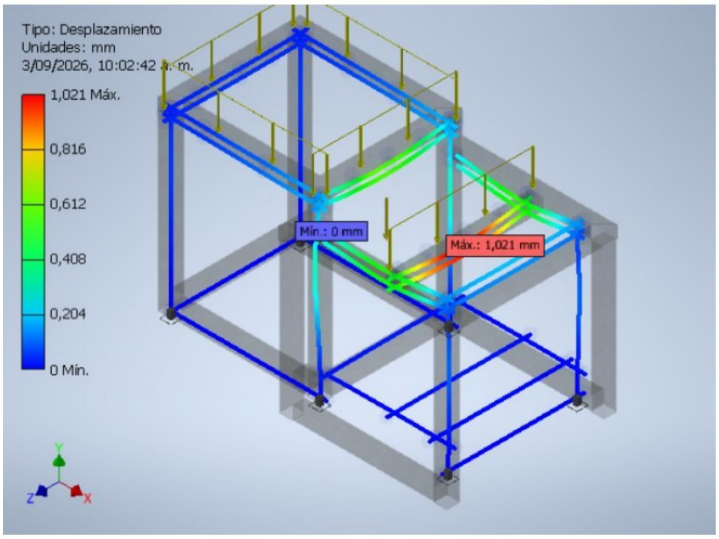


Con el propósito de verificar la rigidez de la estructura y asegurar que no existan flexiones excesivas que afecten la alineación del motor y la caja reductora, se evaluó la deformación en el bastidor. En la Figura 24 se presenta la distribución de desplazamientos totales en el bastidor, se aprecia un comportamiento altamente rígido con un valor de deflexión máxima de apenas 1,021 mm.

Figura 24

Distribución de desplazamientos totales y deflexión máxima en la estructura

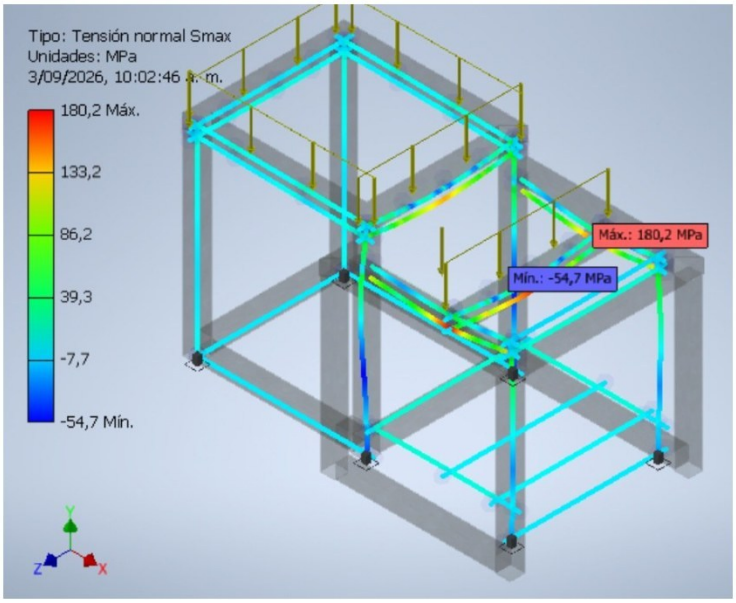
del bastidor bajo carga estática.



En la Figura 25 se ilustra el comportamiento de la tensión normal máxima sobre el bastidor estructural. Se observa un esfuerzo pico de 180.2 MPa localizado en las uniones de los travesaños superiores de soporte. Este nivel de esfuerzo máximo se encuentra por debajo del límite de fluencia del acero estructural seleccionado, garantizando la integridad mecánica de la estructura bajo las cargas de operación.

Figura 25

Distribución de tensiones normales máximas.



El esfuerzo máximo obtenido en el bastidor fue de 180.2 Mpa, localizado en la zona crítica demarcada en la Figura 25. La deformación máxima obtenida fue de 1.021 mm, valor que se considera aceptable respecto a la rigidez requerida para mantener la posición de los componentes durante la operación.

Para las condiciones de esfuerzo máximo presentado, y la capacidad del material empleado, el factor de seguridad mínimo obtenido fue de 1.92, demostrando la capacidad de la estructura para soportar las condiciones de carga consideradas, incluso en condiciones extremas.

7.6.6 Verificación de estabilidad del bastidor

La estabilidad estructural del bastidor se evaluó considerando dos condiciones críticas: la resistencia al pandeo elástico y la estabilidad estática frente a fuerzas de cizalla para evitar el vuelco o deslizamiento, ver Tabla 26.

Tabla 26

Criterios de verificación de estabilidad del bastidor.

Criterio de Estabilidad	Parámetro / Condición Evaluada	Valor Calculado / Límite	Factor de Seguridad (FS)	Estado / Resultado
Pandeo de Columnas (Euler)	Carga axial crítica en soportes (Pcr) vs. Carga de servicio (Pact)	Pact << Pcr	FSpandeo ≥ 3,5	Estable (Sin riesgo de pandeo)
Estabilidad al Vuelco	Momento de vuelco por fuerza cortante (Mv) vs. Momento estabilizador por peso propio (Me)	Me > Mv	FSvuelco ≥ 2,0	Estable (Punto de apoyo seguro)
Rigidez Global / Deformación	Deflexión máxima en perfiles horizontales de soporte	< 0,5 mm	Dentro de tolerancias	Cumple (Alta rigidez)

La estructura presenta un factor de seguridad frente al pandeo muy superior al límite mínimo de diseño, garantizando que las vibraciones y las cargas no comprometerán la alineación ni la integridad del chasis.

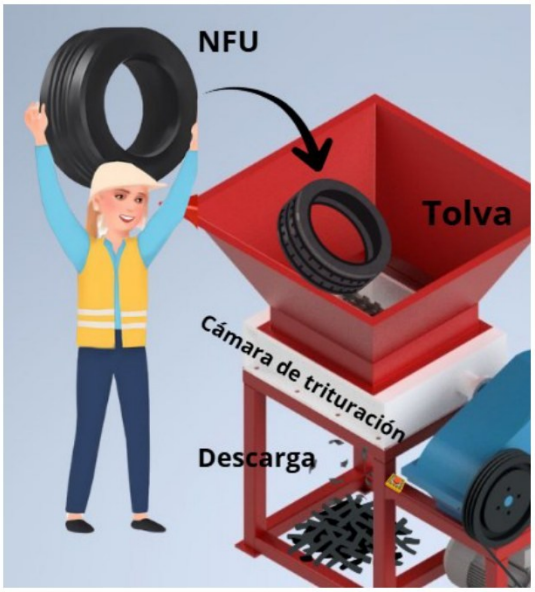
7.7 Diseño de Sistema de alimentación y descarga

7.7.1 Requerimientos del sistema

Como se muestra en la Figura 26, el sistema diseñado requiere que se alimente de una forma manual los NFU, y con las paredes inclinadas de la tolva conducirlos correctamente hacia la cámara de trituración y así facilitar la evacuación del material triturado.

Figura 26

Esquema del flujo del sistema de descarga



7.7.2 Diseño de la tolva de alimentación

La tolva fue diseñada para facilitar el ingreso de los NFU hacia la cámara de trituración. El modelo de este elemento se muestra en la Figura 27. En el diseño se consideraron las dimensiones de los neumáticos, la disposición de las cuchillas, la medida de la cara de la cámara que empalma con la cara de la tolva y las condiciones de alimentación manual, además de dificultar el acceso a las cuchillas por temas de seguridad.

En la Figura 28, se muestran las dimensiones principales de la tolva

Figura 27

Modelo 3D de la tolva de alimentación.

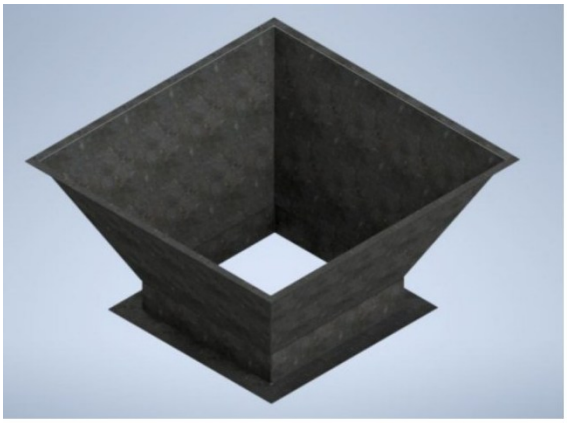
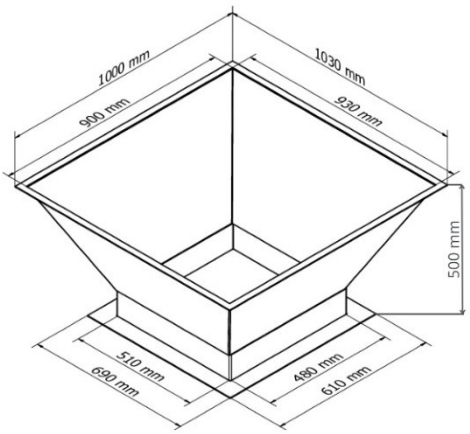


Figura 28

Dimensiones principales de la tolva.



7.7.3 Diseño del sistema de descarga

El sistema de descarga fue diseñado para permitir la salida del material triturado y facilitar su retiro. El diseño mantiene una unión coherente con el bastidor y la cámara de trituración como se muestra en la Figura 29.

Figura 29

Diseño del sistema de descarga y dirección de salida del material.



La cámara de trituración se conectó con el sistema de descarga y la tolva. Se garantizó que las formas fueran compatibles y que no hubiera interferencias con las partes móviles del sistema.

7.7.4 Verificación del diseño

Se verificó que el sistema de alimentación y descarga cumpliera las condiciones funcionales y geométricas requeridas para la entrada y salida de los NFU triturados. En la Tabla 27, se muestran los criterios y resultados obtenidos en la verificación del diseño del bastidor

Tabla 27

Criterios y resultados en la verificación del diseño del bastidor.

Criterio	Resultado
Alimentación de NFU	Cumple
Integración con cámara	Cumple
Evacuación del material	Cumple
Interferencias	No presenta

7.8 Sistema de control

7.8.1 Requerimientos del sistema de control

El sistema de control permite accionar y detener la máquina de una forma segura y facilitar la operación durante la trituración. El arrancador se acciona manualmente, así mismo el botón de la parada de emergencia, en la Figura 30 se muestra un esquema de estos elementos.

Figura 30

Esquema de elementos del sistema de control.



7.8.2 Selección de los elementos de control

Los elementos de control fueron seleccionados de acuerdo con las características del motor trifásico de 10 HP y las condiciones de operación de la máquina.

El motor trifásico de 10 HP adquirido tiene en su placa el dato de consumo de corriente de 34 A, la cual fue la base de selección del dispositivo arrancado. Siguiendo los lineamientos de bajo costo del proyecto se escogió un arrancador directo con capacidad 30-40 A AC3.

Para garantizar la máxima seguridad operativa en la máquina con motor de 10 HP, se seleccionó un pulsador de parada de emergencia industrial tipo hongo de un diámetro de 40 mm con enclavamiento mecánico y rearme por giro, diseñado bajo la normativa internacional IEC 60947-5-5. La elección de este componente fundamenta en su alta confiabilidad y robustez ambiental con grado de protección IP66, óptimo para las exigentes condiciones operativas. El botón especificado posee un bloque de contactos normalmente cerrados NC con clasificación AC-15 (6 A a 230 V); esta capacidad es técnicamente idónea y sobredimensionada para el circuito, ya que el dispositivo no interrumpe directamente la línea de potencia del motor, sino que actúa estratégicamente en la cabecera del lazo de mando del arrancador directo, desenergizando de forma segura e instantánea la bobina del contactor principal ante cualquier condición de riesgo.

La instalación eléctrica se realizó por medio de cables calibre 8 para fases cargadas y calibre 10 para el cable de tierra, indicados para las corrientes operativas. Asimismo, se protegió todo el ramal con un breaker 3x40 A.

8. Construcción y Manufactura

El proceso de construcción de la máquina empezó con la integración de los elementos comerciales que fueron seleccionados a partir de los requerimientos de diseño y los componentes fabricados localmente.

La cámara de trituración, la caja reductora, el motor y otros elementos fueron adquiridos por medio de importación, a partir de los planos y cálculos previamente realizados. Por lo demás como la tolva, estructura, soportes y demás elementos de integración fueron fabricados y ensamblados en Bucaramanga.

Las medidas de los componentes principales fueron cruciales para la configuración final, la fabricación de la estructura se realizó después de la llegada de los mencionados anteriormente, para poder ajustar sus dimensiones reales y garantizar la integración correcta.

8.1 Adquisición y recepción de componentes principales

8.1.1 Componentes importados

En la Tabla 28 se muestra un resumen de los elementos que se obtuvieron y su función en la máquina tomando en cuenta las especificaciones que se definieron en el diseño, se adquirieron los elementos comerciales principales requeridos para el sistema de trasmisión y trituración.

Tabla 28

Componentes comerciales adquiridos para la construcción de la máquina.

Componente	Característica principal	Procedencia
Cámara de trituración	Dos ejes, 10 rotores por eje	Importada
Rotores	10 por eje	Incluidos en cámara
Separadores	Distribución entre rotores	Incluidos en cámara
Rodamientos	Soporte de los ejes	Incluidos
Engranajes sincronizadores	Sincronización de los ejes	Incluidos
Motor eléctrico	10 HP, 220 V	Importado
Caja de velocidades	Reducción de velocidad	Importada
Correas	3 unidades	Incluidas con transmisión
Rigidizadores	Cámara y caja	Incluidos

8.1.2 Recepción de los componentes

La llegada de los componentes importados a la dirección del taller fue de tres meses aproximadamente, después de esto se procedió a realizar una inspección visual para verificar que

todo lo que se pidió haya llegado en buen estado y también que haya llegado cada componente con el modelo y medidas establecidas.

8.2 Cámara de trituración

La cámara se pidió al fabricante ya previamente ensamblado y por tanto se ubicó como un conjunto ya ensamblado de fábrica como se muestra en la Figura 31, donde vienen los dos ejes, los rotores, los separadores, rodamientos, engranajes sincronizadores. Dentro de este paquete, también llegaron los elementos rigidizadores diseñados dentro de la estructura como base a la cámara de trituración y caja reductora.

Figura 31

Cámara de trituración de dos ejes recibida.



8.3 Caja reductora de velocidades

En la Figura 32 se muestra la forma en la que llega la caja con sus dos poleas, y las tres bandas en V. Este paquete incluyó los elementos estructurales tipo canal U pedidos para efectuar la instalación del motor.

Figura 32

Caja reductora recibida.



8.4 Motor

El motor como los demás componentes llegaron en excelente estado, lo primero que se revisó al llegar, fue la placa como se muestra en la Figura 33, para verificar la potencia requerida en la fase de diseño.

Figura 33

Motor recibido.



8.5 Fabricación de la estructura

Ya al finalizar la recepción y la verificación de los componentes importados, se procedió a fabricar la estructura, con la diferencia de basarse en dimensiones teóricas a las reales que se

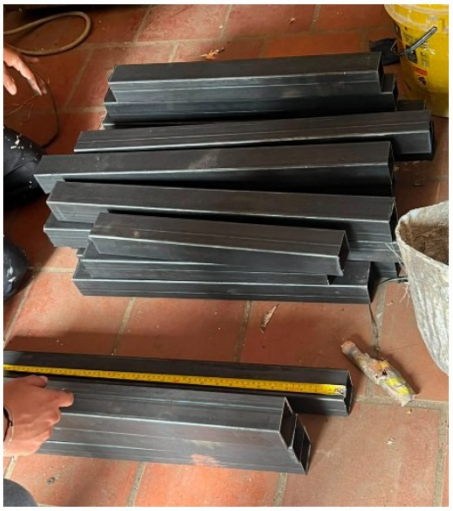
tomaron ya con los componentes en el taller, todo esto para tener una mayor precisión en los puntos de fijación, las posiciones entre los elementos y las dimensiones necesarias para garantizar un correcto ensamblaje.

8.5.1 Adquisición y preparación de materiales

Se realizó la compra de los tubos metálicos para la estructura ya cortados en el taller en donde se compró como se muestra en la Figura 34.

Figura 34

Cortes de tubo para la estructura.



8.5.2 Soldadura de la estructura

Después de la obtención de los tubos ya debidamente cortados, se llevaron a soldar hasta conformar el bastidor principal de la máquina. Se realizó una verificación visual y manual en el proceso de soldadura como se ve en la Figura 35 para garantizar la estabilidad de la estructura para el posterior montaje de los sistemas y que se sigan conservando las dimensiones establecidas.

Figura 35

Proceso de soldadura y conformación del bastidor de la máquina.



8.5.3 Ensamble preliminar de la estructura

En esta parte del proceso ya se procede a organizar cada elemento en su lugar en el bastidor, ya con la estructura lista y situada en el taller, por medio de una grúa pescante, se realizó el levantamiento y localización de cada componente, en la Figura 36 se muestra el uso de un amarre con trinquete para sujetar cada elemento lo más centrado posible con el gancho de la grúa pescante.

Figura 36

Ensamble preliminar de los elementos estructurales y verificación de dimensiones.



8.5.4 Instalación eléctrica del motor

La instalación se llevó a cabo aprovechando la red trifásica 220V 60 Hz del taller previamente verificada el límite de corriente en el contador eléctrico. La instalación del breaker se hizo dentro de la caja ya existente complementado con el paso del nuevo cableado. En la Figura 37 se observan el arrancador y el botón de emergencia ya instalados.

Figura 37

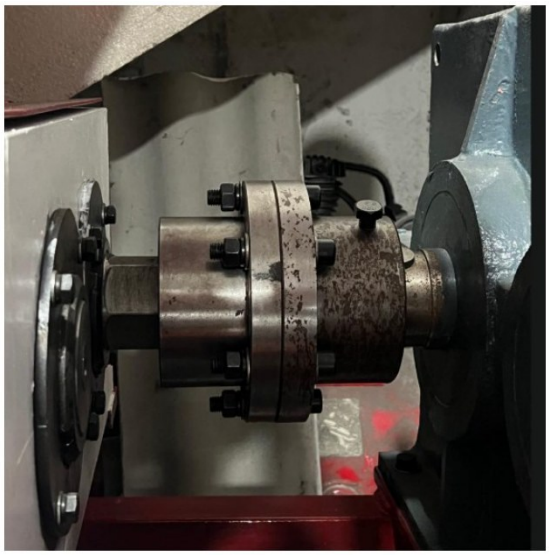
Motor, arrancador y parada de emergencia instalados



Ya instalados todos los componentes en la estructura, se procedió a unir y alinear los ejes de la cámara de trituración al de la caja reductora y atornillarlos como se muestra en la Figura 38.

Figura 38

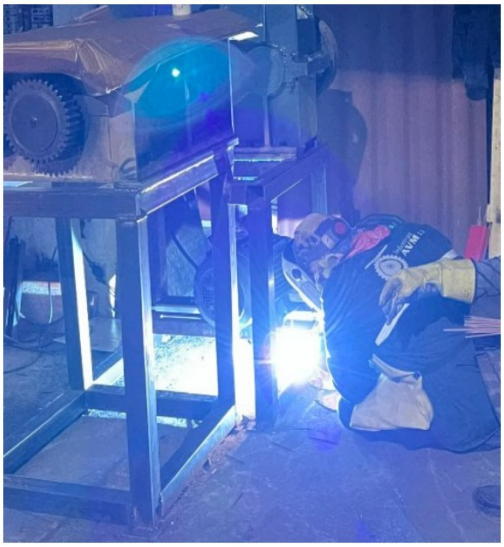
Unión de ejes de la cámara y caja reductora.



Cuando ya el motor, la caja reductora y la cámara se encontraron instalados en su lugar ya verificado, se procedió a soldar los rigidizadores de cada uno de ellos a la estructura para una mayor fijación y estabilidad de los componentes en el proceso de trituración como se muestra en la Figura 39, también en simultáneo se localizaron las bandas en su lugar.

Figura 39

Soldadura de rigidizadores.

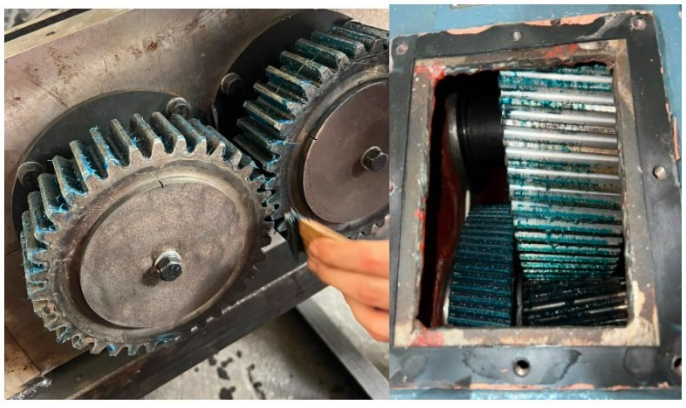


8.6 Limpieza y acondicionamiento de la caja reductora

Los engranajes de la caja reductora y los engranajes sincronizadores se recibieron con un fluido que se usa para proteger y conservar los componentes durante su transporte y almacenamiento (Figura 40). Este fluido fue retirado haciendo una limpieza con ACPM, ya que este líquido elimina esos residuos y también prepara el sistema para el uso del lubricante específico para cada operación.

Figura 40

Elemento con fluido para proteger componentes.



Para el proceso de limpieza de los engranajes como se mencionó anteriormente fue con ACPM, la forma en la que se realizó fue retirando el tapón del lateral para que todo este fluido saliera, además mientras se vertía este líquido con una toallita se iban limpiando los engranajes, en la Figura 41 se muestra el balde que se usó para recibir esté fluido.

Figura 41

Proceso de limpieza y acondicionamiento de la caja reductora.



Posteriormente, la caja reductora fue cargada con el aceite industrial seleccionado para sus condiciones de operación, la referencia de este aceite es ISO 220 EP ideal para cajas reductoras de alto torque. Se compró esta referencia de la marca STARMAX disponible en el mercado local a precio asequible (Figura 42), así mismo como con los engranajes sincronizadores se les esparció una grasa Lubricante con Bisulfuro de Molibdeno de la marca ROWE diseñado para condiciones de extrema presión, cargas pesadas y fuertes vibraciones (Figura 43).

La aplicación de estos lubricantes se realizó antes de la puesta en funcionamiento del sistema de transmisión.

Figura 42

Aceite Starmax ISO 220.



Nota. Fotografía tomada de Tractomulas de Colombia (s.f.).

Figura 43

Grasa Rowe con bisulfuro de molibdeno.



Nota. Fotografía tomada del catálogo de productos de Homecenter Colombia (Homecenter, s.f.).

tractomulas Colombia, productos de Homecenter Colombia.

En esta fase de limpieza se aprovechó para que exista una capa mínima que evita la rápida oxidación de las cuchillas, es importante aclarar que el corte debe hacerse en seco, pero la existencia de óxido puede causar interferencias entre las cuchillas y por tanto desgaste o fracturas prematuras, en la Figura 44 se muestra la aplicación en cada rotor de una capa muy fina del aceite industrial.

Figura 44

Aplicación de aceite industrial sobre las cuchillas-



8.7 Fabricación de la tolva de alimentación

8.7.1 Corte y preparación de la lámina

Se adquirieron láminas de acero A36 con un espesor de 3 mm. para realizar el trazado y corte de cada pieza según las dimensiones establecidas en los planos. (Figura 45)

Figura 45

Corte y preparación de las láminas utilizadas para la fabricación de la tolva.



8.7.2 Ensamblaje de la tolva

Obtenidas las piezas ya cortadas de la tolva, se posicionaron y ensamblaron por medio de soldadura, en la Figura 46 se muestra cómo se va formando el diseño final de este componente para luego instalar en la cámara de trituración.

Figura 46

Proceso de ensamblaje y soldadura de la tolva.



8.7.3 Acabado y pintura

En esta sección se realiza una preparación para pintura tapando algunos elementos que no se pintarán como las cuchillas, acoples, caja reductora, motor y engranes sincronizadores con papel periódico como se ve en la Figura 47 para protegerlos, y luego se procede a lijar elementos como la estructura, tolva y parte superficial de la cámara de trituración, ver Figura 48.

Figura 47

Proceso de cubrimiento de elementos que no requieren pintura.



Figura 48

Preparación superficial mediante lijado.



Posteriormente, se aplicó una capa de antioxidante alquídico (Figura 49) y tres capas de esmalte de acabado, buscando proteger las superficies y proporcionar la terminación final de la máquina.

Figura 49

Aplicación de antioxidante alquídico.



8.7.4 Ensamble y acabado final de la máquina

Una vez finalizado ya el proceso anterior, se ensambló la tolva y tornillería restante para así obtener como resultado una máquina ya completamente ensamblada y preparada para las pruebas de funcionamiento y validación (Figura 50).

Figura 50

Máquina trituradora completamente ensamblada y terminada.



9. Pruebas y Validación

9.1 Protocolo de pruebas

Las pruebas se realizaron utilizando llantas sin flanco como se muestra en la Figura 51, condición adoptada para facilitar la alimentación del material y reducir la exigencia sobre el sistema de transmisión.

Se evaluaron llantas de motocicleta y llantas de automóvil, registrando sus dimensiones y características del material obtenido, ver Tabla 29.

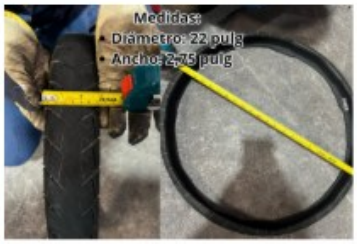
Figura 51

Llantas para triturar sin su flanco.



Tabla 29

Registro de medidas de llantas a triturar.

Tipo de llanta	Registro de medidas de llantas	Diámetro (Pulg)	Ancho (Pulg)	Registro de la llanta triturada
Llanta de motocicleta		16	5	
		22	2,75	
Llanta de automóvil		21	6	
		22	8	

Para cada ensayo se registró el tiempo requerido para completar el proceso de trituración y se inspeccionó visualmente el material obtenido, (ver Tabla 30).

Tabla 30

Resultados de las pruebas de trituración.

Tipo de llanta	Tiempo [s]	Resultado
Motocicleta	10	Satisfactorio
Automóvil	15	Satisfactorio

Durante las pruebas experimentales se procesaron llantas de motocicleta, con una masa aproximada de 2 kg por unidad, y llantas de automóvil, con una masa aproximada de 4,5 kg por unidad. Los resultados de la masa y capacidad de trituración se muestran en la Tabla 31.

Tabla 31

Resultados de las pruebas de trituración.

Ítem	Símbolo	Fórmula	Valor	Unidades
Masa de llanta de moto aproximada	m_m	NA	2	kg
Tiempo de trituración de llanta de moto	t_m	NA	10	s
Capacidad de trituración de llanta de moto	Q_m	m_m/ (t_m*3600)	720	kg/h
Masa de llanta de carro aproximada	m_ca	NA	4,5	kg
Tiempo de trituración de llanta de carro	t_ca	NA	15	s
Capacidad de trituración de llanta de carro	Q_ca	m_ca/(t_ca*3600)	1080	kg/h

9.2 Evaluación del triturado

Una vez evaluado el rendimiento del equipo se procedió a evaluar el tamaño del ripio extraído. En la Figura 52 se ilustra la diferencia en los cortes o ripios del caucho obtenido. Se observa una mayor presencia de refuerzo textil en el caucho de la llanta de moto y una mayor presencia se alambres salientes en la llanta de automóvil.

Figura 52

Diferencia en el ripio del caucho obtenido.



En la Figura 53 se presenta la distribución dimensional del material procesado para un total de 118 muestras aleatorias (N = 118) obtenido tras la primera pasada por el sistema de corte. para la muestra representativa de N = 118 piezas.

Figura 53

Gráfica de distribución normal de tamaños de ripio saliente de la trituración.

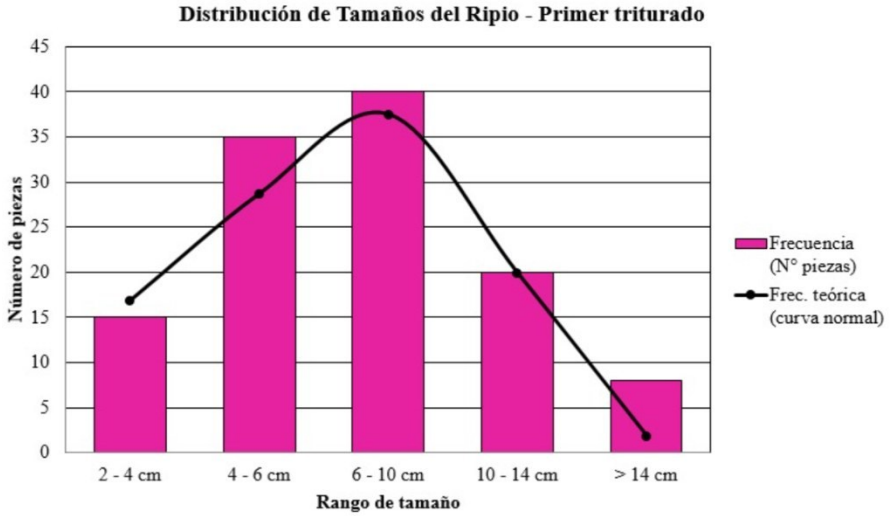


Tabla 32

Parámetros estadísticos de la distribución.

Estadísticas	
N total de piezas (muestra)	118
Media (cm)	7,76
Desviación estándar (cm)	3,76
Coef. de variación (%)	48,4%
Ancho promedio de rango (cm)	3,00

Este tamaño de salida primaria cumple satisfactoriamente con los requerimientos volumétricos del cliente final para su aplicación directa. Sin embargo, cabe destacar la flexibilidad operativa del equipo: al someter el material a un segundo, o incluso un tercer ciclo de trituración (recirculación del ripio), el sistema es capaz de reducir progresivamente el tamaño de partícula hasta obtener fragmentos finos de entre 4,0cm y 5,0 cm, adaptándose así a otros estándares comerciales de reciclaje.

9.3 Cumplimiento de los criterios de diseño

Los resultados que se obtuvieron durante la fase de pruebas permitieron confirmar el funcionamiento de la máquina trituradora de llantas y su capacidad de procesar las llantas con tamaños de hasta 22 pulgadas de diámetro exterior y 8 pulgadas de ancho. La trituración se realizó sin inconvenientes, obteniendo un material de caucho esperado como se muestra en la Tabla 33.

Tabla 33

Verificación de los criterios de diseño.

Criterio	Resultado de validación	Cumplimiento
Procesamiento de llantas de motocicleta	Trituración sin inconvenientes	✓
Procesamiento de llantas de automóvil	Trituración sin inconvenientes	✓
Diámetro de hasta 22 in	Se realizó prueba con llanta de 22 in	✓
Ancho máximo de 8 in	Se verifica con ensayo específico 22 × 8 in	✓
Capacidad de trituración	200 Kg/h	✓
Obtención de ripio	Material obtenido en todos los ensayos	✓
Retruturación para menor tamaño	Posible mediante segundo procesamiento	✓

10. Análisis de Viabilidad

En esta sección se analiza la viabilidad económica y técnica de la máquina trituradora de 10 HP desarrollada en el proyecto. El análisis se divide en dos fases: en primer lugar, se desglosan los costos directos reales de fabricación e integración del equipo clasificados por sus subsistemas funcionales, ver Tabla 34. En segundo lugar, se presenta una matriz comparativa frente a alternativas de máquinas reales del mercado nacional e internacional, demostrando el beneficio financiero, técnico y operacional de la solución diseñada, ver Tabla 34.

Tabla 34

Análisis de costos de la trituradora de llantas.

#	CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN	COSTO TOTAL (COP)
1	Alimentación	Tolva de entrada Materiales:Láminas de acero A36 Procesos: Cortes y soldadura	$600.000
2	Corte	trituración. Materiales: Planchas de acero 9CrSi, barra de acero 1045, planchas de acero A36	$7.500.000
3	Estructura	Bastidor en acero estructural Materiales: Acero A500 Procesos: Corte y soldadura	$750.000
4	Transmisión	Motor eléctrico industrial, reductor de velocidad, poleas, correas en V, acoples, aceite ISO 220 y grasa con bisulfuro de molibdeno	$12.900.000
5	Descarga	Caída por gravedad dirigida porla cámara de trituración	$0
6	Control y seguridad	Arrancador, parada de emergencia, breaker y cableado Proceso: Instalación con profesional certificado	$820.000
7	Acabados y pintura	Pintura total de la máquina con base alquídica y esmalte	$80.000
8	Elementos de unión	Tornillería	$100.000
COSTO TOTAL (COP)			$22.650.000

Para evaluar la viabilidad financiera del proyecto, se comparó el costo total de la máquina desarrollada de 10 HP frente a las alternativas comerciales disponibles en el mercado: un equipo de fabricación nacional de 15 HP, y un equipo de importación asiática de rango equivalente de 10-15 HP (ver Tabla 35).

Tabla 35

Comparativa de Viabilidad Económica y Técnica.

Criterio de Evaluación	Máquina Propia	Máquina Comercial Colombia	Máquina Importada China
Potencia y Consumo	10 HP (Consumo eléctrico optimizado y alto par)	15 HP (Mayor consumo energético continuo)	10 – 15 HP (Consumo variable)
Costo Adquisición e Integración	$22.650.000 COP ($22.650.000 costo directo de fabricación local)	~$70.000.000 COP ($60.000.000 costo comercial + $10.000.000 impuestos y flete)	~$42.500.000 COP (~$20.000.000 costo base + ~$20.000.000 a $22.000.000 de aranceles, impuestos y flete)
Costo Total	$22.650.000 COP	$70.000.000 COP (+209% más costosa)	~$40.000.000 – $45.000.000 COP (+87% más costosa)
Ahorro Financiero Directo	Opción Máxima de Ahorro (Base)	Representa un ahorro del 67,64% respecto a este equipo	Representa un ahorro del 43,37% respecto a este equipo
Facilidad de Intervención	Alta: diseño de fácil acceso para mantenimiento	Media: requerimiento de asistencia de marca	Baja: soporte en otros idiomas y piezas extranjeras
Retorno de Inversión (ROI)	Rápido (Baja barrera financiera inicial)	Prolongado (Alta carga financiera de capital)	Mediano/Largo plazo por fletes e imprevistos de aduana

la matriz comparativa demuestra que la máquina trituradora de llantas diseñada representa la solución más eficiente y rentable para el proceso de trituración. Con una inversión total de 22.650.000 COP, se logra una reducción de costos del 67,64% respecto a la oferta comercial nacional 70.000.000 COP y superior al 43% frente a alternativas importadas. Además del importante ahorro financiero, el equipo garantiza un menor consumo de energía, dimensiones compactas ideales para espacios reducidos e independencia tecnológica al contar con repuestos y mantenimiento inmediato en el mercado local.

11. Conclusiones y recomendaciones

11.1 Conclusiones

Se diseñó y construyó exitosamente una máquina trituradora compacta de llantas adaptada a la escala operativa y económica de los pequeños talleres urbanos. Por medio de cálculos de elementos mecánicos, simulaciones FEM y procesos de manufactura, para una capacidad superior a 200 kg/h.

La máquina trituradora extrae ripio de caucho con y sin alambres de tamaño promedio 50x50 mm, de llantas de hasta 22 in de día y 8 in de ancho, por medio de cargas de cizalla y de halón, reflejando el buen diseño a detalle de las cuchillas.

El sistema de transmisión (motor 10 HP, transmisión por correas y caja reductora ZQ400) proporciona el torque necesario para efectuar el corte por cizalladura de llantas de automóvil y motocicleta sin atascamientos.

La verificación por FEA y criterios de fatiga garantizó una vida útil óptima de los ejes y cuchillas, reduciendo los costos de mantenimiento preventivo y costos de rediseño o ajustes de fabricación.

11.2 Recomendaciones

Retirar los flancos con talones de acero gruesos y de alta resistencia en neumáticos para prolongar la vida útil del filo de las cuchillas.

Establecer un plan de reafilado periódico de los rotores cada 300 horas de uso aproximadas según el modelo de desgaste calculado.

Evaluar a futuro la implementación de un sistema de inversión automática de marcha en el panel de control ante sobrecargas térmicas o mecánicas.

Referencias bibliográficas

Algarín, J., y Álvarez, M. (2018). Gestión de residuos de neumáticos y sus impactos ambientales. *Revista de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 12*(2), 45-56.

Blanco, D., y Pereira, F. (2020). Reciclaje de neumáticos: aplicaciones y aprovechamiento de materiales. *Revista de Innovación y Tecnología, 15*(3), 77-88.

Cortés, R., y Londoño, C. (2017). *Políticas públicas y programas posconsumo de llantas en Colombia*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

García, A., Corredor, L., Calderón, J., y Gómez, P. (2013). Limitaciones tecnológicas en la gestión de neumáticos usados en Colombia. *Revista de Ingeniería Mecánica, 7*(1), 22-30.

Giraldo, H., Ramírez, J., y Quintanilla, P. (2018). Estrategias de reciclaje y aprovechamiento de neumáticos fuera de uso en contextos locales. *Revista Colombiana de Sostenibilidad, 6*(2), 55-70.

Homecenter. (s.f.). *Grasa lubricante con bisulfuro de molibdeno* [Fotografía]. Homecenter Colombia.

JXSC Mining Machinery. (2024). *Catálogo técnico de reductores cilíndricos de velocidad serie ZQ/JZQ*. Jiangxi, China.

Mott, R. L. (2006). *Diseño de elementos de máquinas* (4.ª ed.). Pearson Educación.

Pasqualino, J., Cabrera, L., y Chamorro Vanegas, R. (2015). Evaluación de impactos de la incineración de neumáticos fuera de uso. *Revista de Ingeniería Ambiental, 9*(1), 33-42.

Tractomulas de Colombia. (s.f.). *Imagen del lubricante industrial [Aceite Starmax ISO 220]* [Fotografía]. Llantas y Lubricantes para Vehículos.

Apéndices

Apéndice A

Cálculo de fuerza de corte

Figura 54

Cálculo de fuerza de corte

SISTEMAS - MECANISMOS

Mecanismo de corte-trituración

Flujo volumétrico $fv := \frac{\dot{m}}{\rho} = 0,1667 \frac{m^3}{hr}$

RPM de rotores: $n_{ejes} := 15 \text{ rpm} = 900 \text{ rph}$

Volumen por revolución: $V_{rev} := \frac{fv}{n_{ejes}} = 0,0001852 \frac{m^3}{rev}$

N° de cuchilla-mordidas por rotor: $numc := 11 \cdot \frac{1}{rev}$

N° de mordidas por revolución: $mpr := numc = 11 \frac{1}{rev}$

Volumen por mordida: $V_{mor} := \frac{V_{rev}}{mpr} = 1,6835 \cdot 10^{-5} m^3 \quad 3,858 \cdot 10^{-5} m^3 = 38580 \text{ mm}^3$

Espesor de corte: $t := 25 \text{ mm}$

Área de corte-desgarro: $A_c := \frac{V_{mor}}{t} = 673,4007 \text{ mm}^2$

Fuerza de corte-desgarro necesaria: $F_c := S_{ys} \cdot A_c = 5,0505 \text{ kN}$

Factor de servicio: $FS := 1,5$

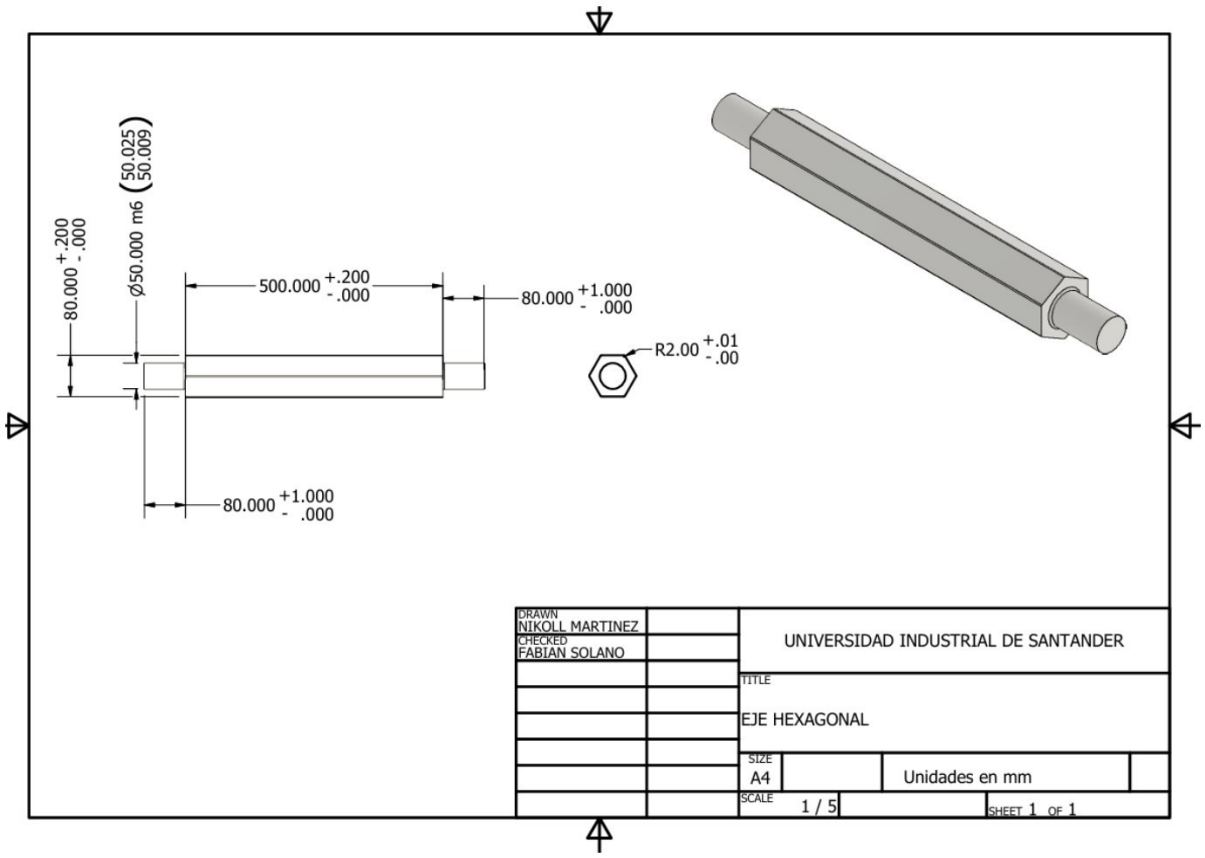
Fueza necesaria de diseño: $F_{cd} := F_c \cdot FS = 7,57576 \text{ kN}$

Apéndice B

Plano del eje hexagonal

Figura 55

Plano del eje hexagonal

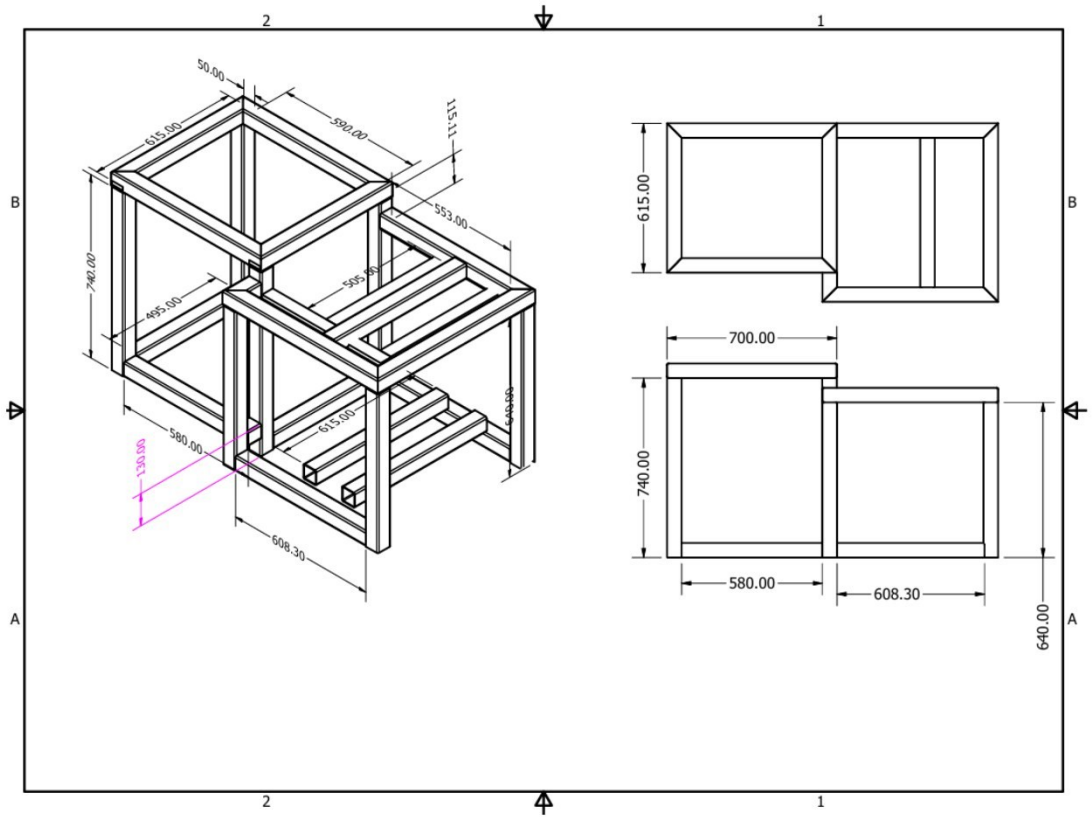


Apéndice C

Plano de la estructura

Figura 56

Plano de la estructura

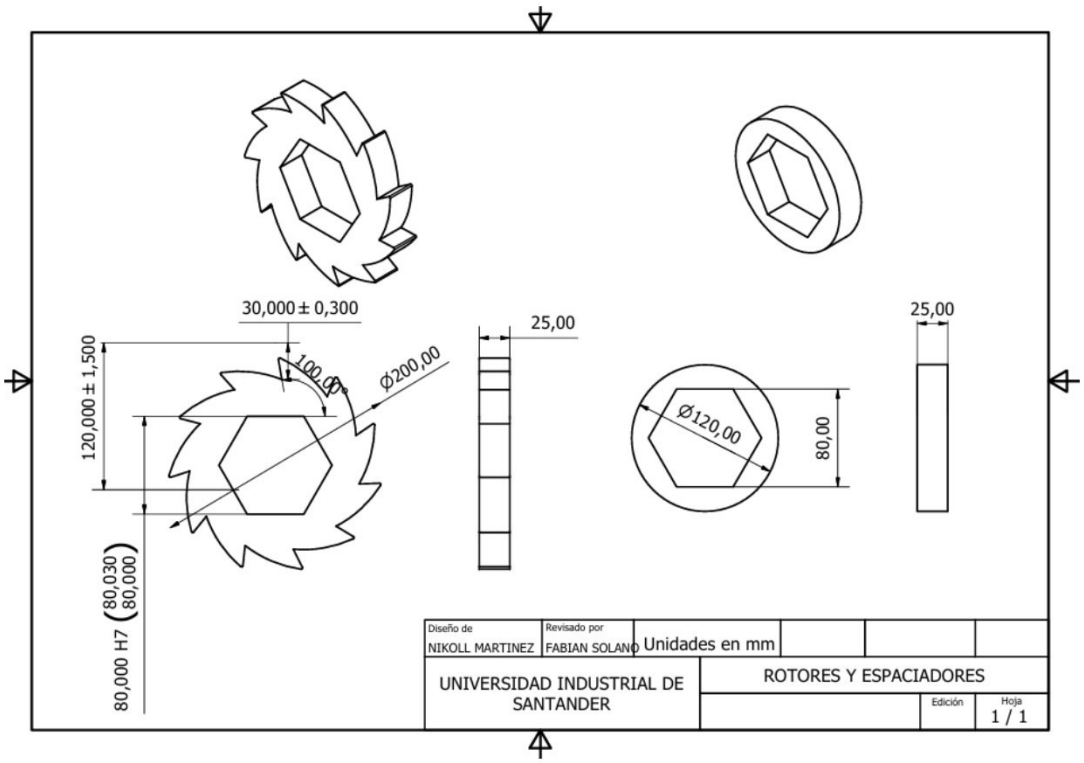


Apéndice D

Plano del rotor y espaciador

Figura 57

Plano del rotor y espaciador

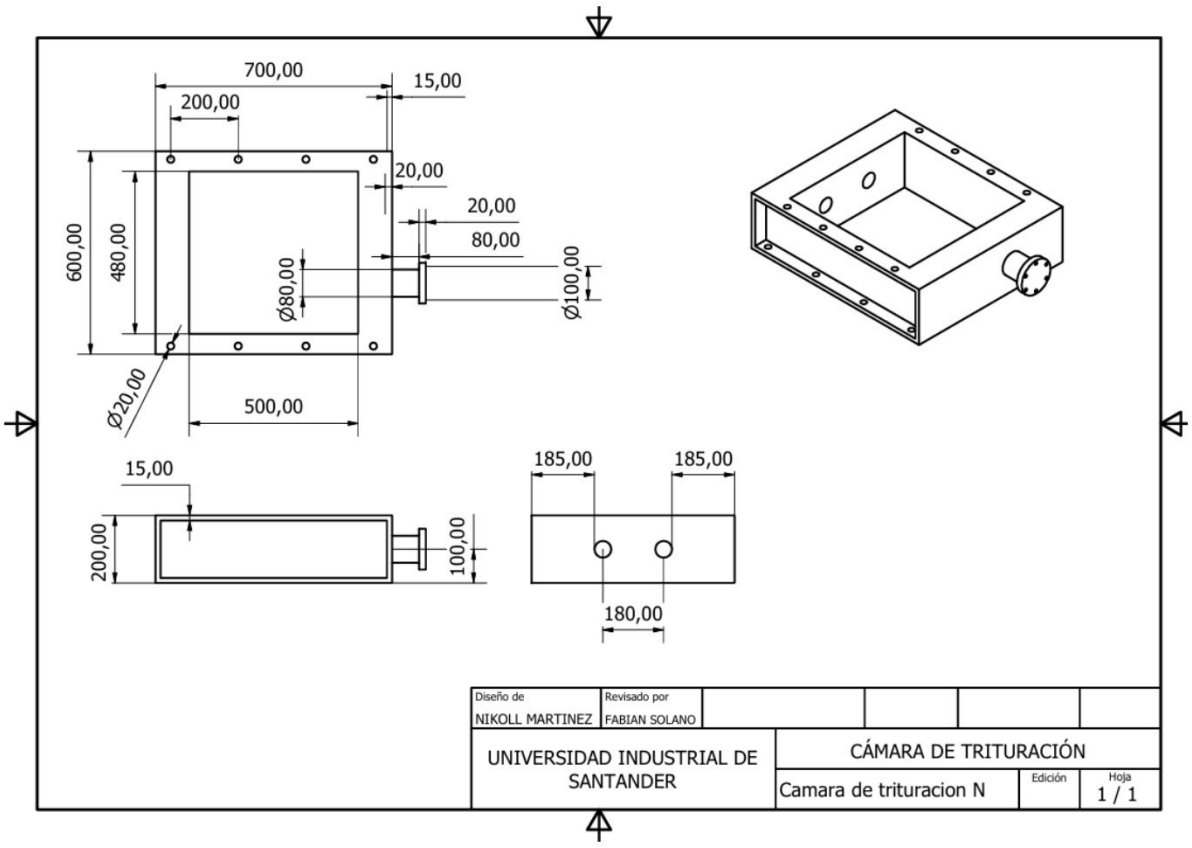


Apéndice E

Plano Cámara de trituración

Figura 58

Plano Cámara de trituración



Apéndice F

Plano Tolva

Figura 59

Plano Tolva

