

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

“Construcción de prototipo de máquina recuperadora de
botellas PET posconsumo con sistema de trituración”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

José Andrés Contreras Anchundia

Josué Humberto Heras Naranjo

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2018

DEDICATORIA

“A Elon Musk, por compartir su visión de un desarrollo sostenible y automatizado.”

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Mayken Espinoza y Alex Romero, tutores de este proyecto por su colaboración y guía. Agradecemos también a los Ing. Ernesto Martínez, Juan Muñoz y Roberto Anchundia, los cuales contribuyeron con su conocimiento para la construcción del prototipo.

José Contreras Anchundia

Agradezco a mis padres, José y Gioconda y a mi hermana Keyla, por darme el apoyo necesario para alcanzar mis metas. A mi tío Roberto por inspirarme a seguir la rama de la Ingeniería Mecánica. Y a María Belén Noboa por su constante apoyo durante mi carrera universitaria.

Josué Heras Naranjo

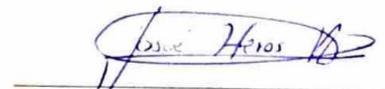
A Dios por la salud. A mis padres Humberto y Delia por su total entrega y apoyo, todo lo que soy hoy es gracias a ellos. A mis hermanos Anthony y Katherine por ser ejemplo e inspiración en terminar los estudios. A mis amigos que de alguna u otra forma colaboraron a lo largo de mi carrera. Y a Kate Símbala por su incondicional apoyo durante mi tesis.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; José Andrés Contreras Anchundia y Josué Humberto Heras Naranjo damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

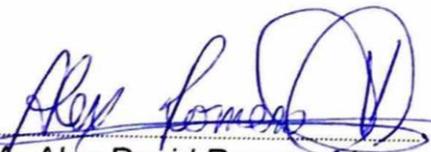


José Andrés
Contreras Anchundia



Josué Humberto
Heras Naranjo

EVALUADORES



MBA. Alex David Romero Vera



Ph.D. Mayken Stalin Espinoza Andaluz



M.Sc. Rodolfo Ezequiel Paz Mora

RESUMEN

El sector de empaquetado de alimentos está constituido en su mayoría por plástico PET y su auge radica en la elaboración de botellas plásticas para productos de bebidas carbonatadas. El Banco Interamericano de Desarrollo estudió la gestión de residuos sólidos en América Latina y estimó que la recuperación de las botellas desde la fuente y por medio de centros de acopio, tienen una eficacia de recolección inferior al 50%. El objetivo de este proyecto fue construir un prototipo de máquina recuperadora de botellas PET posconsumo con sistema de trituración, con la finalidad de involucrar al consumidor en el proceso de reciclaje y sintetizar el actual proceso de recolección posconsumo de estos envases.

Para el diseño se evaluó los elementos del sistema de trituración de forma analítica y para la cuchilla se tomó en consideración los modelos *open source* de *Filamaker*. El modelo CAD de la trituradora y simulación de las cuchillas se lo realizó en Inventor. Luego de la etapa de compra de materiales, tales como rodamientos, acero, contactor, etc., se procedió a mecanizar las piezas de la trituradora y se programó el sistema de control, posteriormente se ensambló todo el sistema. La máquina recuperadora de botellas PET que se diseñó, tuvo una capacidad de $12 \frac{kg}{h}$ con la cual se obtuvo PET triturado con un diámetro nominal inferior a 1 pulgada.

El peso del prototipo fue de 100 lb, por lo cual hace posible su traslado mediante dos personas. Por medio de un microcontrolador Arduino Uno se controló los parámetros de reconocimiento de la botella, así también el encendido y apagado del equipo. Adicionalmente, a través de la interfaz gráfica el usuario visualizó el número de botellas que deposita en la máquina. Su costo de fabricación tuvo un valor inferior en relación al ser importado, dando costo tal de \$1449.60, con lo cual se valida que la manufactura de estos equipos se puede lograr localmente.

Palabras Clave: plástico, trituradora, botellas, reciclaje, hojuelas, *Python*.

ABSTRACT

The Food Packaging Sector is constituted mostly by plastic PET and his summit lies in the production of plastic bottles for products of carbonated drinks. The Inter-American Development Bank studied the solid waste management in Latin America and estimated that the recovery of bottles from the source and through collection centers, have a collection efficiency of less than 50%. The objective of this project was to build a Post-consumer PET bottle recovery prototype machine with shredding system, with the purpose of involving the consumer in the recycling process and synthesizing the current post-consumption collection process of these packaging.

For the design there were evaluated the elements of analytical form and for the blades it took in consideration the open source models of Filamaker. The CAD model of the shredder machine and simulation of the blades carried out it in Inventor. After the stage of purchase of materials (bearings, steel, switch, etc) it proceeded to mechanize the mechanical components of the shredder machine and it programmed the control, subsequently assembled the whole system. The reverse bending machine of bottles PET had a capacity of shredding 12 kg/H and gives a result PET's scale of 1 inch of nominal diameter.

The weight of the prototype was of 100 pounds, for which his movement makes possible by means of two persons. Using an Arduino Uno microcontroller, we managed to control the bottle recon parameters as well as the on and off switch of the machine. Additionally, by the graphic user interface the user visualized the number of bottles that it deposits in the machine. Its cost of manufacture had a low value in relation on having been imported, with a total of \$1449.60, price that assures the assembly of the machine can be done locally.

Keywords: *plastic, shredder, bottles, recycle, scraps, Python.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
ÍNDICE DE PLANOS.....	XII
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Justificación del proyecto	3
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Marco teórico.....	4
1.4.1 Reciclado del plástico	4
1.4.2 Tipos de trituradoras	8
1.4.3 Trituradora de rodillos	8
1.4.4 Trituradoras de cuchillas	9
1.4.5 Trituradoras de dos ejes	10
CAPÍTULO 2.....	11
2. Metodología	11
2.1 Requerimientos de diseño	12
2.2 Alternativas de diseño	13
2.3 Selección de la mejor solución	14

2.3.1	Ponderación de criterios de evaluación	14
2.3.2	Matriz de decisión	16
2.4	Diseño de forma	16
2.5	Consideraciones generales para el proceso de diseño	18
2.5.1	Diseño de cuchillas	19
2.5.2	Diseño del eje	21
2.5.3	Potencia de trituradora.....	28
2.5.4	Selección de engranes	28
2.5.5	Cargas dinámicas en los rodamientos	30
2.5.6	Diseño de la cuña	31
2.6	Automatización del sistema de trituración	32
2.6.1	Sistema de control y potencia	33
2.6.2	Selección de elementos del sistema potencia	34
2.6.3	Selección de Disyuntor, Relé de sobrecarga y contactor.....	37
CAPÍTULO 3.....		38
3.	Resultados y análisis	38
3.1	Resultados de diseño	38
3.1.1	Resultado de cálculo del eje	38
3.1.2	Resultado de cálculo de cuchillas.....	38
3.1.3	Resultado de cálculo de engranes.....	39
3.1.4	Selección de motor	39
3.1.5	Selección de rodamientos.....	39
3.2	Resultados de la simulación en programa de elementos finitos.....	39
3.2.1	Simulación de la cuchilla.....	39
3.2.2	Simulación de la mesa de trabajo.....	41
3.3	Resultados del ensamblaje de la máquina trituradora.....	43
3.4	Resultado del sistema de control y potencia.	46

3.4.1	Conexiones del sistema de control y potencia.....	46
3.4.1	Programación de microcontrolador e interfaz gráfica de usuario.....	47
3.5	Resultado de la máquina trituradora.....	48
3.6	Análisis de costos.....	48
CAPÍTULO 4.....		51
4.	Discusión y conclusiones.....	51
4.1	Conclusiones.....	52
4.2	Recomendaciones.....	53

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ABREVIATURAS

AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
HP	Caballos de fuerza
kW	Kilovatio
kN	Kilonewton
m	Metro
m ²	Metros cuadrados
mm	Milímetro
N	Newton
MPa	MegaPascales
RPM	Revoluciones por minuto
NEC	Código Eléctrico Nacional
PET	Tereftalato de polietileno
Mt	Millones de toneladas
PVC	Policloruro de vinilo
PP	Polipropileno
SPI	Society Plastic Industry

SIMBOLOGÍA

C_{10}	Capacidad de la carga dinámica con una confiabilidad del 90%
I_N	Corriente nominal
I_{NFCm}	Corriente nominal con factor de corrección del motor
I_{NC}	Corriente nominal del conductor
I_{NFCc}	Corriente nominal con factor de corrección del conductor
ρ_e	Densidad del eje
ρ_c	Densidad de cuchilla
ρ_s	Densidad del separador
d_m	Diámetro de maza.
d_p	Diámetro de paso del engrane
d_e	Diámetro exterior del engrane
d	Diámetro mínimo del eje
S_y	Esfuerzo de fluencia
K_f	Factor de concentrador de esfuerzos de fatiga por flexión
K_{fsm}	Factor de concentración de esfuerzo medio de fatiga por torsión
C_{carga}	Factor de corrección de carga
C_{conf}	Factor de corrección de confiabilidad
C_{sup}	Factor de corrección de superficie
$C_{tamaño}$	Factor de corrección de tamaño
C_{temp}	Factor de corrección de temperatura
FP	Factor de potencia
FC_S	Factor de corrección
FC_t	Factor de corrección por temperatura
N_f	Factor de seguridad
a	Factor exponencial para rodamientos de bolas
F	Fuerza del plástico ejercida a la cuchilla
w	Fuerza distribuida del peso del eje
F_D	Fuerza radial en el rodamiento
S_e	Límite corregido de resistencia a la fatiga

Se''	Límite de resistencia a la fatiga sin corregir
m_e	Masa asumida del eje
m_c	Masa de la cuchilla
m_s	Masa del separador
T_m	Momento torsor medio
Z	Número de dientes del engrane
L_D	Número de horas de vida del rodamiento
W_c	Peso de una cuchilla
W_s	Peso de un separador
P	Potencia de trituración
S_{ut}	Resistencia última a la tensión
T	Torque del sistema
T_c	Torque que ejerce la cuchilla
q	Sensibilidad de la muesca en los cambios de sección
ω	Velocidad angular de operación
n_D	Velocidad óptima de operación
V_e	Volumen asumido del eje
V_c	Volumen de la cuchilla
V_s	Volumen del separador

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Países con impuesto redimible a las botellas PET.....	5
Figura 1-2 Clasificación del plástico por código SPI.....	6
Figura 1-3 Tiempo de descomposición del plástico.....	7
Figura 1-4 Método de reciclaje mecánico.....	8
Figura 1-5 Trituradora de rodillo.....	9
Figura 1-6 Trituradora de cuchillas de un eje.....	9
Figura 1-7 Trituradora de cuchillas de dos ejes.....	10
Figura 2-1 Metodología de diseño del proyecto.....	11
Figura 2-2 (a) Vista isométrico, (b) Vista lateral, (c) Vista superior.....	17
Figura 2-3 Diagrama de bloque de máquina recuperadora de botellas PET.....	18
Figura 2-4 Diagrama de fuerza cortante del eje.....	22
Figura 2-5 Diagrama de Momento flector del eje.....	22
Figura 2-6 Coeficientes del factor de superficie.....	24
Figura 2-7 Factores de confiabilidad.....	25
Figura 2-8 Factores de sensibilidad a la muesco para aceros.....	26
Figura 2-9 Factor geométrico de concentración de esfuerzos k_t para un eje con filete de hombro en flexión.....	26
Figura 2-10 Factor geométrico de concentración de esfuerzos k_t para un eje con filete de hombro en torsión.....	27
Figura 2-11 Dimensiones para diferentes tipos de módulos de engranajes rectos ...	29
Figura 2-12 Capacidad de potencia para engranajes rectos.....	30
Figura 2-13 Cuñas estándar para ejes.....	32
Figura 2-14 Diagrama de flujo de las operaciones del prototipo.....	33
Figura 2-15 Diagrama esquemático del circuito de control (A) y circuito de potencia (B).....	34
Figura 3-1 Simulación de la cuchilla de trituradora. Tensión de Von Misses.....	40
Figura 3-2 Simulación de la cuchilla de trituradora. Deformaciones máximas.....	41
Figura 3-3 Fuerza en la cuchilla.....	41
Figura 3-4 Simulación de la mesa de trituradora. Tensión de Von Misses.....	42
Figura 3-5 Simulación de la mesa trituradora. Coeficiente de seguridad.....	42
Figura 3-6 Simulación de la mesa de trituradora. Deformaciones.....	43

Figura 3-7 Rodamientos y la placa de 15 mm de la caja de trituración.	44
Figura 3-8 Orden de cuchillas en el eje de la trituradora.	44
Figura 3-9 Engranajes de la caja trituradora y ángulos en la caja de trituración.	45
Figura 3-10 Ensamble de la parte mecánica de la máquina trituradora.	45
Figura 3-11 Elementos del circuito de potencia conectados.....	46
Figura 3-12 Elementos del circuito de control conectados.	47
Figura 3-13 GUI en Python con librería tkinter.	47
Figura 3-14 Máquina trituradora.	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Requerimientos de diseño.....	12
Tabla 2-2 Matriz morfológica.	13
Tabla 2-3 Rúbrica para asignar puntos en las comparaciones.....	15
Tabla 2-4 Asignación de puntos para las comparaciones.	15
Tabla 2-5 Importancia de cada criterio expresada porcentualmente.	16
Tabla 2-6 Matriz de decisión de trituradora.	16
Tabla 2-7 Corrientes en plena carga en amperios para motores monofásicos de corrientes alterna.....	35
Tabla 2-8 Ampacidades permisibles en conductores aislado paratensiones nominales de 0-2000 voltios y a 60° C a 90° C.	36
Tabla 2-9 Factor de corrección por factores de temperatura de acuerdo a temperatura ambiente.	37
Tabla 3-1 Costos de elementos.....	49
Tabla 3-2 Costos de la mano de obra.	50

ÍNDICE DE PLANOS

- PLANO 1 Ensamble completo
- PLANO 2 Lista de elementos del sistema de trituración
- PLANO 3 Elementos de cuchilla
- PLANO 4 Ejes
- PLANO 5 Placas para rodamientos 15 mm
- PLANO 6 Placas para rodamientos 3 mm
- PLANO 7 Placas laterales 8 mm
- PLANO 8 Estructura inferior
- PLANO 9 Estructura superior

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La producción global de plástico ha aumentado en los últimos 50 años llegando a posicionarse como material insignia de la economía moderna. Se estima que para el año 2020 la producción de plástico aumente en un 900% con respecto a los niveles de 1980, alcanzando valores superiores a 500 millones de toneladas (Mt) de plástico anualmente (Global Ocean Commission, 2014).

El crecimiento de la industria del plástico inicia desde la invención de varias formas de producción de polímeros sintéticos, termoestables y termoplásticos, por medio de fuentes petroquímicas. Estos materiales son baratos, livianos, duraderos y pueden moldearse en productos con una amplia variedad de aplicaciones. Por esta razón, en la actualidad se destina alrededor del 4% de la producción anual de petróleo para la fabricación de plástico (Federation British Plastics, 2008).

El mercado está dominado por cuatro diferentes tipos de plásticos, los cuáles son: polietileno (PE; de alta y baja densidad) con una producción de 73 millones de toneladas en 2010, tereftalato de polietileno (PET) con 50 millones de toneladas, polipropileno (PP) 50 millones de toneladas y finalmente el policloruro de vinilo (PVC) con 35 millones de toneladas. Esto corresponde un aproximado de 85% del consumo mundial total de plástico (UNEP, 2016).

La botella plástica de PET fue patentada en 1973 por N. Wyeth y desde sus inicios tuvo una gran acogida por la industria de las bebidas. Su éxito fue tal, que en menos de 15 años se produjo un equivalente a 3 billones de botellas de PET (Gargiulo, 1997). Esto ha ocasionado que en Estados Unidos, la industria del empaquetado plástico esté constituida por un 97% de PET y HDPE y en Europa se destine alrededor del 40% de su producción (Plastic Europe, 2017).

Debido al auge de las botellas desechables de PET, la idea de reutilizar envases de vidrio para bebidas azucaradas y carbonatadas se ha visto afectada, dejando de ser común su uso desde hace más de cuarenta años. Esto se debe a retrasos en la producción de las fábricas, generado por las limitaciones logísticas para recolectar estas botellas. Además, presentaba limitaciones de comercialización con respecto al marketing, debido a que no se podía generar una amplia gama de empaques.

En los últimos diez años, el reciclaje de plástico se ha incrementado aproximadamente en un 80% y la disposición final en botaderos o rellenos sanitarios se ha reducido alrededor del 40% (Plastic Europe, 2017). Reciclando el plástico se puede alcanzar una reducción aproximada del 70% de recursos naturales y emisiones de CO₂ por cada billón de botellas recicladas en comparación a los recursos que se emplea en el PET virgen (Veolia).

1.1 Descripción del problema

Se ha demostrado en Latinoamérica que los métodos convencionales para recuperar botellas plásticas resultan ser poco eficientes, llegando a recolectar menos del 50% del PET. Entre estos métodos se tiene: La recolección en la acera, en centros de acopio, en la fuente y por medio de tachos etiquetados. El motivo de su baja efectividad se debe a la falta de un incentivo económico, la mala clasificación de los materiales reciclables y la inadecuada ubicación de los centros de acopio, dado a que estos se encuentran en zonas rurales (Banco Interamericano de Desarrollo, 2015).

El crecimiento de la industria del reciclado de plástico está siendo amenazado por problemas de transporte y almacenamiento de las botellas plásticas posconsumo debido al gran volumen que genera su recuperación. Al no existir un sistema compacto donde el consumidor sea el responsable de reciclar el envase, se seguirá manteniendo el método tradicional de reciclaje. Estas son recolectadas desde la fuente por medio de recuperadores informales y se trasladan a un centro de reciclado certificado, en el cual se procesan y distribuyen a la industria manufacturera.

1.2 Justificación del proyecto

Para lograr simplificar el proceso de reciclaje de botellas PET, se debe involucrar al consumidor en el proceso de recolección posconsumo mediante máquinas recuperadoras, las cuales ayudan en el proceso del reciclado mecánico. La efectividad de estas máquinas se debe a la creación de un impuesto redimible, es decir, se graba una tarifa monetaria a cada botella de plástico PET y posteriormente retorna al consumidor cuando este realiza la disposición final en un lugar certificado. El impuesto se ha implementado en alrededor de 40 países del mundo, teniendo una eficacia de más del 90% de recuperación de envases no retornables de PET (Retorna, 2016).

Este sistema puede ser acogido por empresas productoras de empaques plásticos para cumplir con los principios de responsabilidad extendida del productor, la misma que promueve las mejoras ambientales para los ciclos de vida completos de sus productos. En el caso de las instituciones educativas como la Escuela Superior Politécnica del Litoral, siendo un plantel estudiantil de aproximadamente diez mil estudiantes, se puede lograr la recuperación total de aproximadamente media tonelada mensual de desechos plástico de botellas PET, que ingresa a través de los 12 bares que la conforman.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Construir el prototipo de una máquina recuperadora de botellas de tereftalato de polietileno incorporando un sistema de trituración. Esta propuesta relaciona el diseño mecánico y los sistemas interactivos centrados en el usuario, con la finalidad de involucrar al consumidor en el reciclaje y sintetizar el proceso de recolección posconsumo de estos envases.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Diseñar el sistema de trituración de envases PET para botellas de hasta 1 litro.
- Implementar un sistema de control *open source* en el prototipo.
- Programar una interfaz interactiva para la comunicación usuario-máquina.
- Desarrollar un prototipo ligero con la capacidad de ser trasladado manualmente.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Reciclado del plástico

La economía circular del plástico tiene como objetivo tratar a los residuos como recursos para que sean retornados al propio ciclo productivo, reduciendo las fugas a los ecosistemas, como al océano. Los factores que influyen en su viabilidad son: El precio del polímero reciclado en comparación al PET virgen, el precio del barril de petróleo y el costo del proceso de reciclaje.

Los sistemas integrados de gestión de residuos sólidos, han creado impuestos redimibles bajo el modelo de depósito, devolución y retorno, que incentiva el reciclaje de botellas plásticas donde se impone a cada envase plástico un valor monetario que el consumidor paga al comprarlo y es retornado cuando se devuelve el envase a un lugar seguro. En la Figura 1-1 se muestran los países que han adoptado este modelo, por ejemplo, en Alemania se estableció hasta €0.25 por botella plástica, en Ecuador \$0.02, Dinamarca 1kr, entre otros (Forum World Economic, 2016).

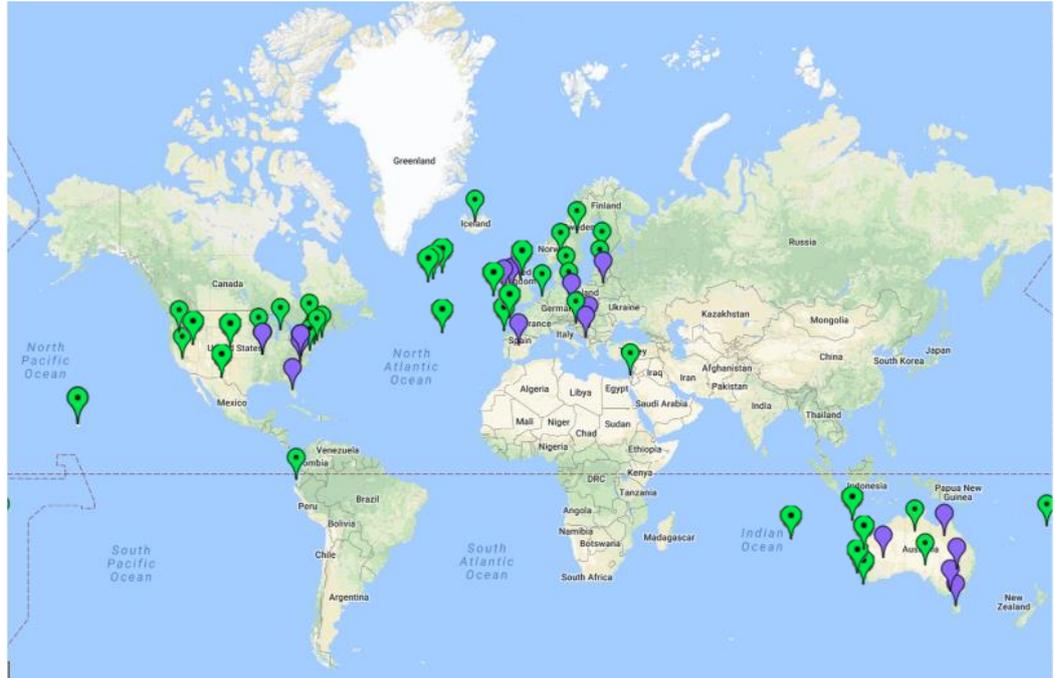


Figura 1-1 Países con impuesto redimible a las botellas PET.

Fuente: Retorna

Para mejorar el proceso de reciclado en su etapa de clasificación y recolección, la Society Plastic Industry (SPI) estableció una codificación (ver Figura 1-2) para identificar el tipo de plástico que está fabricado un determinado producto; usualmente se encuentra en la parte inferior.

 PET Polietileno Tereftalato		Envases: botellas y bandejas. Fiejes. Monofilamentos. Refuerzos para neumáticos. Cintas de video y audio.
 PEAD Polietileno de Alta Densidad		Películas para envases. Bolsas de comercio. Cajones para gaseosas, cervezas, frutas, pescado. Bolsas camiseta. Caños para agua, gas, irrigación. Enseres domésticos. Tapas. Juguetes.
 PVC Policloruro de Vinilo		Caños. Tarjetas de crédito. Productos médicos. Marcos de ventana. Perfiles. Aislaciones para cables. Pisos. Juguetes. Botellas.
 PEBD Polietileno de Baja Densidad		Películas para envases (sachets). Bolsas de comercio. Caños para agua, irrigación. Aislación de cables. Películas para agro, stretch film y termocontraible.
 PP Polipropileno		Película para el envoltorio de galletas, fideos, snacks. Baldes. Contenedores. Bazar- Enseres domésticos. Baterías. Piezas para automotores. Caños. Medicina (jeringas descartables). Sillas y mesas. Rafia.
 PS Poliestireno		Envases lácteos (yogurt, postres, etc.). Vajilla descartable y vasos térmicos. Envases descartables (Bandejas para alimentos, etc.). Electrodomésticos. Perfiles. Juguetes. Art. de librería. Aislantes.
 Otros PA, ABS, SAN, Acrílico, PC y otros		Industria automotriz. Electrodomésticos. Piezas industriales. Colchones. Artículos electrónicos. Construcción. Botellones de agua.

Figura 1-2 Clasificación del plástico por código SPI.

Fuente: El autor

El problema del plástico radica en su gran tiempo de degradación, como se muestra en la Figura 1-3, para algunos objetos comunes. Existen tres técnicas de reciclaje a la cual puede ser sometida esta materia prima: Reciclado mecánico, reciclado químico o a un reciclado energético (como fuente de energía).

Plásticos: ¿cuánto tiempo tardan en descomponerse?		
HILO DE PESCA		± 600 años
BOTELLA		± 500 años
CUBIERTOS		± 400 años
MECHERO		100 años
VASO		65- 75 años
BOLSA		55 años
SUELA DE ZAPATO		10- 20 años
COLILLA		1- 5 años
GLOBO		6 meses

Figura 1-3 Tiempo de descomposición del plástico.

Fuente: Green Peace

En la actualidad, la técnica más utilizada es el reciclado mecánico. Esta técnica consiste en una serie de operaciones (ver Figura 1-4) tales como: Separación de acuerdo con el tipo de resina, remoción de contaminante y trituración mediante molinos para reducir el tamaño del plástico en hojuelas (*scraps*). Con un material homogéneo, se procede a la extrusión por calor y procesamiento del nuevo plástico. Este proceso está limitado para los termoplásticos, debido a que los termoestables no pueden ser remodelados por los efectos del calor.

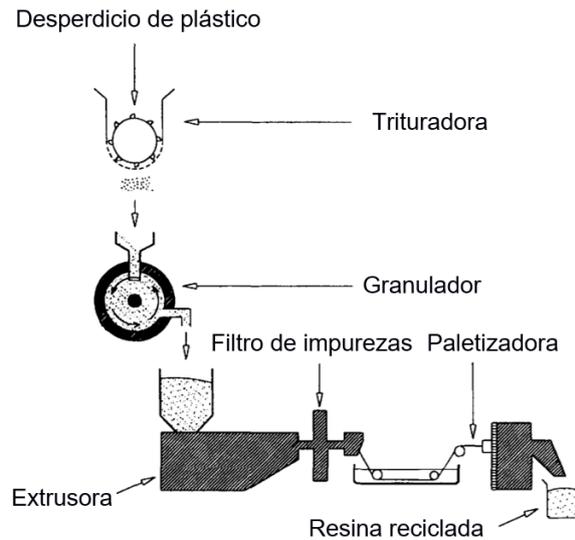


Figura 1-4 Método de reciclaje mecánico.

Fuente: Feedstock Recycling of Plastic Wastes

1.4.2 Tipos de trituradoras

El principio de funcionamiento de las trituradoras es generalizado, el cual a partir de un torque, transmitido a un rotor con cuchillas, se transforma en una fuerza que pueden cortar, triturar o moler un material hasta reducir su volumen. Luego de esto, el paso es permitido a través de una rejilla metálica con una matriz de agujeros (denominada tamiz), el cual regula el diámetro de las partículas de triturado. Las principales trituradoras para plástico son trituradoras de rodillos dentados o lisos, de cuchillas y múltiples ejes.

1.4.3 Trituradora de rodillos

El proceso inicia por medio de una entrada de alimentación donde se deposita el material, con el fin de entrar en contacto con dos ejes que rotan en direcciones contrarias para poder atrapar y triturar. Su desempeño depende de las dimensiones, velocidad de rotación y potencia de los rodillos. Se puede llegar a obtener una reducción de tamaño de hasta 4 a 1. En la Figura 1-5 se muestra un esquema de la trituradora de rodillo.

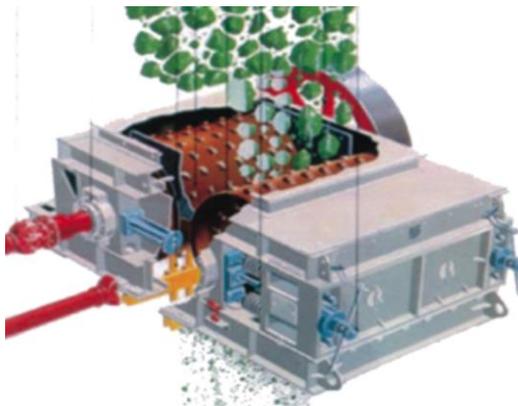


Figura 1-5 Trituradora de rodillo

Fuente: Manual de trituración y cribado, 2008.

1.4.4 Trituradoras de cuchillas

En estos equipos, la trituración se produce por medio de cizalladura, es decir, la cámara de corte consta de un sistema tipo tijeras, en el cual se emplean dos clases de cuchillas. Las cuchillas móviles se ubican en el rotor y las cuchillas fijas sobre la estructura interna del triturador (ver Figura 1-6). El desempeño del equipo depende de la fuerza de impacto, la generación de calor en la zona de corte, la velocidad de rotación y el diseño de la entrada de alimentación. Se presenta problemas de agarre sobre el material, debido a la configuración de un solo eje.



Figura 1-6 Trituradora de cuchillas de un eje.

Fuente: Molino de Impormayorec S.A.

1.4.5 Trituradoras de dos ejes

Están conformadas por dos rotores con una serie de discos de corte (cuchillas) colocados perpendicularmente y alternados con discos separadores, de menor diámetro e igual espesor que las cuchillas. Además, poseen un solo motor conectado a un eje rotor y a través de engranajes se transmite la potencia hacia el otro eje. Para aplicaciones más robustas están constituidas por dos motores eléctricos independientes y con movimientos sincronizados. Su ventaja radica en la configuración de los ejes y la baja velocidad de rotación, debido a que el material es agarrado eficazmente, evitando salpicaduras fuera de la entrada de alimentación.

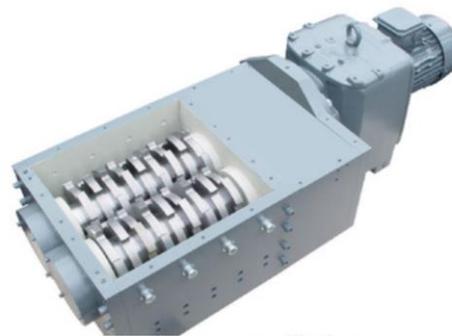


Figura 1-7 Trituradora de cuchillas de dos ejes.

Fuente: Manual de trituración y cribado, 2008.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Para desarrollar este proyecto se elaboró un proceso de diseño dividido en etapas, el cual se detalla en la Figura 2-1 por medio de un flujograma. En la primera etapa se empleó los requerimientos del prototipo para obtener las alternativas de diseño del sistema de trituración y los sistemas de control *open source*. Por medio de una matriz de decisión y morfológica se validó la mejor solución para el sistema de recuperación de botellas PET.

En la segunda etapa se realizó el diseño de forma del prototipo en el cual se utilizó dibujos a mano alzada y diagramas de bloques para plasmar la idea del diseño. El siguiente paso consistió en el diseño detallado del sistema de trituración conformado por cuchillas, separadores, ejes y engranes. Luego se seleccionó el sistema de transmisión y generación de potencia del sistema, al igual que el controlador *open source* y los sensores. En la tercera etapa, se realizó la simulación de los elementos mecánicos de la triturada en el programa de elementos finitos *Inventor* (Autodesk Inc., 1999, E.E.U.U con número de serie 563-47866757 y licencia estándar versión educativa ESPOL), además se procedió a la construcción y puesta a punto del prototipo. Esta etapa concluyó con un análisis de costo de la fabricación del prototipo.

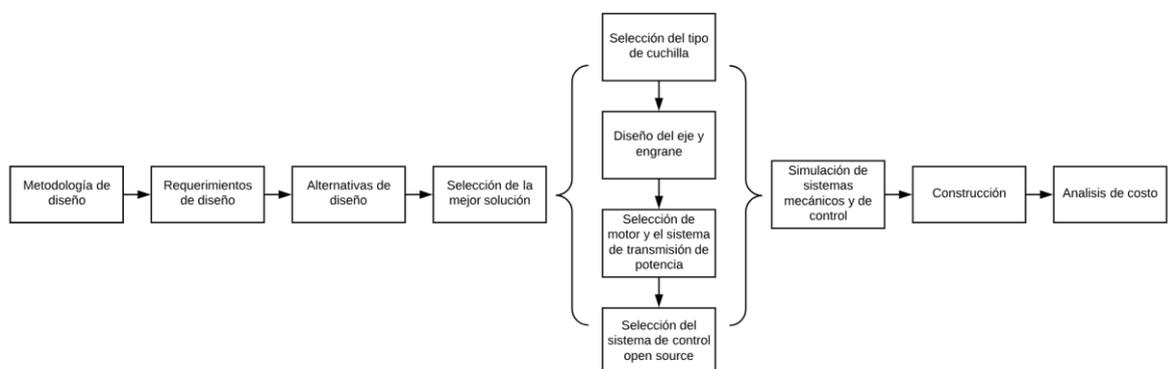


Figura 2-1. Metodología de diseño del proyecto.

Fuente: Autores

2.1 Requerimientos de diseño

En la tabla 2-1 se presentan los requerimientos que debe cumplir el prototipo de la máquina recuperadora de botellas PET. Para expresar de forma clara y detallada las características del prototipo, se describió cada una de ellas empleando tres variables, las cuales son: Función, objetivo y especificación.

Tabla 2-1 Requerimientos de diseño.

Fuente: Autores

Función	Objetivo	Especificación
Ingresar información	Mínima cantidad de botones	Realizar funciones básicas como encendido y apagado.
	Interfaz interactiva	Emplear pantalla táctil para mostrar ventanas interactivas y botones virtuales.
Fácil de mover	Sistema de transporte	Adjuntar ruedas en la parte inferior para facilitar la movilización.
	Optimización del espacio	Las dimensiones aproximadas del exterior del prototipo son 1.70 m para la altura, ancho y profundidad de 0.60 m
Almacenamiento	Capacidad	Almacenamiento de 25 kg de PET triturado.
Sistema de control	Ejecución de forma automática del prototipo	Sistemas <i>open source</i> y de bajo costo.
Identificación de botella	Detectar el ingreso de la botella	Aplicar sensores o reconocimiento por visión artificial.
Trituración	Obtener hojuelas de PET	Triturar botellas de plástico de hasta 1 litro por medio de un sistema mecánico en hojuelas de PET.

2.2 Alternativas de diseño

Debido a que existen una variedad de alternativas al momento de diseñar y seleccionar los componentes de alguna máquina. Se empleó la matriz morfológica, la cual se muestra en la Tabla 2-2 y ayuda a ordenar las ideas, alternativas o soluciones de los parámetros que tendrá nuestra máquina trituradora.

Tabla 2-2 Matriz morfológica.

Fuente: Autores

Parámetros	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D
Número de ejes de la trituradora	1 eje	2 ejes	4 ejes	-
Sección transversal del eje	Circular	Cuadrado	Hexagonal	-
Número de dientes de la cuchilla	2 dientes	3 dientes	4 dientes	6 dientes
Motor	Corriente alterna	Corriente directa	-	-
Movilidad del equipo	2 ruedas y 2 soportes	4 ruedas	4 soportes	-
Sistema de transmisión de potencia	Motorreductor	Sistema de poleas	-	-
Interacción máquina-humano	Sólo botones	Pantalla táctil	Pantalla táctil y botones físicos	-
Sistema de detección de botella	Sensor de ultrasonido	Visión artificial	-	-

2.3 Selección de la mejor solución

Para la selección del diseño del sistema de trituración se consideró dos tipos de trituradoras comunes aplicadas en la industria del reciclado del plástico, las opciones se muestran a continuación:

- **Opción A:** Trituradora de dos ejes (cuchillas)
- **Opción B:** Trituradora de un eje.

La trituradora de dos ejes tiene un eficiente agarre del material, fácil mantenimiento y un costo intermedio. Este tipo de trituradora normalmente es usado para triturar pequeños y grandes objetos a bajas revoluciones. La trituradora de un eje normalmente es utilizada para triturar materiales gruesos y sólidos, sin embargo, ambas trituradoras pueden triturar botellas plásticas.

2.3.1 Ponderación de criterios de evaluación

Los criterios para obtener la matriz de ponderación fueron los siguientes:

- Costo de fabricación.
- Facilidad de mantenimiento y montaje (FMM).
- Eficiencia de agarre.

El costo de fabricación está relacionado a la cantidad de material triturado que se espera producir, es decir la capacidad de la máquina. En la trituradora de 2 ejes se necesita mayor cantidad de material para su fabricación debido a que emplea dos rotores. Para comparar la eficiencia del agarre de los equipos, se emplearon los parámetros de rendimiento; la cantidad de hojuelas que tritura la máquina en un intervalo de tiempo y además cuanto se tarde en atrapar las botellas por medio de las cuchillas, este último parámetro evita que el material salga expulsado repentinamente de la cámara de trituración. En ambas trituradoras se obtienen resultados similares, sin embargo dependen de la cantidad de ejes y la velocidad angular de operación. Se utilizó la rúbrica de la tabla 2-3 para asignar los puntos en las comparaciones.

Tabla 2-3 Rúbrica para asignar puntos en las comparaciones.

Fuente: Autores

Resultado de la comparación	Puntos asignados
Infinitamente más importante	9
Mucho más importante	8
Notablemente más importante	7
Más importante	6
Igual de importante	5
Menos importante	4
Notablemente menos importante	3
Mucho menos importante	2
Infinitamente menos importante	1

En la tabla 2-4 se asignó los valores de puntos de comparaciones para evaluar cada una de las características de los sistemas de trituración.

Tabla 2-4 Asignación de puntos para las comparaciones.

Comparaciones criterios	Costo vs FMM	Costo vs Eficiencia de agarre	FMM vs eficiencia de agarre	Puntos totales de criterio
Costo	5	2	-	7
FMM	5	-	4	9
Eficiencia de agarre	-	8	6	14
Total	10	10	10	30

Teniendo los puntos totales de cada criterio, se obtuvo la importancia expresada porcentualmente en la Tabla 2-5.

Tabla 2-5 Importancia de cada criterio expresada porcentualmente.

Fuente: Autores

Criterio	Puntos obtenidos	Porcentaje
Costo	7	23.33%
FMM	9	36.67%
Eficiencia de agarre	12	40%
Total	30	100%

2.3.2 Matriz de decisión

Para evaluar la matriz de decisión (Tabla 2-6), se asignó valores del 1 al 5, siendo estos: 1 malo, 2 regular, 3 bueno, 4 muy bueno y 5 excelente. De acuerdo con la matriz de decisión, la opción A tuvo un puntaje superior en comparación con las otras opciones, siendo este la trituradora de 2 ejes.

Tabla 2-6 Matriz de decisión de trituradora.

Fuente: Autores

	Costo	Rendimiento	Seguridad	Rango
Factor de peso	0.23	0.37	0.40	1.00
Opción A	3.00	4.00	5.00	
	0.69	1.47	2.00	4.17
Opción B	5.00	4.00	3.00	
	1.16	1.47	1.20	3.83

2.4 Diseño de forma

Para el diseño de forma del exterior del equipo (Figura 2-2) se empleó una cubierta metálica de forma de un cubo y por debajo de esta, se colocó 4 tubos de sección cuadrada a manera de soporte. En un lateral, de la superficie de

trabajo, se ubicó el sistema de transmisión de potencia, compuesto por un motor y un reductor, que posteriormente se une al sistema de trituración. Y en la parte superior de la entrada de alimentación se coloca un sensor para detectar el ingreso de la botella.

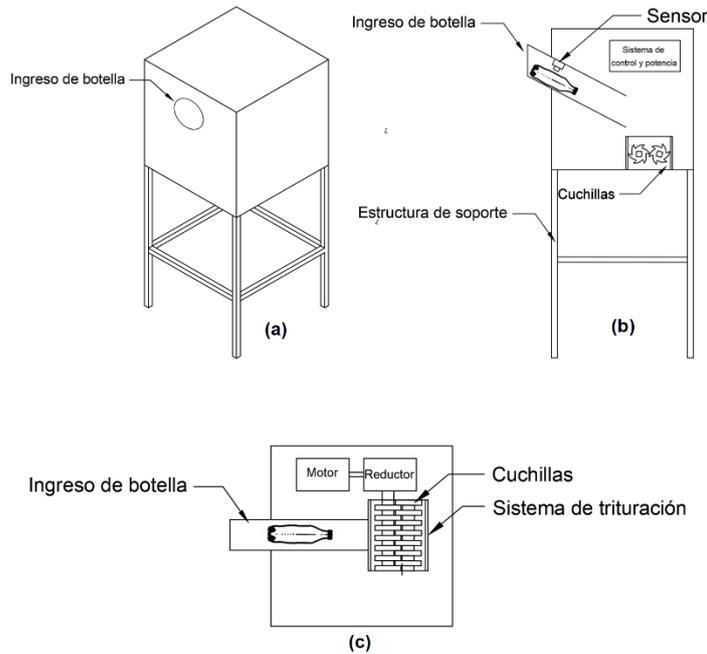


Figura 2-2 (a) Vista isométrico, (b) Vista lateral, (c) Vista superior.

Fuente: Autores

En la Figura 2-3 se presenta las operaciones que realizó el equipo, en el cual este debe transformar una botella PET en hojuelas mediante un sistema de trituración (reciclaje mecánico). Este proceso se compone de 4 pasos: La primera etapa se compone de recepción y validación de la botella plástica en la entrada de alimentación de la máquina. La siguiente etapa se compone de la trituración y finalmente el almacenamiento de las hojuelas de PET.

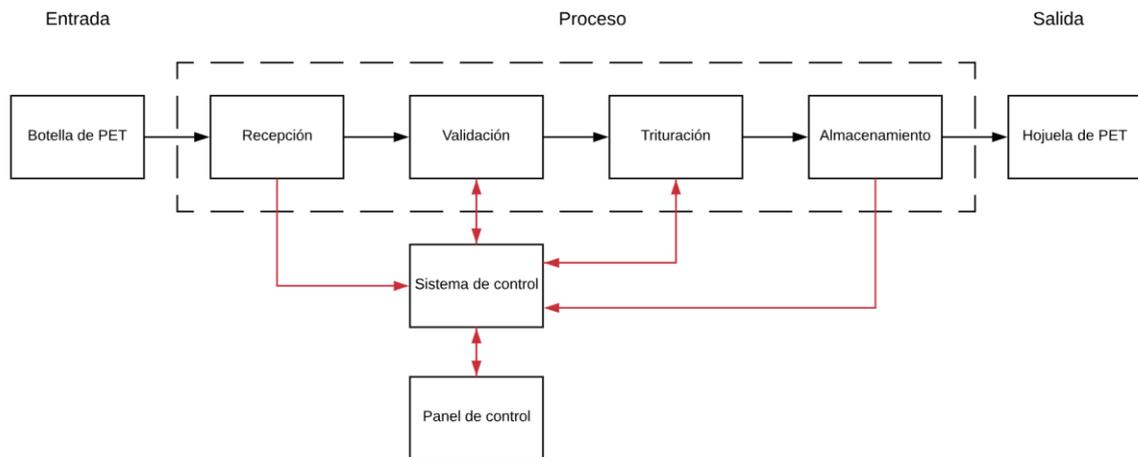


Figura 2-3 Diagrama de bloque de máquina recuperadora de botellas PET.

Fuente: Autores

2.5 Consideraciones generales para el proceso de diseño

El diseño de la máquina trituradora fue basado en los siguientes parámetros generales:

- Material a ser triturado.
- Capacidad de alimentación.

La máquina debe ofrecer el servicio de trituración de botellas PET, por lo cual se determinó las propiedades de resistencia al impacto o esfuerzo Charpy del plástico. Y por medio de una relación de energía-elasticidad se calculó la fuerza que el plástico ejerce en los ejes y cuchillas de la trituradora. Posteriormente se podrá utilizar para los cálculos de selección del material y dimensionamiento de las partes de la máquina trituradora.

Con respecto a la capacidad de alimentación se estableció una velocidad de operación, debido al flujo de material que ingresa al equipo por unidad de tiempo. Una botella PET vacía pesa alrededor de 40 gramos, se hizo una encuesta de la cantidad de botellas que ingresan a los bares de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, y se fijó que la máquina trituradora operará con un flujo de 12 kg/hr. La máquina trituradora consta de los siguientes parámetros de operación: Tipo de cuchillas, tamaño de los ejes y velocidad de operación.

2.5.1 Diseño de cuchillas

Para obtener la geometría de la cuchilla se tomó en consideración los diseños de forma y recomendaciones de las trituradoras *open source* de la empresa alemana *FilaMaker*. De acuerdo a las necesidades del equipo, las dimensiones de la altura del diente de la cuchilla se la obtuvieron en función del agarre que este debe realizar en el cuello de la botella.

Para determinar si falla la cuchilla, se usó un modelo matemático en el que la parte del diente de la cuchilla se la considerará una viga en voladizo y la carga soportada es la que plástico ejerce al material. Esta fuerza se la determinó mediante una relación de ecuación de energía usada en los ensayos de impacto Charpy:

$$\delta W = \delta U_{el} + G_C t \delta a \quad (2.1)$$

Donde:

δW : Trabajo de fuerzas exteriores generada por la energía suministrada.

δU_{el} : Cambio de energía elástica del material.

$G_C t \delta a$: Cambio de energía absorbida por el material en la rotura.

El cambio de energía elástica del material es despreciable en comparación al trabajo realizado por las cuchillas en el corte, debido a la rápida propagación de la grieta en la rotura del plástico. La ecuación se reduce como se expresa a continuación:

$$\delta W = G_C t \delta a$$

Donde:

G_C : Energía absorbida por unidad de área.

t : Longitud del material cortada por la cuchilla.

δa : Avance de la fractura en el instante de impacto.

Se procede a integrar la ecuación:

$$\int \delta W = \int G_c t \delta a$$

$$W = G_c t a \Big|_0^e$$

$$W = G_c t e$$

Se utilizó el $G_c = 34 \frac{KJ}{m^2}$ perteneciente al polietileno de alta densidad debido a que es el material con mayor resistencia al impacto que conforma una botella plástica.

$$W = (34000)(0.01825 + 0.010 + 0.01825)(0.003)$$

$$W = 4.74 Nm$$

$$Fd = 4.74 \tag{2.2}$$

$$F = \frac{4.74}{0.05}$$

$$F = 94.86 N$$

En base a la ecuación (2.2) se calculó la fuerza del plástico ejercida a la cuchilla y realizando una simulación mecánica se aseguró que el material no falla. Empleando la ecuación (2.3) se calculó el torque que ejerce la cuchilla el cual es la fuerza que ejerce al plástico multiplicada por el radio de cuchilla.

$$T_c = (94.86)(0.05) \tag{2.3}$$

$$T_c = 4.74 Nm$$

Teniendo los valores de fuerza y torque se realizó una simulación mecánica en *Autodesk Inventor* para determinar la resistencia a la fluencia del material. Adicionalmente para evitar el desgaste superficial y maximizar el filo de la cuchilla, se debe aumentar la dureza a 60 HRC. Para lograr este objetivo se llevó el material a una temperatura de temple de 850°C con un tiempo de mantenimiento de 15 minutos, y se realizó un enfriamiento en una solución de aceite.

2.5.2 Diseño del eje

Para el árbol de transmisión se utilizaron ejes de secciones cuadradas debido a que estos tipos de ejes reducen el esfuerzo cortante y tienen una mayor eficiencia en comparación a ejes circulares usando las chavetas. Los ejes rotarán en dirección contraria hacia el centro del sistema para agarrar la botella PET y proceder al triturado sin tener algún tipo de salpicadura del material.

Se procedió a hacer el diagrama de fuerza cortante y momento flector teniendo su diagrama de cuerpo libre ya planteado. Las cargas que actúan en el eje son la fuerza distribuida del peso del eje, las cargas puntuales del peso de la cuchilla y separadores, y las fuerzas de contacto que ejercen los engranes. A lo largo del eje también presenta un torque constante.

Para determinar el peso del eje se asumió que este tiene un diámetro de 1 pulgada. Se determina el volumen utilizando la ecuación (2.4) y se lo multiplica por la densidad del material AISI 4340.

$$V = \frac{\pi d^2}{4} \quad (2.4)$$

$$V_e = \frac{\pi(0.0254^2)}{4} (0.140) = 7.09 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$m_e = \rho_e V_e = (7850)(7.09 \times 10^{-5}) = 0.55 \text{ kg}$$

$$W = mg = (0.55)(9.80) = 5.46 \text{ N}$$

$$w = \frac{5.46}{0.14}$$

$$w = 38.98 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Asi mismo, se calculan los pesos de las cuchillas W_c y los separadores W_s .

$$V_c = \frac{\pi(0.1^2 - 0.0254^2)}{4} (0.01) = 7.34 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$W_c = \rho_c V_c g = (7700)(7.34 \times 10^{-5})(9.81)$$

$$W_c = 5.54 \text{ N}$$

A los separadores se les asignó un diámetro exterior de 40 mm.

$$V_s = \frac{\pi(0.040^2 - 0.0254^2)}{4} (0.01) = 2.39 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$W_s = \rho_s V_s g = (7850)(2.39 \times 10^{-6})(9.81)$$

$$W_s = 0.18 \text{ N}$$

Para determinar los diagramas de fuerza cortante y momento flector se utilizó el *software Autodesk Inventor 2018* en su versión estudiantil, como se muestra en las Figuras 2-4 y 2-5.

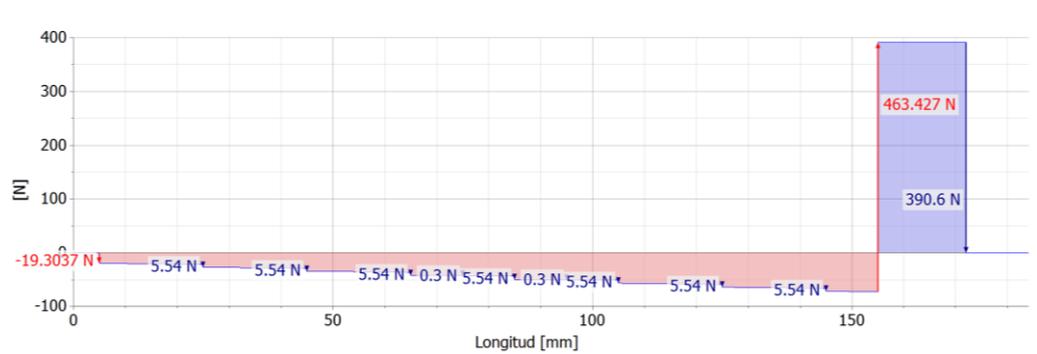


Figura 2-4 Diagrama de fuerza cortante del eje.

Fuente: Autores

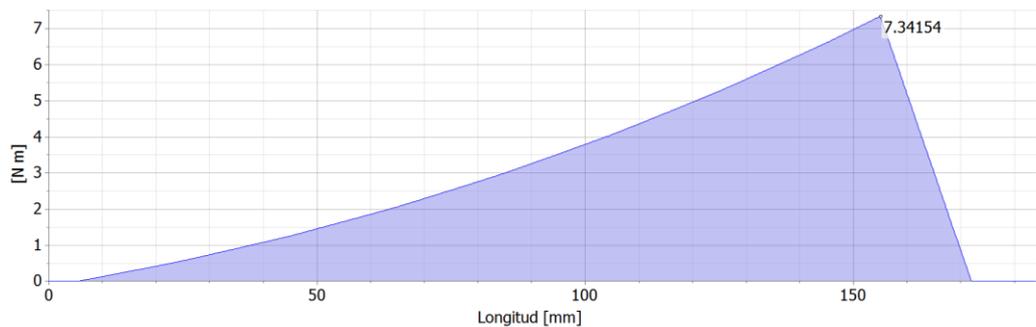


Figura 2-5 Diagrama de Momento flector del eje.

Fuente: Autores

Para el diseño del eje se utilizó la ecuación (2.5) de ASME para diseño de ejes de transmisión debido a que en el mecanismo se presentan ciclos de flexión invertida y un torque constante, del libro de Diseño de Máquinas de Robert L. Robert .

$$d = \left\{ \frac{32 N_f}{\pi} \left[\left(K_f \frac{M_a}{S_e} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{K_{fsm} T_m}{S_y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (2.5)$$

Donde:

N_f : Es el factor de seguridad.

K_f y K_{fsm} : Factores de concentración de esfuerzos de fatiga por flexión.

M_a : Momento flector alternante.

T_m : Momento torsor medio.

S_e : Límite de resistencia a la fatiga corregida.

S_y : Resistencia a la fluencia.

Con el diagrama de fuerza cortante y momento flector de la Figura 2-5, se obtuvo el momento máximo, es decir, el caso crítico a lo largo del eje. En el mecanismo se tiene un torque constante, el cual es la suma de los torques de cada cuchilla, ese torque neto es el momento torsor medio. Los demás valores de la ecuación (2.5) son datos de las propiedades mecánicas del material del eje y están en función del dimensionamiento del cambio de sección del eje.

El acero AISI 4340 tiene una resistencia última a la tensión es de 1078 MPa y una resistencia a la fluencia de 686 MPa. El límite de resistencia a la fatiga corregida se lo obtiene mediante la siguiente ecuación (2.6):

$$S_e = C_{carga} C_{tamaño} C_{sup} C_{temp} C_{confiabilidad} S_e'' \quad (2.6)$$

(Norton, 2011)

Debido a que el sistema presenta flexión y torsión, se tiene un factor de carga de:

$$C_{carga} = 1$$

El $C_{tamaño}$ está en función del diámetro asumido del eje, se lo determina mediante la ecuación (2.7):

$$C_{tamaño} = 1.189d^{-0.097} ; d = 25.40 \text{ mm} \quad (2.7)$$

(Norton, 2011)

$$C_{tamaño} = 0.87$$

Se utilizó la figura 2-6 para el cálculo del C_{sup} mediante la ecuación (2.8):

$$C_{sup} = A (S_{ut})^b = 57.7(1078)^{-0.718} = 0.38 \quad (2.8)$$

(Norton, 2011)

Acabado superficial	Para S_{ut} en MPa se usa		Para S_{ut} en kpsi (no psi) se usa	
	A	b	A	b
Esmerilado	1.58	-0.085	1.34	-0.085
Maquinado o rolado en frío	4.51	-0.265	2.7	-0.265
Rolado en caliente	57.7	-0.718	14.4	-0.718
Forjado	272	-0.995	39.9	-0.995

Figura 2-6 Coeficientes del factor de superficie.

Fuente: (Norton, 2011)

Debido a que la temperatura de trabajo es menor 450°C , el $C_{temp} = 1$. Así pues, se usará un factor de confiabilidad de 99% el cual corresponde un valor de $C_{confiabilidad} = 0.814$.

Factores de confiabilidad
para $S_d = 0.08 \mu$

% de confiabilidad	C_{conf}
50	1.000
90	0.897
95	0.868
99	0.814
99.9	0.753
99.99	0.702
99.999	0.659
99.9999	0.620

Figura 2-7. Factores de confiabilidad.

Fuente: Norton, 2011.

Para materiales que tengan $S_{ut} < 1400 \text{ MPa}$ el $S_e'' = 0.5S_{ut}$, por lo tanto, se obtiene una resistencia a la fatiga corregida S_e de 145 MPa. Los factores de concentrador de esfuerzos a la flexión y al cortante son iguales a la ecuaciones (2.9) y (2.10) respectivamente:

$$K_f = 1 + q(k_t - 1) \quad (2.9)$$

$$K_{fsm} = 1 + q(k_{ts} - 1) \quad (2.10)$$

(Norton, 2011)

Donde:

q : Sensibilidad de la muesca en los cambios de sección para los distintos casos.

k_t : Factor de concentración geométrico estático.

k_{ts} : Factor de concentración geométrico al cortante.

De la Figura 2-8 se estima un radio de muesca de 1 mm. Se obtiene que, para flexión, la sensibilidad de la muesca es de $q = 0.90$. Y, para torsión, la sensibilidad de la muesca es de $q = 0.92$.

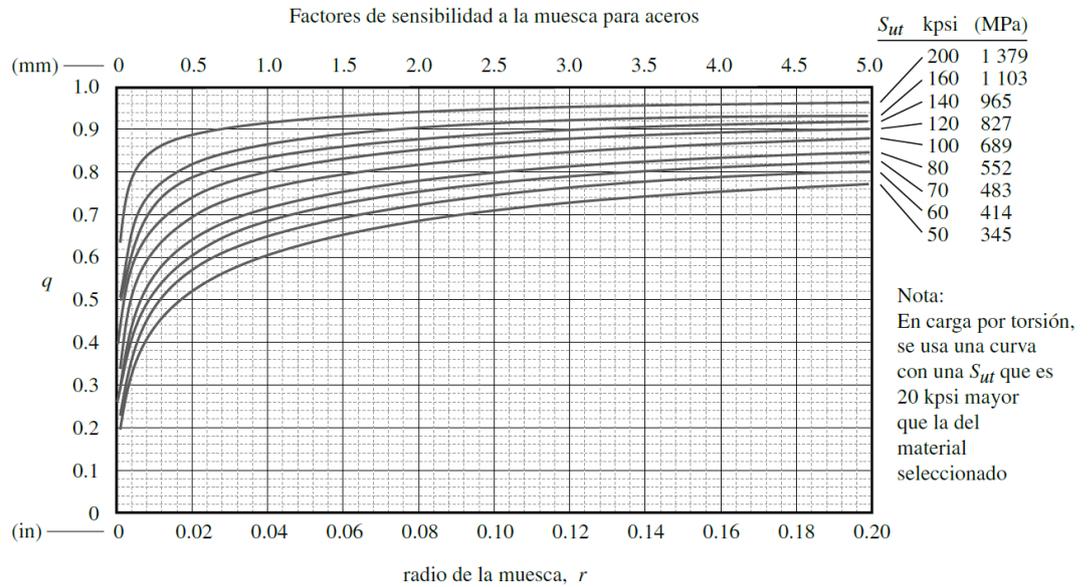


Figura 2-8 Factores de sensibilidad a la muesca para aceros.

Fuente: Norton, 2011

El factor de concentración de esfuerzos teórico k_t , se lo obtiene de la figura 2-9.

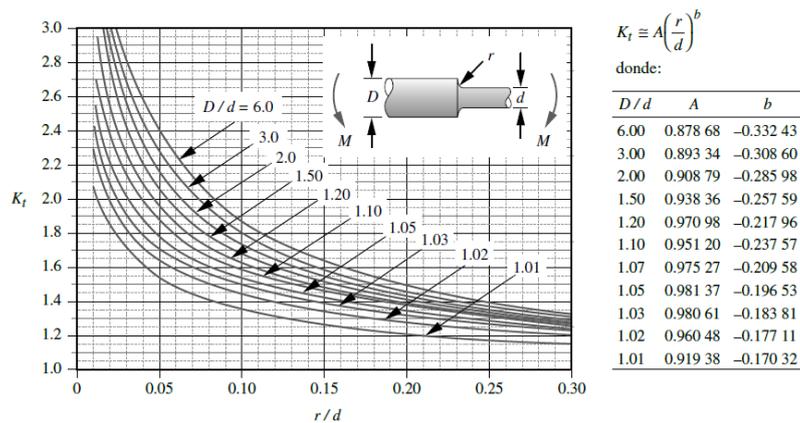


Figura 2-9 Factor geométrico de concentración de esfuerzos k_t para un eje con filete de hombro en flexión.

Fuente: Norton 2011.

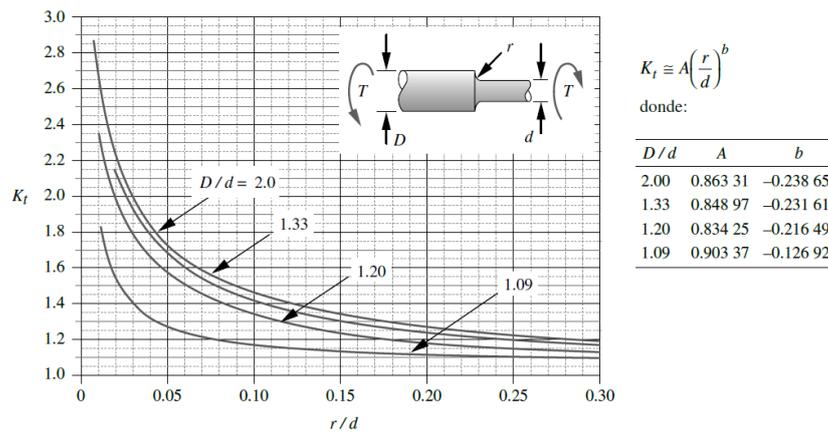


Figura 2-10 Factor geométrico de concentración de esfuerzos k_t para un eje con filete de hombro en torsión.

Fuente: Norton 2011.

Para flexión se tiene un $k_t = 2.11$ y para torsión un $k_t = 1.79$.

Por lo tanto, para flexión:

$$K_f = 1 + 0.90(2.11 - 1.00)$$

$$K_f = 2.00$$

Para torsión:

$$K_f = 1 + 0.92(1.79 - 1.00).$$

$$K_f = 1.73$$

La concentración de esfuerzos por torsión es menor para la misma geometría carga por flexión. Para estos casos y debido a que el esfuerzo cortante no es tan elevado en comparación a la resistencia a la fluencia del material:

$$K_{fsm} = K_f = 1.73$$

Para el torque medio se usó el peor de los casos el cual es el torque entregado por el reductor mas el torque generado por las cuchillas al triturar el plástico, teniendo un valor total de 185 Nm. Y para nuestro momento alternante se usó el valor máximo de la figura 2-5. Una vez obtenido todos los valores se procede a reemplazarlos en la ecuación (2.5) de ASME determinación del diámetro mínimo.

2.5.3 Potencia de trituradora

Para el cálculo de la potencia se usó la ecuación (2.11) de la potencia instantánea para cualquier sistema giratorio, el cual es el producto del torque por la velocidad angular.

$$P = T\omega \quad (2.11)$$

Anteriormente, se determinó un torque en una sola cuchilla, este valor se lo multiplica por 14 cuchillas, la velocidad de operación es de 60 RPM debido al reductor 30:1.

$$P = (66.40)\left(60 \frac{2\pi}{60}\right)$$

$$P = 0.42 \text{ kW}$$

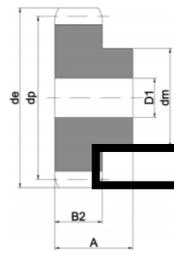
$$P = 0.55 \text{ HP}$$

2.5.4 Selección de engranes

La distancia mínima entre el centro de una cuchilla con el centro del eje paralelo a esa cuchilla (sin separador) es de 66.6 mm (considerando el eje cuadrado de 25 mm de lado y la cuchilla de 100 mm de diámetro). Se desea que la separación entre el extremo de una cuchilla con el extremo del separador del eje paralelo a donde está la cuchilla sea de 1 milímetro para que pueda cortar el pedazo de plástico en ese punto. Por cuestiones de diseño se realizó una separación de ejes de 72 mm entre centros con un separador de diámetro exterior de 40 mm. Basándose en la Figura 2.11, del catálogo de ROLLER CAUSER, para un diámetro de paso de 72 mm se obtuvieron los siguientes datos.

ENGRANAJES RECTOS
SPUR GEARS

PIÑONES Y RUEDAS (con cubo en un lado) ángulo de presión 20°
SPROCKETS AND WHEELS (with box in one side) pressure angle 20°
Material C43- UNI 7847



Ancho diente "B"	mm.	Ancho diente "A"	mm.
M 1	15mm	M 1	25mm
M 1,5	17mm	M 1,5	30mm
M 2	20mm	M 2	35mm
M 2,5	25mm	M 2,5	40mm
M 3	30mm	M 3	50mm
M 4	40mm	M 4	60mm
M 5	50mm	M 5	75mm
M 6	60mm	M 6	80mm

Z	Módulo "M3" Diametral pitch "M3"				Módulo "M4" Diametral pitch "M4"				Módulo "M5" Diametral pitch "M5"				Módulo "M6" Diametral pitch "M6"			
	d _e	d _p	d _m	D1	d _e	d _p	d _m	D1	d _e	d _p	d _m	D1	d _e	d _p	d _m	D1
12	42	36	27	12	56	48	35	14	70	60	45	20	84	72	54	20
13	45	39	30	12	60	52	40	14	75	65	50	20	90	78	60	20
14	48	42	33	12	64	56	45	14	80	70	55	20	-	-	-	-
15	51	45	35	12	68	60	45	14	85	75	60	20	102	90	70	20
16	54	48	38	14	72	64	50	16	90	80	65	20	108	96	75	20
17	57	51	42	14	76	68	50	16	95	85	70	20	-	-	-	-
18	60	54	45	14	80	72	50	16	100	90	70	20	120	108	80	20
19	63	57	45	14	84	76	60	16	105	95	70	20	-	-	-	-
20	66	60	45	14	88	80	60	16	110	100	80	20	132	120	90	20
21	69	63	45	16	92	84	70	16	115	105	80	20	-	-	-	-
22	72	66	50	16	96	88	70	16	120	110	80	25	-	-	-	-
23	75	69	50	16	100	92	75	20	125	115	90	25	-	-	-	-
24	78	72	50	16	104	96	75	20	130	120	90	25	156	144	110	25
25	81	75	50	16	108	100	75	20	135	125	90	25	162	150	110	25

Figura 2-11 Dimensiones para diferentes tipos de módulos de engranajes rectos.

Fuente: *Causser Product Cataloge* (2016)

El engrane recto posee las siguientes características:

$$Z = 24$$

$$d_e = 78 \text{ mm}$$

$$d_p = 72 \text{ mm}$$

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

Diametral pitch: M3

Donde

Z: Número de dientes.

d_e: Diámetro exterior.

d_p: Diámetro de paso (separación entre centros).

d_m: Diámetro de maza.

Se usó el catálogo de Martin, Figura 2-12, con las dimensiones y especificaciones del engrane, para determinar si este no falla a la potencia que ejerce el sistema. Para velocidades entre 50 a 100 RPM se obtuvo una capacidad de potencia máxima de 1.83 HP a 3.55 HP.



Capacidad de Potencia HP (Aprox.) de Engranajes Rectos

Ángulo de Presión 20°

Para
Servicio Clase I (Factor de Servicio = 1.0)

Paso Diametral 8

Ángulo de Presión 20°

Cara 1½"

Número de Dientes	25 RPM		50 RPM		100 RPM		200 RPM		300 RPM		500 RPM		600 RPM		900 RPM		1200 RPM		1800 RPM	
	S	CI	S	CI	S	CI	S	CI	S	CI	S	CI	S	CI	S	CI	S	CI	S	CI
11	0.28		0.56		1.09		2.06		2.94		4.45		5.10		6.76		8.07		10.00	
12•	0.34		0.66		1.29		2.44		3.48		5.26		6.03		7.99		9.54		11.83	
13	0.39		0.78		1.51		2.85		4.06		6.14		7.04		9.33		11.14		13.81	
14•	0.44		0.87		1.70		3.21		4.57		6.91		7.93		10.50		12.54		15.55	
15•	0.50		0.98		1.90		3.60		5.13		7.76		8.90		11.78		14.07		17.45	
16•	0.54		1.07		2.07		3.92		5.58		8.44		9.69		12.83		15.31		18.99	
17	0.59		1.16		2.25		4.26		6.07		9.18		10.53		13.95		16.66		20.66	
18•	0.64		1.25		2.43		4.61		6.56		9.92		11.38		15.07		17.99		22.31	
19•	0.68		1.35		2.62		4.96		7.06		10.67		12.24		16.22		19.36		24.01	
20•	0.73		1.45		2.81		5.32		7.57		11.45		13.13		17.40		20.77		25.76	
21	0.78		1.54		3.00		5.67		8.07		12.21		14.00		18.55		22.14			
22	0.83		1.63		3.18		6.03		8.59		12.99		14.90		19.73		23.56			
24•	0.93		1.83		3.55		6.72		9.56		14.47		16.60		21.98		26.24			
25	0.97		1.92		3.73		7.06		10.05		15.21		17.44		23.10		27.58			
26•	1.02		2.02		3.93		7.43		10.58		16.00		18.35		24.31		29.02			
27	1.08		2.12		4.12		7.80		11.11		16.81		19.28		25.54		30.49			
28•	1.13		2.23		4.33		8.19		11.66		17.63		20.22		26.79		31.98			
30•	1.23		2.43		4.71		8.92		12.70		19.21		22.04		29.19		34.85			
32•	1.33		2.63		5.11		9.68		13.77		20.84		23.90		31.66					
33	1.39		2.73		5.31		10.06		14.32		21.67		24.85		32.92					
35	1.50		2.96		5.74		10.87		15.48		23.42		26.86		35.58					
36•	1.56		3.06		5.96		11.27		16.05		24.28		27.85		36.89					

Figura 2-12 Capacidad de potencia para engranajes rectos.

Fuente: Martin (2007)

2.5.5 Cargas dinámicas en los rodamientos

Debido a que el sistema no presenta cargas axiales se escogió un rodamiento de bolas, se usó 4 rodamientos, dos por cada eje. Estos van ubicados en el apoyo A y apoyo B del eje. Teniendo el diagrama de cuerpo libre del sistema y su diagrama de fuerza cortante y momento flector de la Figura 2-5 se obtuvieron las cargas radiales. Se determinaron sus capacidades de cargas dinámicas C_{10} para cada uno de los rodamientos, mediante la ecuación (2.12).

$$C_{10} = F_D \left[\frac{L_D * n_D * 60}{10^6} \right]^{1/a} \quad (2.12)$$

Donde:

F_D : es la carga radial deseada.

L_D : es la vida deseada, en horas.

n_D : es la velocidad deseada, en revoluciones por minuto.

a : equivale a 3 para rodamientos de bolas.

C_{10} : Capacidad de la carga dinámica con una confiabilidad del 90%.

Para ejes de trituración se recomendó una vida deseada entra 4000 a 8000 horas. Teniendo una velocidad de operación de 60 RPM se determinó la carga dinámica mínima que tienen los 4 rodamientos.

2.5.6 Diseño de la cuña

Para el acople entre el eje y el engrane se utilizó una cuña paralela. Las dimensiones de esta cuña son tamaños estándar que están en función del diámetro del eje. Para el eje de la trituradora y el reductor, se seleccionó una cuña de 8x7 mm.

Tabla 6-2 Cuñas estándar y tamaños de tornillos prisioneros en medidas estadounidenses y métricas para ejes				
Diámetro del eje (in)	Ancho nominal de la cuña (in)	Diámetro del tornillo prisionero (in)	Diámetro del eje (mm)	Ancho x alto de la cuña (mm)
$0.312 < d \leq 0.437$	0.093	#10	$8 < d \leq 10$	3 x 3
$0.437 < d \leq 0.562$	0.125	#10	$10 < d \leq 12$	4 x 4
$0.562 < d \leq 0.875$	0.187	0.250	$12 < d \leq 17$	5 x 5
$0.875 < d \leq 1.250$	0.250	0.312	$17 < d \leq 22$	6 x 6
$1.250 < d \leq 1.375$	0.312	0.375	$22 < d \leq 30$	8 x 7
$1.375 < d \leq 1.750$	0.375	0.375	$30 < d \leq 38$	10 x 8
$1.750 < d \leq 2.250$	0.500	0.500	$38 < d \leq 44$	12 x 8
$2.250 < d \leq 2.750$	0.625	0.500	$44 < d \leq 50$	14 x 9
$2.750 < d \leq 3.250$	0.750	0.625	$50 < d \leq 58$	16 x 10
$3.250 < d \leq 3.750$	0.875	0.750	$58 < d \leq 65$	18 x 11
$3.750 < d \leq 4.500$	1.000	0.750	$65 < d \leq 75$	20 x 12
$4.500 < d \leq 5.500$	1.250	0.875	$75 < d \leq 85$	22 x 14
$5.500 < d \leq 6.500$	1.500	1.000	$85 < d \leq 95$	25 x 14

Figura 2-13 Cuñas estándar para ejes.

2.6 Automatización del sistema de trituración

El funcionamiento del prototipo inicia con la detección de las botellas de plástico PET en la entrada de alimentación de la trituradora. Luego de detectar la botella, se ejecuta la orden de mantener encendido el motor por un intervalo de tiempo (obtenido de forma experimental) hasta que el sistema de trituración haya cortado totalmente la botella PET. En la Figura 2-4 se presenta el diagrama de flujo de las operaciones que deben cumplir el prototipo de máquina trituradora de botellas PET.

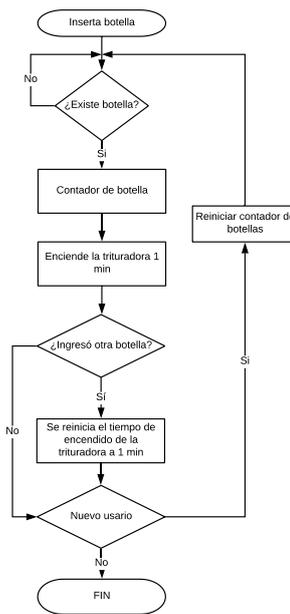


Figura 2-14 Diagrama de flujo de las operaciones del prototipo.

Fuente: Autores

2.6.1 Sistema de control y potencia

Para el sistema de control de la máquina trituradora se programó un microprocesador Arduino con el objetivo de controlar un sensor ultrasonido (HC-SR04) y un módulo de relé de 10A-125VAC, en la Figura 2-15 (A) se observa el diagrama esquemático de las conexiones. Por medio del sensor ultrasonido se detectó el ingreso de botellas PET en la entrada de alimentación del sistema de trituración, luego de detectar la botella, se envía la orden de encender el módulo de relé, el cual energiza la bobina del contactor permitiendo el encendido y apagado del motor eléctrico.

Finalmente, para mantener informado al usuario del número de botellas que ingresa al prototipo, se programó una interfaz gráfica de usuario (GUI, por sus siglas en ingles) en el lenguaje de *Python* (Python Software Foundation, 1990) con la librería *Tkinter* y se ejecutó en un procesador con *display* incluido. La comunicación entre procesador y microcontrolador se realizó mediante el puerto serial.

Para el sistema de protección se empleó un *breaker* y un relé de sobrecarga. El primer elemento protege al sistema de las posibles variaciones de intensidad de la red eléctrica y de cortos circuitos, con el segundo elemento se protege el motor en caso de atascamiento del sistema de trituración. Las conexiones se presentan en la Figura 2-15 (B) que consta del diagrama esquemático de potencia para un arranque directo del motor monofásico, al ser el voltaje de alimentación 110 [V] solo la fase se conectó al sistema de potencia y control.

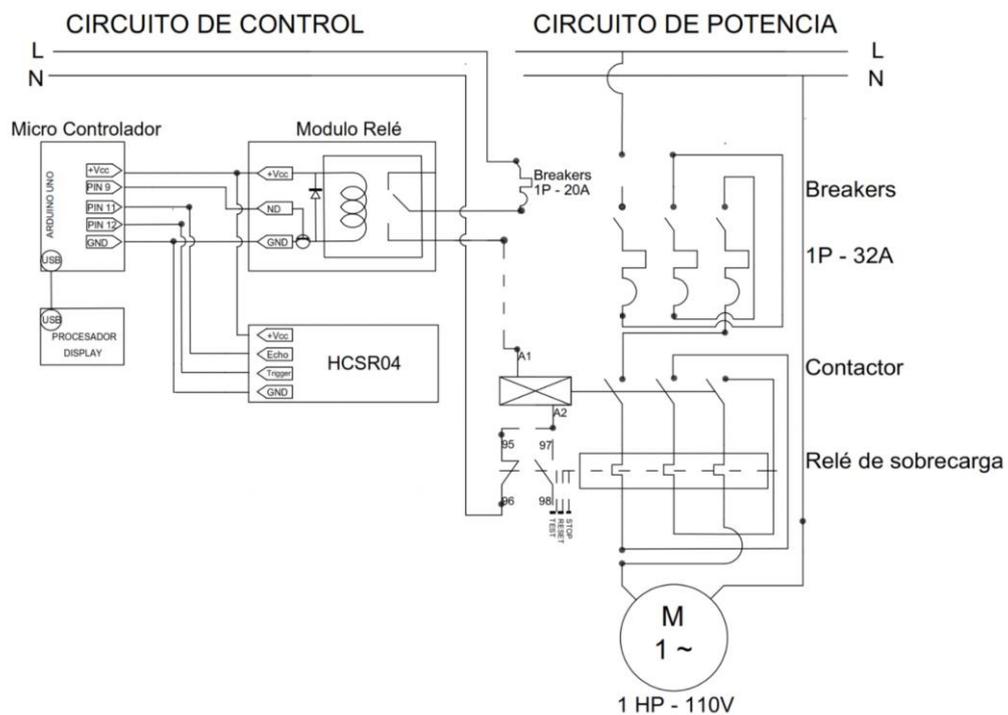


Figura 2-15 Diagrama esquemático del circuito de control (A) y circuito de potencia (B)

Fuente: Autores

2.6.2 Selección de elementos del sistema potencia

Para dimensionar el conductor, disyuntor, contactor y relé de sobrecarga que intervienen en el sistema, se empleó la sección 430 del Capítulo 4 del Código Eléctrico Nacional (NEC, por sus siglas en ingles), el cual es denominado “Motores, Circuitos de Motores y Controladores”. En la tabla 2-7 se relaciona la corriente nominal (corriente en plena carga) con

respecto a la potencia del motor y el voltaje de alimentación, para el caso de un motor de 1 Hp y voltaje de 115 V se obtuvo una corriente nominal de 16 [A]. Sin embargo, de acuerdo con la sección 430.21 del NEC, para motores de servicio continuo se aplica un factor de corrección de 1.25% y un factor de potencia de 0.9 a la corriente nominal del motor (ver Ecuación (2.13)).

$$I_{NFC} = \frac{I_N}{FP} * FC_S = \frac{16.00}{0.90} * 1.25 = 22.22 \text{ [A]} \quad (2.13)$$

Donde:

I_{NFCm} = Corriente nominal con factor de corrección del motor.

I_N = Corriente nominal.

FP = Factor de potencia.

FC_S = Factor de corrección.

Tabla 2-7 Corrientes en plena carga en amperios para motores monofásicos de corrientes alterna

Autor: NEC

Caballos de fuerza	115 voltios	200 voltios	208 voltios	230 voltios
1/6	4.4	2.5	2.4	2.2
1/4	5.8	3.3	3.2	2.9
1/3	7.2	4.1	4	3.6
1/2	9.8	5.6	5.4	4.9
3/4	13.8	7.9	7.6	6.9
1	16	9.2	8.8	8
1½	20	11.5	11	10
2	24	13.8	13.2	12
3	34	19.6	18.7	17
5	56	32.2	30.8	28
7½	80	46	44	40
10	100	57.5	55	50

2.6.2.1 Selección de conductores.

Para dimensionar el calibre AWG del conductor se empleó la sección 310.15 del Capítulo 3 del Código Eléctrico Nacional. Por medio de la tabla 2.8, se relacionó la temperatura nominal del conductor y la corriente permisible, adicionalmente en la tabla 2-9 se muestra el factor de

corrección por temperatura, el cual se aplica a la corriente permisible del conductor (ver Ecuación (2.14)). Para concluir en una correcta selección, se debe corroborar que la corriente permisible del conductor con factor de corrección debe ser mayor al I_{NFCm} del motor.

$$I_{NFCc} = I_{NC} * FC \quad (2.14)$$

Donde:

I_{NFCc} = Corriente nominal con factor de corrección del conductor.

I_{NC} = Corriente nominal del conductor.

FC_t = Factor de corrección por temperatura.

Tabla 2-8 Ampacidades permisibles en conductores aislado para tensiones nominales de 0-2000 voltios y a 60° C a 90° C.

Autor: NEC

Calibre AWG o kcmil	Temperatura nominal del conductor [Véase la Tabla 310.13(A)]						Calibre AWG o kcmil
	60° C (140° F)	75° C (167° F)	90° C (194° F)	60° C (140° F)	75° C (167° F)	90° C (194° F)	
	TIPOS TW, UF	TIPOS RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE, ZW	TIPOS TBS, SA, SIS, FEP, FEPB, MI, RHH, RHW- 2, THHN, THWN-2, USE- 2, THHW, THW-2, THWN- 2, USE-2, XHHW, XHHW- 2, ZW-2	TIPOS TW, UF	TIPOS RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE, ZW	TIPOS TBS, SA, SIS, FEP, FEPB, MI, RHH, RHW-2, THHN, THWN-2, USE-2, THHW, THW-2, THWN-2, USE-2, XHHW, XHHW-2, ZW-2	
COBRE			ALUMINIO o ALUMINIO RECUBIERTO DE COBRE				
18	--	--	14	--	--	--	--
16	--	--	18	--	--	--	--
14*	20	20	25	--	--	--	--
12*	25	25	30	20	20	25	12*
10*	30	35	40	25	30	35	10*
8	40	50	55	30	40	45	8
6	55	65	75	40	50	60	6
4	70	85	95	55	65	75	4
3	85	100	110	65	75	85	3

Tabla 2-9 Factor de corrección por factores de temperatura de acuerdo a temperatura ambiente.

Autor: NEC

FACTORES DE CORRECCIÓN							
Temp. ambiente (° C)	Para temperaturas ambiente distintas de 30° C (86° F), multiplique las anteriores ampacidades permisibles por el factor correspondiente de los que se indican a continuación:						Temp. Ambiente (° F)
21-25	1.08	1.05	1.04	1.08	1.05	1.04	70-77
26-30	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	78-86
31-35	0.91	0.94	0.96	0.91	0.94	0.96	87-95
36-40	0.82	0.88	0.91	0.82	0.88	0.91	96-104
41-45	0.71	0.82	0.87	0.71	0.82	0.87	105-113
46-50	0.58	0.75	0.82	0.58	0.75	0.82	114-122
51-55	0.41	0.67	0.76	0.41	0.67	0.76	123-131
56-60	--	0.58	0.71	--	0.58	0.71	132-140
61-70	--	0.33	0.58	--	0.33	0.58	141-158
71-80	--	--	0.41	--	--	0.41	159-176

2.6.3 Selección de Disyuntor, Relé de sobrecarga y contactor.

De acuerdo a la corriente nominal del motor (I_{NFCm}) que proporciona la NEC, se tiene un valor de 22 A. Con esta corriente se procedió a seleccionar por medio del catálogo de la marca EBCHQ el contactor térmico y en disyuntor del catálogo de la Marca LG, el relé de sobrecarga se lo seleccionó entre un rango de 16 – 22 A del catálogo de la marca EBCHQ.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En esta sección se describe el dimensionamiento de la trituradora ensamblada junto con cada uno de sus componentes o elementos diseñados. Además, se detallan los costos de las partes de la trituradora.

3.1 Resultados de diseño

3.1.1 Resultado de cálculo del eje

El diámetro mínimo de los ejes por ecuación 2.5 es de aproximadamente 23 mm. Sumándole el uso del chavetero de los engranes queda al borde de 25 mm, con un factor de seguridad de 3. En el mercado local, el diámetro mínimo que hay es de 20 mm para eje de transmisión 705.

Se seleccionó un eje de transmisión AISI 4340, mejor conocido como acero 705 en el mercado ecuatoriano, con una sección cuadrada y circular. Las cuchillas con sus separadores ocuparon la sección cuadrada, mientras que en la sección circular se colocaron los rodamientos y engranes.

Por lo tanto, se diseñó un eje de 25 mm de diámetro con sección cuadrada de 25 mm de lado y 300 mm de longitud total. Para el otro eje que rotará por medio de los engranajes, se tuvo las mismas dimensiones, pero con 240 mm de longitud total ya que este no va conectado al reductor se lo hizo más corto.

3.1.2 Resultado de cálculo de cuchillas

Se usaron cuchillas de material AISI DF2 del catálogo Ivan Bohman, este acero es usado para cortar plásticos. Las cuchillas tienen un diámetro exterior de 100 mm con su respectivo agujero cuadrado en el centro. Se utilizó el programa

ANSYS versión estudiantil para determinar su fallo a las fuerzas ejercidas por el corte del plástico a ser triturado.

3.1.3 Resultado de cálculo de engranes

Los engranes se los mecanizó de material AISI 5115 ya que es un acero aleado para cementación, resistente al desgaste superficial y utilizado en la realización de piñones. Los engranes tienen un diámetro de paso de 72 mm (separación de los dos ejes), su módulo es de M3 y posee 24 dientes. Su capacidad de potencia está por encima de los 1 HP.

3.1.4 Selección de motor

La potencia de trituración fue de 0.55 HP considerando un factor de seguridad de 7. Se seleccionó un motor monofásico de 1 HP de 1750 RPM de armazón abierto con amperaje en plena carga de 13 A y una temperatura de operación 13 °C (Clase B).

3.1.5 Selección de rodamientos

Se seleccionaron rodamientos de bolas debido a que el sistema presenta cargas axiales insignificantes en comparación a las cargas radiales. Para los 4 rodamientos se tuvieron una carga dinámica menores a 2 kN, por lo tanto, para los 4 apoyos donde se colocan los rodamientos se seleccionaron los SKF 60052RSC3, de diámetro interior y exterior de 25 mm y 47 mm respectivamente, con un espesor de 12 mm.

3.2 Resultados de la simulación en programa de elementos finitos.

3.2.1 Simulación de la cuchilla

En la figura 3-1 se aprecia la cuchilla de la trituradora simulada en ANSYS versión estudiantil. El análisis de elementos finitos indica la tensión y deformación máxima que tiene la cuchilla en base a la fuerza del plástico a ser triturado.

Existen concentradores de esfuerzos en las esquinas del cuadrado interior y al comienzo de las cuchillas; sin embargo, para estas secciones se presentó una tensión máxima de 51 MPa, valores pequeños en comparación a la resistencia a la fluencia del material, de 1385 MPa. Por lo que, es seguro realizar la trituración con dicho material (AISI DF2) y su geometría se deformará en la parte elástica del material.

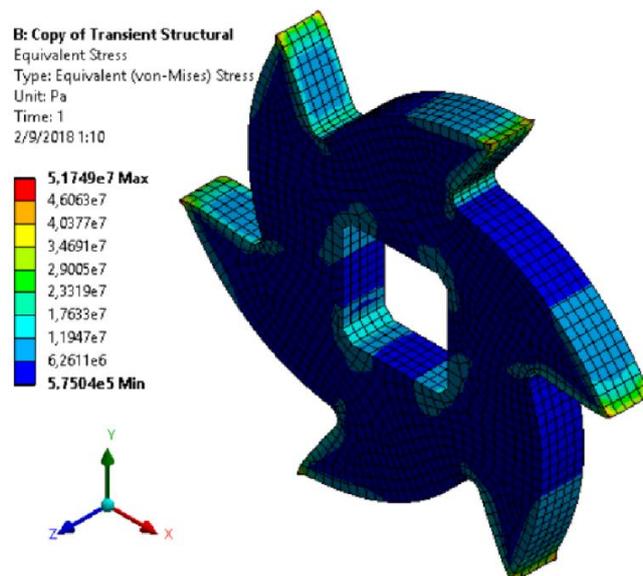


Figura 3-1 Simulación de la cuchilla de trituradora. Tensión de Von Mises.

Fuente: Autores

La simulación permite tener conocimiento, a priori, de las condiciones a las cuales las cuchillas van a estar expuestas al momento de ejercer la trituración de la botella de plástico, obteniendo valores máximos de deformación y puntos críticos. La simulación de la Figura 3-2 nos mostró valores de deformación. La deformación máxima se presentó a los extremos de cada punta de la cuchilla teniendo un valor máximo de menos de una centésima de milímetro.

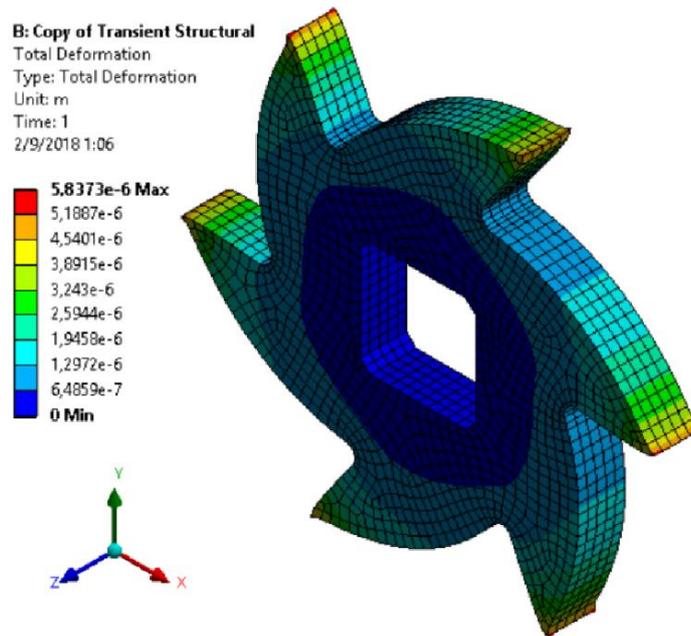


Figura 3-2 Simulación de la cuchilla de trituradora. Deformaciones máximas.

Fuente: Autores

Para realizar las simulaciones se colocó la fuerza distribuida en forma lineal en los en los bordes de las cuchillas (ver figura 3-3), debido que el corte es por cizalla.

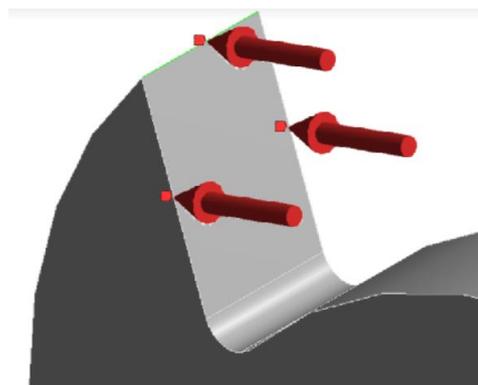


Figura 3-3 Fuerza en la cuchilla

Fuente: Autores

3.2.2 Simulación de la mesa de trabajo

La suma de los pesos del motor con su reductor más la máquina trituradora tiene un total de un peso considerable de 500 N el cual es necesario realizar

una simulación de la mesa de trabajo para determinar si su deflexión no generaría problemas al momento de ensamblar. El programa permite insertar una fuerza la cual está distribuida sobre toda la superficie. En la Figura 3-4 se determinó el esfuerzo de tensión de Von Mises para verificar que la carga sobre la estructura no exceder el esfuerzo de fluencia del material, acero estructural A-36. Y en la Figura 3-5 se determinó el factor de seguridad de la estructura, el cual dio un máximo de 15.

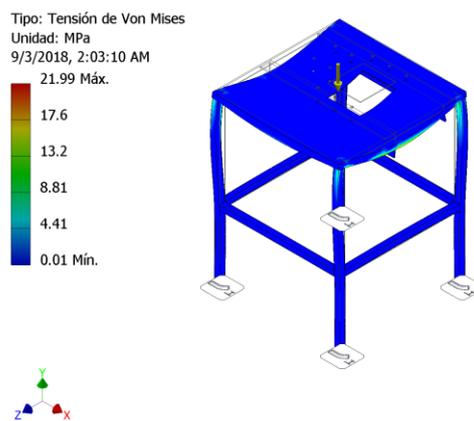


Figura 3-4 Simulación de la mesa de trituradora. Tensión de Von Misses.

Fuente: Autores

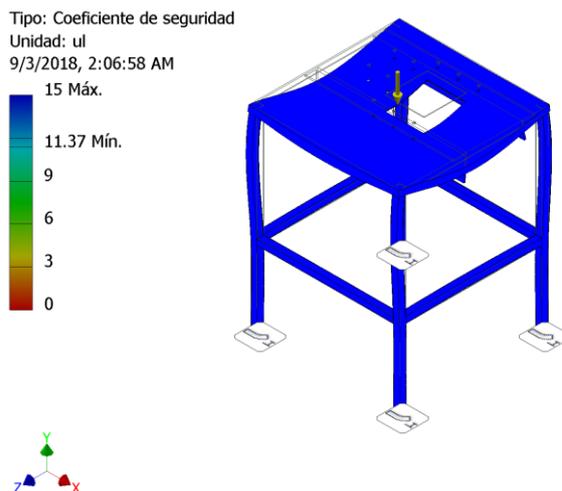


Figura 3-5 Simulación de la mesa trituradora. Coeficiente de seguridad

Fuente: Autores

La Figura 3-6 indica que la mesa tuvo una deformación máxima de 0.15 mm, este factor es necesario para que al momento de acoplar el eje de la trituradora con el reductor se mantengan paralelos y concéntricos. Si existen grandes deflexiones en la superficie de trabajo, no se puede realizar el acople. Un área de trabajo no nivelada puede ocasionar niveles altos de vibraciones las cuales no son deseadas, además, se puede producir desgaste en la zona de contacto entre trituradora y reductor. Para obtener un mínimo de deformación, una décima de milímetro, se colocó por debajo de mesa dos ángulos de $\frac{1}{4}$ de pulgada de espesor unidos a los laterales de la trituradora.

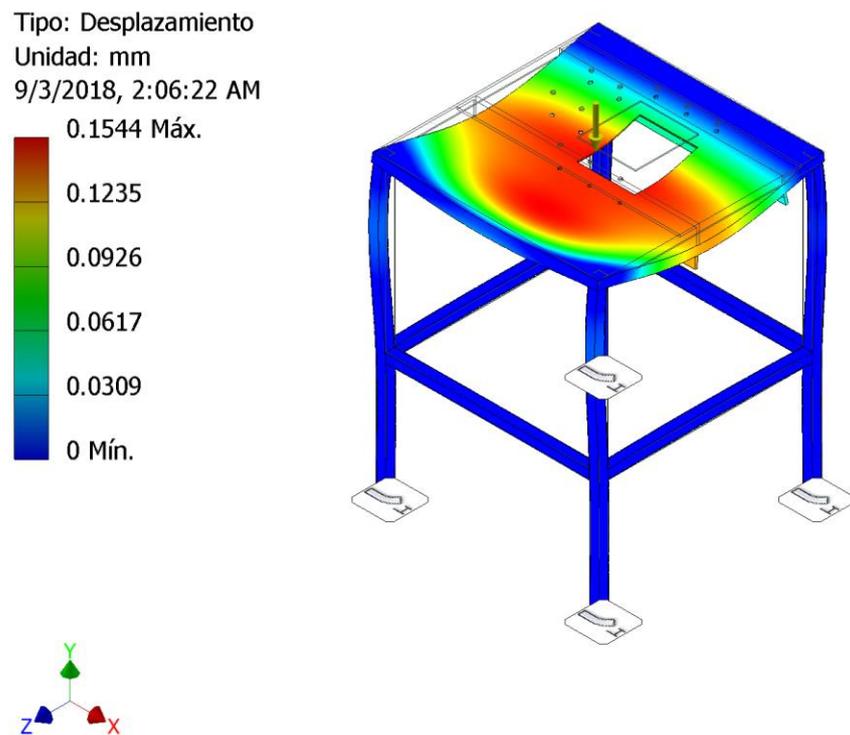


Figura 3-6 Simulación de la mesa de trituradora. Deformaciones.

Fuente: Autores

3.3 Resultados del ensamblaje de la máquina trituradora

Una vez armada la mesa se procedió a ensamblar los componentes de la máquina trituradora. Se empernó el motor con su respectivo reductor en la mesa con 4 pernos de $\frac{1}{4}$ de pulgada en cada componente y alineados en su

eje. Una vez mecanizado los agujeros de 33 y 47 mm de diámetro en las placas de 15 mm de espesor, se les colocó dos rodamientos por placa, ver figura 3-7. Las otras placas de las mismas dimensiones, pero de 3 mm de espesor, sirven para que el rodamiento quede fijo entre las 2 placas.



Figura 3-7 Rodamientos y la placa de 15 mm de la caja de trituración.

Fuente: Autores

Luego, se colocaron los ejes en los rodamientos, con sus respectivas cuchillas y separadores en orden, desfasados de tal forma que se formó una “V” entre las 14 cuchillas, ver Figura 3-8. Los separadores que van apegados a la pared de la caja de trituración, es decir, al extremo de la parte cuadrada del eje, se los imprimió en 3D debido a su complejidad de mecanizado (diámetro interior cuadrado, diámetro exterior circular). No hubo inconvenientes en colocar un separador de plástico debido a que las cargas axiales del proceso de trituración fueron insignificantes.



Figura 3-8 Orden de cuchillas en el eje de la trituradora.

Fuente: Autores

Una vez ensamblada la caja trituradora, se colocaron los engranes en los extremos de los dos ejes con sus respectivas chaveteras y prisioneros, ver figura 3-9. Se introdujo la caja trituradora hacia el reductor, fijando la parte en donde quedaría en la mesa, se los empernó con ángulos con pernos de $\frac{1}{4}$ de pulgada para evitar que la trituradora se tuerza y se mantenga fija. Por último, se obtuvo el ensamble mecánico de la máquina.



Figura 3-9 Engranés de la caja trituradora y ángulos en la caja de trituración.

Fuente: Autores

La parte mecánica de la máquina trituradora cuenta con 3 componentes principales: El motor, el reductor y la caja de trituración. En la caja de trituración se hizo un agujero cuadrado en la mesa para que los *scraps*, es decir, el plástico triturado se libere fácilmente por gravedad y se depositen en el contenedor en donde van las botellas PET trituradas. En la Figura 3-10 se observa la máquina lista para empezar su proceso de trituración, conectándola a una fase de 110 V.



Figura 3-10 Ensamble de la parte mecánica de la máquina trituradora.

Fuente: Autores

3.4 Resultado del sistema de control y potencia.

3.4.1 Conexiones del sistema de control y potencia.

Para la selección del sistema de potencia se empleó los dispositivos que forman parte de un control de motor por arranque directo, los cuales son *breaker*, contactor, relé de sobrecarga y conductores. Se inició con el dimensionamiento del conductor de tipo THHW, debido que es el más común en el medio local. Para la carga del motor establecida por la NEC, se prosiguió a comprar un conductor AWG calibre 12 que soporta hasta 27.3 A con temperatura ambiente de hasta 40 °C. Como el disyuntor sirve para proteger al cableado, se selección uno de capacidad de hasta 32 A.

Para el contactor se seleccionó uno de capacidad de 25 A, debido que el contactor se enciende y apaga constantemente se recomienda sobredimensionarlo. Finalmente, por valores de placa del motor se seleccionó un relé térmico de entre 12 – 18 A. Las conexiones del sistema se las realizó de acuerdo con la figura 2-5 (B), en el cual se demuestra un diagrama esquemático de las conexiones y se obtuvo un resultado como se presenta en la Figura 3-11. De igual manera para el sistema de control, en la sección 2.6.1 se describen los elementos que intervienen en el circuito y en la Figura 2-5 (A) se presentó el diagrama esquemático de conexiones y se logró un resultado tal y como se muestra en la Figura 3-12.



Figura 3-11 Elementos del circuito de potencia conectados.

Fuente: Autores

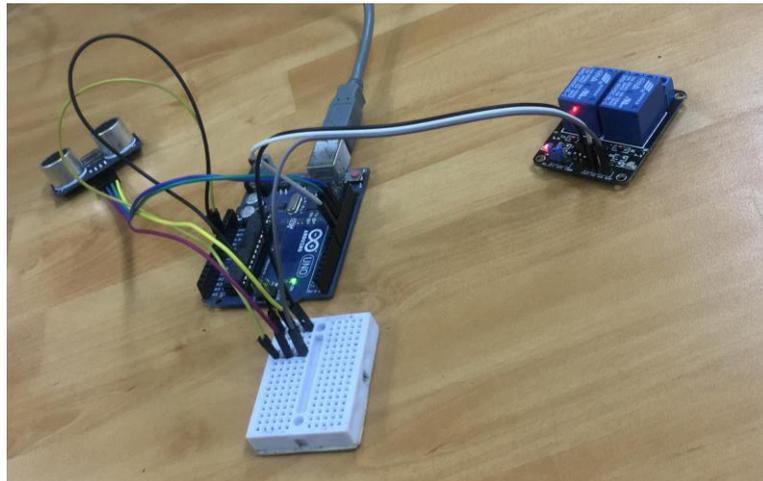


Figura 3-12 Elementos del circuito de control conectados.

Fuente: Autores

3.4.1 Programación de microcontrolador e interfaz gráfica de usuario.

La programación del microcontrolador se la realizó mediante la IDE de Arduino y en el Anexo A se muestra el resultado del código terminado. Para la programación de la GUI se empleó Python y la librería Tkinter, el resultado que se obtuvo se muestra en la Figura 3-13. La interfaz gráfica consta de una ventana en la cual se incluyó la función de contar el ingreso de botellas, además se agregó un botón denominado “NUEVO USUARIO” para encerrar el contador y en el Anexo B se describió el código a mayor detalle.



Figura 3-13 GUI en Python con librería tkinter.

Fuente: Autores

3.5 Resultado de la máquina trituradora

En la figura 3-14 se observa la máquina trituradora ensamblada en su totalidad teniendo una altura de 1,40 m por 60 cm de ancho y profundidad. La puerta se la hizo tamizado para que se pueda apreciar el mecanismo de trituración sin poder tocarla, siendo segura para el usuario, evitando algún tipo de accidente. La máquina presentó un peso neto de 100 lb.



Figura 3-14 Máquina trituradora.

Fuente: Autores

3.6 Análisis de costos

Los costos que intervinieron en la fabricación del prototipo de la recuperadora de botellas PET con sistema de trituración fueron de \$1449.60. En la Tabla 3-1 se describe los costos de los elementos mecánicos y materiales que se emplearon en la construcción, dando un valor total de \$549.60 (precio incluye IVA). En la tabla 3-2 se describe los costos del mecanizado de las piezas del proyecto, los talleres artesanales no gravan IVA, por lo tanto, el precio total de mecanizado fue de \$700. A estos rubros, se agregó un costo indirecto para los imprevistos durante la construcción por un valor fijado en \$200.

Tabla 3-1 Costos de elementos

Fuente: Aceros Bohler, Ivan Bohman, Campos, Casa del Rulimán (Proveedores).

Componente	Descripción	Cantidad	Precio unitario (\$)	Valor final (\$)
AISI 01	110x110x10 mm ³	14	11.50	160.00
AISI 4340	∅ = 35 mm y L = 1000 mm.	1	42.35	42.35
AISI 5115	∅ = 80 mm y L = 60 mm.	2	7.50	15.00
ASTM A-36	∅ _{in} = 30 mm ∅ _{ext} = 42 mm L = 200	1	13.00	13.00
ASTM A-36	∅ _{in} = 20 mm ∅ _{ext} = 30 mm L = 100	1	7.00	7.00
ASTM A-36	200x150x15 mm ³	2	5.00	10.00
ASTM A-36	200x150x3 mm ³	2	2.00	4.00
ASTM A-36	640x640x3 mm ³	1	17.00	17.00
Tubo cuadrado ASTM A-36	25.4x6000x3 mm ³	1	6.00	6.00
Angulo ASTM A-36	25.4x3x40 mm ³	2	1.00	2.00
Motor Magnetek M Century Electric	1hp 230-115 V	1	100.00	100.00
Reductor Bonfiglioli	30:1	1	50.00	50.00
Rodamiento SKF	60052RSC3	4	1.83	7.00
ASTM-A36	1220x1240x0.7 mm ³	1	17.00	17.00
Cable recubierto AWG 12 de 3 hilos	0.7 m	1	2.50	7.50
Pintura	Verde Martillado 1L	1	5.75	5.75
Contactador	C1-D25 7.5 HP	1	17.00	17.00
Relé térmico	R2-D13 12-18 A	1	13.00	13.00
Breaker	LG 3X32 BR-3X32LG	1	11.00	11.00
Cable flexible AWG 12	5 m	1	7.00	7.00
Perno, tuerca y arandela	M8	36	4.00	12.00

Codo plástico de 45 grados	4 pulgadas	1	6.00	6.00
Tubo PVC	4 pulgadas	1	3.00	3.00
Arduino Uno		1	17.00	17.00
Sensor ultrasonido		1	5.00	5.00
Modulo Relé		1	5.00	5.00
TOTAL				549.60

Tabla 3-2 Costos de la mano de obra.

Fuente: Taller Anchundia, Taller Campos, Taller CENMEIND.

Descripción	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Valor final (\$)
Mecanizado por electroerosión de cuchillas	14	25.00	350.00
Cilindrado de eje cuadrado: Distancia entre caras, cuadrado y chavetero	2	30.00	60.00
Cilindrado del cuerpo para piñón: diámetro exterior, diámetro interior y chavetero	2	20.00	40.00
Tallado de dientes de piñón: 24 dientes	48	2.00	96.00
Tratamiento térmico de cementación a engrane de AISI 5115	10	2.00	20.00
Mecanizado de placa 15 mm espesor (contorno cuadrado), perforaciones para acople de ejes y pasar machuelo	20	2.00	40.00
Mecanizado de placa 3 mm espesor (contorno cuadrado), perforaciones para acople de ejes y pasar machuelo	10	2.00	20.00
Doblez de las esquinas de placa de 640x640x3 mm	4	0.75	3.00
Unión de juntas por soldadura para construcción de mesa de soporte	1	20.00	20.00
Elaboración de cobertor superior del prototipo y pintada	1	50.00	50.00
TOTAL			700.00

CAPÍTULO 4

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Por medio de este proyecto se da la apertura para ejecutar un plan piloto en la Escuela Superior Politécnica del Litoral, para la recolección de las botellas plásticas que ingresan mensualmente en el campus. Se prevé analizar el nivel de aceptación y el comportamiento de los usuarios, además se espera igualar la eficiencia de recolección (aprox. 90%) que tienen las máquinas recuperadoras ubicada en países europeos. Este concepto es relativamente nuevo en América y los países como México, Colombia y Argentina han apostado por este método de recolección. Durante la elaboración de este proyecto en Ecuador se abrió una empresa de reciclaje que emplean máquinas recuperadoras de botellas con sistema de trituración, sin embargo aún, es una empresa joven como para emitir alguna conclusión.

Para el diseño de la máquina se consideraron aspectos como el tamaño del material a triturar y la forma de ingreso de la botella, siendo este, una por una, con lo cual se determinó las dimensiones de la cámara de trituración, separación de ejes y número de cuchillas. El elemento crítico de proyecto son las cuchillas y para dimensionar la altura del diente se la relacionó con la altura de la garganta de las botellas plásticas, con esto se aseguró que la eficiencia del agarre de las cuchillas a las botellas sea el máximo. El prototipo tiene como ventaja ser ensamblado y desmontado fácilmente y se necesita únicamente una llave Allen, un par de llaves de tuerca, destornilladores y un martillo. Esta ventaja reduce el costo de mantenimiento, debido que no se requiere un personal especializado.

En la etapa actual de desarrollo del proyecto, se aconseja no insertar botellas superiores a la capacidad de 1 L (dimensiones aproximadas de $\phi = 80 \text{ mm}$ y $L = 200 \text{ mm}$) y en intervalos de ingreso cada 15 s por botella. Estas restricciones se deben a que el plástico se acumula alrededor los ejes y genera que se atasquen. Por tal motivo, se había diseñado y cotizado el precio de manufactura de un nuevo juego de cuchillas fijas (ver Anexo C) las cuales, estarían ubicadas en las paredes internas de la cámara de trituración y ocupando los espacios vacíos entre las

cuchillas móviles. Sin embargo, el alto costo de fabricación de las 14 cuchillas (aprox. \$440.00) impidieron su implementación.

4.1 Conclusiones

- Se diseñó y construyó un prototipo de máquina trituradora de botellas PET que funciona para triturar botellas de plásticos PET de hasta 1 litro. Se obtuvo un tiempo de trituración de aproximadamente 15 segundos para botellas de 1/2 litro y 45 segundos para botella de 1 litro. Este tiempo inicia desde que la botella es colocada en la entrada de alimentación, luego pasa por las cuchillas para ser cortada por cizalla y posteriormente se obtienen hojuelas de PET de diámetro nominal de 1 pulgada.
- Se empleó un programa de análisis de elementos finitos para comprobar que las cuchillas resistan las cargas que se producen durante el proceso de trituración y además se determinó la deformación que se genera. Los esfuerzos que se determinó indican que la cuchilla opera en su zona elástica. Por medio de cálculos analíticos se diseñó los elementos como ejes, engranes y chavetas.
- Se programó un sistema de control en plataformas *open source* tales como Arduino y *Python*. En Arduino se empleó un sensor ultrasonido para detectar el ingreso de botella en la entrada de alimentación de la trituradora y la librería *TimeLib* para agregar un cronómetro en la programación. Se obtuvo un sistema que mantiene encendido el motor de la trituradora por un intervalo de 1 minuto y cada vez que detecta una nueva botella se vuelve a reiniciar este contador. En *Python* se creó una interfaz gráfica por medio de la librería *Tkinter* en la cual se escribieron códigos de comunicación entre el procesador (computadora) y el microcontrolador (Arduino). Finalmente, el sistema de potencia está compuesto por un breaker, contactor y relé de sobrecarga, los cuales nos brindan recursos para salvaguardar el equipo y controlar la corriente que circula por el motor.

- El peso neto del prototipo es aproximadamente 100 lb, por lo tanto, puede ser trasladado por dos hombres elevándolo a una altura no superior a las de sus codos, con esto se cumple el requerimiento de portabilidad y la norma ISO 11228 sobre el Manejo Manual de Cargas que nos indica que un mayor de edad puede manipular cargas de hasta 22 kg.

4.2 Recomendaciones

- De llegar a existir atascamiento en la trituradora, por no cumplir los parámetros indicados al inicio del Capítulo 4, se recomienda retirar los pernos que sujetan la caja de trituración con la estructura de soporte (mesa) y desacoplar la unión entre la trituradora y el reductor. Una vez retirada la caja trituradora, con la ayuda de una llave de tubo anclada a cualquier extremo de los ejes de la trituradora, se debe rotar los ejes en sentido contrario al nominal. Este proceso se debe realizar hasta eliminar todo el exceso de plástico que se encuentra entre las cuchillas.
- Se sugiere que, para la puesta en marcha del equipo se realice una inspección visual a la sección entre las cuchillas de la trituradora, buscando que no haya objetos extraños que puedan dañar el sistema de trituración. De igual manera las cuchillas deben tener una revisión periódica cada tres meses, para verificar desgastes o posibles fisuras.
- Para poder comercializar PET resultante del proceso de trituración, se debe tener un control del tamaño de la escama de PET, para esto se debe colocar un tamiz metálico que rodea la parte inferior de las cuchillas móviles. El diámetro de las perforaciones circulares en el tamiz estará restringido a la aplicación que tenga la escama de PET.
- Finalmente, se recomienda emplear un sistema de visión artificial, con el objetivo de evitar el mal uso de la máquina por parte de los usuarios y además recolectar información sobre las botellas que se introducen. Por

ejemplo, si un usuario ingresa al equipo un objeto diferente a una botella de plástico, el sistema de trituración no se activaría y emitiría un mensaje de alerta por medio del periférico de salida (pantalla táctil). Esto se puede lograr identificando el contorno y color de la botella de plástico por medio de una cámara (periférico de entrada requerido para emplear visión artificial), la cual debe estar ubicada en la parte interna de la entrada de alimentación de la trituradora. Los datos del color de la tapa y cuerpo de la botella pueden ser empleados para determinar la calidad del triturado de PET que se va a obtener.

BIBLIOGRAFÍA

- Banco Interamericano de Desarrollo. (2015). Situación de la gestión de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. Obtenido de https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/7177/Situacion_de_la_gestion_de_residuos_solidos_en_America_Latina_y_el_Caribe.pdf?sequence=1
- Federation British Plastics. (2008). Oil consumption.
- Forum World Economic. (2016). The new plastic economy - Rethinking the future of plastics. Obtenido de http://www3.weforum.org/docs/WEF_The_New_Plastics_Economy.pdf
- Gargiulo, C. a. (1997). Polyester fiber from 100% recycled PET bottles apparel.
- Global Ocean Commission. (2014). From decline to recovery - A Rescue Package for the Global Ocean. Plastic - Keeping them out of the ocean. Obtenido de <http://www.some.ox.ac.uk/wp-content/uploads/2016/03/GOC-Report-Summary.2015.ES-aug.pdf>
- Norton, R. L. (2011). Diseño de Máquinas. Naucalpan de Juárez: PEARSON.
- Plastic Europe. (2017). Plastic - An analysis of European plastics production, demand and waste data. Obtenido de <https://www.plasticseurope.org/en/resources/market-data>
- Plastics Europe. (2016). An analysis of European plastics. Obtenido de <https://www.plasticseurope.org/application/files/4315/1310/4805/plastic-the-fact-2016.pdf>
- Retorna. (2016). Experiencias de éxito. Obtenido de <http://www.retorna.org/es/elsddr/experiencias.html>
- UNEP. (2016). Marine plastic debris and microplastics. Global lessons and research to inspire action and guide policy change. Nairobi, Kenia. Obtenido de file:///C:/Users/j-aca/Downloads/-Marine_plasctic_debris_and_microplastics_Global_lessons_and_research_to_inspire_action_and_guide_policy_change-2016Marine_Plastic_Debris_and_Micropla.pdf
- Veolia. (s.f.). Bottle-to-Bottle à Rostock, en Allemagne. Recycler le PET pour réduire l'impact climatique. Obtenido de <https://www.veolia.com/fr/recyclage-plastique-economie-circulaire>

ANEXOS

ANEXO A
INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO EN PYTHON.

```

import serial, time, sys
from Tkinter import *
import Tkinter as tk
from PIL import ImageTk, Image
from time import sleep
Arduino = serial.Serial('COM5', 9600, timeout = 1)

LARGE_FONT = ("Verdana", 100)
windowWidth = 800
windowHeight = 480

re=0

def update():
    while 1:
        e = Arduino.readline()
        readingcontador.set(e) #set
        ventana.update()
        sleep(1)

ventana= Tk()
ventana.title('BETA VERSION GUI RVM')
ventana.configure(background='white')
x_coordinate = int(ventana.winfo_screenwidth() / 2 - windowWidth / 2)
y_coordinate = int(ventana.winfo_screenheight() / 2 - windowHeight / 2)
ventana.geometry("%dx%d+%d+%d" % (windowWidth, windowHeight, x_coordinate,
y_coordinate)) # widthxheight
ventana.resizable(width=False, height=False) # fixed size windows

Titulo = Label(ventana, text='RECUPERADORA DE BOTELLAS PET \n\n INSTRUCCIONES',
font=("LARGE_FONT"), background='white', relief='flat', width=60, height=5)
Titulo.pack()

# insert image for label
img_file = "NUEVO_RVM.png"
pil_img = Image.open((img_file))
# resize image - Instructions - filter option ANTIALIAS
# get the size of the original image
width_org, height_org = pil_img.size
# factor > 1.0 increases size
# factor < 1.0 decreases size
factor = 0.23
width = int(width_org * factor)
height = int(height_org * factor)
pil_img2 = pil_img.resize((width, height), Image.ANTIALIAS)
ventana.tk_img = ImageTk.PhotoImage(pil_img2)
img_label = tk.Label(ventana, image=ventana.tk_img, compound="center", relief='flat',
bg='white')
img_label.pack()

nombrel = Label(ventana, text='Cantidad de botellas recolectadas
',font=("LARGE_FONT"), background='white', relief='flat', width=60, height=3)
nombrel.pack()

readingcontador = StringVar()
lbl3 = Label(ventana, textvariable=readingcontador, bg='white', font=("LARGE_FONT"))
lbl3.pack()

btn1 = Button(ventana, text="NUEVO USUARIO", bg='red', relief=RAISED)
btn1.pack()

```

```
def NuevoUsuario():  
    Arduino.write(' ')
```

```
btn1['command'] = NuevoUsuario  
ventana.after(2, update)  
ventana.mainloop()
```

ANEXO B
SISTEMA DE CONTROL EN IDE ARDUINO

```

#include <TimeLib.h>
const int EchoPin = 11;
const int TriggerPin = 12;
const int LedPin = 13;
const int rele= 9;
int c=0;
//variable para contador
const float L=15; //variable altura de la botella
int i=0;
int b=0;
int aa=-61;int aaa=-61;
int comenzar=0;
int minutos = 1;
int segundos = 10;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(LedPin, OUTPUT);
  pinMode(TriggerPin, OUTPUT);
  pinMode(EchoPin, INPUT);
  pinMode(rele, OUTPUT);
  time_t ref = now();
}

void loop() {

  long duration, distance;

  digitalWrite(TriggerPin, LOW); //para generar un pulso limpio ponemos a LOW 4us
  delayMicroseconds(4);
  digitalWrite(TriggerPin, HIGH); //generamos Trigger (disparo) de 10us
  delayMicroseconds(10);
  digitalWrite(TriggerPin, LOW);

  duration = pulseIn(EchoPin, HIGH); //medimos el tiempo entre pulsos, en microsegundos
  distance = duration * 10 / 292 / 2; //convertimos a distancia, en cm
  if (distance < L and b==0) {
    b=1;
    i++;
    comenzar=1;
    Serial.println(i);
    time_t ref = now();//Declaramos la variable time_t ref (referencia)
    aa=minute(ref);
    aaa=second(ref);
    return i;
  }
}

```

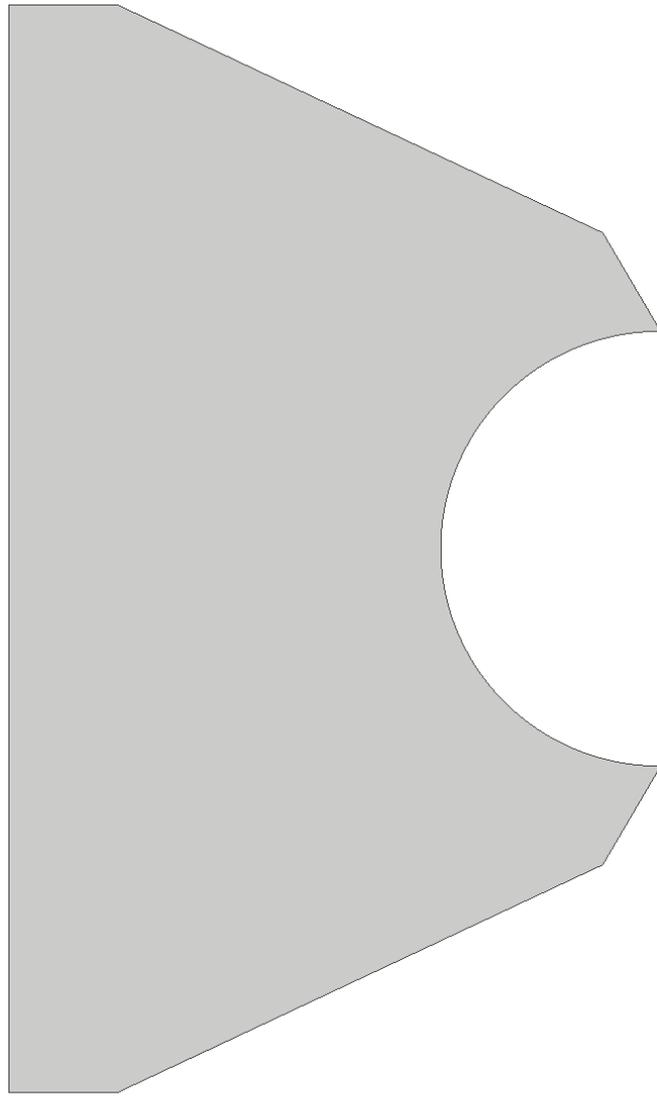
```

    }
else{
    if (distance > L) {
        b=0;
    }
}
time_t t = now();//Declaramos la variable time_t t (tiempo actual)
//Serial.println("segundos");
//Serial.println((second(t)-aaa));
//Serial.println("minutos");
//Serial.println((minute(t)-aa));
//Serial.println("i");
//Serial.println(i);
if ((minute(t)-aa)<minutos)
{    digitalWrite (rele,1);//esta salida es el rele
}
else
{
    if ( (second(t)<aaa) and (comenzar=1) )
    {    digitalWrite (rele,1);
    }
    else
    {    digitalWrite (rele,0);
        comenzar=0;
    }
}
Serial.println(i);

if (Serial.available()){
    char comman = Serial.read();
    i = 0;
}
delay(1000);
}

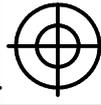
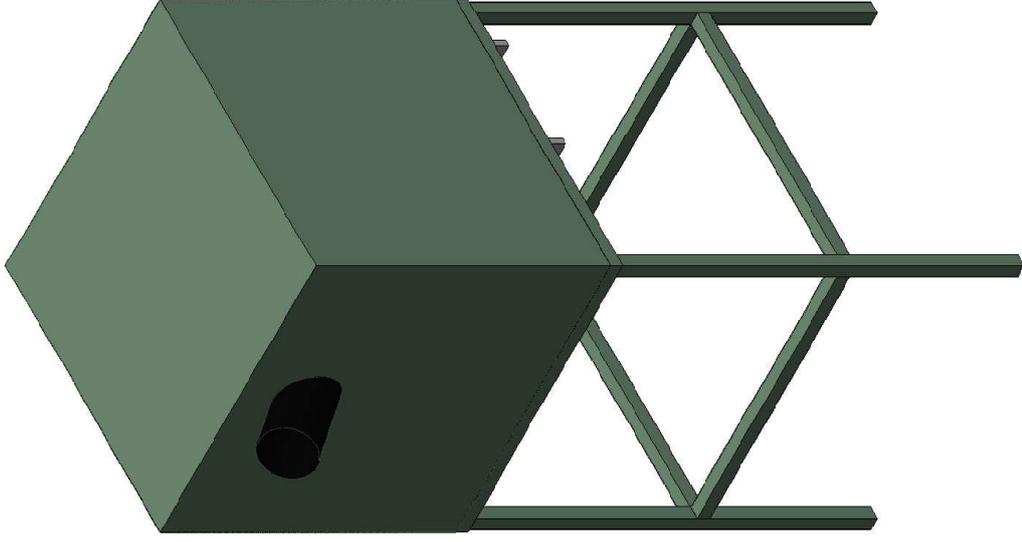
```

ANEXO D
PROPUESTA DE CUCHILLA FIJA



Fuente: Autores

ANEXO C
PLANOS ESQUEMÁTICOS



Escala:

1:12

Nombre

José A. Contreras

Josue H. Heras

Fecha

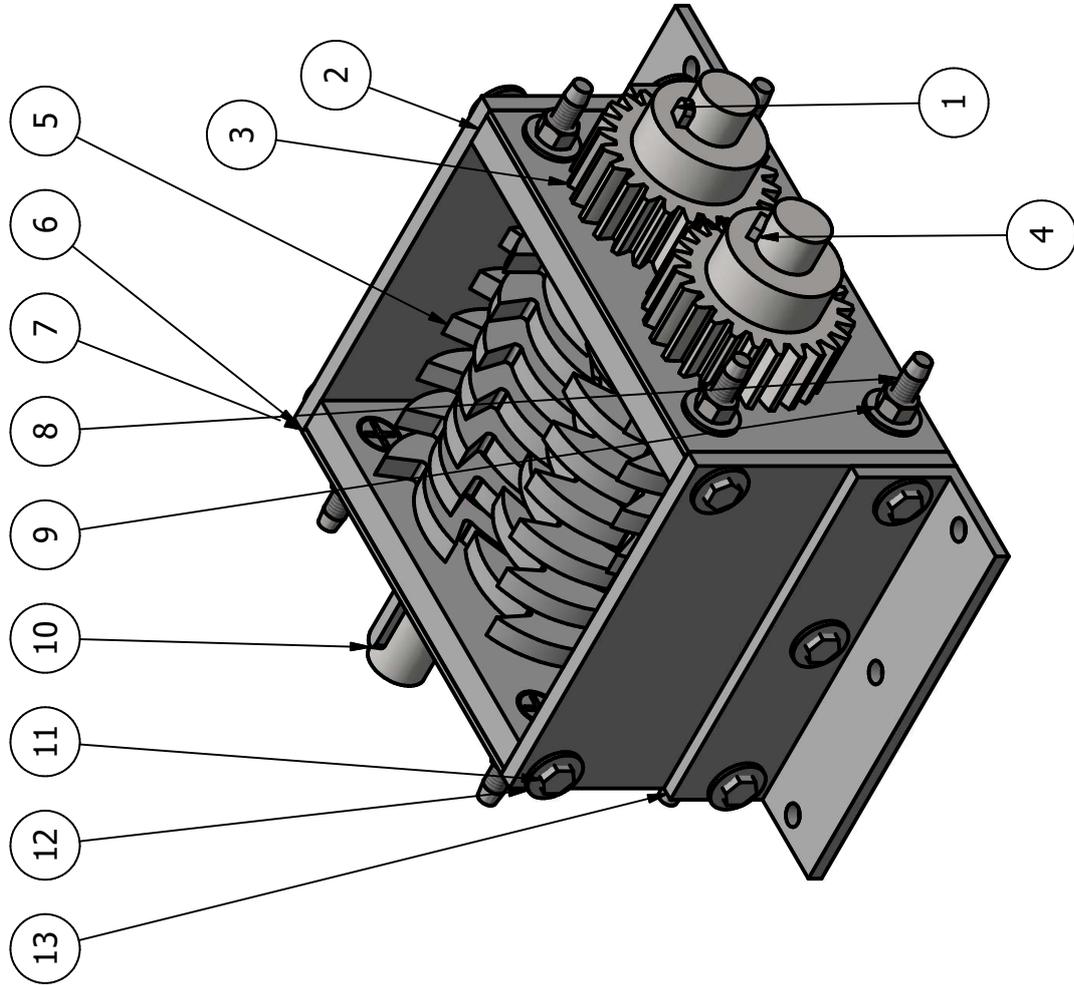
03/08/2018

ESPOL

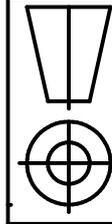
No. 1

Proyecto: Trituradora de botellas PET

Elemento: Ensamble completo



LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	3	Chaveta	
2	2	Placa soporte de rodamiento	Espesor 15 mm
3	2	Engranaje	Diente recto
4	1	Eje	No conectado al reductor
5	14	Cuchilla	
6	2	Placa lateral	Espesor 8 mm
7	2	Placa soporte de rodamiento	Espesor 3 mm
8	3	ANSI B18.6.4 - 3/8-16 UNC - 2	Tornillo de cabeza plana avellanada
9	8	AS 2465 - 3/8 UNC	
10	1	Eje	Conectado al reductor
11	10	Perno 3/8	
12	18	Arandela plana DIN 9021	
13	2	Angulo	Soporte para mesa



Escala:
1:3

Dibujado por: José A. Contreras
Dibujado por: Josue H. Heras
Aprobado por:

Nombre

José A. Contreras
Josue H. Heras

Fecha

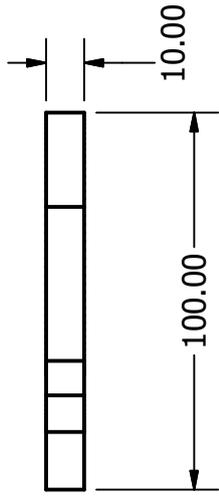
03/08/2018

ESPOL

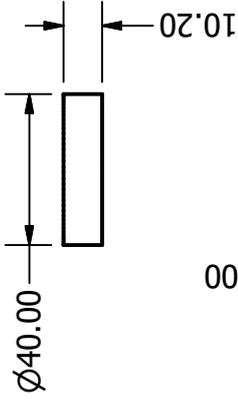
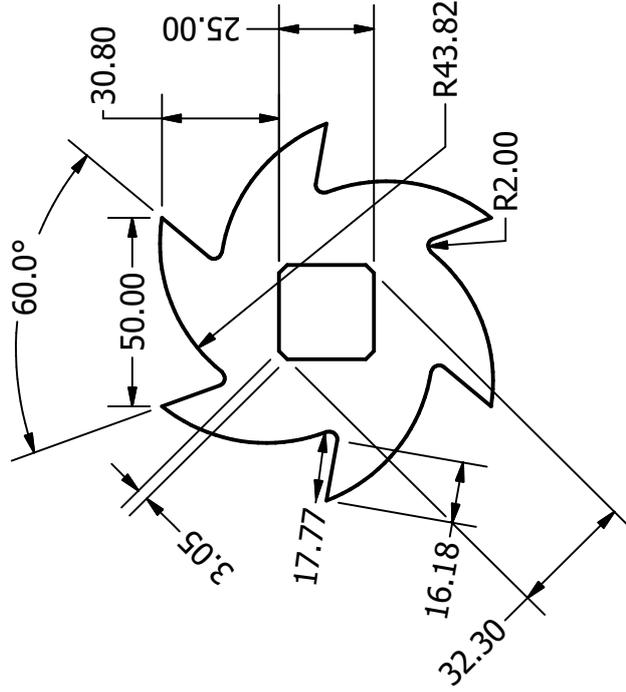
Proyecto: Trituradora de botellas PET

Elemento: Lista de elementos del sistema de trituración

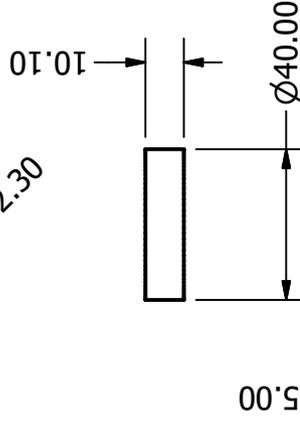
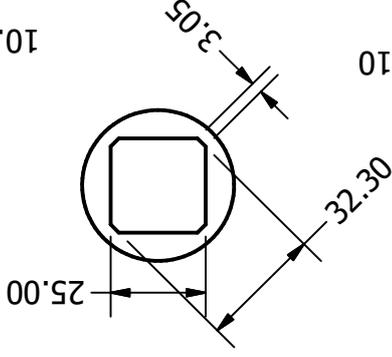
No. 2



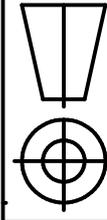
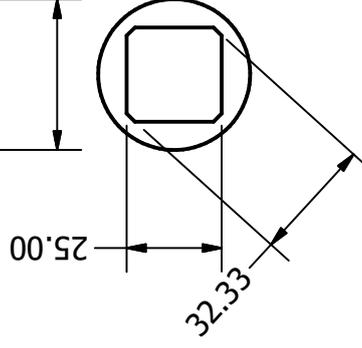
Cuchillas



Separador intermedio



Separador Laterales



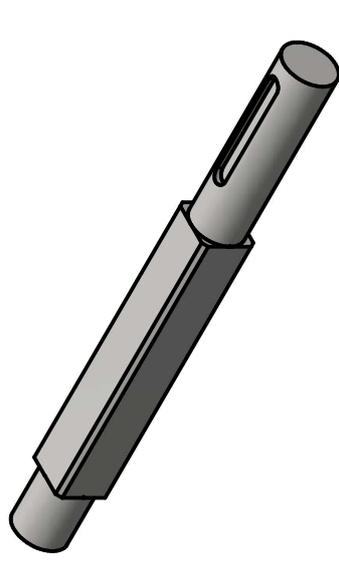
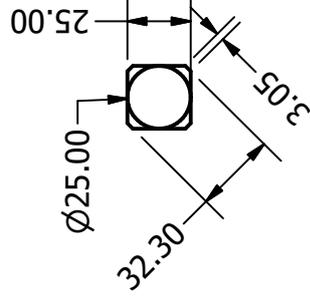
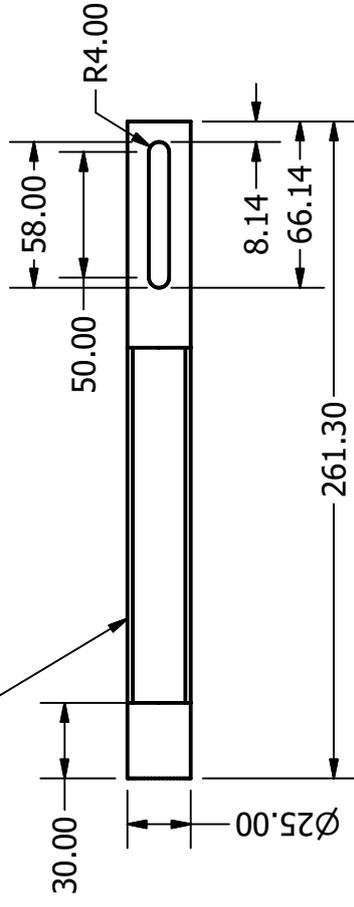
Escala:
1:2

Dibujado por:	José A. Contreras	Nombre	José A. Contreras	Fecha	03/08/2018
Dibujado por:	Josue H. Heras				
Aprobado por:					
Proyecto: Trituradora de botellas PET					
Elemento: Elementos de cuchillas					

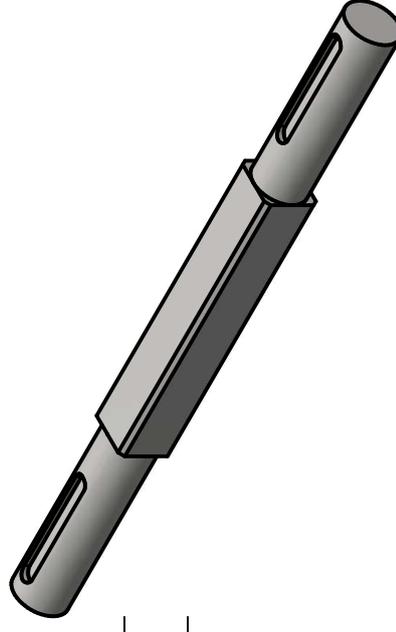
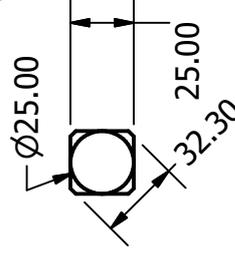
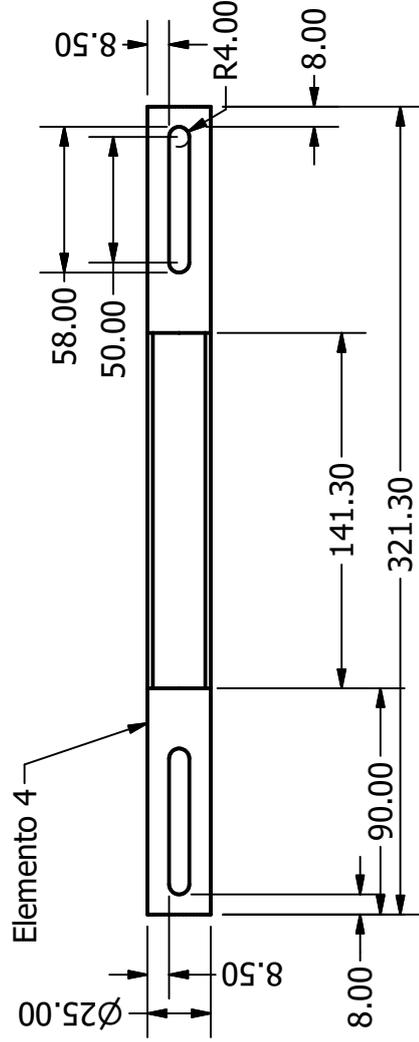
ESPOL

No. 3

Elemento 10



Elemento 4



Escala:

1:3

Dibujado por:

José A. Contreras

Dibujado por:

Josue H. Heras

Aprobado por:

Proyecto: Trituradora de botellas PET

Elemento: Ejes

Fecha

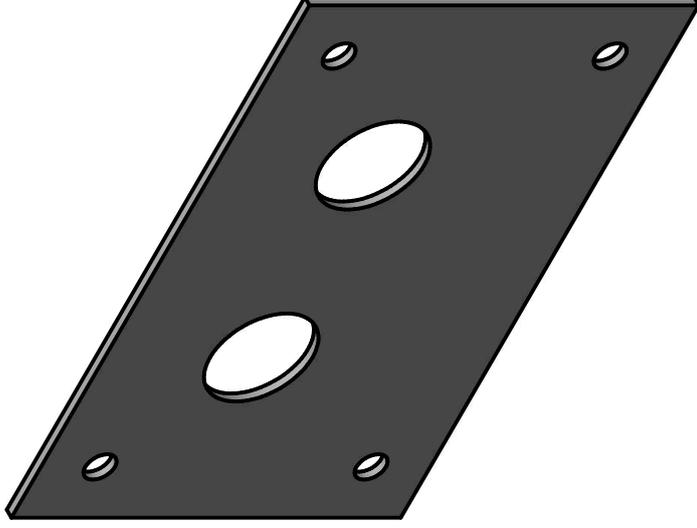
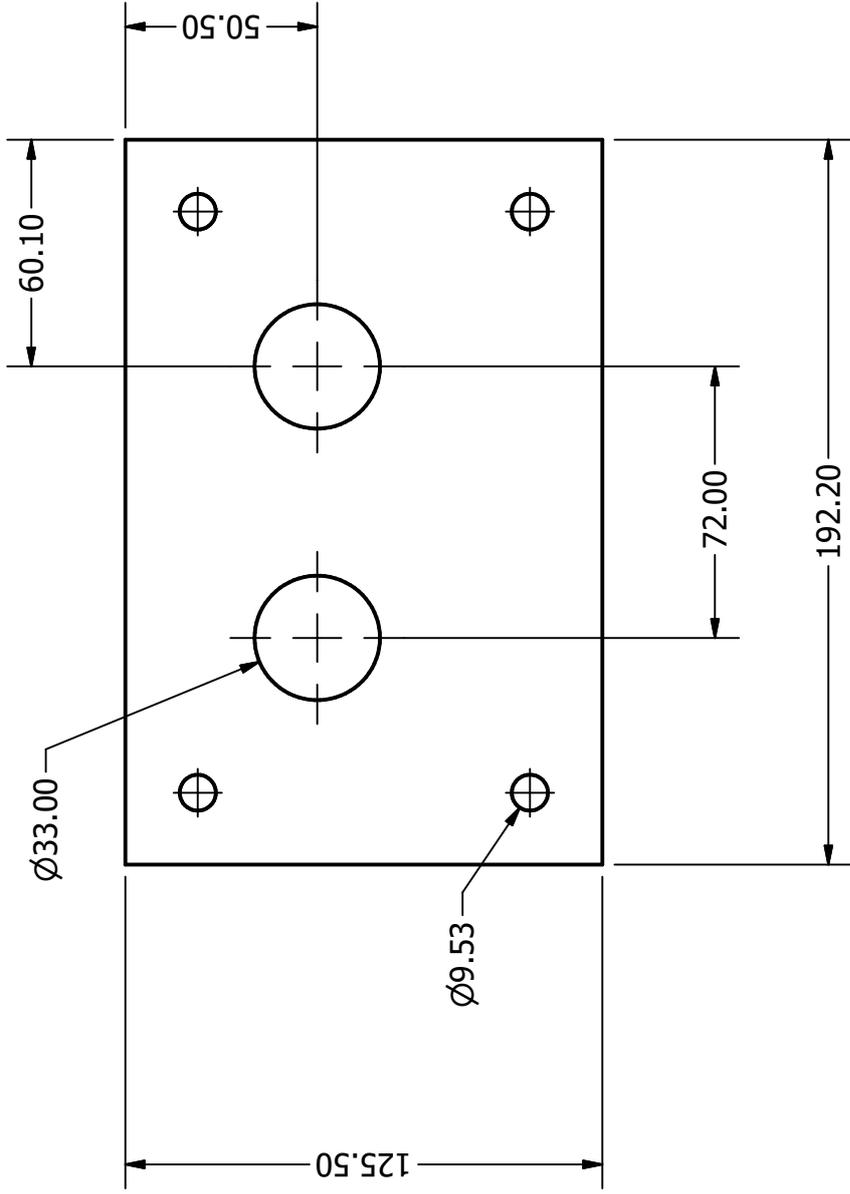
03/08/2018

Nombre

ESPOL

No. 4

3.00

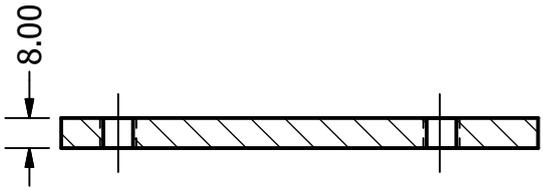
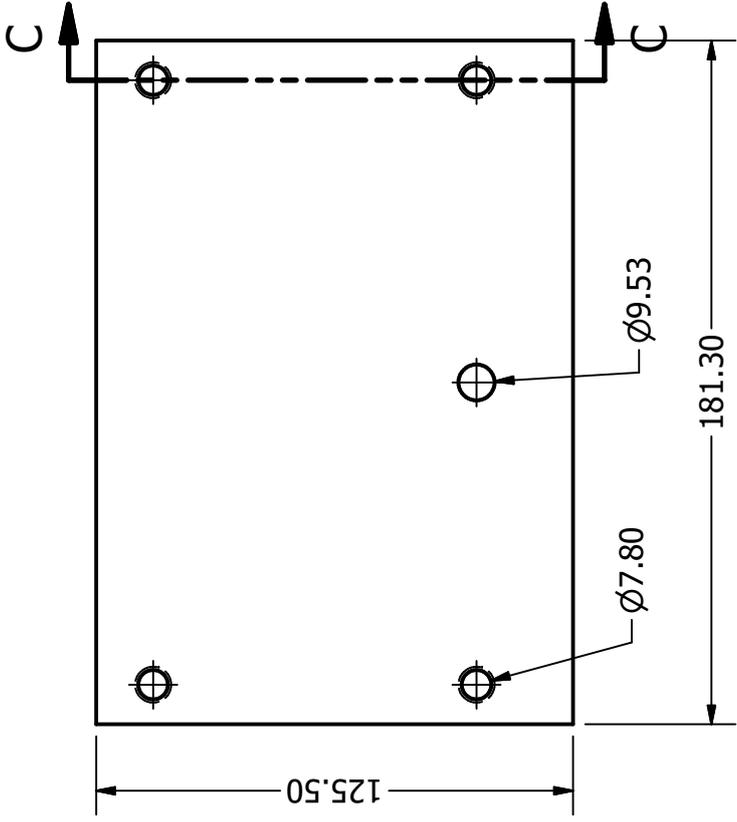


Escala:
1:2

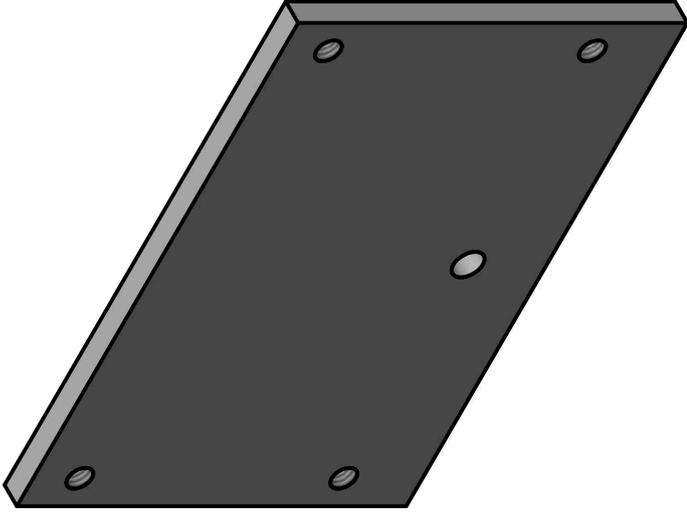
Dibujado por:	José A. Contreras	Nombre	José A. Contreras	Fecha	03/08/2018
Dibujado por:	Josue H. Heras				
Aprobado por:					
Proyecto: Trituradora de botellas PET					
Elemento: Placas para rodamiento 3 mm					

ESPOL

No. 6



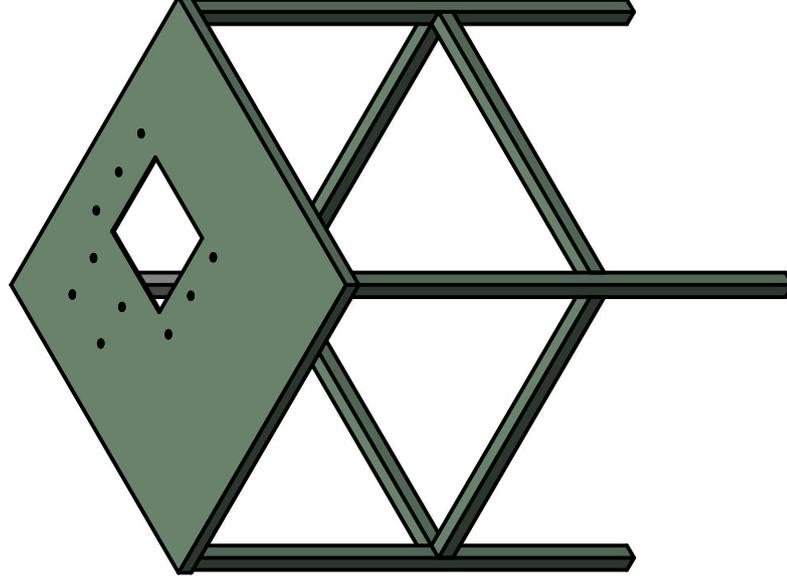
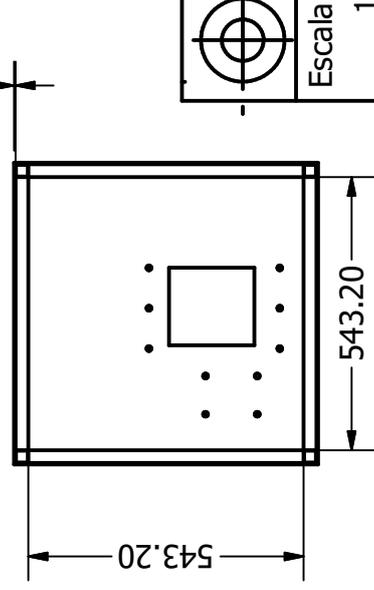
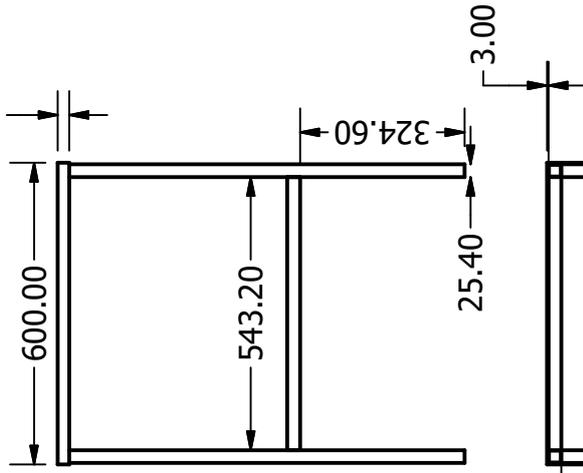
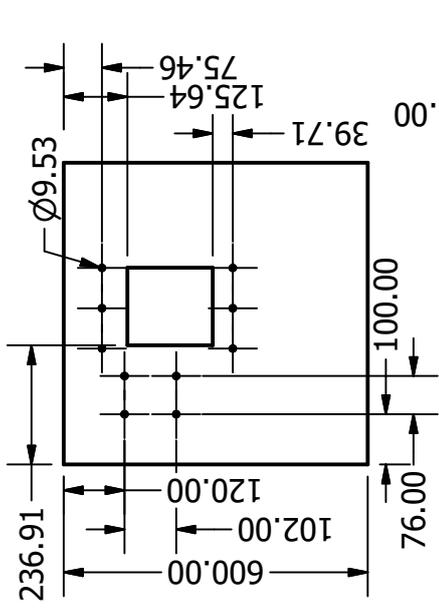
SECCIÓN C-C
ESCALA 1 / 2



	Escala:	
	1:2	

Dibujado por:	Nombre	Fecha
Dibujado por:	Jose A. Contreras	03/08/2018
Aprobado por:	Josue H. Heras	
Proyecto: Trituradora de botellas PET		
Elemento: Placas laterales 8 mm		

ESPOL	
No. 7	



Escala:
1:2

Dibujado por: Dibujado por: Aprobado por:	Nombre		Fecha	ESPOL
	José A. Contreras			
	Josue H. Heras			
Proyecto: Trituradora de botellas PET			No. 8	
Elemento: Estructura inferior				

