

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

Facultad De Ciencias e Ingeniería



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

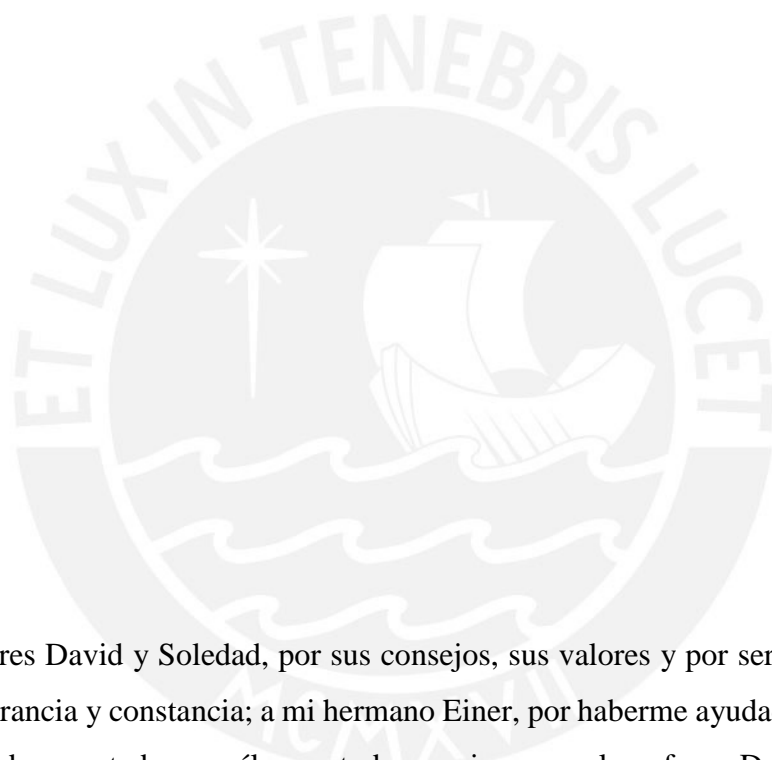
**DISEÑO DE UNA MÁQUINA RECICLADORA ORIENTADA A LA
PRODUCCIÓN DE FILAMENTOS DE PLÁSTICO ABS PARA LA IMPRESIÓN
3D EN LA PUCP**

**Tesis para optar por el Título de Ingeniero Mecatrónico,
que presenta el bachiller:**

Jean Peare Porras Solorzano

Asesor: Dr. Dante Elías Giordano

Lima, octubre del 2018



A mis padres David y Soledad, por sus consejos, sus valores y por ser siempre ejemplo de perseverancia y constancia; a mi hermano Einer, por haberme ayudado en todo campo y poder haber contado con él para todo; a mi asesor el profesor Dante Elías, por su paciencia, apoyo y sabiduría; a mis amigos, que hicieron de este camino universitario uno lleno de experiencias inolvidables; y a la memoria de mi tío Marcial Alarcón, a quien siempre lo recordaremos con mucho cariño y felicidad.

RESUMEN

La presente tesis es planteada con el objetivo de diseñar una máquina automática compacta que permita reciclar plástico ABS, proveniente de las piezas funcionales en desuso de los laboratorios de la PUCP, y convertirlo en filamentos para impresión 3D. Se determinó que el diseño del sistema mecatrónico contará con tres estaciones interconectadas que realizan un proceso específico: triturar, extruir y enrollar el filamento de ABS.

Este diseño permite que la maquina pueda realizar cada proceso independiente, con lo cual se obtiene mínimamente 0.5 kg de filamento ABS para impresión 3D de distintos diámetros comerciales de forma continua. Además, el diseño contempla la posibilidad del reciclaje de otros tipos de plástico con propiedades mecánicas y físicas similares al ABS.

Así, se abordan los cálculos de diseño mecánico, los análisis de resistencia de distintos materiales mediante simulaciones computacionales, la selección de componentes, la propuesta del control del sistema, y los planos de ensamble y despiece para su fabricación. De esta manera, se obtiene un estimado del costo de diseño y fabricación para un ejemplar de aproximadamente S/33,000.00.

**TEMA DE TESIS PARA OPTAR
EL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

Título : Diseño de una máquina recicladora orientada a la producción de filamentos de plástico ABS para la impresión 3D en la PUCP

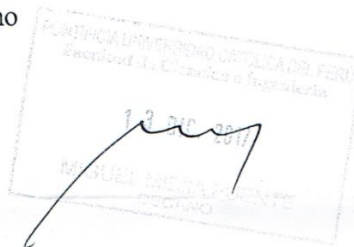
Asesor : Dr. Dante Ángel Elías Giordano

Alumno : Jean Peare Porras Solorzano

Código : 20114479

Tema N° : # 215

Fecha : 01-12-2017



Descripción y Objetivos

Actualmente la manufactura digital mediante impresión 3D es una herramienta versátil en la obtención de modelos y prototipos funcionales para propósitos de investigación. En estas impresiones se emplea ABS y PLA como insumos, siendo el ABS el más usado debido a sus mejores propiedades mecánicas.

La PUCP, en los últimos años, ha implementado ambientes de investigación y desarrollo en los que se usa la fabricación digital en ABS para imprimir nuevos modelos 3D funcionales. Sin embargo la curva de aprendizaje en el desarrollo e investigación de cada proyecto, que es muy frecuente en la manufactura por impresión 3D, origina que las primeras versiones que se imprimen deban desecharse, convirtiéndose así en un agente contaminante y una merma tomar en cuenta.

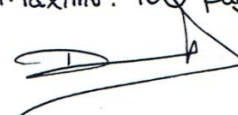
Por lo tanto se propone diseñar una máquina automática, para uso en laboratorios de la PUCP, que permita reciclar el plástico ABS de las piezas funcionales desechadas y convertirlas en filamentos de impresión 3D. Esta propuesta contempla la revisión del estado del arte, la declaración de requerimientos y el desarrollo conceptual del sistema mecatrónico que aborde los dominios mecánico, eléctrico y de control. Este diseño propuesto será validado a través de cálculos de ingeniería y simulaciones en software computacional, e incluirá la realización de los planos de ensamble y fabricación, así como y una estimación de costos de diseño y fabricación del mismo.



Erica P. Gabriel R.

i

Máximo: 100 páginas



ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES.....	3
1.1 Reciclaje de plásticos	3
1.1.1 Reciclaje primario	3
1.1.2 Reciclaje secundario	4
1.1.3 Reciclaje terciario	4
1.1.4 Reciclaje cuaternario	4
1.2 Tipos de impresión 3D	5
1.2.1 Impresión por Estereolitografía (SL).....	5
1.2.2 Impresión por procesamiento de luz digital (DLP)	6
1.2.3 Impresión por Sinterización Selectiva por Láser (LS) y Fusión Selectiva por Láser (LM).....	7
1.2.4 Impresión por deposición de material fundido (FDM).....	7
1.2.5 Impresión por inyección de aglutinante (BJ).....	8
1.2.6 Impresión por inyección de material (MJ)	8
1.2.7 Impresión de fusión por haz de electrones (EBM)	9
1.3 Tipos de plástico utilizados en impresión 3D por Deposición de Material Fundido (FDM)	10
1.3.1 Plástico ABS.....	10
1.3.2 Plástico PLA	10
1.4 Estadísticas del consumo de ABS en los laboratorios de la PUCP.....	11
1.4.1 Laboratorio de Investigación en Biomecánica y Robótica Aplicada	11
1.4.2 Sala VEO	11
1.4.3 Centro de Tecnologías Avanzadas de Manufactura (CETAM)	12
1.4.4 Resultados obtenidos	12
CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE.....	14
2.1 Tipos de carretes comerciales de plástico ABS	14
2.2 Máquinas recicladoras de plástico	15
2.2.1 Máquinas trituradoras de plástico.....	15
2.2.1.1 Filabot Industrial Reclaimer	15
2.2.1.2 UNI-SHEAR SR300	16
2.2.1.3 Precious Plastic Shredder.....	16
2.2.2 Máquinas extrusoras de plástico ABS	17
2.2.2.1 Extrusora de filamentos Filastruder	17
2.2.2.2 Extrusora de filamentos Filabot EX2.....	18
2.2.2.3 Extrusora FilaFab PRO 350 EX.....	19
2.2.3 Máquinas acondicionadoras para presentación final del material	20
2.2.3.1 Filabot Spooler.....	20
2.2.3.2 FilaWinder	21
2.3 Instrumentación y tecnología	21
2.3.1 Tipos de triturado de plástico	21

2.3.1.1 De eje simple	21
2.3.1.2 De doble eje	22
2.3.1.3 De cuatro ejes.....	23
2.3.2 Técnicas de extrusión de plásticos	23
2.3.2.1 Extrusoras de desplazamiento positivo.....	23
2.3.2.2 Extrusora de fricción viscosa	24
2.3.3 Tipos de herramientas de corte para trituración	25
2.3.3.1 Cuchillas trituradoras	25
2.3.3.2 Rodillos dentados.....	26
CAPÍTULO 3 DISEÑO CONCEPTUAL.....	27
3.1 Requerimientos del sistema.....	27
3.2 Estructura de funciones:	32
3.2.1 Abstracción: Caja negra (Black-Box)	32
3.2.2 Fijación de los procesos técnicos	32
3.2.3 Representación de la estructura de funciones.....	33
3.3 Concepto de solución	35
CAPÍTULO 4 INGENIERÍA DE DETALLE DEL SISTEMA MECÁNICO.....	37
4.1 Estación de trituración.....	38
4.1.1 Mecanismo de Trituración.....	39
4.1.1.1 Eje Triturador.....	39
4.1.1.2 Soporte de trituración.....	54
4.1.1.3 Rodamientos	57
4.1.1.4 Placas de la cavidad	57
4.1.2 Tolva.....	59
4.1.3 Motor DC de la Trituradora.....	60
4.1.4 Transmisión de Potencia.....	60
4.1.5 Chaveta	61
4.2 Estación de Extrusión.....	62
4.2.1 Husillo	62
4.2.2 Cilindro.....	63
4.2.3 Cabezal de Extrusión	65
4.2.4 Tolva de la Extrusora.....	65
4.2.5 Motor de la Extrusora	65
4.2.6 Transmisión de Potencia.....	66
4.2.7 Rodamientos	66
4.2.8 Aislante térmico.....	66
4.3 Estación de Enrollado	67
4.3.1 Mecanismo de enrollado.....	67
4.3.1.1 Soporte Lateral.....	68
4.3.1.2 Motor DC del mecanismo de enrollado	70
4.3.1.3 Transmisión de potencia	71
4.3.2 Mecanismo de posicionamiento del filamento	71
4.3.2.1 Brazo	72
4.3.2.2 Servomotor.....	72
4.3.3 Soporte para la conducción del filamento	73
4.4 Armazones de las estaciones	74

CAPÍTULO 5 INGENIERÍA DE DETALLE DEL SISTEMA DE CONTROL.....	77
5.1 Algoritmo y lógica de control	77
5.1.1 Lazo principal	78
5.1.2 Controlar trituradora	78
5.1.3 Controlar extrusora	79
5.1.4 Controlar mecanismo de enrollado.....	80
5.1.5 Actualizar interfaces	80
5.1.6 Control de la temperatura de extrusión	81
5.2 Dispositivos electrónicos para el sistema de control.....	82
5.2.1 Controlador del motor de Trituración.....	82
5.2.2 Controlador del motor de la Extrusora	83
5.2.3 Controlador del motor de la enrolladora	84
5.2.4 Conmutadores mecánicos	84
5.2.5 Indicadores LED.....	85
5.2.6 Pantalla Táctil	85
5.2.7 Microcontrolador	85
5.2.8 Acondicionador de voltaje.....	86
5.2.9 Resistencias para el calentamiento del cilindro extrusor.....	87
5.2.10 Controlador de temperatura.....	88
5.2.11 Sensores de temperatura	88
 CAPÍTULO 6 PLANOS Y ESTIMACIÓN DE COSTOS	 90
6.1 Planos	90
6.2 Estimación de costos	90
 OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES.....	 94
 CONCLUSIONES	 95
 BIBLIOGRAFÍA	 96
 ANEXOS	 99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Nombre estándares de los procesos para el reciclaje de plástico.....	5
Tabla 1.2	Tabla comparativa de las tecnologías de impresión 3D	9
Tabla 1.3	Tabla comparativa de plásticos a 23°C.....	11
Tabla 1.4	Datos de la encuesta en LIBRA.....	12
Tabla 1.5	Datos de la encuesta en Sala VEO.....	12
Tabla 2.1	Tabla comparativa de marcas de filamentos ABS	14
Tabla 2.2	Comparación técnica de las máquinas trituradoras	17
Tabla 2.3	Tabla comparativa de máquinas extrusoras.....	19
Tabla 3.1	Resumen de los requerimientos de la máquina.....	31
Tabla 4.1	Valores de las fuerzas de corte	47
Tabla 4.2	Parámetros recomendados para fresar los materiales plásticos	47
Tabla 4.3	Datos para el cálculo del diámetro del eje.....	52
Tabla 4.4	Parámetros de los soportes de trituración	55
Tabla 4.5	Condiciones de trabajo de la trituradora.....	60
Tabla 4.6	Valores de los parámetros del husillo.....	63
Tabla 4.7	Condiciones de trabajo de la trituradora.....	66
Tabla 4.8	Fuerza máxima de tensión del filamento	68
Tabla 4.9	Velocidad de enrollamiento del filamento.....	70
Tabla 4.10	Características del motorreductor de la enrolladora	70
Tabla 4.11	Tabla comparativa de servomotores	73
Tabla 5.1	Tabla comparativa de controladores para el motor de la trituradora	83
Tabla 5.2	Tabla comparativa de controladores para el motor de la trituradora	84
Tabla 5.3	Tabla comparativa de pantallas táctiles	85
Tabla 5.4	Especificaciones Arduino Uno Genuino	86
Tabla 5.5	Características de la fuente switching para los motores alta potencia.....	87
Tabla 5.6	Características del controlador de temperatura.....	88
Tabla 5.7	Tabla comparativa de termocuplas	88
Tabla 7.1	Lista de planos del sistema	91
Tabla 7.2	Costos de adquisición de elementos del sistema mecánico	92
Tabla 7.3	Costos de adquisición de elementos del sistema electrónico y control	93
Tabla 7.4	Costos de mecanizado.....	93
Tabla 7.5	Estimación del costo para una máquina recicladora de plástico ABS.....	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Impresión SL	6
Figura 1.2 Impresión por DLP	6
Figura 1.3 Impresión por LS	7
Figura 1.4 Impresión por FDM.....	8
Figura 1.5 Porcentajes comparativos en LIBRA y Sala VEO	13
Figura 1.6 Gráfico comparativo de las piezas impresas en LIBRA.....	13
Figura 2.1 Filabot Industrial Reclaimer	15
Figura 2.2 Rodillo dentado de la máquina UNI-SHEAR SR300	16
Figura 2.3 Precious Plastic Shredder	16
Figura 2.4 Extrusora de filamentos Filastruder	18
Figura 2.5 Extrusora de filamentos Filabot EX2	18
Figura 2.6 Extrusora FilaFab PRO 350 EX	19
Figura 2.7 Enrolladora de filamentos Filabot Spooler.....	20
Figura 2.8 Enrolladora de filamentos FilaWinder	21
Figura 2.9 Trituradoras de eje simple	22
Figura 2.10 Trituradora de doble eje	22
Figura 2.11 Trituradora de cuatro ejes.....	23
Figura 2.12 Bomba de extrusión.....	24
Figura 2.13 Extrusión con un solo husillo	24
Figura 2.14 Tipos de chuchillas trituradoras	25
Figura 2.15 Trituradora mediante rodillo dentado simple	26
Figura 3.1 Caja negra del sistema	32
Figura 3.2 Diagrama de la estructura de funciones	34
Figura 3.3 Bosquejo de la solución 3.....	36
Figura 4.1 Maquina recicladora diseñada	38
Figura 4.2 Estación de Trituración	38
Figura 4.3 Mecanismo de Trituración.....	39
Figura 4.4 Partes del eje Triturador	39
Figura 4.5 Herramienta de corte	40
Figura 4.6 Área de corte la de la pieza	41
Figura 4.7 Dimensiones del área desbastada del material	41
Figura 4.8 Volumen aproximado de plástico desbastado	41

Figura 4.9 Configuración del soporte de trituración y las herramientas de corte	42
Figura 4.10 Configuración de las cuchillas	43
Figura 4.11 Trituración de una solo cuchilla	43
Figura 4.12 Fuerzas aplicadas por una cuchilla	44
Figura 4.13 DCL del material a triturar	44
Figura 4.14 Diagramas de Fuerza Cortante y Momento Flector de la pieza de ABS.....	44
Figura 4.15 Área transversal del material desbastado	46
Figura 4.16 Parámetros para fresar	47
Figura 4.17 Análisis de la Herramienta de Corte.....	48
Figura 4.18 Elementos en contacto con el eje de transmisión	49
Figura 4.19 DCL del eje de transmisión	50
Figura 4.20 Transmisión por poleas síncronas	51
Figura 4.21 Diagrama de Fuerzas Cortantes y Diagrama de Momentos Flectores	52
Figura 4.22 Espaciador de las herramientas de corte.....	54
Figura 4.23 Partes del Soporte de Trituración	54
Figura 4.24 Soporte de Trituración.....	55
Figura 4.25 Análisis del Soporte de Corte.....	56
Figura 4.26 Espaciador para los soportes de trituración	57
Figura 4.27 Placas de soporte del mecanismo de trituración.....	58
Figura 4.28 Análisis de la Cavidad de Trituración	59
Figura 4.29 Estación de Extrusión.....	62
Figura 4.30 Vista general de una sección de un husillo de dos canales	63
Figura 4.31 Husillo extrusor	63
Figura 4.32 Garganta de alimentación para la extrusión	64
Figura 4.33 Cilindro Extrusor	64
Figura 4.34 Cabezal extrusor	65
Figura 4.35 Estación de Enrollado.....	67
Figura 4.36 Mecanismo de Enrollado.....	67
Figura 4.37 Soporte Lateral	68
Figura 4.38 DCL del carrete	69
Figura 4.39 Área de compresión y fricción del soporte lateral.....	69
Figura 4.40 Engranaje conductor del mecanismo de enrollado.....	71
Figura 4.41 Mecanismo de posicionamiento del filamento.....	72
Figura 4.42 Brazo del servomotor del mecanismo de posicionamiento del filamento...	72

Figura 4.43 Soporte de conducción del filamento	73
Figura 4.44 Armazones del sistema.....	74
Figura 4.45 Esfuerzo de Von Mises en los armazones	75
Figura 4.46 Desplazamiento del Armazón de la Trituradora.....	76
Figura 4.47 Factor de Seguridad del Armazón de la Trituradora	76
Figura 5.1 Diagrama de flujo del lazo principal	78
Figura 5.2 Diagrama de flujo de la subrutina de controlar trituradora	79
Figura 5.3 Diagrama de flujo de la subrutina de controlar extrusora	79
Figura 5.4 Diagrama de flujo de la subrutina de controlar mecanismo de enrollado	80
Figura 5.5 Diagrama de flujo de la subrutina de actualizar interfaces	80
Figura 5.6 Diagrama de flujo del control de la temperatura de extrusión	81
Figura 5.7 Esquema general de conexiones.....	82
Figura 5.8 Controlador para el motor de la trituradora.....	83
Figura 5.9 Controlador para el motor de la extrusora.....	84
Figura 5.10 Arduino Uno Genuino	86
Figura 5.11 Resistencias tipo banda de la extrusora.....	87
Figura 5.12 Diagrama de Conexiones del Sistema.....	89

INTRODUCCIÓN

Actualmente, se viene avanzando hacia una gran revolución en la fabricación digital, puesto que ya existe tecnología que está revolucionando la creación de productos, procesos y servicios [Casanueva, 2015]. Un ejemplo de ello es la impresión 3D. Esta herramienta posee distintos tipos de aplicaciones, desde la impresión de comida en el espacio para la NASA, hasta la creación de trajes impresos para desfiles de modas [Ribechini, 2017]. Debido a esta versatilidad, es posible emplearla también en la fabricación de modelos y prototipos funcionales orientados al área de la investigación. Para realizar estas impresiones, el 95% del mercado de impresoras 3D personales utiliza dos materiales: ABS Y PLA [Escobar, 2013]. De estos dos, el más empleado es el ABS, ya que, debido a sus propiedades mecánicas, puede ser mecanizado con gran facilidad y es extremadamente resistente, por lo que es el más adecuado para este tipo de aplicaciones. Sin embargo, éste posee una gran desventaja en comparación al PLA debido su característica de altamente contaminante y no biodegradable [Giang, 2017]. Por este motivo no puede ser desechado en conjunto con otros desperdicios cotidianos.

En la PUCP se cuenta con distintos espacios académicos donde se trabajan con tecnología de impresión 3D. Algunos de ellos están enfocados al área de la investigación y para plasmar sus diseños se valen de recursos de fabricación digital. Por tal motivo, se genera gran cantidad de material impreso puesto que, con frecuencia, las primeras versiones de los prototipos funcionales creados no se utilizan más y son dejados de lado porque no pueden ser desechados. Así, una pieza que en un inicio tenía propósitos funcionales, acaba convirtiéndose en un agente contaminante y se terminan desarrollando prototipos funcionales en un material altamente contaminante y que posee un costo relativamente

elevado (según los ingenieros responsables de los laboratorios, el precio de un kg. de material es de S/.200.00). Otros de ellos trabajan solo con PLA puesto que, de acuerdo con los ingenieros a cargo de este laboratorio, se optó por este tipo de material en reemplazo del ABS debido a la toxicidad de este último y a que no se contaba con un sistema de reciclaje para el material contaminante.

Así, después de recolectar información, presente en el subcapítulo 1.4, se determinó que por una tercera parte del material impreso era material en desuso. Entonces, a partir del análisis de la información obtenida, se puede afirmar que el consumo de plástico ABS en los laboratorios de la PUCP está aumentando debido a la necesidad de plasmar los diseños elaborados de los proyectos de investigación; y, por consiguiente, que la cantidad de material que se convertirá en piezas en desuso también lo hará.

Por lo tanto, se propone diseñar una máquina automática, para uso en laboratorios de la PUCP, que permita reciclar el plástico ABS de las piezas funcionales desechadas y convertirlas en filamentos de impresión 3D para los laboratorios de la PUCP. Esta propuesta contempla la revisión del estado del arte, la declaración de requerimientos y el desarrollo conceptual del sistema mecatrónico que aborde los dominios mecánico, eléctrico y de control. Este diseño propuesto será validado a través de cálculos de ingeniería y simulaciones en software computacional, e incluirá la realización de los planos de ensamble y fabricación, así como y una estimación de costos de diseño y fabricación del mismo.

En desarrollo de este diseño se usa la norma alemana VDI 2206 (*Design methodology for mechatronic systems*), debido a que combina las distintas áreas de la ingeniería mecánica, electrónica y control, y posee una normativa práctica que envuelve la comprensión de la solicitud, la concepción de la solución, la elaboración del proyecto y la elaboración de detalles según la comprensión de la solicitud, la concepción de la solución, la elaboración del proyecto y la elaboración del detalle.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

En el siguiente capítulo se presenta información relevante para comprender el tema a desarrollar. Este capítulo consta del reciclaje de plásticos en general, los tipos de impresión 3D existentes, los tipos de plástico utilizados en la impresión 3D por Deposición de Material Fundido (FDM), las estadísticas del consumo de ABS en los laboratorios de la PUCP y los resultados obtenidos.

1.1 Reciclaje de plásticos

El reciclaje de los plásticos es una de las más importantes acciones para reducir la contaminación ambiental que éste genera. Reciclar permite reducir el consumo de aceite (materia prima para su fabricación), emisiones de dióxido de carbono y las cantidades de residuos que deben de eliminarse.

La terminología para el reciclaje de plástico es compleja y a veces confusa debido a la amplia gama de actividades de reciclaje y recuperación que existen. De acuerdo con ASTM, ésta se puede clasificar en cuatro tipos: primario, secundario, terciario y cuaternario. A continuación, se describe los distintos tipos de reciclaje existentes y en la Tabla 1.1 se los presenta en sus diferentes normativas.

1.1.1 Reciclaje primario

Es conocido como reciclaje de lazo cerrado, ya que consiste en la conversión de desechos plásticos de un solo tipo de material en uno nuevo con propiedades físicas y químicas idénticas a las del original [Goodship, 2007]. Este tipo de reciclaje se realiza en los

termoplásticos como el PET (Polietileno Teraftalato), PVC (Cloruro de Polivinilo), ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), etc. Está conformado por los siguientes procesos:

- Separación: Se separa los materiales según el tipo de plástico a reciclar.
- Limpieza: Las piezas de plástico generalmente poseen agentes contaminantes como restos de comida, polvo, piedras, papel, pegamento, etc. Por esta razón tienen que ser limpiados en un baño detergente antes de ser granulados y peletizados.
- Granulado: Mediante procesos industriales, el plástico se muele y se convierte en pequeños gránulos de forma similar a una hoja de maíz.
- Peletizado: El plástico previamente descontaminado es fundido y extruido a través de un tubo, formando así un nuevo material de sección tubular. Este alambre de plástico, al enfriarse, es cortado en trozos pequeños llamados pellets.

1.1.2 Reciclaje secundario

El reciclaje secundario fabrica plástico con propiedades inferiores al polímero original. Este método elimina los procesos de separación y limpieza del material a reciclar. Sin embargo, al igual que en el reciclaje primario, el desecho plástico es granulado y posteriormente peletizado [Reynald, 2005]. Algunos tipos de plástico recuperados por esta forma son los termoestables y los contaminados.

1.1.3 Reciclaje terciario

En este caso, se degrada el polímero hasta descomponerlo en moléculas pequeñas que pueden separarse fácilmente de las impurezas contenidas en el desecho plástico. Es conocido también como el reciclaje de materias primas y es usado para fabricar componentes primarios para procesos petroquímicos. Este tipo de reciclaje es diferente a los mencionados anteriormente ya que no solo involucra un cambio físico del material, sino también uno químico.

1.1.4 Reciclaje cuaternario

Conocido también como recuperación de energía, ya que mediante la incineración del material se recupera la energía inherente en éste. Consiste en el calentamiento de los desechos plásticos con la finalidad de usar la energía térmica liberada para la realización de otros procesos. Es decir, el plástico es usado como combustible para reciclar energía.

Este tipo de reciclaje posee ventajas como la reducción del espacio ocupado por los desechos plásticos, la recuperación de metales puros y el manejo de diferentes cantidades de desechos. Sin embargo, posee también grandes desventajas como la contaminación ambiental generada por los gases y la gran inversión monetaria que representa [Hopewell, 2009].

En la Tabla 1.1 se presenta los distintos tipos de reciclaje en normativas según ASTM, ISO y otros términos equivalentes.

Tabla 1.1 Nombre estándares de los procesos para el reciclaje de plástico [Hopewell, 2009]

Definición ASTM D5033	Equivalente ISO 15270	Otros términos equivalentes
Reciclaje primario	Reciclaje mecánico	Reciclaje de lazo cerrado
Reciclaje secundario	Reciclaje mecánico	<i>Downgrading</i>
Reciclaje terciario	Reciclaje químico	Reciclaje de materias primas
Reciclaje cuaternario	Recuperación de energía	Valorización

1.2 Tipos de impresión 3D

Existen diversos tipos de tecnología en la impresión 3D que han sido desarrollados en el transcurso del tiempo. Dentro ellas destacan la impresión por estereolitografía, por procesamiento de luz digital, por sinterización y fusión selectiva de láser, por deposición de material fundido, por inyección de aglutinante y material, y la de fusión por haz de electrones.

A continuación, se explica las tecnologías mencionadas y al final del subcapítulo, en la Tabla 1.2, se presenta un cuadro comparativo de éstas.

1.2.1 Impresión por Estereolitografía (SL)

La tecnología SL, *Stereolithography* en inglés, fue la primera en usarse en las impresiones 3D [Escobar, 2016]. Como se puede observar en la Figura 1.1, consiste en la aplicación de un haz de luz ultravioleta a una resina líquida contenida en un cubo. El láser va solidificando la resina en diferentes capas, mientras que la base que soporta la estructura se va desplazando hacia abajo para que la luz UV realice la misma acción sobre la nueva capa hasta que se obtenga la forma deseada.

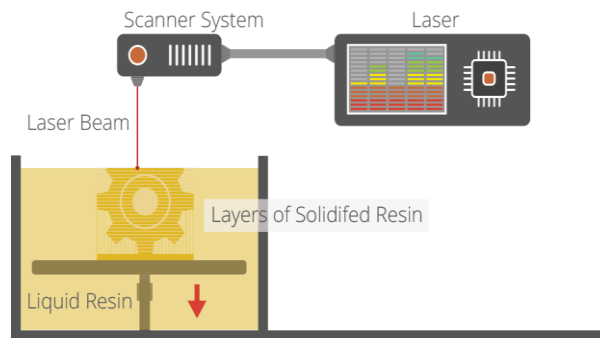


Figura 1.1 Impresión SL [3DPrinting, 2016]

Con este método se consiguen piezas de altísima calidad. Sin embargo, se desperdicia cierta cantidad de material en función al soporte de la pieza impresa.

1.2.2 Impresión por procesamiento de luz digital (DLP)

Impresión DLP, o en inglés *Digital Light Processing*, es un proceso similar al anterior en donde se trabaja con fotopolímeros¹. La principal diferencia es la fuente de luz. DLP utiliza una fuente de luz más convencional, como una lámpara de arco, con un panel de pantalla de cristal líquido o un dispositivo de espejo deformable, el cual se aplica a toda la superficie de la tina de resina de fotopolímero en una sola pasada. El ejemplo de este proceso se puede ver en la Figura 1.2.

Al igual que en el SL, el DLP produce piezas muy precisas con una excelente resolución, pero su similitud también incluye la estructura de soporte en la cual se desperdicia material. Sin embargo, una gran ventaja del DLP sobre el SL es que solo requiere una tina de resina poco profunda para facilitar el proceso, por lo que se produce menos residuos y menores costos de operación. [3DPrinting, 2016].

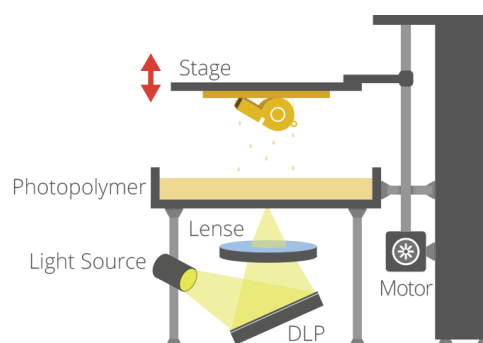


Figura 1.2 Impresión por DLP [3DPrinting, 2016]

¹ Un fotopolímero es una sustancia que sufre un cambio en sus propiedades por acción de la luz, formando un cambio físico entre la parte expuesta y la no expuesta

1.2.3 Impresión por Sinterización Selectiva por Láser (LS) y Fusión Selectiva por Láser (LM)

La impresión LS y LM, por sus siglas en inglés *Laser Sintering* y *Laser Melting* respectivamente, utilizan el láser como principal herramienta. El proceso de fabricación de la LS se observa en la Figura 1.3. La máquina, para fabricar una pieza, primero compacta el material con el que se va a construir el objeto, ya sea polvo de cerámica, cristal, nylon, o de metal, para el caso de LS. Acto seguido, un haz de luz impacta este polvo, lo funde y lo solidifica.

La gran ventaja de esta técnica es que el material que no ha sido utilizado ni fundido es almacenado en el mismo lugar donde se inició el proceso: el desperdicio es nulo. Otra ventaja es que las piezas fabricadas mediante estos procesos son más fuertes que las obtenidas mediante SL o DLP, aunque el acabado final y la precisión de las mismas no son inferiores [OpenFuture, 2016].

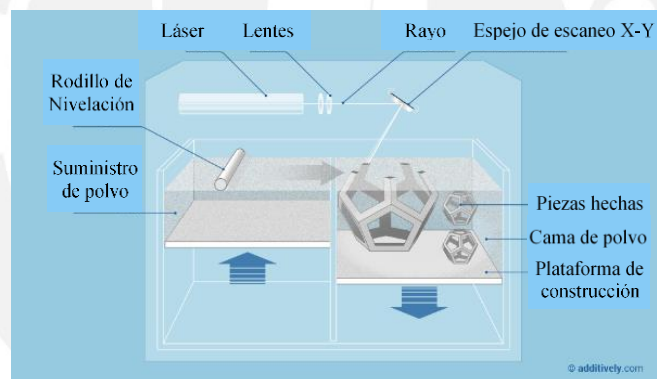


Figura 1.3 Impresión por LS ²

1.2.4 Impresión por deposición de material fundido (FDM)

Conocido como FDM por sus siglas en inglés *Fused Deposition Modeling*, esta tecnología es el método más común de impresión 3D usado en impresoras de escritorio [3DPrinting, 2016]. Este tipo máquina crea objetos mediante un proceso de fabricación de aditivos; es decir, las impresiones se crean en una sucesión de capas de la parte inferior hacia la superior mediante la deposición de un polímero fundido sobre una plataforma (ver Figura 1.4). El material se calienta hasta un estado casi líquido y se expulsa sobre la superficie plana en pequeños hilos que se solidifican al entrar en contacto con ésta.

² Laser Sintering (LS): <https://www.additively.com/en/learn-about/laser-sintering>.

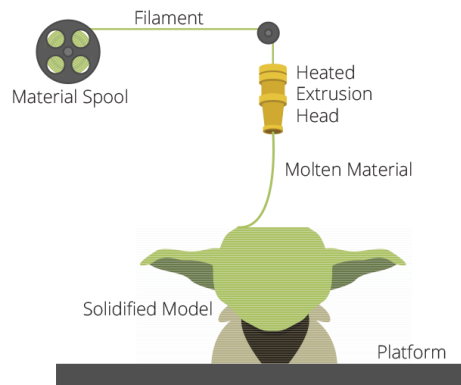


Figura 1.4 Impresión por FDM [3DPrinting, 2016]

Esta tecnología es rentable para productos en desarrollo y prototipos rápidos en pequeñas empresas y sectores educativos debido a que es capaz de fabricar piezas robustas de manera fiable [Hiemenz, 2011].

1.2.5 Impresión por inyección de aglutinante (BJ)

La impresión BJ, en inglés *Blinder Jetting*, es el sistema de impresión más parecido a la impresora de papel, ya que fabrica piezas mediante la inyección de un aglomerante (tinta). El proceso consiste principalmente en la pulverización de un aglutinante líquido sobre un lecho de polvo que luego se solidifica en sección transversal.

Esta tecnología posee grandes ventajas, ya que no requiere estructuras de soporte y además permite la impresión de una gran variedad de colores debido al uso de un aglutinante coloreado. Los materiales usados, para ser solidificados por el aglutinante, suelen ser yeso, arena, cerámica y polvo plástico.

Las piezas resultan con el acabado final directamente de la máquina. Sin embargo, éstas no son tan fuertes como las obtenidas mediante impresión por LS y requieren un post-procesamiento para mejorar su durabilidad [3DPrinting, 2016].

1.2.6 Impresión por inyección de material (MJ)

En las máquinas con tecnología MJ (*Material Jetting* en inglés), los verdaderos materiales para la fabricación de las piezas son inyectados selectivamente a través de múltiples cabezales de chorro. Estos materiales suelen ser fotopolímeros líquidos que se curan con un paso de luz UV a medida que se deposita cada capa.

La ventaja de este tipo de impresión es que se generan piezas precisas con un acabado suave. Sin embargo, una desventaja de esta tecnología es que requiere de una estructura de soporte que generalmente es hecha de un material diferente.

1.2.7 Impresión de fusión por haz de electrones (EBM)

Conocida como EBM por sus siglas en inglés *Electron Beam Melting*, este tipo de impresión es parecida a la LM, ya que en un principio la materia prima se encuentra en forma de polvo al interior de la máquina. Sin embargo, ésta funciona con un haz de electrones en lugar de un láser.

Las piezas se construyen capa por capa en un lecho de polvo. Estas finas capas de polvo metálico se funden selectivamente mediante un haz de electrones en condiciones de vacío. Esta tecnología es capaz de crear piezas totalmente densas en una variedad de aleaciones de metal, incluso para propósitos medicinales.

En total se presentaron siete tipos de tecnologías de impresión 3D en los párrafos anteriores. A partir de ellas, en la Tabla 1.2 se realiza una comparación de éstas.

Tabla 1.2 Tabla comparativa de las tecnologías de impresión 3D

Materiales	Tecnologías		
	Piezas hechas mediante polimerización	Piezas hechas mediante un agente de unión	Piezas hechas mediante fusión del material
Cerámica		BJ	LM
Metal			EBM
Arena			
Plástico	SL		FDM LS
Cera			MJ
MÁS BAJA		Durabilidad	MÁS ALTA
MÁS SUAVE		Acabado superficial	MÁS ALTA
MÁS ALTA		Detalles	MÁS BAJA
Prototipos / procesos indirectos		Aplicación	Piezas funcionales

1.3 Tipos de plástico utilizados en impresión 3D por Deposición de Material Fundido (FDM)

En la actualidad, el 95% del mercado de impresoras personales 3D por FDM utiliza dos materiales: ABS y PLA [Escobar, 2013]. Por tal motivo, este subcapítulo se centra en la definición de estos dos materiales. Además, en la Tabla 1.3 se realiza una comparación de sus características mecánicas.

1.3.1 Plástico ABS

El ABS es el nombre dado a una familia de termoplásticos³. El acrónimo deriva de tres monómeros para producirlos: acrilonitrino, butadieno y estireno. Este material posee propiedades mecánicas, tales como resistencia a la tracción y alargamiento a la rotura, adecuadas para su uso en impresiones 3D de prototipos funcionales, en donde se requieren materiales tenaces [Giang, 2017].

1.3.2 Plástico PLA

El PLA, *Polylactic Acid* en inglés, es un termoplástico biodegradable fabricado a partir de recursos renovables tales como el almidón o la caña de azúcar. Es uno de los bioplásticos más populares, usado en distintas aplicaciones que van desde tazas de plástico hasta implantes médicos [Giang, 2017].

En la Tabla 1.3, se presentan las propiedades mecánicas a 23°C de los plásticos mencionados [UL-ABS, 2017] [UL-PLA, 2017]. A partir de una comparación se observa que ambos materiales poseen resistencia a la tracción muy parecida; sin embargo, es con respecto al alargamiento en la rotura donde el ABS es mejor al PLA, ya que el primero se puede deformar antes de romperse hasta 4 veces más con respecto al segundo. Por ende, el ABS es más tenaz y, por tal motivo, más usado en la impresión de prototipos funcionales.

Otro factor importante es que no resulta conveniente reciclar PLA debido a su biodegradabilidad, mientras que ABS, sí, ya que no se degrada naturalmente. Por lo tanto, a largo plazo es más factible la fabricación de este último porque puede ser fácilmente reciclado, manteniendo sus propiedades mecánicas [Mantoux, 2004].

³ Los materiales termoplásticos hacen referencia a polímeros que se son maleables y flexibles a temperaturas relativamente altas.

Tabla 1.3 Tabla comparativa de plásticos a 23°C

	Métodos de prueba ASTM	ABS	PLA
Resistencia a la tracción (Rotura) (MPa)	D638	26.4 - 50	48.8 - 56.19
Alargamiento en la rotura (%)	D638	1 - 57	0.5 - 9.2
Módulo de tracción (GPa)	D638	1.7 - 2.82	2 - 3.54
Densidad (g/cm ³)	D792	1.03 - 1.11	1.24
Temperatura de transición vítrea (°C)	E1356	90 - 102	55 - 60
Reciclable	---	SI	NO
Biodegradable	---	NO	SI

1.4 Estadísticas del consumo de ABS en los laboratorios de la PUCP

La Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) cuenta con tres espacios académicos en donde se trabaja con tecnología de impresión 3D: El Laboratorio de Investigación en Biomecánica y Robótica Aplicada (LIBRA), Sala VEO y el Centro de Tecnologías Avanzadas de Manufactura (CETAM). En los siguientes puntos se explica brevemente las actividades que se realizan en cada uno de ellos y presentan datos obtenidos de una encuesta sobre el consumo de ABS realizada a los miembros de cada espacio académico.

1.4.1 Laboratorio de Investigación en Biomecánica y Robótica Aplicada (LIBRA)

LIBRA está enfocado al área de la investigación y para plasmar sus diseños se valen de recursos de fabricación digital, por lo que siempre se encuentra imprimiendo nuevos modelos 3D funcionales en plástico ABS [Romero, 2016] [Mio et al., 2017a] [Mio et al., 2017b].

De acuerdo con una encuesta realizada a los miembros del LIBRA en el primer bimestre del año 2017, se obtuvo datos mensuales promediados, los cuales se encuentran en la Tabla 1.4. Además, se pudo determinar que durante ese periodo de tiempo se consumió mensualmente 1.5 kg de plástico ABS.

1.4.2 Sala VEO

Sala VEO es un espacio dedicado a la exploración y aprovechamiento de las tecnologías de manufactura digital en 3D. Además, este ambiente está abierto no solo a la comunidad universitaria sino también al público externo. Por tal motivo, al igual que LIBRA, también se realizan una gran cantidad de impresiones por FDM.

Según información proporcionada por ingenieros de Sala VEO, durante el segundo mes del año 2017 se utilizaron 6.75 kg de ABS en total. Además, se obtuvo datos mensuales promediados que se encuentran en la Tabla 1.5.

1.4.3 Centro de Tecnologías Avanzadas de Manufactura (CETAM)

El CETAM, al igual que LIBRA, también se dedica al área de la investigación, pero en distintas áreas. En estas instalaciones se cuenta con una impresora 3D que trabaja solo con PLA. De acuerdo con los ingenieros a cargo de este laboratorio, se optó por este tipo de material en reemplazo del ABS debido a la toxicidad de éste y a que no se contaba con un sistema de reciclaje para el material contaminante.

Tabla 1.4 Datos de la encuesta en LIBRA

DATOS MENSUALES PROMEDIADOS					
Encuestado	Número total de piezas impresas	Número de piezas que salieron defectuosas en el proceso	Número de versiones impresas de una misma pieza	Tamaño promedio de la piezas impresas (mm)	Tamaño máximo de la piezas que se han impreso(mm)
N° 1	30	1	4	20x20x40	50x50x50
N° 2	25	4	3	20x20x40	80x80x40
N° 3	21	4	3	20x20x40	70x80x70
N° 4	15	3	3	60x40x40	70x40x40
N° 5	5	3	1	20x20x20	80x80x20
N° 6	15	1	10	50x30x30	80x50x50
N° 7	8	3	3	20x20x80	20x20x100
Total	119	19			
Promedio			3.85	30x24x41	64x57x53

Tabla 1.5 Datos de la encuesta en Sala VEO

DATOS MENSUALES PROMEDIADOS			
Número total de piezas impresas	Número de piezas que salieron defectuosas en el proceso	Tamaño promedio de la pieza impresa (mm)	Tamaño máximo de la pieza que se ha impreso(mm)
94	8	100x100x100	300x250x300

1.4.4 Resultados obtenidos

A partir de los datos de la Tabla 1.4 y la Tabla 1.5, se determina que del total de piezas impresas en el mes de febrero del 2017, el 16% se malograron durante la impresión en LIBRA y 8%, en Sala VEO. Es decir, en LIBRA 19 piezas de las 119 fabricadas salieron fallidas y en Sala VEO, 8 de las 94. Estos resultados se pueden observar en la Figura 1.5.

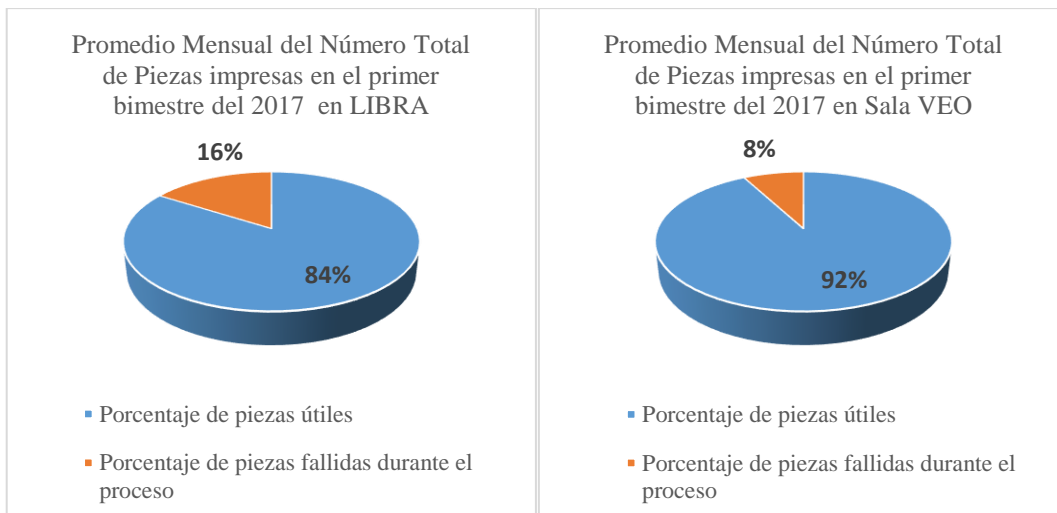


Figura 1.5 Porcentajes comparativos en LIBRA y Sala VEO

Además, se pudo determinar que en LIBRA en promedio se tiene que imprimir un 3.85 veces un mismo prototipo para obtener el final, por lo que se puede determinar que, de las 100 piezas útiles, solo 24 piezas terminan siendo los prototipos finales y el resto, 76, se convierten en material en desuso. Estos valores están representados en la Figura 1.6 y a partir de ellos se concluye que del total de las piezas fabricadas solo un 22% fueron útiles.

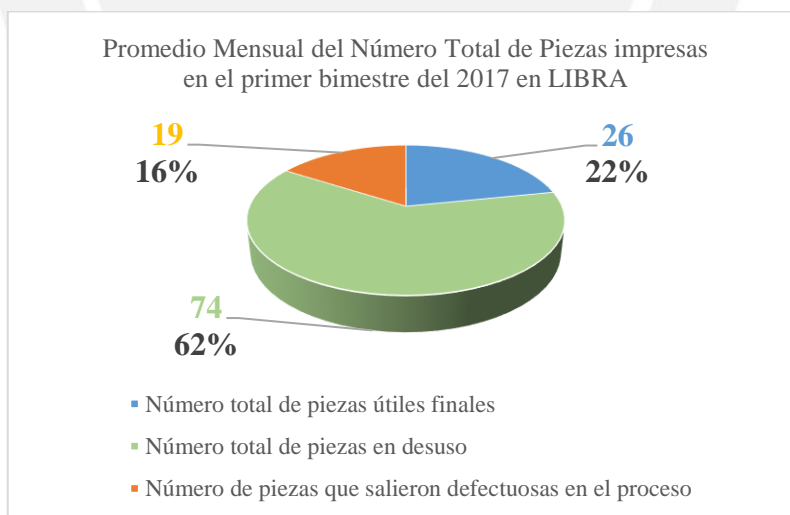


Figura 1.6 Gráfico comparativo de las piezas impresas en LIBRA

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

En el siguiente capítulo se presenta distintos tipos de carretes comerciales de plástico ABS, máquinas recicladoras de plástico en general, y la instrumentación y tecnología presente en ellas.

2.1 Tipos de carretes comerciales de plástico ABS

Se pudo determinar que entre los diferentes tipos de carretes de plástico ABS que son vendidos en el mundo predominan los filamentos de diámetro 1.75, 2.85 y 3.00mm. Los datos técnicos más relevantes de cada marca están presentes en la Tabla 2.1. En ella se realiza una comparación de las distintas características que ofrece cada producto.

Tabla 2.1 Tabla comparativa de marcas de filamentos ABS

	Filamento		Temperatura de Impresión (°C)	Empaquetado	Precio ⁴
	Diámetro	Tolerancia del diámetro			
eSUN ABS	1.75mm	± 0.05mm	220-260	1 kg/carrete	\$60
	3.00mm	± 0.10mm			
MatterHackers PRO Serie	1.75mm	± 0.05mm	230-240	1 kg/carrete	\$39
	3.00mm	± 0.10mm			
Fillamentum ABS Extrafill	1.75mm	± 0.05mm	220-240	0.75kg/carrete	\$23
	3.00mm	± 0.10mm			
3DPrima	1.75mm	± 0.05mm	230-240	0.75kg/carrete	\$32
	2.85mm	± 0.10mm			
FormFutura ABSpro	1.75mm	± 0.05mm	245-275	0.5kg/carrete	\$32
	2.85mm	± 0.10mm			
IC3D	1.75mm	± 0.10mm	220-230	0.9kg/carrete	\$33
	3.00mm	± 0.10mm			

⁴ Los precios se obtuvieron a partir de las páginas oficiales de cada producto en el mes de marzo del 2017. En el caso del producto eSUN, que es con el que se trabaja en LIBRA, se determinó el precio a partir del costo de adquisición de este para la universidad.

2.2 Máquinas recicladoras de plástico

En el caso de la fabricación de filamentos de ABS, el proceso que sigue el plástico a ser reciclado es el de triturado, extruido y preparación para su entrega. Dentro de este subcapítulo se presenta las distintas máquinas trituradoras, extrusoras y de acondicionamiento para la entrega del producto final.

2.2.1 Máquinas trituradoras de plástico

Existen diversos tipos de máquinas trituradoras capaz de moler una gran variedad de plásticos. UNI-SHEAR SR300, Precious Plastic y Filabot Industrial Reclaimer son tres de ellas presentes en el mercado. A continuación, se desarrolla las características de estas máquinas y en la Tabla 2.2 se presenta una comparación técnica de ellas.

2.2.1.1 Filabot Industrial Reclaimer

Filabot Industrial Reclaimer es una unidad de procesamiento de plástico de calidad comercial que granula el material hasta un tamaño de partícula que otra máquina de la misma marca pueda extruir. Esta unidad mide 51" (1300 mm) de altura y tiene una garganta de alimentación de 13.5x6.3" (343x160 mm).

Es lo suficientemente potente como para reciclar sin esfuerzo las impresiones 3D fallidas al 100% de relleno, así como otros materiales plásticos, permitiendo que la empresa recupere estos recursos para volverlos a convertir en filamentos 3D. La unidad procesa material a una velocidad de hasta 170 lb/h (77.11 kg/h), evitando la degradación térmica del regrind⁵. En la Figura 2.1 se tiene una imagen referencial de la máquina.



Figura 2.1 Filabot Industrial Reclaimer⁶

⁵ Regrind es el material que ha pasado por un proceso de cambio mecánico como el de trituración o cortado.

⁶ Filabot Industrial Reclaimer: <https://www.filabot.com/collections/filabot-core/products/filabot-industrial-grinder>

2.2.1.2 UNI-SHEAR SR300

La UNI-SHEAR es una trituradora de rodillo dentado simple (ver Figura 2.2) que reduce el tamaño de materiales como metal, papel, plástico, papel de aluminio, espuma y más. Puede funcionar como una máquina autónoma o como una trituradora secundaria para reducir aún más el tamaño del material. El SR300 posee velocidad ajustable, sensor de presión de rodillo, y cuchillas reversibles del mismo para moler con eficacia el material en pequeñas partículas consistentes en un solo paso.



Figura 2.2 Rodillo dentado de la máquina UNI-SHEAR SR300⁷

2.2.1.3 Precious Plastic Shredder

Precious Plastic Shredder es una máquina *open source*⁸ capaz de triturar distintos tipos de plástico en piezas pequeñas (ver Figura 2.3). Posee un tipo de trituración mediante cuchillas de eje simple y una malla metálica mediante la cual se puede seleccionar el tamaño de salida del material reducido [HAKKENS 2017]



Figura 2.3 Precious Plastic Shredder [HAKKENS, 2017]

⁷ UNI-SHEAR SR300: https://www.ssiworld.com/en/products/uni-shear_shredders/uni_shear_sr300.

⁸ Open source hace referencia a software distribuido y desarrollado libremente, es decir, de manera gratuita.

En la siguiente tabla se presenta una comparación técnica de las máquinas trituradoras mencionadas en los puntos anteriores.

Tabla 2.2 Comparación técnica de las máquinas trituradoras

	Filabot Industrial Reclaimer	UNI-SHEAR SR300	Precious Plastic
Tipo de trituración	Mediante cuchillas de doble eje	Mediante rodillo dentado simple	Mediante cuchillas de eje simple
Tasa de procesamiento	170lb/h	No especificado	No especificado
Potencia de motor	3kW	30kW – 125RPM	2kW – 70RPM
Tamaño del conducto de alimentación (mm)	343x160	785x840	124x148.5
Tamaño total (mm)	610x610x1300	2750x2005x2565	600x280x1142
Peso de la máquina (kg)	272	1800	40
Costo	\$6200	No especificado	Open Source

2.2.2 Máquinas extrusoras de plástico ABS

Existen diversos tipos de máquinas extrusoras de plástico capaces de fabricar filamentos de una sección transversal uniforme con una tolerancia menor a 0.1mm. Entre ellas están Filabot EX2 Filament Extruder, FilaFab PRO 350 EX y Extrusora de filamentos Filastruder. En los siguientes puntos se desarrolla las características de estas tres máquinas y se presenta una comparación técnica de éstas en la Tabla 2.3.

2.2.2.1 Extrusora de filamentos Filastruder

Esta máquina fabrica filamentos de plástico mediante su extrusión empleando un mecanismo de husillo único (ver Figura 2.4). Además, posee un control de motor capaz de controlar la tensión (velocidad) y la corriente (torque) mediante un controlador PWM⁹ de circuito cerrado. Este controlador también muestra la tensión de entrada, y la tensión, corriente y potencia del motor.

Posee un filtro en la boquilla de fundido, el cual evita que partículas mayores de 200µm pasen a través del filamento. Como resultado, el filamento producido a través de una tobera de filtro de fusión está libre de suciedad o escombros que de otro modo obstruirían el extremo caliente de una impresora 3D.

⁹ El PWM es la modulación por ancho de pulsos de una señal o fuente de energía. Es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica, ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.

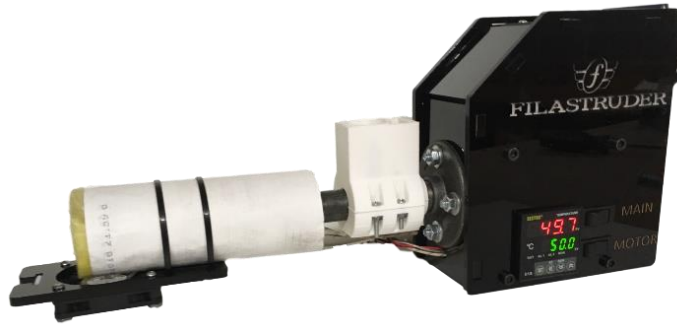


Figura 2.4 Extrusora de filamentos Filastruder [Filastruder, 2017]

Además, el ABS obtenido posee generalmente tolerancias en el diámetro de $\pm 0.05\text{mm}$ [Filastruder, 2017].

2.2.2.2 Extrusora de filamentos Filabot EX2

En la Figura 2.5 se observa la máquina Filabot EX2. Éste es el extrusor de filamentos más avanzado que posee la marca Filabot. Cuenta con un tornillo de extrusión de tres etapas fabricado de acero de alto carbono endurecido y pulido. Este tornillo patentado está diseñado para presurizar plásticos durante el proceso de extrusión, ayudando así en el control del diámetro y aumentando la producción general. La capacidad de mezcla del tornillo es mejorada mediante el uso de una sección de compresión progresiva, la cual aplica una fuerza de corte entre el polímero y la pared del cilindro.

El EX2 también cuenta con un control de velocidad de extrusión, que es exclusivo para este modelo. La tarjeta de control de velocidad incluye un módulo de control automático de voltaje variable. Ésta fue diseñada para regular las precisas revoluciones que el tornillo requiere mientras las fuerzas fluctúan en el proceso de extrusión.



Figura 2.5 Extrusora de filamentos Filabot EX2 [FilabotEX2, 2017]

2.2.2.3 Extrusora FilaFab PRO 350 EX

La máquina FilaFab PRO 350 EX, representada en la Figura 2.6, utiliza un mecanismo de husillo único para extruir el plástico a procesar. Además, esta extrusora puede fabricar filamentos de materiales termoplásticos [D3D Innovations, 2015].



Figura 2.6 Extrusora FilaFab PRO 350 EX [D3D Innovations, 2015]

En la siguiente tabla se realiza una comparación técnica de las tres máquinas extrusoras de filamentos ABS desarrolladas en el punto 2.2.2.

Tabla 2.3 Tabla comparativa de máquinas extrusoras

Especificaciones Técnicas	Extrusora de filamentos Filastruder	Extrusora de filamentos Filabot EX2	Extrusora FilaFab PRO EX 350
Tipo de extrusión	Mediante un solo husillo	Mediante un solo husillo	Mediante un solo husillo
Tamaño (mm)	457x152x102	460x180x240	640X164x240
Controlador de temperatura programable (°C)	Hasta 260	Hasta 450	Hasta 250
Tasa de extrusión	10-36 in/min o de 5 a 8 h/kg	2 lb/h o 251 in/min de filamento de 1.75 mm	0.8 kg/h
Velocidad del tornillo de alimentación (RPM)	No especificado	0 a 35	5 a 30
Tolerancia del filamento (mm)	± 0.05	± 0.05	± 0.05
Potencia máxima de consumo (W)	60	500	600
Ruido (dB)	52	No especifica	Menor a 70
Peso (kg)	No especificado	13	12
Costo	\$300.00	\$2,500.00	\$1,395.00

2.2.3 Máquinas acondicionadoras para presentación final del material

Para obtener el material final para las impresoras 3D por FDM, los filamentos de plástico ABS son envueltos en un carrete. Para realizar este proceso, se utilizan máquinas enrolladoras de cable automáticas o manuales. A continuación, se presentan las enrolladoras Filabot Spooler y FilaWinder.

2.2.3.1 Filabot Spooler

En la Figura 2.7 se visualiza la máquina Filabot Spooler. Este es un sistema enrollador de filamentos de escritorio. Es complementaria para los sistemas de extrusión de la marca Filabot. Además de enrollar el filamento extruido, esta unidad permite ajustar con precisión el diámetro de extrusión para las tolerancias requeridas. Esto se consigue ajustando la velocidad de las ruedas de extracción, que extraen el filamento de la extrusora.

Esta máquina puede enrollar filamentos de los siguientes diámetros: 1.75, 2.75 y 3.00mm. Las ruedas extractoras han sido diseñadas para ser no compresivas, lo que significa que preservan la calidad de la extrusión. Este modelo actualizado cuenta con un mecanismo de desplazamiento variable para distribuir uniformemente el filamento en el carrete, una placa de circuito actualizada para la entrega de potencia más suave posible y ejes de rodillos inoxidables que se deslizan sobre rodamientos sellados. Posee un costo de adquisición de \$1200.00 dólares americanos.



Figura 2.7 Enrolladora de filamentos Filabot Spooler¹⁰

¹⁰ Filabot Spooler: <https://www.filabot.com/products/filabot-spooler?variant=30972850180>.

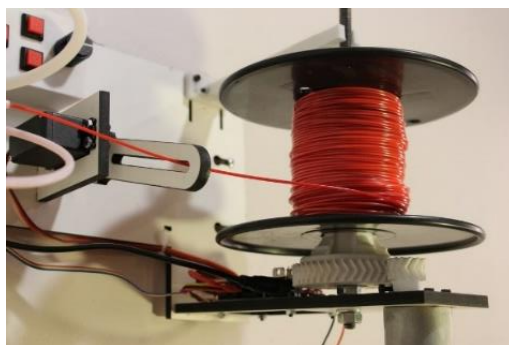


Figura 2.8 Enrolladora de filamentos FilaWinder¹¹

2.2.3.2 FilaWinder

FilaWinder bobina el filamento de ABS mientras éste se extruye. El filamento sigue una trayectoria constante e inmutable de la extrusora al enrollador, lo que facilita la producción de filamentos de calidad profesional. Como se puede observar en la Figura 2.8, se utiliza dos motores, uno para enrollar el filamento y otro para guiar la posición de éste en el carrete para que no se agrupe en el medio. El usuario puede controlar en rango de movimiento de este último motor de acuerdo al ancho del carrete. Posee un costo de adquisición de \$170.00 dólares americanos.

2.3 Instrumentación y tecnología

En esta sección se presenta los principales métodos de trabajo y tecnologías usadas en las máquinas mencionadas en el subcapítulo 2.2. Dentro de ellos están los tipos de trituración, extrusión, acondicionamiento para la entrega del material final y demás configuraciones de estos sistemas.

2.3.1 Tipos de triturado de plástico

Existen distintos tipos de configuración de acuerdo al tamaño del material a triturar. Por ejemplo, se tiene las de eje simple, eje doble y de cuatro ejes.

2.3.1.1 De eje simple

Como se observa en la Figura 2.9, este sistema requiere solo de un acople para la transmisión de movimiento hacia el eje. Este tipo de configuración es usado para triturar materiales como plásticos en general.

¹¹ FilaWinder: <https://www.filastruder.com/products/filawinder>.

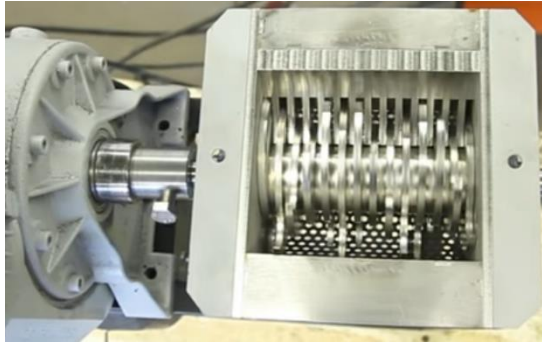


Figura 2.9 Trituradoras de eje simple¹²

Posee la ventaja de que los retazos de material son triturados repetidamente hasta que son lo suficientemente pequeños para atravesar una malla metálica que está ubicada debajo del eje con las cuchillas. De esta manera se obtiene un tamaño de granulo de material casi uniforme. Además, su implementación es más económica debido a que está compuesto por un menor número de piezas que los otros tipos de configuraciones.

2.3.1.2 De doble eje

De acuerdo a la Figura 2.10, esta configuración requiere de engranajes para la transmisión del movimiento hacia los dos ejes. Para este caso, también se puede obtener un tamaño de granulo uniforme si se le agrega una malla metálica debajo de los dos ejes trituradores.

Para su implementación se requiere una mayor cantidad de piezas que en la de eje simple. Sin embargo, posee la ventaja de ser más robusto, ya que puede triturar piezas de mayor espesor que el de la configuración anterior [Prosino, 2017].

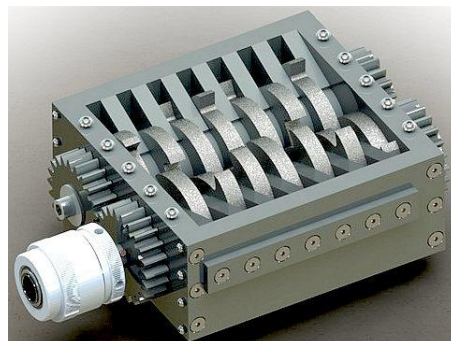


Figura 2.10 Trituradora de doble eje¹³

¹² Precious Plastic Shredder [Captura de pantalla]: <https://www.youtube.com/watch?v=VFIPXgrk7u0>

¹³ Plastic Shredding: http://www.bluebird-electric.net/oceanography/Ocean_Plastic_International_Rescue/Ocean_Rescue_International_Pictures/shredder-mini-head-assembly-plastic.JPG.



Figura 2.11 Trituradora de cuatro ejes¹⁴

2.3.1.3 De cuatro ejes

Este tipo de configuración emplea cuatro ejes con cuchillas para trituración (ver Figura 2.11). Esta distribución es aún más robusta que la de doble eje ya que puede triturar materiales de mucho mayor espesor. Sin embargo, su implementación es mucho más costosa que los otros dos tipos, ya que requiere de más elementos. Usualmente no es usado para triturar plástico, sino materiales como llantas o desechos electrónicos.

2.3.2 Técnicas de extrusión de plásticos

La extrusión de plásticos es un proceso mecánico en donde la resina es fundida por acción de temperatura y fricción en un compartimento cilíndrico, y luego es comprimida y forzada a pasar por un dado de extrusión que le proporciona una determinada forma transversal. Existen diversas técnicas para extruir polímeros. Dentro de ellas están las extrusoras de desplazamiento positivo y las de fricción viscosa [Suarez, 2015].

2.3.2.1 Extrusoras de desplazamiento positivo

Son utilizadas para una extrusión directa. En este caso, la compresión se da mediante la acción de un pistón o ariete de prensa. Existen dos tipos de extrusión de desplazamiento positivo: Extrusoras de pistón y bombas de extrusión.

En las extrusoras de pistón, la extrusión se realiza por un pistón que es accionado de manera hidráulica o mecánica. Estas máquinas producen piezas de longitud determinada, debido a la discontinuidad del proceso.

¹⁴ SHERD-TECH: <http://shred-tech.com/portfolio-items/stq-75-metric/>

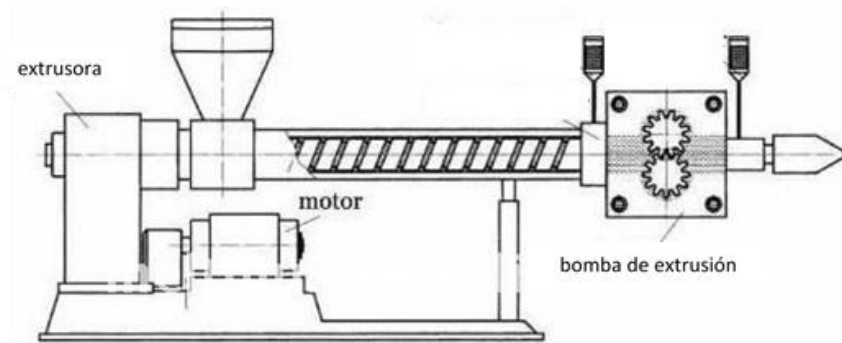


Figura 2.12 Bomba de extrusión¹⁵

Las bombas de extrusión están conformadas por un par de ruedas dentadas engranadas las cuales están alojadas en una carcasa. Como se observa en la Figura 2.12, el polímero solo es transportado sin realizar compresión alguna hacia el lado de succión de la bomba de extrusión. El flujo de material es proporcional a la frecuencia de rotación de los discos dentados, de esta manera se obtiene un flujo constante de polímero extruido. Se uso es mayormente para proceso industrializados.

2.3.2.2 Extrusora de fricción viscosa

Mediante esta técnica, la fricción generada sobre el material eleva su temperatura, con lo cual lo convierte en un fluido viscoso capaz de ser extruido. La extrusión de tornillo y rodillos se encuentran dentro de esta categoría.

Las extrusoras de tornillo son conocidas también como extrusoras de husillo. Posee un tornillo helicoidal que transporta los gránulos de plástico hacia un extremo de la máquina. Como se observa en la Figura 2.13, esta técnica posee tres zonas de trabajo.

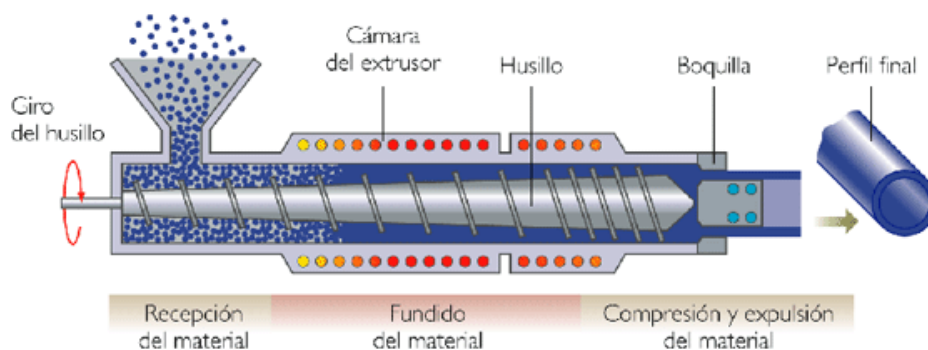


Figura 2.13 Extrusión con un solo husillo¹⁶

¹⁵ Gear Pump for Plastic extruding: http://www.melpump.net/gear-pump/Gear_pump_for_plastic_extruding_49.html

¹⁶ Tecnología-Informática: <http://www.tecnologia-informatica.es/metodos-para-fabricar-plasticos/>.

La primera es la recepción del material, en donde los gránulos sólidos de plástico son depositados. La segunda es la de fundición, en la que el polímero es fundido por acción del incremento de la temperatura. Y la última es la de compresión y expulsión, en la cual el plástico es comprimido debido a que está sujeto a fricción y esfuerzos cortantes por acción del aumento de la sección transversal del husillo. Luego, éste es expulsado a través de una boquilla de sección transversal determinada obteniéndose así el material extruido.

Las extrusoras de rodillos consisten en dos rodillos horizontales cuyos ejes son paralelos entre sí y giran en sentido opuesto. Estos cilindros son calentados por una fuente externa. Mediante esta máquina se obtiene una “extrusión plana” empleada en la fabricación de láminas y películas de polímeros. Esta técnica no es usada en la creación de filamentos de plástico.

2.3.3 Tipos de herramientas de corte para trituración

Existen diversos tipos de herramientas para triturar plásticos. Dentro de ellos destacan las chuchillas y de rodillos dentados.

2.3.3.1 Cuchillas trituradoras

Este tipo de herramienta posee la ventaja de emplear un eje con cuchillas intercambiables. Existen diversos tipos de cuchillas como las presentes en la Figura 2.14. La selección de éstas depende del tipo y tamaño de material a triturar.

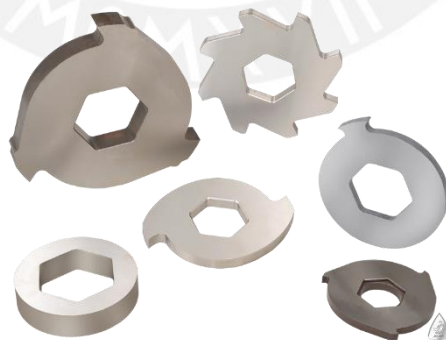


Figura 2.14 Tipos de chuchillas trituradoras¹⁷

¹⁷ Jiujuan Knives: <http://www.jiujuan.com.tw/en/Pair-axis-shredder-knives.html>

2.3.3.2 Rodillos dentados

Esta herramienta posee dientes intercambiables. Representa una gran ventaja con respecto a la herramienta anterior, ya que al momento del desgaste de los dientes no existe la necesidad de desmontar todo el eje para cambiarlos, basta solo con cambiar la pieza gastada. Sin embargo, éstas no pueden trabajar con sólidos muy duros y, además, su implementación puede ser más costosa que el de las cuchillas trituradoras.

Como se observa en la Figura 2.15, esta configuración funciona de manera similar que el de configuración mediante cuchillas de eje simple. Puede triturar diferentes materiales como plástico, madera y caucho.



Figura 2.15 Trituradora mediante rodillo dentado simple¹⁸

¹⁸ Weiku: http://www.weiku.com/products/7238228/lump_Film_roller_plastic_blocks_single_shaft_plastic_shredder.html

CAPÍTULO 3

DISEÑO CONCEPTUAL

En el siguiente capítulo se expone los requerimientos del sistema de reciclado, el cual comprende la trituración, extrusión y acondicionamiento para la presentación final del material. También se elabora la estructura de funciones del diseño mecatrónico y se realiza los conceptos de solución de éste. Finalmente, se elige la alternativa óptima, seleccionada mediante criterios de evaluación técnicos y económicos, para la elaboración del proyecto definitivo en el siguiente capítulo. Para el desarrollo del diseño mecatrónico del sistema se emplea la normativa alemana VDI 2206.

3.1 Requerimientos del sistema

A continuación, se describen los requerimientos del sistema por cada parámetro establecido y en la Tabla 3.1 se muestra un resumen de éstos.

3.1.1 Función principal

El sistema busca reciclar y crear material nuevo para impresión 3D por FDM. Para realizar dicho proceso, primero se tritura el plástico ABS; luego se extruye los gránulos obtenidos de la etapa anterior; y, finalmente, para el acondicionamiento para la presentación final del material, se envuelve el filamento obtenido alrededor de un carrete intercambiable. Estos filamentos pueden tener distintos diámetros como 1.75, 2.85 y 3mm con distintos rangos de tolerancia según lo observado en el estado de la tecnología.

Por lo tanto, la función principal del sistema implica trituración de las piezas de plástico ASB en desuso, su extrusión en filamentos de distintos tipos de diámetro y su

acondicionamiento para la presentación final del material, enrollándolo en carretes. De esta manera el sistema será capaz de fabricar material listo para poder ser usado en impresoras 3D por FDM con una tolerancia máxima de ± 0.1 mm en su diámetro nominal.

3.1.2 Materia Prima

Según las encuestas descritas en los antecedentes, la mayoría de las piezas fabricadas en los espacios académicos de la universidad fueron de plástico ABS y de un tamaño promedio de 100x100x100mm. Por esta razón, el sistema es diseñado para reciclar principalmente piezas de este material y de dimensiones menores a los 100x100mm de área transversal. Además, el plástico a reciclar debe estar libre de agentes contaminantes como pinturas u otras sustancias que comprometan la calidad del filamento extruido.

3.1.3 Geometría

El sistema estará ubicado sobre una de las mesas de trabajo en uno de los espacios académicos de la PUCP debido a su diseño está orientado para dicha universidad. Además, éste deberá ocupar el menor espacio posible y caber dentro del área de trabajo de dicho escritorio. Por esta razón, tendrá dimensiones menores a los 1000x1000x1000mm.

3.1.4 Cinemática

En relación con las máquinas extrusoras descritas en el estado del arte, se determinó que se extruye en promedio 0.5kg de plástico ABS por hora de trabajo. Por tal motivo, el sistema será capaz de fabricar mínimamente 0.5 kg de plástico ABS por hora de trabajo del mecanismo de extrusión.

3.1.5 Energía

El sistema funcionará con una alimentación por corriente alterna de 220V y 60 Hz, la de la red eléctrica en el Perú ya que la máquina está diseñada para trabajar dentro de la universidad.

3.1.6 Materiales

La máquina estará posicionada sobre una mesa de trabajo en un espacio académico de la universidad, por lo que deberá de ser lo más ligera posible para ser soportada por una de estas mesas. Además, el sistema estará expuesto un ambiente corrosivo, ya que estará

ubicado en la universidad PUCP, la cual se encuentra cerca al mar. También estará sometido al desgaste mecánico producto de los procesos a realizar. Por estas razones, la recicladora deberá estar hecha de los materiales más livianos posibles, resistentes y anticorrosivos.

3.1.7 Señales

El sistema posee tres etapas: Trituración, extrusión y enrollamiento del material creado. Estos procesos pueden ser independientes entre sí. Por tal motivo, se contará con una interfaz para controlar o monitorear cada proceso de la máquina.

3.1.8 Seguridad

La máquina contará con una superficie que aisle los mecanismos de cada proceso, y que permita introducir el material a reciclar en la primera etapa de la máquina y colocar la parte inicial del filamento extruido en el carrete para su enrollamiento automático. Esto se debe a que los procesos para el reciclado de los polímeros pueden lesionar al operario. En el caso de la trituradora, la persona puede introducir partes de su cuerpo en el mecanismo de trituración. Y con respecto a la extrusora, esta trabaja a temperaturas mayores a los 200°C, por lo cual existe riesgo de que el operario sufra quemaduras.

También, poseerá conmutadores mecánicos de encendido, apagado y emergencia. Además, tendrá un sistema de apagado automático para la protección de los circuitos y mecanismos de la máquina.

3.1.9 Ergonomía

El usuario tendrá acceso visible hacia los controles para operar la máquina. Para triturar los materiales de plástico, solo deberá colocar las piezas en la etapa inicial de la unidad. Y para enrollar el filamento, podrá introducir la mano de manera segura dentro de la estación para realizar dicha acción. Estos requerimientos se deben a que el usuario interactuará con el sistema al momento de controlarlo, introducir el plástico a reciclar y colocar la parte inicial del filamento en el carrete para su enrollado automático

3.1.10 Fabricación

El sistema a diseñar es un prototipo de tres estaciones interconectadas. Debido a esto, deberá ser fabricado como tres estaciones intercambiables que puedan ser ensambladas

en una sola. Además, podrá ser fabricado en un taller local con herramientas de prototipado rápido como impresoras 3D, tornos o fresas CNC.

3.1.11 Montaje

Como se mencionó en el punto anterior, la máquina consta de tres etapas conectas. Por tal motivo, podrá ensamblarse cada estación por separado e incorporarse como tal dentro de la máquina general.

3.1.12 Uso

El operario deberá saber cómo operar la máquina en general, así como cada una de las partes que la conforman. Esto se debe que el sistema producirá filamento de ABS enrollado en un carrete y para realizar dicha tarea, el material a reciclar realizará un proceso de tres etapas secuenciales dependientes entre sí. Por lo tanto, la máquina operará de forma adecuada cuando las tres estaciones en donde se realiza cada tarea se encuentren totalmente operativas y funcionen de manera correcta.

3.1.13 Mantenimiento

La máquina podrá ser desmontada por partes para el respectivo mantenimiento de cada estación y de los componentes que las comunican debido a la característica modular de la misma.

3.1.14 Transporte

El diseño de este sistema consta en una máquina compacta para su uso sobre un escritorio, la cual puede ser trasladada de un ambiente de trabajo a otro. Por tal motivo, la máquina es diseñada para ser transportada por un mínimo de dos adultos jóvenes, las cuales cargarán el peso máximo estipulado en la Ley N° 29088 del Ministerio del Trabajo del Perú.

En la Tabla 3.1 se presenta un resumen de las catorce categorías de los requerimientos del sistema mencionados anteriormente.

Tabla 3.1 Resumen de los requerimientos de la máquina

Categoría	Requerimiento
Función principal	<ul style="list-style-type: none"> - Creación de filamentos de plástico ABS de cualquier tipo de diámetro comercial menor a los 3mm con una tolerancia de ± 0.1mm. - Enrollamiento del material extruido alrededor de un carrete para su futuro uso en la impresión 3D.
Materia prima	<ul style="list-style-type: none"> - Piezas de plástico ABS de sección transversal menor a 100x100mm
Geometría	<ul style="list-style-type: none"> - La máquina deberá caber sobre una mesa de trabajo del laboratorio LIBRA. - La máquina deberá tener dimensiones menores a 10000x1000x1000mm
Cinemática	<ul style="list-style-type: none"> - La máquina procesará mínimamente 0.5 kg de plástico por cada hora de trabajo.
Energía	<ul style="list-style-type: none"> - La alimentación de la máquina será de 220v y 60 Hz
Materiales	<ul style="list-style-type: none"> - Materiales livianos, resistentes y anticorrosivos
Señales	<ul style="list-style-type: none"> - Interfaz para controlar o monitorear cada proceso de la máquina.
Seguridad	<ul style="list-style-type: none"> - Carcasa que aisle los mecanismos de cada proceso. - Conmutador mecánico de encendido y apagado - Conmutador mecánico de emergencia - Sistema automático de apagado.
Ergonomía	<ul style="list-style-type: none"> - Acceso visible hacia los controles de la máquina - Evitar que el usuario introduzca partes de su cuerpo dentro de la estación de triturado.
Fabricación	<ul style="list-style-type: none"> - Característica modular de la máquina - Fabricado en taller local
Montaje	<ul style="list-style-type: none"> - Ensamblado por estaciones y acoplado de cada una de éstas en la máquina general.
Uso	<ul style="list-style-type: none"> - El usuario deberá conocer como operar cada estación de la máquina, así como ésta en general.
Mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad de brindar mantenimiento de cada estación por separado
Transporte	<ul style="list-style-type: none"> - Podrá ser transportada por un mínimo de dos adultos jóvenes que carguen el peso máximo según Ley N° 29088 del Ministerio de Trabajo del Perú.

3.2 Estructura de funciones:

La estructura de funciones es un proceso de abstracción que evita el bloqueo de nuevas ideas y la predisposición de ideas fijas obtenidas durante la comprensión de la solicitud del diseño.

3.2.1 Abstracción: Caja negra (Black-Box)

La caja negra representa cualquier función total o parcial de un proceso técnico. Posee tres tipos de entradas y salidas: Señales, energía y materia. Estas pueden ser cuantificables tanto en calidad como en cantidad [Barriga, 2014]. En la Figura 3.1 se presenta el Black-Box del sistema mecatrónico a diseñar.

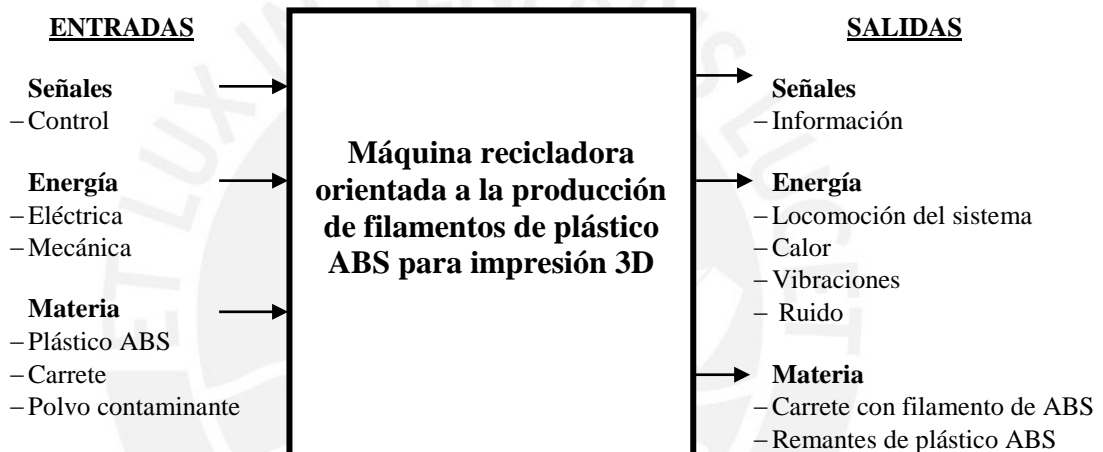


Figura 3.1 Caja negra del sistema

3.2.2 Fijación de los procesos técnicos

En base a la transformación de las magnitudes de entrada de la caja negra del sistema, es necesario fijar procesos técnicos. Para realizar dicho proceso, se tienen cuatro fases: Preparación, ejecución, control y fase final.

- Preparación:

A continuación, se especifican las condiciones iniciales del proceso:

- Energizar controlador
- Energizar los componentes.
- Colocar carrete en la estación de enrollado.
- Encender máquina en general.

- Ejecución:

El proceso a realizar por la máquina recicladora se describe en la siguiente lista.

- Colocar la pieza en la recepción de la estación de triturado.
- Triturar piezas de plástico ABS.
- Dosificar los gránulos triturados de plástico hacia la estación de extrusión.
- Extruir filamentos de plástico ABS.
- Enfriar el filamento extruido.
- Medir el diámetro del filamento extruido.
- Colocar la parte inicial del filamento en el carrete.
- Enrollar filamento alrededor del carrete seleccionado.

- Control:

Los procesos de control que el sistema realiza son los siguientes.

- Verificar el atasco de material a reciclar en la estación de triturado.
- Censado de la temperatura de la cámara de extrusión de la máquina.
- Control de la velocidad de extrusión.
- Control del diámetro del filamento extruido.
- Control de la velocidad de enrollado del filamento.

- Fase final:

En la fase final de la máquina se obtendrá el filamento de plástico ABS enrollado en un carrete para su uso en la impresión 3D por FDM.

3.2.3 Representación de la estructura de funciones

En la visualización del proceso que sigue el sistema de reciclado y la interacción entre las señales de entrada y las de salida, se emplean bloques debido a su versatilidad al momento de establecer conexiones.

La Figura 3.2 muestra las conexiones de las funciones y sub-funciones de los procesos mecánico, electrónico y de control que realiza la máquina recicladora. Además, separa y señala las tres etapas que el sistema posee.

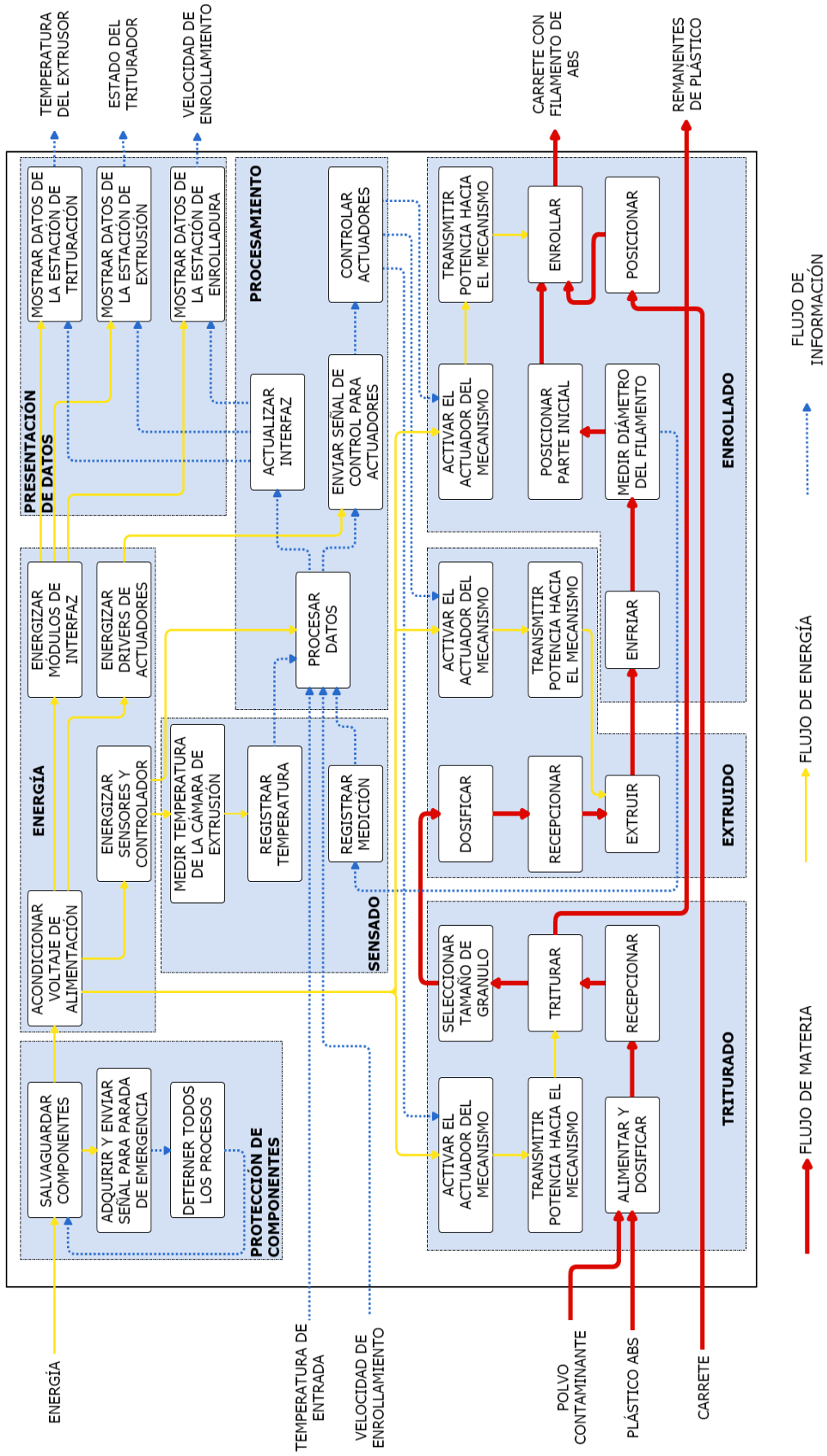


Figura 3.2 Diagrama de la estructura de funciones

3.3 Concepto de solución

El concepto de solución seleccionado es mostrado en la Figura 3.3. Para obtener esta solución se emplea la matriz morfológica presente en el Anexo A. Esta matriz permite mostrar distintas alternativas de solución a cada una de las funciones establecidas. Entonces, a partir de la combinación de cada una de estas alternativas se obtienen tres conceptos de solución (ver Anexo B). En la selección del concepto óptimo se realiza una evaluación técnica y económica descrita en el Anexo C, a partir de la cual se obtiene la solución óptima presente a continuación.

En el concepto de solución seleccionado se determina que la alimentación y dosificación de la máquina se da manera manual. Luego de este proceso se tiene la recepción de las piezas en la estación de triturado, la cual se da mediante una tolva que se encarga de posicionar la pieza para ser triturada. El mecanismo de trituración emplea cuchillas de eje simple, las cuales son accionadas por un motor DC mediante una transmisión por faja. Durante este proceso, para seleccionar el tamaño de gránulo de plástico triturado, se emplea una rejilla metálica que solo permite el paso de material de área menor a la de las divisiones de ésta.

En la siguiente estación, el material triturado es dosificado y recepcionado mediante la tolva de la estación de extrusión. Dentro de la cámara extrusora, el filamento es creado a partir de la acción de un extrusor de husillo simple. Éste es accionado por un motor DC mediante una transmisión por faja. Además, para realizar este proceso, el cilindro extrusor es calentado a temperaturas de hasta 230°C mediante resistencias eléctricas tipo.

Una vez obtenido el filamento extruido, el enfriamiento de éste se da mediante un sistema de ventiladores para realizar la verificación de la tolerancia de su diámetro de manera manual mediante el uso de un instrumento de medición. Luego, el posicionamiento de la parte inicial del polímero en el carrete se realiza manualmente y el enrollado se efectúa mediante el giro del carrete intercambiable accionado por un motor DC mediante una transmisión por engranajes.

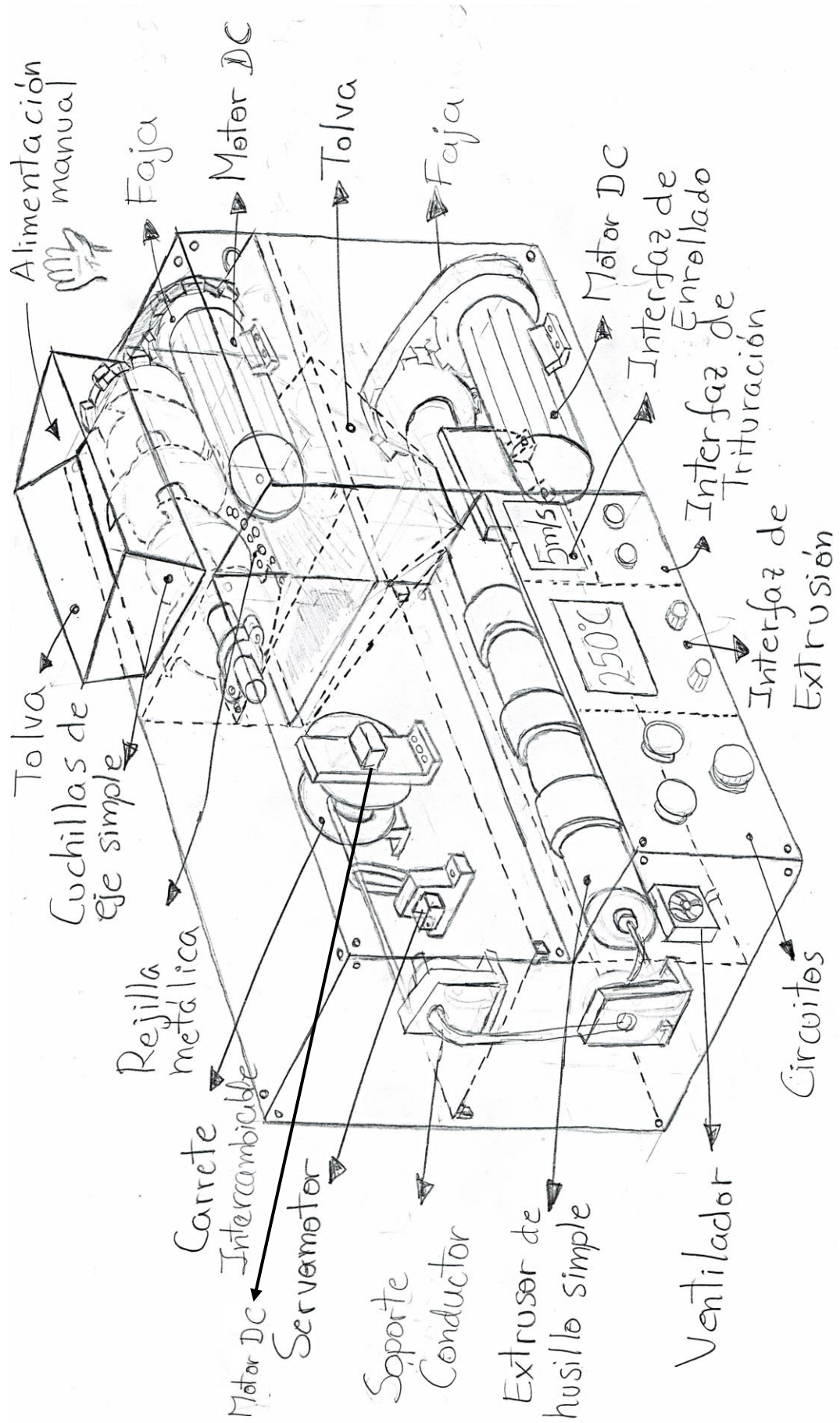


Figura 3.3 Bosquejo de la solución 3

CAPÍTULO 4

INGENIERÍA DE DETALLE DEL SISTEMA MECÁNICO

En el siguiente capítulo se presenta el diseño mecánico del sistema mecatrónico. En primer lugar, es presentado el diseño mecánico general. Luego se describe las subestaciones que la componen y se presenta los cálculos realizados para el dimensionamiento de los elementos que componen cada estación.

Debido a la geometría compleja de algunos elementos de la máquina, el análisis de sus esfuerzos se realiza mediante la técnica de los elementos finitos, haciendo uso del programa *Autodesk Inventor 2017*. Este software brinda resultados confiables respecto a los esfuerzos, deformaciones y factores de seguridad. Para realizar estos cálculos, se emplea una malla tetraédrica de 1 mm y 0.1 mm para las secciones donde se encuentran las cargas aplicadas y los concentradores de esfuerzos. Las condiciones de funcionamiento, cálculos y resultados se explican en cada elemento a analizar.

Además, la digitalización del diseño mecánico de la máquina es realizada en el programa *Autodesk Inventor 2017*, por este motivo las representaciones gráficas de este capítulo se basan en esta interfaz. En la Figura 4.1 se muestra la máquina con las subestaciones integradas. Estas subestaciones son las de trituración, extrusión y enrollado, las cuales son descritas a continuación.

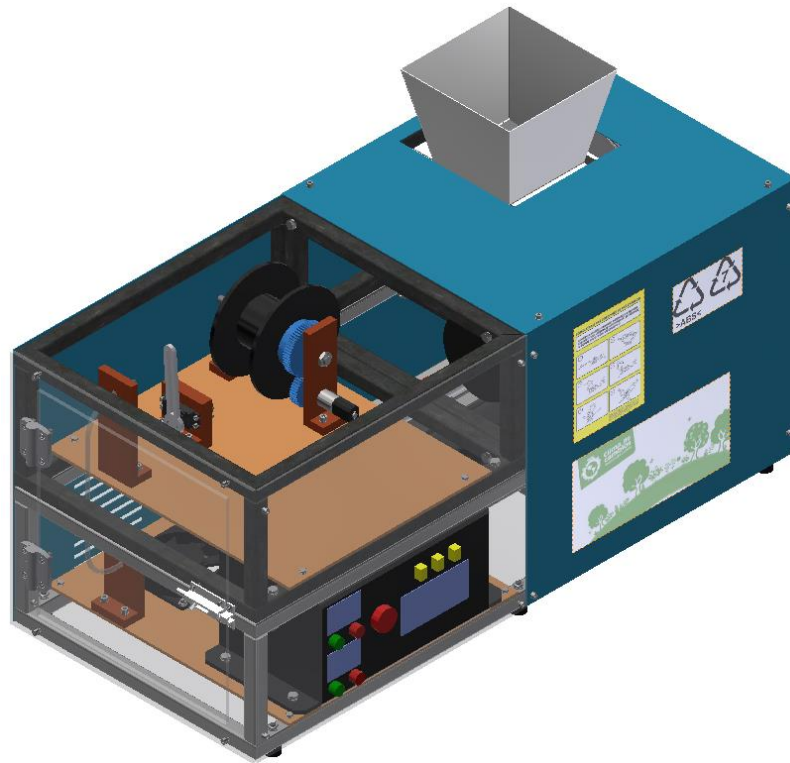


Figura 4.1 Maquina recicladora diseñada

4.1 Estación de trituración

Esta estación, como se observa en la Figura 4.2, está compuesta por la tolva de alimentación, por la cual ingresará la pieza de ABS; el mecanismo de trituración; la transmisión de la potencia; el armazón y el motor DC. El diseño de estos elementos es explicado en los siguientes párrafos.

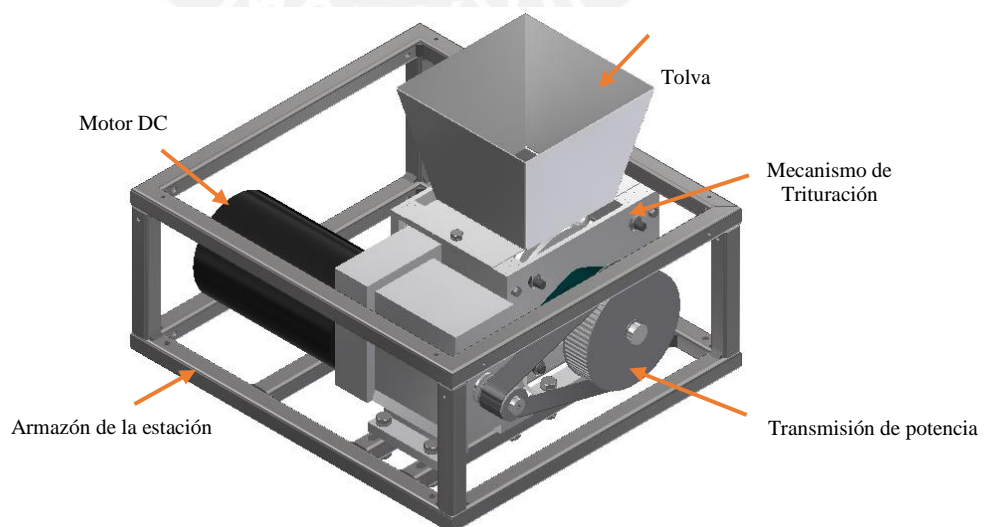


Figura 4.2 Estación de Trituración

4.1.1 Mecanismo de Trituración

Como se determinó en el concepto de solución, la trituración del material se realiza mediante un mecanismo de eje simple de cuchillas trituradoras (ver Figura 4.3). Este mecanismo está formado principalmente por cuatro elementos: el eje triturador, el soporte de trituración, las placas de la cavidad y los rodamientos.

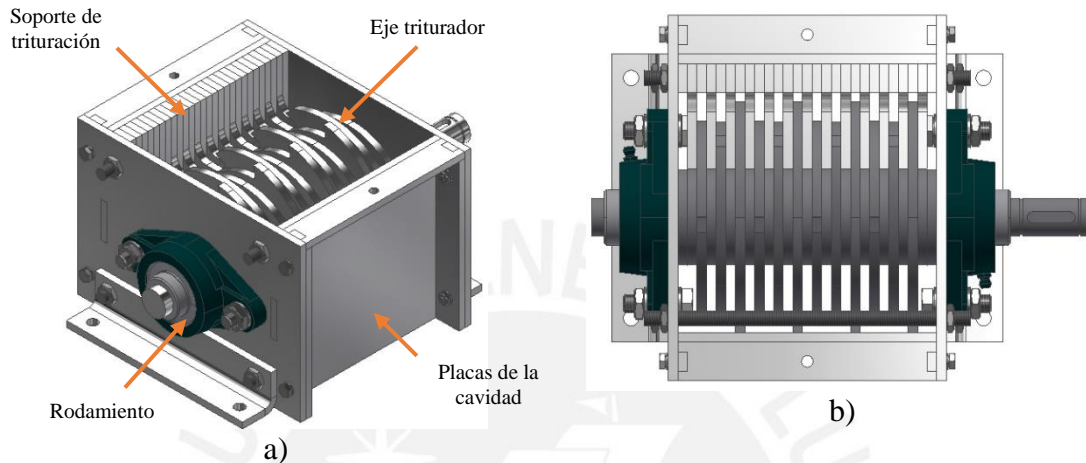


Figura 4.3 Mecanismo de Trituración; a) Vista Isométrica, b) Vista Superior

4.1.1.1 Eje Triturador

El eje triturador se muestra en la Figura 4.4. Está compuesto de doce herramientas de corte, trece espaciadores del mismo espesor y un eje de transmisión. Estos elementos son descritos en los siguientes párrafos.

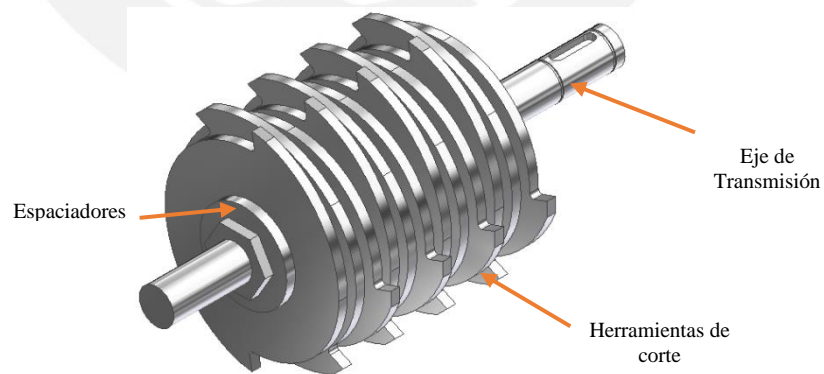


Figura 4.4 Partes del eje Triturador

a) Herramientas de corte

En la Figura 4.5a) se muestra la forma de la herramienta de corte y los parámetros principales para su diseño se encuentran la Figura 4.5b), donde se observa que se requieren principalmente tres parámetros: R , radio de la herramienta (mm); h , altura de la punta de la cuchilla (mm); y α , ángulo del filo de la cuchilla ($^{\circ}$).



Figura 4.5 Herramienta de corte; a) forma, b) parámetros

El radio de la herramienta es mayor a 50 mm debido a que las dimensiones de la pieza a triturar son de un máximo de 100x100x100 mm. Por tal motivo, se trabaja con un valor de “ R ” igual a 50 mm para evitar un sobredimensionamiento de la herramienta y lograr que el material quepa en la cavidad de trituración.

La parte principal de la herramienta de corte es la punta, debido a que ésta es la encargada de cortar el material y comprimirlo contra las paredes del soporte de trituración generando esfuerzos cortantes sobre el plástico y así triturándolo. El valor la altura de la punta (h) es igual a 10 mm. Se selecciona este valor debido a que para una mayor altura de la punta, se requiere de una mayor fuerza para cortar el material por compresión ya que el área donde actuarían los esfuerzos cortantes sería mayor (ver Figura 4.6).

La trayectoria de la cuchilla se aproxima a una recta (ver Figura 4.7), por lo que las dimensiones del material desbastado se obtienen a partir del cálculo mediante el triángulo de Pitágoras que forman los parámetros R y h de la herramienta de corte. Por consiguiente, en la ecuación 4.1, se determina el valor de la base del área desbastada, dimensión b en la Figura 4.7.

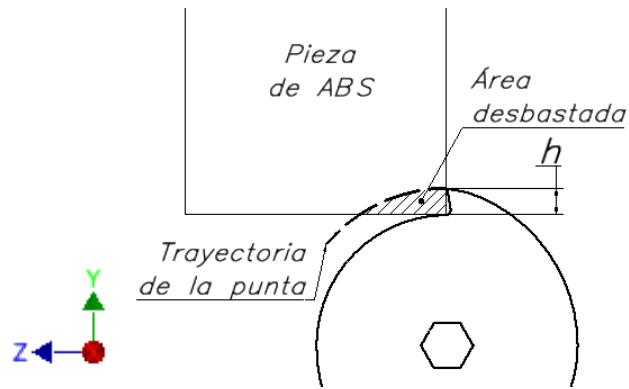


Figura 4.6 Área de corte la de la pieza

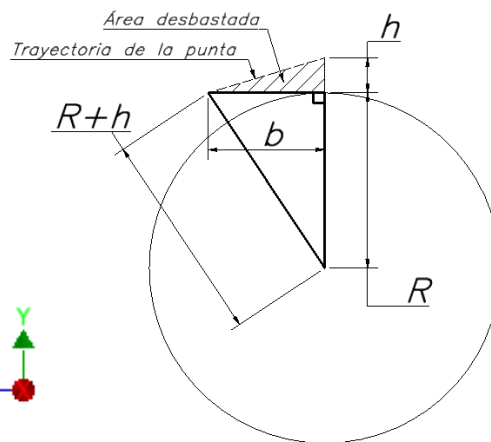


Figura 4.7 Dimensiones del área desbastada del material

$$b^2 = (R + h)^2 - R^2 \quad (4.1)$$

Reemplazando los valores de $R = 100 \text{ mm}$ y $h = 10 \text{ mm}$ se obtiene que el valor de b resulta 46 mm . Los valores de las dimensiones del volumen total de material que se va a comprimir contra el soporte de trituración se pueden observar en la Figura 4.8. Con estos valores se determina la fuerza necesaria para comprimir y cortar el trozo de plástico desbastado.

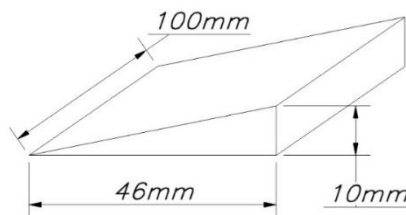


Figura 4.8 Volumen aproximado de plástico desbastado

En el cálculo de la fuerza de corte se necesita conocer la configuración geométrica del soporte de trituración y la de las cuchillas trituradoras (ver Figura 4.9). Se puede observar que ambos poseen espaciadores los cuales sirven para posicionar las herramientas de corte de tal manera que éstas puedan pasar entre los soportes de trituración. Estos soportes son primordiales para comprimir y cortar el material desbastado, y previenen que el plástico calentado por la fricción de la trituración se adhiera a las cuchillas. Con respecto al dimensionamiento de estos últimos y sus espaciadores para el cálculo de la fuerza de corte, es necesario conocer su espesor, el cual será del mismo valor que el de las herramientas de trituración por disposición geométrica.

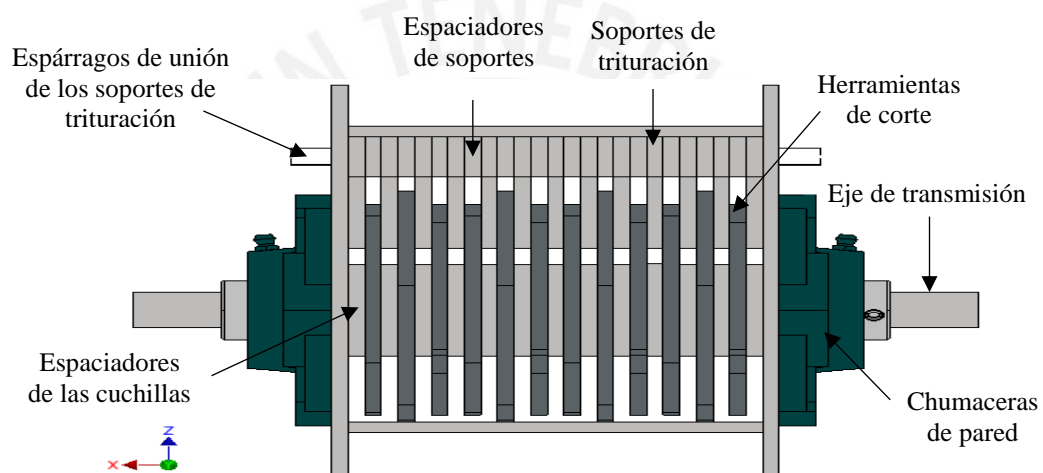


Figura 4.9 Configuración del soporte de trituración y las herramientas de corte

En relación con las herramientas de corte, el número de ellas viene determinado por la longitud total entre las caras externas de la primera y la última, la cual es mayor a 100mm de largo para que el material a reciclar quepa en la cavidad de trituración. Por consiguiente, al poseer espaciadores entre las cuchillas del mismo espesor que éstas, obtener una cavidad de trituración de 125 mm de largo y un espesor de cuchilla de 5mm, se obtiene un total de doce herramientas de corte con trece espaciadores del mismo espesor.

La configuración de las cuchillas puede ser de puntas de corte alineadas o desfasadas. Se opta por esta última debido a que se reduce la fuerza total de trituración, ya que, al momento del corte, en vez de que todas las cuchillas lo hagan al mismo tiempo, solo lo hace un número determinado de ellas. Por tal motivo, se las diseña con dos puntas, de

esta manera se reduce el número máximo de herramientas que cortan el material al mismo tiempo y, como se observa en la Figura 4.10, se obtiene un máximo de cuatro puntas que cortan el material a la vez. Por lo tanto, la fuerza total para el corte del material será cuatro veces la fuerza de corte de una sola cuchilla.

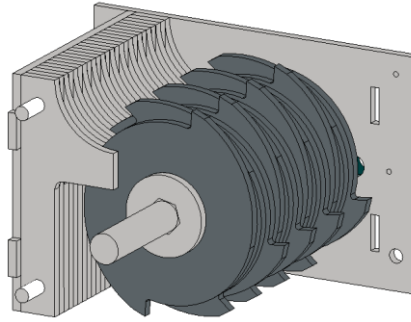


Figura 4.10 Configuración de las cuchillas

En el cálculo de la fuerza de corte de una sola cuchilla se tiene el diagrama representado en la Figura 4.11. En ella se puede observar que la cuchilla comprime el plástico ABS contra los soportes de trituración generando fuerzas cortantes en el material y por consiguiente esfuerzos del mismo tipo. Estas fuerzas se muestran en la Figura 4.12, donde R_Y representa la fuerza de reacción de los soportes de trituración (N/mm), mientras que F_{cuchilla} la fuerza de corte de la herramienta de trituración (N/mm). En esta figura se pueden observar que las fuerzas que actúan sobre el plástico ABS son de tipo distribuido, ya que son aplicadas sobre una superficie de contacto. Además todas actúan sobre una longitud de 5mm cada una, ya que éste es el espesor de la herramienta de corte y de los soportes de trituración.

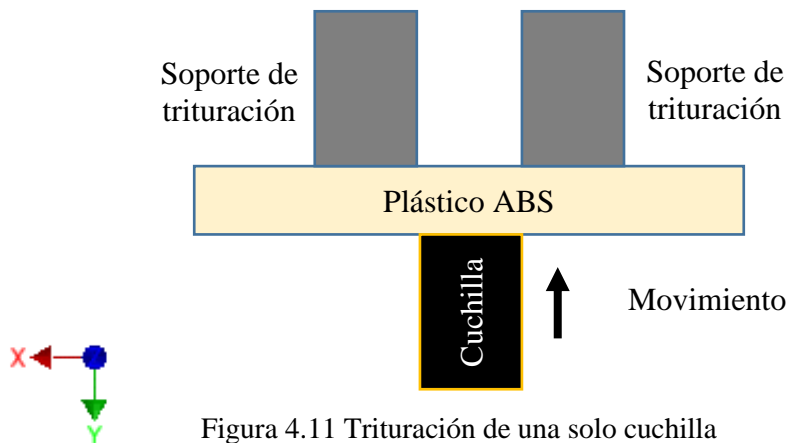


Figura 4.11 Trituración de una solo cuchilla

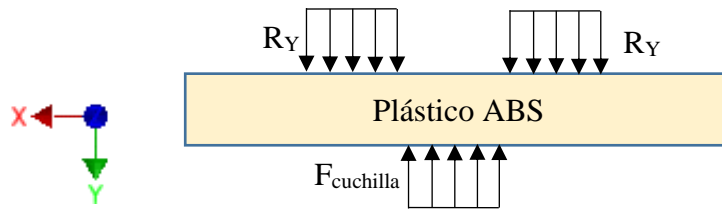


Figura 4.12 Fuerzas aplicadas por una cuchilla

En el caso crítico, todo el material desbastado de 100mm de largo está sometido a las fuerzas de corte por las cuatro cuchillas y, además, comprimido sobre los trece soportes de trituración. Sin embargo, por motivos de análisis del sistema, se calcula la pieza comprimida sobre ocho soportes para obtener cargas simétricas. A partir de este cambio, se realiza el diagrama de cuerpo libre (DCL) del material a triturar (ver Figura 4.13) y el equilibrio estático del sistema para el instante previo a iniciar el corte, es decir con el material en reposo, obteniéndose la ecuación 4.2. Después de este cálculo se realizan los diagramas de fuerzas cortantes y momento flector en la Figura 4.14.

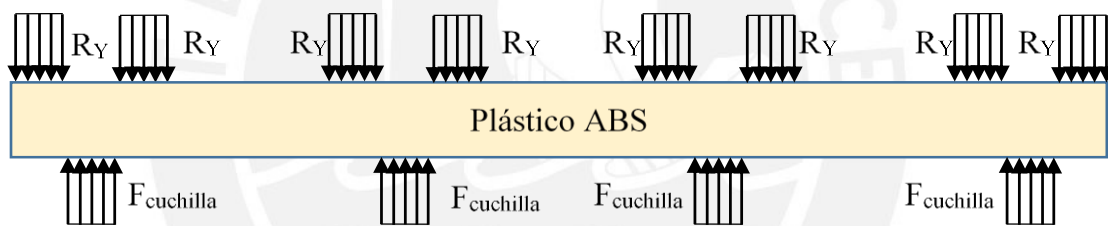


Figura 4.13 DCL del material a triturar

$$\begin{aligned} \sum F_z &= 0 \\ 8 * R_Y * 5 \text{ mm} - 4 * F_{cuchilla} * 5 \text{ mm} &= 0 \text{ N} \\ F_{cuchilla} &= 2 * R_Y \text{ N} \end{aligned} \quad (4.2)$$

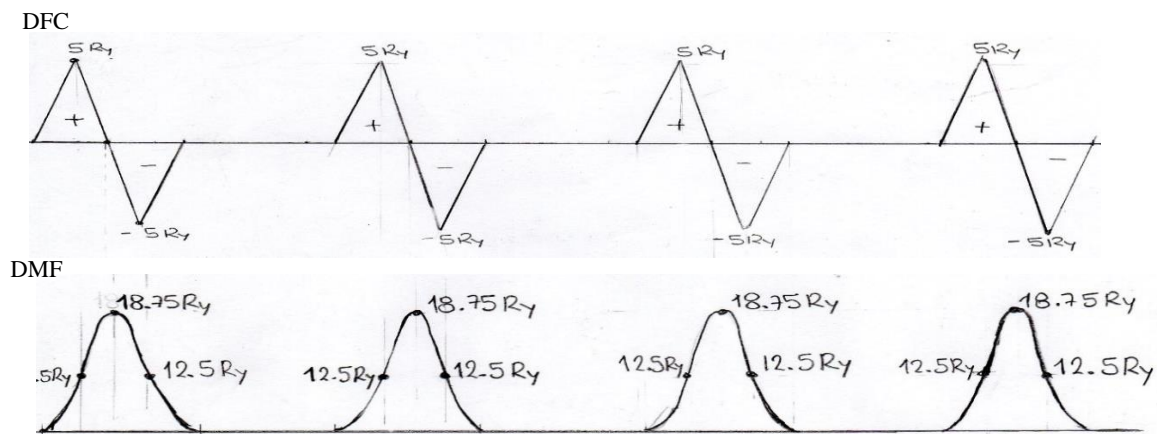


Figura 4.14 Diagramas de Fuerza Cortante y Momento Flector de la pieza de ABS

De acuerdo con la teoría del máximo esfuerzo cortante (Tresca), el cual se aplica para materiales dúctiles como el ABS, en el caso del estado plano de esfuerzos donde actúan σ_x (N/mm²) y τ_{xy} (N/mm²), el esfuerzo equivalente (N/mm²) será el que se presenta en la ecuación 4.3.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + 4 * \tau_{xy}^2} \quad (4.3)$$

Mediante el análisis en la Figura 4.14 se observa que la fuerza cortante máxima aplicada al material es igual a 5*R_y y el momento flector máximo, 18.75*R_y. Sin embargo, también se puede ver que estos dos valores máximos no actúan en el mismo punto del material, por lo que para hallar la ubicación del esfuerzo equivalente máximo se procede a analizar en distintas partes de éste.

El plástico desbastado es considerado como una viga de sección transversal triangular de 46mm de base, 10mm de altura y 100mm de profundidad (largo de la viga) para los cálculos de los esfuerzos. Por lo tanto, a partir de estos datos y los valores de la fuerza cortante y el momento flector, se puede hallar el esfuerzo normal y el cortante mediante la ecuación 4.4 y 4.5 respectivamente donde σ_x es esfuerzo normal (N/mm²); M_Z, el momento flector en el eje Z (N*mm); y, la posición en el eje “Y” del punto a analizar (mm); I_Z, el momento de inercia con respecto al eje Z (mm⁴); τ_{xy} , el esfuerzo cortante (N/mm²); F, la fuerza cortante (N); y A, el Área transversal del material (mm²)

$$\sigma_x = \frac{-M_z * y}{I_z} \quad (4.4)$$

$$\tau_{xy} = \frac{F}{A} \quad (4.5)$$

Una vez obtenido el esfuerzo equivalente máximo, se realiza una comparación con la resistencia máxima a la tracción del ABS, la cual posee un valor de 43.4 N/mm² [Molina, 2016]. Por lo tanto, para que se logre triturar el material, se debe cumplir que el esfuerzo equivalente máximo sea mayor que la resistencia máxima a la tracción del material.

La Figura 4.15 muestra el área transversal desbastada del material, su centroide y su centro de coordenadas ubicado sobre este último. Para determinar el esfuerzo normal se requiere de la coordenada en el eje Y del punto a analizar; siendo los casos críticos los

puntos ubicados en los extremos de dicho eje en la sección transversal: $-10/3$ y $20/3$. Por lo tanto, con respecto al sistema de coordenadas establecido en la Figura 4.15, se obtiene un $I_z = 1277.78 \text{ mm}^4$ y $A = 230 \text{ mm}^2$.

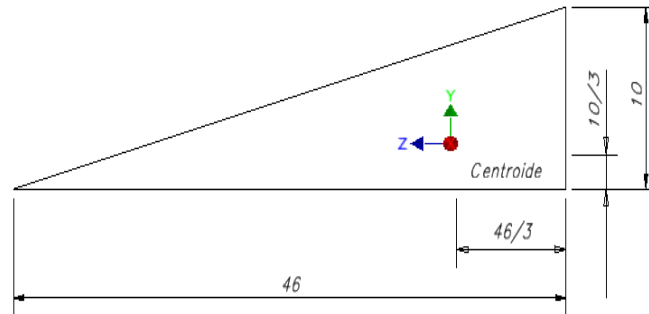


Figura 4.15 Área transversal del material desbastado

Así, al reemplazar los valores de I_z , A , y las fuerzas y momentos, presentes en los diagramas dibujados en la Figura 4.14, en las ecuaciones 4.3, 4.4 y 4.5 se obtienen los resultados de la Tabla 4.1 en función de R_Y . Este análisis se realiza para el segmento de del plástico desbastado desde los 0 mm hasta los 10 mm ya que como se observa en la Figura 4.14 este patrón se repite a lo largo del material a triturar.

En la siguiente tabla se puede ver que el esfuerzo equivalente máximo se encuentra cuando el esfuerzo normal aplicado sobre el material es de $-0.0977 \cdot R_Y \text{ N/mm}^2$ (esfuerzo de compresión) y el esfuerzo cortante sobre el material es 0 N/mm^2 . Entonces, se determina que la mínima fuerza de corte que se debe de aplicar por cuchilla es de 888 N y la máxima de 1750N. Por ende, la fuerza total de trituración será este valor multiplicado por el número de cuchillas que cortan a la vez el material: cuatro cuchillas. En conclusión, la fuerza total de trituración será 3552 N.

Debido a la característica de trabajo de la cuchilla similar al de una fresa de forma, ya que se desbasta, el cálculo del ángulo de filo de éstas se realiza de manera análoga al de la fresa. En Figura 4.16 se puede observar los parámetros para cortar, en donde A es el ángulo de incidencia ($^\circ$) y B es el de arranque ($^\circ$). Por lo tanto, a partir de las recomendaciones de los fabricantes para desbastar plástico ABS presentes en la Tabla 4.2, se seleccionan los valores de A y B igual a 10° , por lo que se obtiene un ángulo del filo de la cuchilla igual a 70° .

Tabla 4.1 Valores de las fuerzas de corte

Posición en el eje X del punto a analizar (mm)	Fuerza Cortante (Ry N)	Momento flector (Ry N*mm)	Posición en el eje Y del punto a analizar (mm)	Esfuerzo Normal (Ry N/mm ²)	Esfuerzo Cortante (Ry N/mm ²)	Esfuerzo Equivalente (Ry N/mm ²)	Fuerza de corte (N)
0	0	0	-3.33	0.0000	0.0000	0.0000	0
5	5	12.5		0.0326	0.0217	0.0543	1597
7.5	0	18.75		0.0489	0.0000	0.0489	1750
10	-5	12.5		0.0326	-0.0217	0.0543	1597
0	0	0	6.66	0.0000	0.0000	0.0000	0
5	5	12.5		-0.0652	0.0217	0.0783	1108
7.5	0	18.75		-0.0977	0.0000	0.0977	888
10	-5	12.5		-0.0652	-0.0217	0.0783	1108

De esta manera, a partir de los cálculos desarrollados en los párrafos anteriores, se presentan los valores de los parámetros principales para la fabricación de la herramienta de corte. Estos son los siguientes: R igual a 50 mm, h igual a 10 mm, α igual a 70° y un espesor igual a 5mm.

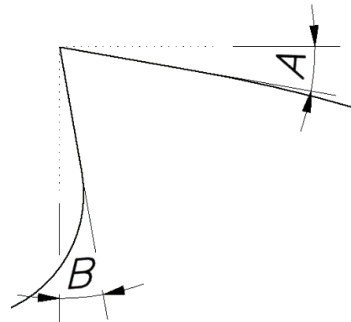


Figura 4.16 Parámetros para fresar

Tabla 4.2 Parámetros recomendados para fresar los materiales plásticos¹⁹

	Milling		
	α	γ	V
PE, PP, PMP	10 - 20	5 - 15	250 - 500
ABS	5 - 10	0 - 10	300 - 500

The feed can be up to 0.5 mm/tooth

¹⁹ Parámetros para fresar materiales plásticos: <http://www.ensinger.es/es/semilaborados/informacion-general-sobre-los-productos-semilaborados/mecanizado-de-piezas-semilaboradas/operaciones-de-mecanizado/fresado>

Sin embargo, se requiere saber del material de fabricación, por lo que se realiza un análisis de la resistencia del material con las dimensiones halladas mediante el análisis por elementos finitos en *Inventor 2017*. Para este análisis se selecciona como material de fabricación el acero inoxidable ASTM A240 debido a sus propiedades mecánicas. Este elemento efectúa una fuerza de hasta 1750 N, en el caso crítico, para cortar y triturar el material a reciclar. Además, está posicionado sobre un eje hexagonal, por lo que, en el momento del corte, esta cuchilla se apoya sobre un lado del eje. Entonces se establece esta restricción, las fuerzas y momentos transmitidos hacia la cuchilla: la del material a triturar (1750N) y la del eje (1750 N y 105N-m), y se selecciona el material para el análisis que es el acero inoxidable ASTM A240. De esta manera, se obtienen los resultados resumidos en las Figura 4.17.

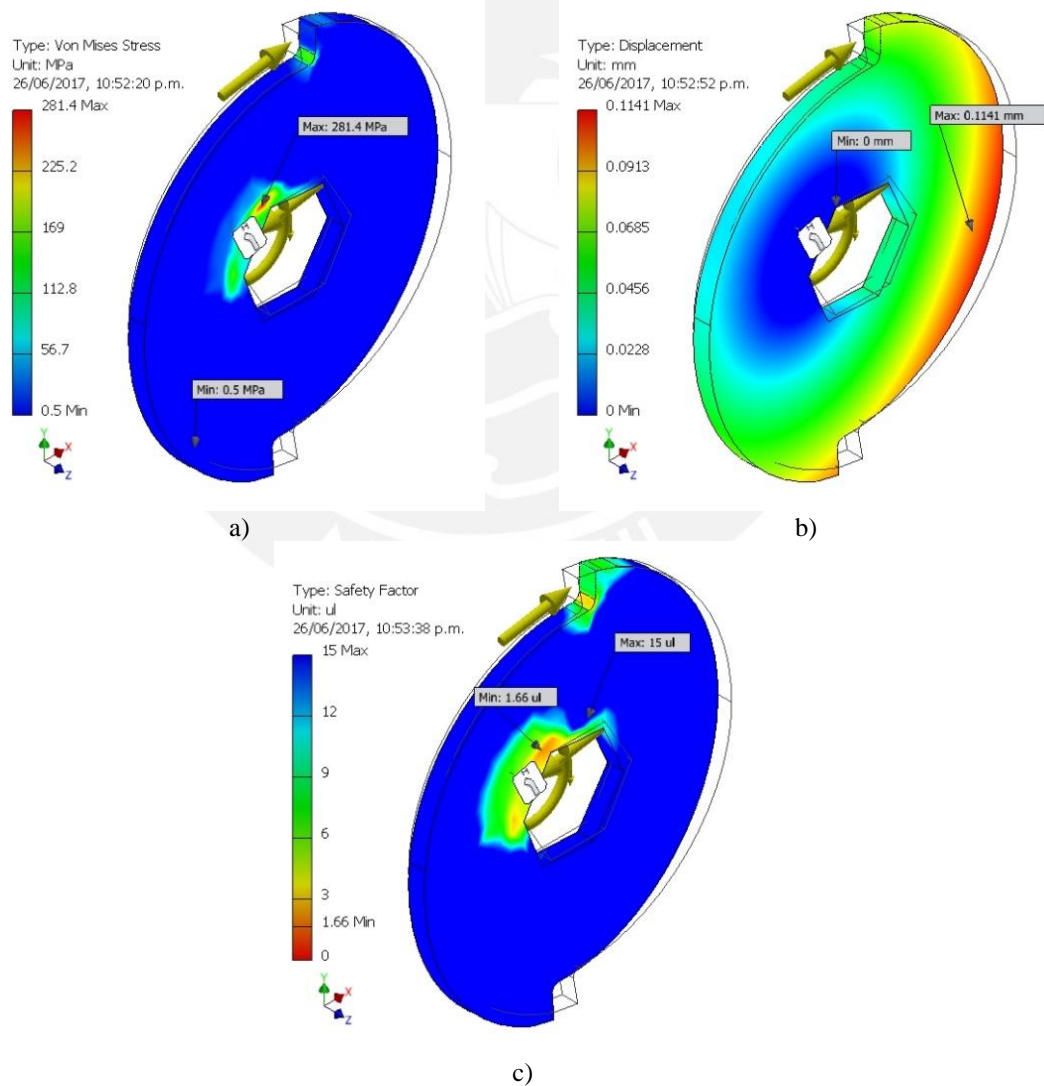


Figura 4.17 Análisis de la Herramienta de Corte; a) Esfuerzos de Von Mises, b) Desplazamiento y c) Factor de Seguridad

Entonces, resumiendo, se obtiene los siguientes valores máximos.

- Máximo esfuerzo equivalente: 281.4 MPa
- Máximo desplazamiento: 0.1141 mm
- Mínimo factor de seguridad: 1.66

El esfuerzo total más significativo (281.4MPa) actúa sobre el lado que está en contacto con el eje hexagonal. Éste es comparado con la resistencia máxima a la tracción del acero ASTM A240 (470MPa) y se obtiene un factor de seguridad igual a 1.66, que es superior a 1.5, por lo que se considera válido. Finalmente, el máximo desplazamiento se produce en el borde de la cuchilla y se encuentra en el orden de las décimas de milímetro. Por lo tanto, se corrobora que las dimensiones obtenidas y el material seleccionado para la fabricación de las herramientas de corte soportan los esfuerzos generados por las cargas de trabajo críticas para triturar el plástico ABS.

b) Eje de transmisión

El eje de la trituradora está sometido a cargas de flexión y torsión que se generan por efecto de la transmisión de la potencia que se da entre la polea, el eje y las herramientas de corte. En la Figura 4.18 se muestra la disposición de los elementos que están en contacto con el eje de transmisión. Este eje cuenta con tres partes: la primera, donde está posicionado un rodamiento; la segunda, donde está ubicado las herramientas de corte; y la última, en la que se encuentra el otro rodamiento y la polea para la transmisión de la potencia.

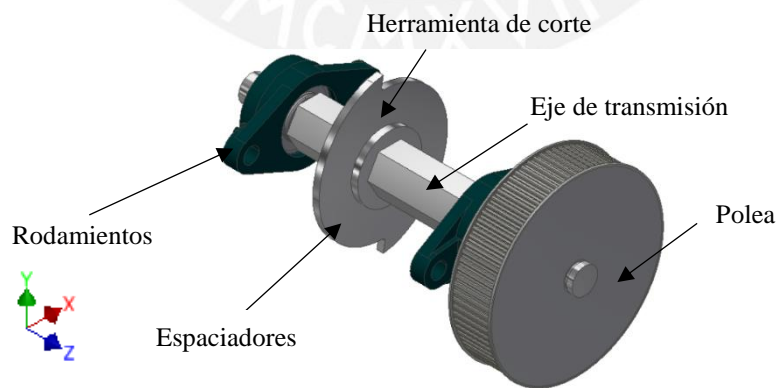


Figura 4.18 Elementos en contacto con el eje de transmisión

La primera parte posee una longitud mayor al ancho del rodamiento: 30 mm. La segunda parte cuenta con una sección transversal hexagonal (forma elegida por motivos de

transmisión de potencia a las cuchillas, términos comerciales de adquisición y debido a que posee una mayor inercia que una sección cuadrada) y longitud de 125 mm ya que se cuenta con doce herramientas de corte y trece espaciadores, ambos de 5mm de espesor. Por último, la tercera parte posee una longitud de 60 mm en donde se posicionan un rodamiento y la polea de transmisión a 22.5 y 52.5 mm del inicio de la sección respectivamente. Por lo tanto, se obtiene una barra de 245 mm de largo en total.

Entonces, el DCL del eje de transmisión será el presente en la Figura 4.19 donde A_x , A_y , B_x y B_y son las reacciones de los rodamientos (N); R_x y R_y son las fuerzas generadas por la polea (N); F_H y M_H son la fuerza de reacción (N) y el momento (N-m) generados por las cuatro cuchillas que cortan el material a la vez; M_t es el torque necesario para mover una cuchilla (N-m) y las distancias están en milímetros.

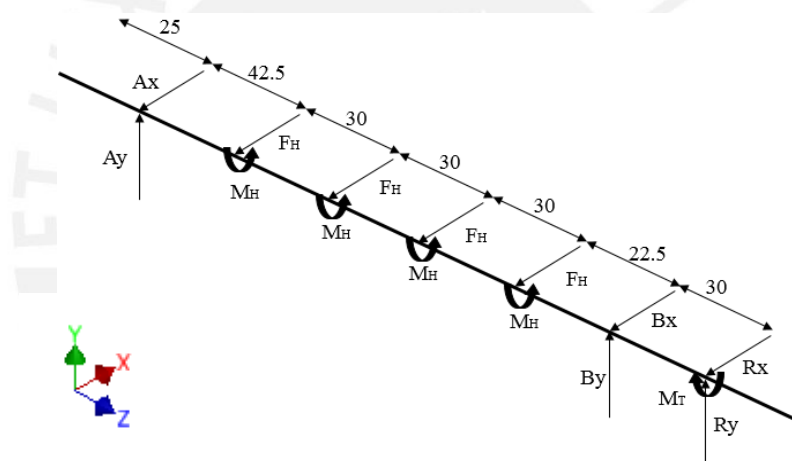


Figura 4.19 DCL del eje de transmisión

El valor de M_t se obtiene a partir de la ecuación 4.6, donde M_t es torque (N-m), $F_{cuchilla}$ es la fuerza de trituración por cuchilla (N) y D es el diámetro de la herramienta de corte (m).

$$M_t = F_{cuchilla} * D/2 \quad (4.6)$$

$$M_t = 888 \text{ N} * 0.12/2 \text{ m}$$

$$M_t = 53.28 \text{ N} * \text{m}$$

Entonces el torque para mover una cuchilla es de 53.28 N-m y el torque total para la locomoción del sistema es cuatro veces el valor anterior: 213.12 N-m.

La transmisión de la potencia se realiza mediante faja síncrona con una relación de transmisión de 3.6:1, ya que se cuenta con un motorreductor DC de 59N·m de torque a la salida y que está posicionado de forma paralela a la estación de trituración. La configuración de las poleas se observa la Figura 4.20a) y en la Figura 4.20b) se puede ver las fuerzas en las poleas. Esta fuerza es la misma que actúa sobre el eje, pero con sentido opuesto y puede ser calculada mediante la ecuación 4.7 donde M_{t2} es el torque aplicado al eje (N·m) y d_2 es el diámetro (m) de la polea conducida igual a 120 mm.

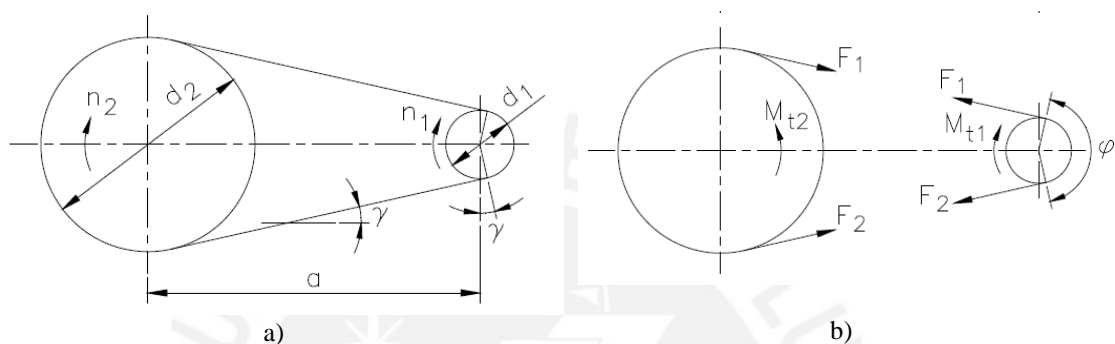


Figura 4.20 Transmisión por poleas síncronas; a) Configuración de las poleas, b) Fuerzas en la poleas [Paulsen, 2014]

$$F_1 = \frac{2 \cdot M_{t2}}{d_2} \quad (4.7)$$

De esta manera al remplazar los valores de M_{t2} y d_2 en la ecuación anterior se obtiene un valor de F_1 igual a 3833 N, y, por consiguiente, la fuerza de reacción, que es la resultante de R_x y R_y , igual a 3833 N.

Entonces, después de realizar el equilibrio de fuerzas del eje de transmisión en las coordenadas “X” e “Y”, se obtienen los valores de las reacciones en los rodamientos los cuales son A_x igual a -1315 N; A_y , -688 N; B_x , 3597 N; y B_y , 4309 N. Con estas fuerzas se realizan los diagramas de fuerzas cortantes y momentos flectores representados en la Figura 4.21. En ellas podemos observar que la máxima fuerza cortante y el máximo momento flector resultantes son de aproximadamente 3832 N y 115 N·m respectivamente. Ambos, actúan en la posición del rodamiento cercano a la polea de transmisión, por lo que éste es el punto crítico del eje y a partir de él se dimensionará el elemento.

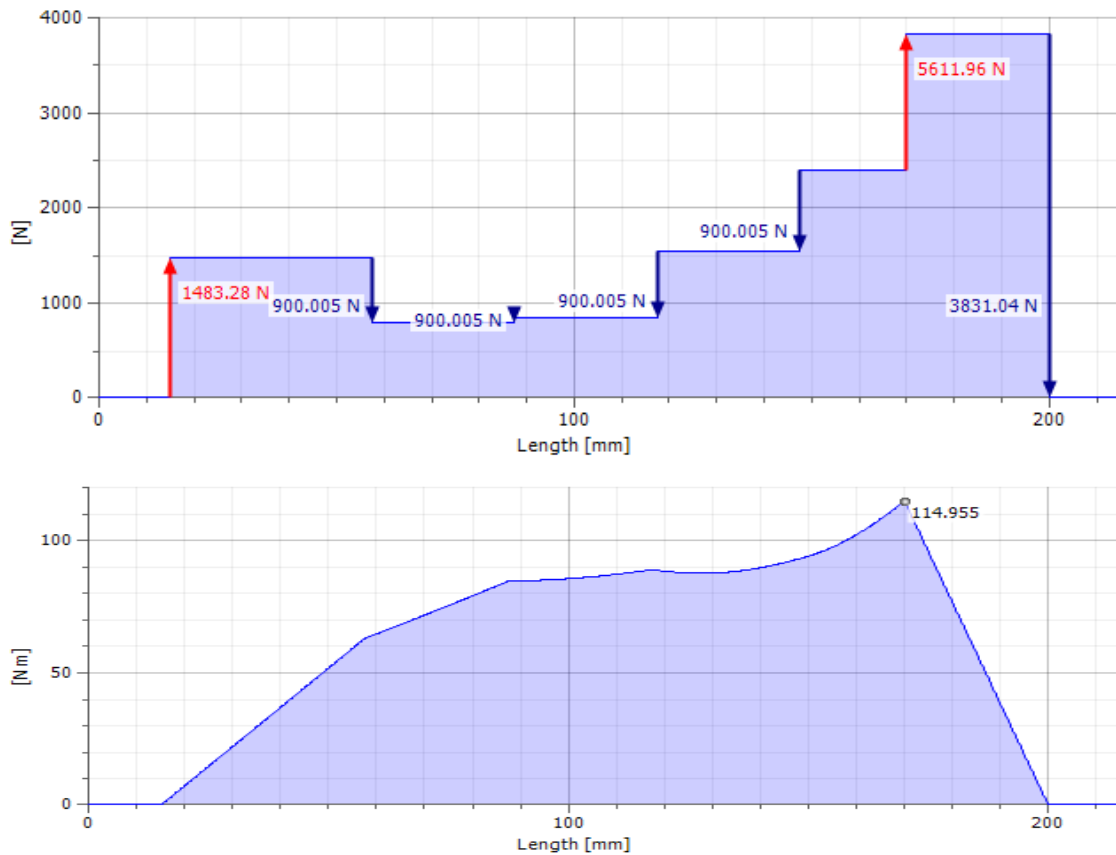


Figura 4.21 (Sup) Diagrama de Fuerzas Cortantes. (Inf) Diagrama de Momentos Flectores

En el punto seleccionado, a 170 mm del inicio de la primera sección del eje, actúan esfuerzos normales originados por momentos flectores, y esfuerzos cortantes originados por fuerzas cortantes y por torsión. Éstas son calculadas a partir de las ecuaciones 4.4, 4.5 y 4.8, donde en esta última τ_{torsor} es el esfuerzo cortante generado por el momento torsor (MPa), M_t es el momento torsor (N*mm) y d es el diámetro del eje (mm). Por lo tanto, al reemplazar los valores de la Tabla 4.3 en estas tres última ecuaciones mencionadas, se obtiene que $\sigma = 1171 * 10^3 / d^3$, $\tau_{xy} = 7146 / d^2$ y $\tau_{torsor} = 1100 * 10^3 / d^3$.

$$\tau_{torsor} = \frac{16 * M_t}{\pi * d^3} \tag{4.8}$$

Tabla 4.3 Datos para el cálculo del diámetro del eje

Área de la sección (mm)	Momento de Inercia (mm ⁴)	Fuerza Cortante (N)	Momento Flector (N*mm)	Momento Torsor (N*mm)
$\pi * d^2 / 4$	$\pi * d^4 / 64$	3832	$115 * 10^3$	$216 * 10^3$

El esfuerzo equivalente es obtenido según la teoría de Tresca mediante la aplicación de la ecuación 4.3 con los esfuerzos anterior. Entonces, al seleccionar el acero inoxidable ASTM A276, con resistencia a la rotura de 510 MPa, como material para la construcción del eje, se obtiene el valor mínimo del diámetro del eje a partir de la ecuación 4.9.

$$\sigma_{eq} < \sigma_{max} \tag{4.9}$$

$$\sqrt{\sigma^2 + 4 * (\sqrt{\tau_{xy}^2 + \tau_{torsor}^2})^2} < 510 \text{ MPa}$$

$$d > 13 \text{ mm}$$

Por lo tanto, para la fabricación del eje de transmisión se requiere de un diámetro mayor o igual a 13 mm, por lo que aplicando un factor de seguridad mayor a 1.5 se obtiene un diámetro de 20 mm para la tercera sección del eje. Sin embargo, debido a su geometría, se requiere de un diámetro del segundo tramo del eje mayor a 20 mm para que éste pueda ser mecanizado en sus extremos, secciones en donde estarán ubicados los rodamientos. De esta manera, con respecto a las barras hexagonales comerciales en el Perú, se selecciona una de 35 mm de diámetro (ver catálogo en el Anexo E).

c) Espaciadores

Los espaciadores poseen una función de acondicionamiento geométrico, es decir, son usados para que los elementos continuos a ellos puedan encajar correctamente. Por tal motivo, estas piezas nos están sujetas a esfuerzos mecánicos y su dimensionamiento depende netamente de la configuración espacial del mecanismo en las que se ensamblan.

En la Figura 4.22 se observa la forma geométrica de un elemento. Posee una forma circular, de 100 mm de diámetro, para evitar cortes de los usuarios por manipulación de los mismos, y un agujero de forma hexagonal, para que puedan ser ensamblados en el eje de transmisión. Además, tiene un espesor de 5 mm determinado por configuración geométrica del mecanismo de trituración y está fabricado del mismo material que el de las herramientas de corte: ASTM A240, ya que debe poseer las mismas propiedades que las herramientas de corte y se busca reducir los costos de fabricación.

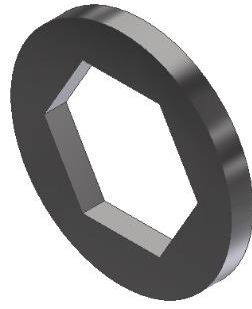


Figura 4.22 Espaciador de las herramientas de corte

4.1.1.2 Soporte de trituración

Estos soportes son fundamentales para la trituración del plástico ABS. Está conformado por los elementos mostrados en la Figura 4.23: los soportes de corte, los espaciadores y el espárrago de unión para los elementos anteriores.

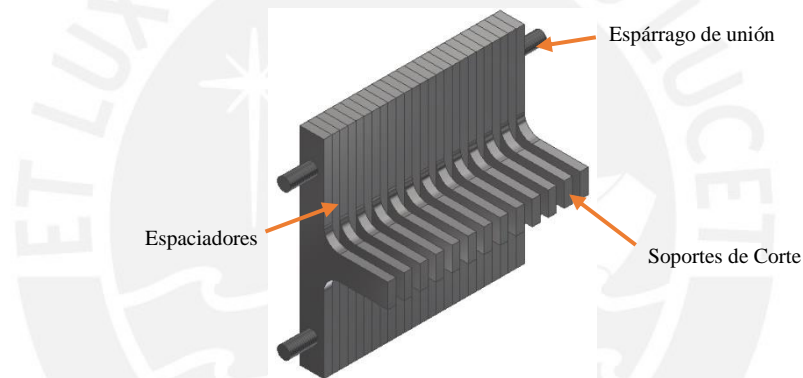


Figura 4.23 Partes del Soporte de Trituración

a) Soporte de corte

Poseen la forma mostrada en la Figura 4.24a) y los parámetros para su dimensionamiento en la Figura 4.24b), en donde h es la altura del soporte (mm), C es la longitud del tramo cuadrado del mismo (mm) y E es la longitud de la parte contra la que se comprime el plástico ABS (mm).

La altura está determinada por la de la cavidad de trituración, la cual es de 130 mm por disposición geométrica de las herramientas de corte que deben de caber en el compartimiento para triturar. El valor de C es mayor que el diámetro de los espárragos los cuales sirven para unir los 13 soportes con sus 12 espaciadores. Y la longitud de E está determinada por el espaciamiento entre éste y el espaciador de la cuchilla. Mientras mayor sea el valor del espaciamiento menor será el valor de E ; sin embargo existirá una

mayor holgura por la que puedan caer objetos de un tamaño relativamente grande. Por tal motivo, este espaciamiento será de la menor longitud posible, y por consiguiente, mediante configuración geométrica se obtiene un valor de $E=40$ mm.

Entonces se obtiene un soporte de parámetros presentes en la Tabla 4.4 fabricado de acero inoxidable ASTM A240 debido a sus propiedades mecánicas.

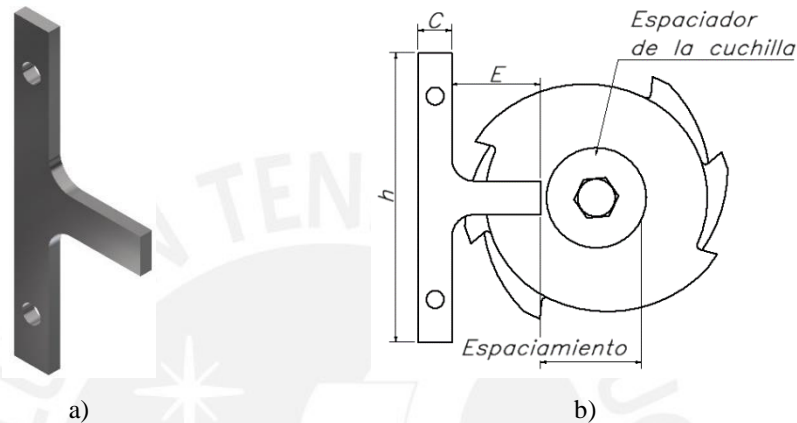


Figura 4.24 Soporte de Trituración; a) Forma geométrica, b) Dimensiones

Tabla 4.4 Parámetros de los soportes de trituración

h (mm)	c (mm)	E (mm)
130	15	40

El cálculo del análisis de su resistencia se realiza mediante el uso de elementos finitos por medio del programa *Inventor 2017*. Este elemento soporta una fuerza de hasta 875 N, en el caso crítico, para cortar y triturar el material a reciclar. Además, está montado sobre dos espárragos por lo cual posee una restricción de movimiento en estos dos puntos de apoyo. Por ende, se tiene restricciones de movimiento, la fuerza de 875 N que ejerce la herramienta de corte para triturar el plástico ABS y el acero ASTM A240 como material de fabricación para el análisis del elemento. De esta manera, al realizar el cálculo, se obtienen los resultados resumidos en las Figura 4.25.

Entonces, resumiendo, se obtiene los siguientes valores máximos.

- Máximo esfuerzo equivalente: 122.2 MPa
- Máximo desplazamiento: 0.075 mm
- Mínimo factor de seguridad: 4.35

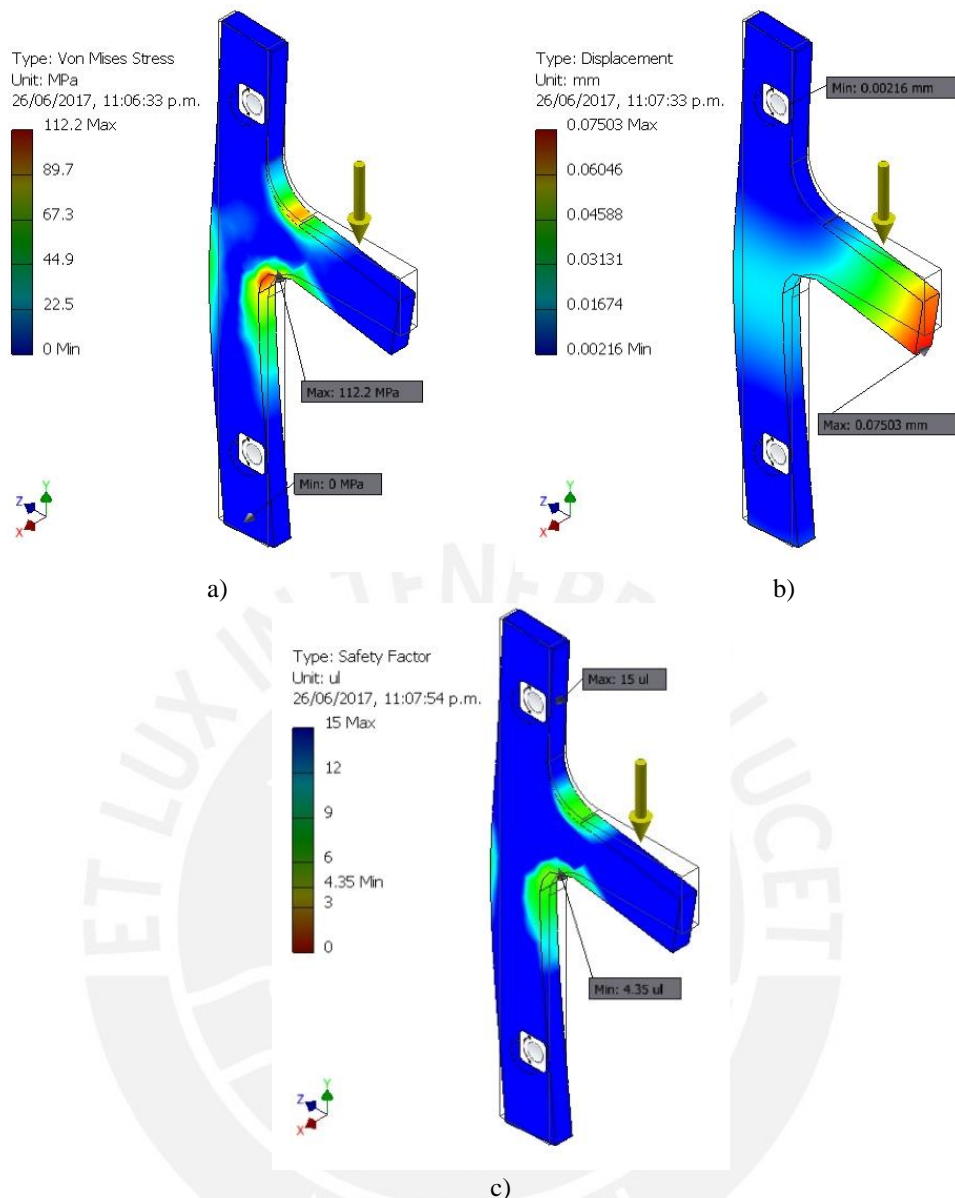


Figura 4.25 Análisis del Soporte de Corte; a) Esfuerzos de Von Mises, b) Desplazamiento y c) Factor de Seguridad

El esfuerzo total más significativo (112.2 MPa) actúa sobre el lado curvo inferior del soporte. Éste es comparado con la resistencia máxima a la tracción del acero ASTM A240 (480MPa) y se obtiene un factor de seguridad igual a 4.35, que es superior a 1.5, por lo que se considera válido. Además, el máximo desplazamiento se produce en el extremo del soporte de corte y se encuentra en el orden de las centésimas de milímetro. Por lo tanto, se corrobora que las dimensiones obtenidas y el material seleccionado para la fabricación de los soportes de corte soportan los esfuerzos generados por las cargas de trabajo críticas para triturar el plástico ABS.

b) Espaciadores

Estos espaciadores poseen la misma función que los de las herramientas de corte. Por este motivo, tampoco están sujetas a esfuerzos mecánicos y su dimensionamiento depende netamente de la configuración espacial del mecanismo en las que se ensamblan.

En Figura 4.26 se presenta la forma del espaciador, el cual posee las mismas dimensiones que los elementos a los que separan: una altura de 130 mm, una longitud de la base igual a 15 mm y un espesor de 5 mm determinado por configuración geométrica del mecanismo de trituración. Además, están fabricados de acero inoxidable ASTM A240, ya que se reduce los costos de adquisición de material por ser de adquisición nacional.



Figura 4.26 Espaciador para los soportes de trituración

4.1.1.3 Rodamientos

Estos rodamientos son los soportes para el eje triturador. Éste es seleccionado en base al diámetro del eje de transmisión, el cual es de 20 mm, y a la configuración geométrica, la cual debe de ocupar el menor espacio posible. Entonces, en el Anexo F se muestra el catálogo de rodamientos de la marca SKF con soporte tipo pared y se selecciona el modelo de código FYTBK 20 FE.

4.1.1.4 Placas de la cavidad

Estas placas son el soporte de los elementos mencionados anteriormente del mecanismo de trituración. Debido a la complejidad de la forma geométrica de la cavidad, estas placas son diseñadas para puedan ser ensambladas mediante pernos. En la Figura 4.27 se observa distintas placas como las laterales, las frontales, las de soporte para la tolva, las de soporte lateral y las de soporte de la base. Todas estas placas tienen un espesor de 5 mm y están fabricadas de acero inoxidable ASTM A240.

El cálculo del análisis de la resistencia se realiza mediante el uso de elementos finitos por medio del programa *Inventor 2017*. Este análisis se realiza para todas las placas en conjunto con el soporte de trituración debido a la complejidad geométrica de estos elementos.

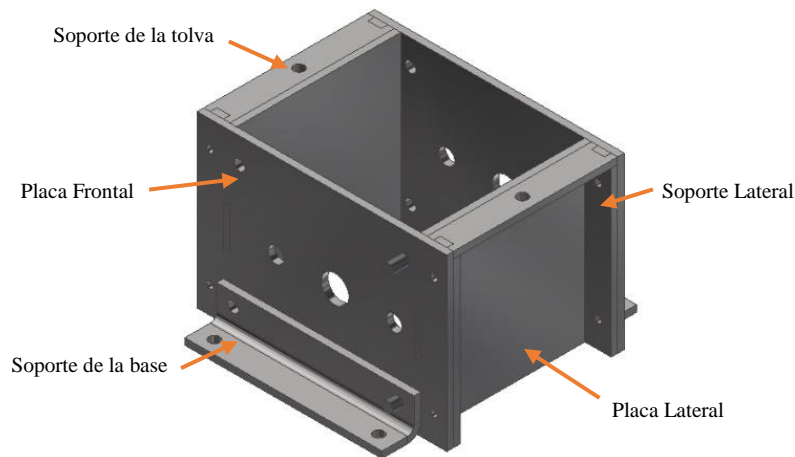


Figura 4.27 Placas de soporte del mecanismo de trituración

Los soportes de trituración soportan una fuerza de hasta 875 N, en el caso crítico, en cada uno de los ocho soportes de corte al momento de triturar el ABS (cuatro cuchillas que cortan el material a la vez). Por otro lado, la placa frontal está sometido a las fuerzas de reacción de las uniones atornilladas que soportan los rodamientos del eje triturador. Además, posee dos placas que son la base de esta cavidad y van montados mediante cuatro pernos al armazón de la trituradora. Por este motivo posee dos restricciones de movimiento en estos dos elementos. Entonces al colocar estas restricciones para el análisis, la fuerza de 875 N que ejerce la herramienta de corte sobre cada soporte, y las reacciones de los rodamientos, determinados en el cálculo del eje de transmisión, sobre la placa frontal; y ejecutar el análisis, se obtienen los resultados de la Figura 4.28.

Entonces, resumiendo, se obtiene los siguientes valores máximos.

- Máximo esfuerzo equivalente: 253.3MPa
- Máximo desplazamiento: 0.0593 mm
- Mínimo factor de seguridad: 1.63

El esfuerzo total más significativo (253.3 MPa) actúa sobre el agujero de la base de la cavidad. Éste es comparado con la resistencia máxima a la tracción del acero ASTM A240 y se obtiene un factor de seguridad igual a 1.63, que es superior a 1.5, por lo que se considera válido. Además, el máximo desplazamiento se produce en los soportes de corte y se encuentra en el orden de las centésimas de milímetro. Por lo tanto, se corrobora que las dimensiones obtenidas y el material seleccionado para la fabricación de la cavidad de trituración soportan los esfuerzos a los que se encuentran sometidos.

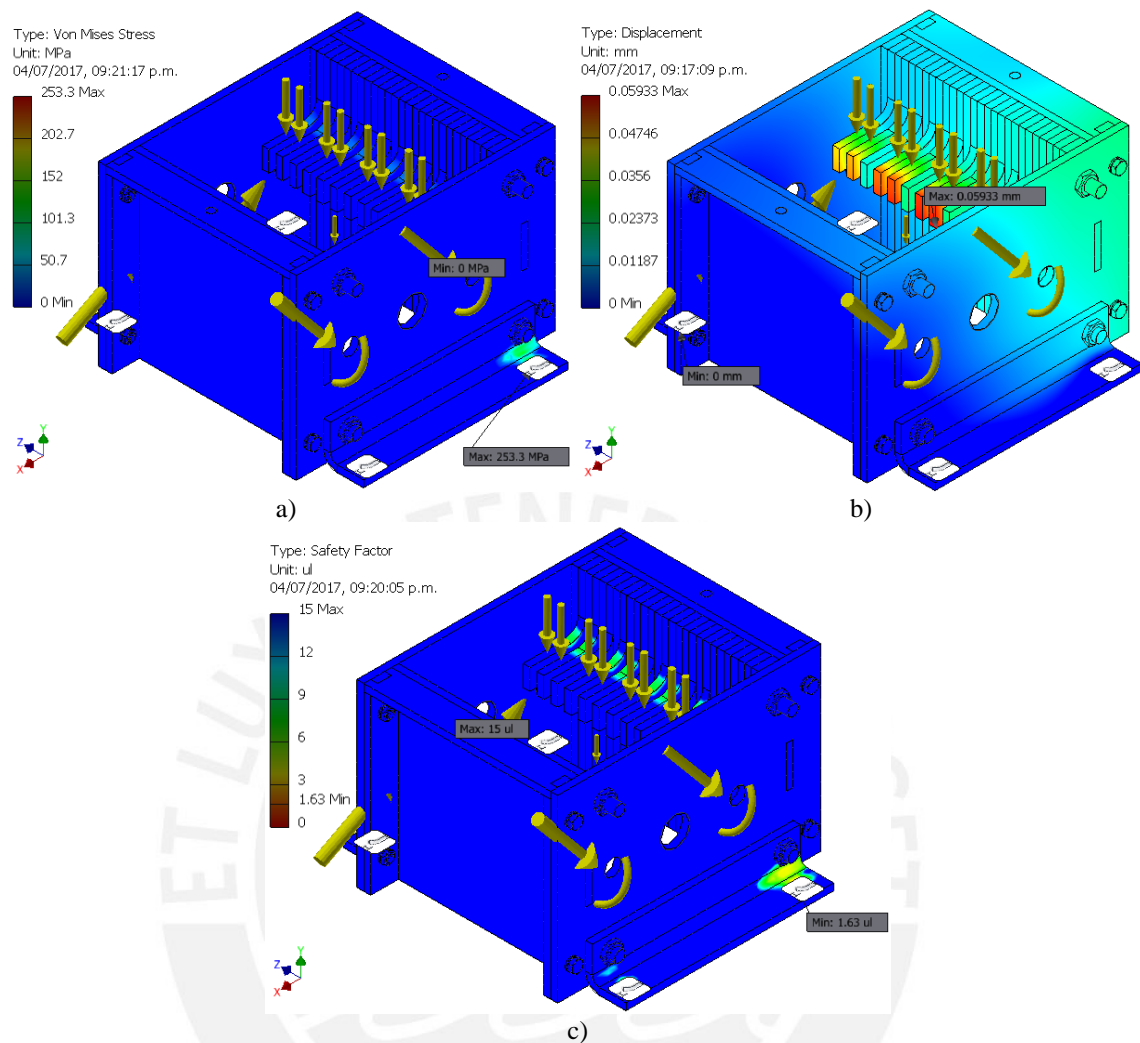


Figura 4.28 Análisis de la Cavity de Trituración; a) Esfuerzos de Von Mises, b) Desplazamiento y c) Factor de Seguridad

4.1.2 Tolva

La función principal de este elemento es de posicionar y canalizar el plástico ABS hacia la cámara de trituración, por esta razón no está sometido a esfuerzos considerables y su dimensionamiento dependerá de la base de la tolva, la cual debe poseer un área mayor a 100x100 mm ya que el mecanismo puede triturar piezas de hasta 100x100x100 mm. Por este motivo, la tolva posee una base dimensionada con una holgura de 10 mm a cada lado, es decir posee un área de 110x110mm en la parte inferior; un área de 160x160mm en la parte superior; y una altura de 120 mm, para que quepa la pieza a triturar en el caso crítico. Para la fabricación de este elemento se emplea el acero inoxidable ASTM A240.

4.1.3 Motor DC de la Trituradora

El cálculo de la potencia requerida para la locomoción del mecanismo se obtiene en la ecuación 4.10, donde P es la potencia (W), T es el torque (N*m) para accionar el mecanismo, y ω es la velocidad de giro del eje de las cuchillas (RPM). Debido a que para obtener una menor potencia de trabajo se requiere de una menor velocidad de giro, se trabaja con un valor de 15 RPM para este último parámetro. Además, en esta estación es irrelevante controlar la velocidad de trituración del material ya que no es un requerimiento del sistema, por lo que se trabaja con el valor seleccionado.

$$P = T * \omega * \frac{\pi}{30} \quad (4.10)$$

$$P = 213.12 \text{ N} * m * 15 \text{ RPM} * \pi / 30 = 334.79 \text{ W} \approx 350 \text{ W}$$

Entonces, la potencia necesaria para activar el mecanismo de triturado es de aproximadamente 350W. Por lo tanto, el motor seleccionado para esta estación es el motorreductor DC de la marca Transtecno de código ECMG 250/002 H 55.10 D16 240 que posee 59 N-m de torque de salida y 54 RPM (ver Anexo H).

4.1.4 Transmisión de Potencia

El mecanismo para la transmisión de la potencia mecánica es el de faja síncrona. Ya que se cuenta con un motor de 54 RPM de salida y se requiere de 15 RPM para la locomoción del mecanismo, se emplea una reducción de velocidad en la transmisión mediante poleas de 3.6:1. En la selección de los elementos para la transmisión se hace uso del manual para fajas Optibelt y se establece las condiciones de trabajo en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Condiciones de trabajo de la trituradora

Máquina Motriz	Condiciones de servicio	Máquina accionada
Motor DC P = 350 W n ₁ = 54 RPM	Servicio diario: aprox. 1 hora Numero de arranques: 2 al mes Condiciones de servicio: Temperatura ambiental normal, sin influencia de aceites, agua o polvo. Distancia entre ejes: variable entre 145 y 200 mm Diámetro de la polea: d _{d1} < 180 mm	Eje Triturador P = 335 W n ₂ = 15 RPM ± 0.5 Arranque: bajo carga Tipo de carga: constante

Las variables de los cálculos desarrollados a continuación son obtenidas a partir del manual técnico para fajas síncronas Optibelt OMEGA, OMEGA HP y OMEGA HL mostrados en el Anexo J.

Factor de Carga:	$c_2 = c_0 + c_3 + c_6 = 1.3 + 0 + -0.2 = 1.1$
Potencia teórica:	$P_B = P * c_2 = 350 \text{ W} * 1.1 = 385 \text{ W}$
Selección del perfil de la correa:	Tipo 5M HP
Relación de transmisión:	$i = n_1 / n_2 = 54/15 = 3.6$
Número de dientes de la polea síncrona:	$z_1 = 20$ $d_{w1} = 31.83$ $z_2 = z_1 * i = 20 * 3.6 = 72$ $z_2 = 72$ $d_{w2} = 114.59$
Comprobación de la velocidad de giro de la máquina accionada:	$i = z_2 / z_1 = 72/20 = 3.6$ $n_2 = n_1 / i = 54/3.6 = 15 \text{ RPM}$
Distancia entre centros de los ejes:	Recomendación: $a > 0.5 (d_{w1} + d_{w2}) + 15 \text{ mm} = 85.21 \text{ mm}$ $a < 2.0 (d_{w1} + d_{w2}) = 292.84 \text{ mm}$ $a = 160 \text{ mm}$ (selección provisional)
Longitud de paso de la correa síncrona:	$L_{wth} = 2a + \frac{\pi}{2} (d_{w1} + d_{w2}) + \frac{(d_{w2} - d_{w1})^2}{4a}$ $L_{wth} = 560.65 \text{ mm}$ $L_{wth} = 560 \text{ mm}$ (longitud estandarizada)
Distancia entre centros	$a_{nom} = K + \sqrt{K^2 - \frac{(d_{w2} - d_{w1})^2}{8}}$ $K = \frac{L_{wth}}{4} - \frac{\pi}{8} (d_{w1} + d_{w2}) = 82.501$ $a_{nom} = 159.64 \text{ mm}$
Ajuste mínimo x/y entre las distancias	$x = 0.004 * a_{nom} = 0.638 \text{ mm}$ $y = 19 \text{ mm}$
Número de dientes que engranan en la polea pequeña	$Z_e = \frac{z_1}{6} \left(3 - \frac{d_{w2} - d_{w1}}{a_{nom}} \right) = 8.27 = 8$
Factor de la longitud de la correa	$c_7 = 1$ ($L_{wth} > 555 \text{ mm}$)
Factor de engrane del diente	$c_1 = 1$ ($Z_e > 6$)
Ancho de la faja por encima de la potencia nominal	P_N para ancho de correa de 25 mm = $120 * 3.4 = 408 \text{ W}$ $P_u = P_N * c_1 * c_7 = 217.6 * 1 * 1 = 408 \text{ W}$ $P_u > P_B \Rightarrow 408 \text{ W} > 385 \text{ W}$ (SÍ SE CUMPLE)

Por lo tanto, a partir del cálculo anterior se obtiene los siguientes componentes a emplear.

1 faja síncrona Optibelt OMEGA HP	560	5M HP	25
1 polea síncrona Optibelt ZRS	20	5M	25
1 polea síncrona Optibelt ZRS	72	5M	25

4.1.5 Chaveta

En la transmisión de la potencia, se emplea una chaveta según la norma DIN 6885 y la tabla presente en el Anexo I. Ésta posee un área transversal de 6x6 mm y una longitud de 28 mm, la cual es menor que el ancho de la polea síncrona.

4.2 Estación de Extrusión

El sistema de extrusión por husillo simple es el seleccionado para el diseño de la máquina. Esta configuración consta de las partes mostradas en la Figura 4.29, en la que se observa una tolva de alimentación, por la cual ingresa el plástico triturado de ABS; el subsistema cilindro-husillo; el cabezal de extrusión; la transmisión de la potencia; el armazón y el motor DC. El diseño de estos elementos es explicado a continuación.

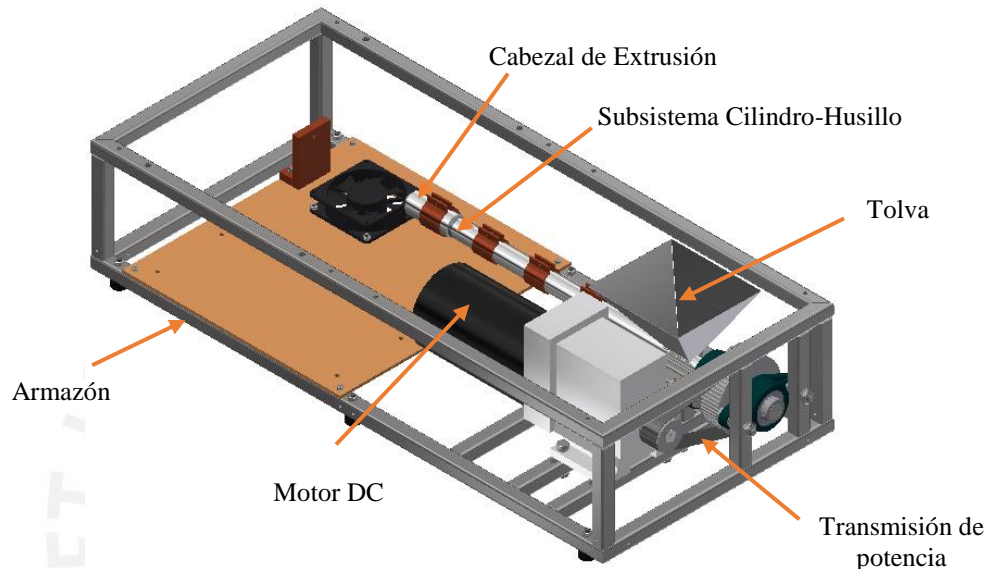


Figura 4.29 Estación de Extrusión

4.2.1 Husillo

En la Figura 4.30 se muestra las características del husillo de extrusión en donde D es el diámetro del tornillo (mm); t , el paso del husillo (mm); e , la anchura de la cresta del filete; ϕ , el ángulo del filete del tornillo con la vertical ($^{\circ}$); w , el ancho del canal (mm); h , la profundidad del canal (mm); δ , la holgura entre el cilindro y el filete (mm); y N , el número de revoluciones por minuto (RPM). Los valores de estos parámetros se determinan partir de la presión necesaria para extruir el material y el flujo másico determinado en los requerimientos del sistema que es de 0.5kg/h.

El cálculo para determinar los valores de estos parámetros se presenta en el Anexo D.1, en el cual se obtiene los valores presentes en la Tabla 4.6, en donde m es el número de canales en el husillo y L es la longitud del husillo sin considerar el muñón (mm). Además, se elige como material de construcción del husillo extrusor el acero ASTM A-276. Por lo tanto, se obtiene un husillo extrusor representado en la Figura 4.31.

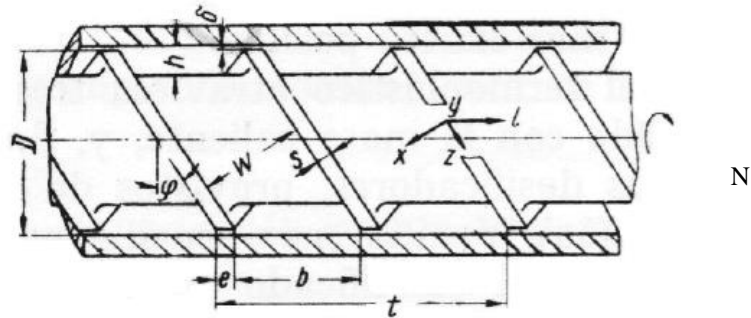


Figura 4.30 Vista general de una sección de un husillo de dos canales [Savgorodny, 1973]

Tabla 4.6 Valores de los parámetros del husillo

D (mm)	t (mm)	e (mm)	φ (°)	δ (mm)	h (mm)	m	L (mm)	N (RPM)
20	20	2	18	0.04	1	1	400	15



Figura 4.31 Husillo extrusor

4.2.2 Cilindro

El dimensionamiento del cilindro se inicia con los valores hallados para la construcción del husillo. En él, el diámetro interno está determinado por el diámetro del husillo y la holgura presente en él. Por lo que se tiene un $D_i = D + 2 * \delta$, es decir $D_i = 20.08\text{mm}$. El espesor mínimo del cañón se calcula mediante la ecuación 4.11 [Savgorodny, 1973], donde σ_{eq} es el esfuerzo total equivalente (MPa), p_{max} es la presión máxima presente en el cilindro (cuyo valor está determinado en el Anexo D.1 y es igual a 63.16 MPa), r es el radio interno del cilindro (mm) y e_{minimo} es el espesor mínimo del mismo (mm).

$$\sigma_{eq} = \frac{\sqrt{3}}{2} * \frac{p_{max} * r}{e_{minimo}} \quad (4.11)$$

Así, al elegir el acero ASTM A-276 para la construcción, de $\sigma_{\max} = 510$ MPa, y reemplazar los valores hallados en la ecuación anterior, se obtiene un $e_{\minimo} = 1.08$ mm. Por lo tanto, trabajando con un factor de seguridad mayor a 2, se obtiene un espesor $e_{\minimo}=2.5$ mm, y, de esta manera, un diámetro externo del cilindro igual a 25 mm.

Además del espesor del cilindro, se determina la garganta de alimentación de éste, la cual permite la dosificación del plástico triturado para su extrusión. Su dimensionamiento está determinado en la Figura 4.32, donde D es el diámetro interno del cilindro. Por lo tanto, se obtiene un área de ingreso del material de 14x30 mm con lo cual se optimiza la caída del material hacia la estación de extrusión.

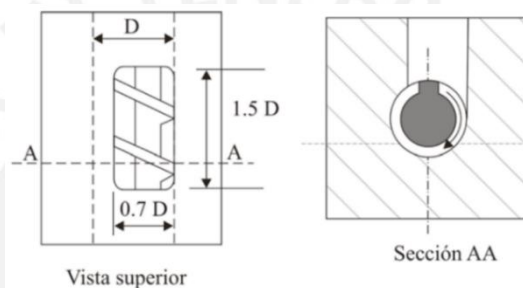


Figura 4.32 Garganta de alimentación para la extrusión [Beltrán, 2012]

Entonces se obtiene un cilindro de 400 mm de largo, 30 mm de diámetro externo, 20 de diámetro interno y con una garganta de alimentación de 17.5x37.5 mm. Además, posee un tramo roscado en su extremo para facilitar el montaje del cabezal de extrusión en él. En la parte a) de la Figura 4.33 se observa una representación gráfica isométrica de este elemento, y en la b) se muestra que posee que posee ángulos soldados a cada lado para su ensamble en el armazón y dos placas en la parte superior para la sujeción de la tolva.

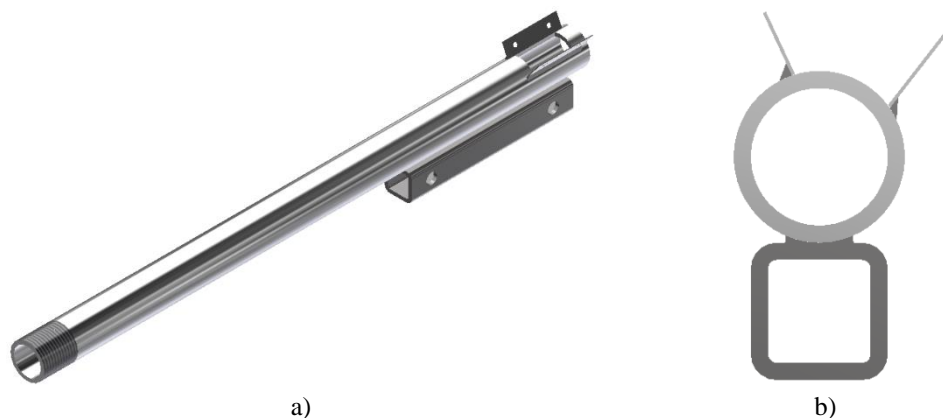


Figura 4.33 Cilindro Extrusor; a) Vista Isométrica, b) Vista Frontal

4.2.3 Cabezal de Extrusión

El cálculo para la selección de sus parámetros está desarrollado en el Anexo D.2. A partir de esta selección se obtiene un cabezal de extrusión con dos secciones roscadas como se muestra en la Figura 4.34a). El agujero roscado más grande es para su ensamble con el cilindro de extrusión. Se selecciona esta configuración ya que facilita el montaje de este elemento, así como su mantenimiento. El otro agujero tiene como función el posicionamiento de un tornillo. Este tornillo posee un agujero en el centro del tamaño del diámetro del filamento a extruir. Con este método se obtiene la posibilidad de fabricar filamentos de distintos diámetros al cambiar estos tornillos. Así, el cabezal extrusor tiene la forma mostrada en la Figura 4.34b).

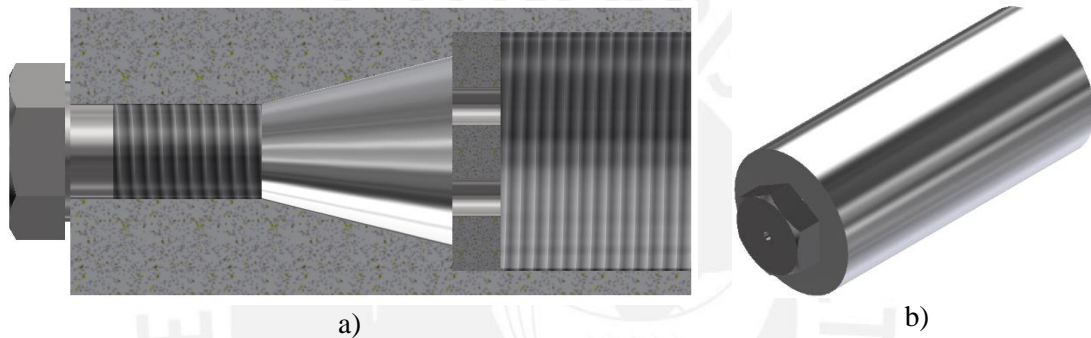


Figura 4.34 Cabezal extrusor; a) Sección media, b) Vista isométrica

4.2.4 Tolva de la Extrusora

La tolva tiene como función principal canalizar el plástico ABS triturado hacia la cámara de extrusión, por esta razón no está sometido a esfuerzos considerables y su dimensionamiento depende de la configuración geométrica de la máquina ya que comunica la estación de trituración con la de extrusión. Sus dimensiones se presentan en el plano despiece de las tolvas.

4.2.5 Motor de la Extrusora

Los cálculos para determinar la potencia para la locomoción de la estación se determinan en el Anexo D.3. En él se establece que el motor seleccionado debe poseer una potencia mayor a 113W para extruir el filamento de ABS. Por lo tanto, el motor seleccionado para esta estación es el motorreductor DC de 250W de la marca Transtecno con código ECMG 180/002 H 55.10 D16 240 que posee 42 N-m de torque a 54 RPM (ver Anexo H).

4.2.6 Transmisión de Potencia

En este caso, el motor posee un torque y una velocidad de salida de 42 N-m y 54 RPM, respectivamente, y se requiere de un torque de 120 N-m para la locomoción de la estación. Por tal motivo, se requiere de una reducción de la velocidad mediante faja síncrona, de esta manera se obtiene el torque necesario para extruir el filamento. En la selección de los elementos para la transmisión se hace uso del manual técnico para fajas síncronas Optibelt OMEGA, OMEGA HP y OMEGA HL y se establece las condiciones de trabajo en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7 Condiciones de trabajo de la trituradora

Máquina Motriz	Condiciones de servicio	Máquina accionada
Motor DC P = 250 W n ₁ = 54 RPM	Servicio diario: aprox. 1 hora Numero de arranques: 2 al mes Condiciones de servicio: Temperatura ambiental normal, sin influencia de aceites, agua o polvo. Distancia entre ejes: variable entre 100 y 200 mm Diámetro de la polea: d _{d1} < 180 mm	Eje Triturador P = 150 W n ₂ = 20 RPM ± 5 Arranque: bajo carga Tipo de carga: constante

Por lo tanto, al desarrollar el mismo procedimiento para la selección de los componentes de la transmisión de la estación de trituración, se obtiene los siguientes elementos:

1 faja síncrona Optibelt OMEGA HP	500	5M HP	25
1 polea síncrona Optibelt ZRS	24	5M	25
1 polea síncrona Optibelt ZRS	60	5M	25

4.2.7 Rodamientos

Estos rodamientos son los soportes para el husillo de extrusión. En este caso, se requiere que soporten cargas axiales de 320 N. Entonces, para su selección se emplea la tabla presente en el Anexo G y donde se selecciona el rodamiento cónico de código 32005 X/Q.

4.2.8 Aislante térmico

Como fue determinado en la lista de exigencias, por propósitos de seguridad, esta estación posee un material aislante térmico alrededor del cilindro de extrusión ya que la temperatura de trabajo de este elemento es cercana a los 250°C. Por tal motivo, se selecciona un material que soporta esta temperatura y que sea de adquisición nacional: lana de vidrio. Se trabaja con el producto de la empresa Kostec, el cual es un aislante especial para tubos y posee una temperatura de trabajo de hasta 454°C (Anexo K).

4.3 Estación de Enrollado

Es la estación final de la máquina. Posee las partes mostradas en la Figura 4.35, en la que se observa el mecanismo de enrollado, el mecanismo de posicionamiento del filamento en el carrete, el soporte para la conducción del filamento, el armazón y los motores del sub-sistema. Se muestra el armazón de forma transparente para poder visualizar mejor el mecanismo que posiciona el filamento. El diseño de estos elementos es explicado a continuación.

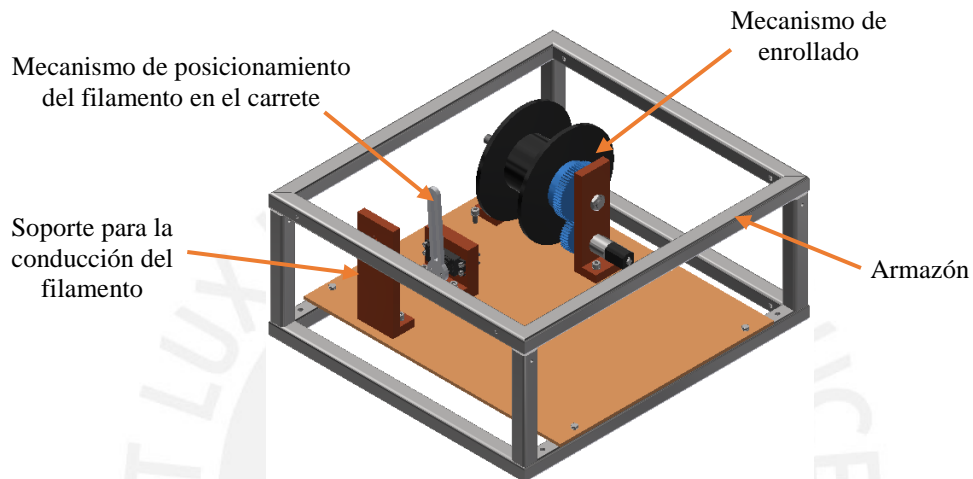


Figura 4.35 Estación de Enrollado

4.3.1 Mecanismo de enrollado

Este mecanismo es el que se presenta en la Figura 4.36. Está compuesto por dos soportes base, dos soportes laterales, una transmisión de potencia por engranajes, un eje y un motor DC. El dimensionamiento de estos elementos se presenta a continuación.

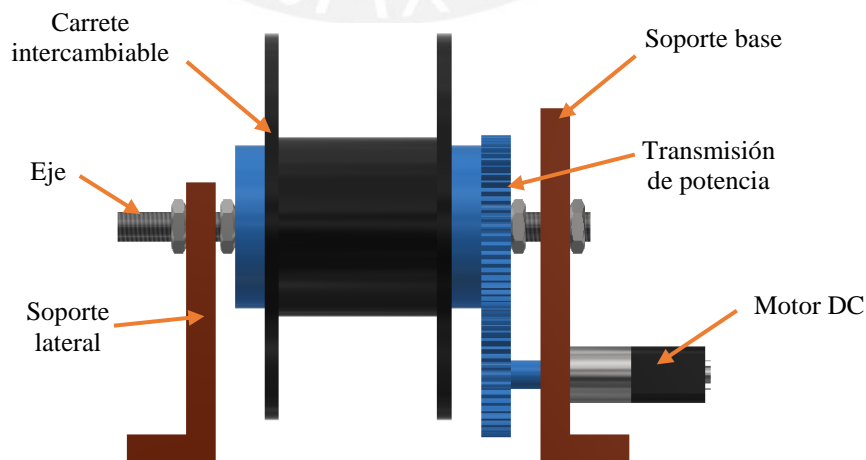


Figura 4.36 Mecanismo de Enrollado

4.3.1.1 Soporte Lateral

Debido a que el sistema usa carretes intercambiables de distintos tipos, se requiere de un mecanismo que se adapte a las distintas formas de estos elementos. Por tal motivo se cuenta con estos soportes laterales que poseen la forma mostrada en la Figura 4.37. Para el dimensionamiento de estos elementos se tiene en consideración que el diámetro interno de los carretes en general es de 2". Entonces, estos soportes cuentan con una sección circular la cual se posiciona en el agujero del carrete y permite su ajuste mediante forma. Entonces, al comprimir estos elementos contra las paredes del carrete, se logra la transmisión del movimiento rotacional para el enrollado del filamento.

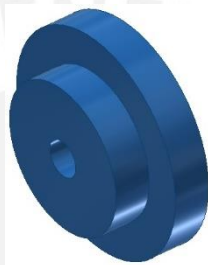


Figura 4.37 Soporte Lateral

Por lo tanto, este elemento está sometido a una fuerza de compresión que está relacionada con la fuerza requerida para enrollar el filamento alrededor del carrete. Esta fuerza que tracciona el filamento debe de ser tal que el esfuerzo de tracción generado sea menor que el esfuerzo de rotura del ABS (43.4 MPa). Por lo tanto en la Tabla 4.8 se muestra la fuerza máxima de tensión para filamentos de distintos diámetros comerciales.

Tabla 4.8 Fuerza máxima de tensión del filamento

Diámetro (mm)	Fuerza Máxima (N)
1.75	104
2.85	276
3	306

Por lo tanto, para la compresión de los soportes laterales se trabaja con la fuerza máxima hallada: 306 N. Esta fuerza se distribuye a los dos soportes que se encuentran comprimiendo al carrete, por lo que se tiene el DCL mostrado en la Figura 4.38, donde F_t es la fuerza de tracción del filamento, F_r es la fuerza de rozamiento entre el carrete y los soportes laterales, y F_c es la fuerza de compresión, todos en Newtons. Entonces al realizar el equilibrio de fuerzas para un sistema donde la velocidad es constante, se obtiene que

un valor de $F_r = 153 \text{ N}$. Con este valor, se obtiene el valor de la fuerza de compresión de los soportes, el cual resulta de la división entre F_r y μ , que es la constante estática de rozamiento entre el carrete y los soportes. Así, al seleccionar el ABS como material de fabricación de estos soportes, se obtiene un valor de $\mu = 0.48$ y, por consiguiente, una fuerza de compresión igual a 318 N .

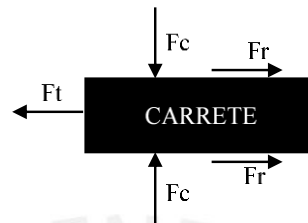


Figura 4.38 DCL del carrete

Entonces, hay una fuerza de compresión y una de fricción que actúan sobre el área anular de los soportes laterales que están en contacto con las paredes laterales del carrete; área representada en la Figura 4.39, donde D_{es} es el diámetro exterior del soporte. De esta manera, al aplicar la teoría del máximo esfuerzo cortante (Tresca), el cual se emplea en materiales dúctiles como el ABS, para el caso del estado plano de esfuerzos donde actúan el esfuerzo equivalente será el que se presenta en la ecuación 4.12, donde σ_{eq} es el esfuerzo equivalente (N/mm^2), σ_x es el esfuerzo de compresión (N/mm^2) y τ_{xy} es el esfuerzo cortante (N/mm^2),

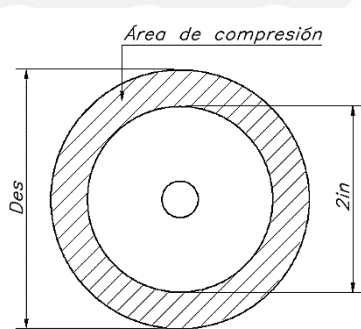


Figura 4.39 Área de compresión y fricción del soporte lateral

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + 4 * \tau_{xy}^2} \quad (4.12)$$

Por lo tanto al trabajar con una valor de $D_{es} = 55 \text{ mm}$, se obtiene una $\sigma_{eq} = 1.5 \text{ MPa}$ y por consiguiente, un factor de seguridad mayor a 5, ya que el esfuerzo de rotura del ABS es 43.4 MPa

4.3.1.2 Motor DC del mecanismo de enrollado

El valor de la potencia para la selección de motor se obtiene de la multiplicación entre la fuerza de tensión del filamento y la velocidad de enrollamiento del mismo. Este último valor debe de ser igual al de la velocidad de salida del material del cabezal de extrusión, que varía de acuerdo a su tamaño de apertura: diámetro del filamento extruido. Para hallar este valor se emplea la ecuación 4.13, en donde f_m es el flujo másico de extrusión igual a 0.5 kg/h, determinado en los requerimientos del sistema; ρ es la densidad del ABS igual a 1.1×10^{-6} kg/mm³; A_t es el área transversal del filamento (mm); y V_e es la velocidad tangencial de enrollamiento del filamento (mm/s). Y para obtener el valor de la velocidad angular de enrollamiento se emplea la ecuación 4.14, donde ω_e es la velocidad angular (RPM), V_e es la velocidad tangencial (mm/s) y R_c es el radio del carrete igual a 25.4 mm. Por lo tanto, al reemplazar los valores de los distintos diámetros en las ecuaciones 4.13 y 4.14, se obtienen los datos de la Tabla 4.11.

$$f_m = \rho * A_t * V_e * 3600 \frac{s}{h} \quad (4.13)$$

$$V_e = \omega_e * R_c * \frac{\pi}{30} \quad (4.14)$$

Tabla 4.9 Velocidad de enrollamiento del filamento

Diámetro (mm)	V_e (mm/s)	Potencia para enrollar (W)	ω (RPM)
1.75	52.5	5.5	20
2.85	19.8	5.5	8
3	17.9	5.5	7

Por lo tanto, se requiere de un motor que gire a 20 RPM y de una potencia de 5W (valor seleccionado para obtener un menor torque y, por consiguiente, una menor fuerza de tracción del filamento). Así, después de realizar una selección bajo los criterios de búsqueda determinados, se selecciona el motorreductor de la marca Pololu 20Dx46L mm 6V de reducción 391:1, cuyas características se muestran en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10 Características del motorreductor de la enrolladora

Tamaño (mm)	Voltaje de operación (V)	Velocidad de rotación (RPM)	Corriente de operación (mA)	Torque de operación (oz-in)
20D x 46L	6	35	3200	160

4.3.1.3 Transmisión de potencia

La transmisión de la potencia mecánica se realiza mediante engranajes. Debido a que se posee un motor de 35 RPM y se requiere de una velocidad de giro de 20 RPM, se emplea una reducción por engranajes de 3:2, de tal manera que se obtiene una velocidad de giro de 23.3 RPM. El ajuste más exacto de esta velocidad se realiza mediante el controlador del motor. De esta manera, mediante configuración geométrica se obtienen los siguientes engranajes:

Engranaje Motriz: Módulo 1, 40 dientes y 10 mm de ancho

Engranaje Conducido: Módulo 1, 60 dientes y 10 mm de ancho

Debido a que la potencia no se transmite del engranaje al eje y del eje a los soportes laterales, se requiere de una unión entre un soporte lateral y el engranaje para garantizar la transmisión del movimiento hacia el carrete. De esta manera, se obtiene un engranaje conducido como se muestra en la Figura 4.40. Por tal tanto, debido a la forma compleja de estos elementos, la fabricación de ambos engranajes se realiza mediante impresión 3D y con ABS.



Figura 4.40 Engranaje conductor del mecanismo de enrollado

4.3.2 Mecanismo de posicionamiento del filamento

Este mecanismo sirve para distribuir el filamento uniformemente a lo ancho del carrete. Se realiza este procedimiento para evitar que al plástico extruido se concentre en una zona del carrete al momento de su enrollado. Es por este motivo que se posee el mecanismo presente en la Figura 4.41, el cual está conformado por un brazo, un servomotor y un soporte para este servo. El dimensionamiento de estos elementos está descrito a continuación.

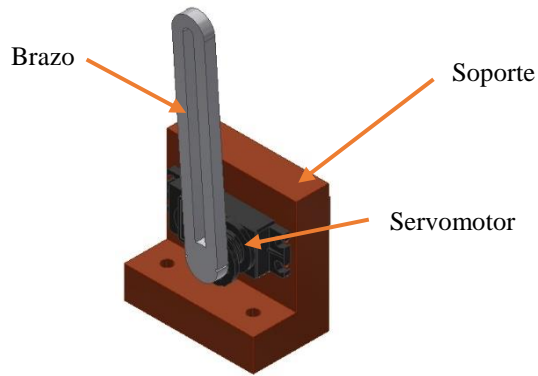


Figura 4.41 Mecanismo de posicionamiento del filamento

4.3.2.1 Brazo

Este elemento se encarga de posicionar el filamento a lo ancho del carrete. Posee la forma presente en la Figura 4.42, en la que se observa que presenta un canal por el cual pasará el filamento a enrollar. Debido a que no está sometido a esfuerzos mecánicos considerables, el dimensionamiento de este elemento depende del diámetro del filamento a posicionar y de la forma de la cabeza del servomotor para su ensamble. Además, debido a su geometría poco usual, este elemento de plástico ABS por impresión 3D.

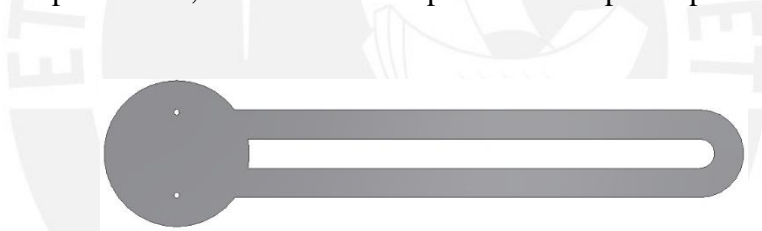


Figura 4.42 Brazo del servomotor del mecanismo de posicionamiento del filamento

4.3.2.2 Servomotor

Este actuador debe de ser capaz de mover el brazo de plástico ABS que posee una masa de 7g. Además, se sabe que el centro de masa de este elemento se encuentra a 35mm del de su centro de giro. Por lo tanto, se requiere de un torque igual a $7g \cdot 35mm$, es decir 24.5g-cm. Bajo este criterio de búsqueda, se tiene los servomotores presentes en la Tabla 4.11, de los cuales se selecciona el modelo MG90 debido a que posee un mayor torque de operación que el otro, lo cual brinda un mayor factor de seguridad para asegurar el movimiento del brazo del servomotor.

Tabla 4.11 Tabla comparativa de servomotores

Nombre	SG90	MG90
Tamaño	23x12.2x29 mm	23x22x12 mm
Peso	9 g	17 g
Torque de operación	1.8kg-cm	2.5kg-cm
Ángulo de operación	180° Máx	180° Máx
Voltaje de operación	4.8-6 V	4.8-6 V
Precio	S/14.00	S/22.00

4.3.3 Soporte para la conducción del filamento

Este soporte tiene como función principal canalizar el filamento ABS desde la salida del cabezal de extrusión hasta el mecanismo de posicionamiento del filamento. Por este motivo, no está sujeto a esfuerzos considerables y su dimensionamiento está en función del acondicionamiento geométrico de la estación. Entonces, para realizar dicha función se requieren de dos de estos soportes, cuya representación gráfica se muestra en la Figura 4.43, uno de ellos posicionado a la salida del filamento del cabezal extrusor y otro en la estación de enrollado. Ambos están conectados mediante un tubo de plástico que se posiciona en los agujeros de ambos soportes. Es por este tubo que el filamento extruido es conducido entre los puntos mencionados.

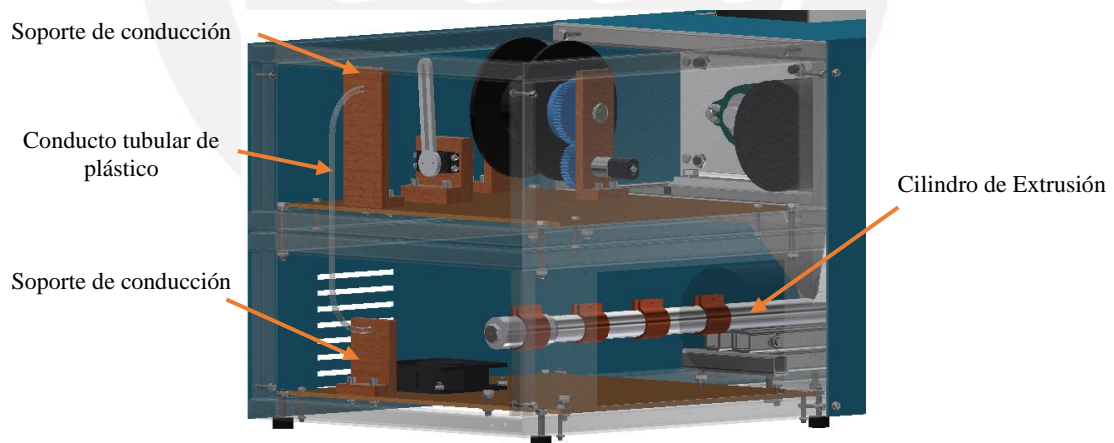


Figura 4.43 Soporte de conducción del filamento

4.4 Armazones de las estaciones

Los armazones de cada estación están conformados por perfiles cuadrados soldados de 20x2.5mm. Las estructuras de la trituradora, la enrolladora y la del soporte del cilindro extrusor están ensambladas sobre la de la extrusora mediante uniones atornilladas (ver Figura 4.44).

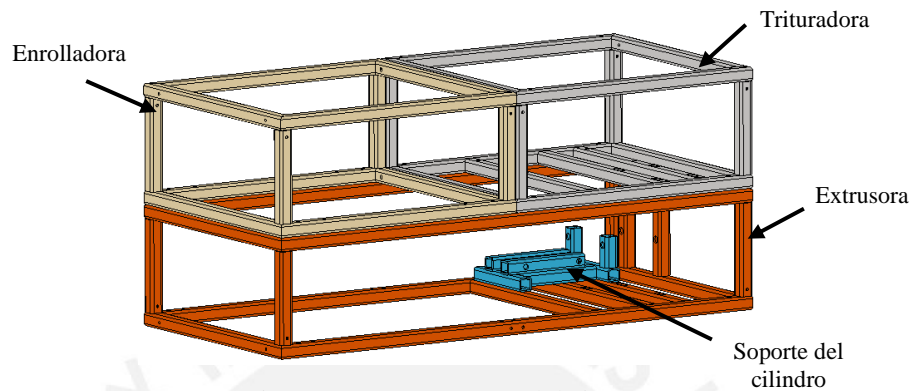


Figura 4.44 Armazones del sistema

El armazón de la trituradora posee tubos cuadrados de 20x2.5mm que están soldados a la estructura principal cuadrada y son el soporte del mecanismo de trituración y del motor del mismo. En el caso de la extrusora también se hace uso de perfiles cuadrados soldados de las mismas dimensiones donde se posiciona el soporte del cilindro de extrusión, los rodamientos, que soportan al husillo, y el motor de la extrusora. Y por último, en la enrolladora, se ensambla una base de madera en el armazón mediante pernos sobre la cual se posicionan los elementos de la misma mencionados anteriormente. Se opta por el uso de este material debido a que debajo de esta estación se encuentra la extrusora, la cual trabaja a temperaturas de hasta 250°C, por lo que si se emplea una base de acrílico o ABS esta se deformaría y se quebraría. Además, tampoco se hace uso de metal para la base, debido a que éste, al ser un conductor de calor, lo transferiría desde la parte inferior hasta la superior. Por este motivo se emplea un material aislante térmico como la madera.

Los tres armazones son fabricados con perfiles de acero estructural A36. Se opta por este tipo de acero debido a su menor valor y mayor facilidad de adquisición, y a que no se requiere de uno inoxidable ya que no está en contacto con el material a reciclar.

El análisis de la resistencia del material se realiza por medio de elementos finitos en *Inventor 2017*. Con respecto a las restricciones, el armazón de la extrusora es el que se

soporta a los otros dos, y éste, a su vez, posee seis soportes: uno en cada esquina y dos a la mitad del perfil de mayor longitud. Como fue mencionado, en cada armazón están ensamblados elementos por medio de uniones atornilladas. Por esta razón, estos elementos transmiten fuerzas y momentos en los agujeros donde son ensamblados.

En el caso del mecanismo de trituración, se transmite un momento torsor de 206.5 N-m y una fuerza de 2.95kN (radio de la polea conductora igual a 70 mm) a los cuatro agujeros donde está ensamblado. El motor de la trituradora transmite un momento de 59 N-m y una fuerza de 2.95kN y el de la extrusora, un momento de 42 N-m y una fuerza total de 2.1kN a todas las superficies donde se encuentran los tornillos de su ensamble. El husillo está sometido a una fuerza de compresión de 320N y un momento de 120N-m, por lo que las reacciones en los rodamientos son de 600N (radial) para el rodamiento de bolas, y 600N (radial) y 600N (axial) para el rodamiento cónico. Y, por último, para el cilindro extrusor, este se encuentra sometido a una fuerza de 320N de tracción (reacción del husillo), la cual genera reacciones en los cuatro agujeros donde se encuentra ensamblado. De esta manera, al distribuir las fuerzas y momentos mencionados en los agujeros de los armazones, y colocar las restricciones mencionadas para el análisis se obtienen los resultados resumidos en la Figura 4.45, Figura 4.46 y Figura 4.47.

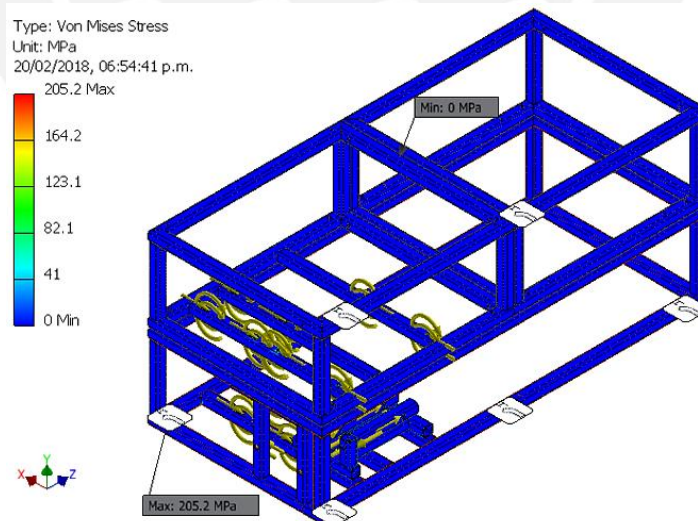


Figura 4.45 Esfuerzo de Von Mises en los armazones

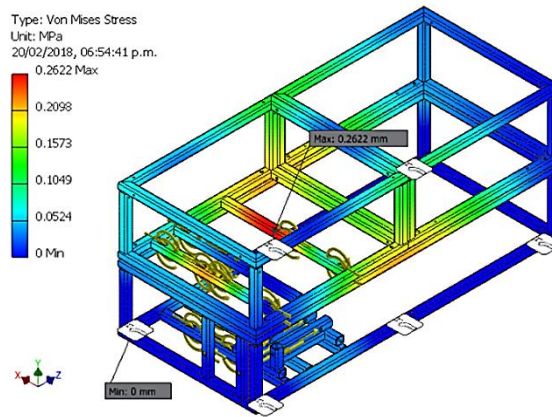


Figura 4.46 Desplazamiento del Armazón de la Trituradora

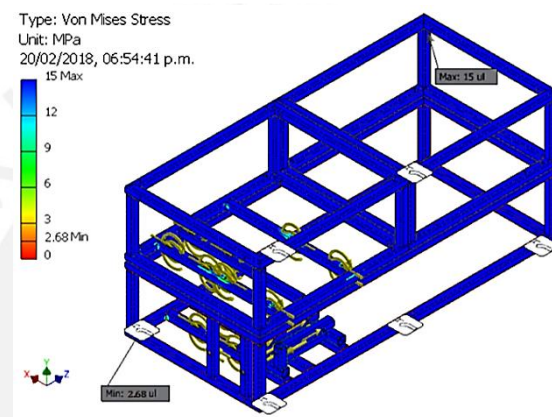


Figura 4.47 Factor de Seguridad del Armazón de la Trituradora

Entonces, resumiendo, se obtiene los siguientes valores máximos.

- Máximo esfuerzo equivalente: 205.2 MPa
- Máximo desplazamiento: 0.2622 mm
- Mínimo factor de seguridad: 2.68

El esfuerzo total más significativo (205.2 MPa) actúa sobre el agujero del armazón de la extrusora que se encuentra más cercano al motor de dicha estación. Éste es comparado con la resistencia máxima a la tracción del acero ASTM A36 (550MPa) y se obtiene un factor de seguridad igual a 2.68, que es superior a 1.5, por lo que se considera válido. Además, el máximo desplazamiento se produce en la barra que soporta el motor de la trituradora y el mecanismo de trituración del mismo, y se encuentra en el orden de las décimas de milímetro. Por lo tanto, se corrobora que las dimensiones obtenidas y el material seleccionado para la fabricación de la estructura de los armazones soportan los esfuerzos generados por las cargas de trabajo críticas para reciclar el plástico ABS.

CAPÍTULO 5

INGENIERÍA DE DETALLE DEL SISTEMA DE CONTROL

Este capítulo presenta el diseño del sistema de control. En él se describe el funcionamiento del sistema y las variables relevantes del mismo. Luego se establece la estrategia de control que permite el desarrollo un algoritmo y la selección de los componentes que garanticen el funcionamiento del sistema de control y su integración al sistema mecánico. Así, se obtiene la lógica de control a emplear y los componentes electrónicos del sistema mecatrónico.

Los mecanismos diseñados permiten realizar los tres procesos principales (triturar, extruir y enrollar) independientemente. En la trituración, se requiere de la lectura del estado del motor (encendido o apagado) y el sensado de la corriente del mismo para establecer el control de su sentido de giro. En la estación de extrusión, se precisa de la lectura del estado del motor, y del control de la velocidad de rotación del husillo y de la temperatura de extrusión. Finalmente, para el enrollado del filamento se requiere del valor de la longitud del ancho del carrete para el posicionamiento del plástico y el control de la velocidad de giro del carrete. Debido a que el valor de la temperatura de extrusión no está relacionado directamente con las otras variables a controlar, éste posee un sistema de control propio para simplificar el control en general.

5.1 Algoritmo y lógica de control

La propuesta de control del sistema mecatrónico está representada mediante los siguientes diagramas de flujo: lazo principal, control de la trituradora, control de la extrusora, control

del mecanismo de enrollado, actualización de interfaces y control de la temperatura de extrusión.

5.1.1 Lazo principal

En la Figura 5.1 se presenta el programa principal, el cual en un inicio realiza la configuración inicial de las unidades controladoras. Luego procede al control de la trituración, extrusión y enrollado mediante las subrutinas controlar trituradora, controlar extrusora y controlar mecanismo de enrollado respectivamente. Finalmente se ejecuta la última subrutina, que permite la actualización de las interfaces de cada estación, y se regresa a la segunda subrutina para así ejecutar todo el proceso nuevamente.

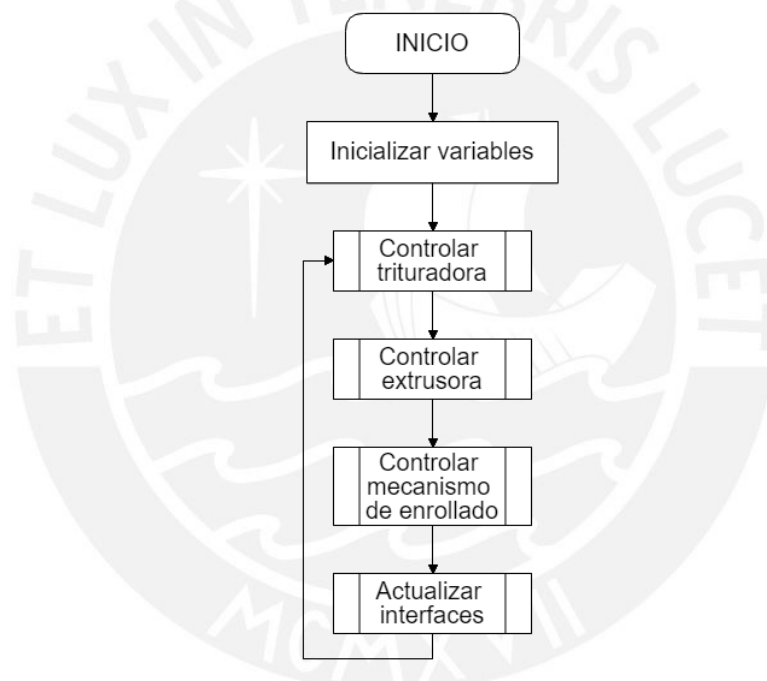


Figura 5.1 Diagrama de flujo del lazo principal

5.1.2 Controlar trituradora

En la Figura 5.2 se observa el diagrama de flujo de la subrutina para controlar la trituradora. Ésta lee el estado del motor para luego compararlo. Si éste está encendido, se procede con el sensado de su corriente. Si este valor no excede los 15A (valor de operación nominal), el motor mantiene el sentido de giro para la trituración, caso contrario, se invierte el mismo; ya que el plástico a triturar se encuentra atascado. Si el motor se encuentra apagado en un inicio, no se realiza ninguna acción y se finaliza la subrutina.

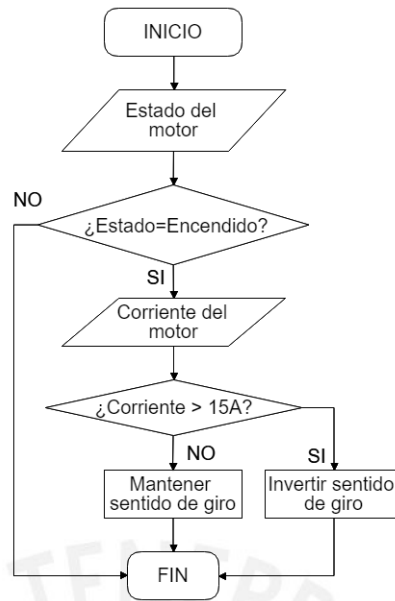


Figura 5.2 Diagrama de flujo de la subrutina de controlar trituradora

5.1.3 Controlar extrusora

En la Figura 5.3 se observa el diagrama de flujo de la subrutina para controlar la extrusora. Al igual que la subrutina anterior, se lee el estado del motor y si se encuentra encendido, se procede a la lectura la corriente de operación. Si este valor excede los 11A, el motor se detiene; caso contrario, se procede a leer el valor de la velocidad del husillo para luego ser colocado como el valor de la velocidad del motor de la extrusora.

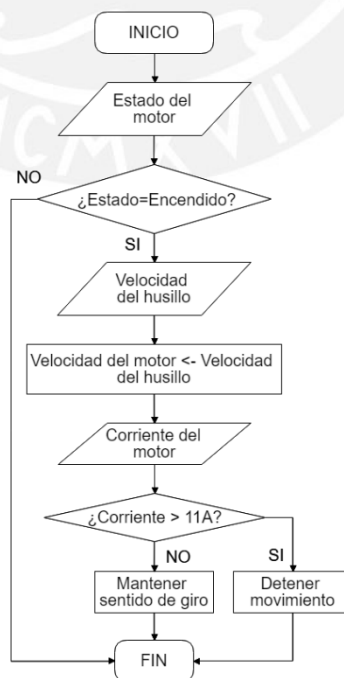


Figura 5.3 Diagrama de flujo de la subrutina de controlar extrusora

5.1.4 Controlar mecanismo de enrollado

En la Figura 5.4 se observa el diagrama de flujo de la subrutina para controlar el mecanismo de enrollado. Se realiza la lectura del ancho de carrete y la velocidad de giro de éste para poder controlar el rango de giro del servomotor, en función del primer valor, y la velocidad del actuador para enrollar el filamento.

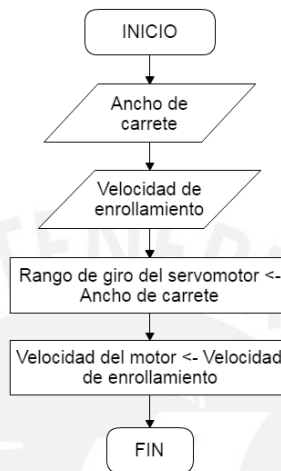


Figura 5.4 Diagrama de flujo de la subrutina de controlar mecanismo de enrollado

5.1.5 Actualizar interfaces

En la Figura 5.5 se observa el diagrama de flujo de la subrutina para actualizar las interfaces de cada estación. En la estación de trituración se enciende un led determinado para indicar el estado del motor (triturando o atascado); en la de extrusión, se muestra la velocidad de giro del husillo; y en la de enrollado, se muestra la velocidad con la que se enrolla el filamento extruido.

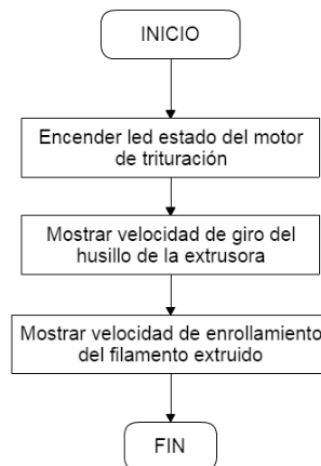


Figura 5.5 Diagrama de flujo de la subrutina de actualizar interfaces

5.1.6 Control de la temperatura de extrusión

La temperatura a la cual se extruye el filamento triturado posee un control independiente de las otras variables del sistema. Entonces, en la Figura 5.6 se muestra el diagrama de flujo para controlar este valor. En él se observa que inicialmente se realiza la configuración inicial del controlador, luego se establece la temperatura de extrusión del material y finalmente se asigna este valor a las resistencias de la extrusora.

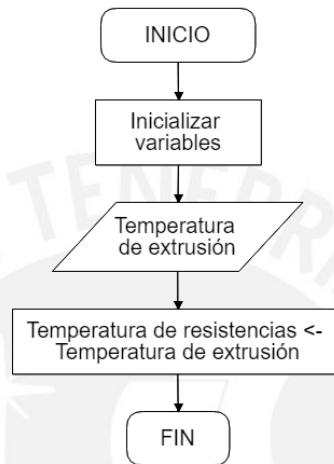


Figura 5.6 Diagrama de flujo del control de la temperatura de extrusión

Entonces, en la Figura 5.7 se muestra el esquema general del sistema de control. Se observa dos sistemas de control independientes representados por dos colores diferentes: uno para la temperatura de extrusión y otro para los otros parámetros a controlar. En una se observa las conexiones de los motores de cada estación, de sus controladores, de la unidad de control y del sistema de alimentación. Y en el otro se observa la conexión entre sensor de temperatura, la unidad de control de este sistema y la resistencia eléctrica para el calentamiento de la extrusora.

En el sistema de control de color azul, se cuentan con conmutadores mecánicos que permiten el paso que la energía eléctrica a las fuentes de alimentación (fuentes switching). También posee drivers para los motores de alta potencia de la trituradora y la extrusora. Estos deben de ser capaces de sensar las corrientes de sus respectivos motores para su posterior control. Y finalmente, en la interfaz se ubican conmutadores mecánicos, para el control de giro del motor de la trituradora; luces LED, para mostrar el estado del motor de la misma estación; y una pantalla táctil, para establecer la velocidad de giro y el ancho del carrete para el enrollado del filamento.

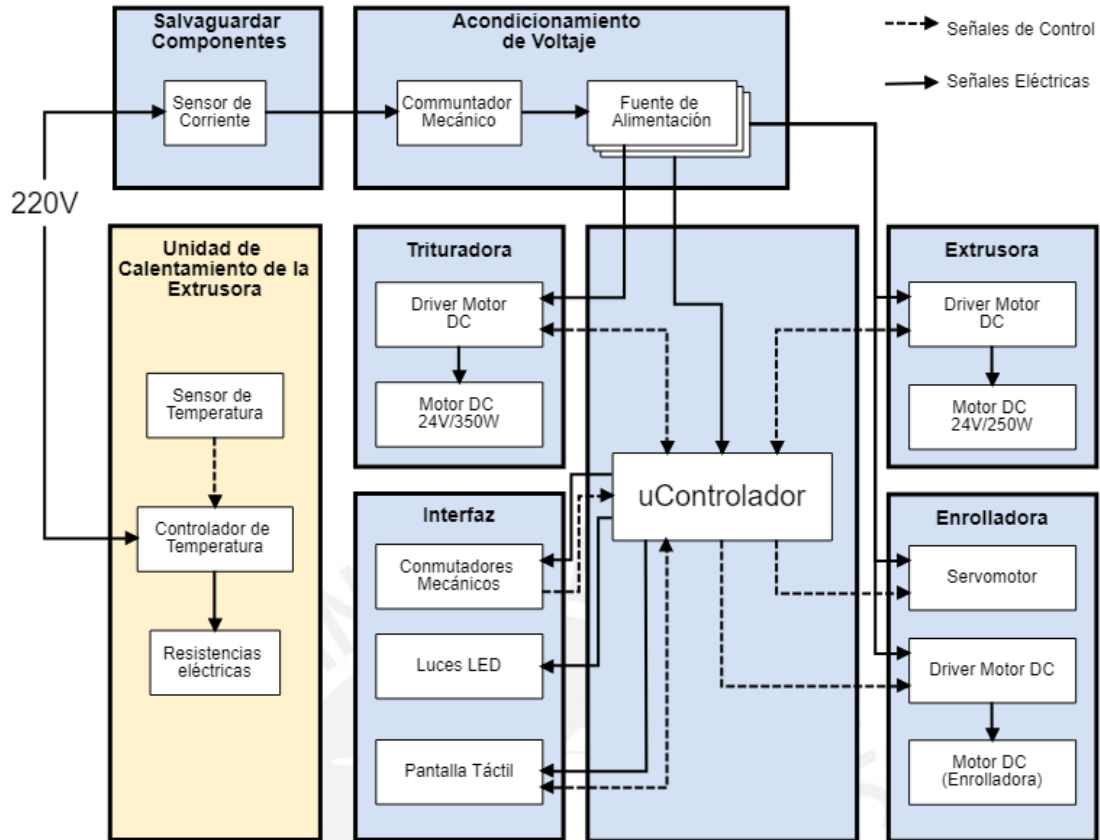


Figura 5.7 Esquema general de conexiones

5.2 Dispositivos electrónicos para el sistema de control

A continuación, se describen los componentes electrónicos (sensores, controladores, interfaces y fuentes de acondicionamiento de voltaje para la alimentación) involucrados en el sistema de control.

5.2.1 Controlador del motor de Trituración

En la selección del dispositivo para el control de este motor se toma en cuenta el voltaje y corriente de operación, los cuales son de 24V y 15A respectivamente. Entonces, en la Tabla 5.1 se representa dos controladores que cumplen con los criterios de búsqueda. Se selecciona el controlador Pololu G2 High-Power 24v21 debido que posee una protección para el voltaje inverso y un menor costo de adquisición que la otra alternativa.

Además, este controlador cuenta con un sensor de corriente de salida, para la protección del motor, de hasta 50A. El voltaje de salida del sensor tiene la relación de 20mV/A más un valor de 50mV de offset. El dispositivo total para el control y protección del motor se

observa en la Figura 5.8, en donde CS es el pin de salida del sensor de corriente del controlador y DIR es el del sentido de giro del motor.

Tabla 5.1 Tabla comparativa de controladores para el motor de la trituradora

Nombre	G2 High Power 24v21	High Power 24v20
Tamaño	33*20.3 mm	45.7*20.3 mm
Peso	5 g	4.2 g
Voltaje de operación	6.5 a 40 V	5.5 a 40 V
Corriente de salida	21 A (continua)	20 A (continua)
Frecuencia máxima de PWM	100 kHz	40 kHz
Voltaje de operación lógico	1.8 a 5.5V	Hasta 5.5 V
Protección de voltaje inverso	Si	No
Precio	S/130.00	S/173.00

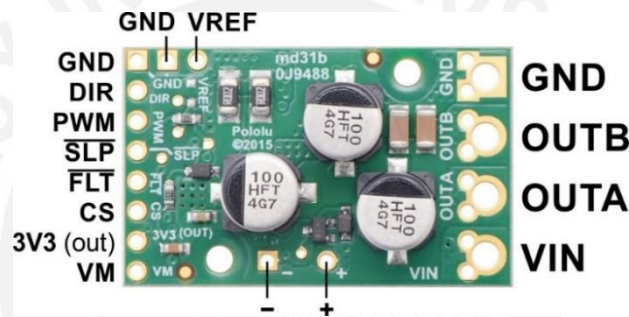


Figura 5.8 Controlador para el motor de la trituradora²⁰

5.2.2 Controlador del motor de la Extrusora

En este caso, el controlador debe soportar el voltaje y corriente de operación del motor de la extrusora que son de 24V y 11A respectivamente. Entonces, en la Tabla 5.2 se representa dos controladores que cumplen con los criterios de búsqueda, ambos con sensores de corriente incluidos. Se selecciona el controlador Pololu G2 High-Power 24v13 debido que posee una mayor holgura en el voltaje de operación ya que puede trabajar hasta 40V y el otro llega a un máximo de 24V, valor de voltaje nominal del motor.

El sensor de corriente de este dispositivo posee una relación de 40mV/A más un valor de 50mV de offset. El dispositivo total para el control y protección del motor se observa en la Figura 5.9, en donde CS es el pin de salida del sensor de corriente del controlador y DIR es el del sentido de giro del motor.

²⁰ Controlado marca Pololu 24v21: <https://www.pololu.com/product/2995#lightbox-picture0J7104;main-pictures>

Tabla 5.2 Tabla comparativa de controladores para el motor de la trituradora

Nombre	G2 High Power 24v13	VNH5019
Tamaño	33*20.3 mm	38.1*28 mm
Voltaje de operación	6.5 a 40 V	5.5 a 24 V
Corriente de salida	13 A (continua)	12 A (continua)
Frecuencia máxima de PWM	100 kHz	20 kHz
Protección de voltaje inverso	Si	Si
Precio	S/.98.00	S/.82.00

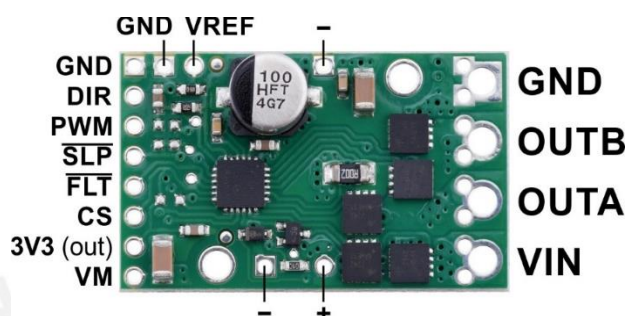


Figura 5.9 Controlador para el motor de la extrusora²¹

5.2.3 Controlador del motor de la enrolladora

En este caso, el controlador debe soportar el voltaje y corriente de operación del motor de la extrusora que son de 6V y 3.2A respectivamente. Así, después de realizar una selección bajo los criterios de búsqueda determinados, se selecciona el controlador VNH5019 de la marca Pololu, cuyas características se muestran en la Tabla 5.2.

5.2.4 Conmutadores mecánicos

El control del sentido de giro del motor de la trituradora se da mediante conmutadores mecánicos. Además, como mecanismo de seguridad, se coloca estos elementos para la alimentación de los motores de alta potencia: el de la trituradora y la extrusora. Entonces se requiere de tres de estos dispositivos mecánicos: uno para el control del sentido de giro de motor de la trituradora y dos como mecanismo de seguridad para la alimentación de los motores de alta potencia. Estos últimos deben de ser capaces de soportar una potencia de 480W a 220V: una corriente de 2A. Así, bajo este criterio de búsqueda, se selecciona los switches Rocker Switch SPDT de la marca Pololu. Estos botones son capaces de soportar una corriente de 6A a 250VAC.

²¹ Controlador marca Pololu 24v13: <https://www.pololu.com/product/2992#lightbox-picture0J6859;main-pictures>

5.2.5 Indicadores LED

En la visualización del estado de todos los motores (encendido o apagado) y del sentido de giro del motor de la trituradora se hace uso de LEDs. Estos deben de consumir la menor energía posible y deben de ser relativamente grandes para una mejor visualización por parte del usuario. Por lo tanto, se selecciona LEDs RGB de 10mm de diámetro que tienen un costo de adquisición de S/2.00.

5.2.6 Pantalla Táctil

La visualización y asignación de los valores de las variables a controlar en las estaciones de extrusión y enrollado se dan mediante una pantalla táctil. Este elemento debe ser capaz de crear la interfaz para ambas estaciones, por lo que se requiere de un tamaño mayor a las 2". Entonces, de acuerdo con este criterio de búsqueda, se obtienen las opciones presentes en la Tabla 5.3. Sin embargo, se selecciona el NX4024T032 ya que se requiere de menos pines para su control y es compatible con más tipos de controladores.

Tabla 5.3 Tabla comparativa de pantallas táctiles

Nombre	TFT LCD shield para Arduino	NX4024T032
Tamaño	320x240 pixeles (3.2")	320x240 pixeles (3.2")
Pines de control	8	2
Compatibilidad	Arduino	Arduino y Raspberry Pi
Ranura para SD	Si	Si
Alimentación	5V	5V
Precio	S/65.00	S/66.00

5.2.7 Microcontrolador

La tarjeta de programación debe poseer los pines necesarios para poder controlar los siguientes componentes:

- Los controladores de los motores DC de alta potencia. Cada uno de ellos requiere de 3 pines: uno para el PWM, otro para el control de la dirección del motor y el último para el censado de la corriente que circula por el actuador.
- Un controlador para el motor de 6V, el cual requiere de cuatro pines para su control.
- Un Servomotor de 6V, el cual requiere de un pin para su control
- Un conmutador mecánico como entrada para la interfaz de la trituradora.
- La pantalla táctil NX4024T032, la cual posee 2 pines para su control.
- Dos LEDs RGB que requieren de 3 pines para el control de cada uno.

En total se debe de contar con 20 pines disponibles para el control del sistema, con cuatro de PWM incluidos. Por tal motivo, se selecciona el Arduino Uno como sistema para el control (ver Figura 5.10) ya que cumple con los requisitos establecidos, posee una ventaja económica de adquisición y cuenta con un tamaño reducido con respecto a otros componentes en el mercado. En la Tabla 5.4 se presentan algunas características de este componente.



Figura 5.10 Arduino Uno Genuino²²

Tabla 5.4 Especificaciones Arduino Uno Genuino

Micro-controlador	Voltaje de operación	Clock	Pines digitales	Pines analógicos	Corriente por pin	Tamaño
ATMega 382P	5V	16MHz	14 (6 PWM)	6	20 mA	68.6x54.4mm

5.2.8 Acondicionador de voltaje

La alimentación de todos los componentes electrónicos, el controlador y los motores del sistema se realiza mediante fuentes conmutadas o switching. Para una mayor seguridad (debido a que se consume una corriente de 36A en DC en los motores de alta potencia) y mejor control de la alimentación de los componentes, se selecciona cuatro fuentes switching: una para cada motor de alta potencia, otra para el servomotor y el motor de la estación de enrollado y otra para la alimentación del controlador del sistema.

En la alimentación del motor de trituración se requiere de un voltaje de 24V y una corriente de 15A, mientras que para el motor de la extrusora se necesita el mismo voltaje, pero una corriente de 11A. Por tal motivo, para cada uno de estos motores se selecciona una fuente de la marca TMART con código S-480-24 cuyas características se presenta en la Tabla 5.5.

²² Arduino Uno: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>

Tabla 5.5 Características de la fuente switching para los motores alta potencia

Característica	Valor
Tamaño	215*113*49 mm
Peso	670 g
Entrada	110-220V / 50-60Hz
Tensión de salida	24V
Corriente de salida	20A
Potencia de salida	480W
Precio	S/95.00

Por otro lado, los motores de la enrolladora, que trabajan a un voltaje máximo de 6V y consumen una corriente total de 3.5A; y el microcontrolador, que posee 20 pines de control y consume un corriente de 400mA (20 mA por pin), requieren de una alimentación de 5V/4A en total. Para este caso, se selecciona una fuente switching de 12V/5A de la marca Energitec de código EN-60-12. La ventaja de esta fuente es que el voltaje de salida se puede ajustar, por lo que se puede obtener los 6V requeridos para la alimentación de los componentes restantes.

5.2.9 Resistencias para el calentamiento del cilindro extrusor

Estas resistencias son necesarias para precalentar el cilindro de la extrusora. El tipo más usado son las resistencias de banda/abrazadera las cuales son colocadas a lo largo de los 200 mm de la zona de transición y dosificado del cilindro. Entonces, bajo los criterios de potencia y dimensiones establecidos, se selecciona la resistencia de la marca TEMPCO de 240V/250W (ver Figura 5.11), la cual posee un diámetro interno y una longitud de 35mm, y un costo de S/98.00.



Figura 5.11 Resistencias tipo banda de la extrusora²³

²³ Band resistor: <http://www.tempco.com/Band/Duraband2010.htm>

5.2.10 Controlador de temperatura

El dispositivo de control de las resistencias para el calentamiento del cilindro debe poder encenderlas y apagarlas automáticamente cuando se llegue a la temperatura deseada. Además, debe ser capaz de controlar una temperatura de hasta 300°C (temperatura de extrusión del plástico ABS), soportar una corriente máxima determinada por las resistencias a controlar y ser lo más pequeño posible.

Por tal motivo, y después de comparar los distintos tipos de controladores de temperatura en el mercado, se opta por el controlador PID REX-C100, el cual posee las características mostradas en la Tabla 5.6 y es de adquisición nacional.

Tabla 5.6 Características del controlador de temperatura

Característica	Valor
Tamaño	48*48*100 mm
Temperatura máxima de censado	400°C
Entrada	240VAC / 60Hz
Tipo de control	Doble PID
Tensión máxima de salida	240VAC
Corriente máxima de salida	3A
Precio	S/.99.00

5.2.11 Sensores de temperatura

En la elección del sensor de temperatura, se requiere que éste pueda sensar temperaturas de hasta 400°C, valor determinado por el controlador seleccionado. Entonces se presenta la Tabla 5.7 en donde se compara los distintos tipos de termocuplas presentes en el mercado. Luego de realizar la comparación, se selecciona la termocupla tipo J, debido a que es la que mejor se adecua a los requerimientos establecidos.

Tabla 5.7 Tabla comparativa de termocuplas

Código ANSI	Cable + Aleación	Cable - Aleación	Rango de Temperatura	Salida
J	Hierro	Cobre/Níquel	0 a 750°C	0 a 42.2mV
K	Níquel/Cromo	Níquel/Aluminio	-200 a 1250°C	-5.9 a 50.6mV
T	Cobre	Cobre/Níquel	-200 a 350°C	-5.6 a 17.82mV

De esta manera, el diagrama de conexiones para los componentes electrónicos seleccionados se muestra en la Figura 5.12.

CAPÍTULO 6

PLANOS Y ESTIMACIÓN DE COSTOS

En el siguiente capítulo se muestra la lista de planos de ensamble, despiece y esquemático para la fabricación del sistema mecatrónico descrito en el capítulo 4 y 5. Además se muestra la estimación de costos para fabricar una unidad del sistema diseñado.

6.1 Planos

Los planos mecánicos y eléctricos se encuentran en el Anexo M: Planos del Sistema. En la Tabla 6.1 se presenta la lista de planos en el cual cada uno está asociado a un código donde las dos primeras letras indican que tipo de plano es: Plano de ensamble (PE), plano de despiece (PD) o plano esquemático (PEE), y el número indica la numeración del plano.

6.2 Estimación de costos

Cabe resaltar que las cotizaciones de la compra de algunos componentes seleccionados pueden variar dependiendo de la disponibilidad y del tipo de cambio, así como también los costos de los procesos de mecanizados que están contemplados en relación a los talleres del parque industrial limeño.

Los costos de la máquina están conformados por los costos de fabricación y de diseño. En la categoría de diseño se estipulan los costos de horas-hombre por la investigación de los antecedentes, el estado del arte, el diseño conceptual y la ingeniería de detalle del sistema mecatrónico desarrollado. Este proceso fue realizado en 450 horas durante 15 semanas y a S/40.00 por hora, por lo que el costo total del diseño de la máquina es de S/18,000.00.

Tabla 6.1 Lista de planos del sistema

Plano	Código
Ensamble General	PE1
Ensamble de la Trituradora	PE2
Ensamble de la Extrusora	PE3
Ensamble de la Enrolladora	PE4
Armazón de la trituradora	PE5
Armazón de la extrusora	PE6
Armazón de la enrolladora	PE7
Mecanismo de Trituración	PE8
Soporte de Trituración	PE9
Eje Triturador	PE10
Cilindro Total	PE11
Base Cilindro	PE12
Carcasas	PD13
Elementos del Eje Triturador	PD14
Elementos del Soporte de Trituración	PD15
Elementos de la Cavidad de Trituración	PD16
Husillo Extrusor	PD17
Elementos del Cilindro Extrusor	PD18
Elementos de la Enrolladora	PD19
Tolvas	PD20
Esqueleto del armazón de la trituradora	PD21
Esqueleto del armazón de la extrusora	PD22
Esqueleto del armazón de la enrolladora	PD23
Esqueleto de la base del cilindro	PD24
Plano Esquemático	PEE25

Los costos de fabricación se dividen, a su vez, en costos de adquisición del material y costos de mecanizado, cuyas cotizaciones se presentan en el Anexo L. Dentro de los costos de adquisición se tienen el de los elementos del sistema mecánico, presentados en la Tabla 6.2, y el de los del sistema electrónico y control, presentado en la Tabla 6.3. Los costos de mecanizado involucran los costos por soldadura, por maquinado, por corte por plasma y por impresión 3D, presentados en la Tabla 6.4 (costos nacionales).

Los costos por soldadura incluyen los gastos de preparación del material a soldar, las herramientas y elementos consumibles utilizados en la soldadura, la mano de obra y la pintura anticorrosiva que se debe de aplicar a la estructura, ya que es de acero estructural A36. De esta manera, se obtiene en promedio un costo de S/250.00 por armazón soldado y S/100.00 por la soldadura del cilindro extrusor con los soportes base para su sujeción.

La fabricación de las piezas del mecanismo de trituración se realiza mediante corte por plasma. Entonces, consultando el costo del servicio de diversas empresas, se opta por el de POLIMETALES S.A.C., que posee un precio de USD\$4.50 el metro lineal de corte. En el total de metros lineales a cortar, se incluyen las 12 herramientas de corte (5.441 m) con sus 13 espaciadores (3.407 m), los 13 soportes de corte (5.352 m) y sus 12 separadores (4.083 m), y las placas de la cavidad de trituración (6.294 m), obteniéndose un total de 24.577 m lineales para cortar. Por lo tanto, el costo por fabricar los elementos del mecanismo de trituración (no se considera el eje de transmisión) es de USD\$110.60, es decir, al tipo de cambio del mes de febrero del 2018, S/360.60.

El costo de fabricación por medio de impresión 3D se realiza en SalaVEO-PUCP, el cual varía de acuerdo a la máquina usada y a la longitud total de filamento empleado en la impresión. De esta manera, al usar la impresora de la marca daVinci 1.0 y el plástico ABS como material de fabricación, el costo por metro de material usado es igual a S/3.12 soles.

En el cálculo de la cantidad de filamento a utilizar se utiliza el programa XYZware, el cual indica que para la impresión de los componentes requeridos se consume en total 140.8 m de filamento ABS. Por lo tanto, el costo total de la impresión de los elementos a fabricar en ABS es igual a S/439.30.

Tabla 6.2 Costos de adquisición de elementos del sistema mecánico

Descripción	Precio	Cantidad	Precio Total
Plancha de acero inoxidable ASTM A240 de 1219x2438x5mm	S/1,089.00	1	S/1,089.00
Plancha de acero inoxidable ASTM A240 de 1219x2438x1mm	S/224.23	2	S/448.46
Barra hexagonal de 1m de acero ASTM A-276 de ø25mm	S/106.07	1	S/106.07
Ángulos de 6m de acero A36 de 20x2mm	S/25.00	3	S/75.00
Motor DC Transtecno 350W/54 RPM	S/2,790.00	1	S/2,790.00
Motor DC Transtecno 250W/54 RPM	S/2,720.00	1	S/2,720.00
Faja síncrona Optibelt OMEGA HP 560 5MHP 25	S/63.50	1	S/63.50
Faja síncrona Optibelt OMEGA HP 500 5MHP 25	S/47.00	1	S/47.00
Polea síncrona Optibelt ZRS 24 5M 25	S/30.00	2	S/60.00
Polea síncrona Optibelt ZRS 60 5M 25	S/80.00	1	S/80.00
Polea síncrona Optibelt ZRS 72 5M 25	S/100.00	1	S/100.00
Chumacera de pared UCFL 204	S/25.00	4	S/100.00
Servomotor SG90	S/22.00	1	S/22.00
Tablero de madera MDF de 2140x2440x4mm	S/36.90	1	S/36.90
Anillos seeger DIN471 ø20mm	S/0.50	4	S/2.00
Pernos, tuercas y arandelas	S/1.00	100	S/100.00
		Total	S/7,839.93

Tabla 6.3 Costos de adquisición de elementos del sistema electrónico y control

Descripción	Precio	Cantidad	Precio Total
Controlador G2 High Power 24v21	S/130.00	1	S/130.00
Controlador G2 High Power 24v13	S/98.00	1	S/98.00
Controlador VNH5019	S/82.00	1	S/82.00
Pantalla Táctil NX4024T032	S/66.00	1	S/66.00
Arduino UNO	S/85.00	1	S/85.00
LEDs RGB	S/2.00	2	S/4.00
Conmutadores mecánicos	S/2.40	4	S/9.60
Fuente Switching TMART 24V/20A	S/95.00	2	S/190.00
Fuente Switching ENERGIT 12V/5A	S/60.00	1	S/60.00
Resistencias tipo banda TEMPCO de 240V/250W	S/98.00	4	S/392.00
Controlador de temperatura PID REX-C100	S/130.00	2	S/260.00
Termocupla tipo J	S/.30.00	2	S/.60.00
Total			S/1,436.60

Tabla 6.4 Costos de mecanizado nacional

Descripción	Precio Total
Soldadura	S/850.00
Corte por plasma para metal de 5mm de espesor	S/360.60
Torneado y fresado	S/1,200.00
Impresión 3D de los componentes en ABS (VEO PUCP)	S/.439.30
Total	S/2,849.30

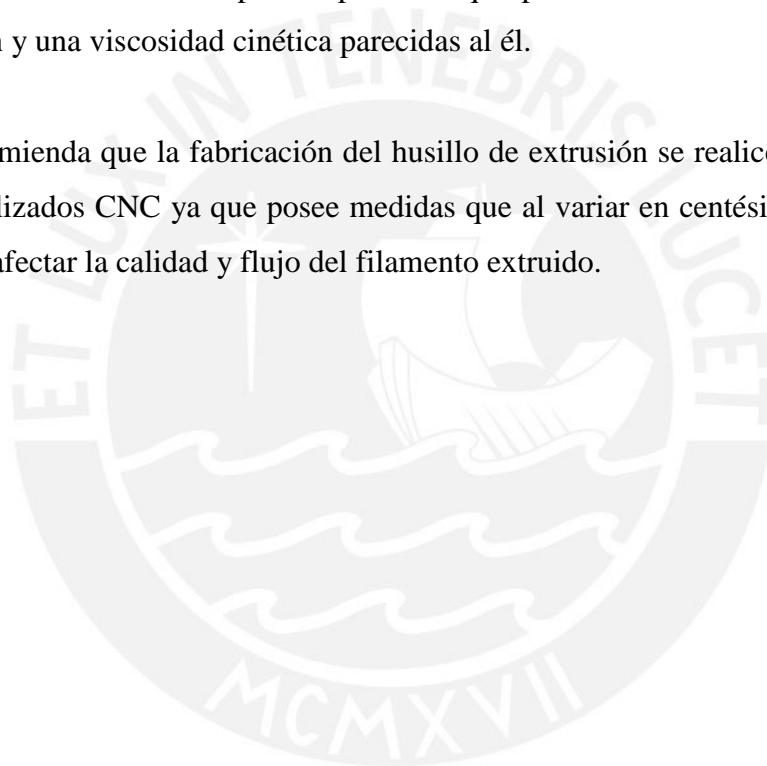
De esta manera, en la Tabla 6.5 se muestra la lista de la estimación de costos de fabricación para un ejemplar del sistema mecatrónico diseñado.

Tabla 6.5 Estimación del costo para una máquina recicladora de plástico ABS

Descripción	Precio Total
a) Diseño	S/18,000.00
b) Fabricación	S/12,125.83
- Adquisición de material	S/9,276.53
- Mecanizado	S/2,849.30
c) Ensamblaje y puesta a punto de la máquina	S/1,000.00
Subtotal	S/31,125.83
Imprevistos (5%)	S/1,556.29
Total	S/32,682.12

OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

- Se observa que la adquisición de los motorreductores DC de alta potencia es elevada, por lo que si se quiere disminuir costos se puede contemplar el uso de motores AC monofásicos, pero teniendo en cuenta que no se poseerá un sistema de protección contra el atasco de material en la estación de trituración, ya que en un motor de este tipo no se puede invertir el sentido de giro del mismo mediante un sistema de control.
- Si bien el sistema está diseñado para reciclar plástico ABS, se podría contemplar el procesamiento de otros tipos de plásticos que posean una resistencia máxima a la tracción y una viscosidad cinética parecidas al él.
- Se recomienda que la fabricación del husillo de extrusión se realice mediante tornos especializados CNC ya que posee medidas que al variar en centésimas de milímetro podría afectar la calidad y flujo del filamento extruido.



CONCLUSIONES

- Con el diseño realizado se consigue un sistema capaz de reciclar el plástico ABS y convertirlo en filamento para impresiones 3D por FDM, mediante procesos de trituración, extrusión y enrollado del material en un carrete intercambiable. Además, el diseño presente cuenta con dimensiones de 800x360x350mm, lo cual permite su uso en ambientes con espacio relativamente reducido como los laboratorios de la PUCP.
- Debido a que se posee un sistema de extrusión de boquilla intercambiable, se obtiene un sistema capaz de fabricar no solo filamentos de 1.75, 2.85 y 3.00 mm de diámetro como fue determinado en un principio, sino también otras variantes que se encuentren en este rango de valores.
- El sistema diseñado cumple todos los requerimientos que se estipularon en el capítulo 3 del documento, por lo que posee la capacidad de producir mínimamente 0.5kg de ABS por hora. Además, se contempla un diseño modular, permitiendo el ensamble de cada estación (trituradora, extrusora y enrollado) por separado y su montaje en una sola mediante uniones atornilladas.
- De los resultados obtenidos del análisis del sistema se concluye que los elementos de cada estación soportan los esfuerzos a los que se encuentra sometidos al momento del reciclado del plástico, obteniéndose un factor de seguridad mayor a 1.5 en todos ellos. Sin embargo, en el caso de las herramientas de corte y de la cavidad de trituración se obtiene un factor cercano a 1.5, por lo que deben tener un mantenimiento más frecuente en comparación de los otros elementos.
- Con respecto a la estimación de los costos, se concluye que el precio de fabricación de una unidad de este sistema es de S/13,500.00, en el cual se incluye la importación de componentes mecánicos y electrónicos (como los motores de alta potencia y sus controladores) y su ensamblaje y puesta a punto. Así mismo, se obtienen los costos de diseño que son de S/18,000.00 por 450 horas invertidas.

BIBLIOGRAFÍA

- 3DHUBS
2016 *2017 3D Printer Guide*. 3DHUBS. Web: 13 de marzo, 2017.
<<https://www.3dhubs.com/best-3d-printer-guide>>
- 3DPrintingIndustry
2016 *The Free Beginner's Guide*. 3DPrintingIndustry. Web: 13 de marzo, 2017.
<<http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/processes/>>
- Álvarez, A.
2015 *Resistencia de Materiales 2*, Lima, Perú: PUCP.
- Barriga, B.
2014 *Métodos de diseño en Ingeniería Mecatrónica*. Lima, Perú: PUCP.
- Beltrán, M. y Marcilla, A.
2012 *Tecnología de Polímeros*. Alicante, España: Universidad de Alicante
- Casanueva, H.
2015 *La impresión 3D y 4D: ¿Hacia una nueva Revolución Industrial?*
AméricaEconomía. 4 de enero del 2015. Web: 27 ene. 2017.
<<http://www.americaeconomia.com/analisis-opinion/la-impresion-3d-y-4d-hacia-una-nueva-revolucion-industrial>>
- D3D Innovations
2015 *FilaFab Operating Manual*. D3D Innovations Limited. Reino Unido.
- Escobar, C.
2013 *ABS Y PLA: DIFERENCIAS, VENTAJAS Y DESVENTAJAS*. Impresoras3D.
Web: 13 de marzo, 2017.
<<https://impresoras3d.com/blogs/noticias/102837127-abs-y-pla-diferencias-ventajas-y-desventajas>>
- 2016 *Tipos de impresoras 3D*. Impresoras3D. Web: 14 de marzo, 2017.
<<https://impresoras3d.com/blogs/noticias/102883975-tipos-de-impresoras-3d>>
- FilabotEX2
2017 *Filabot EX2 Filament Extruder*. Filabot. Web: 14 de marzo, 2017.
<<https://www.filabot.com/collections/filabot-core/products/filabot-original-ex2?variant=3635451076>>
- Filastruder
2017 *Filastruder Kit*. Filastruder. Web: 14 de marzo, 2017.
<<https://www.filastruder.com/products/filastruder-kit?variant=338125655>>
- GIANG, K.
2017 *PLA vs. ABS: What's the difference? 3D HUBS*. Web: 01 de marzo, 2017.
<<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/pla-vs-abs-whats-difference>>

- Goodship, V.
2007 *Plastic Recycling*. Science Progress (1993-), Vol.90, No. 4, pp. 245-268.
- Hakkens, D.
2017 Build a Shredder. Precios Plastic. Web: 16 de marzo, 2017.
<<https://preciousplastic.com/en/videos/build/shredder.html>>
- Hiemenz, J.
2011 *LA IMPRESIÓN 3D CON FDM: ¿Cómo funciona?* Pixel Sistemas. Web: 13 de marzo, 2017.
<<https://caminstech.upc.edu/sites/default/files/FDM%20I%20-%20Tecnologia.pdf>>
- Hopewell, J. et al.
2009 *Plastics recycling: challenges and opportunities*. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, Vol. 364 (1526), pp. 2115–2126.
- Mantoux, O. et al.
2004 *Recycling Study of End of Life Products Made of ABS Resin*. Journal of Materials Science and Technology, Vol.20, Suppl. 1, pp. 125-128.
- Mio, R. et al.
2017a Development and Assessment of a Powered 3D-printed Prosthetic Hand for Transmetacarpal Amputees. *The 3rd International Conference on Control, Automation and Robotics*, Nagoya, Japan, 2017, to be published.
- 2017b Design of a 3D printable powered prosthetic hand for transmetacarpal amputees. *Latin American Congress on Automation and Robotics*, Panama city, Panamá, 2017.
- Molina, A
2016 *Desarrollo de materiales compuestos de matriz termoplástica reforzados con nanopartículas utilizando la técnica de modelado por deposición fundida empleada en manufactura aditiva*. (Tesis de Maestría). PUCP, Lima, Perú.
- OpenFuture
2016 *¿Qué tipos de impresión 3D existen?* OPEN FUTURE. Web: 14 de marzo, 2017.
<<https://www.openfuture.org/es/new/que-tipos-de-impresion-3d-existen>>
- Paulsen, K.
2014 *Elementos de Máquinas 1*. Lima, Perú: PUCP.
- Peydró, M. et al.
2012 *Metodología para el cálculo de la viscosidad empleando como caso práctico el reprocesado de ABS*. 3C Tecnología. N°1, pp. 43-48.
- Prosino
2017 *What is the difference between single shaft shredder and double shaft shredder?* Ningbo Sinobaler Machinery Co., Ltd. Web: 18 de marzo, 2017.
<<http://www.sinoshredder.com/what-is-the-difference-between-single-shaft-shredder-and-double-shaft-shredder/>>

- Ramos, L.
1993 *Extrusión de plásticos. Principios básicos.* México DF, México: Limusa
- Reynald, H.
2005 *Reciclaje.* Reciclaje de envases plásticos de agroquímicos y su transformación en insumos rurales. Web: 14 de marzo, 2017.
<<http://oni.escuelas.edu.ar/2005/CORDOBA/902/olimpiadas/reciclaje.htm>>
- Ribechini, G.
2017 IMPRESORAS 3D, ¿QUÉ USO LES DAREMOS EN EL FUTURO??. *OBS Business School.* [Consulta: 28 ene. 2017].
<<http://www.obs-edu.com/int/blog-investigacion/innovacion/impresoras-3d-que-uso-le-daremos-en-el-futuro>>
- Romero, E y Elías, D.
2016 Design of a non invasive haptic feedback device for transradial myoelectric upper limb prosthesis. *2016 IEEE ANDESCON*, Arequipa, Perú, pp. 1-4.
- Savgorodny
1973 Transformación de plásticos. Barcelona, España: G. Gil,
- Suarez, J.
2015 *Proyecto de máquina extrusora, para creación de hilos de Poli Etilén Tereftalato.* (Tesis de pregrado). Instituto Politécnico Nacional, México D.F., México.
- UL-ABS
2017 *Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) Typical Properties Generic ABS.* PROSPECTOR. Web: 13 de marzo, 2017.
<<https://plastics.ulprospector.com/generics/1/c/t/acrylonitrile-butadiene-styrene-abs-properties-processing>>
- UL-PLA
2017 *Polylactic Acid (PLA) Typical Properties.* PROSPECTOR. Web: 13 de marzo, 2017. Web: 13 de marzo, 2017.
<<https://plastics.ulprospector.com/generics/34/c/t/polylactic-acid-pla-properties-processing>>

ANEXOS

