

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO FUNCIONAL DE MÁQUINA
TRITURADORA DE RESIDUOS PLÁSTICOS

CARLOS DANIEL ANGULO VERGARA

JOHAN STEVEN VEGA PERAZA

Trabajo de grado en Ingeniería Mecánica.

Director: Jorge Andrés García Barbosa, Ph.D., Docente – Facultad de Ingeniería
Mecánica

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

BOGOTÁ

2025

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO FUNCIONAL DE MÁQUINA
TRITURADORA DE RESIDUOS PLÁSTICOS

CARLOS DANIEL ANGULO VERGARA

JOHAN STEVEN VEGA PERAZA

Director: Jorge Andrés García Barbosa, Ph.D., Docente

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

BOGOTÁ

2025

PÁGINA DE ACEPTACIÓN

Nota de aceptación:

El presente trabajo fue revisado y aprobado por el jurado evaluador, como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico de la Universidad Santo Tomás.

Presidente del jurado

Jurado

DIRECTOR

Jorge Andrés García Barbosa

ESTUDIANTE 1

Johan Steven Vega Peraza

ESTUDANTE 2

Carlos Daniel Angulo Vergara

Bogotá D.C., 09 de Diciembre de 2025

AGRADECIMIENTOS

A lo largo del desarrollo de este proyecto enfrenté retos técnicos, plazos ajustados y decisiones que exigieron constancia y claridad. Cada avance fue posible gracias al apoyo de las personas que estuvieron presentes durante este proceso y aportaron de manera significativa tanto en lo personal como en lo académico.

A mi madre, Ana Leonilde Peraza Cortés, le agradezco profundamente por su respaldo incondicional y por estar presente en cada etapa de mi formación. Su fortaleza y acompañamiento fueron esenciales para avanzar incluso en los momentos más complejos.

A mi primo, Cristian Andrey Rivera, gracias por apoyarme en los momentos de mayor presión, aportando soluciones rápidas y eficaces cuando el tiempo era limitado. Su disposición y agilidad fueron clave para mantener el ritmo del proyecto.

A mis tías y mis tíos, gracias por estar siempre presentes, por su interés constante en mi carrera y por los aportes que brindaron durante el desarrollo del proyecto.

A mi compañero de tesis, Carlos Daniel Angulo Vergara, le expreso mi agradecimiento por el trabajo conjunto, la coordinación y el compromiso que permitieron consolidar este proyecto hasta su fase final.

A todos ustedes, gracias por su apoyo, por creer en este proceso y por contribuir de manera significativa a que este trabajo hoy sea una realidad.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo marca el cierre de un camino largo, exigente y lleno de aprendizajes. Mirando hacia atrás, entiendo que cada etapa fue una prueba que, con dedicación y constancia, logré superar. Sin embargo, este logro no habría sido posible sin el apoyo y el ejemplo de las personas que me acompañaron a lo largo del proceso.

A mis padres, Carlos Eduardo Angulo Urzola y María Beatriz Vergara Medrano, les expreso mi gratitud más profunda. Su apoyo incondicional, su confianza y su entrega han sido el pilar fundamental que me ha impulsado siempre a seguir adelante. Gracias por permanecer a mi lado en cada reto y por celebrar conmigo cada avance.

A mi hermana, Laura Steffany Angulo Vergara, le agradezco por ser una figura constante de perseverancia. Su capacidad para enfrentar desafíos con disciplina y esfuerzo ha sido para mí una inspiración silenciosa, pero poderosa. Su ejemplo me recordó que las metas se alcanzan trabajando con firmeza, incluso cuando el camino parece difícil.

A mi compañero de tesis, Johan Steven Vega Peraza, gracias por compartir este proceso y aportar al desarrollo de este proyecto conjunto.

Extiendo también mi agradecimiento a los técnicos e ingenieros de Dersa, quienes compartieron sus conocimientos, su experiencia y su disposición para aportar al desarrollo de este proyecto. Su colaboración fue clave para transformar las ideas en resultados concretos.

A todos ustedes, gracias por acompañarme, por fortalecer este recorrido y por hacer posible que hoy este logro sea una realidad.

CONTENIDO

	pág.
1. RESUMEN	7
2. INTRODUCCIÓN	9
3. OBJETIVOS	13
4. DISEÑO CONCEPTUAL	14
5. DISEÑO DETALLE	39
6. FABRICACIÓN	70
7. COSTOS DEL PROYECTO	90
8. RESULTADOS	93
9. CONCLUSIONES	95
10. BIBLIOGRAFÍA	96
11. ANEXOS	103

1. RESUMEN

Este proyecto desarrolla el diseño conceptual, detalle, fabricación y validación de un sistema de trituración de plásticos orientado a obtener material con un tamaño promedio igual o inferior a 5 mm, apto para procesos de inyección, partiendo de la necesidad de transformar residuos plásticos posconsumo en materia prima reutilizable mediante un equipo compacto, robusto y con capacidades industriales. En la primera fase se establecen los requisitos funcionales, operativos y de manufacturabilidad, y se comparan varias configuraciones de trituración para seleccionar un concepto que garantice eficiencia de corte, estabilidad mecánica y facilidad de ensamble; a partir de estos criterios se desarrolla un primer prototipo conceptual que permite validar el funcionamiento general del mecanismo, identificar limitaciones y ajustar el diseño. Con la información obtenida se procede a desarrollar un segundo prototipo, concebido como una máquina real y totalmente funcional, con dimensiones, materiales y prestaciones compatibles con un entorno de operación industrial ligera. El diseño de detalle se estructura siguiendo el orden lógico de ingeniería que incluye la selección de cuchillas, diseño del rotor, cálculo estructural del eje bajo cargas combinadas, selección de rodamientos y diseño de la cámara de trituración y la tolva; posteriormente se fabrica el prototipo final utilizando procesos convencionales de corte, mecanizado y soldadura, incorporando ajustes menores durante el ensamble para mejorar la manufacturabilidad y la integración de los componentes. Los resultados demuestran que la máquina opera de manera estable, produce un triturado homogéneo menor a 5 mm y constituye una base sólida para su implementación directa en aplicaciones industriales.

ABSTRACT

This project presents the conceptual design, detailed design, manufacturing, and validation of a plastic shredding system intended to produce material with an average size of 5 mm or less, suitable for injection molding processes, addressing the need to convert post-consumer plastic waste into reusable feedstock through a compact, robust system with industrial-grade capabilities. In the first phase, the functional, operational, and manufacturability requirements are defined, and several shredding configurations are compared to select a concept that ensures cutting efficiency, mechanical stability, and ease of assembly; based on these criteria, an initial conceptual prototype is developed to validate the mechanism's overall operation, identify limitations, and refine the design. The insights gained support the development of a second prototype conceived as a real, fully functional machine with dimensions, materials, and performance consistent with light industrial operation. The detailed design follows a structured engineering sequence, including blade selection, rotor design, structural shaft analysis under combined loads, bearing selection, and the design of both the shredding chamber and the hopper; the final prototype is manufactured using conventional cutting, machining, and welding processes, incorporating minor adjustments during assembly to improve manufacturability and component integration. The results confirm that the machine operates reliably, produces a homogeneous output smaller than 5 mm, and provides a solid foundation for direct implementation in industrial applications.

2. INTRODUCCIÓN

El crecimiento acelerado del consumo de plásticos en las últimas décadas ha generado un incremento significativo en la producción de residuos posconsumo, los cuales en su mayoría no reciben un tratamiento adecuado. En países en desarrollo, como Colombia, la infraestructura para la transformación y aprovechamiento de estos materiales presenta limitaciones en capacidad, tecnología y accesibilidad económica. Esto hace que gran parte del plástico desechado termine en vertederos, cuerpos de agua o se dispersen, generando impactos ambientales y sociales difíciles de revertir. Frente a este panorama, la creación de soluciones técnicas que permitan transformar estos residuos en materia prima reutilizable se convierte en una necesidad urgente y estratégica.

Las máquinas trituradoras de plástico representan uno de los primeros eslabones en el proceso de reciclaje mecánico, ya que permiten reducir el tamaño del material para facilitar su manejo, clasificación y posterior procesamiento. Sin embargo, los equipos disponibles en el mercado suelen tener costos elevados, dimensiones poco adaptables a espacios reducidos y requerimientos energéticos altos, lo que dificulta su implementación en talleres, emprendimientos y pequeñas industrias. Además, muchos de estos sistemas no ofrecen la versatilidad necesaria para procesar diferentes tipos de polímeros a un tamaño uniforme que sea realmente apto para procesos de inyección o extrusión sin etapas intermedias adicionales.

Para dar respuesta a esta necesidad, el proyecto desarrolla una máquina trituradora de plásticos diseñada bajo criterios de manufacturabilidad, eficiencia y durabilidad, con el objetivo de alcanzar un desempeño comparable al de equipos industriales, pero en un formato compacto y de menor costo. El trabajo se estructura en dos etapas: un primer prototipo conceptual orientado a validar el principio de corte, la cinemática del rotor y la interacción cuchilla–material; y un segundo prototipo completamente funcional, construido con geometrías, materiales y componentes propios de una máquina destinada a operar en entornos industriales de baja y mediana demanda. Esta estrategia permite identificar fallas, optimizar el diseño y garantizar que el producto final sea confiable y escalable.

La justificación técnica del proyecto se fundamenta en la necesidad de contar con un equipo capaz de triturar diferentes tipos de polímeros, garantizando un tamaño de partícula uniforme, una operación mecánica estable y un rendimiento compatible con las exigencias del reciclaje moderno. La máquina propuesta integra un sistema de cuchillas rotativas, un rotor de alta rigidez, un eje diseñado para resistir cargas combinadas, rodamientos seleccionados para operación continua y una cámara de trituración optimizada para mejorar la eficiencia de corte. Todo esto se desarrolla siguiendo una metodología de ingeniería que estructure progresivamente las decisiones de diseño, desde el diseño conceptual hasta el diseño de detalle y la fabricación del prototipo final.

La justificación económica surge de la necesidad de ofrecer una alternativa viable frente a los equipos importados o de gran escala, cuyo costo supera ampliamente el presupuesto de pequeñas empresas o grupos productivos. Un prototipo manufacturable localmente contribuye a reducir la dependencia tecnológica y facilita la adopción de procesos de aprovechamiento del plástico en sectores que actualmente no cuentan con acceso a tecnología especializada.

Desde el punto de vista ambiental, este proyecto aporta una herramienta concreta para disminuir la cantidad de residuos plásticos que llegan a rellenos sanitarios o ambientes naturales, permitiendo reincorporar estos materiales a la cadena productiva y fomentando un uso más responsable y sostenible de los recursos. En términos de desarrollo técnico, la máquina construida representa una plataforma para validar principios mecánicos de trituración y establecer criterios de diseño para futuras versiones de mayor capacidad o automatización.

En conjunto, este proyecto se plantea como una solución integral que combina diseño, ingeniería, fabricación y validación de un sistema de trituración de plásticos funcional y escalable. La máquina resultante no solo responde a una necesidad real del contexto industrial y del creciente mercado de impresión 3D, sino que también establece bases técnicas para futuras mejoras, ampliaciones de capacidad e integración con líneas

completas de reciclaje, consolidando una herramienta útil para el cierre del ciclo de vida del plástico.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Implementar un prototipo funcional de una máquina trituradora de plásticos, diseñada para cumplir con los requisitos de una empresa de impresión 3D, garantizando la reducción de tamaño de los residuos plásticos para su reutilización en procesos de manufactura.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Proponer el diseño conceptual de una máquina trituradora, estableciendo los principios de funcionamiento y los criterios técnicos clave en función de los materiales a procesar y los requerimientos operacionales.
- Elaborar el diseño de detalle del sistema de trituración, especificando sus componentes, mecanismos y parámetros técnicos, para asegurar un funcionamiento adecuado que permita la reducción eficiente del plástico a un tamaño de 5 mm o menos.
- Fabricar el prototipo de la máquina trituradora, basado en el diseño final, asegurando el cumplimiento de los requisitos técnicos y operativos establecidos.

4. DISEÑO CONCEPTUAL

4.1 Definición del problema y requerimientos del sistema

El proceso de reciclaje para impresión 3D requiere triturar polímeros como PLA, ABS y PETG hasta obtener partículas menores a 5 mm, con una máquina compacta, manufacturable y de bajo costo. Sin embargo, los equipos industriales disponibles son costosos, voluminosos y sobredimensionados para entornos académicos o de pequeña producción. Por ello se plantea el desarrollo de una trituradora capaz de ofrecer un desempeño comparable al industrial, pero en un formato accesible y escalable.

Para orientar el diseño se establecen requerimientos funcionales y operativos: lograr una reducción de tamaño eficiente, asegurar estabilidad del rotor, evitar atascos, garantizar seguridad del usuario y permitir una fabricación modular con procesos convencionales como corte láser y mecanizado. Estos lineamientos definen el alcance del prototipo conceptual, cuyo propósito principal es validar el principio de corte, la interacción cuchilla-material y el comportamiento cinemático del rotor mediante un modelo impreso en 3D que permite iterar rápidamente y ajustar decisiones preliminares.

Con esta base se desarrolla el diseño conceptual, que comprende la identificación de funciones del sistema, la generación y comparación de alternativas, y la selección del concepto más adecuado para avanzar hacia el diseño detallado del prototipo funcional.

4.2 Análisis funcional del sistema

El análisis funcional permite descomponer la trituradora en las funciones esenciales que debe cumplir para transformar piezas de polímero en partículas de pequeño tamaño. Este enfoque facilita identificar los subsistemas críticos, establecer relaciones entre ellos y orientar la selección del mecanismo de corte y los componentes principales.

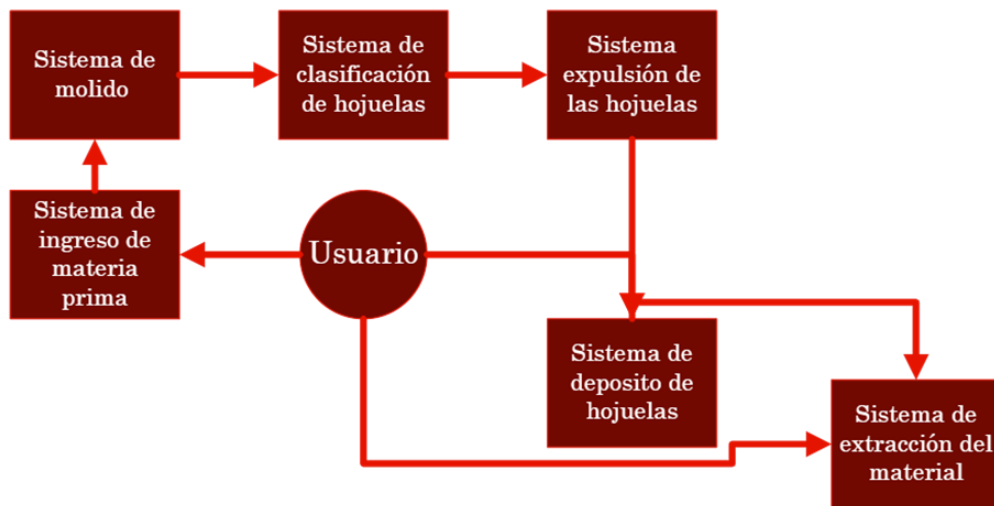


Ilustración 1. Diagrama funcional del sistema

Fuente: Elaboración propia

La función global del sistema se define como reducir el tamaño del plástico de entrada mediante un proceso controlado, continuo y seguro. Para cumplirla, el sistema se organiza en funciones primarias y secundarias. Las funciones primarias incluyen: alimentar el material, cortar y fragmentar utilizando un rotor con cuchillas móviles y cuchillas fijas, y expulsar el material triturado garantizando un flujo estable. Las funciones secundarias soportan la operación y comprenden: estabilizar

el rotor, disipar vibraciones, limitar el ingreso del operario mediante elementos de protección y asegurar un control básico de la operación mediante un sistema electrónico de prueba.

A partir de esta descomposición funcional se identifican los componentes necesarios para el prototipo conceptual: un mecanismo de corte que combine simplicidad y eficiencia, un rotor capaz de mantener rigidez incluso en material impreso en 3D, una carcasa que garantice la contención del material y una electrónica que permita validar la cinemática del sistema. Este análisis establece la estructura mínima viable para evaluar alternativas en el proceso de diseño conceptual y sirve como guía para la generación de configuraciones propuestas en la siguiente sección.

4.3 Generación de alternativas conceptuales

4.3.1 Trituración de plásticos y contexto industrial

Los sistemas de trituración de plásticos han evolucionado significativamente para responder al creciente volumen de residuos y a las necesidades de aplicaciones específicas, como la impresión 3D. Tradicionalmente, estas máquinas procesaban residuos pre-consumo (recortes, rebabas) y posconsumo (productos desechados), pero las nuevas tecnologías han aumentado su eficiencia, flexibilidad y capacidad de producir partículas uniformes.

En el reciclaje para impresión 3D, uno de los principales retos es obtener partículas finas y homogéneas “alrededor de 5 mm” adecuadas para procesos de extrusión y generación de filamento. La calidad del material triturado influye directamente en la estabilidad térmica, fluidez y pureza del polímero reciclado, lo que hace que la etapa de trituración sea crítica en todo el ciclo de reciclaje (Nizamuddin et al., 2020).

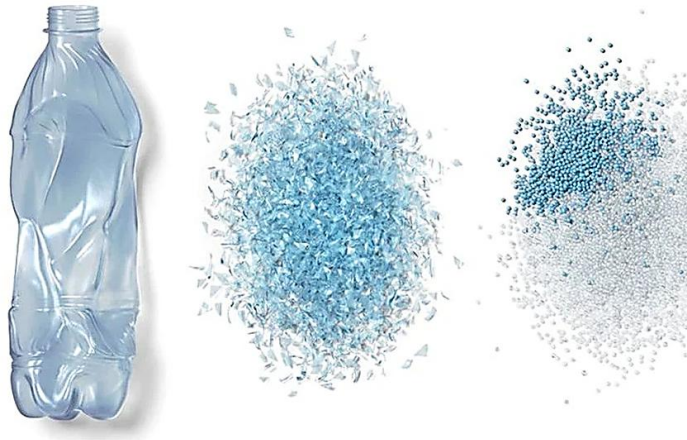


Ilustración 2. Proceso de producción de pellets de rPET.

Tomado de Disposable Tableware ([Enlace](#)).

Tipos de trituradoras y mecanismos de corte

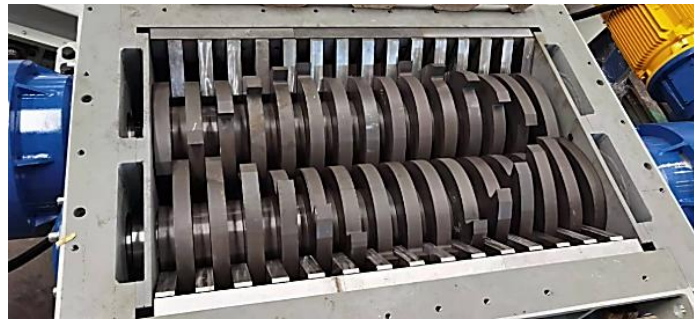
a) Trituradoras de cuchillas

Las más comunes en reciclaje mecánico. Utilizan un rotor con cuchillas móviles que interactúan con cuchillas fijas, generando un corte progresivo. Funcionan

muy bien con PET, PLA y plásticos rígidos, produciendo granulometría controlada (Geyer et al., 2017).

b) Trituradoras de dos ejes

Combinan dos rotores contrarrotantes que desgarran el material. Ideales para plásticos duros o tenaces como ABS, ya que no requieren pre triturado (Palanivelu & Thanasekaran, 2019).



*Ilustración 3. Trituradora de dos ejes.
Tomado de Wiscon-Tech ([Enlace](#)).*

c) Trituradoras de *cutting chamber*

Cuentan con una cámara cerrada donde las cuchillas operan a alta velocidad. Permiten un control preciso del tamaño de partícula y producen trituración homogénea, siendo ideales para procesos continuos y materiales destinados a impresión 3D (Hopewell et al., 2019).

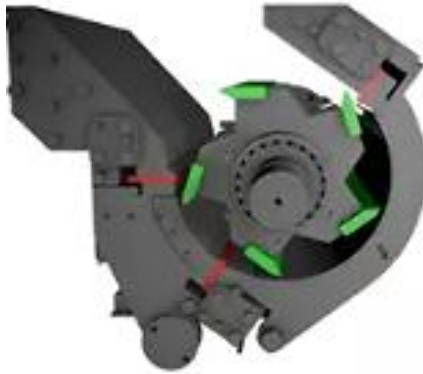


Ilustración 4. Tecnologías de reducción de tamaño en plásticos.

Tomado de Plastics Technology Online ([Enlace](#)).

d) Trituradoras de impacto y molinos de martillos

Menos utilizadas debido a la sensibilidad térmica de los polímeros y al riesgo de degradación térmica (Singh et al., 2018).

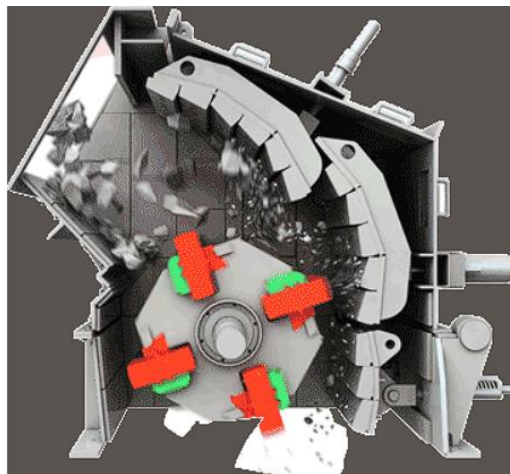


Ilustración 5. Trituradora de impacto.

Tomado de DASWELL ([Enlace](#)).

Alimentación y molienda

La eficiencia del sistema depende en gran medida del método de alimentación. Equipos modernos incluyen alimentación automática que evita atascos y regula la entrada de material según la capacidad del rotor.

La reducción de tamaño debe ser uniforme para garantizar un proceso de extrusión estable. Para PET, PLA y ABS, un tamaño controlado reduce problemas como obstrucciones, flujo irregular o defectos en el filamento (Shivapurmath et al., 2017).



Ilustración 6. Diseño de tolvas industriales.

Tomado de ProjectPlant ([Enlace](#)).

Relevancia del tamaño de partícula en la impresión 3D

El plástico triturado pasa a extrusión para producir filamento. La granulometría afecta:

- Homogeneidad térmica.
- Generación de burbujas.
- Presencia de impurezas.
- Regularidad del filamento final.

Una trituración deficiente compromete la calidad del producto final y la estabilidad del proceso de impresión. Por esto, el diseño de una trituradora orientada a reciclaje para impresión 3D debe priorizar la uniformidad del material (Shivapurmath et al., 2017).



Ilustración 7. Proceso de fabricación de pellets plásticos.

Tomado de Aceretech ([Enlace](#)).

4.3.2 Uso de la Matriz Pugh

Para consolidar la arquitectura funcional del sistema y seleccionar las soluciones más adecuadas para cada subsistema, se aplicó la Matriz Pugh como herramienta de evaluación comparativa. Este método permitió contrastar múltiples alternativas frente a un concepto base y determinar cuáles ofrecían el mejor balance entre desempeño, simplicidad, costo y viabilidad dentro del prototipo funcional.

Los criterios evaluados correspondieron directamente a los subsistemas identificados en la descomposición funcional:(Ver Anexo A)

- Selección del sistema de control.

- Selección del sistema de ingreso de materia prima.
- Selección del sistema de triturado. (Ver tabla T1)
- Selección del sistema de clasificación del tamaño.
- Selección del sistema de expulsión del material triturado.
- Selección del sistema de depósito.
- Selección del sistema de extracción.

Cada subsistema contó con diferentes alternativas de solución, las cuales fueron calificadas mediante los valores típicos de la Matriz Pugh (1, 0, -1) según su desempeño relativo frente a un referente inicial. Esta metodología permitió evaluar la coherencia técnica de cada opción, su compatibilidad con los objetivos del prototipo y su alineación con las restricciones de manufactura y operación.

TRITURADO								
Criterio	Importancia	Cuchillas rotativas horizontales	Mono axial	Bi axial	Cuatro ejes	Trituradora de rodillos	Cámara de corte	Molino de impacto
Capacidad de Triturado	0,1	-1	0	1	1	-1	1	1
Uniformidad del Tamaño de Partícula	0,2	-1	1	1	1	-1	1	-1
Durabilidad	0,1	1	1	1	1	-1	0	-1
Eficiencia Energética	0,1	1	1	0	-1	-1	0	-1
Facilidad de Mantenimiento	0,1	1	1	1	-1	1	1	-1
Costo	0,2	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1
Seguridad Operativa	0,1	-1	1	1	1	-1	1	-1
Ruido y Vibración	0,1	-1	-1	-1	-1	1	0	-1
Entre más alto el valor de importancia y evaluación mejor	RESULTADOS	-0,4	0,3	0,3	2,7756E-17	-0,2	0,3	-0,8

Tabla 1. Selección del sistema de triturado.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis mostró que el conjunto de alternativas más consistente correspondió a:

- Control basado en microcontrolador con lectura directa de sensores.
- Sistema de ingreso por tolva rígida con gravedad.
- Sistema de trituración basado en rotor con cuchillas móviles y fijas.
- Clasificación mediante tamiz fijo integrado.
- Expulsión asistida por gravedad y geometría de cámara.
- Depósito inferior tipo contenedor desmontable.
- Extracción manual.

Este conjunto logró los puntajes más altos en estabilidad operativa, simplicidad constructiva y confiabilidad. Además, garantizó que el prototipo se mantuviera compacto, fácil de fabricar y escalable hacia una máquina con capacidades semi industriales.

4.3.3 Aplicación del método TRIZ

Una vez seleccionadas las alternativas conceptuales mediante la Matriz Pugh, se aplicó el método TRIZ para resolver las contradicciones técnicas presentes en el concepto preliminar. Esta etapa permitió transformar la solución base en un diseño más robusto, manufacturable y eficiente, consolidando lo que posteriormente se denominó Propuesta de Molino de Plástico.

Las principales contradicciones identificadas durante el análisis fueron:

- Compacto vs. Potente: el equipo debía mantener dimensiones reducidas, pero generar el torque necesario para triturar plásticos duros como PET o ABS.
- Bajo costo vs. Alta durabilidad: se buscaba un prototipo económico, sin comprometer la vida útil de las cuchillas y el rotor.
- Fácil de ensamblar vs. Geometrías exigentes: la cámara de corte requería precisión dimensional para garantizar el paralelismo y el alineamiento entre cuchillas móviles y fijas.
- Trituración fina vs. Evitar atascos: la necesidad de obtener partículas pequeñas aumentaba el riesgo de acumulación y bloqueo dentro de la cámara.
- Alta velocidad de corte vs. Estabilidad vibratoria: velocidades elevadas mejoran el proceso, pero introducen vibraciones no deseadas en estructuras ligeras.

Resultado: Propuesta de Molino de Plástico

El uso de TRIZ permitió sintetizar una solución conceptual que resolviera simultáneamente las contradicciones identificadas. Como resultado se definió la

Propuesta de Molino de Plástico, cuyas características principales son:

TRITURADORA DE PLÁSTICOS							
Parámetros	Posibles soluciones						
S. Control	PLC	Micro controlador	Controlador basado en pc	Lógica cableada	Arduino	Pc	Encendido pagado
S. Ingreso materia prima	Alimentador por gravedad	Alimentador vibratorio	Banda transportadora inclinada	Tolva	Ingreso manual	Directo de recolección	
S. Triturado	Cuchillas rotativas horizontales	Mono axial	Bi axial	Cuatro ejes	Trituradora de rodillos	Camara de corte	Molino de impacto
S. Clasificación hojuelas	Criba vibratoria	Clasificador por aire	Tamiz separado	Malla interna	Por densidades	Separación manual	Sistema de sensores de clasificación
S. Expulsión hojuelas	Sistema neumático	Banda transportadora	Expulsión por gravedad	Por acumulación	Robot recolector		
S. Deposito Hojuelas	Canecas	Cajas en banda transportadora	Entrada directa extrusora	Suelo	Banda transportadora	Psicon de limpieza	
S. Extracción	Canecas que se recogen manual cada cierto tiempo	Banda transportadora	Entrada directa extrusora	Suelo	Barrido	Por acumulación interna en la máquina	

Tabla 2. Propuesta de molino de plástico.

Fuente: Elaboración propia.

Estas mejoras consolidan un sistema conceptualmente sólido, viable de fabricar y con potencial de escalarse a una máquina con capacidad semi industrial.

DISEÑOS CONCEPTUALES

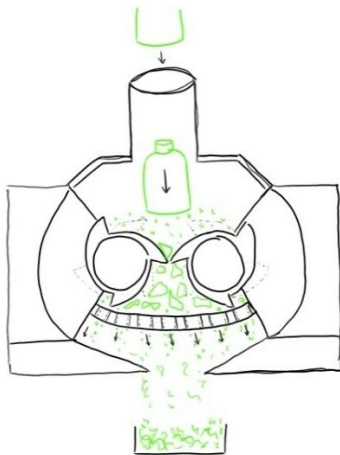


Ilustración 8. Propuesta de diseño conceptual 1
Fuente: Elaboración propia.

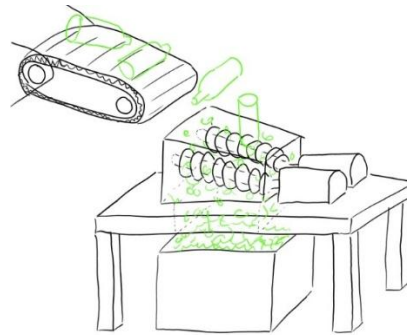


Ilustración 9. Propuesta de diseño conceptual 2

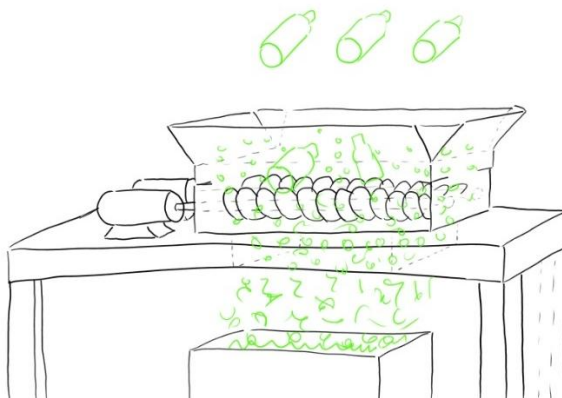


Ilustración 10. Propuesta de diseño conceptual 3

Fuente: Elaboración propia.

4.4 Modelo preliminar y diseño conceptual seleccionado

Tras el proceso de evaluación de alternativas, la Matriz Pugh y el análisis TRIZ, se consolidó un **diseño conceptual único** que responde a los requerimientos

funcionales del sistema de trituración de plásticos y permite una futura transición al prototipo físico. El modelo preliminar integra los subsistemas seleccionados en la fase conceptual y define los elementos estructurales, mecánicos y electrónicos esenciales para la validación inicial.

4.4.1 Esquemas y definición del concepto final

El concepto final corresponde a un sistema tipo molino con rotor convencional para *cutting chamber*, equipado con cuchillas móviles y contra cuchillas fijas, donde el flujo del material se realiza por gravedad. Esta configuración proporciona un corte estable, seguro y fácilmente manufacturable en la escala del prototipo.

Las características principales del diseño conceptual seleccionado son:

Geometría general del sistema conceptual

El sistema está compuesto por:

- Tolva superior de paredes inclinadas, diseñada para alimentar el material sin obstrucciones.
- Cámara de corte cerrada donde se ubican las cuchillas móviles sobre el rotor y las contra cuchillas fijas en la carcasa.
- **Rotor tipo *cutting chamber***, cilíndrico, con alojamiento para cuchillas atornilladas y equilibrado para operación estable.

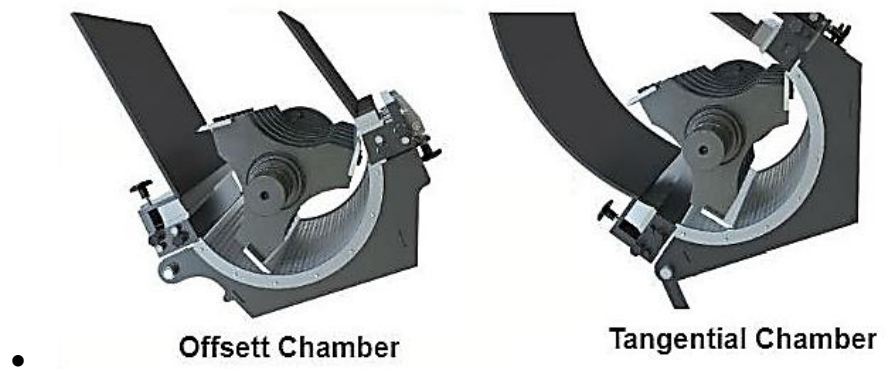


Ilustración 11. Cámaras de corte en granuladores industriales.

Tomado de Cumberland Plastics ([Enlace](#)).

- Chasis modular que permite desmontaje rápido para mantenimiento y ensamble sencillo.
- Canal inferior de expulsión del triturado hacia el sistema de depósito y clasificación.

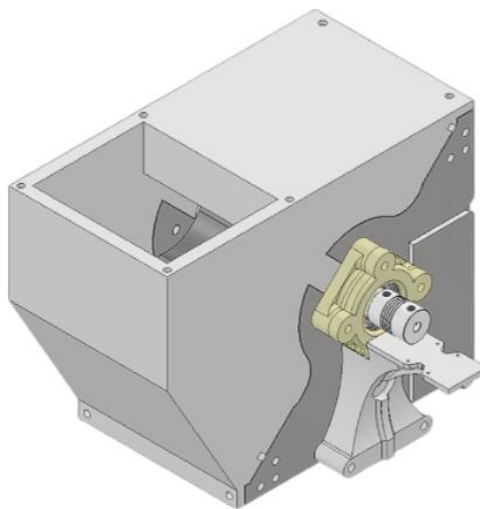


Ilustración 12. Cámaras de corte prototipo Alpha.

Fuente: Elaboración propia.

Selección preliminar de cuchillas y rotor

La selección final fue:

- **Rotor cilíndrico estándar tipo *cutting chamber***, diseñado para alojar cuchillas rectas atornilladas.
- **Cuchillas móviles rectas**, de geometría simple y bajo costo de fabricación para la versión metálica.
- **Contra cuchillas fijas**, ubicadas en los laterales de la cámara, con regulación en el juego de corte.

Esta configuración fue la más favorable en la evaluación conceptual al ofrecer buen equilibrio entre estabilidad, simplicidad manufacturable, eficiencia de corte y reducción de atascos.

Materiales para el prototipo 3D

Para la fabricación del prototipo se seleccionaron materiales de impresión 3D con funciones específicas:

- **PLA** para la estructura no sometida a esfuerzos altos.
- **PLA** para la cámara de corte y soportes que requieren resistencia mecánica moderada.
- **PETG** para el rotor, por su tenacidad y capacidad de absorber impactos durante pruebas.

Esto permite validar geometrías, ensamblaje y comportamiento preliminar sin pasar aún a la fabricación en acero.

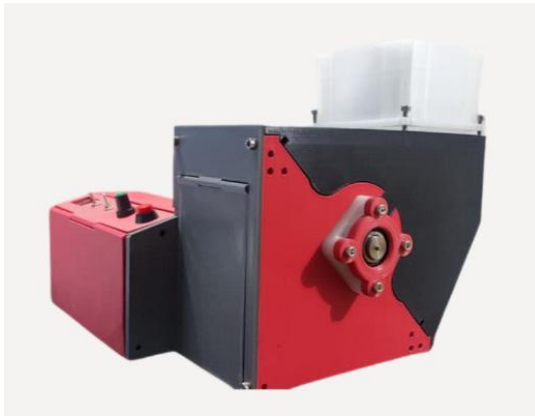


Ilustración 13. Vista interna prototipo 3D
Fuente: Elaboración propia.



*Ilustración 14. Prototipo 3D totalmente
 ensamblado*
Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 15. Parte trasera y sistema de control prototipo 3D
Fuente: Elaboración propia.

Selección de sensores, motor y electrónica de prueba

Para el prototipo funcional impreso en 3D se integró un sistema electrónico sencillo pero suficiente para validar el movimiento del rotor, la interacción con las cuchillas fijas y el comportamiento general del mecanismo. La selección de componentes respondió a la necesidad de medir variables básicas, controlar la velocidad y garantizar condiciones mínimas de seguridad durante las pruebas de laboratorio.

Los elementos utilizados fueron:

- **Arduino MEGA**, empleado como unidad de control principal por su número de entradas y salidas, y su capacidad para manejar varios módulos simultáneamente.
- **Driver PWM para motor DC o servomotor**, encargado de regular la velocidad del motor mediante modulación por ancho de pulso.
- **Batería recargable de 9 V** como fuente de alimentación portátil para pruebas rápidas del sistema electrónico.
- **Interruptor de seguridad**, utilizado para control básico de encendido/apagado y selección de dirección del motor.
- **Botón de parada de emergencia (E-Stop)**, obligatorio para detener inmediatamente el sistema durante fallas o bloqueos mecánicos.
- **Potenciómetro de control de velocidad**, que permitió variar las RPM del motor durante la evaluación de corte.

- **Sensor de voltaje**, usado para detectar caídas asociadas a sobreesfuerzos del motor y activar señales de advertencia.
- **Pantalla de visualización**, instalada para mostrar alertas, nivel de esfuerzo del motor y estado operacional en tiempo real.
- **Motor reductor de 600 rpm**, empleado por su torque estable y su capacidad para simular condiciones de operación similares a una trituradora a pequeña escala.

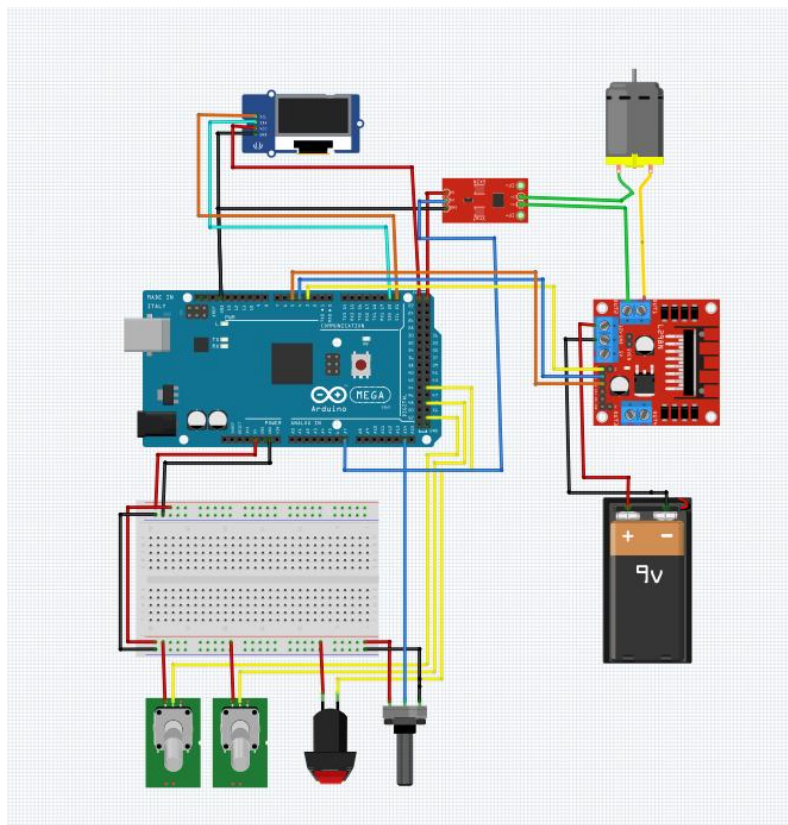


Ilustración 16. Plano de control eléctrico prototipo impresión 3D.

Fuente: Elaboración propia.

Este conjunto electrónico permitió validar:

- Interacción entre cuchillas móviles y cuchillas fijas.
- Holguras internas, geometría de la cámara de corte y estabilidad del sistema.

4.5 Resultados del prototipo conceptual y lecciones aprendidas

El prototipo conceptual impreso en 3D permitió validar los principios de funcionamiento de la máquina trituradora y analizar el comportamiento del sistema rotor-cámara de corte bajo condiciones controladas. Aunque no fue diseñado para triturar material real a escala industrial, su construcción facilitó identificar fallas estructurales, evaluar la interacción mecánica de los componentes y obtener información crítica para el avance hacia un segundo prototipo.

Identificación de fallos estructurales del prototipo 3D

Durante las pruebas se evidenciaron fallos directamente relacionados con las limitaciones del material (PLA/PETG) y del proceso de manufactura aditiva:

- **Deformación en paredes internas** por esfuerzos de corte superiores a la resistencia del polímero.
- **Holguras excesivas** entre rotor y cuchillas fijas, incrementadas por tolerancias propias de la impresión 3D.

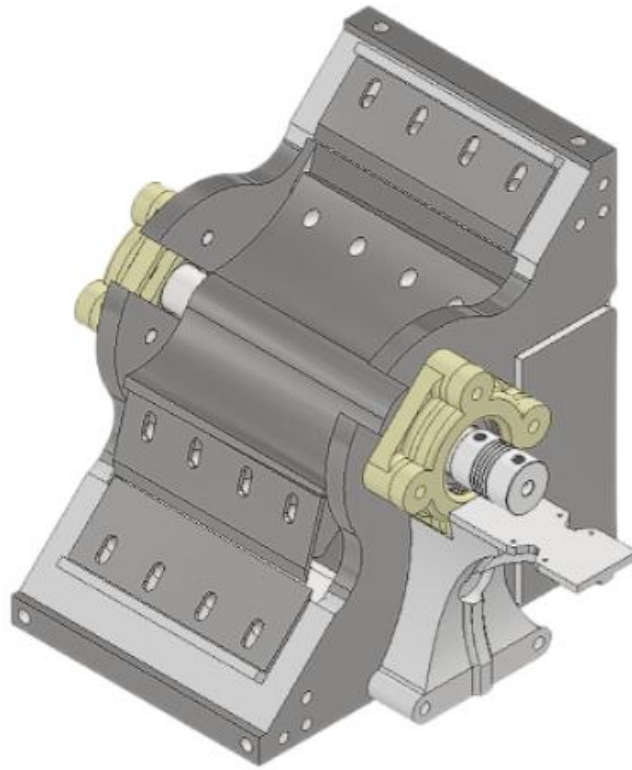


Ilustración 17. Cámaras de corte abierta prototipo 3D.

Fuente: Elaboración propia.

Observaciones de funcionamiento

El prototipo permitió identificar tendencias clave sobre el comportamiento del sistema:

- **Atascos:** se presentaron frecuentemente cuando el material ingresado era demasiado voluminoso en comparación con la holgura disponible, evidenciando que la geometría de corte debía optimizarse.

- **Eficiencia de corte:** limitada por el bajo torque del motor de prueba y por la suavidad de las piezas plásticas; sin embargo, se observó correctamente el principio de “cizallamiento progresivo” propio de una *cutting chamber*.
- **Estabilidad del sistema:** el rotor generó vibraciones moderadas, lo que confirmó la necesidad de balanceo dinámico en versiones futuras.
- **Interacción cuchilla–material:** el prototipo mostró que el ángulo de ataque funciona correctamente, pero requiere materiales rígidos y cuchillas metálicas a medida para un corte real.

Elementos que se mantienen y elementos que se descartan para el prototipo 2

Se mantienen:

- Geometría general del rotor tipo *cutting chamber*.
- Configuración de cuchillas fijas.
- Sistema de alimentación superior por tolva.
- Concepto modular del chasis.

Se descartan o modifican:

- Rotor en plástico → **se reemplaza por acero.**
- Soportes impresos → **se reemplazan por estructuras soldadas o mecanizadas.**
- Holguras amplias → **se reducen y controlan mediante mecanizado y corte laser.**

- Motor de prueba → **se sustituye por motor de mayor torque y velocidad.**
- Unión de cuchillas → **se optimiza mediante fijaciones metálicas y tornillería de alta resistencia.**

4.6 Conclusión conceptual

El prototipo conceptual cumplió su función esencial: validar principios de funcionamiento, observar interacciones mecánicas y detectar fallas tempranas, sin pretender triturar plástico en condiciones reales. La información obtenida permite avanzar de manera sólida hacia un segundo prototipo estructuralmente robusto, con componentes metálicos, tolerancias precisas y un sistema de accionamiento adecuado para cargas reales.

Validación del prototipo 3D y ajustes al diseño final

El prototipo impreso en 3D permite analizar la geometría de la cámara de corte, revisar la interacción entre los componentes y validar la facilidad de montaje.

Este ejercicio permite identificar varias oportunidades de mejora, entre ellas:

- Optimización de uniones y puntos de fijación.
- Modificación de espesores para montaje más ágil.
- Simplificación de la estructura para facilitar la manufactura real.
- Ajustes en la tolva y la malla interna para mejorar el flujo del material.

Con base en estos hallazgos, el diseño final se actualiza para garantizar un ensamblaje más eficiente y una fabricación industrial más sencilla.

5. DISEÑO DETALLE

Este capítulo presenta el diseño detallado de la máquina trituradora, avanzando desde el concepto validado en el prototipo inicial hacia una configuración completamente funcional y manufacturable. El desarrollo inicia con la interpretación de los requerimientos del cliente, los cuales se traducen en criterios técnicos que guían todas las decisiones de ingeniería: selección de materiales, geometrías, componentes mecánicos, modos de transmisión y sistemas de control.

El alcance del capítulo abarca el diseño mecánico y estructural del equipo, la definición del sistema de accionamiento, la integración electrónica, los cálculos de desempeño y la verificación de que el modelo final cumple con los parámetros operativos y de seguridad necesarios para su fabricación y posterior validación experimental.

5.1 Requerimientos técnicos del cliente y del sistema

El cliente cuenta con un sistema de fabricación aditiva compuesto por cinco impresoras 3D convencionales, con un consumo total aproximado de 25 kg de filamento por día, y una impresora industrial de gran formato con una demanda continua de 1 kg/h, equivalente a 24 kg/día. El consumo combinado asciende a aproximadamente 50 kg diarios de material.

Aun así, el objetivo del proyecto no es diseñar una trituradora para esta demanda inmediata, sino desarrollar un equipo con capacidad industrial. El sistema debe procesar entre 500 kg a 1.000 kg diaria de PET posconsumo, permitiendo:

- Garantizar la disponibilidad continua de material para la impresora de gran formato.
- Mantener un stock estable para las impresoras estándar.
- Proveer suficiente material para el proceso de extrusión destinado a fabricar filamento reciclado.
- Escalar la operación ante futuras impresoras o incrementos de producción.
- Habilitar la comercialización de filamento reciclado.

Este margen de capacidad garantiza robustez, sostenibilidad y un potencial de crecimiento real para el sistema productivo.

Dado que el PET triturado presenta una densidad aproximada de 400 kg/m³, los volúmenes asociados a la capacidad requerida son:

Con PET posconsumo (densidad del triturado $\approx$ 400 kg/m³):

Para 500 kg/día:

$$\frac{500}{400} = 1.25m^3/día$$

Para 1000 kg/día:

$$\frac{1000}{400} = 2.5 \text{ m}^3/\text{día}$$

Esto representa:

- 0,052 m³/h para 500 kg/día
- 0,104 m³/h para 1000 kg/día

Cálculo del número de botellas equivalentes al volumen diario de procesamiento

Para expresar el volumen total de PET posconsumo en términos de botellas estándar, se adopta como referencia una botella PET de 1,5 L, la cual ocupa un volumen aproximado de:

- $V_{\text{botella}} = 0.0018 \text{ m}^3$

El sistema debe procesar entre 1,25 m³/día y 2,5 m³/día de PET posconsumo. El número equivalente de botellas se determina mediante:

$$N = \frac{V_{\text{total}}}{V_{\text{botella}}}$$

$$N = \frac{1.25}{0.0018} = 694.44 \text{ botellas} = 695$$

$$N = \frac{2.5}{0.0018} = 1,388.88 \text{ botellas} = 1389$$

Tomando como referencia una botella PET de 1,5 L con un volumen físico aproximado de 0,0018 m³, los volúmenes diarios de PET posconsumo requeridos

(1,25 a 2,5 m³/día) corresponden aproximadamente a **694 a 1.389 botellas por día**.

Este rango permite dimensionar el flujo real de residuos que la trituradora debe procesar para garantizar el abastecimiento continuo del sistema de impresión y extrusión.

5.1.1 Requerimientos funcionales y operativos del sistema de trituración

El sistema debe transformar PET posconsumo en hojuelas de tamaño uniforme (≤ 5 mm), aptas para extrusión y procesamientos posteriores. Para cumplir con la capacidad establecida (1,25–2,5 m³/día), el diseño debe garantizar un flujo continuo de alimentación, trituración estable y un control adecuado del tamaño de partícula.

Los requerimientos funcionales principales son:

- Alimentación continua y estable: El sistema debe aceptar botellas enteras pre lavadas y comprimidas sin generar atascos, manteniendo un flujo que permita alcanzar entre 0,052 y 0,104 m³/h de material procesado.
- Triturado homogéneo: La cámara de corte, los cuchillos y el rotor deben asegurar un tamaño final de partícula ≤ 5 mm, consistente con las necesidades de extrusión de filamento reciclado.

- Capacidad industrial sostenida: La máquina debe operar ciclos prolongados (8h continuas) sin degradación térmica, vibraciones excesivas o pérdida de eficiencia.
- Mantenimiento rápido: El diseño debe permitir acceso simple a cuchillas, tolva y cámara de trituración para limpieza y ajuste, reduciendo tiempos muertos.
- Seguridad del operador: Protección contra proyecciones.
- Compatibilidad con procesos posteriores: Las hojuelas generadas deben ser adecuadas para secado, extrusión y alimentación a la impresora de gran formato.

Este conjunto de requerimientos funciona como marco técnico para las decisiones de diseño que se desarrollan en los apartados siguientes, incluyendo geometría del rotor, potencia instalada, configuración estructural y selección de materiales.

5.1.2 Requerimientos mecánicos y estructurales del sistema

El diseño debe garantizar una estructura rígida, estable y capaz de soportar las cargas dinámicas generadas durante la trituración del PET. Para ello, se consideran los siguientes requerimientos mecánicos y estructurales:

- Resistencia a cargas dinámicas: El rotor, la cámara de corte y el bastidor deben soportar esfuerzos cíclicos producidos por impactos, torsión y vibraciones propias del corte de botellas PET densificadas.
- Rigidez estructural: La carcasa y el chasis no deben presentar deformaciones que alteren el alineamiento rotor–cuchillas, ya que esto comprometería el tamaño final de partícula y aumentaría el riesgo de fallo prematuro.
- Aislamiento mecánico: El conjunto mecánico debe minimizar la transmisión de vibraciones a la estructura externa mediante amortiguadores o bases anti vibratorias, permitiendo operación estable en turnos prolongados.
- Tolva reforzada: La tolva debe resistir la carga de alimentación continua sin deformarse, garantizando un flujo constante hacia la cámara de trituración.
- Cámara de corte de alta resistencia: Debe fabricarse en acero o equivalente, capaz de resistir desgaste abrasivo y cortes repetitivos sin pérdida de filo o deformación superficial.
- Sistema de sujeción de cuchillas: El diseño debe asegurar que las cuchillas fijas y móviles mantengan su posición con tolerancias estrechas para permitir un corte eficiente y seguro.

- Fijaciones y uniones robustas: Tornillería, soldaduras y uniones deben dimensionarse para soportar fuerzas alternantes y choques generados durante el proceso.
- Compatibilidad con mantenimiento: Las placas laterales, tapas y soportes deben permitir desmontaje parcial para ajustes y reemplazo de cuchillas sin afectar la integridad estructural.

Estos requerimientos orientan la selección de materiales, espesores, geometrías y apoyos estructurales que se desarrollan en los apartados posteriores, garantizando que la máquina mantenga su rendimiento incluso bajo condiciones industriales exigentes.

5.1.3 Requerimientos de potencia, par y rendimiento del rotor

El rotor es el componente central del proceso de trituración y concentra la mayor parte de las exigencias mecánicas, energéticas y funcionales del sistema. Para dimensionarlo correctamente, se establecen los siguientes requerimientos:

Demanda de potencia

La máquina debe procesar entre 500 kg y 1.000 kg diarios de PET, lo cual exige un rotor capaz de trabajar en operación continua durante varias horas por turno.

Requerimiento de par

El rotor debe generar un par suficiente para cortar botellas enteras, pre compactadas o parcialmente deformadas, evitando bloqueos del sistema.

Tamaño de las Botellas a Procesar

Las botellas de 1.5 litros tienen las siguientes dimensiones aproximadas:

Diámetro: 80 mm (8 cm)

Largo: 260 mm (26 cm)

Estas dimensiones obligan a diseñar un área de entrada que permita procesar al menos dos botellas simultáneamente sin atascarse.

Área de Entrada y Diámetro del Molino

Para acomodar dos botellas en paralelo, el área de entrada debe ser lo suficientemente amplia para dos diámetros de botella. Esto da un valor de entrada mínimo de:

$$2 \times 80 \text{ mm} = 160 \text{ mm}$$

Como resultado, el diámetro mínimo del área de entrada debe ser mayor a 160mm.

Diámetro del Molino

224 mm de diámetro permite asegurar que las cuchillas puedan moverse libremente en un espacio mayor a la longitud de las cuchillas (160 mm), lo que garantiza un área de corte eficiente y un mayor alcance en la trituración.

Relación con las Cuchillas

Si las cuchillas tienen un largo de 160 mm, el diámetro del molino de 224 mm justifica un radio que cubra adecuadamente el área de corte, permitiendo que las cuchillas trabajen eficientemente en toda la circunferencia del molino.

Justificación del Radio

El radio del molino basado en un diámetro de 224 mm se calcula como:

$$\text{Radio} = 224/2 = 112\text{mm}$$

Este radio es adecuado para una máquina compacta que puede manejar el procesamiento de dos botellas de 1.5 litros a la vez. Además:

- Cumple con el criterio de compactación, ya que un diámetro de 224 mm sigue siendo moderado para una máquina compacta.
- Permite espacio suficiente para las cuchillas, garantizando un corte eficiente a lo largo de los 160 mm de las cuchillas.

Velocidad de Rotación y Reducción del Motor

Para determinar la potencia y el torque necesarios en el rotor, se realiza el cálculo del esfuerzo cortante en la zona de corte utilizando los parámetros resumidos en la Tabla 3, a partir de estos valores se evalúa el comportamiento del sistema en distintos regímenes de operación entre 500 y 8000 rpm. La Tabla 3 presenta el torque de corte, torque total y potencia mecánica requerida para cada velocidad analizada. Con estos resultados se seleccionó un punto de operación de aproximadamente 1500 rpm, donde la potencia demandada es de 6.25 kW (8.38 HP), lo cual justifica el uso de un motor trifásico de 10 HP acoplado mediante un sistema de poleas reductoras.

Torque por corte

$$T_c = F_c \cdot r$$

donde:

$$F_c = \tau \cdot A_c$$

r = radio efectivo del eje o brazo de cuchilla (m)

Torque total

$$T_{total} = T_f + T_c$$

Potencia requerida

$$P = \frac{T_{total} \cdot \omega}{\eta}$$

$$\text{donde } \omega = \frac{2\pi \cdot \text{RPM}}{60}$$

Potencia en HP

$$HP = \frac{P}{745.7}$$

Cálculos detallados de potencia, par y selección del motor: ver Anexo B.

Espesor de corte	d	5
MPA de corte	t	60
Torque en vacio	Tf	2
Longitud de corte	Lc	160
Angulo de enfrentamiento	alpha	1,2
Coeficiente de trabajo maximo	k	0,4
Radio de presion max	r	94

RPM	Fuerza (N)	Torque de corte (N*m)	Torque Total (N*m)	Potencia (W)	HP
500	1005,236154	37,79687941	39,79687941	2083,76	2,79
1000	1005,236154	37,79687941	39,79687941	4167,52	5,59
1500	1005,236154	37,79687941	39,79687941	6251,28	8,38
2000	1005,236154	37,79687941	39,79687941	8335,04	11,18
2500	1005,236154	37,79687941	39,79687941	10418,80	13,97
3000	1005,236154	37,79687941	39,79687941	12502,56	16,77
3500	1005,236154	37,79687941	39,79687941	14586,32	19,56
4000	1005,236154	37,79687941	39,79687941	16670,08	22,35
4500	1005,236154	37,79687941	39,79687941	18753,84	25,15
5000	1005,236154	37,79687941	39,79687941	20837,60	27,94
5500	1005,236154	37,79687941	39,79687941	22921,36	30,74
6000	1005,236154	37,79687941	39,79687941	25005,12	33,53
6500	1005,236154	37,79687941	39,79687941	27088,88	36,33
7000	1005,236154	37,79687941	39,79687941	29172,64	39,12
7500	1005,236154	37,79687941	39,79687941	31256,40	41,92
8000	1005,236154	37,79687941	39,79687941	33340,16	44,71

Tabla 3. Velocidad de rotación en función de parámetros.

Fuente: Elaboración propia.

La máquina está diseñada para operar con un motor a 3520 revoluciones por minuto (rpm), mediante un sistema de reducción por poleas en V, la velocidad efectiva de operación se ajustará a 1500 rpm. (Tabla completa ver Anexo B)

5.2 Número de Cuchillas y Frecuencia de Corte

Con la velocidad de 1500 rpm, cada cuchilla realiza 90.000 cortes por minuto, lo que influye directamente en la capacidad de procesamiento. El número de cuchillas

se determina de manera que cada una participe de manera eficiente en el proceso de fragmentación del plástico. La distribución adecuada del volumen de trabajo entre las cuchillas es fundamental para evitar sobrecargas y garantizar un corte homogéneo.

Justificación del Número de Cuchillas

En función del volumen de material y la velocidad de rotación, se determina que el sistema puede operar eficientemente con dos a tres cuchillas. Este número asegura:

- Un balance óptimo entre la capacidad de corte y la velocidad de alimentación del plástico.
- Distribución uniforme del esfuerzo, evitando el desgaste prematuro y reduciendo los tiempos de inactividad por mantenimiento.
- Cumplimiento de los requerimientos de diseño compactos del cliente, permitiendo mantener un sistema eficiente en términos de espacio y operación.
- El uso de dos o tres cuchillas permite cubrir el volumen diario de plástico sin comprometer la durabilidad del sistema, manteniendo al mismo tiempo un nivel de rendimiento adecuado. Este diseño también garantiza que la máquina cumpla con los requerimientos de tamaño de partícula y

procesamiento continuo, esenciales para la posterior reutilización del material.

Se seleccionan dos cuchillas móviles y dos cuchillas fijas en el diseño del sistema de trituración debido a consideraciones de economía y funcionalidad.

5.3 Diseño de cuchillas y ángulo de corte

El diseño de las cuchillas de la máquina trituradora de plásticos se basa en referencias de trituradoras de tipo "*chamber cutting*", que son ampliamente utilizadas en la industria del reciclaje. Estas máquinas se caracterizan por un sistema de corte que emula el funcionamiento de cizallas o tijeras, lo cual es ideal para procesar materiales plásticos. El principio de corte por cizalla permite aplicar esfuerzos controlados y eficientes, generando una fractura limpia en el plástico sin aplicar esfuerzos excesivos que puedan generar deformaciones o calor innecesario.

Ángulo de Corte Basado en Referencias Industriales

Para definir el ángulo de corte de las cuchillas, se toma como referencia ángulos empleados en trituradoras de tipo *chamber cutting*, que suelen oscilar entre 30° y 45° para las cuchillas móviles. Este rango de inclinación maximiza la eficiencia del corte por cizalla, distribuyendo el esfuerzo de corte de manera uniforme a lo largo de la cuchilla. Estos ángulos son óptimos para plásticos como el PET, que requieren una combinación de fuerza y precisión para ser cortados de manera eficiente.



Ilustración 19. Corte tipo cizalla. Tomado de Guidetti ([Enlace](#))

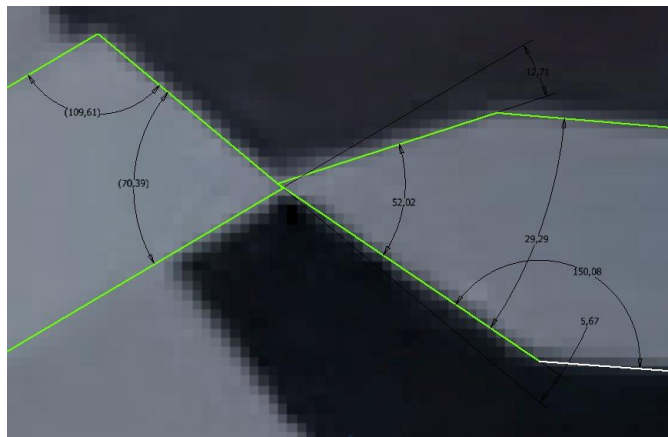


Ilustración 18. Ángulo de corte referencia industrial. Tomado de Guidetti ([Enlace](#)).

Principio de Cizalla o Tijera

El principio de cizalla es clave en el diseño de las cuchillas, ya que este método genera una acción de corte similar al funcionamiento de una tijera. Este mecanismo es particularmente eficiente para materiales plásticos debido a su capacidad para:

- Minimizar el desgaste en las cuchillas, dado que el esfuerzo de corte se distribuye progresivamente.
- Reducir la acumulación de calor, que puede afectar la calidad del material plástico durante el proceso de trituración.
- Generar un corte limpio y preciso, que facilita la obtención de partículas de plástico del tamaño deseado, en este caso, de 5 mm o menos.

Ángulo Seleccionado

El ángulo final adoptado para las cuchillas de esta máquina se establece en función de la evaluación de trituradoras similares y de los requerimientos del cliente, quien solicita una máquina compacta con capacidad para triturar volúmenes diarios de 500-1000 kg de plástico. El ángulo de corte seleccionado es de 30° para las cuchillas móviles y 70° para las cuchillas fijas se adapta a las características del plástico y al volumen procesado, asegurando un rendimiento eficiente y prolongado de las cuchillas, así como un corte preciso.

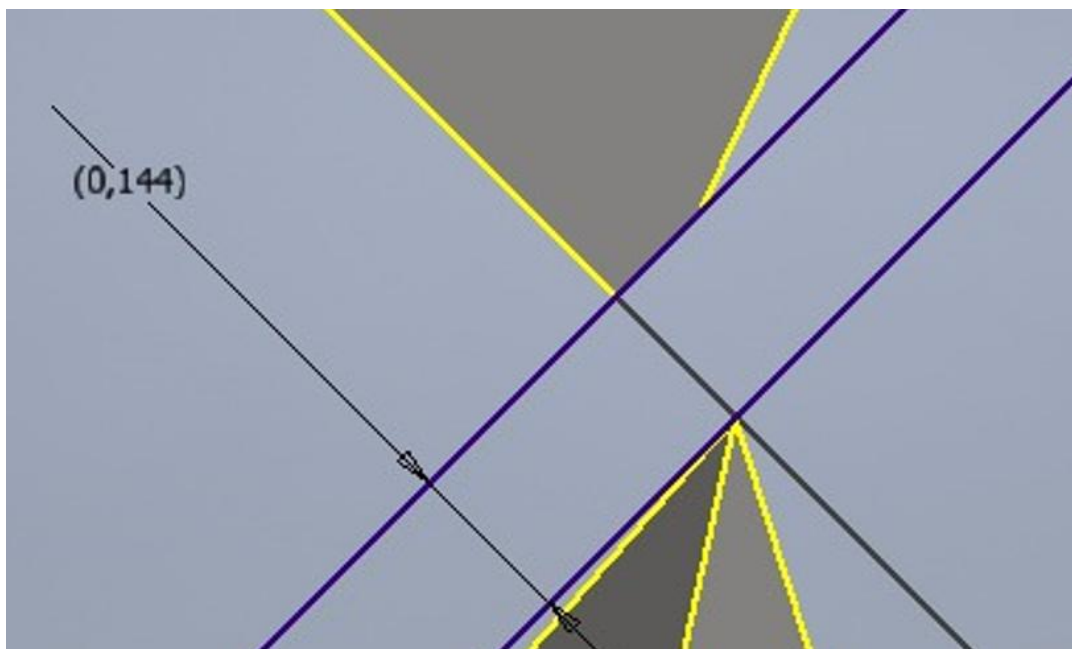


Ilustración 20. Distancia de separación cuchillas móvil-fija.

Fuente: Elaboración propia.

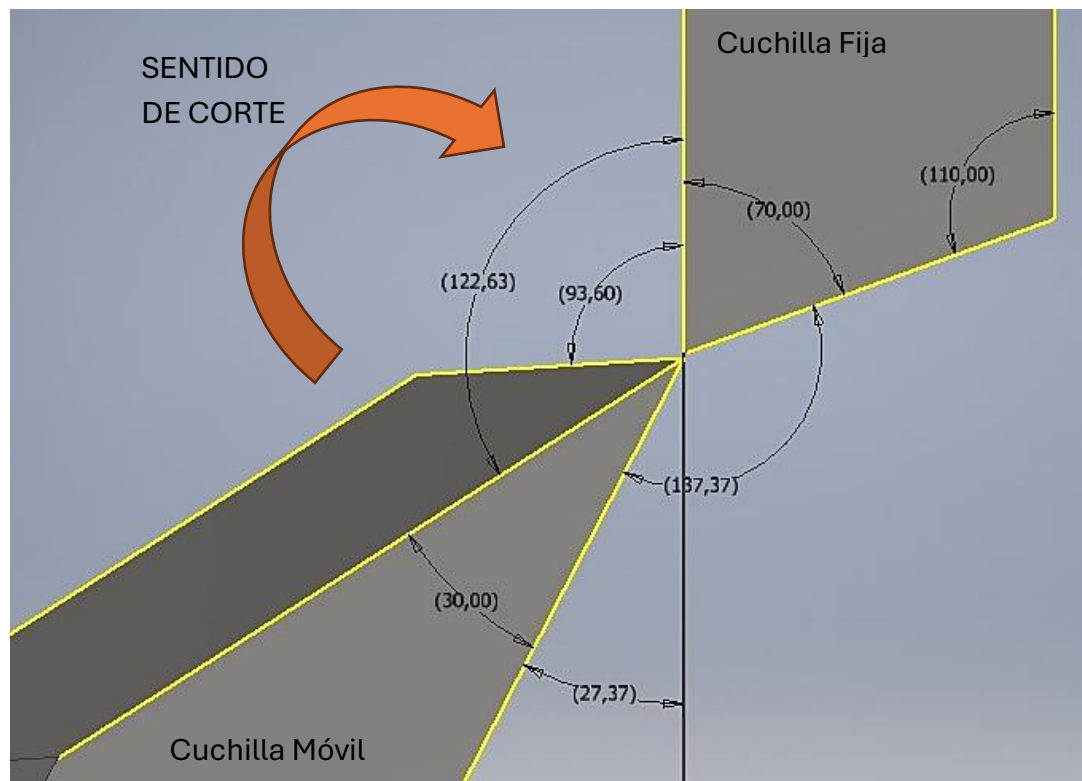


Ilustración 21. Ángulo de corte seleccionado.

Fuente: Elaboración propia.

5.4 Diseño del rotor y del eje

El diseño del rotor y del eje constituye uno de los elementos críticos en el desempeño del sistema de trituración de plásticos. Su función es transmitir el torque requerido para vencer la resistencia al corte del material, soportar las cargas de impacto generadas durante la fragmentación, mantener el alineamiento entre cuchillas móviles y fijas, y asegurar una operación mecánica estable a la velocidad de trabajo (1500 rpm).

El proceso de diseño integra los datos de resistencia al corte de los polímeros, la geometría del sistema de cuchillas, la estimación del torque de operación y los criterios de resistencia estructural para dimensionar un eje confiable y manufacturable.

5.4.1 Fuerzas de corte y justificación de las cargas de diseño

La trituración se produce principalmente por corte tipo cizalla, donde las cuchillas móviles enfrentan al material mediante un ángulo de ataque de $1,2^\circ$ a 2° , reduciendo el área instantánea de contacto y, con ello, la carga máxima aplicada de manera simultánea. Sin embargo, para efectos de diseño estructural se emplea la condición más desfavorable, suponiendo compromiso total del espesor de cuchilla en el instante de corte.

Para estimar la fuerza de corte se recopilaron valores de resistencia al corte de los polímeros más habituales en procesos de reciclaje. La Tabla 4 resume los datos utilizados para el dimensionamiento:

Material	Resistencia a el corte estimada* (MPa)	Fuerza estimada (N) sobre 1 cm²	Observaciones
PET (Polietileno tereftalato)	≈ 60	≈ 6 000	Alta rigidez / densidad; se fragmenta con mayor esfuerzo.
ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno)	≈ 40	≈ 4 000	Buena tenacidad, menor resistencia al corte que PET.
PLA (Ácido Poliláctico)	≈ 50	≈ 5 000	Rígido, pero algo más frágil que ABS; requiere fuerza intermedia.
PP (Polipropileno)	≈ 30	≈ 3 000	Menor rigidez, se deforma antes de cortar limpio.
PEAD (Polietileno de alta densidad)	≈ 25	≈ 2 500	Muy dúctil; la cuchilla puede producir deformación antes del corte.
PVC (Policloruro de vinilo)	≈ 35	≈ 3 500	Rigidez moderada, pero puede requerir mayor esfuerzo si contiene refuerzos.

Tabla 4. Resistencia materiales por cizallamiento Fuente: Elaboración propia con base en ASTM D638, ASTM D695, ASTM D732; MatWeb (2024); Granta EduPack (2024); Nizamuddin et al. (2020); Hopewell et al. (2009).

Estos valores fueron obtenidos con base en normas ASTM D638, D695 y D732, así como bases de datos técnicas (MatWeb, Granta EduPack). Aunque el corte real ocurre con un área efectiva menor debido al ángulo de las cuchillas, se adopta un enfoque conservador para garantizar la integridad del sistema ante materiales duros como PET.

5.4.2 Cálculo del torque y carga transmitida al eje

El dimensionamiento del eje parte del torque requerido para realizar la trituración y de las cargas que transmite el conjunto rotor–cuchillas sobre los apoyos. Con base en las fuerzas máximas de corte obtenidas en la sección previa ($F \approx 6\,000\text{ N}$ para PET, condición más crítica) y en el brazo radial efectivo de corte ($r = 90\text{ mm}$), el torque máximo de operación resulta:

$$T = F \cdot r = 6000\text{ N} \cdot 0.09\text{ m} = 540\text{ N}\cdot\text{m}$$

Para garantizar operación segura, se aplica un factor de sobredimensionamiento del 25 %, obteniendo:

$$T_{\text{diseño}} = 675\text{ N}\cdot\text{m}$$

Este valor corresponde al torque que debe transmitir el eje de manera continua a 1500 rpm. El cálculo de la tensión cortante por torsión para un eje macizo de 30 mm de diámetro da como resultado:

$$\tau = 32T/(\pi d^3) = 32(675)/(\pi \cdot 0.03^3) = 25.4 \text{ MPa}$$

Al compararlo con el límite de cortante del acero AISI 1045 (aprox. 350 MPa), el factor de seguridad es:

$$FS_\tau \approx 13.7$$

Respecto a las cargas verticales, el análisis de vigas con dos apoyos separados 197.25 mm y las cargas distribuidas del rotor (350 N) más las cargas puntuales del sistema de corte (≈ 6000 N instantáneos) arroja los siguientes esfuerzos máximos:

Momento flector máximo:

$$M_{max} \approx 540 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Esfuerzo normal por flexión:

$$\sigma = 32M/(\pi d^3) = 32(540)/(\pi \cdot 0.03^3) = 22.5 \text{ MPa}$$

El acero 1045 presenta una resistencia a cedencia de 530 MPa, lo que produce:

$$FS_\sigma \approx 23.5$$

Finalmente, se evalúa la condición combinada de torsión + flexión mediante el criterio de Von Mises:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = 49.8 \text{ MPa}$$

$$FS_{VM} = \frac{530}{49.8} = 10.6$$

Los factores de seguridad obtenidos muestran que el eje de 30 mm de diámetro cumple holgadamente con los requerimientos mecánicos bajo las condiciones más desfavorables de corte, soporte y transmisión de torque. Este diámetro garantiza integridad estructural, manufacturabilidad, rigidez suficiente y compatibilidad con los rodamientos seleccionados.

Los cálculos detallados del torque, cortantes, momentos, ecuaciones y desarrollo matemático completo se presentan en el Anexo B y C: Cálculo estructural del eje, donde también se incluyen los diagramas de cortante y momento.

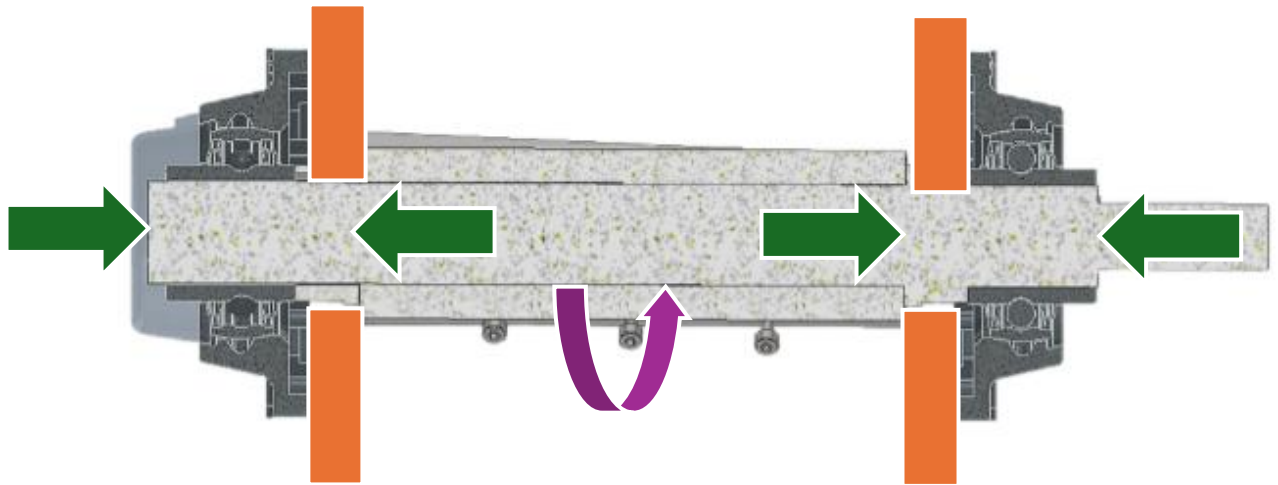


Ilustración 22. Eje rodete fuerzas aplicadas.

Fuente: Elaboración propia.

5.5 Selección de rodamientos y chumaceras

Para soportar el eje del rotor se seleccionan rodamientos auto alineables tipo UC con chumacera tipo UCF, debido a su buena capacidad para soportar cargas combinadas y su facilidad de montaje.

Dado que el sistema opera a una velocidad máxima de 1500 rpm, se considera inicialmente el uso de rodamientos SKF por su alta calidad y disponibilidad de datos técnicos. Sin embargo, al evaluar el costo–beneficio y la disponibilidad local, se opta por los rodamientos FAG ARSA referencia UCF 206, equivalentes a los SKF UCF 206, que ofrecen características mecánicas comparables con un costo más adecuado al proyecto.

Estos rodamientos presentan:

- Diámetro interior: 30 mm

- Diámetro exterior: 62 mm
- Capacidad de carga dinámica: ≈ 14.0 kN
- Capacidad de carga estática: ≈ 7.8 kN
- Velocidad límite: hasta 8500 rpm

La configuración auto alineable permite compensar posibles desalineaciones en el eje, reduciendo vibraciones y desgaste prematuro, lo que resulta esencial para el funcionamiento estable del rotor a altas velocidades.

5.6 Diseño de la estructura

La estructura de soporte de la máquina se definió bajo un esquema modular tipo *finger joint*, con el objetivo de facilitar el montaje, el transporte y las intervenciones de mantenimiento. Este enfoque permite obtener un ensamble preciso sin necesidad de doblado, garantizando repetibilidad geométrica en las piezas y reduciendo tiempos de manufactura.

Las componentes estructurales se fabricaron en lámina de acero al carbono de 3/8" de espesor, cortada mediante tecnología láser. La selección de este espesor responde a requerimientos de rigidez y estabilidad propios del sistema de trituración. Durante la operación, el motor de 10 HP y el rotor generan cargas dinámicas y variaciones de torque que pueden inducir flexión o pérdida de alineación si se emplean paredes con menor capacidad estructural. El espesor de 3/8" proporciona una masa y rigidez

suficientes para mantener la posición relativa del motor, el rotor y las cuchillas, evitando desplazamientos que afecten el proceso de corte o aceleren el desgaste de los elementos de transmisión.

Este espesor también contribuye al control de vibraciones. La mayor inercia estructural incrementa la frecuencia natural del conjunto y mejora su respuesta frente a las excitaciones generadas por el rotor, reduciendo la posibilidad de resonancia y asegurando un comportamiento estable en operación continua. Además, el espesor seleccionado garantiza que las uniones tipo *finger joint* mantengan un encaje firme, evitando deformaciones por carga o tensión en las zonas de fijación.

El diseño de la estructura fue desarrollado en CAD 3D, lo que permitió verificar interferencias, ajustar tolerancias y evaluar la ubicación de cada componente. Este proceso incluyó la revisión del centro de gravedad del equipo con el fin de lograr una distribución uniforme de cargas sobre las bases de apoyo y asegurar un comportamiento estable durante el funcionamiento y el transporte. La validación del modelo permitió también identificar zonas susceptibles a concentraciones de esfuerzo, incorporando refuerzos locales cuando fue necesario.

En conjunto, la estructura propuesta ofrece la rigidez, precisión y estabilidad requeridas para soportar las condiciones de operación del sistema de trituración, contribuyendo a su fiabilidad y al adecuado desempeño del prototipo.

5.7 Sistema de transmisión

5.7.1 Diseño y selección del sistema de transmisión por bandas

correas estrechas Xtra Power serie RMA: 3V XP2

❗

Non standard pulley diameter

Belt Speed: 40.74 (m/s)

Belt Length: 740.00 (mm)

DriveR

600.002 mm

DriveN

Unidad Motriz y energia

Polencia de Motor (kW)

7.5

Torque de Motor (Nm)

20.35

SF (V-belts)

1.2

[Open ruled configuration](#)

Velocidades y poleas

Auto calculate Input

DriveR speed (rpm)

Velocidad motriz (rpm)

3520

Velocidad Conducida (rpm)

1500

Diametro Motriz (mm)

93

Diametro de la polea conducida (mm)

219.86

Shaft diameters

DriveR shaft diameters (mm)

38

DriveN shaft diameters (mm)

20

correas y distancia entre centros

Distancia entre centros (mm.)

600.002

Logitud de correas

169

66.82

Numero de canales

Estandar

Ilustración 23. Datos selección sistema de transmisión SKF.

Fuente: Elaboración propia.

5.7.2

Parámetros de entrada del sistema

- Potencia del motor: **7.5 kW**
- Torque nominal: **20.35 Nm**
- Velocidad motriz: **3520 rpm**
- Velocidad requerida en el rotor: **1500 rpm**
- Factor de servicio: **1.3 – 1.8**
- Distancia entre centros: **600 mm**
- Configuración: transmisión por correa trapezoidal estrecha (3V XP2)

Selección de poleas según catálogo SKF

- Polea motriz seleccionada: **Ø 93 mm**
- Polea conducida seleccionada: **Ø 219.86 mm**
- Relación de transmisión efectiva ≈ 2.35
- Velocidad obtenida en el rotor: **~1500 rpm**

Selección de la correa y número de canales

Según la herramienta SKF:

- Tipo de correa: **3V 4/725XP2**
- Número de correas: **4 canales**
- Longitud estándar SKF: **740 mm** (según segunda imagen)
- Velocidad de la banda: **40.74 m/s**

- Longitud total recomendada (primer cálculo): **1697 – 1700 mm**
según configuración alternativa.

Wrapped narrow wedge belts; 3V XP2 Export solutions: PDF EXCEL	
1 Non standard belt length. 1 Non standard Driven pulley diameter. Non standard Driven number of teeth.	
Velocidad de la correa 13.31	Longitud de correas 1,697.900
Datos de entrada	
Potencia Nominal (kW)	7.5
Torque nominal	20.35
Solicitado factor de servicio	1.2
Velocidad motriz (rpm)	3520
Velocidad Conducida (rpm)	1500
Accionamiento	
Ancho total (mm)	0.00
Longitud Total (mm)	423.62
Altura Total (mm)	172.23
Distancia entre centros de poleas (mm)	600.00
Longitud Span (mm)	296.03
correas	
Designación	PHG 3V475XP2
Number of belts / grooves	4
Factor de servicio actual	1.52
Potencia de la correa (kW)	11.41
Masa de correa (kg) (Aprox.)	0.06
Ancho de la correa (mm)	9.00
Polea Motriz	
Designación	PHIP 4-3V280TB
diámetro de referencia	71.00
Buje nominal	PHF TB1108XC
Taperlock shaft diameter range [mm]	9–28
Polea Conducida	
Designación	
diámetro de referencia	168.23
Buje nominal	
Taperlock shaft diameter range [mm]	
Cargas	
Cargas estáticas en el eje para correas nuevas (N)	1,474.39
Cargas estáticas en el eje para correas usadas (N)	982.93
Cargas dinámicas para correas nuevas (N)	1,382.31
Cargas dinámicas para correas usadas (N)	890.85
Tensionador	
tensión de instalación para una correa nueva (N)	184.30
tensión de instalación para una correa usada (N)	122.87
Fuerza de Deflexión para el tensiometro mecanico para correas SKF (kg.)	1.26
-New	0.87
-Run	
Frecuencia de vibración para Medidor de Frecuencia de correas SKF (Hz)	89.94
-New	73.43
-Run	
SKF Belt Frequency Meter (PHL FM 10/400) Belt tension pen gauge (PUB PSD CI/007)	

Ilustración 24. Datos adicionales de diseño aportados por SK.

Fuente: Elaboración propi.

Justificación del método

La transmisión se seleccionó mediante la herramienta oficial *SKF Belt Drive System Design Tool*, lo que asegura el cumplimiento de normas RMA, vida útil adecuada, tensión correcta y disponibilidad comercial de poleas y correas. El enfoque se centró en seleccionar componentes estándar para facilitar el suministro y minimizar costos.

5.8 Diseño de plano eléctrico

El diseño eléctrico del sistema:

Sistema industrial real, correspondiente a la máquina a escala completa equipada con un motor trifásico de 10 HP;



Ilustración 25. Arrancador estrella triángulo.
67 *Fuente: Elaboración propia.*

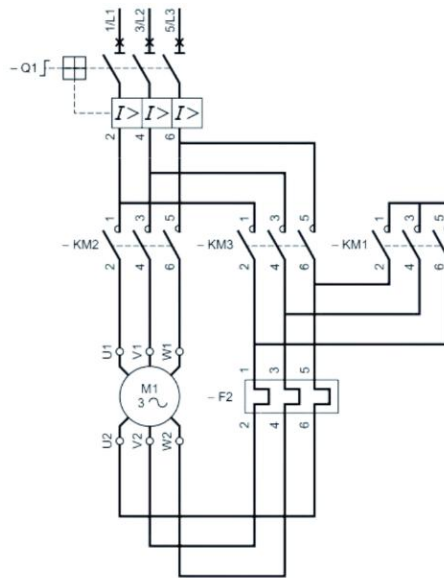


Ilustración 26. Plano Arrancador Estrella-Triángulo.

Fuente: Elaboración propia

Sistema eléctrico de la máquina industrial (Motor 10 HP – Arranque Estrella Triángulo)

Justificación del método de arranque

El motor principal del sistema de trituración corresponde a un motor trifásico de 10 HP (≈ 7.5 kW), con velocidad nominal de 3520 rpm.

Debido a su potencia, el arranque directo generara corrientes entre 5 y 7 veces la corriente nominal, lo que puede provocar:

- Caídas de tensión en la red.
- Disparos por sobre corriente.
- Reducción de vida útil del motor.
- Esfuerzos mecánicos innecesarios sobre el rotor y la transmisión.

Por ello, se implementa un arranque estrella-triángulo, el cual reduce la corriente de arranque aproximadamente en un 33 %, garantizando un inicio suave y protegiendo tanto la instalación eléctrica como el motor.

6. FABRICACIÓN

La fabricación del prototipo se desarrolló mediante una secuencia técnica que integra corte por láser, procesamiento térmico, mecanizados de precisión, manufactura de componentes por fundición y construcción de una estructura modular en acero. Este capítulo detalla el procedimiento completo para la construcción del sistema de trituración, desde la fabricación de las cuchillas hasta el ensamblaje final del conjunto mecánico y del sistema de control.

6.1 Diseño estructural y fabricación de la estructura

La estructura principal del prototipo se diseñó bajo un esquema modular tipo Finger Joint, lo cual permitió un ensamble preciso de las placas sin necesidad de dobleces, reduciendo tiempos de fabricación y asegurando rigidez estructural. Todas las placas fueron fabricadas en acero de 3/8" mediante corte láser, obteniendo una precisión dimensional elevada y uniones perfectas entre módulos.

Las ventajas del sistema estructural implementado incluyen:

- Alineación estable entre motor, rotor, cámara de corte y tolva.
- Reducción de esfuerzos residuales al minimizar la soldadura.
- Ensamble rígido que reduce vibraciones durante el triturado.
- Facilidad para reemplazar o modificar módulos sin procesos invasivos.

El diseño fue validado mediante modelo 3D CAD, verificando la ausencia de interferencias y la correcta distribución de cargas.

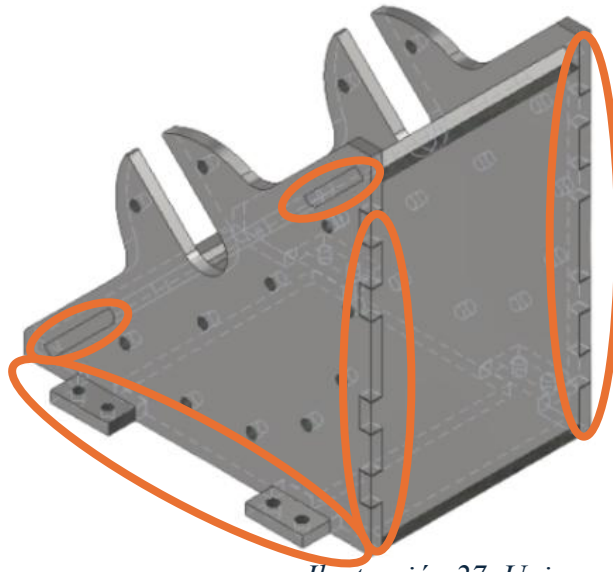


Ilustración 27. Uniones tipo Finger Joint
Fuente: Elaboración propia

6.2 Fabricación de las cuchillas móviles y fijas

Las cuchillas móviles y fijas fueron fabricadas por la empresa DIMALTA siguiendo planos detallados. Dado que el rendimiento del sistema depende directamente de estas piezas, se aplicaron procesos especializados de mecanizado y tratamientos térmicos.

6.2.1 Material y geometría

- Material: acero herramienta
- Cuchillas móviles: 2 unidades, montadas en el rotor.
- Cuchillas fijas: 2 unidades, instaladas en la cámara de corte.

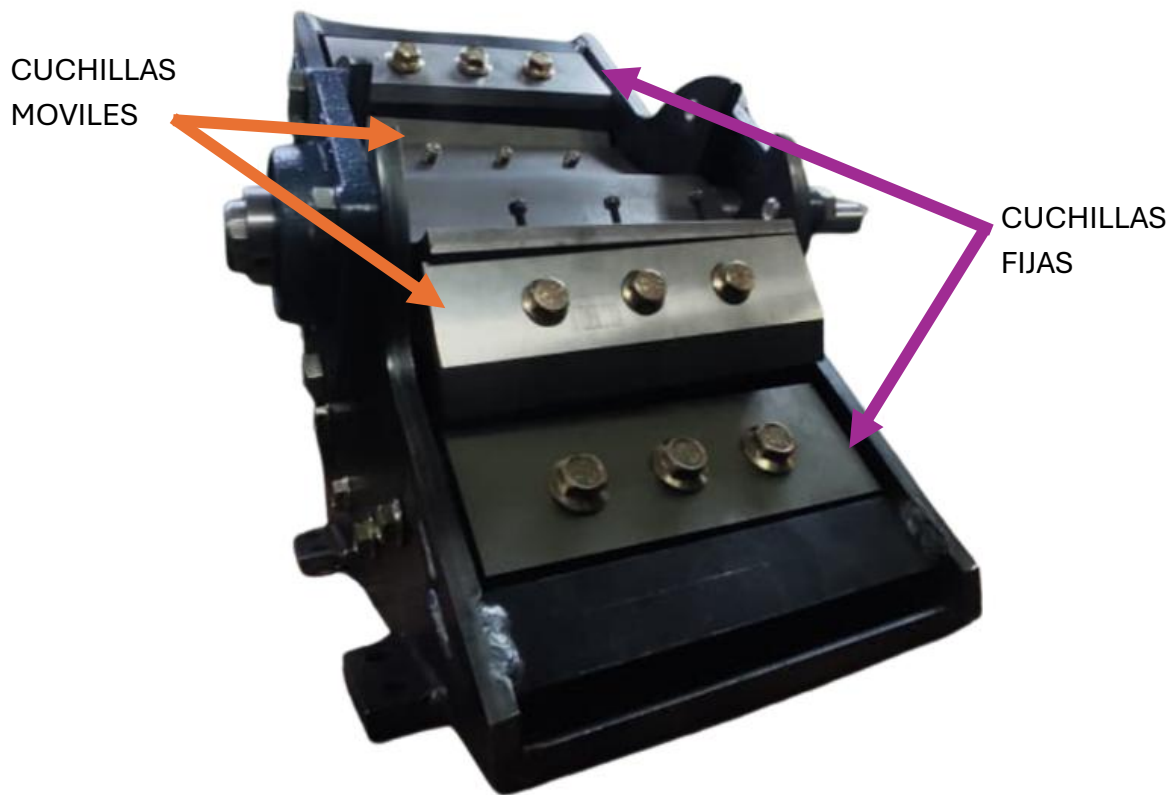


Ilustración 28. Cuchillas móviles y fijas.

Fuente: Elaboración propia.

6.2.2 Proceso de fabricación

Corte del material y desbaste inicial

Se cortaron las piezas en bruto y se rectificaron las caras para garantizar paralelismo.

- Mecanizado CNC
 - Fresado de ángulos de ataque.
 - Perforaciones.

- Preparación del filo previo al temple.
- Tratamientos térmicos
 - Austenización del acero.
 - Templado al aceite, obteniendo durezas cercanas a 58–60 HRC.
 - Revenido para mejorar tenacidad.
- Rectificado final
 - Rectificado plano para asegurar planitud y paralelismo.
 - Acabado del filo con tolerancias $<0,05$ mm.

Las cuchillas fueron entregadas completamente listas para montaje.

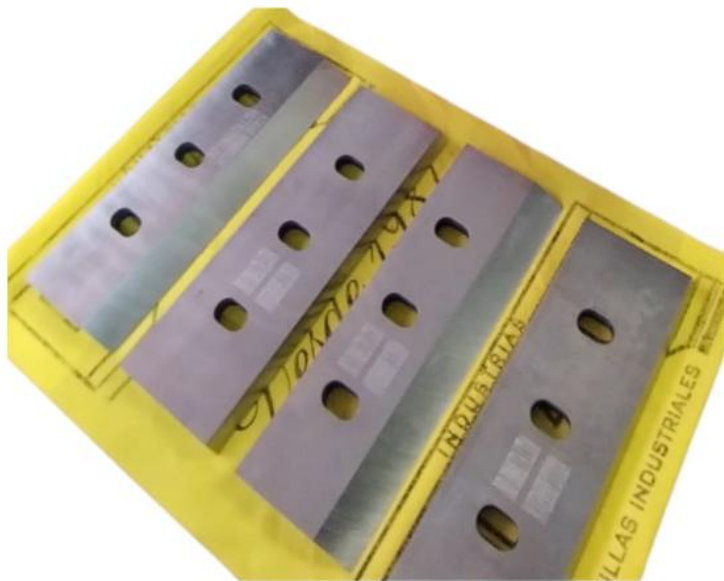


Ilustración 29. Cuchillas.

Fuente: Elaboración propia.

6.3 Fabricación del rotor

El rotor es el componente central del sistema de trituración y se fabricó combinando impresión 3D, fundición en acero nodular y mecanizado de precisión.

6.3.1 Prototipo previo en impresión 3D

Se imprimió un modelo a escala real:

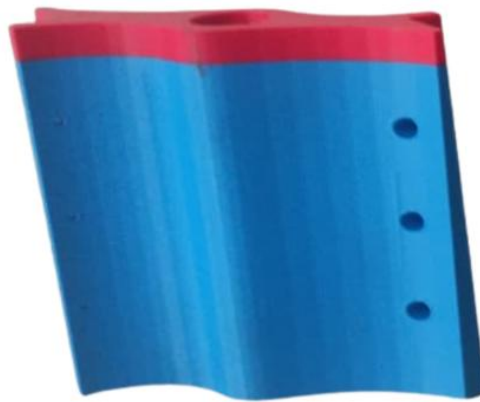


Ilustración 30. Rotor guía prototipo Beta.

Fuente: Elaboración propia.

- Validó geometría y espacios internos.
- Permitió verificar balance y ensamblaje.
- Sirvió como referencia directa para la fundición.

6.3.2 Fundición del rotor

El rotor definitivo se produjo en acero nodular, material adecuado por su resistencia al impacto y ductilidad.

Proceso:

- Creación del molde en arena.
- Colado del acero nodular.
- Corte de mazarotas y limpieza por granallado.
- Verificación de superficie e integridad.



Ilustración 31. Rotor impreso en 3D, para fundición.

Fuente: Elaboración propia.

6.3.3 Mecanizado del rotor

El rotor fundido pasó por los siguientes procesos:

- Torneado: cilindrado exterior, alojamientos del eje y superficies críticas.

- Fresado CNC:
 - Caras laterales.
 - Asientos de cuchillas
 - Biseles y superficies funcionales.

- Electroerosión por hilo (Wire EDM):
 - mecanizado del agujero central del eje con alta exactitud.
 - tolerancia en circularidad y alineación.

Los roscados del rotor fueron realizados directamente durante las operaciones CNC.



Ilustración 32. Fundición nodular.

Fuente: Elaboración propia.

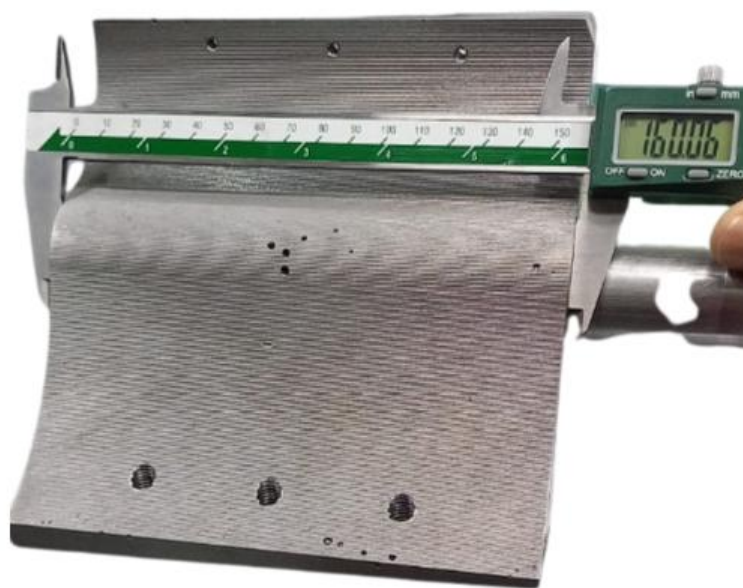


Ilustración 33. Rodete mecanizado.

Fuente: Elaboración propia.

6.4 Balanceo dinámico del conjunto rotor–eje–cuchillas

El balanceo dinámico del sistema rotativo es un proceso fundamental para garantizar la estabilidad del prototipo durante su operación, minimizar vibraciones y reducir cargas adicionales sobre las chumaceras, correas y la estructura principal. El procedimiento se realizó una vez ensamblado el conjunto completo, de manera que el balanceo correspondiera a las condiciones reales de trabajo.

6.4.1 Balanceo dinámico del conjunto rotor–eje–cuchilla

El balanceo dinámico del sistema rotativo es un proceso fundamental para garantizar la estabilidad del prototipo durante su operación, minimizar vibraciones y reducir cargas adicionales sobre las chumaceras, correas y la estructura principal. El procedimiento se realizó una vez ensamblado el conjunto completo, de manera que el balanceo correspondiera a las condiciones reales de trabajo.

6.4.2 Preparación del conjunto

Para iniciar el balanceo dinámico se ensambló el conjunto rotativo completo, compuesto por:

- Eje principal.
- Rotor fundido y mecanizado.
- Dos cuchillas móviles montadas con su tornillería y chavetas.

Dos cuchillas fijas instaladas en la cámara de corte (solo las móviles afectan el balanceo, pero se menciona el conjunto en general).

Esto permitió evaluar el comportamiento vibratorio final del sistema tal como operaría a 1500 rpm, evitando desviaciones causadas por diferencias entre el estado real y un montaje parcial.

6.4.3 Procedimiento de balanceo dinámico

El proceso fue realizado por Colombiana de Balanceo S.A.S., empleando equipo especializado de balanceo dinámico en dos planos. Este método permite identificar el desequilibrio tanto en el extremo motriz como en el extremo opuesto del eje, proporcionando una corrección más precisa que el balanceo estático.

El procedimiento seguido fue el siguiente:

1. Montaje del conjunto en la máquina de balanceo, calibrando los sensores de vibración para la velocidad objetivo de 1500 rpm.
2. Registro del desequilibrio inicial, donde se observaron niveles de vibración entre 5 y 7 mm/s, valores representativos de un desequilibrio significativo.

3. Corrección del desequilibrio en dos planos, aplicando hasta cinco corridas de balanceo por plano.
4. Ajustes progresivos, consistentes en remoción controlada de material y/o adición de masa en puntos estratégicos del rotor según las recomendaciones del equipo.
5. Verificación intermedia mediante gráficas FFT y polares, evaluando la disminución del pico dominante asociado a la frecuencia de giro.
6. Repetición del proceso hasta que el desequilibrio fuera reducido a valores aceptables según estándares internacionales.

Este procedimiento permitió corregir tanto la asimetría del rotor como las pequeñas variaciones en masa debidas a la instalación de las cuchillas móviles y tornillería.

Para mayor detalle técnico del registro, gráficas FFT, polares y valores exactos de corrección, consultar ANEXO C. Informe de balanceo dinámico del rotor.

6.4.4 Resultados del balanceo

Tras las sucesivas etapas de corrección, los niveles de vibración se redujeron hasta valores cercanos a 1 mm/s, dentro de los límites recomendados por la norma ISO 10816 para máquinas rotativas de esta categoría.

El conjunto rotor–eje–cuchillas logró una calidad de balanceo equivalente a G 2.5, adecuada para operación estable a la velocidad objetivo del prototipo.

Los beneficios principales del balanceo obtenido son:

- Reducción significativa de vibraciones mecánicas.
- Menor desgaste en rodamientos y chumaceras.
- Disminución de esfuerzos en la estructura y transmisión.
- Incremento de la vida útil del sistema rotativo.
- Mayor estabilidad y seguridad operativa durante la trituración.

Estos resultados confirman que el conjunto quedó apto para operar sin vibraciones críticas y con un comportamiento dinámico adecuado a los requerimientos del diseño.

6.5 Fabricación de la carcasa, cámara de corte y criba

6.5.1 Estructura principal en acero 3/8"

Las placas fueron ensambladas usando el sistema *Finger Joint*. Posteriormente:

- Se verificó el encaje y alineación.
- Se realizaron puntos de soldadura MIG.
- Se completó la soldadura alternada para evitar deformaciones.

Esta estructura soporta el rotor, la criba, la cámara de corte y el sistema de transmisión.



Ilustración 34. Modelo 3D ensamblaje lamina.

Fuente: Elaboración propia.

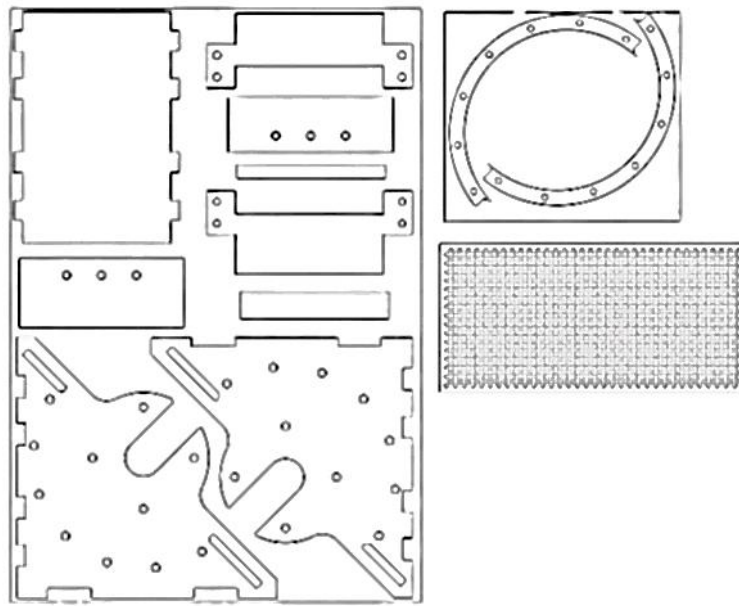


Ilustración 35. Plano de corte lamina trituradora Beta.

Fuente: Elaboración propia.

6.5.2 Criba y soportes

La criba fue fabricada en lámina de 1/8", perforada para obtener partículas ≤ 5 mm.

- Se roló para coincidir con la curvatura del rotor (Radio 115).

Los soportes de la criba, fabricados en acero de 3/16" y posteriormente soldados a la estructura principal.



Ilustración 36. Criba rolada y soportes.

Fuente: Elaboración propia.

6.6 Roscado y preparación previa al ensamble

Antes de cerrar la estructura se realizó el roscado de todos los agujeros:

- Roscado de cuchillas fijas.
- Roscado de soportes laterales de la criba.
- Roscado de bases para chumaceras.
- Roscados del rotor (realizados en CNC).

Este paso aseguró que todas las uniones atornilladas se ensamblaran sin interferencias una vez soldada la estructura.

6.7 Ensamble estructural y montaje de la criba

Con los roscados listos:

1. Se soldó completamente el marco estructural de 3/8".

2. Se instalaron los soportes de la criba.
3. Se colocó la criba y se atornilló utilizando los roscados preinstalados.
4. Se verificaron:
 - posición,
 - curvatura,
 - separación respecto al rotor,
 - uniformidad del ajuste.

6.8 Montaje del eje, rotor y cuchillas

Luego de preparar la estructura, se procedió al montaje del sistema rotativo:

Montaje del conjunto rotativo completo fuera de la estructura:

- Rotor.
- Eje.
- Chavetas.
- Cuchillas móviles.
- Tornillería asegurada.

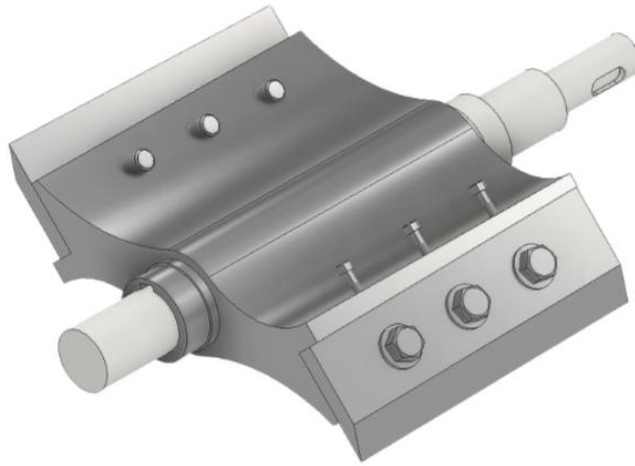


Ilustración 37. Modelo 3D rotor.

Fuente: Elaboración propia.

Instalación del eje en la estructura, reubicando las chumaceras en su posición final.

Ajuste de tornillos y verificación de rotación libre.

Montaje y alineación final de cuchillas fijas:

- ajuste del juego de corte (<1 mm),
- verificación manual del giro del rotor,
- control de interferencias.

Con esto la cámara de corte quedó completamente operativa.

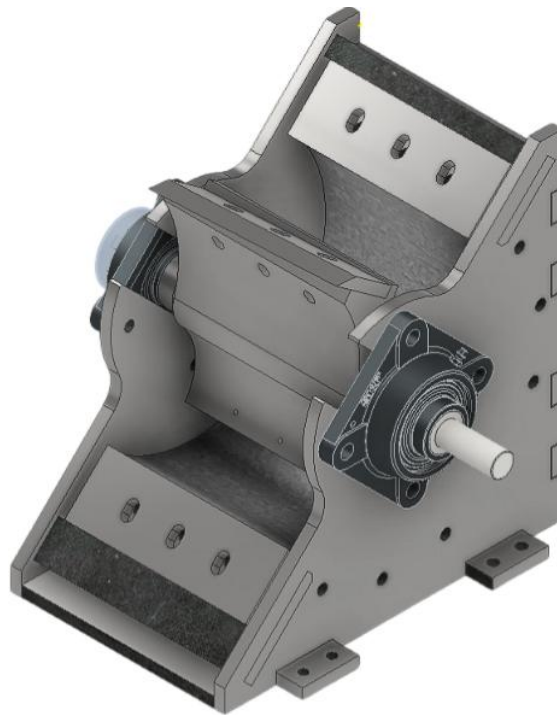


Ilustración 38. Modelo 3D ensamblaje completo.

Fuente: Elaboración propia.

6.9 Montaje del sistema de transmisión

El sistema de transmisión se instaló de la siguiente forma:

- Montaje del motor en su base regulable.
- Instalación de poleas en V en el eje y en el motor.
- Colocación y tensión final de correas.
- Alineación de poleas verificando paralelismo.
- Prueba manual del sistema para comprobar ausencia de roce.

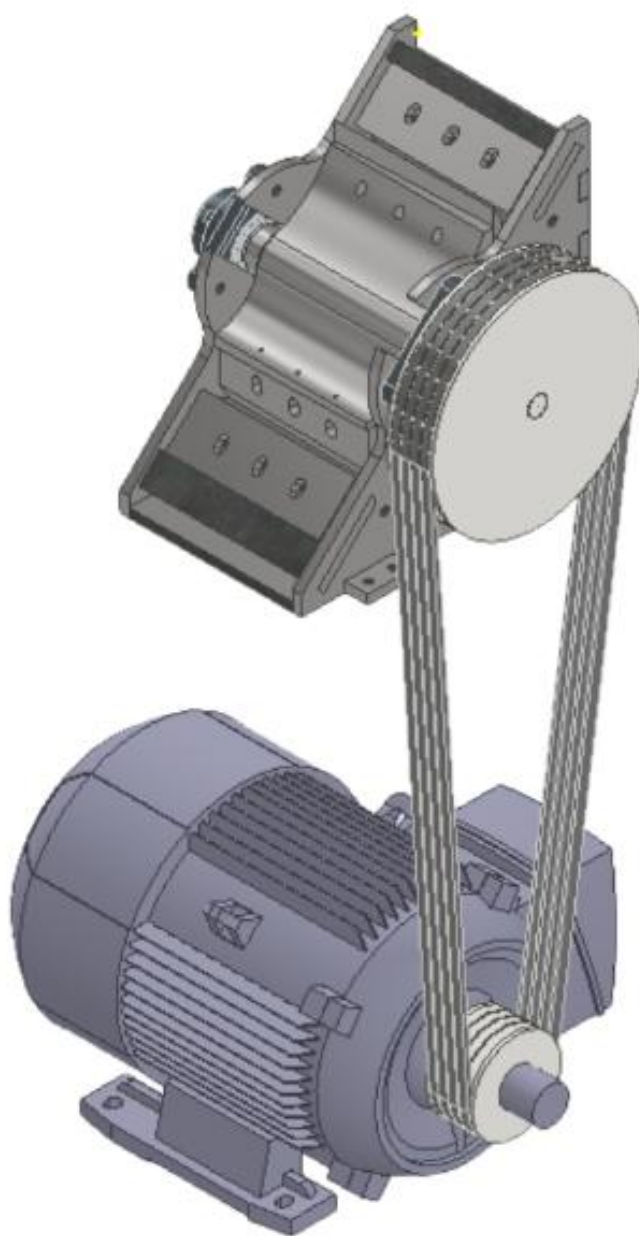


Ilustración 39. Montaje sistema de transmisión.

Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 40. Ensamble final trituradora Beta.

Fuente: Elaboración propia.

7. COSTOS DEL PROYECTO

El desarrollo del proyecto requiere una inversión en recursos tanto en especie como en efectivo. Los costos están distribuidos en dos fases:

- **Prototipo dinámico:** Financiado por **Carlos Daniel Angulo Vergara**, utilizado para validar el principio de funcionamiento del sistema de trituración y evaluar el desempeño de los componentes clave.
- **Prototipo Alpha:** Financiado por **Johan Steven Vega Peraza**, representa la versión final del equipo, con mejoras en su estructura y componentes para garantizar su correcto desempeño en el procesamiento de plásticos reciclados.

A continuación, se presenta el desglose de los costos asociados a cada fase del proyecto:

CONCEPTO	COSTO Alpha (COP)
Materiales estructurales	\$ 200.000,00
Cuchillas y mecanismos	\$ 345.000,00
Motor y transmisión	\$ 30.000,00
Procesos de fabricación	\$ 70.000,00
Ensamble y ajustes	\$ 100.000,00
Total	\$ 745.000,00

Tabla 5. Costos prototipo Alpha.

Fuente: Elaboración propia.

CONCEPTO	DESGLOCE	COSTO REAL Beta (COP)
Materiales estructurales	Fundición	\$ 250.000,00
	Mecanizado + Balanceo	\$ 2.034.000,00
	Lamina 3/8	\$ 400.000,00
	Criba + soportes	\$ 250.000,00
	Tornillería + macho	\$ 360.000,00
	Estructura perfilería	\$ 500.000,00
Cuchillas y mecanismos	Cuchillas	\$ 800.000,00
	Chumaceras	\$ 180.000,00
Motor y transmisión	Motor 10hp	\$ 1.100.000,00
	Arrancador estrella	\$ 400.000,00
	Correas	\$ 150.000,00
	Poleas	\$ 180.000,00
Procesos de fabricación	Soldadura	\$ 300.000,00
Ensamble y ajustes	Ajustes de ensamblaje	\$ 500.000,00
	Movimientos y transporte	\$ 600.000,00
Total		\$ 8.004.000,00
Total con aportes detrgentes LTDA		\$ 9.204.000,00

Tabla 6. Costos prototipo Beta.

Fuente: Elaboración propia.

Recursos en Especie

Además de los costos directos, el proyecto ha contado con **recursos en especie**, lo que permite optimizar el presupuesto y aprovechar herramientas disponibles. Estos recursos incluyen:

- **Uso de software de la universidad:** Se ha empleado software especializado para diseño y modelado 3D, facilitando el desarrollo del prototipo sin incurrir en costos adicionales.
- **Acceso a bibliografía y documentación técnica:** La investigación y fundamentación teórica del proyecto se han basado en documentos de libre acceso, artículos científicos y normativas disponibles en internet.
- **Asesoría docente:** Durante el desarrollo del proyecto, se ha contado con la guía del profesor encargado, quien ha brindado recomendaciones sobre el diseño y la selección de materiales.
- **Tiempo de trabajo no remunerado:** Tanto los integrantes del equipo como colaboradores han dedicado horas de trabajo al diseño, análisis y ajustes del prototipo sin representar un costo adicional para el proyecto.

8. RESULTADOS

Validación funcional del sistema de corte

Durante las pruebas iniciales se verifica el funcionamiento mecánico del prototipo a escala real. La máquina logra triturar botellas de PET posconsumo sin atascos, obteniendo hojuelas con un tamaño inferior a 5 mm, cumpliendo el requisito funcional establecido.

La operación a 1500 rpm muestra un comportamiento estable, sin bloqueos del rotor y con una interacción adecuada entre las cuchillas fijas y móviles.



Ilustración 41. Posición de corte.

Fuente: Elaboración propia

Comportamiento operativo: vibración y nivel de ruido

Las pruebas en vacío y con carga muestran niveles bajos de vibración y un ruido moderado, adecuados para una trituradora compacta.

No se evidencian resonancias ni movimientos anómalos en la estructura, lo cual confirma la correcta alineación entre motor, chumaceras y rotor, así como la rigidez estructural del chasis modular.

Conformidad con los requerimientos del cliente

Los objetivos funcionales establecidos por el cliente se cumplieron.

El diseño final presenta:

- Capacidad de procesamiento entre 500 kg y 1 tonelada al día.
- Tamaño de hojuela inferior a 5 mm.
- Operación estable a 1500 rpm.
- Diseño compacto.
- Estabilidad validada mediante balanceo dinámico.
- Facilidad de mantenimiento y extracción del material.
- Compatibilidad con el proceso posterior de extrusión para impresión 3D.

Con esto se confirma que el sistema diseñado cumple los requisitos técnicos y operacionales definidos desde el planteamiento del problema.

9. CONCLUSIONES

1. Se diseñó y fabricó un prototipo funcional de trituradora de plásticos, capaz de obtener hojuelas menores a 5 mm y cumplir con los requerimientos operativos definidos para aplicaciones de impresión 3D.
2. El proceso de diseño desde el prototipo conceptual 3D hasta el prototipo Alpha en acero permite depurar geometrías, validar el mecanismo de corte y corregir fallas estructurales, lo que resulta en una máquina estable, segura y manufacturable con procesos convencionales.
3. Los cálculos de potencia, torque y la selección del sistema de transmisión justifican el uso de un motor de 10 HP, y las pruebas demuestran que el sistema es capaz de operar de manera continua sin atascos, vibraciones excesivas ni pérdida de rendimiento.
4. El prototipo final cumple los requerimientos funcionales y de capacidad establecidos por el cliente, y constituye una base sólida para futuras mejoras, automatización y escalamiento hacia un equipo de uso industrial ligero.

10. BIBLIOGRAFÍA

Advanced Polymer Machinery. (2022). High-speed rotor technology for fine particle production.

Ameco Research. (2024). Why is the global filament material market expected to grow significantly? 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com>

Anónimo. (2020). Mechanical properties of direct waste printing of polylactic acid with universal pellets extruder: Comparison to fused filament fabrication on open-source desktop three-dimensional printers. 3D Print Addit Manuf.

Anónimo. (2020). Polymer recycling and additive manufacturing in an open-source context: Optimization of processes and methods. Proceedings of the Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – SFF.

Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI). (2023). Industria del plástico y sostenibilidad en Colombia.

Beer, F., Johnston, E., & DeWolf, J. (2012). *Mechanics of Materials* (7th ed.). McGraw-Hill.

Budynas, R., & Nisbett, J. (2015). *Shigley's Mechanical Engineering Design* (10th ed.). McGraw-Hill.

Callister, W. D., & Rethwisch, D. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed.). Wiley.

Cryogenic Processing Journal. (2023). Advances in cryogenic grinding of polymers.

Energy Efficiency Agency. (2021). High-efficiency motor adoption report. International Energy Agency.

European Plastics Recyclers. (2022). Annual report: mechanical recycling trends. EuPR.

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Plastic waste management: A review of mechanical recycling and chemical recycling. *Waste Management*, 68, 1–13.

<https://www.researchgate.net>

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

Grand View Research. (s.f.). 3D printing industry analysis.

<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/3d-printing-industry-analysis>

Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 364(1526), 2115–2126. <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstb.2008.0311>

Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2019). Mechanical and thermomechanical recycling of polyolefin plastics. *ScienceDirect*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352550917301360>

Industry 4.0 Recycling Report. (2023). Smart monitoring technologies for waste processing equipment. Manufacturing Insight Group.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2023). Estudio sobre la generación de residuos plásticos en Bogotá.

Jadhav, S., & Parkar, P. (2021). Design and development of plastic shredder machine. Zenodo. <https://zenodo.org/record/4898120>

Kulkarni, A., & Kharat, A. (2019). Design and fabrication of crusher machine for plastic wastes. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 8(1), 12–15. <https://www.ijert.org/design-and-fabrication-of-crusher-machine-for-plastic-wastes>

Kulkarni, P. S., & Kharat, A. H. (2019). Technological advances in plastic recycling systems: A review. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8(1), 234–239. <https://doi.org/10.35940/ijrte.A1780.108119>

McCabe, W., Smith, J., & Harriott, P. (2005). *Unit Operations of Chemical Engineering* (7th ed.). McGraw-Hill.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2023). Informe nacional sobre la gestión de residuos plásticos en Colombia. Gobierno de Colombia.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2023). Política Nacional para la Gestión Sostenible de los Plásticos en Colombia. <https://www.minambiente.gov.co>

Nizamuddin, S., Baloch, H. A., Griffin, G. J., Madapusi, S., Mubarak, N. M., & Srinivasan, M. P. (2020). An overview of plastic waste recycling in the 3D printing industry. *Materials*, 13(2), 14–20. <https://doi.org/10.3390/ma13020420>

Nizamuddin, S., Jadhav, A., Kalimuthu, P., Mubarak, N. M., Nizami, A. S., & Jami, M. S. (2020). A critical review on recycling of end-of-life polymeric materials for sustainable design and environmental pollution control. *Environmental Pollution*, 263, 114–116. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749119362868>

Nizamuddin, S., Siddiqui, Z., Mubarak, N., & Baloch, H. A. (2020). Recent advancements in plastic packaging recycling: A mini-review. *Resources*, 9(6). <https://www.mdpi.com/2079-9276/9/6/89>

Ogedengbe, T. I., & Osunkoya, O. O. (2020). Development of a waste plastic shredding machine. *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*, 12(2), 213–219. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/20421338.2021.1953920>

Palanivelu, K., & Thanasekaran, K. (2019). Challenges and advances in plastic recycling: A mini-review. *Resources*, 8(6). <https://www.mdpi.com/2079-9276/9/6/89>

Precious Plastic. (2024). Industrial shredder documentation.

<https://www.preciousplastic.com>

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2022). Informe sobre plásticos en el medio ambiente.

Rapid Granulator. (2022). Product catalog and technical overview.

<https://www.rapidgranulator.com>

Shigley, J., & Mischke, C. (2011). Standard Handbook of Machine Design (3rd ed.). McGraw-Hill.

Shivapurmath, G. M., Swamy, V. S., & Singh, R. (2017). Recycling of waste plastic for 3D printing filament and applications. *Procedia CIRP*, 77, 417–420.

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.07.054>

Shivapurmath, S. P., Kariduraganavar, M. Y., & Katti, K. R. (2017). Performance analysis of shredder machine for waste plastic recycling. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 8(8), 17–21. <https://www.ijser.org/researchpaper/Performance-Analysis-of-Shredder-Machine-for-Waste-Plastic-Recycling.pdf>

Singh, R., Singh, S., & Chohan, J. S. (2018). Thermomechanical properties of recycled polystyrene for additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(1–4), 623–637. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-017-0231-1>

SNS Insider. (2025). 3D printing filament market size to surpass USD 5.85 billion by 2033 at a CAGR of 19.49%. GlobeNewswire. <https://www.globenewswire.com/news-release/2025/10/13/3165359/0/en/3D-Printing-Filament-Market-Size-to-Surpass-USD-5-85-Billion-by-2033-at-a-CAGR-of-19-49-Research-by-SNS-Insider.html>

Thermal Pretreatment Institute. (2021). Thermal softening techniques for polymer recycling.

Weima Maschinenbau. (2021). Shredding & recycling technology overview. <https://www.weima.com>

Zerma Machinery. (2023). GSL & GSE series technical specifications. <https://www.zerma.com>

11. ANEXOS

ANEXO A. MATRICES PUGH

CONTROL					
Criterio	Importancia	PLC	MICROCONTROLADOR	CONTROLADOR BASADO EN PC	LOGICA CABLEADA
Costo	0,4	-1	1	-1	0
Facilidad de Programación	0,2	-1	-1	-1	-1
Interfaz de Usuario	0,2	1	1	1	1
Mantenimiento	0,2	0	0	0	0
Entre más alto el valor de importancia y evaluación mejor	RESULTADOS	-0,4	0,4	-0,4	0

Tabla 7. Selección del sistema de control.

Fuente: Elaboración propia.

INGRESO MATERIA PRIMA					
Criterio	Importancia	Alimentador por gravedad	Alimentador vibratorio	Banda transportadora inclinada	Tolva
Capacidad de Carga	0,1	0	1	1	0
Velocidad de Alimentación	0,2	-1	1	1	1
Costo	0,2	1	-1	-1	1
Mantenimiento	0,2	1	-1	-1	0
Seguridad	0,3	-1	1	1	1
Entre más alto el valor de importancia y evaluación mejor	RESULTADOS	-0,1	0,2	0,2	0,7

Tabla 8. Selección del sistema de ingreso de materia prima

Fuente: Elaboración propia

TRITURADO								
Criterio	Importancia	Cuchillas rotativas horizontales	Mono axial	Bi axial	Cuatro ejes	Trituradora de rodillos	Cámara de corte	Molino de impacto
Capacidad de Triturado	0,1	-1	0	1	1	-1	1	1
Uniformidad del Tamaño de Partícula	0,2	-1	1	1	1	-1	1	-1
Durabilidad	0,1	1	1	1	1	-1	0	-1
Eficiencia Energética	0,1	1	1	0	-1	-1	0	-1
Facilidad de Mantenimiento	0,1	1	1	1	-1	1	1	-1
Costo	0,2	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1
Seguridad Operativa	0,1	-1	1	1	1	-1	1	-1
Ruido y Vibración	0,1	-1	-1	-1	-1	1	0	-1
Entre más alto el valor de importancia y evaluación mejor	RESULTADOS	-0,4	0,3	0,3	2,7756E-17	-0,2	0,3	-0,8

Tabla 9. Selección del sistema de triturado.

Fuente: Elaboración propia.

CLASIFICACIÓN HOJUELAS					
Criterio	Importancia	Criba vibratoria	Clasificador por aire	Tamiz separado	Malla interna
Eficiencia de Clasificación	0,3	0	0	0	0
Velocidad de Clasificación	0,1	1	1	-1	0
Costo	0,1	-1	1	1	1
Espacio Requerido	0,2	-1	-1	1	1
Flexibilidad	0,3	0	0	1	1
Entre mas alto el valor de importancia y evaluación mejor	RESULTADOS	-0,2	0	0,5	0,6

Tabla 10. Selección del sistema de clasificación.

Fuente: Elaboración propia.

EXPULSIÓN HOJUELAS				
Criterio	Importancia	Sistema neumático	Banda transportadora	Expulsión por gravedad
Velocidad de Expulsión	0,1	1	1	0
Costo	0,2	-1	-1	1
Fiabilidad	0,2	0	1	0
Compatibilidad	0,3	0	1	1
Facilidad de Operación	0,2	0	1	1
Entre mas alto el valor de importancia y evaluación mejor	RESULTADOS	-0,1	0,6	0,7

Tabla 11. Selección del sistema de expulsión.

Fuente: Elaboración propia.

DEPÓSITO				
Criterio	Importancia	Canecas	Cajas en banda transportadora	Entrada directa extrusora
Espacio	0,5	-1	-1	-1
Costo	0,2	1	0	0
Operación	0,2	-1	1	0
Mantenimiento	0,1	0	0	0
Entre mas alto el valor de importancia y evaluación mejor	RESULTADOS	-0,5	-0,3	-0,5

Tabla 12. Selección del sistema de depósito.

Fuente: Elaboración propia.

EXTRACCIÓN				
Criterio	Importancia	Canecas que se recogen manual cada cierto tiempo	Banda transportadora	Entrada directa extrusora
Espacio	0,3	-1	-1	0
Costo	0,2	1	-1	-1
Fabricación	0,2	1	-1	0
Operación	0,1	-1	1	1
Mantenimiento	0,2	1	0	0
Entre mas alto el valor de importancia y evaluacion mejor	RESULTADOS	0,2	-0,6	-0,1

Tabla 13. Selección del sistema de extracción.

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO B. Cálculos detallados de potencia, par y selección del motor:

Para determinar los requerimientos de potencia y par del motor de la trituradora tipo *cutting chamber*, se desarrolla una hoja de cálculo que permite analizar el comportamiento dinámico del sistema en función de la velocidad de giro del eje (RPM) y de la carga de corte. La metodología combina parámetros geométricos del rotor, propiedades mecánicas del material a cortar y la eficiencia real del motor eléctrico.

1. Estimación del par resistente de corte

El par necesario para vencer el proceso de cizallamiento se calcula a partir del esfuerzo cortante del material y del área efectiva de contacto entre cuchillas. Dado que el corte no ocurre sobre la longitud total de 160–170 mm, sino de forma progresiva debido al ángulo de las cuchillas (1,2°–2°), el área efectiva se redujo empleando un factor de contacto:

$$A_{\text{efectiva}} = L_{\text{cuchilla}} \cdot t \cdot k$$

Donde:

- L_{cuchilla} = longitud nominal (170 mm)
- t = espesor del material introducido
- k = factor de cizalla (0.05–0.15 según el ángulo, valor usado en tabla)

El esfuerzo cortante usado corresponde a valores típicos:

- PET: $\tau \approx 35 - 45 \text{ MPa}$

- PA6-CF: $\tau \approx 50 - 65 \text{ MPa}$

El par resistente se calcula como:

$$T_{\text{corte}} = F_{\text{corte}} \cdot r = (\tau \cdot A_{\text{efectiva}}) \cdot r$$

donde r es el radio del rotor.

2. Par en vacío

El par en vacío se estima a partir de valores típicos para motores entre 1 y 5 HP a bajas RPM, que suelen mostrar pérdidas mecánicas equivalentes a:

$$T_{\text{vacío}} \approx 1.5 - 3.0 \text{ N}$$

Esto incluye fricción en rodamientos, rozamiento de cuchillas sin carga y pérdidas internas del motor.

Se adopta un valor constante dentro del Excel que permite el cálculo de potencia mínima requerida a distintos regímenes de giro.

3. Cálculo de la potencia

La hoja calcula automáticamente la potencia para cada valor de RPM usando la ecuación estándar:

$$P = \frac{T \cdot \omega}{746}$$

con:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot \text{RPM}}{60}$$

La tabla analiza valores crecientes de RPM (500–8000).

A medida que aumenta la velocidad, la potencia requerida para vencer un mismo par crece de forma lineal, pero la **potencia disponible del motor disminuye** debido a que se corrige por eficiencia real.

4. Inclusión de la eficiencia del motor

En el Excel se incluye una celda de eficiencia global:

$$\eta = \eta_{\text{eléctrica}} \cdot \eta_{\text{mecánica}}$$

Valores típicos usados:

- motores pequeños: 0.70 – 0.85
- eficiencia mecánica de transmisión y rodamientos: 0.90 – 0.95

Finalmente:

$$P_{\text{real}} = \frac{P_{\text{requerida}}}{\eta}$$

Esta potencia corregida es la que se compara para seleccionar un motor comercial.

5. Construcción de la tabla final

El Excel genera una tabla cuyos campos son:

1. RPM
2. Velocidad angular (rad/s)
3. Par en vacío (N·m)
4. Par de corte (N·m)
5. Par total = T vacío + T corte
6. Potencia requerida (W / HP)
7. Potencia corregida por eficiencia
8. Potencia equivalente del motor comercial

La tabla permite identificar:

- La **potencia mínima en vacío** del sistema.
- El **pico de potencia en carga** para materiales como PET y PA6-CF.

- La zona de trabajo óptima para el motor según RPM.
- La potencia nominal que debe tener el motor para funcionar sin caer de régimen.

Espesor de corte	d	5
MPa de corte	t	60
Torque en vacio	Tf	2
Longitud de corte	Lc	160
Angulo de enfrentamiento	alpha	1,2
Coeficiente de trabajo maximo	k	0,4
Radio de presion max	r	94

RPM	d(mm)	Lc(mm)	t(Mpa)	r(mm)	Tf(N*m)	Area (m2)	Tao (Pa)	Fuerza (N)	r (m)	Torque de corte (N*m)	Torque Total (N*m)	omega (rad/s)	Potencia (W)	HP
500	5	160	60	94	2	1,67539E-05	60000000	1005,236154	0,094	37,79687941	39,79687941	52,36	2083,76	2,79
1000	5	160	60	94	2	1,67539E-05	60000000	1005,236154	0,094	37,79687941	39,79687941	104,72	4167,52	5,59
1500	5	160	60	94	2	1,67539E-05	60000000	1005,236154	0,094	37,79687941	39,79687941	157,08	6251,28	8,38
2000	5	160	60	94	2	1,67539E-05	60000000	1005,236154	0,094	37,79687941	39,79687941	209,44	8335,04	11,18
2500	5	160	60	94	2	1,67539E-05	60000000	1005,236154	0,094	37,79687941	39,79687941	261,80	10418,80	13,97
3000	5	160	60	94	2	1,67539E-05	60000000	1005,236154	0,094	37,79687941	39,79687941	314,16	12502,56	16,77
3500	5	160	60	94	2	1,67539E-05	60000000	1005,236154	0,094	37,79687941	39,79687941	366,52	14586,32	19,56
4000	5	160	60	94	2	1,67539E-05	60000000	1005,236154	0,094	37,79687941	39,79687941	418,88	16670,08	22,35
4500	5	160	60	94	2	1,67539E-05	60000000	1005,236154	0,094	37,79687941	39,79687941	471,24	18753,84	25,15
5000	5	160	60	94	2	1,67539E-05	60000000	1005,236154	0,094	37,79687941	39,79687941	523,60	20837,60	27,94
5500	5	160	60	94	2	1,67539E-05	60000000	1005,236154	0,094	37,79687941	39,79687941	575,96	22921,36	30,74
6000	5	160	60	94	2	1,67539E-05	60000000	1005,236154	0,094	37,79687941	39,79687941	628,32	25005,12	33,53
6500	5	160	60	94	2	1,67539E-05	60000000	1005,236154	0,094	37,79687941	39,79687941	680,68	27088,88	36,33
7000	5	160	60	94	2	1,67539E-05	60000000	1005,236154	0,094	37,79687941	39,79687941	733,04	29172,64	39,12
7500	5	160	60	94	2	1,67539E-05	60000000	1005,236154	0,094	37,79687941	39,79687941	785,40	31256,40	41,92
8000	5	160	60	94	2	1,67539E-05	60000000	1005,236154	0,094	37,79687941	39,79687941	837,76	33340,16	44,71

ANEXO C. Cálculos del eje (30 mm)

A — Datos base

- Diámetro eje: $d = 30 \text{ mm} = 0.03 \text{ m}$
- Radio: $c = 0.015 \text{ m}$
- Longitud entre apoyos:

$$L = 0.19725 \text{ m}$$

- Fuerza de corte:

$$F = 1172.78 \text{ N}$$

- Torque operativo: $T_{op} = 46.10 \text{ N}\cdot\text{m}$
- Torque pico: $T_{pico} = 159.5 \text{ N}\cdot\text{m}$

Material (1045):

$$E = 210 \text{ GPa}, G = 79 \text{ GPa}, S_{ut} = 580 \text{ MPa}$$

B — Propiedades geométricas

$$I = \frac{\pi d^4}{64} = 3.98 \times 10^{-8}$$

$$J = \frac{\pi d^4}{32} = 7.95 \times 10^{-8}$$

C — Reacciones en los apoyos

$$R = \frac{F}{2} = 586.39 \text{ N}$$

D — Momento flector máximo

Carga centrada en un tramo simplemente apoyado:

$$M_{max} = \frac{FL}{4}$$

$$M_{max} = \frac{1172.78(0.19725)}{4}$$

$$M_{max} = 57.90 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$\boxed{M_{max} = 57.9 \text{ N}\cdot\text{m}}$$

E — Tensiones

1. Flexión

$$\sigma_b = \frac{M_{max}c}{I}$$

$$\sigma_b = \frac{57.9(0.015)}{3.98 \times 10^{-8}}$$

$$\boxed{\sigma_b = 21.83 \text{ MPa}}$$

2. Torsión (operativa)

$$\tau_t = \frac{T_{op} c}{J}$$

$$\tau_t = \frac{46.10(0.015)}{7.95 \times 10^{-8}}$$

$$\boxed{\tau_t = 8.70 \text{ MPa}}$$

3. Von Mises

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_b^2 + 3\tau_t^2}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{(21.83)^2 + 3(8.70)^2}$$

$$\boxed{\sigma_{eq} = 27.9 \text{ MPa}}$$

F — Rigidez

1. Flecha máxima

$$\delta_{max} = \frac{FL^3}{48EI}$$

$$\delta_{max} = \frac{1172.78(0.19725)^3}{48(210 \times 10^9)(3.98 \times 10^{-8})}$$

$$\delta_{max} = 1.47 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$\boxed{\delta_{max} = 0.0147 \text{ mm}}$$

2. Ángulo de torsión (operativo)

$$\theta = \frac{T_{op}L}{JG}$$

$$\theta = \frac{46.10(0.19725)}{(7.95 \times 10^{-8})(79 \times 10^9)}$$

$$\theta = 0.00145 \text{ rad}$$

$$\boxed{\theta = 0.083^\circ}$$

G — Fatiga (Goodman)

Datos:

$$S'_e = 0.5S_{ut} = 290 \text{ MPa}$$

$$k_a = 0.50,$$

$$k_b = 0.85$$

$$k_c = 0.95$$

$$S_e = 290(0.50)(0.85)(0.95) = 117 \text{ MPa}$$

1. Alternante

$$\sigma_a \approx \sigma_b = 21.83 \text{ MPa}$$

2. Media (torsión)

$$\sigma_m = 3\tau_t = 26.1 \text{ MPa}$$

3. Goodman

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{21.83}{117} + \frac{26.1}{580}$$

$$= 0.186 + 0.045$$

$$\boxed{Goodman = 0.231}$$

$$FOS_{fatiga} = \frac{1}{0.231} = 4.32$$

$$\boxed{FOS_{fatiga} \approx 4.3}$$

H — Torsión límite

Esfuerzo cortante admisible (FS = 2.5):

$$\tau_{adm} = 80.8 \text{ MPa}$$

$$T_{lim} = \tau_{adm} \frac{J}{c}$$

$$T_{lim} = 80.8 \frac{7.95 \times 10^{-8}}{0.015}$$

$$\boxed{T_{lim} = 428 \text{ N}\cdot\text{m}}$$

ANEXO C. Informe de balanceo dinámico del rotor

Este anexo contiene el registro del proceso de balanceo dinámico realizado por Colombiana de Balanceo S.A.S., donde se corrige el desequilibrio del rotor y del conjunto cuchillas–eje para garantizar operación estable a 1500 rpm.

El rotor con cuchillas es sometido a un proceso de balanceo dinámico profesional para garantizar su operación estable a alta velocidad. Las pruebas se realizan en dos planos de corrección, registrando inicialmente niveles de vibración entre **5 y 7 mm/s**, valores propios de un desequilibrio significativo.

A través de cinco corridas de corrección en cada plano, el desequilibrio se reduce progresivamente hasta alcanzar valores finales cercanos a **1 mm/s**, dentro del rango aceptado por la norma **ISO 10816** para máquinas rotativas de este tipo. Las gráficas FFT y polares evidencian la disminución del pico dominante asociado a la frecuencia de giro.

El balanceo se ejecuta primero en las piezas por separado y luego en conjunto (rotor + cuchillas + eje), logrando una calidad final equivalente a **G 2.5**, adecuada para operación estable a 1500 rpm en la trituradora.

En conjunto, el proceso confirma que el rotor queda apto para operar sin vibraciones críticas, reduce el desgaste de los rodamientos y garantiza la estabilidad mecánica del sistema de trituración.



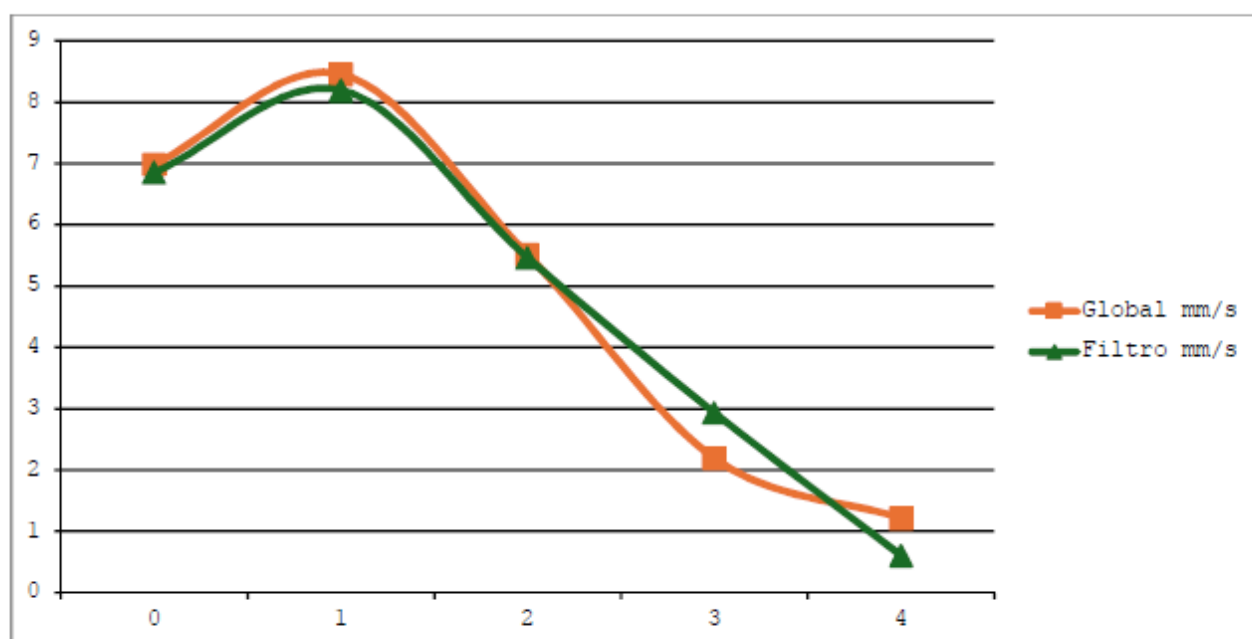
Fecha:01/11/2025

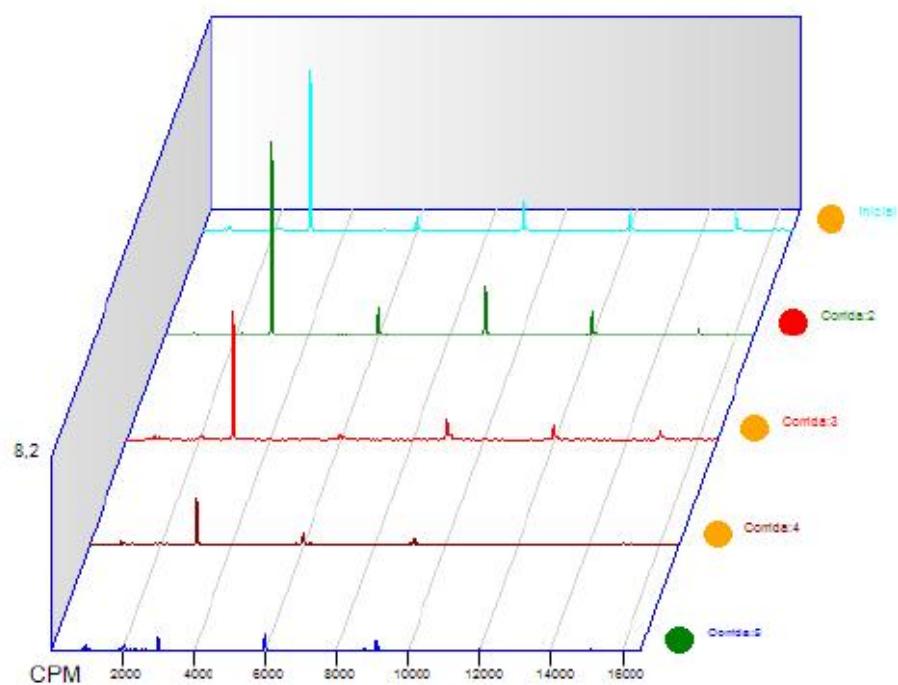
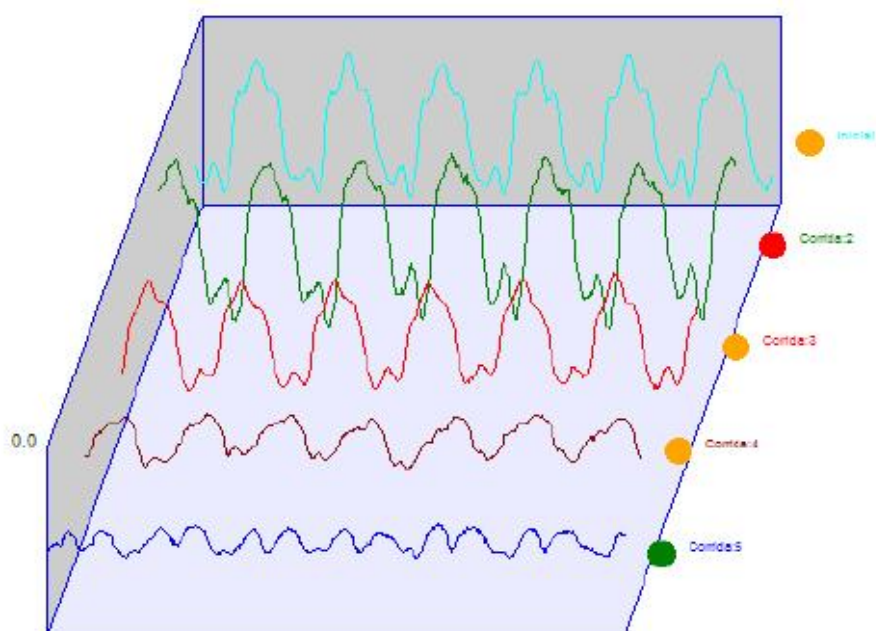
REPORTE DE BALANCEO DINÁMICO
CUCHILLAS DE 9 Ø" x 2" A 6000 RPM.
FABRIN
15428

Evolución del plano 1

Corrida	Global mm/s	Filtro mm/s	Max FFT mm/s	Frec Max CPM	Tacómetro CPM	Fase
Inicial	6,99	6,85	6,85	2972	2972	340
Corrida:2	8,45	8,20	8,20	2972	2972	327
Corrida:3	5,51	5,46	5,46	2972	2972	356
Corrida:4	2,20	2,94	2,08	2971	2971	16
Corrida:5	1,22	0,61	0,74	5942	2971	157

Evolución del plano 1



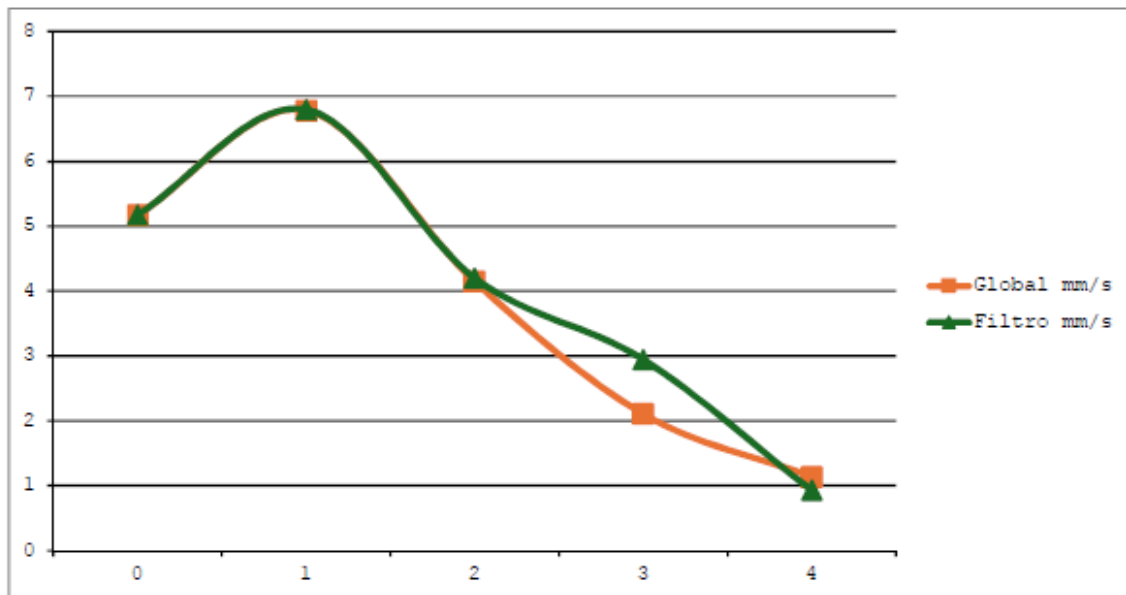


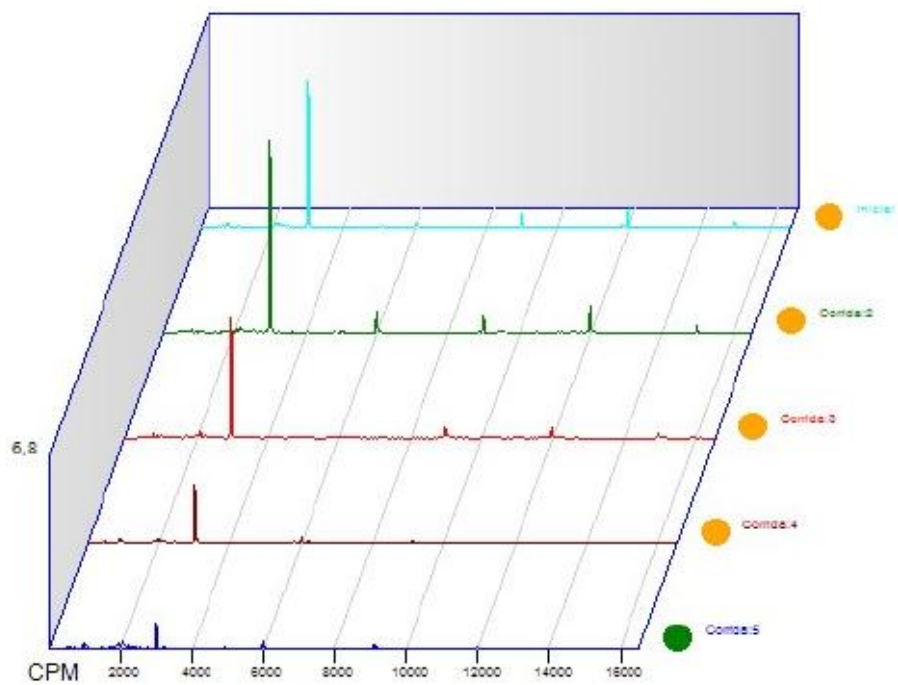
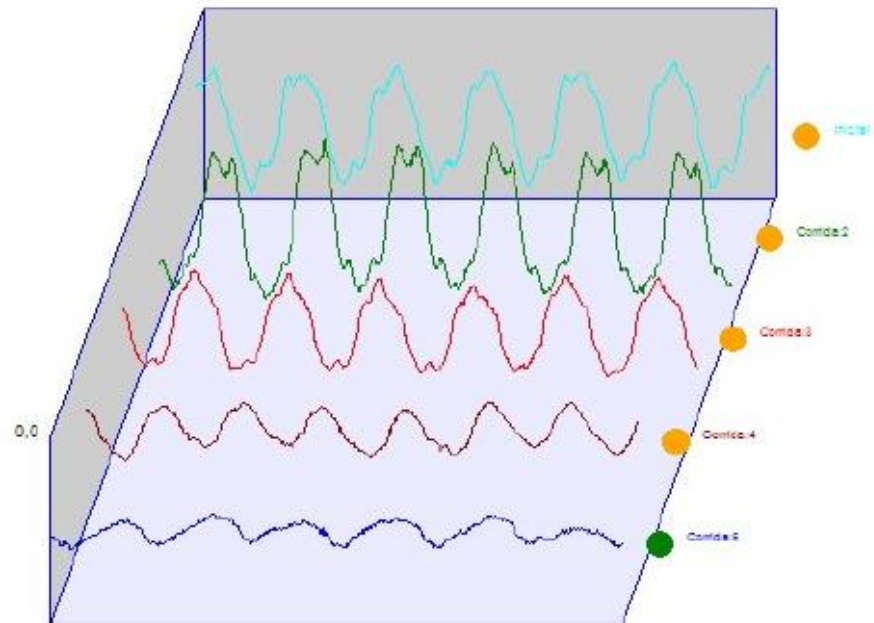


Evolución del plano 2

Corrida	Global mm/s	Filtro mm/s	Max FFT mm/s	Frec Max CPM	Tacómetro CPM	Fase
Inicial	5,17	5,17	5,17	2972	2972	149
Corrida:2	6,78	6,80	6,80	2972	2972	138
Corrida:3	4,15	4,20	4,20	2972	2972	166
Corrida:4	2,11	2,95	2,08	2971	2971	201
Corrida:5	1,14	0,93	0,93	2971	2971	271

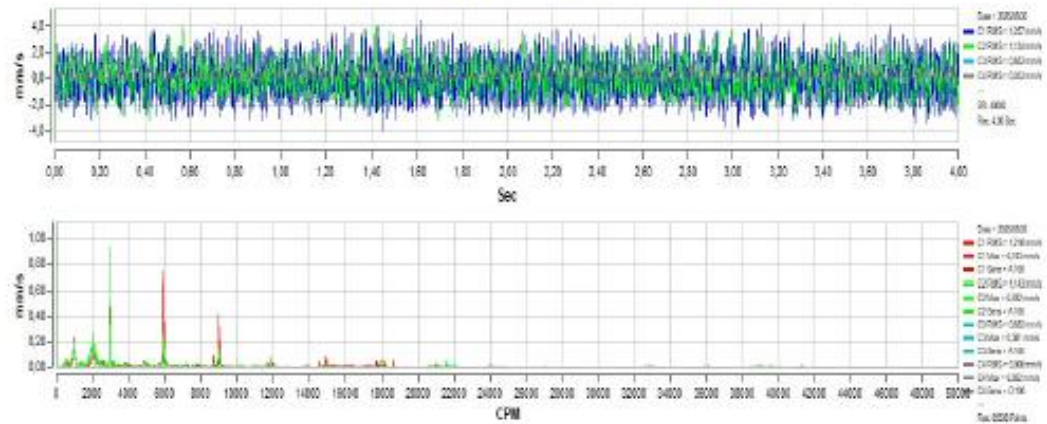
Evolución del plano 2



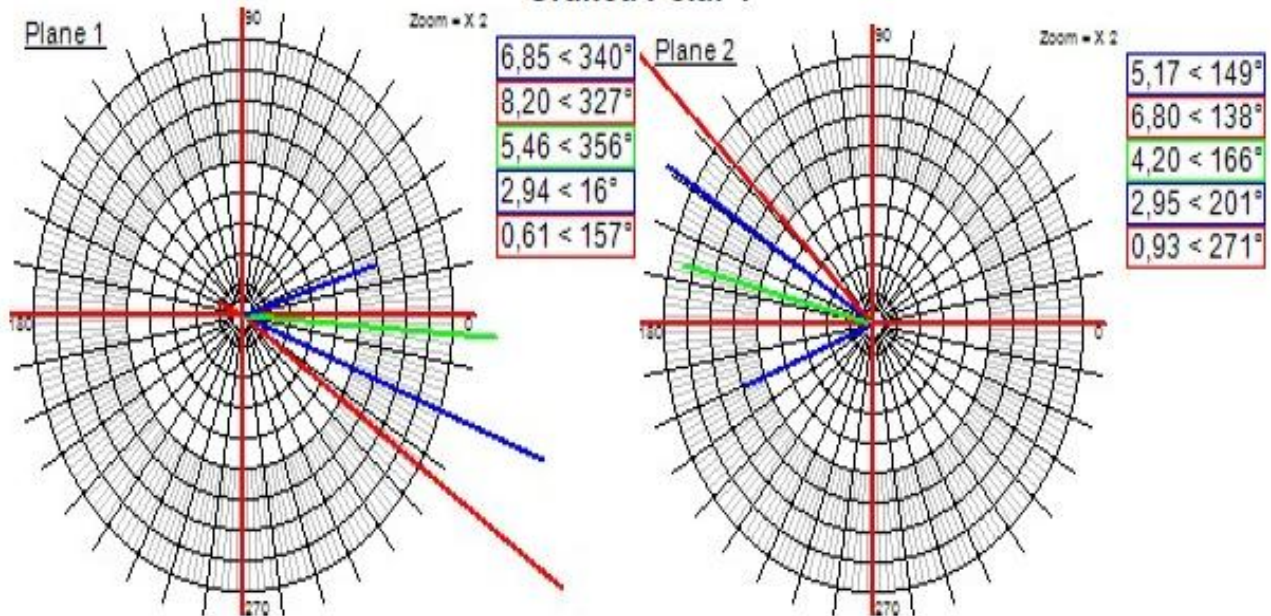




Gráficas FFT Final



Gráfica Polar 1





ISO 10816

SEVERIDAD DE LA VIBRACION ISO 10816						
Velocidad de Vibración Vrms	MÁQUINA		CLASE I	CLASE II	CLASE III	CLASE IV
	in/s	mm/s	Pequeñas < 3.7kW-5HP	Medianas < 373kW-500HP	Grandes con cimentación rígida	Grandes con cimentación suave
	0.01	0.28		Excelente		
	0.02	0.45				
	0.03	0.71				
	0.04	1.12		Bien		
	0.07	1.80				
	0.11	2.80		Satisfactorio		
	0.18	4.50				
	0.28	7.10		Mal		
	0.44	11.2				
	0.71	18.0				
	1.10	28.0		Inaceptable		
	1.77	45.0				



Grado de Calidad G 2.5

Observaciones: Se balancean piezas por separado y luego en conjunto para un mejor refinamiento.

MEDIDAS DE MEJORA A IMPLEMENTAR EN EL DISEÑO Y LA SEGURIDAD DEL EQUIPO

Como resultado del proceso de evaluación técnica del prototipo funcional de la trituradora de plásticos y del diálogo sostenido durante la sustentación del proyecto, se implementarán una serie de mejoras orientadas a fortalecer la seguridad operativa, la confiabilidad mecánica y la estabilidad estructural del equipo, manteniendo inalterados el principio de funcionamiento y los parámetros de diseño previamente definidos.

1. Implementación de un sistema de ajuste y compensación de holgura en la transmisión por correas

Se implementará un sistema de tensado progresivo de correas mediante rieles deslizantes para el motor eléctrico, que permitirá su desplazamiento controlado con respecto al eje del rotor.

Este sistema permitirá:

Compensar de forma gradual la elongación natural de las correas tipo 3V-670 durante su vida útil.

Mantener una tensión adecuada y constante, asegurando una correcta transmisión de potencia desde el motor trifásico de 15 HP hacia el eje del rotor.

Reducir fenómenos de deslizamiento, vibraciones y pérdidas de eficiencia, así como el desgaste prematuro de correas y poleas.

El ajuste se realizará durante paradas programadas de mantenimiento, sin requerir el desmontaje del sistema de transmisión.

2. Incorporación de guardas de seguridad en el sistema de poleas y correas

Se instalarán guardas mecánicas de protección que cubrirán completamente el conjunto de poleas y correas de transmisión, con el propósito de minimizar los riesgos asociados a partes móviles expuestas.

Estas protecciones permitirán:

Evitar el contacto accidental del operario con elementos en rotación.

Prevenir el atrapamiento de ropa, herramientas u objetos externos.

Reforzar el cumplimiento de criterios básicos de seguridad industrial aplicables a maquinaria rotativa.

Las guardas serán desmontables, permitiendo el acceso controlado únicamente para labores de inspección y mantenimiento, siempre con el equipo desenergizado.

3. Rediseño de la tolva de alimentación como elemento de seguridad pasiva

Se rediseñará la tolva superior de alimentación, incrementando su longitud con el fin de que actúe como una barrera física de seguridad, reduciendo significativamente el riesgo de acceso involuntario a la zona de corte.

La longitud de la tolva se definirá de manera que:

Imposibilite el alcance manual de las cuchillas, incluso con extensión máxima del brazo.

Obligue a la alimentación del material exclusivamente por gravedad, sin intervención manual directa.

Refuerce las prácticas de operación segura descritas en el manual de usuario.

Esta medida funcionará como un sistema de seguridad pasiva, independiente de dispositivos electrónicos o sensores.

4. Implementación de patas de anclaje para la reducción de vibraciones

Se incorporarán patas de anclaje en la mesa o base de apoyo de la trituradora, con el objetivo de mejorar la estabilidad del conjunto y disminuir las vibraciones generadas durante la operación.

Este sistema permitirá:

Fijar el equipo de forma segura a la superficie de instalación.

Reducir la transmisión de vibraciones producidas por el rotor, el impacto del material y el sistema de corte.

Mejorar la alineación general del conjunto mecánico, disminuyendo esfuerzos adicionales sobre el eje, las chumaceras y la estructura.

La reducción de vibraciones contribuirá a una mayor vida útil del equipo y a una operación más estable.

5. Configuración de un botón de parada de emergencia de fácil acceso

Se instalará un botón de parada de emergencia (STOP) ubicado estratégicamente en las proximidades de la tolva de alimentación, que corresponde a la zona de mayor interacción del operario con el equipo.

Esta configuración permitirá:

Una respuesta inmediata ante situaciones de riesgo, atascos o condiciones anómalas de operación.

La detención rápida del motor y del sistema de trituración.

El fortalecimiento de las condiciones de seguridad durante la operación normal del equipo.

Este elemento actuará como un sistema de seguridad activa, complementando las protecciones mecánicas del diseño.

Conclusión técnica

Las mejoras descritas serán implementadas con el fin de reforzar el enfoque de seguridad, confiabilidad y operación industrial del prototipo de trituradora de plásticos. Estas acciones permitirán que el diseño final incorpore medidas preventivas y correctivas coherentes con buenas prácticas de ingeniería mecánica, sin modificar el desempeño funcional ni la capacidad de trituración previamente establecida.

ENSAMBLAJE

1. Introducción

Este documento describe el procedimiento de ensamblaje funcional de la trituradora de plásticos, orientado a personal con formación técnica u operarios industriales. No se incluye la fabricación ni el armado de la estructura portante, ya que se asume previamente construida y nivelada. El objetivo es garantizar un montaje correcto, seguro y repetible de los componentes mecánicos y de transmisión.

2. Componentes principales

- Estructura de soporte en tubería cuadrada de 2 pulgadas (preinstalada).
- Cámara de trituración en lámina de acero de 3/8", fijada a la estructura.
- Eje principal del rotor.
- Rotor porta-cuchillas.
- Cuchillas móviles (2 unidades, ángulo 70°).
- Cuchillas fijas (2 unidades, ángulo 30°).
- Chumaceras tipo brida cuadrada FAG ARSA UCF 206 (2 unidades).
- Criba curva con soportes laterales (1 conjunto).
- Polea conducida Ø219 mm.

- Polea motriz para motor Ø93 mm.
- Tres correas tipo 3V-670.
- Motor eléctrico trifásico de 15 HP, conexión doble delta, 220 V.
- Riel deslizante para tensado del motor.
- Tolva superior de alimentación.
- Tolva inferior de descarga.
- Carcaza superior y protecciones de transmisión.
- Tornillería:
 - M8 x 80 mm con tuerca de seguridad.
 - M12 x 20 para fijación de chumaceras.
 - M10 x 50 para cuchillas fijas y móviles.
 - M5 x 30 para tapas y tolvas.
 - M4 (temporales) para ajuste angular de cuchillas móviles.

3. Consideraciones generales de ensamblaje

- Distancia entre centros aproximada entre eje motriz y eje conducido: 600 mm.
- El tensado de correas se realiza mediante corredera deslizante del motor.
- Todas las tuercas y pernos deben instalarse con fijador de roscas tipo Loctite rojo, debido a la vibración del sistema.

- El sentido de giro del rotor es antihorario, visto desde el lado de la polea conducida.

4. Procedimiento de ensamblaje

4.1 Montaje de la cámara de trituración

1. Fijar la cámara de trituración en lámina de 3/8" a la estructura tubular mediante 8 tornillos M8 × 80 mm con tuercas de seguridad.
2. A los mismos puntos de fijación se instala la salida que conecta con la tolva inferior.
3. Instalar la sección trasera y superior que conforma la carcasa y el ingreso del material.

4.2 Instalación de la criba y tolva inferior

1. Introducir la criba curva por la parte inferior de la trituradora.
2. Alinear los soportes laterales soldados y fijar con 7 tornillos M8 por cada lado.
3. Verificar que la criba quede firmemente sujeta y centrada.
4. Instalar la tolva inferior de descarga una vez asegurada la criba.

4.3 Montaje del eje, rotor y chumaceras

1. Introducir el eje principal por la parte superior de la cámara.
2. Montar el rotor sobre el eje y colocar el anillo de retención en el lado opuesto a la polea para evitar desplazamiento axial.

3. Presentar las chumaceras UCF 206 sin ajuste final.
4. Iniciar el montaje de izquierda a derecha:
 - Lado izquierdo: el eje queda a ras de la chumacera. Fijar la chumacera a la estructura con pernos M12.
 - Lado derecho: corresponde al lado de la polea conducida. Alinear y fijar la chumacera a la estructura laminar.
5. Ajustar ambas chumaceras y verificar que el rotor gire libremente sin contacto con las paredes laterales.

4.4 Montaje y ajuste de cuchillas

1. Instalar las cuchillas móviles (2 unidades) en el rotor con ajuste preliminar.
2. En la parte posterior del rotor, utilizar los tres tornillos M4 por cuchilla para ajuste temporal del ángulo.
3. Instalar las cuchillas fijas (2 unidades) mediante tres pernos M10 por cuchilla, colocándolas rectas y firmemente sujetas.
4. Ajustar la separación entre cuchillas móviles y fijas utilizando una galga de 0,5 mm.
5. Una vez definido el ángulo correcto de las cuchillas móviles, retirar los tornillos M4 de ajuste temporal (6 en total).

4.5 Montaje del sistema de transmisión

1. Instalar la polea conducida de Ø219 mm en el eje del rotor, con la maza orientada hacia el exterior.
2. Instalar la polea motriz en el eje del motor.
3. Colocar las tres correas 3V-670, iniciando desde la más interna hacia la más externa.
4. Ajustar la tensión de las correas desplazando el motor sobre el riel deslizante.

4.6 Cierre del conjunto

1. Instalar la carcasa superior de la trituradora y fijar con cuatro pernos M5.
2. Montar la tolva superior de alimentación mediante cuatro pernos M5.
3. Colocar la protección del sistema de correas.

5. Verificaciones finales

- Confirmar sentido de giro horario antes de la operación continua.
- Verificar que no existan interferencias entre rotor, cuchillas y carcasa.
- Comprobar la correcta tensión de correas.
- Revisar que toda la tornillería tenga fijador de roscas aplicado.

Con estas verificaciones completadas, la máquina queda lista para su conexión eléctrica y puesta en marcha.

MANUAL DE USUARIO

1. Descripción general del equipo

La trituradora de plásticos es una máquina de accionamiento eléctrico diseñada para la reducción de tamaño de residuos plásticos, obteniendo un material triturado entre 3 y 5 mm, condicionado por una criba con perforaciones de 5 mm. El equipo está destinado a operación continua bajo supervisión de un operario industrial capacitado, y su diseño prioriza la seguridad, confiabilidad mecánica y facilidad de mantenimiento.

El sistema está compuesto por una cámara de trituración con cuchillas fijas y móviles, un rotor accionado por un motor trifásico de 15 HP mediante transmisión por correas, una criba inferior, tolvas de alimentación y descarga, y protecciones de seguridad para las partes móviles.

2. Datos técnicos principales

- Tipo de operación: Trituración mecánica por cuchillas.
- Potencia del motor: 15 HP.
- Alimentación eléctrica: Trifásica, 220 V, conexión doble delta.
- Corriente nominal de operación: 42 A.
- Protección eléctrica: Relé térmico de 50 A.
- Velocidad de rotación del rotor: 1500 rpm.

- Tamaño máximo del material de entrada: Hasta dos botellas plásticas de 1,5 L en paralelo.
- Tamaño del material triturado: 3–5 mm.
- Diámetro de perforación de la criba: 5 mm.

3. Uso correcto del equipo

3.1 Encendido

1. Verificar que la máquina esté limpia y libre de material residual.
2. Confirmar que todas las protecciones y carcasas estén correctamente instaladas.
3. Asegurar que no haya herramientas u objetos extraños dentro de la cámara de trituración.
4. Energizar el tablero eléctrico.
5. Accionar el botón de arranque y verificar que el rotor gire en sentido horario.

3.2 Alimentación del material

1. Introducir únicamente materiales plásticos permitidos.
2. Alimentar el material de forma progresiva y controlada.
3. No forzar el ingreso del material ni introducirlo manualmente hasta la cámara.
4. Mantener las manos y herramientas alejadas de la tolva durante la operación.

3.3 Operación normal

- Operar la máquina dentro de los límites establecidos.
- Supervisar el sonido y la vibración del equipo.
- Detener la máquina ante cualquier ruido anormal, vibración excesiva o calentamiento.

3.4 Parada normal

1. Detener la alimentación de material.
2. Esperar a que la máquina evacúe completamente el material en la cámara.
3. Accionar el botón de parada.
4. Desenergizar el tablero eléctrico.

3.5 Parada de emergencia

- Accionar inmediatamente el botón de paro de emergencia ante cualquier situación de riesgo.
- No reiniciar el equipo hasta identificar y corregir la causa del evento.

4. Materiales permitidos y prohibidos

4.1 Materiales permitidos

- PET.

- HDPE.
- PP.
- ABS.
- PLA.
- Entre otros.

Nota: Cada vez que se cambie de tipo de material plástico, se debe realizar una purga o limpieza interna para evitar contaminación cruzada.

4.2 Materiales prohibidos

- Metales.
- Vidrio.
- Madera.
- Materiales compuestos o con refuerzos metálicos.
- Materiales no plásticos.

5. Seguridad y advertencias

- No operar la máquina sin protecciones instaladas.
- Prohibido introducir manos, herramientas u objetos en la tolva durante la operación.
- El equipo genera ruido; se recomienda el uso de protección auditiva.

- Mantener distancia de las partes móviles durante el funcionamiento.
- No permitir la operación por personal no autorizado o sin capacitación.

6. Mantenimiento básico

6.1 Limpieza

- Realizar limpieza general al finalizar cada jornada.
- Retirar residuos plásticos acumulados en tolvas y carcazas.

6.2 Revisión y afilado de cuchillas

- Inspeccionar periódicamente el estado de las cuchillas.
- Realizar afilado cuando se observe pérdida de eficiencia de corte.
- Verificar siempre la holgura entre cuchillas después del mantenimiento.

6.3 Tensado de correas

- Revisar periódicamente la tensión de las correas de transmisión.
- Ajustar mediante el riel deslizante del motor.

6.4 Lubricación

- Las chumaceras cuentan con lubricación propia.
- Realizar engrase periódico según condiciones de operación y recomendaciones del fabricante.

7. Buenas prácticas operativas

- No sobrealimentar la máquina.
- Operar siempre dentro de los parámetros definidos.
- Detener el equipo ante cualquier comportamiento anormal.
- Registrar actividades de mantenimiento realizadas.
- Mantener el área de trabajo limpia y ordenada.

El cumplimiento de estas recomendaciones garantiza una operación segura, eficiente y prolonga la vida útil del equipo.

PLANOS

LAMINA 3/8" ESTRUCTURA

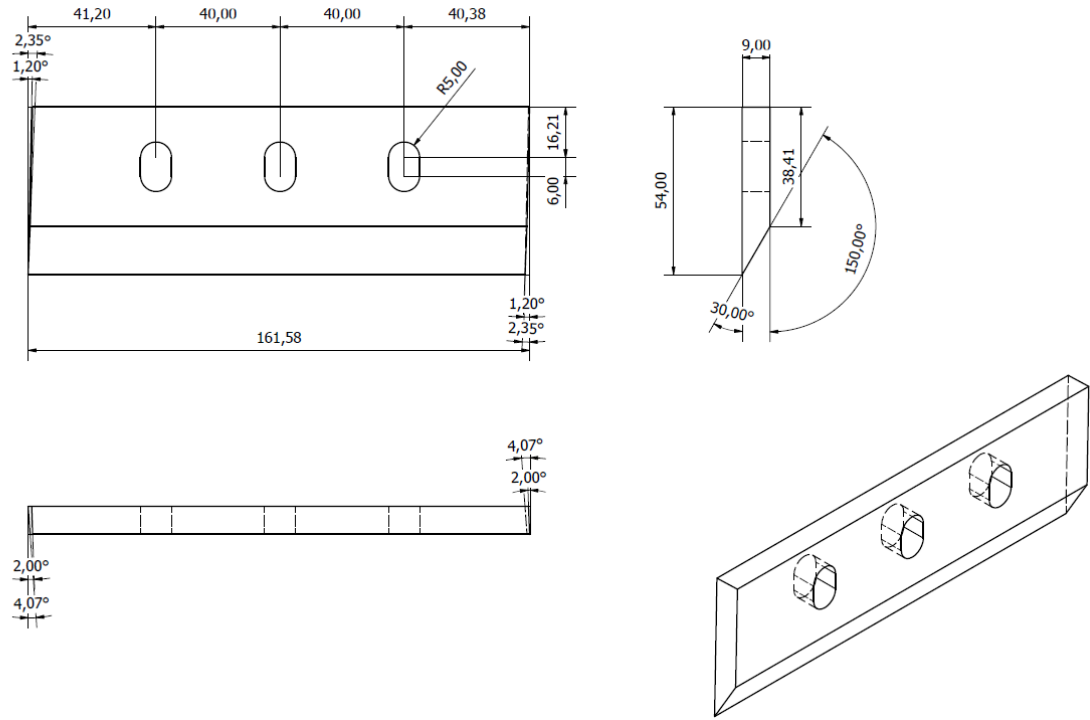


Ilustración 42. PLANO CUCHILLA 70 GRADOS.

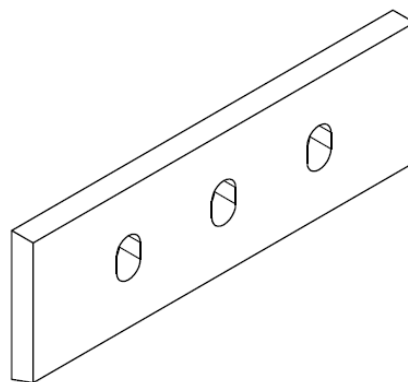
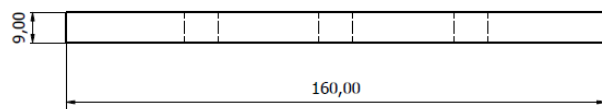
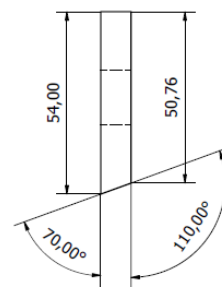
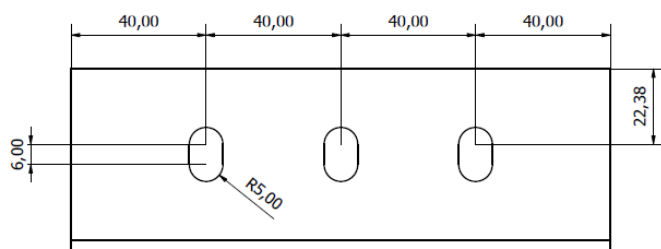


Ilustración 43. PLANO CUCHILLA 30 GRADOS.



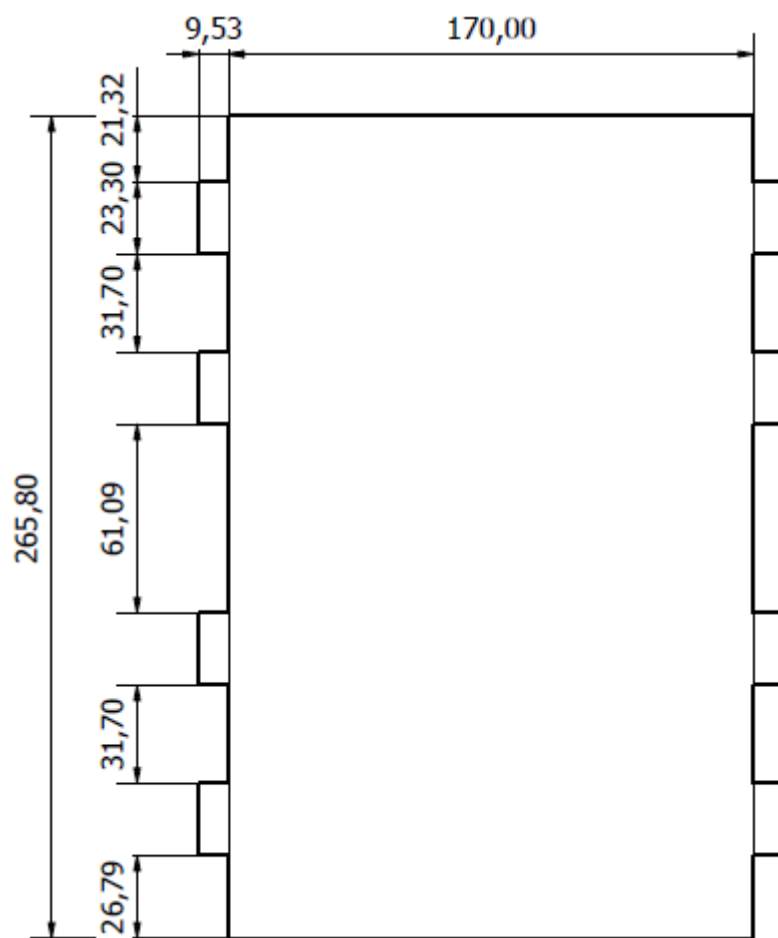


Ilustración 45. Plano placa trasera.

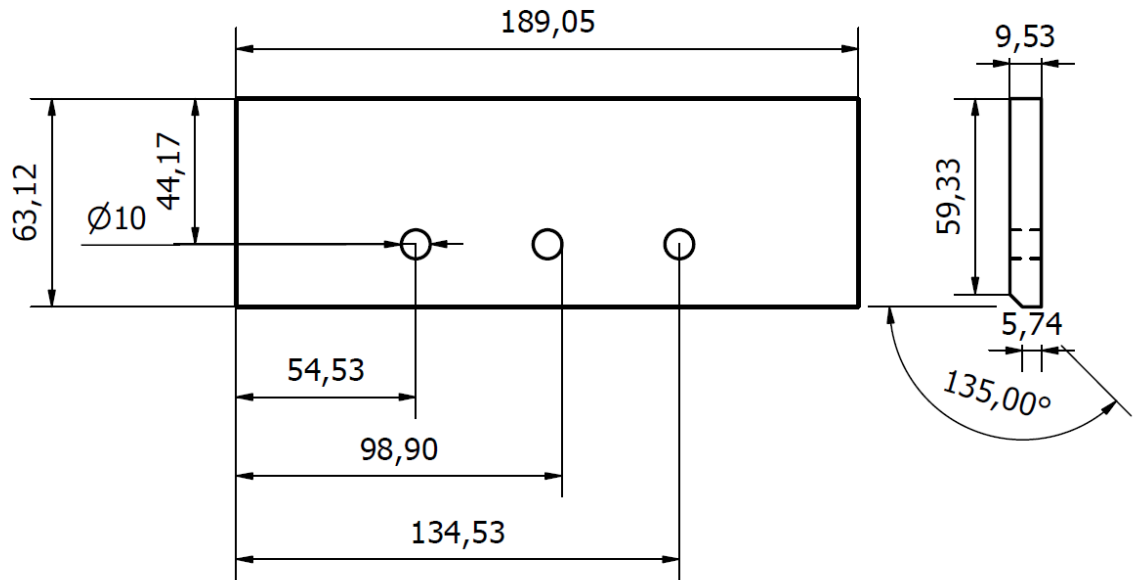


Ilustración 46. Plano placa base cuchilla superior.

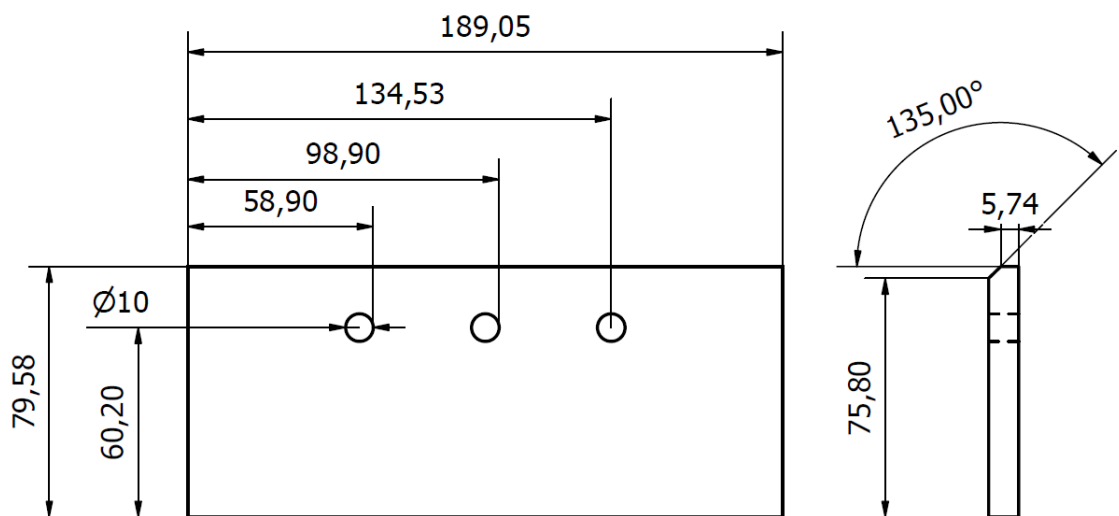


Ilustración 47. Plano placa base cuchilla inferior

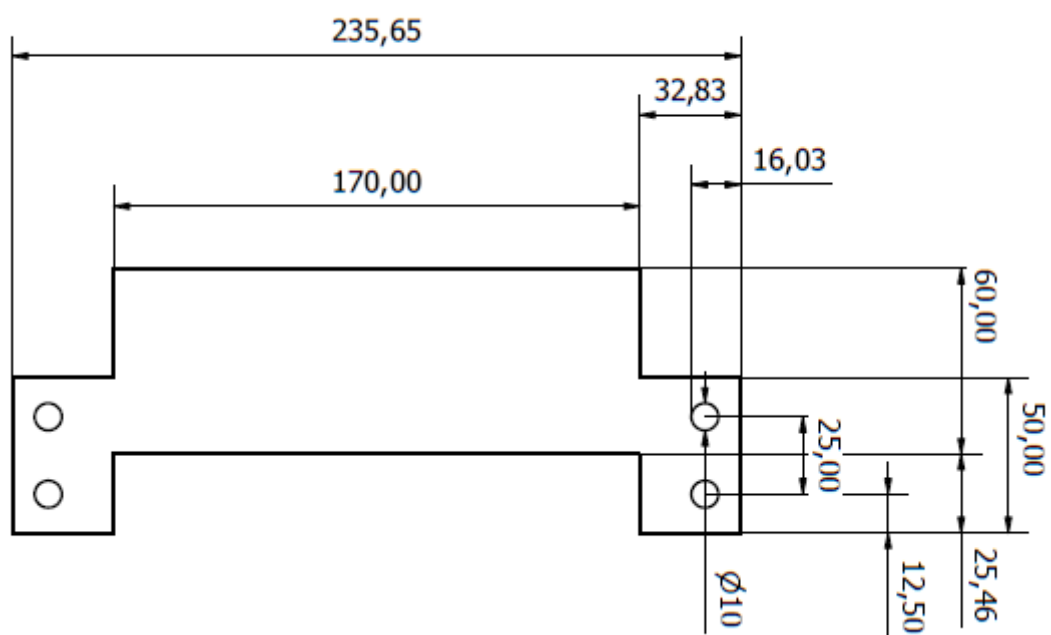


Ilustración 48. Plano placa basa 1.

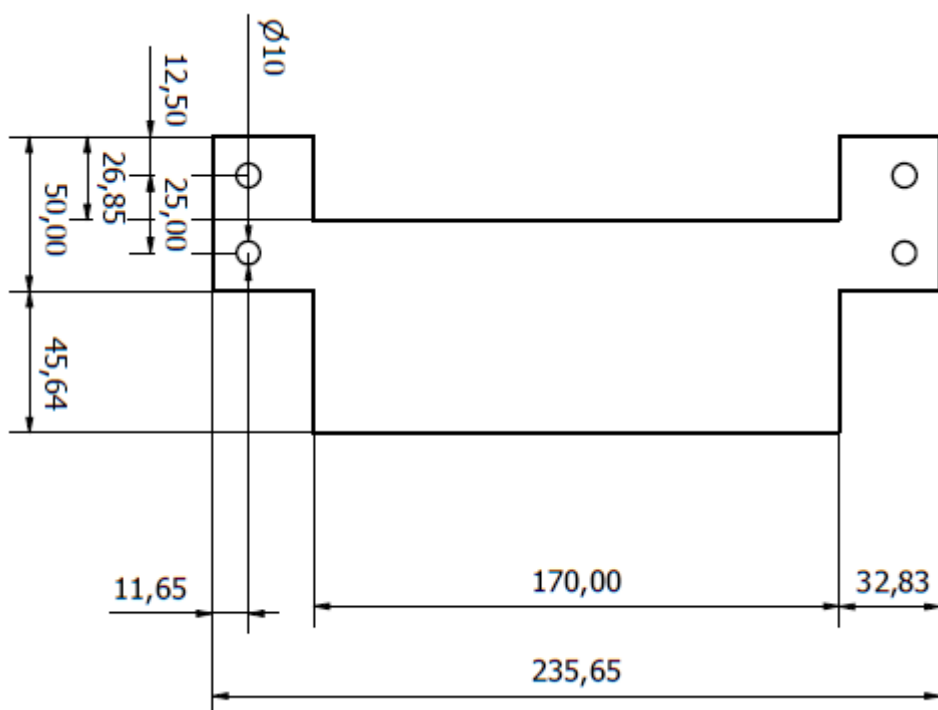


Ilustración 49. Plano placa base 2.

LAMINA 3/16 SOPORTES CRIBA

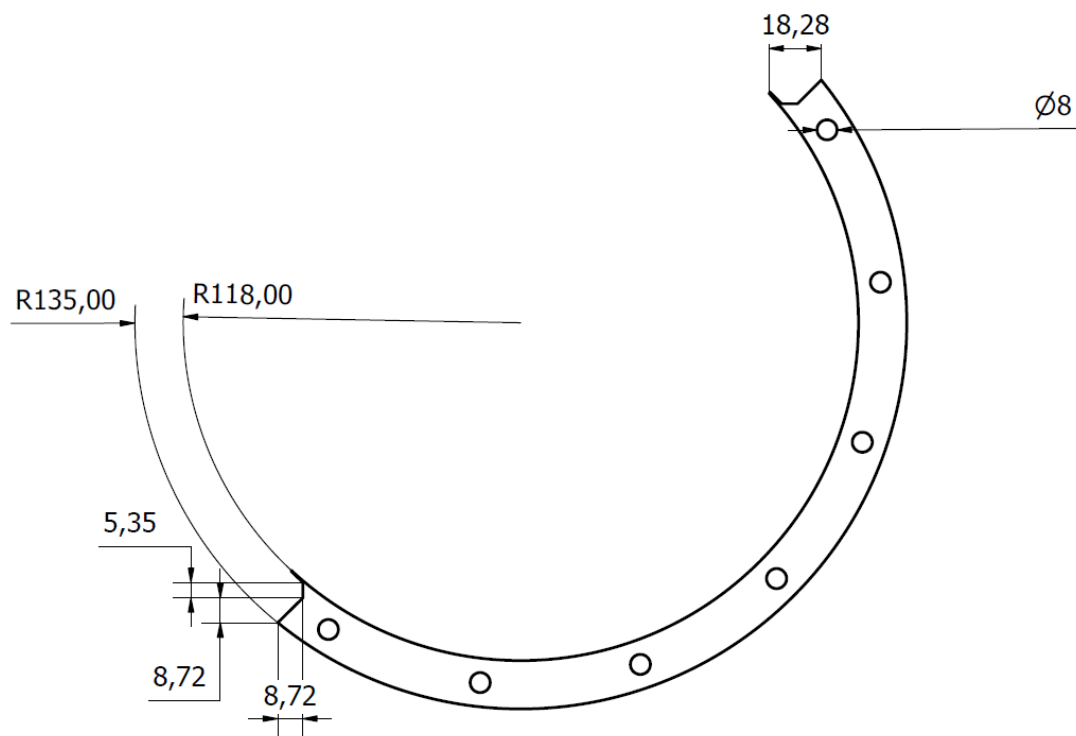


Ilustración 50. Plano soportes criba.

LAMINA 1/8 CRIBA

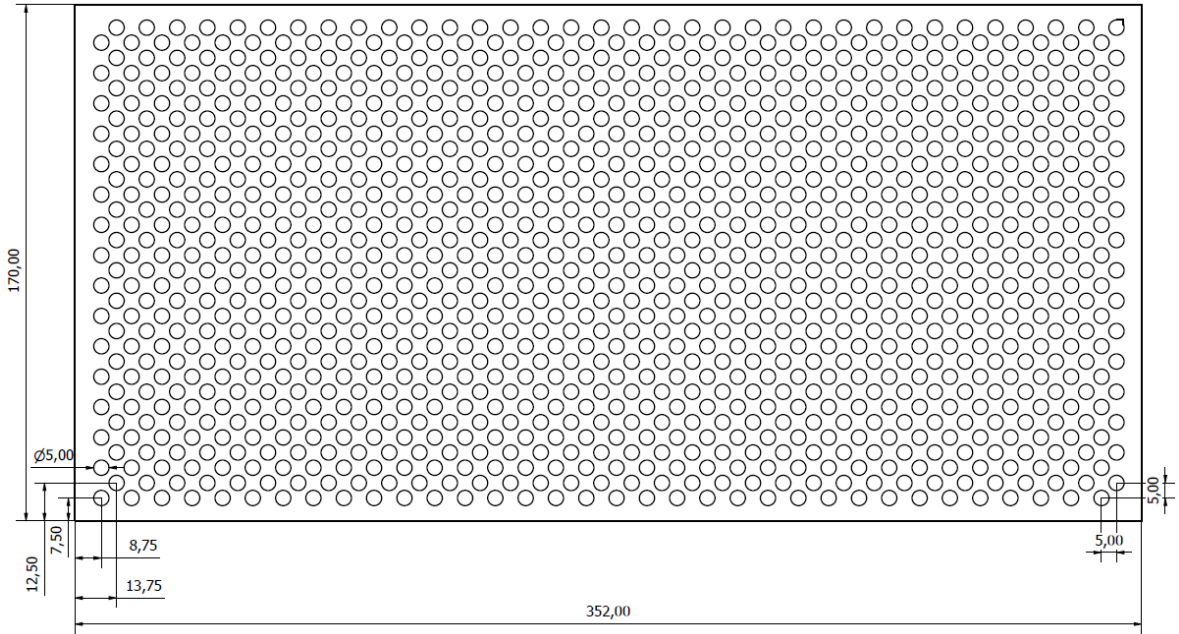


Ilustración 51. Plano criba.

ANILLO

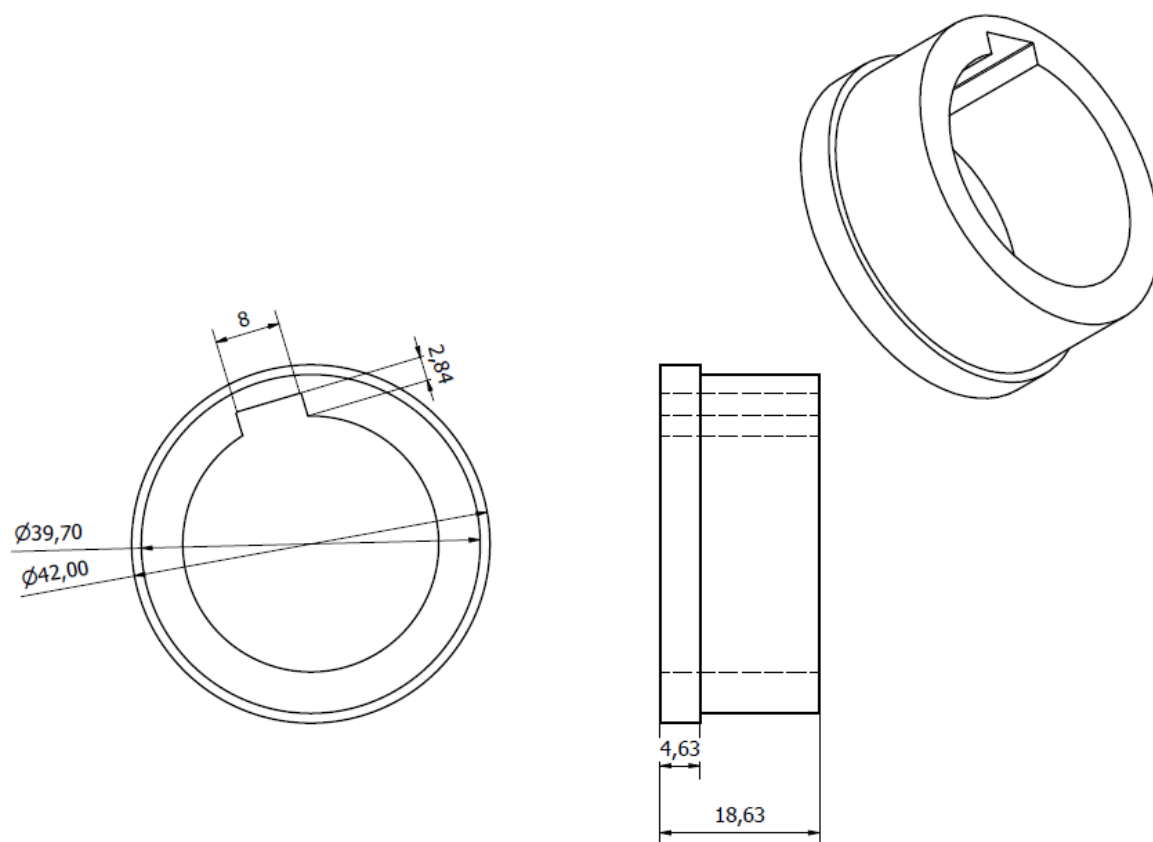


Ilustración 52. Plano anillo reten.

EJE

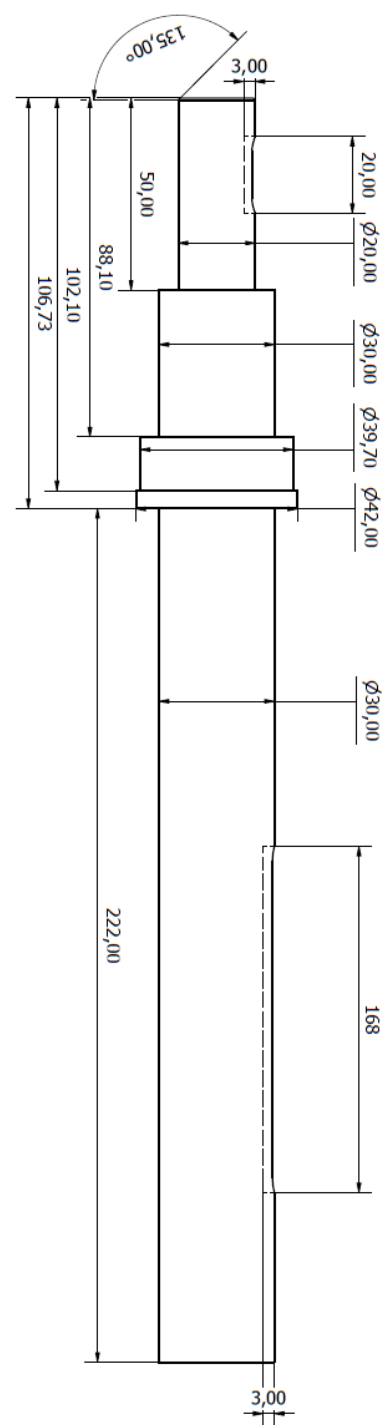


Ilustración 53. Plano eje.

ROTOR

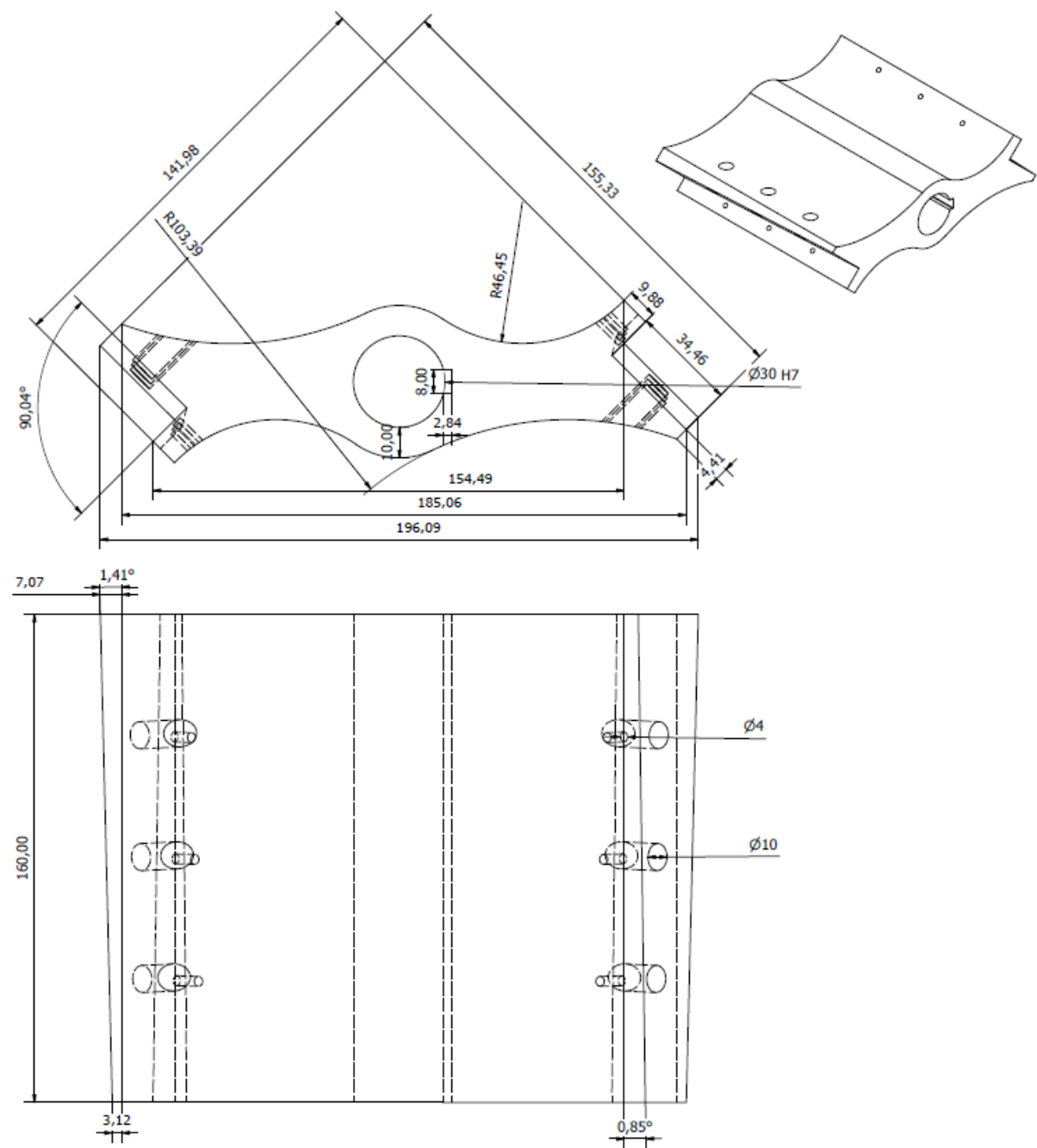


Ilustración 54. Plano rotor.

PLANO CONJUNTO

RODETE

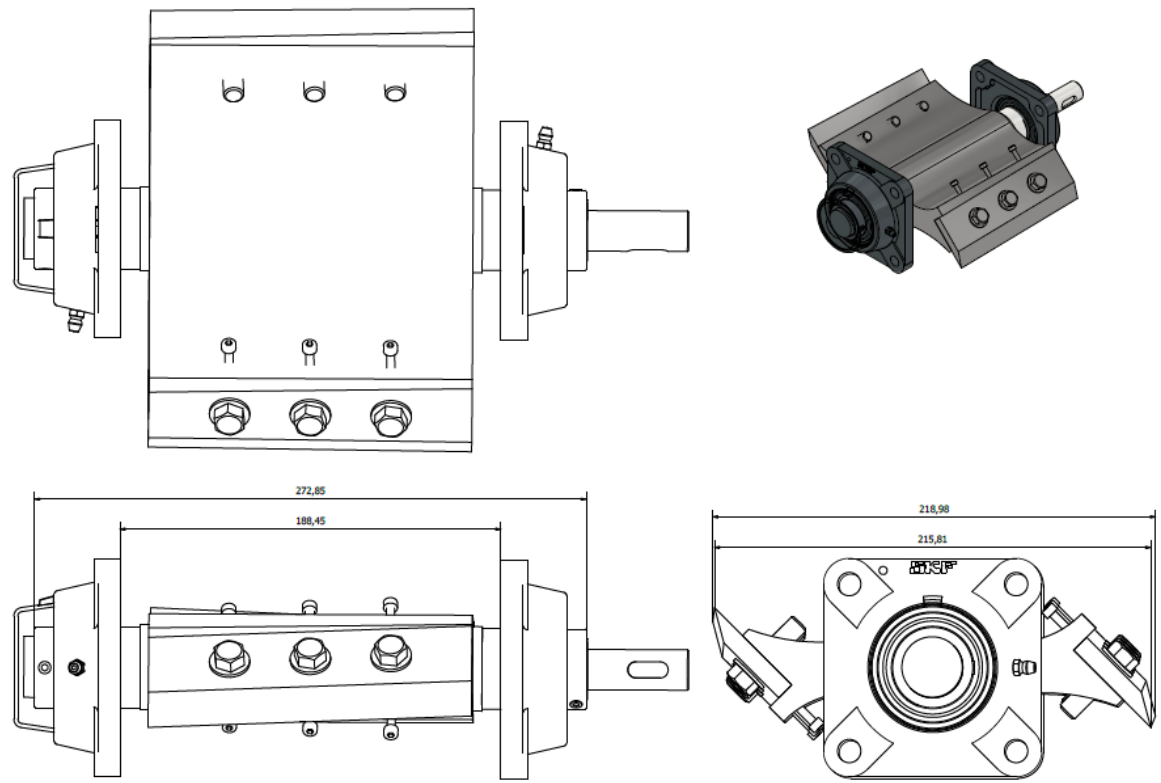


Ilustración 550. Plano conjunto rodete.

ENSMABLE LAMINA

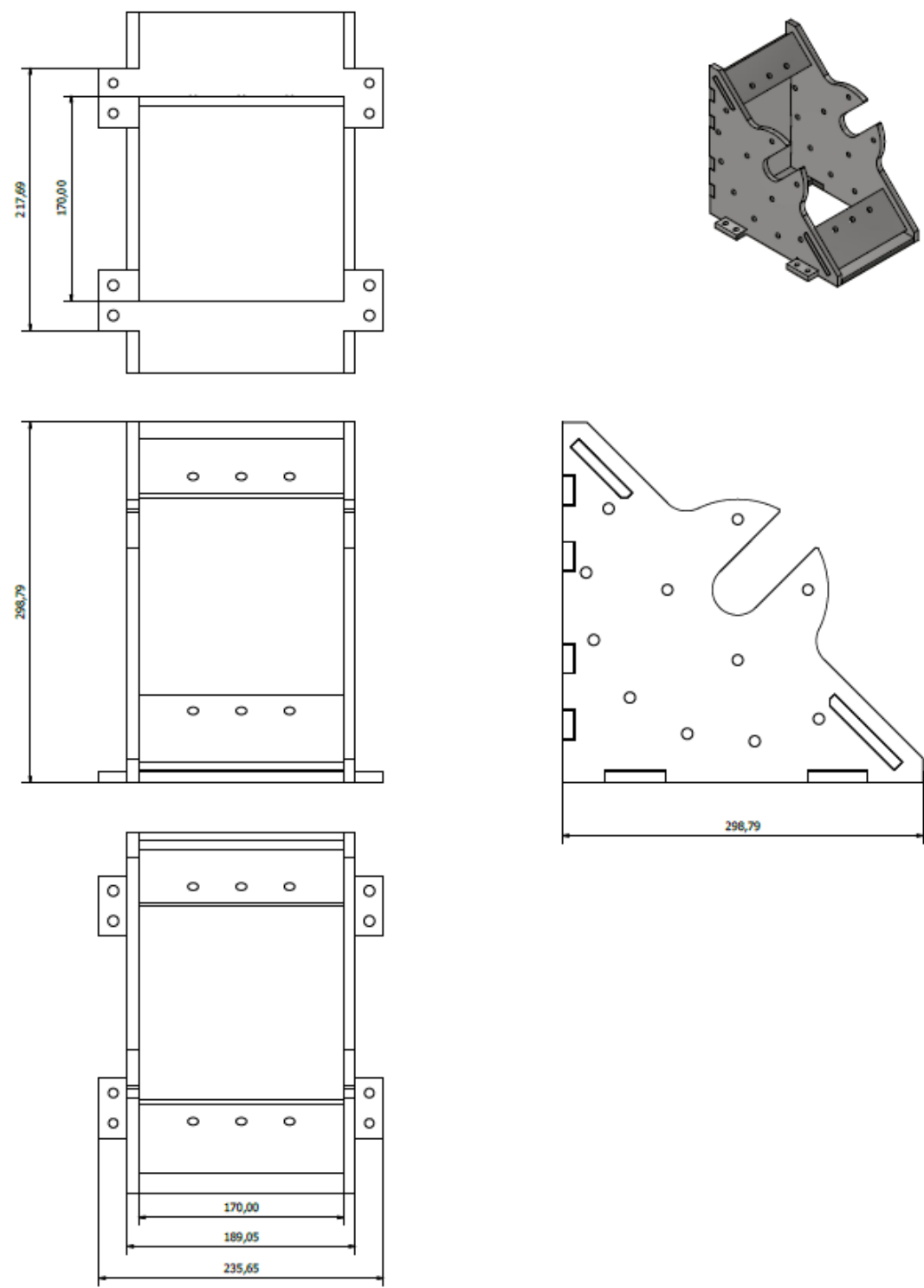
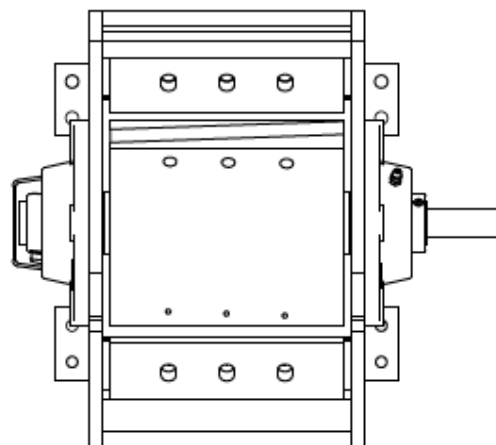
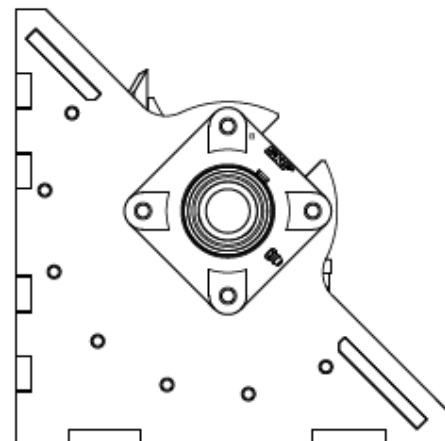
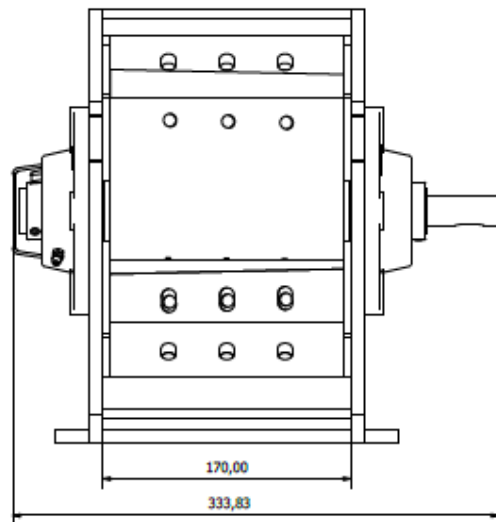
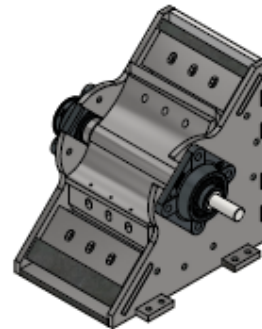
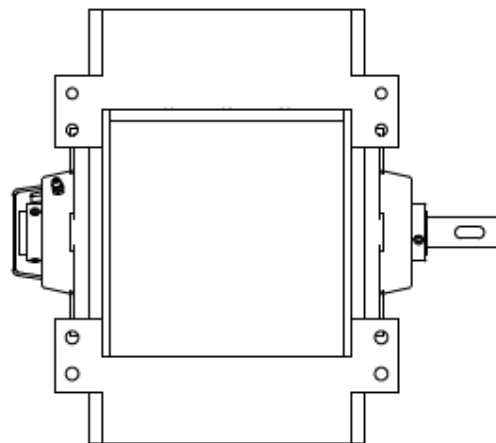


Ilustración 56. Plano conjunto estructura laminar.

ESAMBLE LAMINA-RODETE



ENSAMBLE COMPLETO

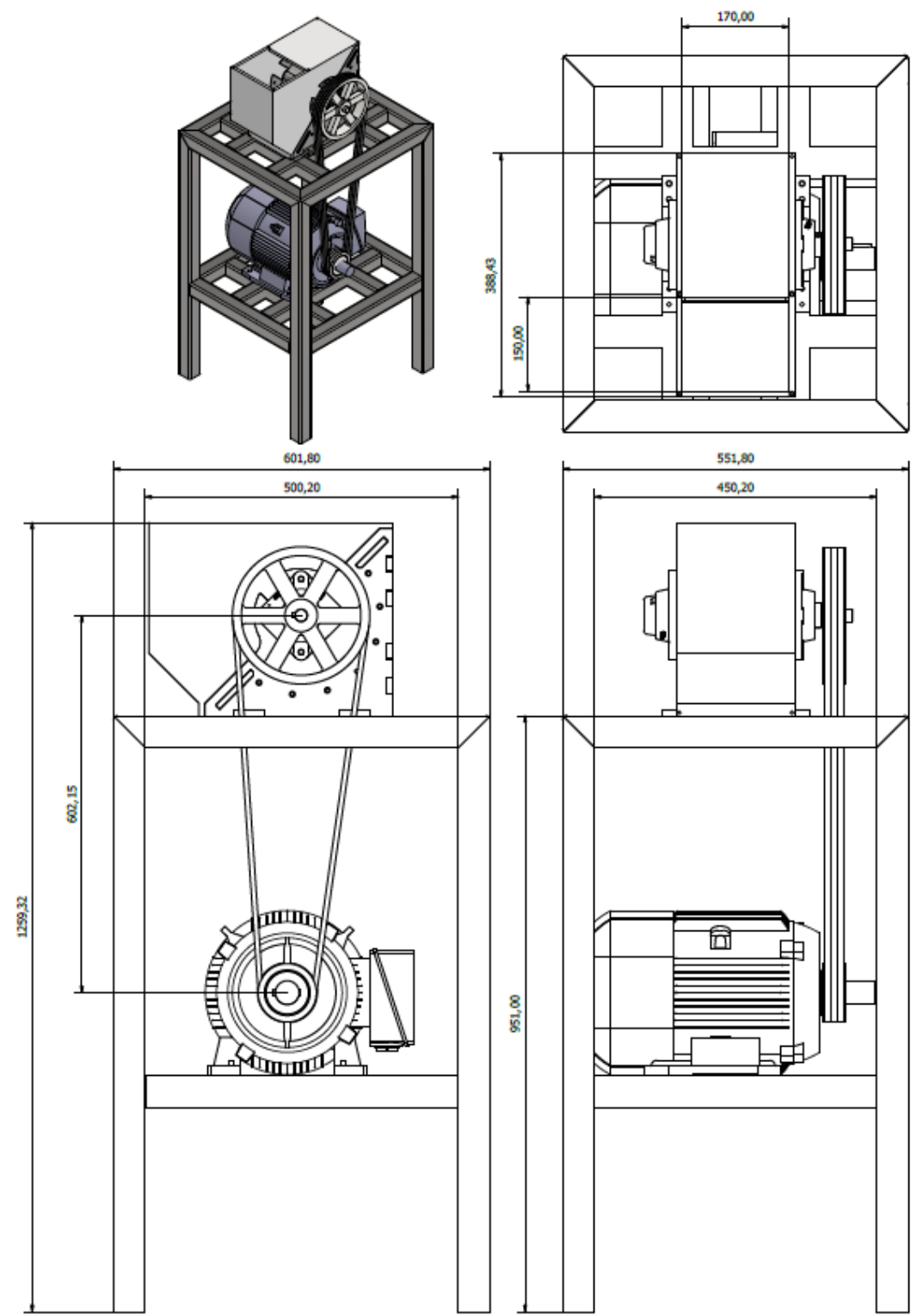


Ilustración 58. Plano conjunto ensamble completo.