

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE MOLINO TRITURADOR PARA
EL APROVECHAMIENTO EFICIENTE DE PLÁSTICO RECICLADO**

**JOHAN ANDRÉS RODRÍGUEZ ORTIZ
WILMER JEFFERSON SUAREZ FLOR**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
POPAYAN**

2024

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE MOLINO TRITURADOR PARA
EL APROVECHAMIENTO EFICIENTE DE PLÁSTICO RECICLADO**

**PROYECTO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO MECATRÓNICO**

**ASESOR: PhD. JAVIER ANDRES MUÑOZ CHAVES
CO ASESOR: MG. CARLOS IVAN VASQUEZ VALENCIA**

**CORPORACION UNIVERSITARIA COMFACAUCA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
POPAYÁN
2024**

Tabla de Contenido

Resumen	4
1. Introducción	5
2. Planteamiento, Descripción y Formulación Del Problema	8
3. Justificación.....	12
4. Objetivos.....	144
4.1 Objetivo General.	144
4.2 Objetivos Específicos.	144
5. Marco Teórico.....	155
5.1 El Reciclaje y sus Tipos	166
5.2 Polímeros y sus Características.	177
5.3. Tipos de Reciclaje.	21
5.4. Triturado de Plástico.	23
5.5. Sistemas de Triturado de Plástico.....	25
6. Antecedentes.....	29
7. Metodología.....	422
8. Resultados.....	499
8.1 Modelo a mano alzada	50
8.2 Modelado y diseño CAD.....	51
8.3 Simulaciones CAE	65
8.4 Implementacion del sistema de triturado	785
8.5 Sistema de control	77
8.6 Test de Rendimineto de la Maquina Trituradora de Plásticos.....	80
9. Análisis general.....	87
10. Conclusiones	88
11.Recomendaciones y Trabajos Futuros	90
12. Referencias Bibliográficas.....	91
13. Anexos.....	96

Resumen

En la actualidad, el incremento abrupto del procesamiento de plásticos de origen fósil para bienestar de la humanidad se ha visto cuestionado por los problemas medioambientales y a la salud humana que conlleva su mala disposición e incineración. Así, a nivel mundial se han propuesto políticas que tienden a mitigar esta producción, optándose por el reintegro de la materia prima al proceso de fabricación con el fin de evitar el agotamiento de las fuentes fósiles. A nivel local esta tendencia está en crecimiento, y se está iniciando a dar un valor agregado adecuado al aprovechamiento de los residuos plásticos generados. En este sentido, usando la metodología de diseño Mecatrónico, este proyecto describe el desarrollo de una máquina trituradora de plástico que conlleven a un uso sostenible y eficiente del plástico reciclado. Así, la trituradora tiene la capacidad de realizar los respectivos cortes de diferentes tipos de residuos plásticos, como, PET (tereftalato de polietileno), PP (polipropileno), PS (Poliestireno) y otras variedades. Adicionalmente, se realizaron estudios de velocidad de trituración en función del tamaño del material triturado. El sistema final cumplió los requisitos de desempeño, fiabilidad y sostenibilidad. La validación del sistema a través de pruebas específicas aseguró que la máquina desarrollada fuera capaz de cumplir con las demandas del sector manufacturero en términos de velocidad de corte, uniformidad del material procesado, consolidando un paso adecuado hacia la sostenibilidad en la gestión de residuos plásticos.

Palabras Clave: Trituradora de plástico, Plástico reciclado, Diseño mecatrónico Aprovechamiento de plástico.

1. Introducción

En la era actual, el aumento exponencial en el procesamiento de plásticos derivados de fuentes fósiles, destinado en principio al beneficio humano, ha suscitado crecientes interrogantes debido a los problemas medioambientales y a la salud humana asociados con su gestión inadecuada y la incineración. De acuerdo con [1] la extensa fabricación y consumo de plásticos derivados de fuentes fósiles suscitan profundas inquietudes a nivel ambiental y de salud en todo el mundo. En Latinoamérica, la producción anual promedio de cerca de 200 botellas de PET por habitante añade considerablemente a la acumulación de desechos plásticos persistentes. Este problema impacta no solo los ecosistemas marinos y terrestres, sino también el aire, afectando negativamente la fauna, la salud humana y la estética de las ciudades, entre otros aspectos.

En respuesta a la creciente inquietud a nivel mundial sobre los impactos negativos de la producción masiva de plásticos convencionales, se han desarrollado diversas políticas orientadas a abordar esta problemática. Estas iniciativas buscan no solo reducir la producción desenfrenada de plásticos, sino también adoptar estrategias que fomenten la circularidad de los materiales, reintegrando la materia prima al ciclo de fabricación. La premisa fundamental de estas políticas es prevenir el agotamiento de las fuentes fósiles al promover la reutilización, el reciclaje y la innovación en materiales sostenibles. Al respecto, [2] sostiene que la producción de desechos y su gestión efectiva representan dos desafíos fundamentales que confrontan las sociedades contemporáneas en su búsqueda de viabilidad y sostenibilidad. Al respecto, se han desarrollado diversas estrategias para abordar esta cuestión, todas orientadas a reducir tanto la cantidad de residuos generados como sus impactos ambientales.

Donde, la alternativa más favorable consiste en la reducción, que implica la modificación de procesos, actividades y hábitos de consumo con el objetivo de disminuir la generación de desechos. En este contexto, se busca transformar la manera en que se concibe, produce y utiliza el plástico, adoptando enfoques más responsables y respetuosos con el medio ambiente para asegurar un futuro sostenible. Estas políticas no solo se centran en la mitigación de los impactos actuales, sino que también buscan sentar las bases para un cambio estructural en la gestión de los recursos plásticos a nivel global.

A nivel local, se observa un impulso significativo hacia la adopción de un cambio de paradigma en la gestión de residuos, destacándose un énfasis creciente en la valorización de los residuos plásticos generados. Este cambio refleja un reconocimiento cada vez mayor de la necesidad de abordar de manera integral el problema de los desechos y transformarlos en recursos aprovechables. En la lucha global contra el cambio climático, se han implementado diversas políticas respaldadas internacionalmente, destacando acuerdos como el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París. Las empresas, con su poder económico y organizativo, juegan un papel crucial en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel nacional, permitiendo transiciones energéticas más rápidas en comparación con hogares o países [3]

En este contexto, el proyecto actual se inserta con firmeza en la filosofía de la sostenibilidad y la eficiencia, posicionándose como un eslabón clave en la evolución hacia prácticas más responsables y sostenibles. Utilizando la metodología de diseño Mecatrónico, se busca no solo mitigar los impactos negativos de los desechos plásticos, sino también fomentar su reutilización de manera eficiente, contribuyendo así a la construcción de un entorno más equilibrado y sostenible a nivel local. La propuesta central del proyecto se enfoca en el diseño y desarrollo de una máquina trituradora de plástico, concebida con el objetivo de promover un uso responsable y eficiente del plástico reciclado. Esta trituradora ofrece además de un

triturado aceptable, su fácil limpieza y mantenimiento tanto preventivo como correctivo. Desde el tereftalato de polietileno (PET) hasta el polipropileno (PP) y el poliestireno (PS), la máquina está diseñada para abordar múltiples variedades de plásticos, ofreciendo así una solución versátil y efectiva para el procesamiento de distintos tipos de materiales plásticos. Este enfoque integral busca no solo fomentar la reutilización del plástico, sino también facilitar su integración en nuevos procesos de fabricación, promoviendo así prácticas sostenibles y una gestión responsable de los recursos plásticos.

Como componente esencial de este proyecto, se realizarán pruebas o estudios sobre la velocidad de trituración en relación con el tamaño del material procesado. En la fase de diseño del sistema de trituración de polímeros reciclados para su aplicación en manufactura, se seguirá la metodología de diseño mecatrónico [4]. Esta metodología, caracterizada por ser estructurada y sistemática, integra las disciplinas mecánicas, eléctricas y de control en el proceso de diseño, garantizando una aproximación general y eficaz al desarrollo del sistema. Este enfoque integral no solo tiene como objetivo contribuir a la gestión sostenible de los residuos plásticos, sino también dar conocer uno de los procesos fundamentales para la reutilización del mismo en algunas áreas, y que en este caso es el proceso de triturado. Así, se busca no solo avanzar en prácticas más responsables y eficientes en la gestión de recursos plásticos, sino también facilitar un camino hacia la comprensión más profunda y completa de este proceso.

2. Planteamiento, Descripción y Formulación Del Problema

Actualmente, los polímeros derivados del petróleo son una parte importante del comercio contemporáneo. Su estructura química versátil permite una amplia gama de aplicaciones, y sus bajos costos de producción han impulsado su masiva comercialización. Sin embargo, esta producción desmesurada de plásticos de origen fósil ha llevado consigo una serie de consecuencias preocupantes para el medio ambiente y la salud humana.

En los últimos años, la producción mundial de plásticos ha experimentado un crecimiento anual promedio del 3.8%. Se proyecta que para el año 2030, la producción alcance la alarmante cifra de aproximadamente 500 millones de toneladas. Esta producción desenfrenada ha generado una acumulación masiva de residuos plásticos en todo el mundo [5].

En los océanos las cifras también son preocupantes, ya que 20 millones de toneladas de plástico entran al mar cada año y 12 millones de toneladas representan artículos que se usan una sola vez. Por la acumulación, se estima que 5 trillones de partículas de plástico que pesan 268,940 toneladas están flotando en los mares, siendo que, la masa del plástico supera seis veces la masa del plancton en el mar [6].

La contaminación por plásticos se ha convertido en uno de los retos medioambientales más acuciantes de nuestro tiempo. La producción e incineración de plásticos contribuye en gran medida al cambio climático. Los residuos plásticos también ahogan nuestras vías fluviales, contaminan nuestros océanos, matan la vida silvestre y se infiltran en nuestra cadena alimentaria. Si la tendencia actual continúa, en 2050 habrá unos 12 000 millones de toneladas de residuos plásticos en nuestros vertederos o contaminando el medio ambiente, el equivalente a casi 80 millones de ballenas azules.

Dado que el problema del plástico sigue creciendo como una bola de nieve, debemos trabajar con rapidez para tomar medidas audaces y decisivas que reviertan la situación de los residuos plásticos. TNC está avanzando en la lucha contra los residuos plásticos en California y en todo el mundo a través de investigaciones científicas, innovaciones tecnológicas y soluciones normativas audaces. Sigue leyendo para saber más sobre nuestro trabajo y lo que puedes hacer para unirte a la lucha.

Además de la contaminación ambiental, los plásticos de origen fósil también plantean preocupaciones para la salud humana. La mala disposición de los desechos plásticos y su incineración liberan sustancias tóxicas y gases nocivos que pueden tener efectos adversos en la calidad del aire y el agua, así como en la salud de las comunidades que viven cerca de vertederos o incineradoras [7].

En Colombia, la problemática generada por los desechos plásticos sigue el mismo patrón que a nivel mundial. Existe una falta de conciencia ambiental y la reutilización de residuos plásticos no es suficiente debido a la falta de conocimiento y la carencia de infraestructura para implementar prácticas adecuadas de reciclaje. De acuerdo con las investigaciones de [8] aproximadamente el 56% del consumo de plástico en Colombia corresponde a productos de un solo uso. El país genera alrededor de un millón de toneladas de residuos plásticos anualmente, y se estima que el ciudadano promedio consume 24 kilogramos de este material. Se estima que cada persona utiliza alrededor de 60 gramos de plástico al día, lo que se traduce en aproximadamente 2 kilogramos de residuos plásticos por habitante al mes. Si multiplicamos esta cifra por la población del país, estimada en 45 millones, el volumen total de residuos plásticos puede aumentar considerablemente.

Como menciona Pastori, para muchos colombianos, no reciclar representa una pérdida económica significativa. Sin embargo, la realidad es que a diario se desperdician

oportunidades que podrían impulsar el desarrollo de una economía más sólida y generadora de empleo. [9]

Específicamente en la ciudad de Popayán, ubicada en el departamento del Cauca, la falta de capacitación y el incumplimiento de las normas de separación de residuos han llevado a la saturación del vertedero sanitario y a obstrucciones en el sistema de alcantarillado. Según el informe del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) de Popayán en 2016, durante el periodo de agosto de 2015 a agosto de 2016, se generaron un total de 6313.51 toneladas de residuos sólidos, con un aumento mensual promedio de 17.38 toneladas por mes [10].

Considerando las metas establecidas en los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular el objetivo 11 de "ciudades y comunidades sostenibles", se reconoce la importancia del reciclaje como pieza fundamental para lograr un desarrollo sostenible y un crecimiento verde. Se espera que para el año 2030 se minimice el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, especialmente en la gestión de los desechos municipales.

En este contexto de crisis ambiental, es crucial reutilizar la mayor cantidad de materia prima posible en diversas áreas. El plástico es uno de los materiales más desaprovechados y abundantes en el planeta, y una de las formas de aprovechamiento es su transformación para un posterior uso en utensilios del día a día [11].

En teoría, la tecnología de trituración y granulado del plástico es un recurso crucial en el proceso productivo para garantizar eficiencia y competitividad de estos productos con base en material plástico reciclado. En la práctica, una máquina trituradora tiene la ventaja de poder procesar el plástico reciclado y pulverizarlo, e incluso puede producirlo en forma de gránulos. Estos gránulos tienen características y consistencia que los hacen altamente demandados en el mercado local y nacional [12].

Dada la actual preocupación por el impacto ambiental de los desechos plásticos, surge el siguiente cuestionamiento *¿Cómo se puede optimizar el proceso de reutilización de plástico, con base en el proceso de pulverización y granulado del plástico reciclado?*

Para conseguir reutilizar estos plásticos, lo primero que hay que hacer es separarlos. Cada plástico tiene unas propiedades distintas, y si se quiere obtener unas buenas propiedades, se debe tratar por separado. Por ello, si el proceso productivo genera residuos plásticos, una buena forma de empezar es recogiendo dichos residuos sin mezclar. Una vez recolectado los residuos plásticos por separado, el siguiente paso es realizar un proceso de triturado y molienda para transformarlos en polvo o granza. Una vez se ha reducido suficiente el tamaño de las piezas de plástico, estas pueden ser usadas de nuevo en el proceso de producción mediante su uso en máquinas de inyección o en extrusoras. [13]

3. Justificación

En la actualidad, el reciclaje de plásticos ha adquirido una gran importancia debido a los avances en investigación y los numerosos estudios realizados sobre la reutilización de diferentes tipos de plástico. Este enfoque ha dado lugar a una amplia gama de aplicaciones reciclables, desde la creación de objetos impresos en 3D hasta materiales de construcción como ladrillos, postes de cercas, bancos, mesas y muchos otros productos de uso cotidiano. Es ampliamente reconocido que la producción de residuos de polímeros está aumentando a nivel mundial y que su impacto ambiental es perjudicial, afectando tanto a las especies acuáticas como a los seres humanos. Esta preocupación ha sido respaldada por informes de la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés), donde se define la "basura marina" como cualquier material sólido persistente que se fabrica o procesa y que se desecha o se abandona en el entorno marino y en lagos [14].

El reciclaje se presenta como una de las soluciones para procesar y transformar los residuos de polímeros en nuevos productos, alargando así la vida útil de los plásticos a través de su reutilización. En este contexto, el desarrollo de un molino triturador de plástico se plantea como una herramienta complementaria en el proceso de reciclaje, permitiendo obtener material procesado según las especificaciones requeridas para su uso posterior, ya sea para la creación de filamentos o para su transformación en otras formas mediante tratamientos específicos.

Esta investigación tiene como objetivo procesar el mayor volumen posible de plástico para su posterior reutilización, contribuyendo así a la reducción de la contaminación generada por estos materiales. Además, se busca aprovechar de manera óptima los materiales reciclados y

explorar nuevas tecnologías para el diseño y desarrollo de máquinas que promuevan la economía circular y el uso sostenible de los plásticos.

Por ende, esta investigación se centrará en explorar los aspectos relacionados con el diseño, los parámetros de operación y los métodos de optimización para desarrollar un molino triturador de plástico que facilite el aprovechamiento eficiente y sostenible de los residuos plásticos, contribuyendo así a mitigar los problemas asociados con la contaminación y fomentando la transformación y reutilización de los materiales plásticos.

4. Objetivos

4.1 Objetivo General.

Desarrollar un sistema de triturado de plástico reciclado que permita la disminución del tamaño de partícula, para su posterior aprovechamiento en la manufactura de nuevos productos.

4.2 Objetivos Específicos.

- Establecer parámetros de diseño adecuados en base a particularidades de sistemas de trituración, así como, de las características físicas y químicas de los residuos plásticos disponibles para este estudio.
- Implementar los componentes hardware y software necesarios en el sistema de triturado, asegurando la correcta integración y funcionamiento de cada elemento.
- Validar el sistema de triturado en función de los tiempos de corte de diversos materiales, la disminución del volumen y la uniformidad del material procesado.

5. Marco Teórico

Un molino triturador de plásticos tiene varias características básicas, entre ellas: una cámara de corte, rotor donde van situadas las cuchillas, cuchillas de corte, un tamiz o criba por donde pasa el material triturado, un motor para accionar el sistema de trituración, y un sistema de seguridad para prevenir lesiones. El tamaño y la potencia del motor varían según el modelo de molino y el material a triturar. Además, los molinos trituradores de plásticos normalmente tienen un diseño ergonómico para facilitar su uso.

También es importante el tamaño del agujero a escoger en el tamiz o criba, ya que el molino expulsara el material triturado por el en el tamaño deseado.

Un molino triturador de plásticos suele estar equipado con cuchillas fijas y móviles. Cada una de estas cuchillas está diseñada para triturar los materiales plásticos de diferente modo, dependiendo de la forma y el tamaño de los materiales.

Es importante conservar bien las cuchillas de un molino triturador de plásticos para garantizar una trituración eficiente y segura. Ya que estas se desgastan con el tiempo debido al uso, por lo que es importante mantenerlas afiladas para asegurar una trituración de alta calidad. Si las cuchillas están desgastadas o dañadas, la máquina no será capaz de triturar los materiales con la misma eficiencia y puede provocar daños en los componentes internos.

También es importante el correcto ajuste de estas cuchillas para que el corte sea óptimo. [15]

A seguir se exploran algunos fundamentos y conocimientos previos relacionados con el reciclaje de plástico y la trituración de materiales.

5.1 El Reciclaje y sus Tipos

Es importante saber que hay diferentes tipos de plásticos, porque el impacto que tienen en el medio ambiente depende del material con el que hayan sido producidos. Uno de los casos más preocupantes son los micro plásticos, que afectan la salud y a multitud de especies animales. Dicho esto, el proceso de reciclaje de plásticos no es igual para todos, lo cual indica que no todos los plásticos son igual de dañinos.

El Código de Identificación de la Resina es un sistema internacional utilizado en el sector industrial para diferenciar la composición de las resinas en los productos plásticos de uso diario. Se trata de siete números que se encuentran en los diferentes tipos de plásticos y que marcan su nivel de toxicidad.

Los números se integran dentro del triángulo de Möbius (símbolo universal del reciclaje)

Por lo tanto, se han identificado seis tipos de plásticos específicos que permiten crear una organización según sus características. Existe una séptima categoría en la que se incluyen otros plásticos cuya composición no ha sido totalmente identificada o bien cuyos elementos constituyentes no pueden incluirse en ninguna de las otras categorías. La figura 1, presenta la identificación de los diferentes plásticos junto a algunos ejemplos característicos



Figura 1

Tipos de plástico y su forma de reciclaje [16]

5.2 Polímeros y sus Características.

Polietileno Tereftalo (PET)

Este tipo de plástico es transparente además cuenta con una alta resistencia al desgaste y a la corrosión, se emplea en la fabricación de envases de bebidas carbonatadas, fibras textiles, entre otras. A continuación, (Figura 1) se puede observar uno de los ejemplos más comunes de material PET, el cual se usa mucho para el embotellamiento de bebidas para consumo humano.



Figura 2

Material PET [18]

Cloruro de Polivinilo (PVC)

Este material es altamente resistente, de igual modo cuenta con una elevada resistencia a la abrasión, este tipo de plástico es bastante estable e inerte, por tal razón es utilizado en procesos donde la exigencia de higiene es bastante alta, no obstante, también es destinado para aislar y proteger cables eléctricos y para la contención y transporte de agua potable, entre otras. A continuación, (Figura 3) se observa el PVC en la principal forma en la que se usa, es muy utilizado en el área de plomería tanto de aguas limpias como aguas negras y posee más aplicaciones.



Figura 3

Material PVC [19]

Polipropileno (PP)

Posee una alta resistencia al impacto y a la tracción, es flexible, puede ser rígido y translúcido, esterilizante desde 120 a 130 grados Celsius. Frecuentemente es utilizado en la fabricación de autopartes, tapas en general, cajas de baterías, jeringas desechables, entre otros.

Este material debido a su gran resistencia se usa para objetos que se ven sometidos a fuerzas externas elevadas y también es muy común el uso en los hogares, como se puede apreciar en la figura 5.



Figura 4

Material PP [20]

Poli-estireno (PS)

Este plástico es transparente u opaco, según sea procesado, es muy versátil e imita al cristal. Se emplea en la fabricación de diferentes envases utilizados para servir alimentos y en materiales para proteger equipos delicados.

En la figura 5, se puede observar su uso como recipientes para comidas y bebidas.



Figura 5

Material PS [21]

Polietileno (PE)

Este material es incoloro, opaco, de alta rigidez, estabilidad dimensional y dureza superficial. Estable frente a ácidos, álcalis y alcoholes. Puede ser utilizado en envases de detergentes, aceites para motor, shampoo, entre otros. [22]

En la (figura 6) se pueden observar los diferentes usos que se les puede dar a este material.



Figura 6

Material PE [23]

A nivel de resumen, en la tabla 1; se presentan algunas aplicaciones de los polímeros mencionados, así como, los códigos representativos de reciclaje.

Tabla 1*Propiedades de los tipos de plástico*

Sigla	Nombre	Código de Reciclaje	Usos y Aplicaciones
PET	Polietileno tereftalato	1	Botellas para bebidas, aceite y otros alimentos
PEAD/HDPE	Polietileno de alta densidad	2	Envases y botellas para productos de limpieza. Membranas impermeabilizantes
PVC	Policloruro de vinilo	3	Cañerías, electrónica
PEBD/LDPE	Polietileno de baja densidad	4	Bolsas, separadores, guantes
PP	Polipropileno	5	Tapas de botellas
PS	Poliestireno	6	Vasos y recipientes para alimentos, aislantes

5.3. Tipos de Reciclaje.

A seguir se presentan las siguientes formas de reciclaje [24]

Es importante saber que hay diferentes tipos de plásticos, porque el impacto que tienen en el medio ambiente depende del material con el que hayan sido producidos. Uno de los casos más preocupantes son los micro plásticos, que afectan la salud y a multitud de especies

animales. Dicho esto, el proceso de reciclaje de plásticos no es igual para todos, lo cual indica que no todos los plásticos son igual de dañinos.

El Código de Identificación de la Resina es un sistema internacional utilizado en el sector industrial para diferenciar la composición de las resinas en los productos plásticos de uso diario. Se trata de siete números que se encuentran en los diferentes tipos de plásticos y que marcan su nivel de toxicidad.

Los números se integran dentro del triángulo de Möbius (símbolo universal del reciclaje).

A seguir se presentan las diferentes formas de reciclaje:

Reciclaje Mecánico

Se refiere a todas las técnicas y procesos que incluyan el trabajo manual o ayudado por máquinas. Este tipo de reciclaje es utilizado mucho en la clasificación de residuos mezclados y en el reciclaje del plástico.

Reciclaje Químico

Incluye técnicas y procedimientos que implican el cambio en la estructura química del material. Su finalidad es la descomposición del polímero para la obtención de monómeros. Este tipo de reciclaje es utilizado mediante disoluciones, hidrólisis, hidrogenación...

Reciclaje Energético

Se utiliza este tipo de reciclaje en materiales cuyo fin es el aprovechamiento energético y cuyos residuos no pueden ser clasificados y recuperado, por lo que, debido a esta imposibilidad técnica o económica, se aprovechan de este modo. Un ejemplo de estos son la incineración de residuos, pirolisis y gasificación.

Reciclaje por Residuo

En este tipo de reciclaje, lo que se busca es la degradación de toda la materia orgánica en presencia o en ausencia de oxígeno. Estos tratamientos pueden emplearse con la materia

orgánica separada en origen o con la materia orgánica sin separar, utilizando procesos mecánicos complementarios en este último caso.

5.4. Triturado de Plástico.

Como mencionado previamente en la actualidad, a nivel mundial se presenta una grave problemática derivada de la sobreproducción y acumulación de desechos plásticos. Estos materiales, que alguna vez fueron utilizados para satisfacer nuestras necesidades, ahora representan una amenaza para el medio ambiente y la salud pública. Ante esta situación, es imprescindible adoptar medidas que promuevan la sostenibilidad y la preservación de nuestro entorno.

En este contexto, surgen las 5R's del reciclaje: reducir, reutilizar, reciclar, repensar y recuperar. Estas prácticas buscan cambiar la forma de consumo y producción, fomentando la minimización de residuos, la reutilización de materiales, el adecuado reciclaje de los mismos, la adopción de decisiones más conscientes y la recuperación de recursos. Con relación a los plásticos, esta tendencia básicamente envuelve [25]:

Reducir

Se refiere a la práctica de minimizar la cantidad de residuos generados, enfocándose en la prevención de la producción excesiva de desechos mediante la adopción de hábitos y decisiones que disminuyan la cantidad de productos desechables, envases y consumos no sostenibles.

Reutilizar

Se refiere a la práctica de utilizar un producto, material o artículo nuevamente sin realizar modificaciones significativas en su forma o composición.

La idea principal de la reutilización es prolongar la vida útil de un objeto para reducir

la cantidad de residuos generados y minimizar la necesidad de producir nuevos productos.

Reciclar

Esto implica la recolección selectiva de materiales, como papel, cartón, vidrio, plástico y metal, para luego someterlos a procesos de clasificación, limpieza y transformación, con el fin de fabricar nuevos productos en lugar de depender completamente de la extracción y procesamiento de recursos naturales.

Repensar

Se refiere a la consideración reflexiva y crítica de las decisiones de consumo y hábitos cotidianos para identificar formas de minimizar el impacto ambiental y reducir la generación de residuos.

Recuperar

Se refiere a la acción de recolectar y recuperar materiales y recursos de productos o desechos que de otra manera serían descartados. Se centra en la recuperación de materiales valiosos antes de que se conviertan en residuos, con el objetivo de reintegrarlos en el ciclo de producción y consumo.

En este sentido, dentro del proceso de reciclaje, la etapa de trituración juega un papel fundamental. Esta fase permite descomponer los desechos plásticos en partículas más pequeñas, facilitando su posterior procesamiento y transformación en nuevos productos. La trituración eficiente y adecuada garantiza la obtención de materiales reciclados de alta calidad y contribuye a la reducción de la demanda de plásticos vírgenes.

En general, la trituración es un proceso de reducción de tamaño, esto con el fin de facilitar el transporte de los materiales, lavado, fundición, reacciones químicas y conformado del mismo. Esta reducción de tamaños se clasifica en dos grupos (ver Figura 7): el primero está definido como desintegración grosera, que está constituida por trituración gruesa (15 cm), trituración mediana (3 a 15 cm) y trituración fina (3 a 0.5 cm); el segundo grupo está definido como desintegración fina, que está constituida por molienda gruesa (0,1 - 0,3 mm) y molienda fina (menores de 0,1 mm), de aquí la diferencia entre los términos trituración y molienda [26].

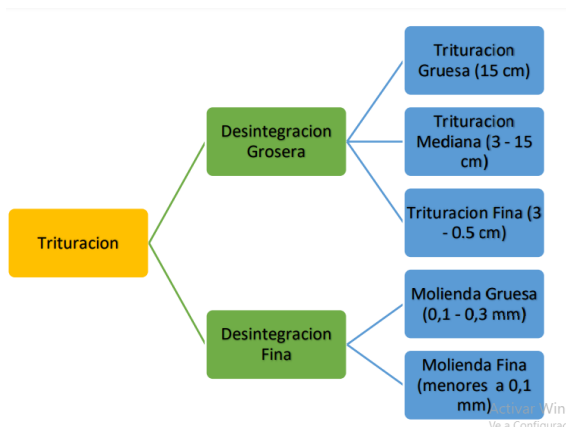


Figura 7

Clasificación de los procesos de trituración. [26]

5.5 Sistemas de Triturado de Plástico

Existen diversas clases de máquinas para triturar plástico, conocidas también como cortadoras o molinos. Estos dispositivos tienen la misma función, pero utilizan distintos elementos para llevarla a cabo. Todos están equipados con motores eléctricos de diferentes capacidades, los cuales transforman la energía eléctrica en energía mecánica de rotación. Entre los sistemas más comunes están [27]:

•Trituradoras de Cuchillas

Son máquinas que utilizan cuchillas afiladas para cortar el plástico en pedazos pequeños.

Este sistema es adecuado para el procesamiento de plásticos blandos y flexibles.

•Molinos de Martillos

Son equipos que utilizan martillos oscilantes para aplastar el plástico en partículas pequeñas.

Este sistema es más adecuado para el procesamiento de plásticos rígidos y frágiles.

•Trituradoras de Rodillos

Son máquinas que utilizan dos rodillos que giran en direcciones opuestas para aplastar el plástico en partículas pequeñas. Este sistema es adecuado para el procesamiento de plásticos duros y abrasivos.

•Granuladores

Son equipos que utilizan una combinación de cuchillas y rodillos para triturar y cortar el plástico en partículas pequeñas y uniformes. Este sistema es adecuado para el procesamiento de plásticos de alta densidad y viscosidad.

La (figura 8) presenta las partes básicas de un sistema de triturado de cuchillas, donde se pueden apreciar componentes, tales como, la tolva, la cámara de trituración, el eje ensamblado con los soportes y las cuchillas móviles, las cuchillas fijas, los soportes de la cuchilla fija y la criba o malla que separa el material.

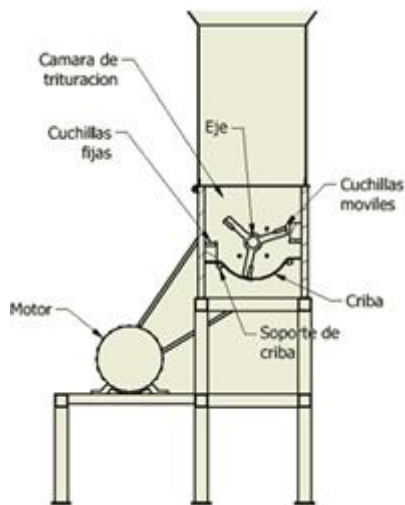


Figura 8

Diseño genérico de un sistema de trituración [28]

En relación a los ejes, que puede tener el sistema sigue la siguiente clasificación [29]:

- **Molino Mono Eje.**

Estos molinos son fabricados de manera manual en pequeñas cantidades, pero ofrecen un corte de alta calidad. Su capacidad de producción puede ajustarse para alcanzar entre 3 y 5 kg por hora de forma manual. Sin embargo, al utilizar un motor de 5Hp, la producción puede aumentar considerablemente a 20 kg por hora. Un desafío importante de este tipo de molino es que se recomienda triturar cantidades pequeñas a la vez para evitar obstrucciones en el proceso (figura 9a).

- **Molino de Dos Ejes.**

En comparación con el molino anterior, este molino cuenta con dos ejes, lo que reduce el esfuerzo de los rotores y al mismo tiempo duplica la capacidad de producción. Es decir, en una hora puede procesar de 40 a 50 kg. Las ventajas de este tipo de molinos incluyen

un corte más preciso, menor desgaste de los ejes, lo que se traduce en una mayor durabilidad y una producción más alta (figura 9b). Molino de 3 ejes o más.

Los molinos de este tipo no se pueden fabricar de manera artesanal como los anteriores, ya que son de producción industrial y tienen la capacidad de triturar diversos materiales como llantas, madera, metal, plástico, entre otros. La producción mínima o base de un molino de esta magnitud es de 1000 kg por hora, lo que implica costos significativos en términos de los materiales necesarios para su construcción (figura 9c).

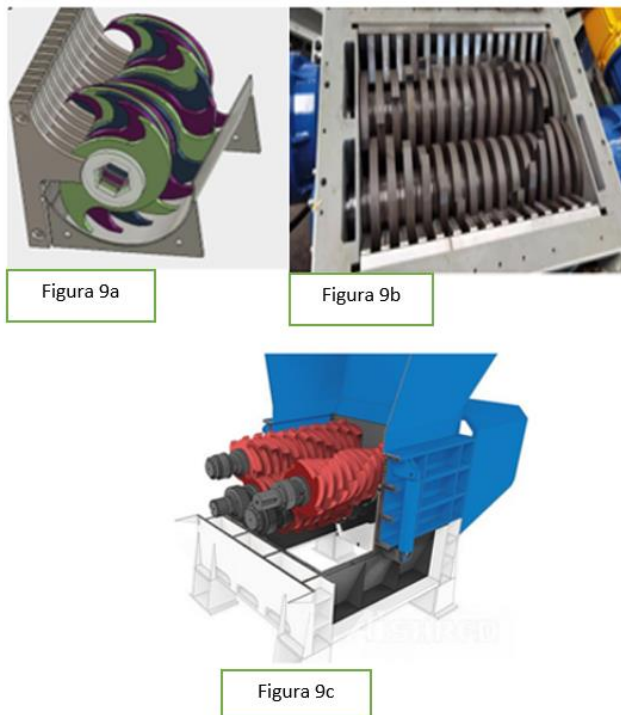


Figura 9

Clasificación de los sistemas de trituración en función del número de ejes [30]

6. Antecedentes

Villalba et al [31] desarrollaron un proyecto enfocado en aprovechar la creciente demanda internacional de PET reciclado, motivada por los incrementos en los precios del PET natural. En la ciudad de Juárez, donde no existe una actividad de reciclaje a nivel industrial, se identificó una clara oportunidad para el desarrollo de una planta recicladora de PET. Desde una perspectiva técnica y económica, se considera viable la instalación y puesta en marcha de la planta, con el objetivo a corto plazo de desarrollar una máquina trituradora de PET de bajo costo, potente y de calidad. Esta máquina, diseñada para uso comercial y doméstico, busca promover el reciclaje, incluso en S educativos, como escuelas. La producción de hojuelas de PET de media pulgada mediante el reciclado mecánico se plantea como el producto final, destinado a ser utilizado como materia prima en diversas aplicaciones, desde textiles hasta juguetes. Desde una perspectiva técnica, se destaca la importancia del motor y las especificaciones del cortador, utilizando acero SISA A2 y simulaciones en SOLIDWORKS. La máquina se estructuró sobre una mesa de PTR, y se implementó un sistema de engranajes para transmitir potencia y movimiento circular a los cortadores, garantizando una relación de transmisión precisa. La visión a largo plazo es establecer un negocio rentable y sostenible en el ámbito del reciclaje de PET.

J. Bravo [32] Aborda la problemática del inadecuado tratamiento de los desechos plásticos mediante el diseño y construcción de una máquina trituradora destinada a integrarse en la cadena de reciclaje del plástico. La propuesta busca cambiar la percepción de los residuos plásticos como basura desechable, promoviendo su reutilización como fuentes de trabajo y estimulando la industria del reciclaje. El prototipo industrial autónomo logra una capacidad de trituración de 0,36 kg por minuto y un peso neto de 152 kg, adecuado para entornos de

reciclaje manual. La trituración en la cadena de reciclaje desempeña un papel fundamental al reducir la contaminación, convirtiendo los residuos en material homogéneo y facilitando su manipulación. La máquina utiliza una configuración de doble eje, seleccionada por su equilibrio entre eficacia y costo, con una estructura resistente compuesta por placas de hierro soldadas. Las dimensiones de la caja permiten recibir botellas de hasta 2,5L, ofreciendo un diseño compacto. El sistema de trituración utiliza un motor asincrónico trifásico de 3 HP en combinación con una caja de reducción, y se destacan los engranajes rectos para maximizar la eficiencia. Los elementos de corte, diseñados con inspiración en modelos de SSI Shredder Systems, presentan una disposición desfasada para mejorar la eficacia frente a grandes volúmenes de material. El afilado de las cuchillas contribuye a la calidad de los pellets resultantes. El proyecto logra construir una máquina que automatiza la trituración de envases plásticos, adaptándose a entornos de reciclaje manual y acelerando el ciclo de uso de los plásticos.

El proyecto de N.A.S. Robles and F. Cely [33] proponen una solución técnica para la gestión eficiente de residuos sólidos mediante el diseño y construcción de una máquina trituradora especializada en abrir y vaciar bolsas de diversos tamaños. Desarrollado por ingenieros electromecánicos de la Universidad Antonio Nariño, sede Tunja, el enfoque técnico se centra en la simulación utilizando software de diseño mecánico para analizar componentes, características geométricas y condiciones de funcionamiento de un molino triturador. La máquina busca simplicidad y eficacia, minimizando costos de consumo y mantenimiento, y pretende agilizar la primera etapa del proceso de transformación de residuos. La disposición final de las bolsas se plantea junto con los residuos contenidos, contribuyendo a la obtención de un combustible alternativo para la industria cementera. La simulación resulta esencial para la toma de decisiones en la fabricación de una máquina trituradora industrial, optimizando el

proceso y considerando factores de seguridad estáticos y dinámicos, así como la resistencia a la fatiga. En conjunto, el proyecto busca no solo resolver la problemática de los residuos, sino también aprovecharlos como recurso, contribuyendo a la sostenibilidad y competitividad de la industria.

El proyecto de D.F Gaitán [34] aborda la problemática de la gestión ineficiente de residuos sólidos en Colombia, donde se generan 11,6 millones de toneladas de basura doméstica anualmente, con solo un 17% de aprovechamiento. El enfoque se centra en el diseño y fabricación de un molino triturador de polímeros termoplásticos, especialmente dirigido a abordar la contaminación causada por los productos plásticos. La máquina tiene como función principal cortar y reducir el tamaño del plástico para facilitar su reprocesamiento, resultando en una disminución significativa de la contaminación y la generación de nuevas empresas dedicadas a la trituración e inyección de plástico reciclado. El diseño del molino se basa en la metodología QFD, que traduce las necesidades del cliente en especificaciones técnicas, seguido de un análisis de elementos finitos para evaluar la resistencia y esfuerzos de la máquina. Además, se realiza un estudio económico detallado que incluye la mano de obra necesaria para la fabricación del molino, con el objetivo de obtener un valor preciso de la inversión. El trabajo destaca la importancia de ver el reciclaje como una oportunidad para reducir costos y crear nuevas empresas y mercados. La metodología utilizada incorpora principios de diseño concurrente y relaciones interfuncionales, siguiendo la propuesta de Carles Riba, lo que permite una representación estructurada de la función global del producto. En resumen, el proyecto busca ofrecer una solución técnica y económica para fomentar el reciclaje y el reaprovechamiento de plásticos en Colombia, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental y al desarrollo de nuevas iniciativas empresariales.

Los cuatro proyectos analizados comparten un enfoque común en abordar la problemática global de los residuos sólidos, particularmente centrados en la gestión eficiente y sostenible de materiales como el plástico. La temática central de estos proyectos refleja una preocupación por la contaminación ambiental generada por la incorrecta disposición de residuos, siendo evidente en la baja tasa de reciclaje. Cada proyecto busca desarrollar soluciones técnicas y tecnológicas para enfrentar este desafío, ya sea mediante el diseño de maquinaria especializada, la creación de procesos de tratamiento más eficientes, o la implementación de nuevos enfoques en la gestión de residuos.

A pesar de sus similitudes, los proyectos difieren en sus enfoques específicos y objetivos. Algunos se centran en la creación de maquinaria para la trituración de plásticos, mientras que otros adoptan un enfoque más integral, abordando desde la apertura de bolsas hasta la generación de nuevos productos a partir de materiales reciclados. La industria objetivo también varía, con algunos proyectos orientados a plantas de tratamiento de residuos urbanos y otros dirigidos a la industria del reciclaje y la producción de nuevos artículos.

Considerando las oportunidades para proyectos futuros, se destaca la posibilidad de integrar tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial y el internet de las cosas, para mejorar la eficiencia en la gestión de residuos. Además, proyectos centrados en la educación y sensibilización pública podrían cambiar las percepciones y comportamientos en torno al reciclaje. La colaboración interdisciplinaria entre ingenieros, diseñadores, ambientalistas y expertos en negocios podría conducir a soluciones más globales y sostenibles. Explorar nuevos materiales y desarrollar proyectos escalables que se adapten a diversos entornos también representan oportunidades clave para abordar la problemática de los residuos sólidos de manera más efectiva y sostenible.

La creciente acumulación de residuos plásticos representa un desafío ambiental significativo. La transformación de plásticos reciclados en materiales útiles a través de procesos mecánicos, como la trituración, se ha convertido en una estrategia clave para promover la sostenibilidad. Los molinos trituradores de cuchillas son una solución técnica importante en este contexto, proporcionando una forma eficiente de reducir el tamaño de los plásticos reciclables y facilitar su posterior procesamiento. Esta revisión de literatura explora los avances en el diseño y la eficiencia de los prototipos de molinos trituradores de cuchillas, con el objetivo de optimizar el aprovechamiento sostenible del plástico reciclado.

Así, los molinos trituradores de cuchillas se caracterizan por su capacidad para cortar y triturar plásticos en pequeños fragmentos, lo que facilita su reciclaje. Estos dispositivos pueden clasificarse principalmente en dos tipos: molinos de cuchillas fijas y molinos de cuchillas rotativas. Los primeros utilizan cuchillas estacionarias y se enfocan en una trituración eficiente a través de una acción de corte directa, mientras que los segundos emplean cuchillas rotativas que giran a alta velocidad para lograr una reducción de tamaño más agresiva [2].

Los molinos de cuchillas fijas, como los descritos por [35], utilizan un sistema de cuchillas estacionarias y una base de corte fija para triturar plásticos. Estos molinos son efectivos para procesar plásticos de mayor grosor, como botellas y piezas de envases. La eficiencia de estos molinos depende en gran medida del diseño de las cuchillas y la geometría del sistema de corte. Investigaciones recientes, como las de [36] sugieren que el uso de cuchillas intercambiables y ajustables puede mejorar significativamente la capacidad de procesamiento y reducir el desgaste de las cuchillas.

Por otro lado, los molinos de cuchillas rotativas, según [37], ofrecen ventajas en términos de velocidad y uniformidad en el tamaño de los fragmentos resultantes. Estos sistemas emplean

cuchillas que giran a alta velocidad para triturar los plásticos, lo que permite un procesamiento más rápido y eficiente. La investigación de J.F López, J.C Pomaquero [38] ha mostrado que la incorporación de cuchillas de aleaciones especiales puede mejorar la durabilidad y la capacidad de corte, optimizando así la eficiencia del proceso de trituración. La eficiencia energética es un aspecto crucial en el diseño de molinos trituradores de cuchillas, dado que el proceso de trituración requiere una cantidad significativa de energía. Según S.M Patil [39], los avances en el diseño de cuchillas y mecanismos de transmisión han permitido la reducción del consumo energético sin comprometer la eficiencia del procesamiento. Además, la integración de tecnologías de reciclaje de energía y la optimización de los parámetros operativos han contribuido a hacer estos molinos más sostenibles.

La investigación de N.A.S Robles [40] destaca que la eficiencia en la trituración de plásticos reciclados no solo está relacionada con el diseño de las cuchillas, sino también con la configuración general del molino, incluyendo el sistema de alimentación y la gestión de residuos. Las innovaciones en el diseño de sistemas de enfriamiento y lubricación también han demostrado ser efectivas en la reducción del consumo energético y el aumento de la vida útil de las cuchillas.

En consonancia con lo anterior, resulta claro que, la creciente acumulación de residuos plásticos representa un desafío ambiental significativo. La transformación de plásticos reciclados en materiales útiles a través de procesos mecánicos, como la trituración, se ha convertido en una estrategia clave para promover la sostenibilidad. Los molinos trituradores de cuchillas son una solución técnica importante en este contexto, proporcionando una forma eficiente de reducir el tamaño de los plásticos reciclables y facilitar su posterior procesamiento.

A. Vazquez, R. Valdemar, Mbeltrán [41] presentaron una trituradora de plástico desarrollada en la Universidad Federal de Tecnología, Akure (FUTA), en Nigeria. Esta máquina fue diseñada para reciclar plástico desechado, mejorando la eficiencia del proceso de reciclaje. La trituradora incluyó unidades de alimentación, trituración, transmisión de potencia y un marco robusto. Los resultados de pruebas demostraron que la máquina tiene una producción de 27.3 kg/hr y una eficiencia de recuperación de hasta el 95% para plástico de cloruro de polivinilo. Su costo de producción es de aproximadamente \$140.750 Naira nigeriana equivalente a \$100 USD, haciéndola accesible para emprendedores de pequeña y mediana escala en el sector del reciclaje de plástico.

A. Waleola Ayo, O. Olukunle, D. Adelabu [42] Desarrollaron una máquina trituradora de desechos plásticos para reducir el tamaño de los desechos en piezas pequeñas para el proceso de reciclaje. Esta máquina constituyó una evolución de máquinas anteriores. La metodología de diseño empleada en este estudio es la VDI 2222. La determinación de las dimensiones de los componentes se basó en el análisis de componentes críticos con la ayuda de software de ingeniería asistida por computadora. Esta máquina funciona insertando desechos de botellas plásticas en la tolva; el tamaño se reducirá en el área de trituración con un sistema de dos cuchillas que se mueven en direcciones opuestas con un cuchillo fijo en cada lado, y el resultado son astillas de plástico con un tamaño máximo de 5x5 mm. Después del proceso de diseño, la máquina es operada con un motor eléctrico con una potencia de 0,75 kW y una rotación de salida de 50 rpm. Esta máquina puede procesar 10 kg/día de desechos plásticos con dimensiones de 400 x 600 x 900 mm y un peso total de 124 kg.

D. Ariefijanto, N.R. Novianty, A.I. Komara[43] Para manejar los residuos plásticos y convertirlos en pequeñas escamas, diseñaron una trituradora de plástico. El concepto de diseño de la trituradora de plástico considera que el eje y las cuchillas son los componentes

críticos en la máquina trituradora que determinan su rendimiento. Su estudio encontró que la geometría y la orientación de las cuchillas instaladas en los ejes simples o dobles afectan directamente el rendimiento de la trituración. Por lo tanto, revisaron las diferentes geometrías y orientaciones de las cuchillas que afectan directamente el rendimiento de la trituración, así mismo, identificaron las brechas de investigación relacionadas con la máquina trituradora para materiales de desechos plásticos. Al respecto, desarrollaron una máquina compacta y de bajo costo para triturar nylon de baja densidad y plásticos, que es fácil de operar sin necesidad de mano de obra técnica especializada. La máquina trituradora cuenta con cuchillas de corte de acero dulce dispuestas en un ángulo de 40 grados para reducir la potencia necesaria para rotar el eje, un motor de inducción monofásico de 550 vatios/1 HP con una velocidad de entrada de 1405 rpm y un par de entrada de 3.738 Nm. Además, utiliza un acoplamiento tipo mandíbula que transmite torque, amortigua vibraciones y acomoda desalineaciones, compuesto por dos cubos metálicos y un inserto elastomérico que garantiza la operación continua incluso si el elastómero falla. La máquina, si se mantiene adecuadamente, evidencia una durabilidad garantizada y un costo de mantenimiento más bajo en comparación con la maquinaria importada existente.

La investigación de S. M. Patil [44] presentó una solución innovadora para el reciclaje de desechos multipolímeros (PMW) utilizando la tecnología de molienda por cizallamiento en estado sólido (S3M). Este método aprovechó una potente fuerza de cizallamiento tridimensional para pulverizar y dispersar eficientemente los polímeros multicomponentes a temperatura ambiente, mejorando la procesabilidad termoplástica del PMW molido. Los análisis de DSC y DMA revelaron una excelente compatibilidad entre los componentes del compuesto, resultando en mejoras en las propiedades mecánicas, como el esfuerzo de tracción (de 14.03 MPa a 22.02 MPa) y la resistencia al impacto sin muesca (de 3.26 KJ/m²

a 4.82 KJ/m²). Los resultados demostraron una reducción significativa en el tamaño de las partículas de PMW y una mejor dispersión de los dominios, lo que mejoró notablemente las propiedades mecánicas del material reciclado. La investigación sugirió que la tecnología S3M es una metodología efectiva y sostenible para el reciclaje de PMW sin necesidad de separación previa, con aplicaciones industriales prometedoras.

Estas investigaciones destacan la importancia de optimizar el diseño de componentes críticos, como cuchillas y motores, para mejorar la eficiencia y reducir costos. Se observa una tendencia hacia el desarrollo de máquinas de bajo costo y fácil mantenimiento, aptas para pequeños emprendedores. Estas innovaciones proporcionan una base sólida para el desarrollo futuro de equipos de reciclaje más eficientes y sostenibles.

En general, los molinos trituradores son máquinas bastante resistentes, así que, si la conservación de sus elementos principales es óptima, se puede trabajar con ellos por mucho tiempo, siendo así una adquisición buena para una empresa nivel industrial. En este sentido, de maquinaria industrial se destacan los modelos GT 3050, GT 2403, GT 3667 y ME 0004.

La figura 10 muestra los modelos previamente mencionados.

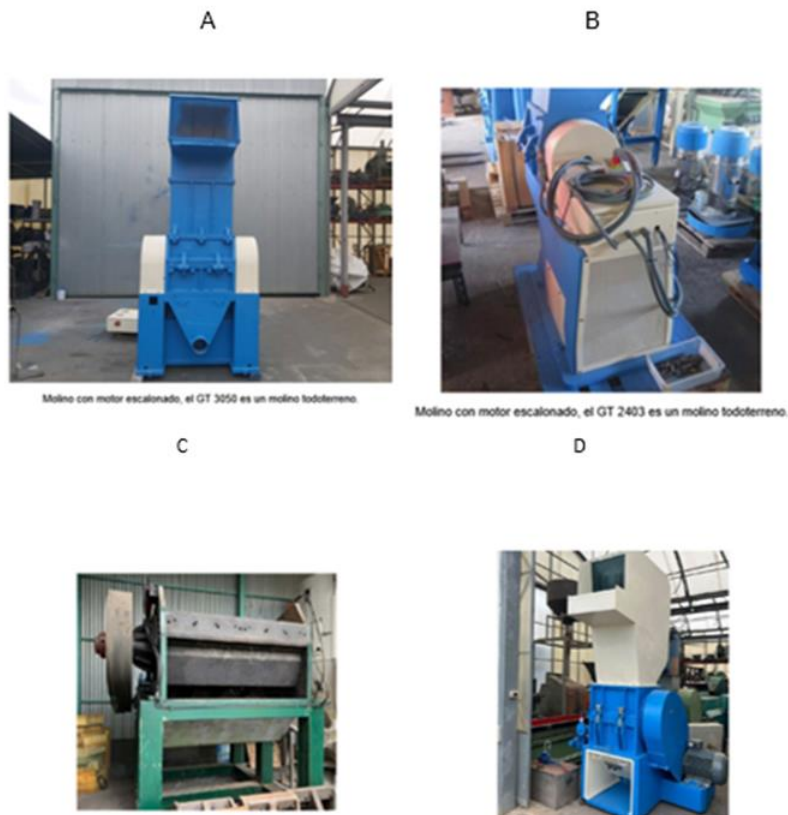


Figura 10

Modelos de trituradoras industriales [45]

A seguir se presentan algunas referencias de la literatura que engloban resultados prácticos del uso de trituradoras.

En el estudio de B. Wei, L. Li [45] evaluó la eficiencia energética de una trituradora de martillos a escala industrial en la planta de Zeolitas de San Andrés. Los procesos de trituración y molienda consumen una gran cantidad de energía, representando entre el 3% y el 4% de la energía generada a nivel mundial. Se realizó un diseño de experimentos para evaluar la potencia consumida por el motor de la trituradora, variando la velocidad del rotor, la cantidad de martillos y la tasa de producción. Los resultados indicaron que el aumento en la velocidad del rotor incrementa el consumo energético sin beneficios significativos en la

trituration de rocas zeolíticas. Se propone un régimen tecnológico de operación de la trituradora con una velocidad del rotor de 1100 rpm, dos martillos y una tasa de producción de 15 t/h, basado en los ensayos realizados.

En la tesis de grado de [46] se diseñó la herramienta de percusión (martillos), los ejes y el disco porta ejes para un molino triturador de residuos sólidos de poliuretano. Se realizó un análisis de fuerzas actuantes en estos componentes y se calculó su factor de diseño, obteniendo resultados favorables (factor de diseño de 28.4 para los martillos, 19.8 para los ejes y 2.82 para el disco). También se calcularon la potencia del motor, la transmisión de potencia y otros aspectos técnicos. Además, se implementó un interruptor Termomagnético con la función de proteger el motor del molino triturador, desconectando el circuito en caso de sobrecarga o corriente excesiva.

J. Gausemeier y S. Moehring [47] Abordaron diferentes tipos de molinos trituradores de plástico, con uno, dos o cuatro ejes, así como la combinación de cuchillas y medios cortantes. Además, se analiza la viabilidad técnica, económica, ambiental y social del diseño y construcción de la máquina. Esta evaluación es importante para determinar si el proyecto es viable y evitar destinar recursos sin obtener beneficios positivos en retorno.

Ming-fu [49], utilizó la metodología QFD (Despliegue de la Función de Calidad) de manera completa, que permite comprender las prioridades del cliente y buscar la mejor alternativa para satisfacer esas necesidades. El autor comienza recopilando los requisitos del usuario, especificando las características que la máquina debe tener. A través de la metodología, se obtienen parámetros técnicos como el costo, el volumen de producción, el control de vibraciones, el peso y la calidad de los materiales. Se realiza una encuesta para determinar la cantidad diaria de botellas generadas y así establecer la capacidad y otras especificaciones técnicas de la máquina. Además, se diseña un flujo de trabajo que desglosa las funciones

necesarias para obtener el producto final, y se proponen alternativas de diseño para cada módulo. Para evaluar y seleccionar las mejores alternativas, se utiliza el método ordinal corregido de criterios ponderados, asignando valores y ponderaciones a través de una matriz de correlación. Esta tesis aporta significativamente a la solución del proyecto de investigación, ya que la metodología QFD aborda la mayoría de los objetivos y se presenta de manera clara y enfocada, sirviendo como guía para el autor del proyecto

A continuación, se presentan algunas de las trituradoras de plástico comerciales (figura 11) con sus respectivas características y precios, ver tabla 2.

Tabla 2

Precios y Características de Trituradoras de Plástico[15]

Nombre	Características	
Trituradora casera de venta libre	Boca de entrada 250 x 300 mm Cuchillas fijas 18 Cuchillas móviles 19 Potencia de motor ¼ Hp	\$ 2'800.000 COP
De un solo eje modelo VMWT2260[19]	Boca de entrada 790 x 600 mm Diámetro rotor Φ220 Cuchillas giratorias 30 Cuchillas fijas 4 Potencia de motor 18.5 KW Potencia hidráulica 2.2 KW	\$ 12'326.160 COP
De doble eje modelo VGML2160 [20]	Boca de entrada 550 x 300mm Rotor 284mm Numero de cuchillas 30 Espesor de cuchillas 20mm Potencia de motor 5.5 + 5.5 KW Peso 1900kg	\$ 17'045.030 COP
TYPE 250 [21]	Boca de entrada 250 x 190mm Potencia motor 3.7 KW Cuchillas fijas 2 Cuchillas giratorias 15	\$ 4'300.000 COP



Figura 11

Modelo de Molinos Trituradores Industriales y caseros. [6]

7. Metodología

Para el diseño del sistema de triturado de polímeros reciclados para su uso en manufactura, se siguió la metodología de diseño mecatrónico [40]. Esta metodología es un enfoque estructurado y sistemático que integra las disciplinas mecánicas, eléctrica y de control en el proceso de diseño.

La metodología se basa en una representación gráfica en forma de V (figura 12), donde cada fase del proceso de diseño se muestra en un nivel de abstracción específico. Comienza con la definición de los requisitos del sistema y la identificación de los objetivos de diseño. A medida que se desciende por el lado izquierdo de la V, se lleva a cabo el diseño conceptual y se definen las especificaciones detalladas. A medida que se asciende por el lado derecho de la V, se realizan actividades como la implementación y la integración de los componentes mecánicos, eléctricos y de control. Finalmente, se llevó a cabo la verificación y validación del sistema, donde se realizan pruebas y se evalúa el cumplimiento de los requisitos establecidos. Esta metodología garantiza un enfoque coherente y estructurado durante todo el proceso de diseño, permitiendo una integración eficiente de las diferentes disciplinas involucradas. Esto asegura que el sistema de triturado de polímeros reciclados cumpla con los requisitos de desempeño, fiabilidad y funcionalidad necesarios para su implementación en la manufactura.



Figura 12

Metodología de Diseño Mecatrónico, Modelo en V [47]

En este tipo de investigación aplicada se busca resolver problemas prácticos y específicos a través del desarrollo de soluciones tecnológicas. En este caso, se enfoca en el diseño y la creación de una máquina trituradora de plástico, abordando un problema ambiental crítico: la gestión de residuos plásticos. Mejorando así la eficiencia del proceso de reciclaje de plásticos mediante la optimización del diseño de la trituradora, lo que incluye su velocidad de operación y la uniformidad del material procesado.

Esta investigación se alinea con políticas globales y locales que buscan mitigar el impacto negativo de los plásticos en el medio ambiente, promoviendo la reutilización y el reciclaje; Los resultados tienen una aplicación directa en el sector manufacturero, donde se requiere una solución efectiva para el manejo de residuos plásticos.

A seguir se detallan las fases, seguidas para el desarrollo del presente proyecto.

A. Fase 1. DISEÑO

Investigación Documental. Se realizó un análisis exhaustivo de fuentes académicas, artículos, y publicaciones relacionadas con tecnologías de reciclaje y trituración de plásticos. Esto incluye estudios sobre el impacto ambiental de los plásticos, técnicas de reciclaje, y casos de éxito en el uso de trituradoras en otras industrias, se investigó normativas y regulaciones ambientales que afectan la gestión de residuos plásticos a nivel local y global, para asegurarse de que el diseño cumpla con los estándares requeridos.

Análisis de Tecnologías Existentes. Se evalúa diferentes tipos de trituradoras de plástico ya existentes, analizando sus diseños, materiales, costos, y eficiencias identificando las limitaciones y oportunidades de mejora en las máquinas disponibles en el mercado, así como las necesidades no satisfechas de los usuarios.

Definición de Especificaciones del Proyecto. Se definió las características que debe tener la máquina, como la capacidad de triturar diferentes tipos de plásticos (PET, PP, PS), el tamaño del material triturado, y la velocidad de operación teniendo en cuenta unos criterios de diseño relacionados con la seguridad, la facilidad de operación, el mantenimiento y la sostenibilidad del diseño.

Diseño Conceptual.

1. **Diseño a mano alzada.** se inició como primera medida plasmando en papel y con dibujo a mano alzada un posible diseño de las piezas críticas de la trituradora.
2. **Modelado CAD.** Se utilizó software de diseño asistido por computadora (CAD) para crear modelos tridimensionales de la máquina. Esto permitió visualizar el diseño y realizar ajustes antes de la construcción.

3. **Simulación.** Se realizaron simulaciones para prever el rendimiento de la máquina bajo diferentes condiciones de operación, identificando posibles puntos de falla y áreas de mejora en el diseño.
4. **Diseño de sistema de control.** se realizó el diseño del sistema de control teniendo en cuenta cual es la funcionalidad de la máquina, medidas de seguridad mínimas que debía tener y las características del motor eléctrico que se usa.
5. **Evaluación del Diseño.** Se evaluó la viabilidad técnica y económica del diseño, considerando factores como los costos de materiales, el tiempo de fabricación y la escalabilidad del prototipo.
6. **Preparación para la Construcción.** Se hizo un prospecto y planificación de recursos al identificar los materiales y herramientas necesarios para la construcción del prototipo. Esto incluyó la búsqueda de proveedores y la estimación de costos.

B. Fase 2. CONSTRUCCIÓN DEL SITEMA DE TRITURADO DE PLÁSTICO

1. **Selección de Materiales.** Se eligieron materiales adecuados para la construcción de la máquina, considerando propiedades como durabilidad, resistencia a la abrasión y una alta dureza. Ejemplos incluyen acero inoxidable para componentes estructurales y acero anti desgaste Hardox 450.
2. **Evaluación de Proveedores.** Se investigó y selecciono proveedores confiables que ofrecieran materiales de buena calidad a precios competitivos. Se pidió muestras para verificar la calidad antes de realizar pedidos en cantidades necesarias para la construcción de la máquina.

3. **Fabricación.** En primera instancia se planeó fabricar las piezas en una fresadora CNC a lo cual mediante la primera prueba que se hizo se pudo evidenciar que el material a maquinar era muy duro y que la cantidad de herramientas de corte que usa la fresadora CNC seria alta, lo cual incrementaría los costos, motivo por el cual se optó por hacer el maquinado bajo un servicio de corte laser. En cuanto a la estructura base y la tolva de carga de material a triturar se fabricó teniendo en cuenta el diseño y medidas virtuales correspondientes al diseño.
4. **Proceso de Ensamblaje.** Se establece un plan de ensamblaje que detalló la secuencia de montaje de los componentes de la máquina, iniciando desde los componentes internos hasta los más externos guiados bajo el ensamble virtual para facilitar el proceso, dentro del proceso de ensamble también se llevó a cabo el proceso de pintura de los componentes que lo requerían.
5. **Control de Calidad.** Se implementó un sistema de control de calidad durante la fabricación. Inspecciona regularmente los componentes y el ensamblaje para garantizar que cumplan con las especificaciones diseñadas, mediante la comparación de las medidas y formas físicas de las piezas virtuales y las piezas físicas.
6. **Calibración del Prototipo.** Una vez estuvo ensamblada la máquina, se realizaron ajustes iniciales para asegurar de que todas las partes móviles funcionen sin problemas. Se verificó la alineación de los componentes y se realizaron los ajustes necesarios.
7. **Pruebas Preliminares.** Se realizó pruebas preliminares con diferentes tipos de plásticos para evaluar el funcionamiento de la máquina. Se observó el

comportamiento de la trituradora donde se evidencio un funcionamiento adecuado según lo previsto.

- 8. Manual de Operación.** Se desarrolla un manual de operación que incluye instrucciones para el uso, mantenimiento y seguridad de la máquina. Esto ayudará a los futuros usuarios a comprender mejor cómo operar el prototipo de manera segura y eficiente.
- 9. Revisión Final.** Se realiza una revisión final del prototipo, asegurándose de que cumpla con los requisitos establecidos en la fase de diseño. Asegurando que todas las partes estén correctamente ensambladas y operativas.

C. Fase 3. PRUEBAS DE VALIDACIÓN.

- 1.** Se determinar si el prototipo cumple con las especificaciones de diseño y rendimiento establecidas, se verifica funcionalidad de la maquina ejecutando el proceso de trituración en términos de velocidad y uniformidad del material triturado.
- 2.** Se identifican problemas y/o posibles fallos o áreas de mejora en el diseño y funcionamiento del prototipo.
- 3.** Se establece criterios específicos para cada prueba, como la cantidad de material triturado en un tiempo determinado, el tamaño del material final.
- 4.** Se seleccionaron materiales para pruebas utilizando una variedad de plásticos (PET, PP, PS) para evaluar cómo la máquina se desempeña con diferentes tipos de materiales.
- 5.** Se hizo preparación del material recogido de los diferentes tipos de plásticos que se utilizaron para las pruebas. Asegurándose de que el material esté en condiciones adecuadas (tamaño y forma) para ser procesado por la máquina.

6. Realizar pruebas de funcionamiento continuas, variando los parámetros operativos como la velocidad de corte y la precisión.
7. Observar el funcionamiento de la máquina y registrar cualquier anomalía o comportamiento inesperado.

8. Resultados

Para llevar a cabo este proyecto se tuvo como base fundamental la metodología de diseño mecatrónico, la cual permitió identificar las variables y necesidades de la máquina para un óptimo rendimiento y que su triturado fuera el mejor. Se decide tomar como referencia de corte el efecto tijera de una máquina ya existente, esto debido a sus características a la hora de realizar un corte, ya que, lo realiza limpio. Adicional a esto se implementa en la creación de las cuchillas una punta curva y afilada para que pueda sujetar de mejor manera el material y así mismo aumentar la eficiencia del proceso y una mejora en cuanto a la máquina tomada como referencia fue la de realizar una tolva lo suficientemente grande para la cantidad de material que le puede introducir y especialmente pensando en el bienestar del operario debido a los posibles riesgos que estaría expuesto. También se pensó en el efecto del giro que debía tener las cuchillas y se le implementa el desfase de las cuchillas para que vaya sujetando el material en cualquier posición que se encuentre, ya sea en el centro o en alguno de sus extremos, para así garantizar el correcto corte.

Teniendo identificadas estas variables se procede a realizar un bosquejo a mano alzada, tomando como ejemplo una máquina ya existente de venta libre (figura 11) [48] para tener una idea de cómo se iba a ejecutar la parte esencial, que en este caso son las cuchillas para que se realice un buen triturado de plástico. Tras el diseño previo, se procede al estudio y selección del material a emplear. Éste debe poseer alta resistencia a la fricción y al calentamiento, a fin de evitar una deformación o un desgaste acelerado. Luego de las investigaciones pertinentes, se decide utilizar acero HARDOX 450, un material con excelentes propiedades mecánicas en cuanto a fricción y tolerancia a altas temperaturas. Sin embargo, el mecanizado de este acero en fresadora CNC presenta dificultades, por lo que se

opta por un proceso de corte láser, el cual resulta más conveniente al minimizar el desperdicio de material y permitir la obtención de todas las piezas necesarias para la parte mecánica del diseño. Una vez definidos los diseños CAD, se procede al envío de los mismos para ejecutar los cortes láser correspondientes. A continuación, se observa en la tabla 3 las diferencias de cada uno de los materiales que se pensó en usar para este proyecto.

Material	Aplicaciones	Dureza (HBW)	Lim. Elástico (KSI)	Carga de rotura (KSI)	Alargamiento (%)	Costo Pesos
XAR 500	Chutes, Tolvas, Trituradoras, etc.	470-530	188	232	9	3'230.000
CHRONIT 450	Tolvas de volqueta, cucharas de máquinas.	420-480	169	191	10	2'332.000
ABRAZO 400	Excavadoras, Dagas, Trituradoras, etc.	360-400	145	188	12	1'456.000
HARDOX 450	Cuchillas, Poleas, Containers, etc.	425-475	175	205	14	1'071.00

Tabla 3

Comparación de precios y características de los aceros investigados.

En cuanto al eje central, se seleccionó un acero aleado con carbono debido a su rigidez, siendo ésta la opción más adecuada para la función que debe desempeñar. Paralelamente al proceso de corte, se avanzó en el diseño y ejecución de la base donde se instalará la máquina, así como en el análisis de esfuerzos de las piezas fundamentales. Una vez recibidas las piezas, se procedió a realizar un pulido manual para evitar la presencia de contaminantes en las cuchillas fijas y móviles. Posteriormente, se ejecutó el ensamblaje de la máquina, integrando las piezas, la base y la tolva, y finalmente se realizaron los ajustes estéticos finales para completar el proceso.

A continuación, se detalla el procedimiento llevado a cabo en cada una de las fases para llevar a buen término el proyecto.

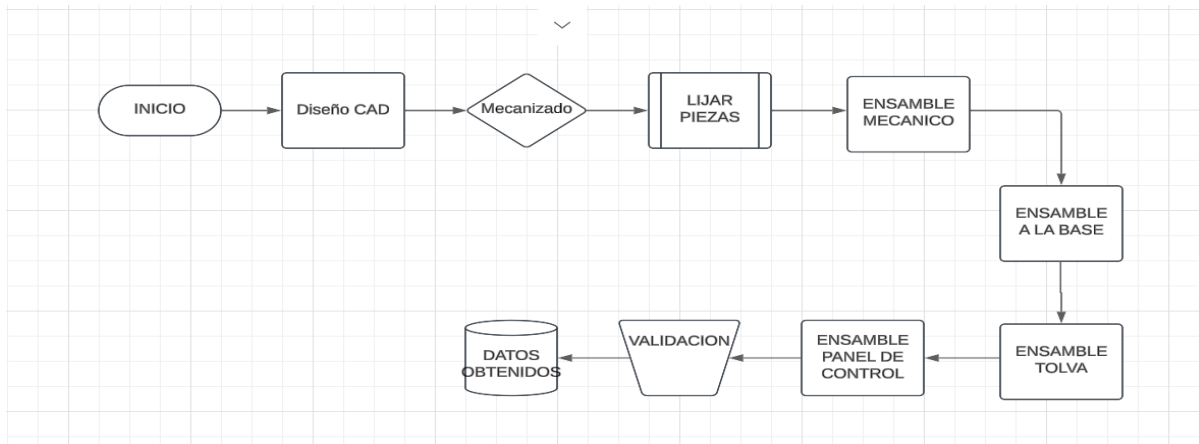


Figura 13

Diagrama de flujo de proceso de ensamble

Fuente propia

8.1 Bosquejo a mano alzada

El diseño a mano alzada (figura 14) toma como referencia componentes de las máquinas identificadas en la etapa de revisión antecedentes, a partir de la cual se origina la idea del principio de corte de las cuchillas y se procede a bosquejar la configuración mecánica de la máquina. En base a esta información preliminar, se define la forma de las cuchillas y se diseñan separadores propios con el fin de lograr el efecto de corte, siguiendo el principio de funcionamiento de una tijera.

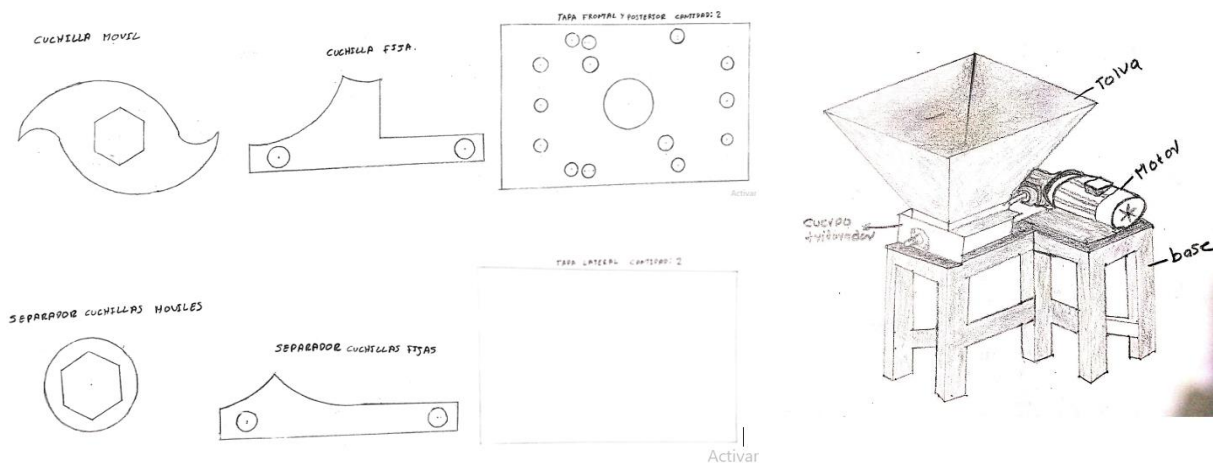
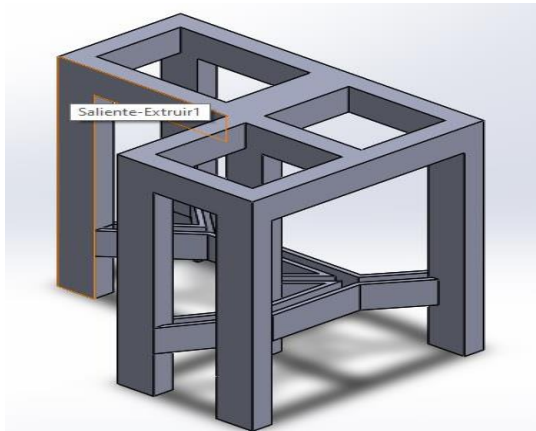


Figura 14

Bosquejo a mano alzada

Fuente elaboración propia

8.2 Modelado y diseño CAD**Figura 15**

Diseño de base para el sistema de triturado

Fuente: elaboración propia.

La base de la trituradora (figura 15) es la estructura de soporte sobre la cual se montan todos los componentes de la máquina. Está diseñada con tubos cuadrados de 4 mm para proporcionar estabilidad y resistencia, soportando tanto el peso de la máquina como las fuerzas generadas durante la operación. Fabricada mayormente en acero, la base debe estar anclada de manera segura al suelo para evitar vibraciones y desplazamientos que puedan afectar el rendimiento del equipo.

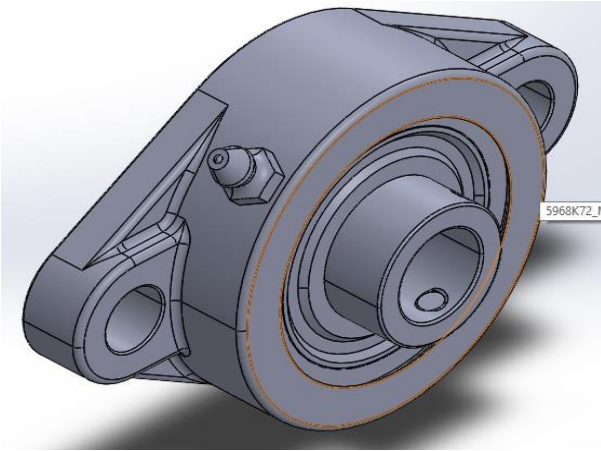


Figura 16

Diseño CAD de la Chumacera

Fuente: elaboración propia.

La chumacera (figura 16), fabricada en fundición, de la cual se utilizan 2 unidades, tiene un diámetro de 25.4 mm. Las chumaceras son soportes de rodamientos que proporcionan estabilidad al eje principal de la máquina. Están diseñadas para resistir las fuerzas radiales y axiales generadas durante el funcionamiento del equipo. Las chumaceras aseguran que el eje principal gire con mínima fricción y sin desalineamientos, prolongando la vida útil de la máquina y garantizando un rendimiento consistente.

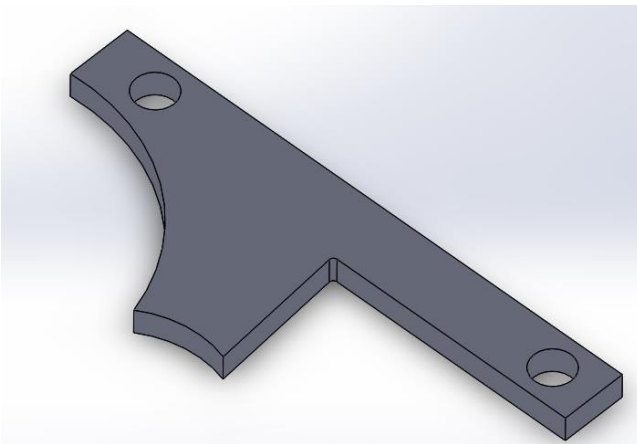


Figura 17

Diseño de cuchilla Fija

Fuente: elaboración propia.

La cuchilla fija (figura 17), fabricada en acero anti desgaste Hardox 450, presenta dimensiones de 52.67 mm de ancho, 132 mm de largo y un espesor de 6.35 mm, con una cantidad total de 22 unidades para ensamble en la máquina. Este es un acero conocido por su sobresaliente resistencia al desgaste y su versatilidad, combinando una dureza de 425-475 HBV con una alta tenacidad, lo que lo convierte en una opción ideal para aplicaciones sometidas a abrasión intensa. Las propiedades mecánicas del material incluyen un esfuerzo a la fluencia mínimo de 175 ksi, esfuerzo a la tensión de 205 ksi y una elongación mínima del 14% en 50 mm, proporcionando una combinación equilibrada de dureza y capacidad de deformación antes de fracturarse. Este material es especialmente adecuado para entornos de alta exigencia, donde el desgaste es crítico, manteniendo además una facilidad de trabajo en taller que permite ajustarse a diversas configuraciones industriales.

La cuchilla fija (figura 17), es un componente esencial que se encarga de mantener una posición estática durante el proceso de trituración. Está diseñada con bordes afilados y una geometría específica para maximizar la eficiencia del corte. Su ubicación estratégica en el interior de la máquina permite que actúe como un contrapunto contra las cuchillas móviles, facilitando el efecto de corte para la reducción efectiva del tamaño del material plástico. Está fabricada especialmente en acero de alta dureza para resistir el desgaste constante durante el funcionamiento.

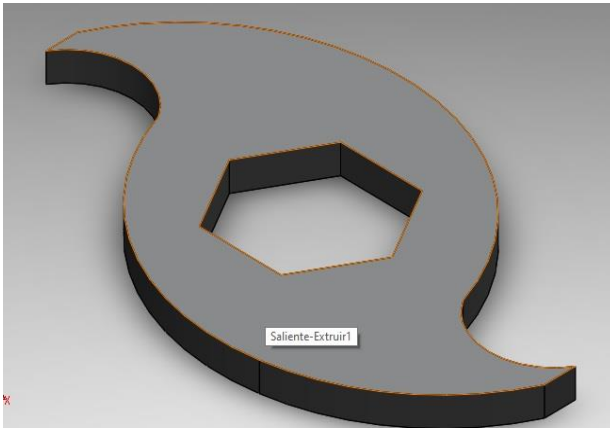


Figura 18

Diseño cuchilla Móvil

Fuente: elaboración propia.

La cuchilla móvil (figura 18), fabricada en acero anti desgaste Hardox 450, presenta dimensiones de 60.21 mm de ancho, 119.93 mm de largo y 6.35 mm de espesor, con una cantidad de 20 unidades para ensamble de la máquina. Las cuchillas móviles son elementos que giran en torno al eje principal, accionadas por un motor que les proporciona el movimiento necesario. Estas cuchillas interactúan directamente con las cuchillas fijas para realizar el corte del material plástico. Su diseño incluye 2 filos cortantes distribuidos en ángulos estratégicos para optimizar el proceso de trituración.



Figura 19

Diseño eje principal

Fuente: elaboración propia.

El eje principal (figura 19), fabricado con barras de acero AISI/SAE 1045, tiene dimensiones de 32 mm de diámetro y 411 mm de largo, con un único ejemplar en la producción. El acero AISI/SAE 1045 es un acero al carbono de medio contenido, conocido por su equilibrio entre dureza y tenacidad. Sus propiedades mecánicas incluyen un esfuerzo a la fluencia mínimo de 40 kg/mm², un esfuerzo a la tracción que oscila entre 63 y 73 kg/mm², y una elongación mínima del 15%, lo que le otorga una adecuada capacidad de deformación antes de la fractura. Su dureza se encuentra en el rango de 170-190 HBV, lo que le proporciona una resistencia moderada al desgaste sin comprometer su maquinabilidad. Este material es muy usado para diversas aplicaciones industriales que requieren resistencia mecánica y durabilidad, tales como ejes, manivelas, chavetas, pernos, tuercas, cadenas y engranajes de baja velocidad. Además, puede ser sometido a procesos de temple y revenido para mejorar sus propiedades mecánicas, haciéndolo más versátil para diferentes condiciones de trabajo.

El eje principal es el componente sobre el cual se montan las cuchillas móviles y es responsable de transmitir la potencia generada por el motor a las cuchillas. Este eje debe ser extremadamente robusto, ya que soporta las fuerzas de corte generadas durante la operación.

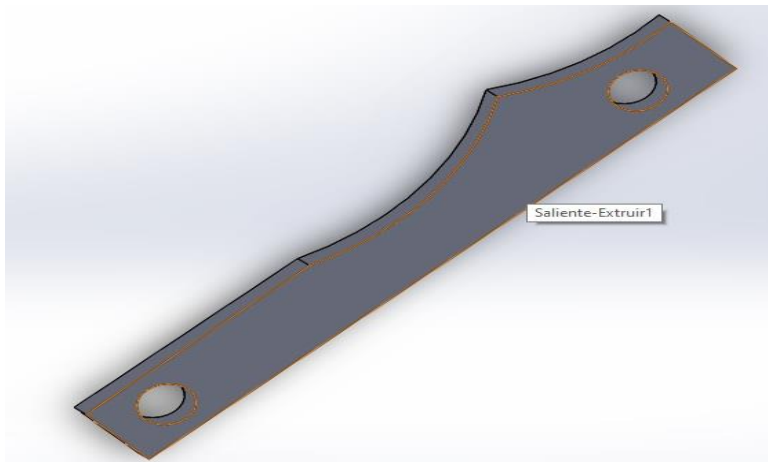


Figura 20

Diseño separador Cuchilla Fija

Fuente: elaboración propia.

El separador de cuchilla fija (figura 20), fabricado en acero anti desgaste Hardox 450, presenta dimensiones de 23.87 mm de ancho, 132 mm de largo y un espesor de 6.35 mm, con una cantidad total de 20 unidades.

El separador de cuchilla fija es una pieza que asegura la correcta distancia y alineación de las cuchillas fijas en relación con las cuchillas móviles. Esta separación es crítica para el correcto funcionamiento de la máquina, ya que determina la precisión del corte y la uniformidad del material triturado. Está diseñado para resistir las fuerzas generadas durante la operación y asegurar una posición constante de las cuchillas fijas.

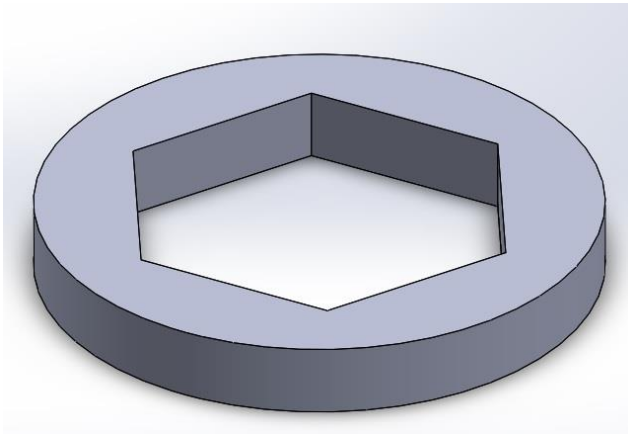


Figura 21

Diseño separador Cuchilla Móvil

Fuente: elaboración propia.

El separador de cuchilla móvil (Figura 21), fabricado en acero anti desgaste Hardox 450, tiene dimensiones de 52.67 mm de ancho, con un diámetro interno de 32 mm, un diámetro externo de 50 mm y un espesor de 6.35 mm. Con un total de 23 unidades diseñadas y elaboradas, este separador está diseñado para aplicaciones de alta resistencia al desgaste debido al trabajo que debe realizar.

Similar al separador de cuchilla fija, este componente se encarga de mantener la distancia adecuada entre las cuchillas móviles y las cuchillas fijas. Asegura que las cuchillas móviles operen en el ángulo y la posición correctos, optimizando el proceso de corte y evitando daños en las cuchillas por contacto excesivo.

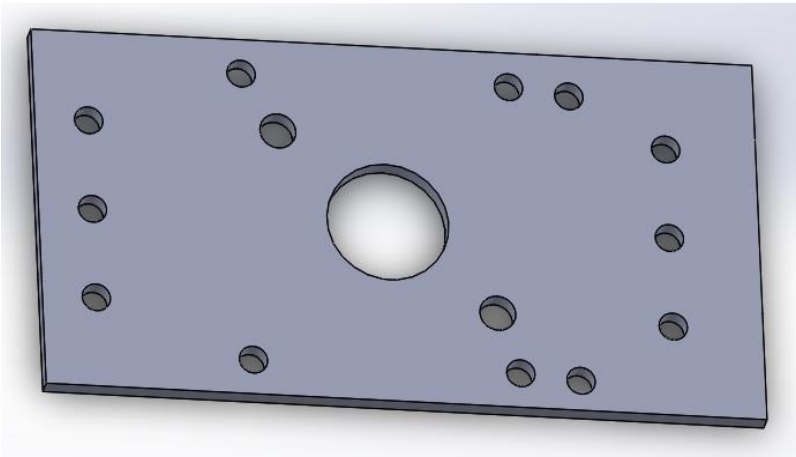


Figura 22

Diseño tapa Frontal Y Posterior

Fuente: elaboración propia.

La placa frontal y posterior (Figura 22), fabricada en acero anti desgaste Hardox 450, tiene unas dimensiones de 132 mm de ancho, 254.3 mm de largo y un espesor de 6.35 mm, con una cantidad total de 2 unidades diseñadas. Esta pieza hecha en este material es ideal para su uso en aplicaciones donde se requiere alta resistencia al desgaste, como maquinaria pesada, manteniendo su capacidad de ser trabajada fácilmente en diferentes procesos de fabricación industrial.

Las tapas frontal y posterior son estructuras que encierran y protegen los componentes internos de la máquina trituradora. Estas tapas proporcionan seguridad al operador, evitando el contacto accidental con las partes móviles. Además, ayudan a contener el material durante el proceso de trituración, minimizando la dispersión de partículas plásticas y contribuyendo al control del ruido. Están diseñadas para ser desmontables, facilitando el mantenimiento y la limpieza de la máquina.

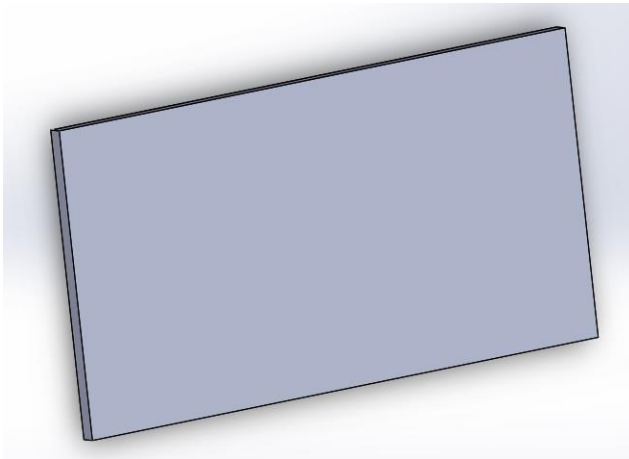


Figura 23

Diseño tapa Lateral

Fuente: elaboración propia.

La placa lateral (Figura 23), fabricada en acero anti desgaste Hardox 450, tiene unas dimensiones de 132 mm de ancho, 260.35 mm de largo y un espesor de 6.35 mm, con un total de 2 unidades diseñadas y elaboradas.

La tapa lateral cumple una función similar a la de las tapas frontal y posterior, pero también proporciona acceso lateral a los componentes internos de la máquina. Esto es útil para realizar ajustes o cambios de cuchillas sin necesidad de desmontar completamente el equipo. Al igual que las otras tapas, está fabricada en materiales robustos y diseñada para garantizar la seguridad y la contención del proceso de trituración.

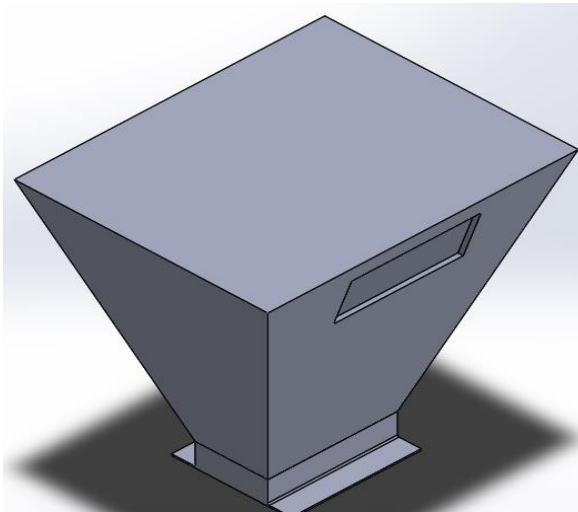


Figura 24

Tolva

Fuente: elaboración propia.

La tolva (Figura 24) está fabricada en acero inoxidable AISI 316/316L, con dimensiones en la parte superior de 51cm x 62,4cm, la parte inferior o base tiene 26,1cm x 14,6cm y de alto tiene 53,2cm, lo que nos da un volumen de 28006,9 cm³ y un espesor de lámina de calibre 22. Este acero inoxidable es altamente resistente a la corrosión. Este material es ideal para aplicaciones industriales donde se requiere alta resistencia a la corrosión y durabilidad.

La tolva es la estructura encargada de recibir y guiar el material plástico hacia las cuchillas para su procesamiento. La tolva está diseñada para soportar la carga y el impacto del material que se introduce en la máquina. Su geometría asegura un flujo constante y controlado del material hacia las zonas de corte, evitando atascos y mejorando la eficiencia del sistema.

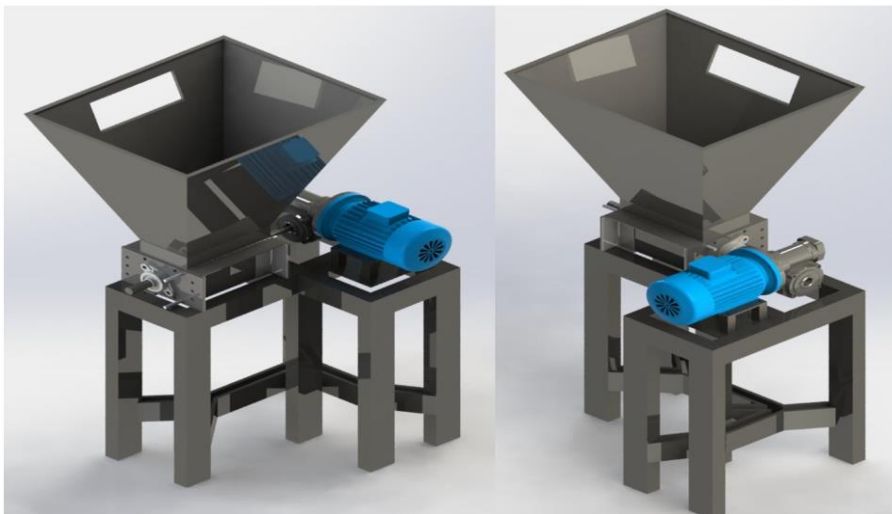


Figura 25

Ensamble CAD de la Estructura y Sistema de Transmisión de Movimiento para el

Prototipo de Molino Triturador de Plástico Reciclado STPR

Fuente: elaboración propia.

ITEM	N° PIEZA	CANTIDAD
1	BASE PRINCIPAL	1
2	PLACAS LATERALES	2
3	TOLVA	1
4	motorreductor	1
5	Base motorreductor	1
6	Chumacera	2
7	Uniones	4
8	Cuchillas móviles principales	20
9	Placa frontal y posterior	2
10	Eje principal	1
11	Separadores cuchillas principales	23
12	Ejes sujeción cuchillas fijas	2
13	Separadores cuchillas fijas	20
14	Cuchilla fija	22

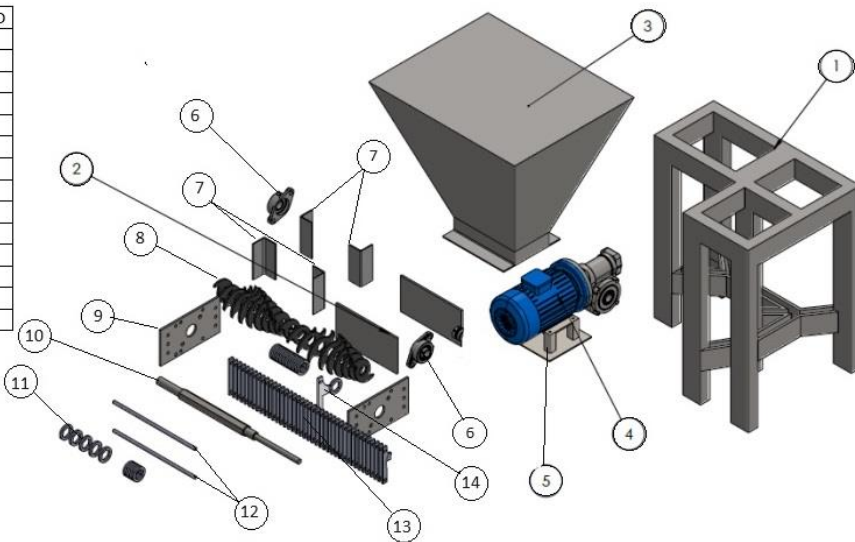


Figura 26

Diseño CAD del plano de Ensamble de la Estructura y Sistema de Transmisión de

Movimiento para el Prototipo de Molino Triturador de Plástico Reciclado STPR

Fuente: elaboración propia.

Las figuras 25 y 26 presentan la vista explosionada del prototipo de molino triturador de plástico reciclado (STPR), así como el ensamble renderizado. La estructura principal del prototipo es un eje robusto construido en metal de acero con aleación de carbono para su resistencia, diseñado para soportar tanto el sistema de trituración como el motor eléctrico. La base elevada asegura la estabilidad de la máquina durante su operación, minimizando las vibraciones y proporcionando un espacio adecuado para la recolección del plástico triturado. La tolva de alimentación, fabricado con acero inoxidable AISI 316/316L calibre 22, está diseñado con abertura lateral para facilitar la entrada de diferentes tamaños y formas de plásticos. Las paredes inclinadas del embudo permiten guiar el material hacia el sistema de trituración, evitando atascos y garantizando un flujo continuo. La solidez y el diseño ergonómico de la tolva contribuyen a la eficiencia del proceso de alimentación del plástico. El sistema de transmisión de movimiento está compuesto por un motor eléctrico de 1800 rpm acoplado a una caja reductora (con relación 40:1), la cual está diseñada para disminuir los rpm a 45 y el torque requerido para la operación del molino. El motor, está montado de forma lateral y se conecta al eje de la trituradora a través de un sistema de acoplamiento y una caja reductora, lo que permite una transferencia eficiente de potencia. La caja reductora reduce la velocidad del motor, aumentando el torque y proporcionando la fuerza necesaria para el proceso de trituración. El acoplamiento asegura una transmisión suave del movimiento, minimizando la tensión en los componentes y garantizando la durabilidad del sistema. Este diseño CAD refleja un enfoque funcional y práctico en el desarrollo del prototipo de molino triturador de plástico reciclado. La combinación de una estructura sólida con un sistema de transmisión de movimiento capaz de cumplir con los requerimientos mínimos

para que se determine que realiza bien el proceso de triturado aceptable en la trituración de plásticos.

8.3 Simulaciones CAE

La ingeniería asistida por computador o más conocida como CAE, es una de las herramientas más importantes que brinda el software de solidworks, esta herramienta permite la realización de estudios de esfuerzos previo a su ejecución. Este tipo de estudios se realizan de manera digital para garantizar que cualquier proyecto, elemento, pieza o dispositivo que se va a crear cuenta con las características físicas mínimas para resistir los trabajos a los cuales será sometido, de ser así, se lleva a su ejecución en físico, de lo contrario se debe investigar para realizar un cambio de material el cual si tenga las características adecuadas para lo que se va a utilizar.

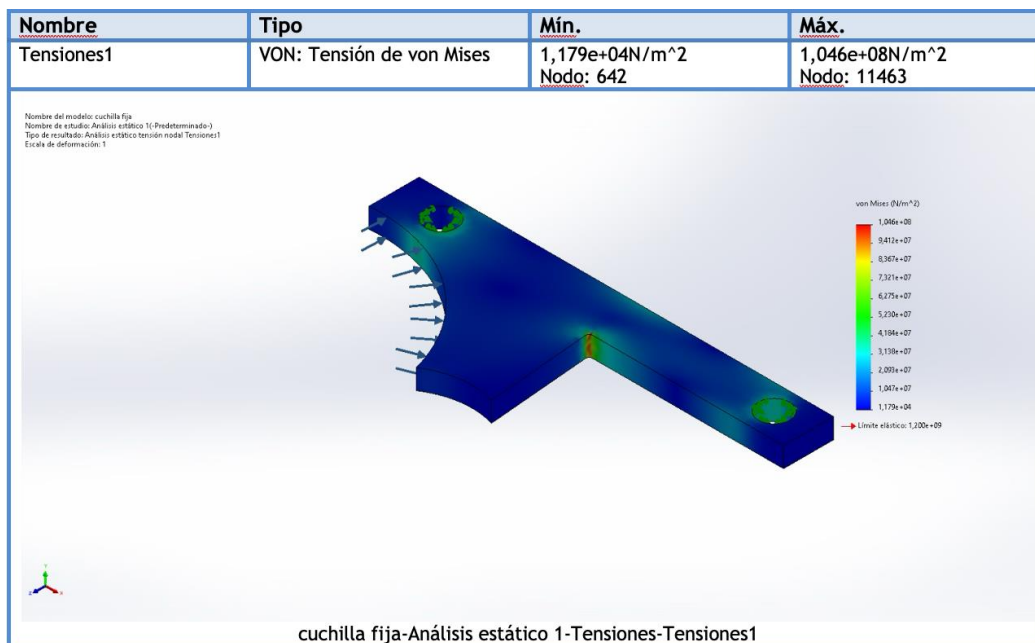


Figura 27

Análisis estático Cuchilla fija

Fuente: elaboración propia.

La figura 27 muestra el análisis estático para la evaluación de la cuchilla fija de la máquina, utilizando el criterio de von Mises, que busca evaluar las tensiones máximas. En este caso se le aplicaron 2000 N ya que, es la fuerza máxima utilizada para el triturado de un plástico de

alta densidad [48]. Los resultados indican que la distribución de tensiones se concentra principalmente cerca de las zonas de fijación y alrededor de los orificios o puntos de concentración de esfuerzos, lo que es común en componentes sometidos a cargas.

Para evaluar la seguridad de la cuchilla, es esencial comparar este valor máximo de tensión con el límite elástico del material. Si la tensión máxima supera el límite elástico, existe un riesgo considerable de deformación plástica o fractura. Por otro lado, si la tensión está por debajo del límite elástico, la cuchilla debería soportar las cargas aplicadas sin experimentar deformaciones permanentes.

Así se determina el factor de seguridad como mostrado en la ecuación 1

$$\text{Factor de Seguridad (FS)} = \frac{\text{limite elástico del material}}{\text{esfuerzo máximo de von mises}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

En este caso, $((6,275 (e^{-07}) \text{ N/m}^2) / (1,046(e^{-08}) \text{ N/m}^2))$, donde el resultado arrojado es $16,30 \geq 1$, lo cual nos dice que si es segura para la función que realizará bajo las condiciones adecuadas.

Estos resultados indican que el diseño de la cuchilla muestra lo que se esperaba con respecto a las características del material, a la forma de la pieza y a la función que debe realizar en la máquina, en este caso la cuchilla fija es una de las encargadas de ejecutar el corte y brindar el efecto tijera, es por esta razón que la mayor tensión recibida es en la región donde la pieza tiene un ángulo de 90 grados, pronunciado en la imagen con color rojizo. Las observaciones realizadas pueden concluir que la geometría de la pieza cumple con lo requerido para realizar su trabajo sin tanto riesgo de daño o pérdida de la pieza en su totalidad, la selección de materiales con un límite elástico más alto o la incorporación de refuerzos en las zonas más críticas. El análisis estático de la cuchilla fija revela áreas de baja tensión en gran parte de la

pieza, poniendo en evidencia de que su vida útil va a ser muy prolongada, teniendo en cuenta las propiedades del material.

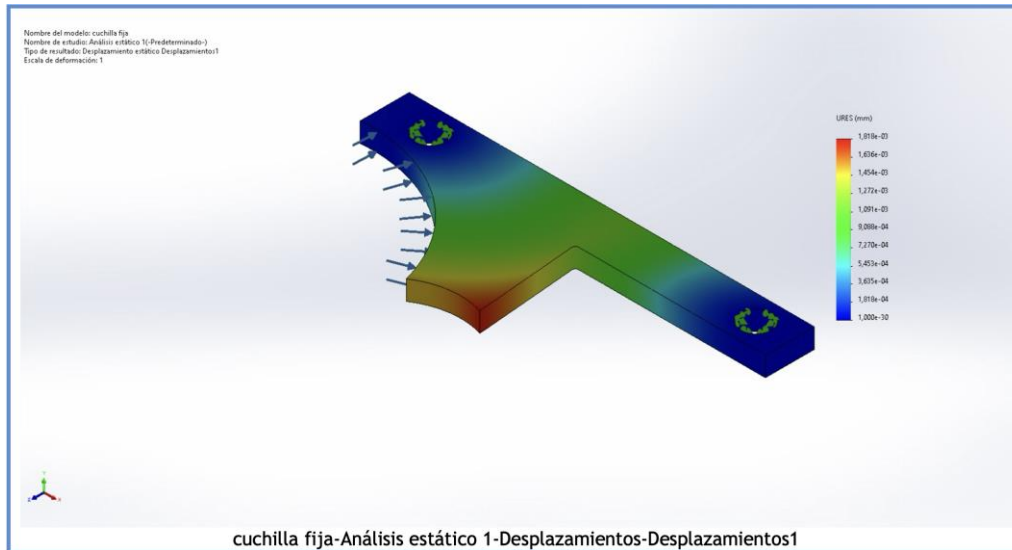


Figura 28

Análisis Estático Desplazamientos Cuchilla Fija

Fuente: elaboración propia.

La gradiente de desplazamientos observada indica que la cuchilla está experimentando una deflexión mayor en su parte más alejada de la zona de fijación, lo cual es típico en componentes en voladizo sometidos a cargas laterales. Esto se refleja en la escala de colores, donde las áreas más cercanas al verde y amarillo representan mayores desplazamientos, mientras que las áreas azules indican desplazamientos mínimos.

El análisis estático de desplazamientos realizado en la cuchilla fija (figura 28) de la máquina trituradora de plásticos, muestra la distribución y magnitud de los desplazamientos bajo las condiciones de carga aplicadas. Según los resultados, los desplazamientos máximos se

localizan en el extremo libre de la cuchilla, con un valor de $1.454 \times 10^{-3} \text{ mm}$. Este desplazamiento máximo se encuentra dentro de un rango aceptable si se consideran las dimensiones y las condiciones de operación típicas de una cuchilla de este tipo. La variación en la magnitud de los desplazamientos a lo largo de la cuchilla sugiere que las zonas cercanas a las restricciones (zona de fijación) presentan un movimiento prácticamente nulo, lo cual es coherente con las condiciones de contorno aplicadas durante el análisis.

El hecho de que los desplazamientos máximos sean relativamente pequeños indica que la cuchilla tiene una rigidez adecuada bajo las condiciones de carga simuladas, lo que sugiere que no habrá deformaciones excesivas que comprometan su funcionamiento durante la operación.

Sin embargo, es crucial correlacionar estos resultados de desplazamiento con los de tensiones obtenidos anteriormente. Aunque los desplazamientos sean bajos, si las tensiones alcanzan niveles críticos, puede existir un riesgo de falla. Por lo tanto, la evaluación conjunta de tensiones y desplazamientos es fundamental para garantizar un diseño seguro y eficiente de la cuchilla.

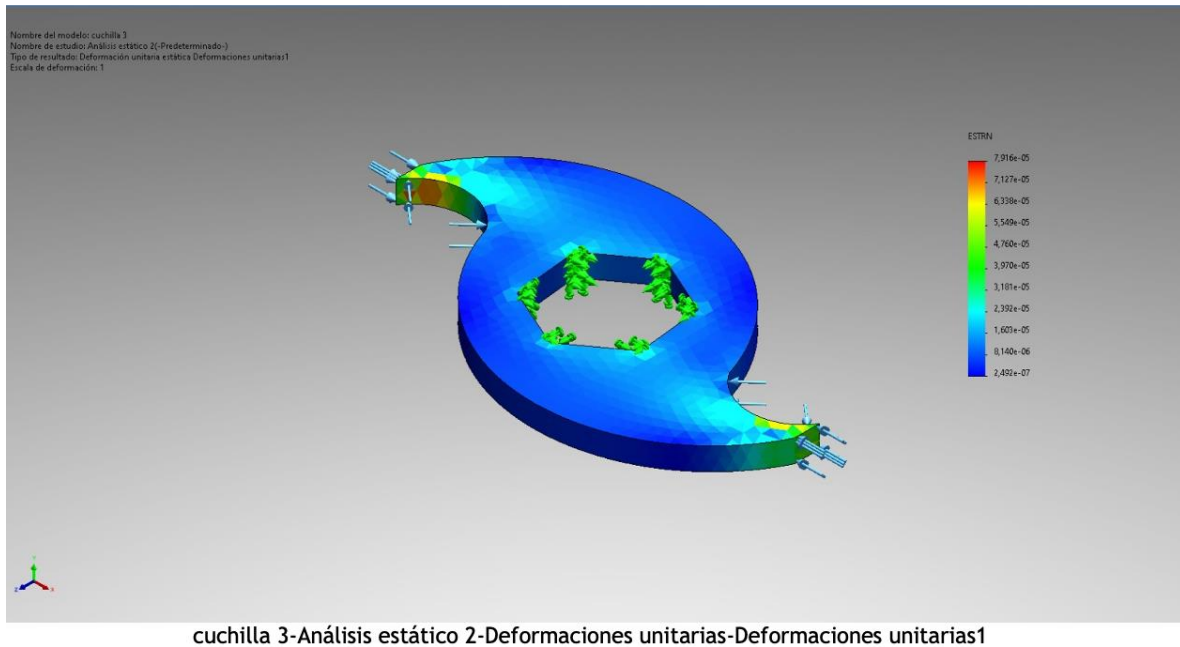


Figura 29

Análisis Estático Deformaciones Unitarias Cuchilla Móvil

Fuente: elaboración propia.

El análisis estático de deformaciones unitarias realizado en la cuchilla móvil (figura 29) de plásticos revela la distribución de las deformaciones bajo la aplicación de cargas. La imagen presenta un mapa de contorno que indica la magnitud de las deformaciones unitarias a lo largo de la cuchilla. Las áreas de mayor deformación también se encuentran marcadas en la escala de colores.

Según los resultados mostrados, el valor máximo de la deformación unitaria es de 6.338×10^{-5} . Las áreas de máxima deformación se ubican principalmente en las zonas donde la cuchilla

experimenta mayores concentraciones de rozamiento, típicamente alrededor de las áreas de contacto y puntos donde se aplican las cargas. Las zonas cercanas a los puntos de fijación o soporte muestran deformaciones mínimas, como se espera debido a las restricciones aplicadas en estas áreas.

Este patrón de deformación es indicativo de cómo la cuchilla móvil responde a las fuerzas durante su operación. Las áreas con alta deformación unitaria podrían estar sujetas a mayores riesgos de fatiga o falla a largo plazo, especialmente si estas deformaciones se encuentran en regiones críticas para el funcionamiento de la cuchilla. No obstante, el valor máximo de la deformación unitaria es relativamente bajo 6.338×10^{-5} lo que sugiere que la cuchilla tiene una buena capacidad para soportar las cargas sin sufrir deformaciones excesivas que puedan afectar su rendimiento o integridad estructural.

Es importante destacar que, aunque las deformaciones unitarias sean bajas, deben analizarse en conjunto con las tensiones para evaluar la seguridad del diseño, por ende, es necesario el análisis de tensiones.

El análisis de deformaciones unitarias muestra que la cuchilla móvil de la trituradora de plásticos presenta un comportamiento estructural aceptable bajo las cargas aplicadas, con deformaciones que están dentro de límites seguros.

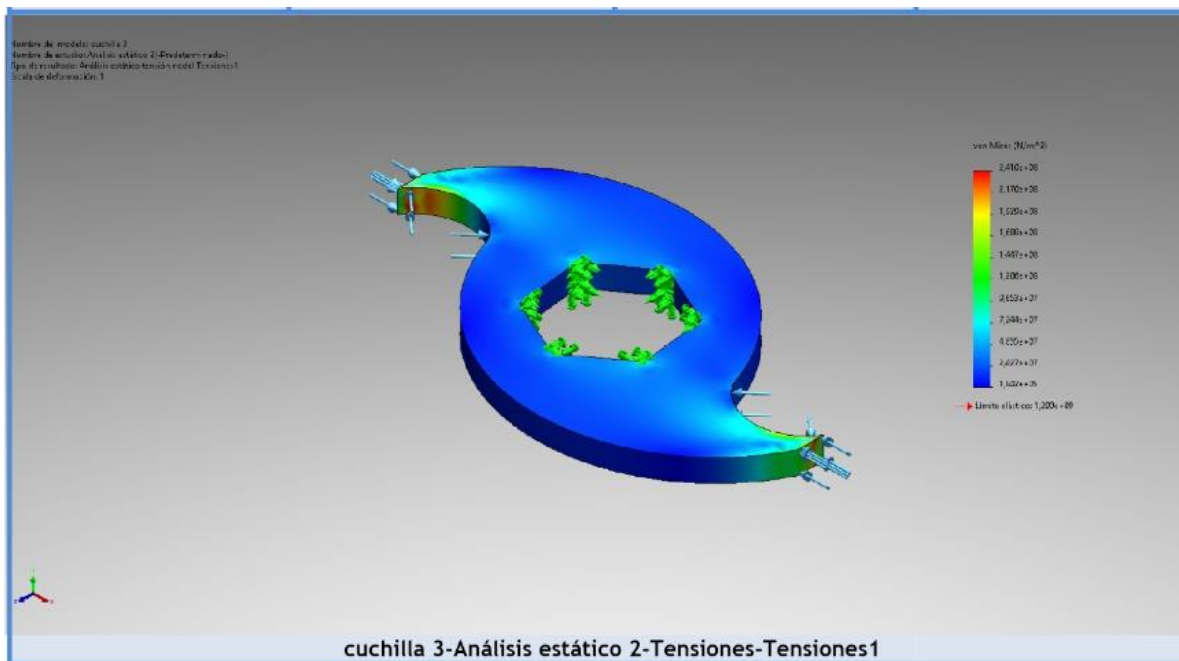


Figura 30

Análisis Estático Desplazamientos Cuchilla Móvil

Fuente: elaboración propia.

El análisis estático de tensiones realizado para la cuchilla móvil (figura 30) de la máquina trituradora de plásticos muestra una distribución clara de las deformaciones en la estructura. Los desplazamientos más significativos se concentran en los extremos de la cuchilla, donde se experimentan mayores esfuerzos debido a las fuerzas de corte durante la operación. Estas áreas están sometidas a mayores deformaciones, probablemente por el efecto palanca, dado que se encuentran más alejadas del centro de la estructura. Por otro lado, la parte central de la cuchilla, que muestra colores cercanos al azul, presenta los menores desplazamientos, lo que indica una mayor rigidez o menor influencia de las fuerzas externas, posiblemente por la proximidad a los puntos de sujeción.

En términos generales, el diseño de la cuchilla permite observar el comportamiento que tiene en sus extremos de corte, con deformaciones controladas en las zonas críticas. Sin embargo,

las concentraciones de desplazamientos en los extremos sugieren que, aunque el diseño es eficiente, podría optimizarse en estas áreas para mejorar la resistencia de la cuchilla bajo cargas extremas o a largo plazo. Habiendo realizado este estudio se puede observar que, la cuchilla presenta pequeñas deformaciones en su conjunto, siendo los extremos los más afectados debido al trabajo adicional que debe realizar que es agarrar la botella para en conjunto con la cuchilla fija realizar el trabajo de corte.

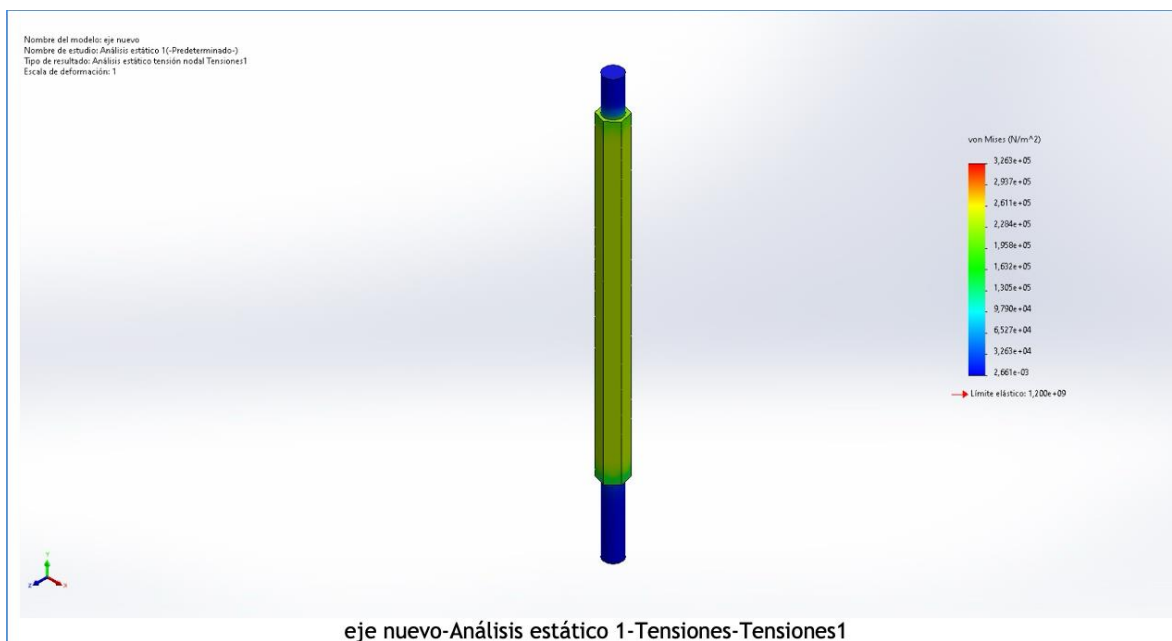


Figura 31

Análisis estático Eje

Fuente: elaboración propia.

El análisis estático de tensiones para el eje (figura 31) de la máquina trituradora de plásticos muestra una distribución de tensiones de Von Mises, con valores que van desde aproximadamente 2.66×10^{-3} N/m² en las zonas menos afectadas (en azul) hasta un máximo de 3.6310×10^5 N/m² en las áreas más críticas (en rojo), la carga utilizada para esta simulación

fue de 2000N, teniendo en cuenta el peso de la máquina, que en este caso fue mayor a 75kg, que si se mira desde unidades Newton nos da un valor de 760N estimando un peso de 80Kg, y a esto se le anexa el esfuerzo que presenta el motor, que en este caso fue de $\frac{1}{2}$ Hp, y por último, se aumenta la fuerza del estudio para garantizar aún más que si es adecuado para llevarse a cabo su ejecución en la realidad. La mayor parte del eje se encuentra en una zona intermedia (verde), con tensiones alrededor de $1.63 \times 10^5 \text{ N/m}^2$. Las tensiones máximas están muy por debajo del límite elástico del material ($1.20 \times 10^5 \text{ N/m}^2$), lo que indica que el eje opera dentro de un rango seguro sin riesgo de deformación plástica. Las zonas de mayor tensión se concentran en la parte central del eje, mientras que los extremos presentan tensiones mínimas, lo cual es típico en componentes conectados a otras piezas donde las cargas no se concentran. Aunque el eje está sometido a tensiones moderadas, es importante monitorear las áreas críticas (en amarillo y naranja) donde podrían surgir problemas de fatiga a largo plazo. En general, el eje muestra un comportamiento estructural adecuado, con una distribución de tensiones bien controlada, lo que sugiere que puede resistir las cargas operativas sin comprometer su integridad estructural.

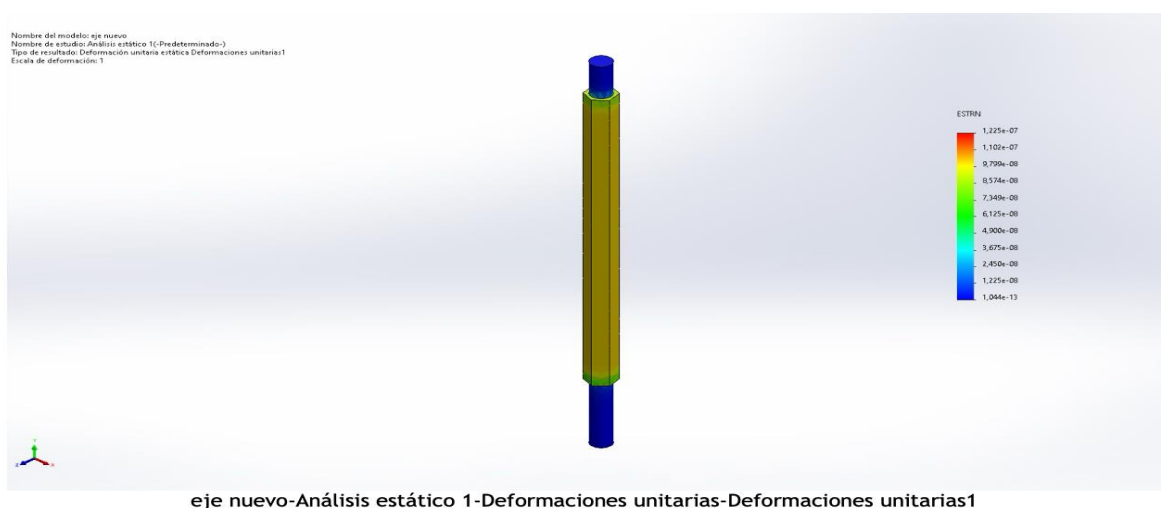


Figura 32

Análisis Estático Eje

Fuente: elaboración propia.

El análisis estático de deformaciones unitarias del eje de la máquina trituradora de plásticos muestra una distribución de deformaciones que varía desde un mínimo de $1.04e^{-13}$ (en azul) hasta un máximo de $1.22e^{-07}$ (en rojo). La mayor parte del eje presenta deformaciones intermedias, la sección con mayor probabilidad de deformación es la parte central del eje con un valor aproximado de $9.799 e^{08}$ representadas en colores verde y amarillo. Las menores deformaciones se observan en los extremos del eje, donde el color azul indica que estas zonas están más restringidas debido a su fijación o conexión a otros elementos. Las deformaciones más altas se concentran en la parte media del eje, donde el color amarillo y rojizo sugiere que estas áreas están experimentando los mayores esfuerzos, lo que es típico de un eje sometido a torsión o flexión. En general, el eje se diseñó de la manera correcta para soportar las cargas aplicadas, ya que las deformaciones máximas son muy pequeñas (del orden de $2.284e^5$), lo que indica que el material no está sometido a esfuerzos significativos que comprometan su integridad. La uniformidad en la distribución de las deformaciones sugiere que no hay concentraciones de tensiones que puedan causar fallos por fracturas o deformación excesiva a largo plazo. Además, el hecho de que las deformaciones se mantengan dentro de un rango tan bajo en comparación con los límites de deformación típicos del material confirma que el eje opera dentro de un margen seguro de elasticidad, sin riesgo de fallos por deformación plástica, lo cual se soporta con el cálculo del factor de seguridad, $((7,321 (e^{07}) \text{ N/m}^2) / (1,046(e^{08}) \text{ N/m}^2))$ donde se obtiene un valor de 2,20 y se observa que este valor es ≥ 1

En conclusión, los resultados muestran que el eje está funcionando adecuadamente bajo las condiciones de carga simuladas, en este caso una fuerza de 2000N con deformaciones bien distribuidas y dentro de los límites seguros del material.

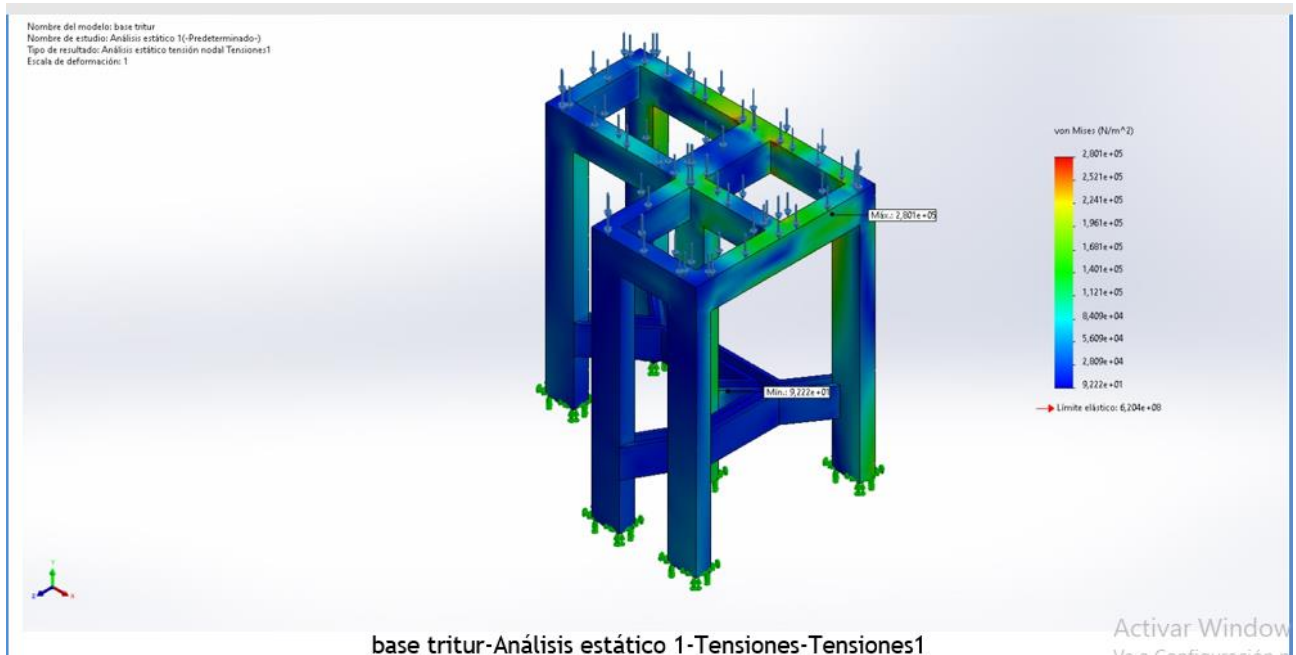


Figura 33

Análisis estático de la base del sistema

Fuente: elaboración propia.

El análisis estático de tensiones para la base del sistema (figura 33) muestra una distribución de tensiones de Von Mises, con valores que van desde aproximadamente $9,222e^{01}$ N/m² en las zonas menos afectadas (en azul) hasta un máximo de $2,801e^{05}$ N/m² en las zonas con mayor exposición o riesgo de desgaste (color verde), aunque en el caso de la base se observa que cuenta con una gran resistencia, ya que, presenta zonas muy mínimas en color rojo, la

carga utilizada para esta simulación fue de 2000N que en kg es aproximadamente el doble del peso del sistema.

En general, la base muestra un comportamiento estructural muy resistente teniendo en cuenta el peso y el trabajo que debe soportar, con una distribución de tensiones suficientemente altas, lo que afirma que puede resistir las cargas operativas sin comprometer su integridad estructural.

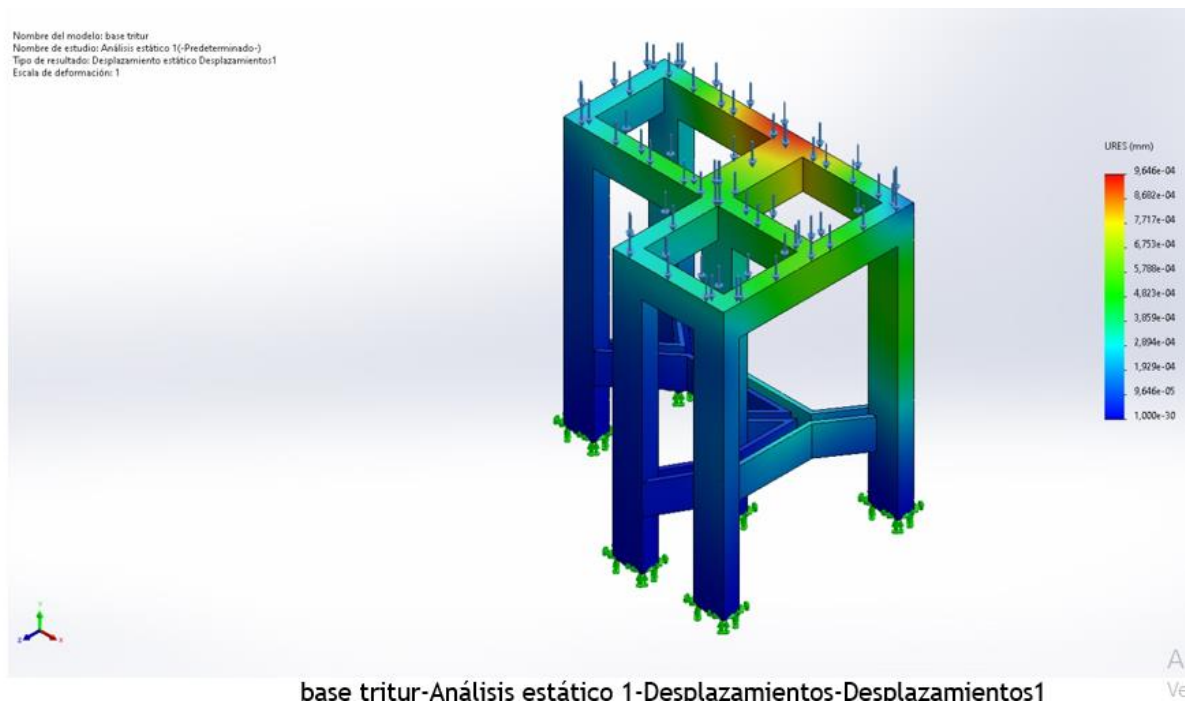


Figura 34

Análisis estático de la base del sistema

Fuente: elaboración propia.

El análisis estático de desplazamientos realizado en la base del sistema (figura 34), muestra la distribución y magnitud de los desplazamientos bajo las condiciones de carga aplicadas. Según los resultados, los desplazamientos máximos se localizan en el extremo libre de la base, con un valor máximo $9,757e^{07}$ mm. Este desplazamiento máximo se encuentra dentro de un rango aceptable si se consideran las dimensiones y las condiciones a las que está siendo

sometida la base. La variación en la magnitud de los desplazamientos a nivel general de la base sugiere que las zonas cercanas a las restricciones (puntos de fijación) presentan un movimiento prácticamente nulo, lo cual es coherente con las condiciones de contorno aplicadas durante el análisis.

8.4 implementación del sistema



Figura 35

Ensamble Trituradora

Fuente: elaboración propia.

El ensamble de la trituradora (figura 35) es el proceso de integración de todas las piezas y componentes que conforman la máquina. Este proceso es crucial para garantizar que la trituradora funcione correctamente y cumpla con los requisitos de diseño. Durante el ensamblaje, se comienzan instalando los componentes estructurales como la base trituradora, que proporciona el soporte necesario para toda la máquina. A continuación, se montan el eje principal y las chumaceras, asegurando su correcta alineación para que el movimiento de las cuchillas móviles sea fluido y sin resistencia indebida. Las cuchillas fijas y móviles se instalan en sus respectivas posiciones, utilizando los separadores de cuchillas para asegurar la distancia precisa entre ellas. Esto es fundamental para obtener un corte eficiente y uniforme del material plástico.

Una vez que los componentes internos están ensamblados, se colocan las tapas frontal, posterior y lateral, que encierran y protegen el mecanismo interno. Estas tapas no solo proporcionan seguridad, sino que también ayudan a controlar el ruido y la dispersión de partículas durante el proceso de trituración.

Finalmente, la tolva se monta en la parte superior de la máquina, asegurando que el material a triturar se dirija adecuadamente hacia las cuchillas. Después de completar el ensamblaje, se realizan pruebas de funcionamiento para verificar que todos los componentes estén correctamente instalados y que la máquina opere de manera eficiente y segura.



Figura 36

Ensamble Completo

Fuente: elaboración propia.

8.5 Sistema de Control

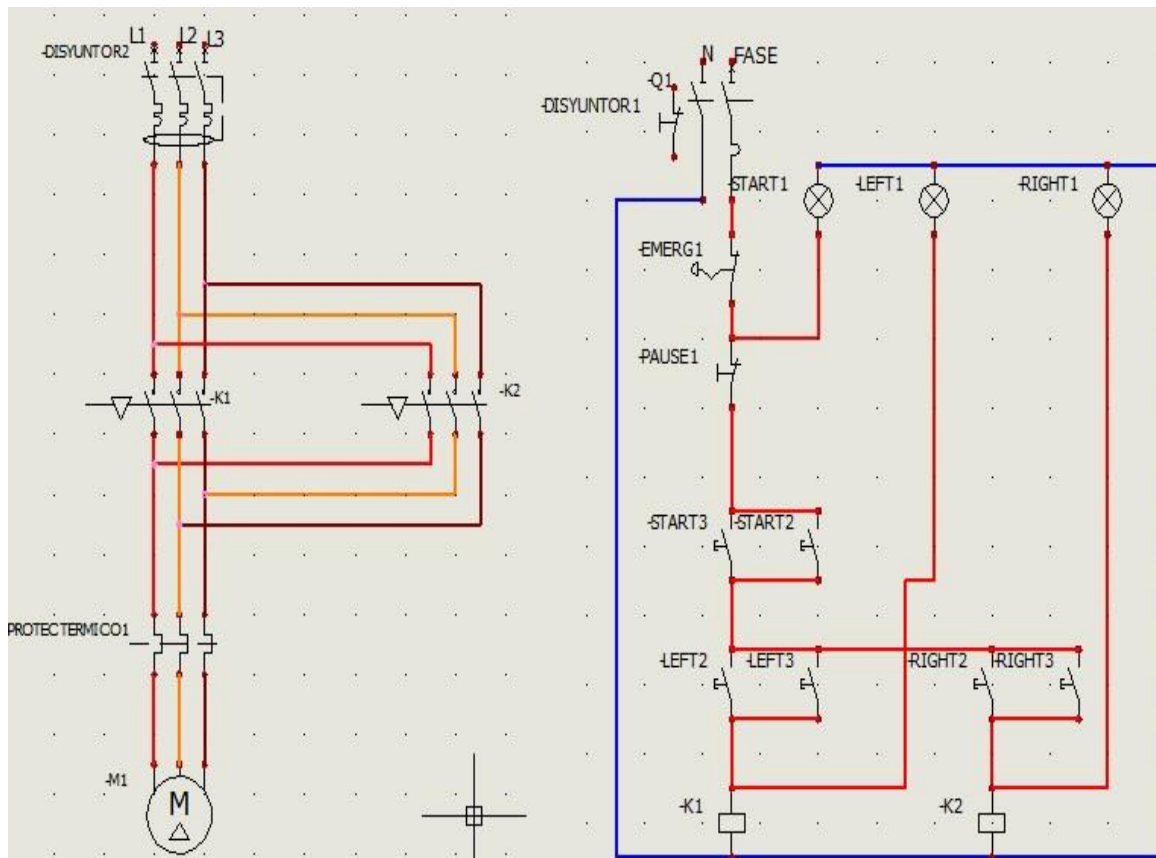
El diagrama eléctrico de la máquina trituradora de plástico se divide en dos secciones principales: el circuito de potencia y el circuito de control (ver figura 37). El circuito de potencia, a la izquierda, se encarga de suministrar la energía eléctrica al motor trifásico que impulsa la trituradora. La alimentación trifásica pasa a través de fusibles (F1, F2, F3) que protegen el motor contra sobrecorrientes, evitando así posibles daños causados por cortocircuitos. El contactor principal (KM1) actúa como un interruptor controlado, permitiendo o cortando el suministro eléctrico al motor según sea necesario. El relé térmico (F4) está conectado en serie con el motor y funciona como un dispositivo de protección térmica, desconectando el motor en caso de sobrecarga para prevenir sobrecalentamientos y

daños internos. La combinación de estos elementos asegura una operación segura y controlada del motor de la trituradora.

El circuito de control, ubicado a la derecha, gestiona el encendido y apagado del motor, así como las condiciones de operación seguras. Este circuito se alimenta de la misma fuente trifásica, pero incluye un transformador o dispositivos que adaptan la tensión para la lógica de control. El circuito cuenta con dos botones de control: el botón de marcha (S2) y el botón de paro (S1). Al presionar el botón de marcha, se energiza la bobina del contactor (KM1), lo que cierra los contactos principales y permite que el motor funcione. Un contacto auxiliar del contactor (KM1) proporciona una función de autorretención, manteniendo el motor encendido incluso después de liberar el botón. El botón de paro interrumpe el circuito de control, apagando el motor de manera inmediata y segura. La lámpara de señalización (X1) actúa como un indicador visual del estado operativo de la trituradora, encendiéndose cuando el motor está en marcha.

Los relés térmicos desempeñan un papel fundamental en la protección del sistema. Estos relés monitorizan continuamente la corriente del motor y actúan si detectan una sobrecarga, lo que podría causar un sobrecalentamiento. Si se produce una sobrecarga, el relé térmico abre su contacto normalmente cerrado (NC) en el circuito de control, desenergizando la bobina del contactor (KM1) y deteniendo el motor para evitar daños. Este mecanismo de protección es esencial, especialmente en aplicaciones industriales como las trituradoras de plásticos, donde el motor puede estar sometido a cargas variables y condiciones de funcionamiento exigentes. El uso de contactos auxiliares del contactor y relés térmicos garantiza que el sistema solo opere bajo condiciones seguras, minimizando los riesgos de fallos operativos.

Este sistema de control eléctrico ofrece un diseño robusto y seguro para la operación de una máquina trituradora de plásticos. Proporciona un control preciso del motor a través de una combinación de dispositivos de protección y lógica de control. La integración de elementos como el contactor principal, los fusibles, y los relés térmicos asegura que el motor funcione dentro de los parámetros seguros, mientras que los controles manuales permiten al operador iniciar y detener el proceso de trituración de manera controlada. Este diseño es típico en entornos industriales donde la fiabilidad y la seguridad son prioridades, ya que ofrece una respuesta efectiva tanto a las condiciones normales de operación como a las situaciones de emergencia, garantizando la protección del motor y la seguridad del personal operativo.



a) Sistema de control eléctrico.



b) Circuito de potencia



c) Sistema de control implementado

Figura 37

Sistema de Control Eléctrico (a) Circuito de potencia (b) Circuito de Control (c) Sistema de control implementado.

Fuente: elaboración propia.

8.6. Test de rendimiento de la Máquina Trituradora de Plásticos

Se efectuaron pruebas de rendimiento para evaluar la velocidad de triturado de la máquina con diferentes tipos de plástico, con el objetivo de determinar su capacidad de procesamiento en función del tiempo.

El análisis de rendimiento se realizó evaluando tres tipos distintos de plásticos, cada uno con diferentes pesos y características, manteniendo condiciones de operación constantes. La máquina operó a una velocidad nominal de 40 RPM, con tiempos de procesamiento entre 20 y 30 minutos por muestra. A partir de estos datos, se extrapola la capacidad de triturado por hora para cada tipo de plástico. Las variaciones en el volumen de material procesado se correlacionan directamente con las propiedades físicas y estructurales específicas de cada tipo de plástico.

8.6.1. Tipo 1 - Bolsas de Plástico (PS):

Se realizó una prueba inicial con una muestra de 100g de bolsa plástica, registrándose un tiempo de triturado de 33,96 segundos. Mediante análisis por regla de tres simple y la conversión a una base horaria (60 minutos), se determinó una capacidad de procesamiento estimada de 10,6 kg/hora para este tipo de material.

La eficiencia en el procesamiento de este material se atribuye principalmente a su baja densidad y estructura flexible. Las bolsas plásticas, caracterizadas por su reducido espesor y menor resistencia mecánica, presentan una baja oposición al corte, facilitando su trituración. La baja densidad del material permite una mejor penetración de las cuchillas, reduciendo el esfuerzo mecánico requerido y, consecuentemente, el tiempo de procesamiento por kilogramo. Estos factores contribuyen a un proceso de trituración eficiente en comparación con materiales plásticos de mayor densidad. La figura 37 muestra el material PS triturado.



Figura 38

Muestra del material triturado a partir de bolsas plásticas de PS (Poliestireno)

Fuente propia

8.6.2. Tipo 2 - Tarros de Aceite, Shampoo, y Similares (PE):

Se realizó el análisis de tiempo con una muestra de 603g de plástico, registrando un tiempo de triturado de 160 segundos. Mediante el mismo método de cálculo (regla de tres simple y conversión a base horaria), se determinó una capacidad de procesamiento de 13,63 kg/hora. Este tipo de plástico, caracterizado por su mayor rigidez y espesor en comparación con las bolsas plásticas, requiere mayor esfuerzo mecánico para su procesamiento. A pesar de mantener la velocidad nominal de operación (40 RPM), la resistencia superior del material incrementa el tiempo de corte, resultando en un volumen de procesamiento moderado. No obstante, la rigidez y consistencia del material favorece la obtención de partículas más finas, característica que puede resultar ventajosa según la aplicación final del material reciclado. La figura 38 muestra el material PE triturado.



Figura 39

Muestra del material triturado a partir de diferentes tipos de envases plásticos de PE (polietileno)

Fuente propia

8.6.3 Tipo 4 - Botellas Plásticas (PET):

Para el análisis de este plástico, se procesó una muestra de 286g durante 120 segundos. Aplicando el mismo método de cálculo, se determinó una capacidad de procesamiento de 8,59 kg/hora.

Este material, caracterizado por una densidad media y dada la geometría de las botellas, presenta desafíos particulares durante el proceso de trituración. La superficie lisa y la forma cilíndrica del material pueden generar deslizamiento de las cuchillas, reduciendo la eficiencia del corte inmediato. Estas características físicas del material influyen directamente en la

efectividad del proceso de trituración y, consecuentemente, en la capacidad de procesamiento del equipo. La figura 39 muestra el material PET triturado



Figura 40

Muestra del material triturado a partir botellas PET (tereftalato de polietileno),

La tabla 4 muestra un resumen de la velocidad de triturado de los diversos materiales utilizados para la validación.

Fuente propia

Tipo de plástico (Número)	Peso (Kg)	Tiempo De Triturado (h)	RPM
1 (PS)	10.6	1	40
2 (PE)	13,63	1	40
4 (PET)	8,59	1	40

Tabla 4

Prueba de Velocidad de la Maquina

Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, se llevó a cabo un análisis del tamaño medio de las partículas de los materiales PE y PET después del proceso de trituración.

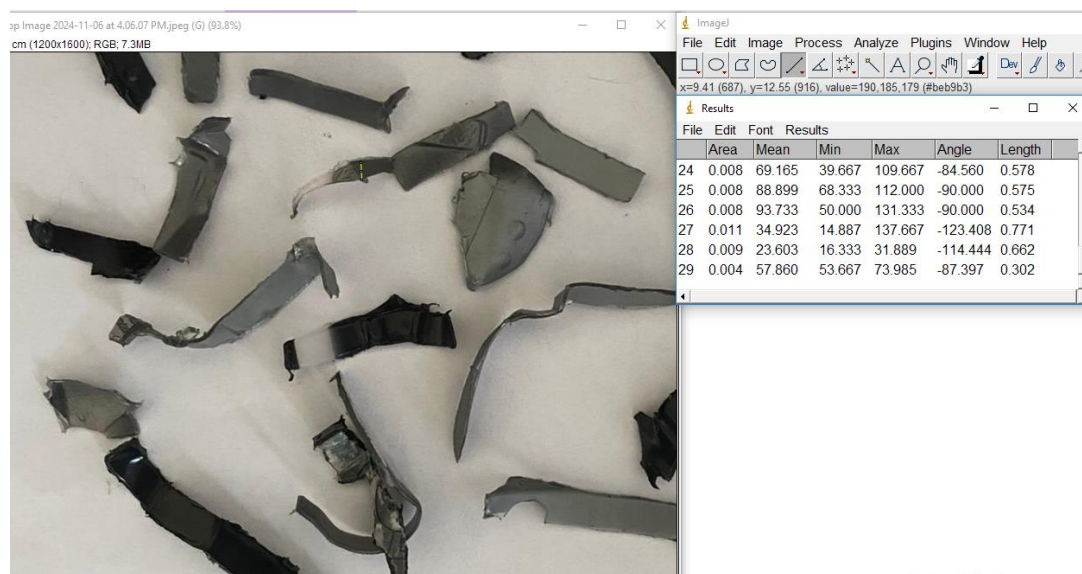


Figura 41

Análisis de tamaño promedio del triturado de plástico PE, en software ImageJ.

Fuente propia.

En la figura 41 se puede apreciar una porción de la imagen usada para la respectiva toma de medidas. El software utilizado fue ImageJ, con su función *Analyze particles*, creado para este tipo de tareas. Aquí cada medida, longitudinal y transversal, que se va tomando se va viendo reflejada en una tabla como se puede observar (figura 40). Aquí se tiene las medidas promedio del ancho y largo de los cortes realizados en el sistema de triturado, y esto nos arroja una gráfica (figura 41) donde se puede observar la diferencia de los tamaños en cm.

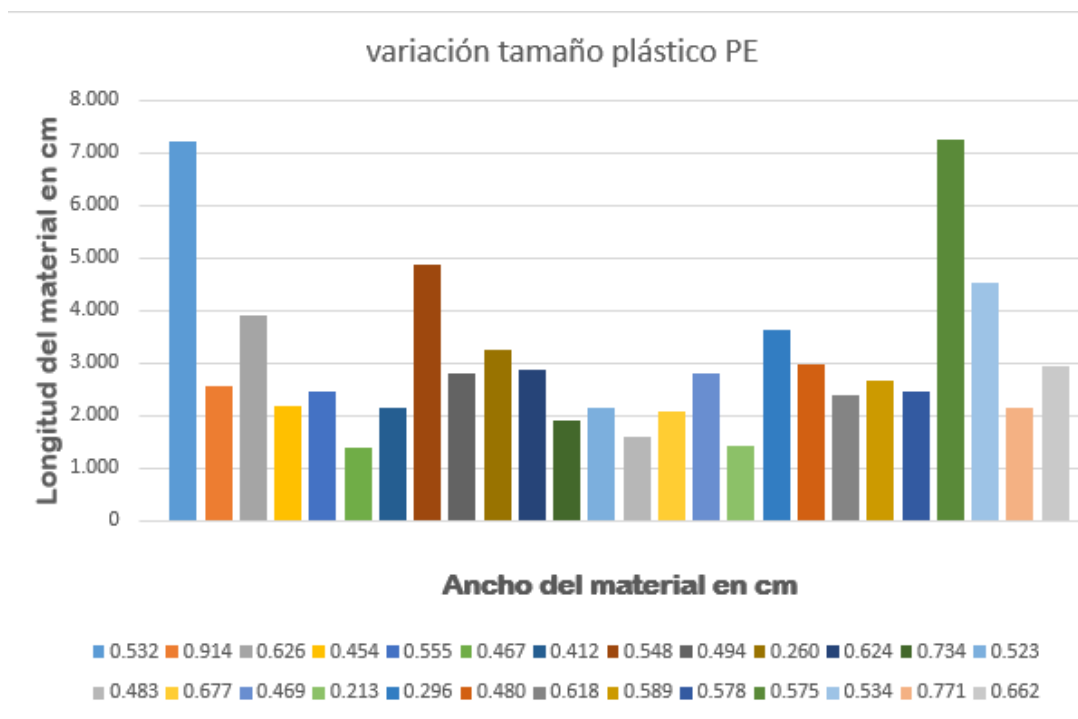


Figura 42

Gráfico de variación de tamaño del plástico PE

Fuente propia

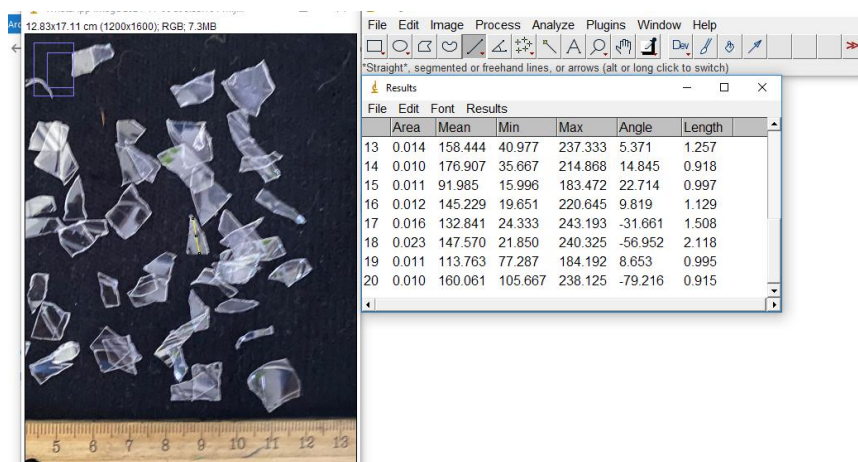


Figura 43

Análisis de tamaño promedio del triturado de plástico PET, en software Imagej.

Fuente propia.

En la figura 43 se observa el plástico PET triturado y se puede notar la diferencia en el corte en cuanto al tamaño, el corte realizado es de menor tamaño pero sus formas son más similares en comparacion al PE, que como se observa en la figura el resultado del corte tiende a ser más uniforme que el material anterior (Figura 41) el cual varia bastante su tamaño, para poder observar mejor estos resultados se realiza el diagrama de la figura 43.

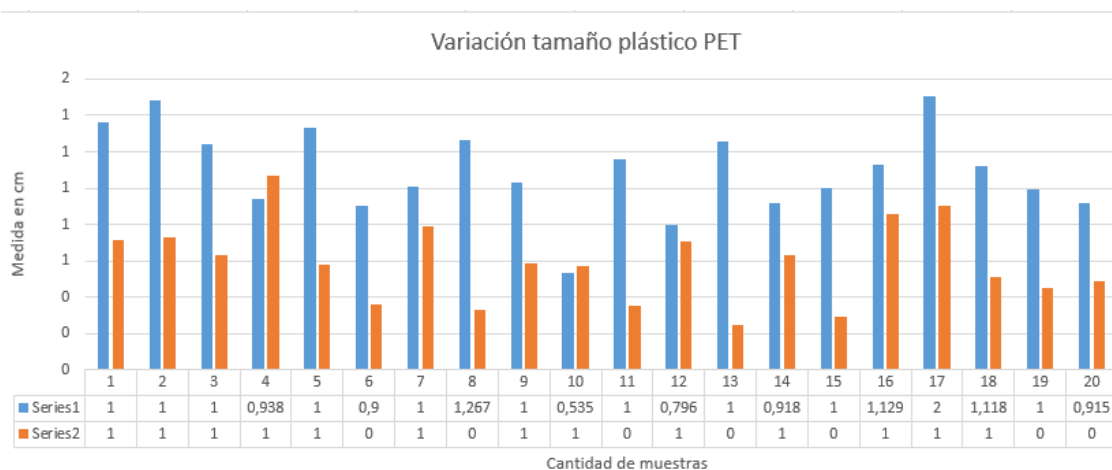


Figura 44

Gráfico de variación de tamaño del plástico PET

Fuente propia

De forma general, el rendimiento de la trituradora en función del tipo de plástico resalta la importancia de las características físicas del material en la eficiencia del proceso. El poliestireno, con su baja densidad, ofrecen el menor nivel de resistencia, permitiendo un triturado rápido. En contraste, los plásticos más rígidos y densos, como lo es polietileno tereftalato y el polietileno, requieren más energía para triturarse, y su forma y superficie pueden afectar la eficiencia de las cuchillas. Este análisis da a conocer que, para optimizar el proceso de trituración, se debe considerar la preclasificación de los plásticos según sus características físicas.

9. Conclusiones

En las siguientes conclusiones, se presentarán los resultados y hallazgos obtenidos a lo largo del proyecto, así como una evaluación del funcionamiento de la máquina trituradora de plástico. De esta manera se pudo concluir de manera global que:

Fue posible llevar a cabo de manera exitosa el diseño, la elaboración y la implementación de una máquina trituradora de plástico que permita reducir el volumen de forma considerable de las botellas y bolsas plásticas recicladas.

Fue posible llevar a cabo con éxito el desarrollo de la trituradora, siguiendo la metodología de diseño mecatrónico. Esta metodología permitió establecer las variables críticas necesarias para la fabricación de la máquina y determinar los parámetros óptimos para el proceso de triturado, teniendo claro el proceso de triturado implementado en la máquina. Se logró identificar que la forma de las cuchillas debía tener esa para lograr el efecto que se quería, en este caso el efecto tijera para lograr un buen corte. Por esta razón se hizo el enfoque en el desarrollo mecánico de la máquina que realizara el corte de la mejor manera y que fuera un corte bastante fino para su posterior proceso. Ya teniendo esta parte mecánica y siendo la más esencial, se logró un mecanismo funcional capaz de cortar el plástico debido al principio implementado, y esto debido al diseño y al material utilizado para estas piezas. El Hardox 450 fue el material que se ajustó a la necesidad para la creación de la parte más fundamental de la máquina, ya que, por sus propiedades físicas y mecánicas se ajusta totalmente a las necesidades requeridas para la ejecución de este proyecto. Las propiedades más sobresalientes y más necesarias para la máquina, es su dureza y su propiedad anti desgaste, lo cual permite que su parte mecánica sea más duradera y efectiva a la hora de realizar los cortes.

Por otro lado, gracias al diseño CAE, se pudo observar de manera más exacta lo que se había calculado o deducido en cuanto los puntos con mayor índice de deformación o desgaste debido a la temperatura y el rozamiento en este caso. Ya teniendo estos estudios, se pudo concluir que el diseño que se realizó para la creación de la máquina fue el mejor, ya que, las zonas más expuestas son mínimas en cuanto al tamaño y función de la pieza. Y el factor de seguridad nos reafirma la teoría del estudio de esfuerzos, debido a que el material cumple con los requerimientos solicitados, que en este caso fue dureza y resistencia al rozamiento.

En cuanto al sistema de control, se logró obtener un panel muy completo, en cuanto a seguridad con su paro de emergencia y su protección térmica y en cuanto a sus mandos de funcionamiento, cuenta con un giro adicional que permite destrabar la máquina en caso de que llegue a pasar y por último la introducción de los pilotos indicadores, que muestran el sentido de giro, si la maquina está encendida y el de paro de emergencia.

En cuanto a la validación que se llevó a cabo, se pudo analizar que dependiendo del tipo de plástico se pudo procesar cierta cantidad en cada hora teniendo variaciones en cuanto al tipo y tamaño del plástico, teniendo como resultado que el plástico PS se tritura de manera más fácil y de manera más rápida. Por el lado del plástico tipo PET realiza cortes con diferente tamaño y forma, un corte rectangular y más fino en comparación a otros. Y por último el plástico de tipo PE el corte es mayor en cuanto a su longitud y su triturado es muy similar en cuanto al tiempo con el PET.

11. Recomendaciones y Trabajos Futuros

Teniendo como referencia el sistema que se construyó, se puede determinar las recomendaciones y las mejoras que se le pueden realizar más adelante.

- Cambio de motor: un motor con más caballos de fuerza le brindaría al sistema un mayor desempeño y mejoraría la capacidad de triturado en relación al tiempo.
- El aumento de tamaño o de cantidad de cuchillas: otra de las posibles mejoras, al realizar este proceso, abarcaría más área la máquina y así tendría mayor capacidad de agarre y también aumentaría su cantidad de triturado, ya que, podría lograr triturar más botellas al mismo tiempo.
- Un trabajo futuro exclusivo para este proyecto podría ser un sensor interno que a determinada cantidad solicite al operario ingresar más material para que no haya tiempos muertos y el proceso sea más productivo.
- Sistema de paro inmediato: adecuar un sensor que al detectar un material diferente al plástico detenga automáticamente el sistema.

12. Referencias Bibliográficas.

- [1] J. F. López-Aguirre, J. C. Pomaquero-Yuquilema, and J. L. López-Salazar, "Análisis de la contaminación ambiental por plásticos en la ciudad de Riobamba," Polo Del Conocimiento: Revista Científico - Profesional, vol. 5, no. 12, pp. 725-742, 2020.
- [2] A. Vazquez, R. Valdemar, M. Beltrán Villavicencio, and M. Velasco Perez, "Reciclaje de plásticos," 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4440.1527>.
- [3] L. Á. Meneses, J. Orozco, C. S. C. Avirama, and J. F. S. Imbachi, "Desempeño económico de las empresas colombianas y la responsabilidad ambiental," Dictamen Libre, vol. 33, Article 33, Jul.-Dec. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.18041/2619-4244/dl.33.11164>.
- [4] J. Gausemeier and S. Moehring, "New Guideline VDI 2206—A flexible procedure model for the design of mechatronic systems," in DS 31: Proc. of ICED 03, 14th Int. Conf. on Engineering Design, Stockholm, 2003, pp. 599-600.
- [5] Greenpeace, "Datos sobre la producción de plásticos." [Online]. Available: <https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/consumismo/plasticos/datos-sobre-la-produccion-de-plasticos/>.
- [6] Greenpeace, "¿Cómo llega el plástico a los océanos y que sucede entonces?" [Online]. Available: <https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/consumismo/plasticos/como-llega-el-plastico-a-los-oceanos-y-que-sucede-entonces/>.
- [7] Precious Plastic, "Ayuda didáctica," [Online]. Available: <https://preciousplastic.com/solutions/machines/overview.html>.
- [8] Greenpeace, "Plásticos," [Online]. Available: <https://www.greenpeace.org/colombia/tag/plastico>
- [9] D. Pastori, "Colombia pierde \$2 billones anuales por no reciclar desechos plásticos," El Herald, Jun. 10, 2019. [Online]. Available: <https://www.elheraldo.co/economia/colombia-pierde-2-billones-anuales-por-no-reciclar-desechos-plasticos-640305>.
- [10] Alcaldía Popayán, Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos. Cauca, Popayán, 2016. [Online]. Available: <http://www.popayan.gov.co/ciudadanos/la-alcaldia/planeacion-gestion-y-control/plan-de-gestion-integral-de-residuos-solidos-pgirs>.

- [11] United Nations, "Ciudades saludables, es ahora o para siempre, detengamos el flujo de residuos plásticos," [Online]. Available: <https://www.un.org/es/impacto-acad%C3%A9mico/page/objetivos-de-desarrollo-sostenible>.
- [12] G. Vila, "Imágenes de ejemplos de molinos trituradores de plástico," [Online]. Available: <https://www.pape.es/page/molinos-y-trituracion-de-plastico>.
- [13] "Generación de residuos de plástico: La importancia de la prevención," Políticas Públicas, Sep. 19, 2019. [Online]. Available: <http://www.politicaspublicas.uncu.edu.ar/articulos/index/generacion-de-residuos-de-plastico-la-importancia-de-la-prevencion>.
- [14] "Diseño de una máquina trituradora de plástico PET," Bogotá, 2020. [Online]. Available: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7904/1/4131632-2020-1-IM.pdf>.
- [15] "Clasificación de los tipos de plásticos," Fundación Aquae. [Online]. Available: <https://www.fundacionaquae.org/wiki/tipos-de-plasticos/>.
- [16] "Códigos de reciclaje de plásticos". (triángulo de Möbius). [Online]. Available: <https://www.spg-pack.com/blog/codigos-identificacion-plasticos/>
- [17] "Tipos de plástico y su forma de reciclaje". [Online]. Available: <https://www.carmenfigueroa.es/simbolos-de-los-envases-de-uso-alimentario/>
- [18] "Material PET". [Online]. Available: <https://flakewash.com/?seccion=blog&accion=detalle&id=22>
- [19] "Material PVC" [Online]. Available: <https://www.runsom.com/es/design-tips/difference-between-pvc-and-acrylic/>
- [20] "Material PP". [Online]. Available: <https://plasticosascaso.es/polipropileno-que-es-propiedades/>
- [21] "Material PS". [Online]. Available: <https://ambienteplastico.com/guia-sobre-el-poliestireno-ps-que-es-tipos-usos-y-aplicaciones/>
- [23] "Material PE". [Online]. Available: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/polietileno-de-alta-densidad.html>
- [24] "Tipos de reciclaje," Reciclados La Trinchera. [Online]. Available: <https://recicladoslatrinchera.com/tipos-de-reciclaje-y-en-que->

[consisten/#:~:text=El%20reciclaje%20de%20pl%C3%A1stico%20se,temperaturas%20en%20ausencia%20de%20ox%C3%ADgeno.](#)

[25] "Las R que definen y ayudan al reciclaje con respecto a su uso," Universidad Distrital, May 17, 2018. [Online]. Available: <https://comunidad.udistrital.edu.co/piga/2018/05/17/las-5-r-reducir-rechazar-recuperar-reusar-y-reciclar/>.

[26] D. F. Gaitán Hernández, "Diseño de un molino triturador para polímeros termoplásticos para la empresa Industria Recuplast S.A.S.," Trabajo de Grado, Facultad de Ingeniería Mecánica, Univ. Libre, Bogotá, Colombia, 2024.

[27] "Diseño de un prototipo de máquina trituradora de botellas PET," [Online]. Available: https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/2492/Eder%20Luque_Trabajo%20de%20Investigacion_Bachiller_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

[28] "Trituradora industrial de un solo eje (Costo)," [Online]. Available: <https://asianmachineryusa.com/Reciclado-de-plasticos/Trituradores/De-Un-solo-Eje/VMWT2260>.

[29] "Trituradora de dos ejes - Equipos de reciclaje," [Online]. Available: <https://www.wiscon-tech.com/trituradora-de-dos-ejes/>.

[30] "Trituradora de 4 ejes industrial (Costo)," [Online]. Available: <https://asianmachineryusa.com/Reciclado-de-plasticos/Trituradores/De-Cuatro-Ejes/VMWT48150>.

[31] L. A. G. Villalba, C. Corral, E. López, and J. L. Ordaz, "Diseño y prototipo de una máquina trituradora de PET," CULCyT, vol. 54, no. 1, pp. 63-71, Feb. 15, 2016.

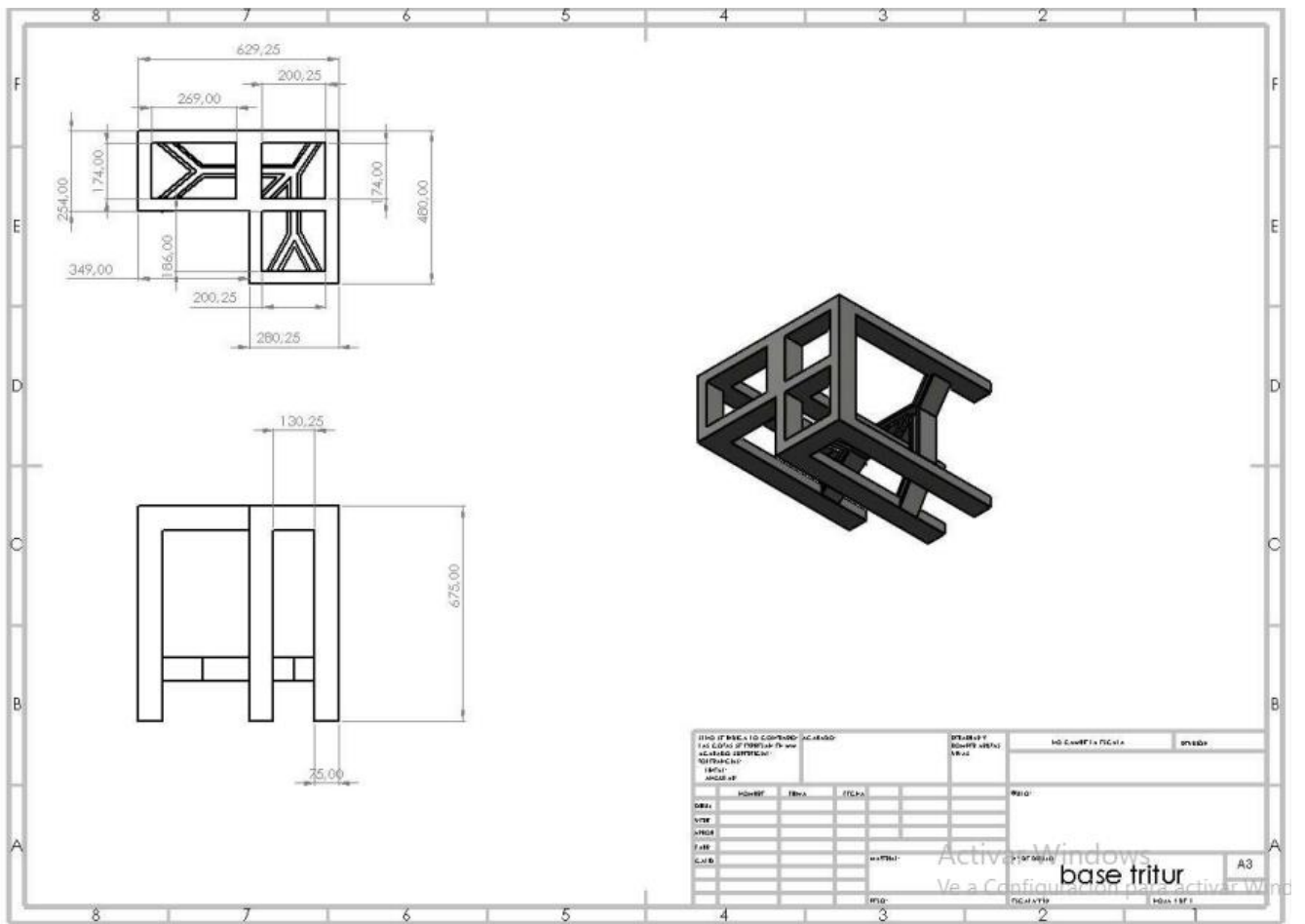
[32] J. Bravo, Diseño y construcción de un prototipo industrial de una máquina trituradora de plásticos, Pregrado, Universidad de los Andes, 2017. [Online]. Available: <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/7e9c0236-e0bc-4900-a147-e606c7a2f09a/content>.

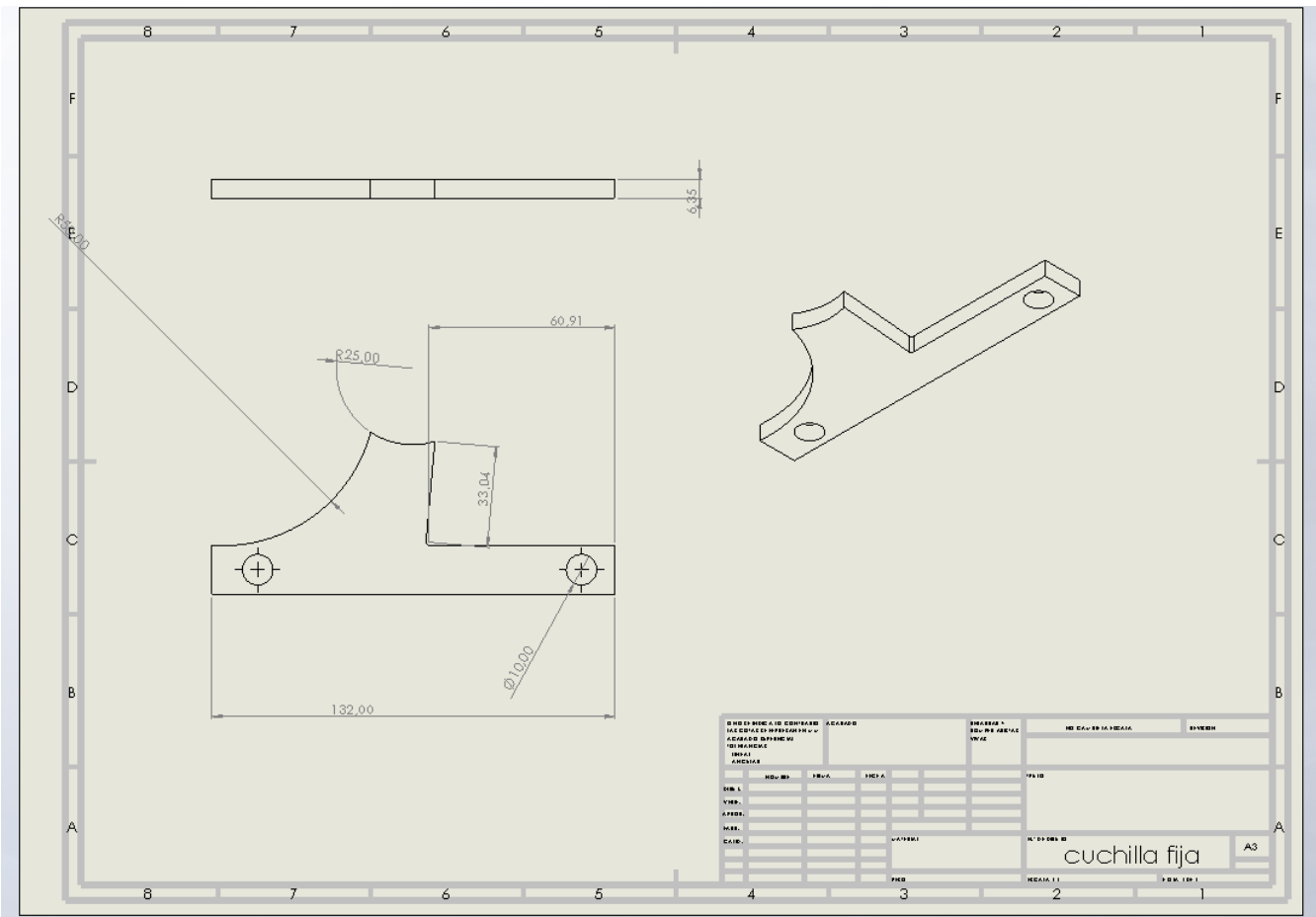
[33] N. A. S. Robles and F. Cely, Diseño cálculo y simulación de una máquina trituradora de bolsas plásticas, Pregrado, Universidad Antonio Nariño, 2022. [Online]. Available: <http://repositorio.uan.edu.co/bitstream/123456789/7728/3/Trabajo%20de%20grado%20Sot%20aquira%20N.-Franklin%20C.pdf>.

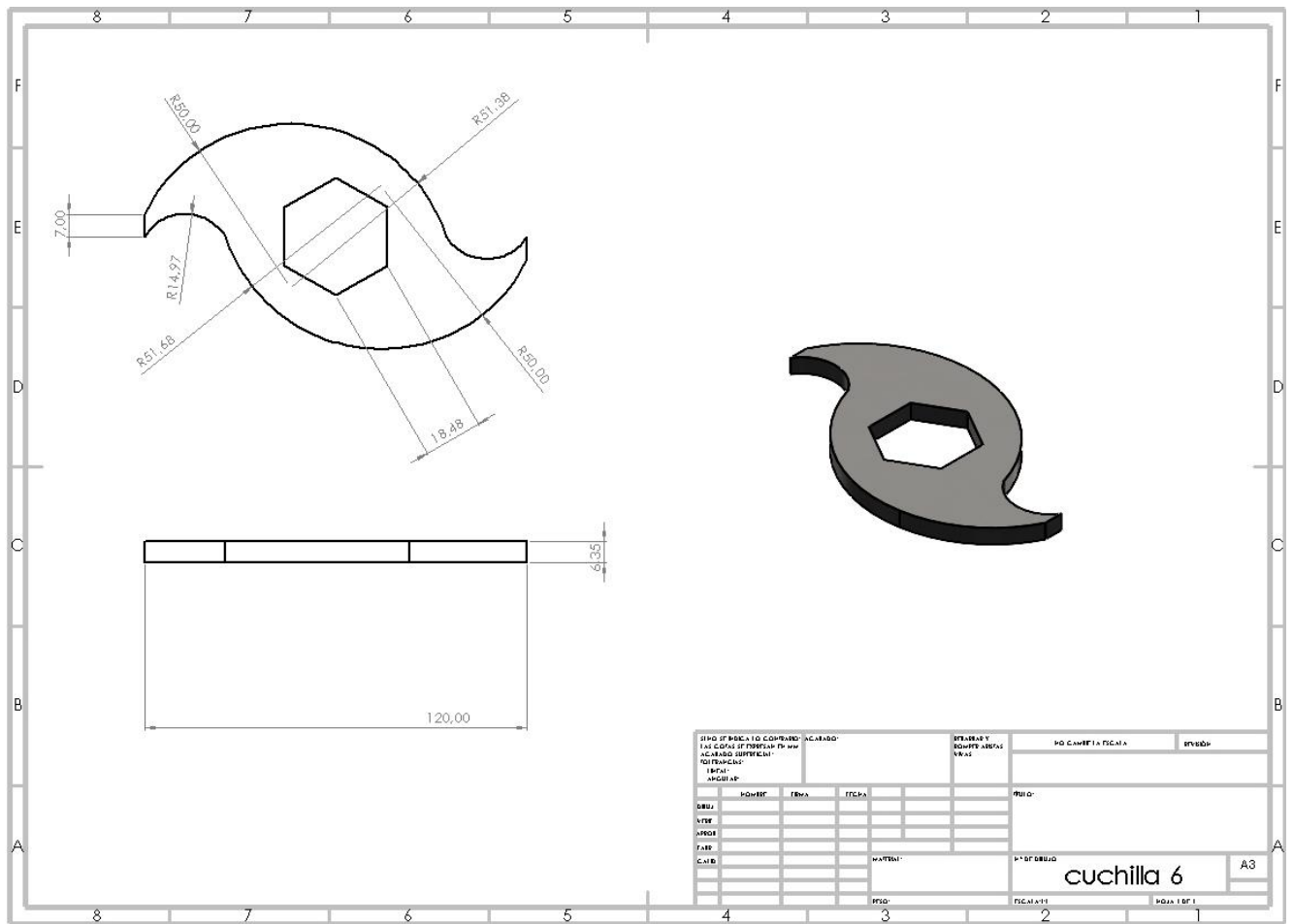
- [34] D. F. Gaitán Hernández, Diseño de un molino triturador para polímeros termoplásticos para la empresa Industria Recuplast S.A.S., Universidad Libre, 2018. [Online]. Available: <http://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/11605>.
- [35] D. Ariefijanto, N. R. Novianty, and A. I. Komara, "PERANCANGAN PLASTIC WASTE SHREDDER MACHINE PORTABLE DI KAMPUS POLMAN BANDUNG," *Machine: Jurnal Teknik Mesin*, vol. 9, no. 1, pp. 37-43, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.33019/jm.v9i1.4029>.
- [36] J. Bravo, Diseño y construcción de un prototipo industrial de una maquina trituradora de plásticos, Universidad de los Andes, 2017. [Online]. Available: <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/7e9c0236-e0bc-4900-a147-e606c7a2f09a/content>.
- [37] D. F. Gaitán Hernández, *Diseño de un molino triturador para polímeros termoplásticos para la empresa Industria Recuplast S.A.S.*, Universidad Libre, 2018. [Online]. Available: <http://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/11605>.
- [30] J. Gausemeier and S. Moehringer, "NEW GUIDELINE VDI 2206—A FLEXIBLE PROCEDURE MODEL FOR THE DESIGN OF MECHATRONIC SYSTEMS," in *DS 31: Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design*, Stockholm, 2003, pp. 599-600.
- [38] J. F. López-Aguirre, J. C. Pomaquero-Yuquilema, and J. L. López-Salazar, "Análisis de la contaminación ambiental por plásticos en la ciudad de Riobamba," *Polo Del Conocimiento: Revista Científico - Profesional*, vol. 5, no. 12, pp. 725-742, 2020.
- [39] S. M. Patil, V. M. Patil, A. L. Tare, and A. P. Vaity, "Design and Fabrication of Plastic Shredding Machine," *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, vol. 11, no. 4, pp. 1070-1077, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.50286>.
- [40] □ N. A. S. Robles and F. Cely, *Diseño cálculo y simulación de una máquina trituradora de bolsas plásticas*, Universidad Antonio Nariño, 2022. [Online]. Available: <http://repositorio.uan.edu.co/bitstream/123456789/7728/3/Trabajo%20de%20grado%20Sotaquira%20N.-Franklin%20C..pdf>.
- [41] A. Vazquez, R. Valdemar, M. Beltrán Villavicencio, and M. Velasco Perez, *Reciclaje de plásticos*, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4440.1527>.

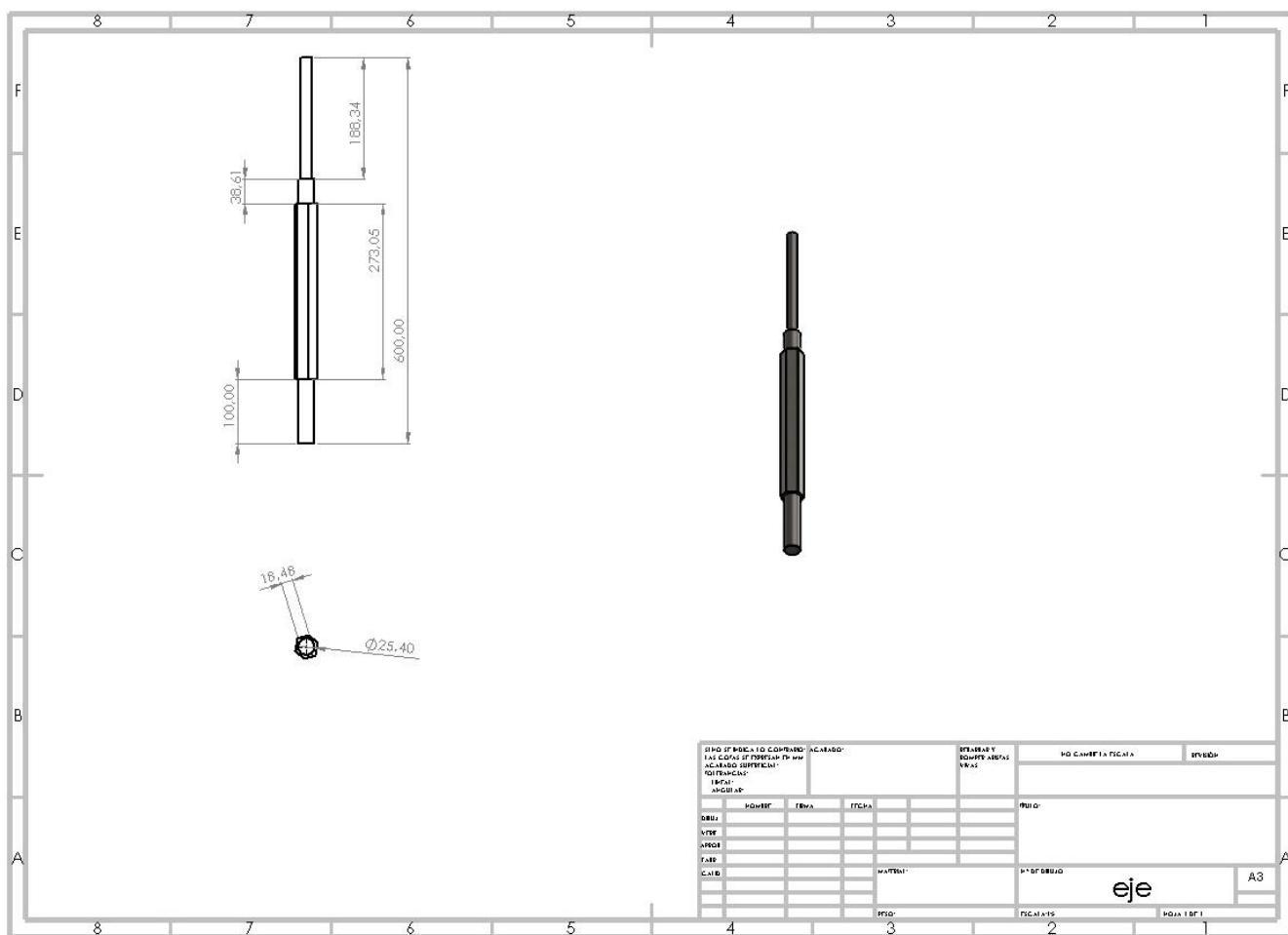
- [42] A. Waleola Ayo, O. Olukunle, and D. Adelabu, "Development of a Waste Plastic Shredding Machine," *International Journal of Waste Resources*, vol. 07, no. 02, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4172/2252-5211.1000281>.
- [43] D. Ariefijanto, N. R. Novianty, and A. I. Komara, "Perancangan plastic waste shredder machine portable di Kampus Polman Bandung," *Machine: Jurnal Teknik Mesin*, vol. 9, no. 1, pp. 37-43, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.33019/jm.v9i1.4029>.
- [44] S. M. Patil, V. M. Patil, A. L. Tare, and A. P. Vaity, "Design and Fabrication of Plastic Shredding Machine," *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, vol. 11, no. 4, pp. 1070-1077, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.50286>.
- [45] B. Wei, L. Li, S. Ding, N. Chen, S. Bai, and S. Yang, "Solid-state shear milling for recycling aluminum–plastic packaging waste: A sustainable solution for mixed plastic waste," *Sustainability*, vol. 15, no. 7, Article 7, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su15076144>.
- [46] E. Baño Marti, "Todo sobre los molinos trituradores," *Interempresas*, [Online]. Available: <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/467751-Todo-sobre-los-molinos-trituradores.html>.
- [47] J. Gausemeier and S. Moehring, "New guideline VDI 2206—a flexible procedure model for the design of mechatronic systems," in *DS 31: Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design*, Stockholm, 2003, pp. 599-600.
- [48] 3R Consejos de reciclaje, tu Ecosistema-Molino de plástico. (12 feb 2022). Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=xCg-sNohGWc&t=14s>
- [49] D. F. Gaitán Hernández, "Diseño de un molino triturador para polímeros termoplásticos para la empresa Industria Recuplast S.A.S.," Trabajo de Grado, Facultad de Ingeniería Mecánica, Univ. Libre, Bogotá, Colombia, 2024.

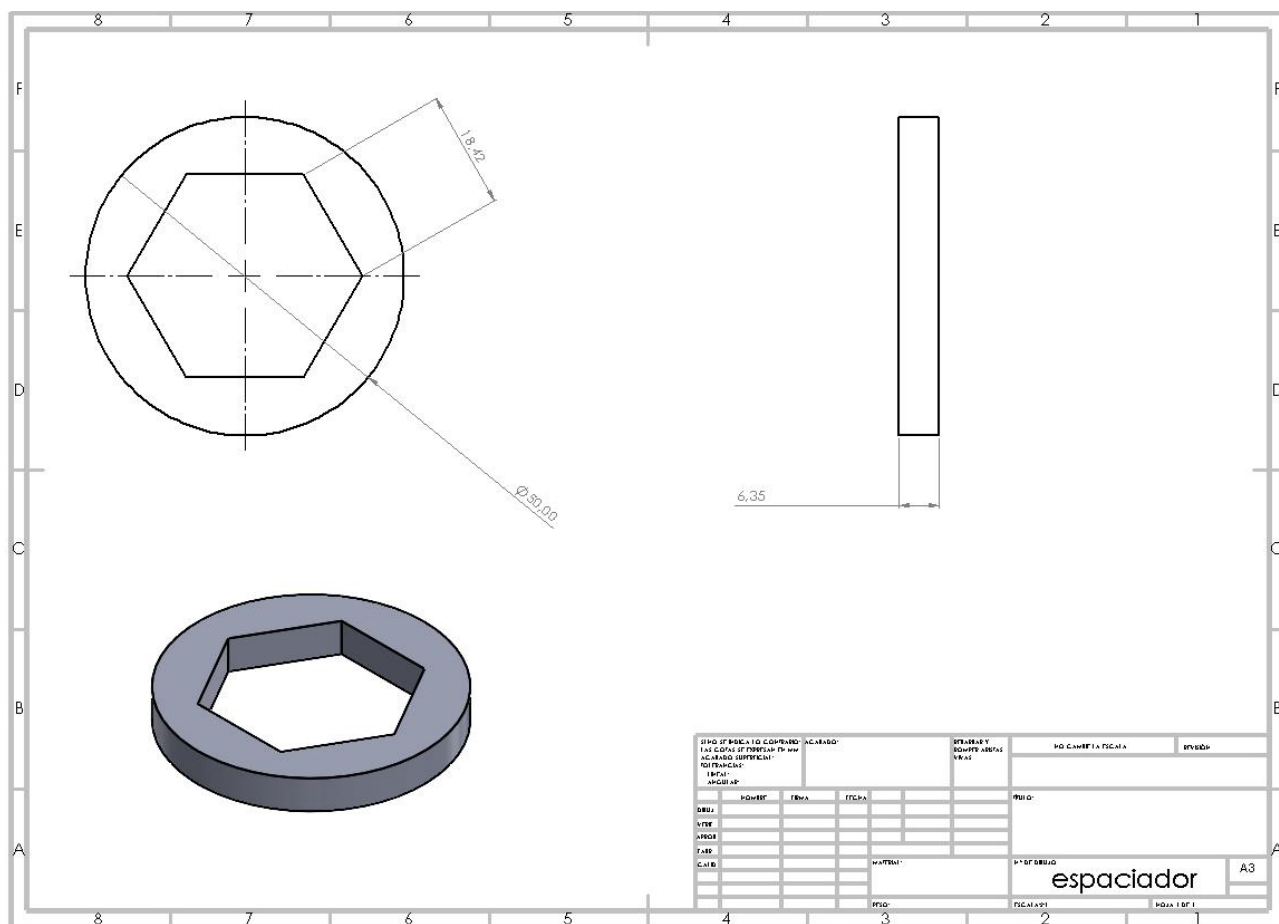
13. Anexo-Planos del sistema

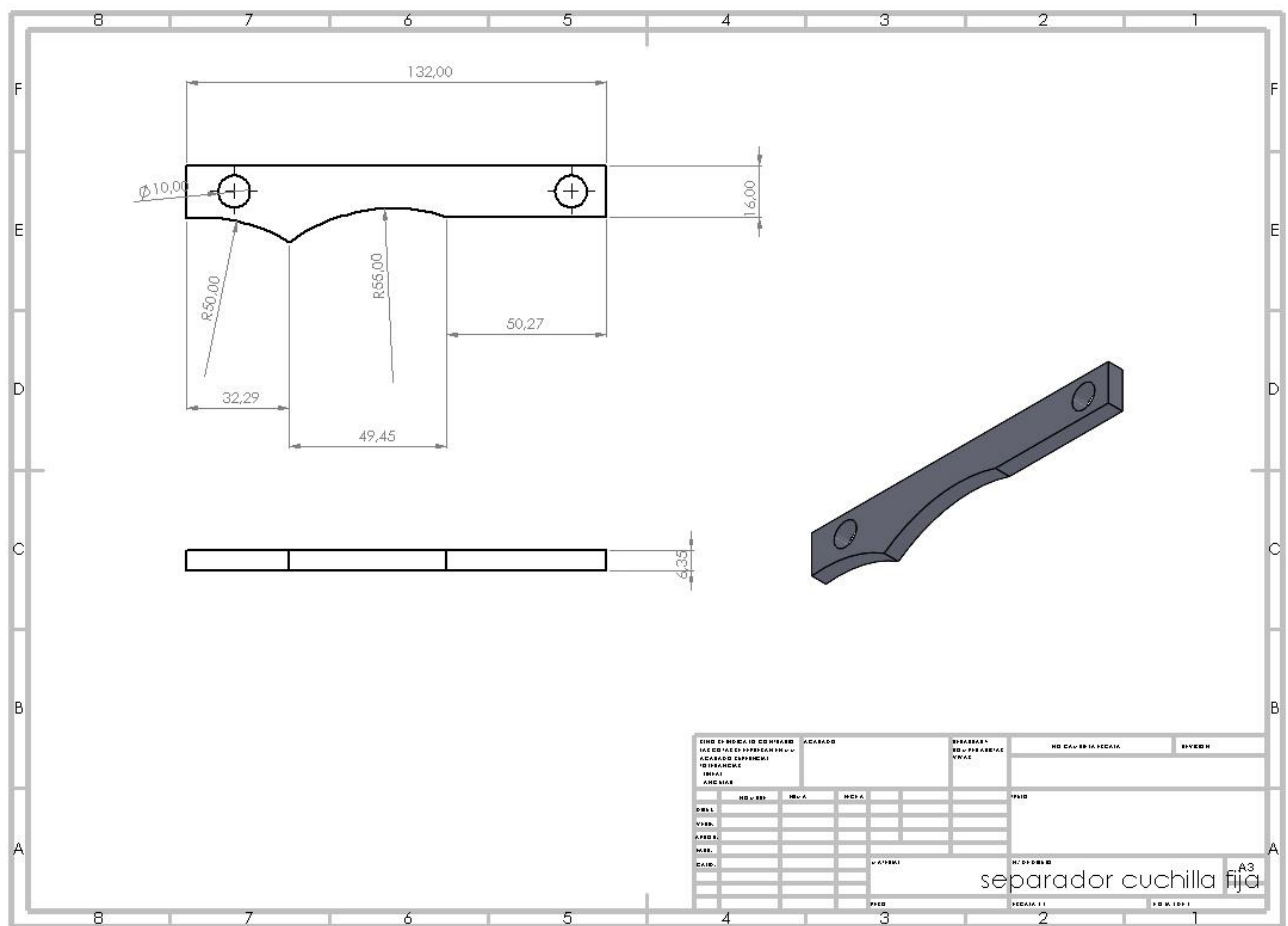


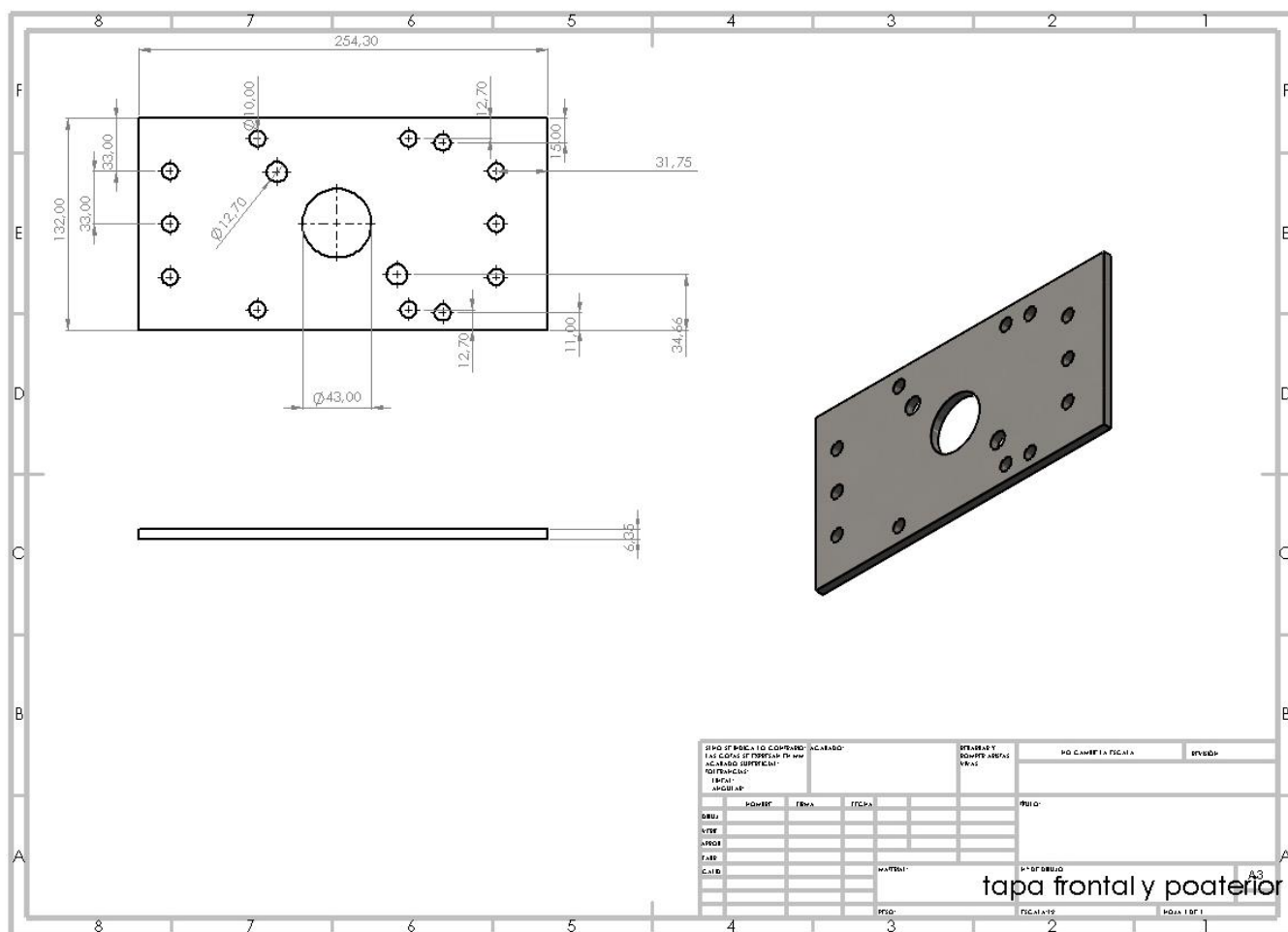


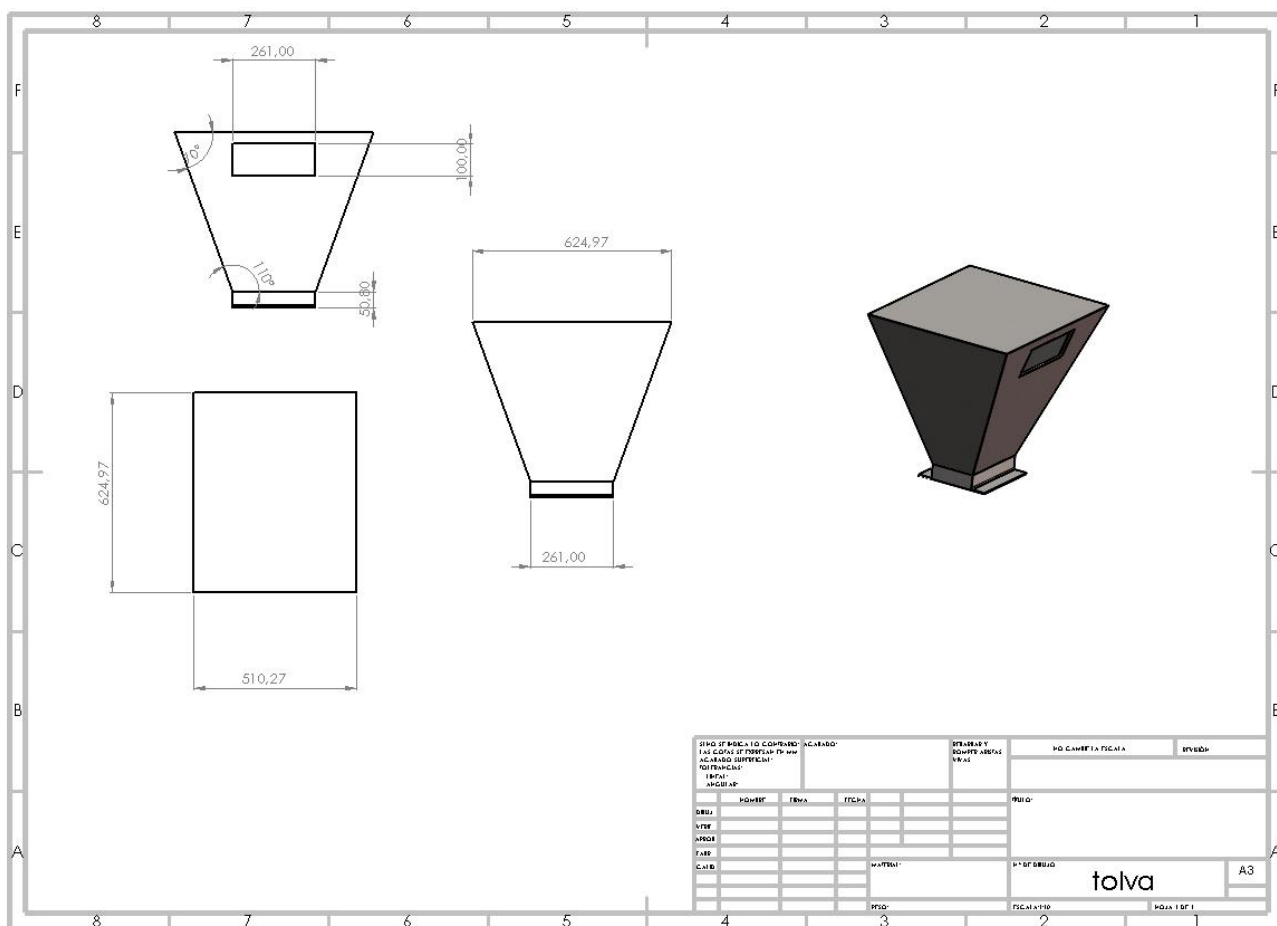


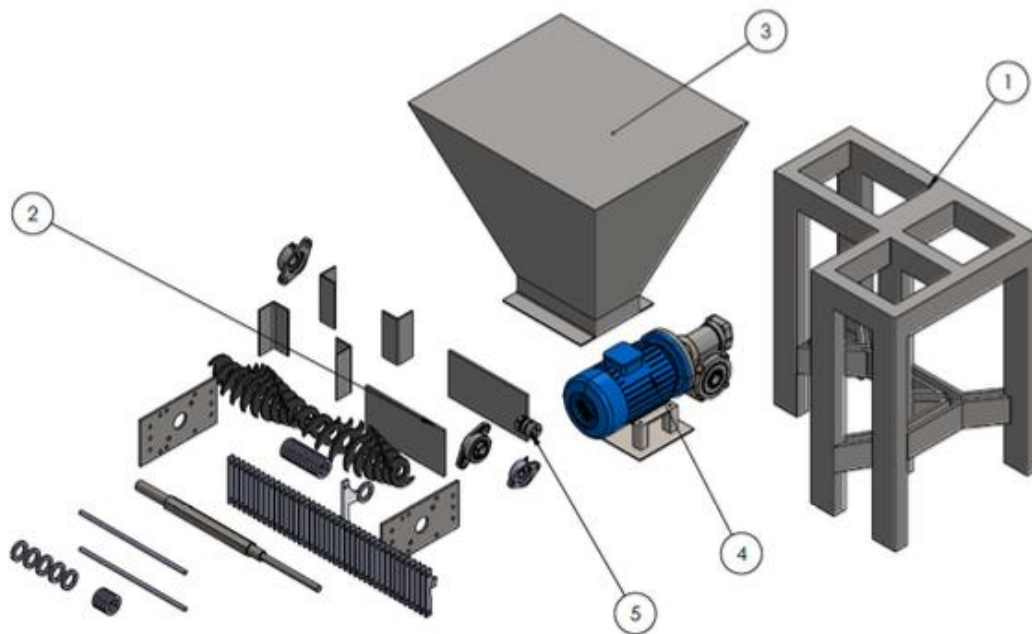












N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	base tritur		1
2	Ensamblaje principal		1
3	tolva		1
4	Motoreductor		1
5	3488N13	Servomotor Precision Flexible Shaft Coupling	1