

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA.
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA.
SANTIAGO – CHILE.



DISEÑO DE EXTRUSORA DE FILAMENTO
PARA IMPRESIÓN 3D A PARTIR DE PLÁSTICOS
RECICLADOS.

RODRIGO NICOLÁS PARRA BRITO.
MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO.
PROFESOR GUÍA: DR. ING. SHEILA LASCANO FARAK.
PROFESOR CORREFERENTE: DR. ING. DANILO ESTAY BARRIENTOS.

AGOSTO-2017

Resumen

La impresión 3D es una técnica de manufactura aditiva, que por su versatilidad y bajo costo ha tenido un amplio auge. Esta tecnología, ha provocado un enorme impacto en la ciencia y la ingeniería, y en los sectores industriales, medicina y salud, cultural, construcción, entre otros. Sin embargo, presenta algunas limitaciones, entre las cuales se encuentra la gran cantidad de material que queda sobrante después de la fabricación de la pieza o bien de las piezas que no quedan en las condiciones adecuadas, lo que representa un problema para el medio ambiente.

En este trabajo se propone el diseño de una extrusora de filamento a partir de plásticos reciclados, los cuales podrán ser empleados para técnicas de impresión 3D y prototipado rápido. El material empleado será aquel proveniente de cualquier impresión fallida o material sobrante del proceso, siendo una alternativa de reciclaje de residuos del proceso.

Índice

Resumen	ii
Índice	iii
Índice de Ilustraciones	viii
Índice de Tablas.....	xii
Introducción	xiv
1. Estado del Arte	1
1.1 Impresión 3D	1
1.2 Extrusión	3
1.2.1 Tipos de extrusión	3
1.2.1.1 Configuración del equipo.....	3
1.2.1.2 Temperatura de Trabajo	4
1.2.2 Extrusor	5
1.2.3 Componentes de un extrusor	7
1.2.3.1 Husillo (Screw).....	7
1.2.3.2 Barril (Barrel)	8
1.2.3.3 Tolva y apertura de alimentación (Hopper, Feed throat)	9
1.2.3.4 Sistema de calentamiento y enfriamiento (Heaters, Coolers)	11
1.2.3.5 Cabezal	11
1.2.3.6 Placa Rompedora y filtros.....	12
1.2.3.7 Boquilla (Die)	13
1.2.3.8 Sistema de Motor (Drive)	14
1.2.3.9 Sistema de instrumentación y control	15
1.2.4 Defectos Generales en el proceso de extrusión	15
1.3 Polímeros usados en impresión 3D y extrusión.	17
1.3.1 ABS.....	17
1.3.2 PLA	17
1.3.3 Otros.....	18
1.4 Equipos Actuales	18

1.4.1	FilaStruder.....	19
1.4.2	ProtoCycler	19
2.	Metodología de diseño	21
2.1	Definición: Diseño.....	21
2.1	Descripción del Proceso de diseño	22
2.1.1	Primera Fase: Diseño conceptual	23
2.1.2	Segunda Fase: Diseño de configuración.....	24
2.1.3	Tercera Fase: Diseño de detalle.....	24
3.	Desarrollo del Diseño Conceptual	26
3.1	Definición del problema	26
3.1.1	Entendimiento del problema	26
3.1.2	Listado de Atributos	27
3.1.3	Objetivos, Restricciones y Funciones	29
3.1.4	Categorización de los objetivos de diseño.....	31
3.1.5	Jerarquización de Objetivos	32
3.1.6	Lista de objetivos argumentada.....	33
3.1.7	Lista de objetivos con pesos ponderados.....	34
3.2	Análisis Funcional	36
3.2.1	Benchmarking	38
3.2.2	Lista de requerimientos	41
3.2.3	Matriz Objetivos-Requerimientos	41
3.2.4	Despliegue de la función de Calidad (QFD)	42
3.2.5	Resolución de problemas y contradicciones de diseño.....	44
3.3	Generación de Conceptos	46
3.3.1	Búsqueda de Patentes	47
3.3.2	Brainstorming.....	52
3.3.3	Carta Morfológica	54
3.3.4	Generación del concepto	56
3.4	Selección del Concepto	59

4.	Diseño de Configuración	61
4.1	Arquitectura del producto	61
4.1.1	Tipo de arquitectura	61
4.1.2	Arquitectura del equipo	62
4.2	Diseño de configuración	65
4.2.1	Componentes Especializados.....	67
4.2.2	Componentes Estándar	68
5.	Diseño de Detalle.....	72
5.1	Diseño Husillo.....	72
5.1.1	Dimensionamiento	72
5.1.2	Selección Material	94
5.1.3	Selección Husillo	95
5.1.4	Selección Motor del Husillo	96
5.2	Diseño Cilindro	97
5.2.1	Dimensionamiento	97
5.2.2	Selección Material	98
5.2.3	Selección del Cilindro.....	98
5.3	Diseño Tolva.....	99
5.3.1	Dimensionamiento	99
5.3.2	Selección Material	102
5.3.3	Modelo CAD	102
5.4	Diseño Estructura.....	103
5.4.2	Modelo CAD	103
5.5	Diseño Boquilla.....	103
5.5.1	Dimensionamiento	103
5.5.2	Selección Material	104
5.5.3	Selección Boquilla	105
5.5.4	Modelo CAD	105
5.6	Diseño Sistema Calefacción.....	106

5.6.1	Dimensionamiento	106
5.6.2	Selección del sistema de Calefacción	112
5.7	Diseño Sistema Bobinado	113
5.7.1	Dimensionamiento	113
5.7.2	Selección Motor Bobinado	117
5.7.3	Modelo CAD	118
5.8	Diseño Sistema refrigeración	119
5.8.1	Dimensionamiento	119
5.8.2	Selección del sistema de refrigeración.....	123
5.9	Diseño Puller.....	124
5.9.1	Dimensionamiento	124
5.9.3	Modelo CAD	126
5.10	Diseño Repartidor de Filamento	126
5.10.1	Dimensionamiento	126
5.10.3	Modelo CAD	130
5.11	Modelo CAD Sistema Extrusor.....	131
5.11	Planos.....	133
5.12	Dilatación Térmica.....	133
6	Sistema Eléctrico	137
6.1	Sistema de Control para Motor Husillo	137
6.2	Sistema de Control para el sistema de puller y bobinado.....	138
6.3	Sistema de Control para el sistema de calefacción.....	140
6.4	Sistema de alimentación para el sistema de refrigeración.....	140
6.5	Esquema Unilineal	141
7	Costos	144
8	Conclusión	145
9	Referencias	147
10	Anexo A	149
10.1	Respuesta de Encuestas.....	149

10.1.1	Encuestas a Ingeniería Procatell.....	149
10.1.2	Encuestas a Laboratorio de Prototipado a Escala DIMEC	155
10.2	Cálculo de Pesos Relativos	162
10.3	Ficha técnica acero AISI 4140	164
10.4	Ficha técnica Motorreductor 3273E de Phidgets	164
10.5	Ficha técnica acero AISI 316	165
10.6	Ficha técnica Latón 360	165
10.7	Ficha técnica Motor 32204MD de Zhengke	166
10.8	Ficha técnica Motor 32205MD de Zhengke	166
10.9	Cálculo Conductividad del aire de acuerdo a características de operación	167
10.10	Ficha técnica Band Heater A16113000UX0129 de ASSISI Electric	168
10.11	Ficha técnica Band Heater A13062400UX1085 de ASSISI Electric	168
10.12	Ficha técnica Ventilador 6010HH12C EC de EverCool.....	169
10.13	Ficha técnica Servomotor TowerPRO SG-5010 de Adafruit	170
10.14	Rodamientos	171
10.15	Acoples	173
10.16	Información General de los polímeros.....	175
10.16.1	PROPIEDADES DE LOS POLÍMEROS	177
10.16.1.1	Viscosidad	177
10.16.1.2	Melt Flow Index (MFI)	177
10.16.1.3	Temperatura de fusión y transición vítrea	178
10.17	Tiempo por vuelta de carretes para el distribuidor de filamentos	180
10.18	Factores Fatiga.....	182
10.19	Dimensiones cuñas cuadradas	183
10.20	Diseño Vástago del Husillo	184
10.21	Diseño chaveta en el husillo	191
10.22	Proyecto Precious Plastics	193
	Cuchillas Trituradoras Móviles	194
	Cuchillas Trituradoras Fijas.....	195

10.23	Montaje de Piezas.....	195
10.24	Vida útil Rodamiento.....	216
10.25	Lista de Materiales.....	218
11	Anexo B.....	222

Índice de Ilustraciones

Figura 1:	Metodología básica para las técnicas actuales de prototipado rápido.	1
Figura 2:	Fabricación con Filamento Fundido (FDM)	2
Figura 3:	Esquema de una unidad extrusora de un husillo [1].....	6
Figura 4:	Husillo de una Extrusora. [2]	7
Figura 5:	Tolvas para una unidad extrusora [1].....	9
Figura 6:	Ejemplo Tornillo de alimentación [2]	10
Figura 7:	Gargante de alimentación [2]	10
Figura 8:	Sistema externo de transferencia de calor de un barril [1]	11
Figura 9:	Cabezal [1].....	12
Figura 10:	Placa Rompedora [2].....	12
Figura 11:	Boquilla Anular [1]	13
Figura 12:	Partes de una boquilla de extrusión [2]	14
Figura 13:	Fractura de fusión [3].....	15
Figura 14:	Perfil de velocidades en la llamada piel de tiburón [3]	16
Figura 15:	Defecto Bambú [3].....	16
Figura 16:	FilaStruder [10].....	19
Figura 17:	ProtoCycler [11].....	20
Figura 18:	Diagrama de la Metodología del Diseño [12].	23
Figura 19:	Modelo Caja Negra	36
Figura 20:	Modelo Caja Transparente	37
Figura 21:	Benchmarking con escala.....	39
Figura 22:	Benchmarking con características comparativas.....	40
Figura 23:	Matriz Objetivos – Requerimientos	42
Figura 24:	Despliegue de la función de Calidad (QFD)	43
Figura 25:	Brainstorming	53
Figura 26:	Ilustración del Concepto A	56
Figura 27:	Ilustración del Concepto B.....	57
Figura 28:	Ilustración del Concepto C.....	58

Figura 29: Tipos de Arquitectura de Diseño.....	62
Figura 30: Diagrama de componentes y funciones de la máquina	62
Figura 31: Módulo de Control	62
Figura 32: Módulo de Triturado	63
Figura 33: Módulo de Fundido.....	63
Figura 34: Módulo de Extruido	63
Figura 35: Módulo de Bobinado.....	64
Figura 36: Módulo de Soporte.....	64
Figura 37: Bosquejo de funciones y grupos.	64
Figura 38: Diagrama de componentes del diseño separados en módulos.....	65
Figura 39: Módulo de Triturado	65
Figura 40: Módulo de Fundido.....	66
Figura 41: Módulo de Extruir	66
Figura 42: Módulo de Bobinar	66
Figura 43: Modulo de Sistema de Control.....	67
Figura 44: Modulo de Soporte Estructural	67
Figura 45: Shredder Proyecto Precious Plastics [24].....	70
Figura 46: Detalles del Husillo [3]	73
Figura 47: Gráfico de Variación del caudal en Plástico ABS respecto a las RPM, con una boquilla de 1,75 [mm]	82
Figura 48: Gráfico Viscosidad Aparente en el PLA a 190 [°C] [21].....	85
Figura 49: Gráfico Viscosidad Aparente en el ABS a 190,230 Y 270 [°C] [22].....	86
Figura 50: Diagrama de fuerzas de un husillo. [15]	89
Figura 51: Modelo Husillo universal a mecanizar	96
Figura 52: Motor 3273E de Phidget empleado en el husillo.	96
Figura 53 Cilindro de Acero AISI/SAE 316.....	99
Figura 54: Modelo CAD Estructura y Tolva.	102
Figura 55: Diagrama geométrico de la boquilla	104
Figura 56: Modelo CAD Boquilla extrusora.	105
Figura 57: Modelo Simplificado Del Cilindro y el sistema de calefacción.	106
Figura 58: Esquema del sistema de calefacción.	108
Figura 59: Band Heater A13062400UX1085, del distribuidor ASSISI empleado en el sistema de calefacción	112
Figura 60: Representación Sistema de Bobinado	114
Figura 61: DCL Carrete del Sistema de Bobinado	115
Figura 62: Representación Sistema de Bobinado con parámetros.....	116
Figura 63: Imagen del Motor 32204 MD de Zhengke empleado en el sistema de bobinado.	118
Figura 64: Modelo CAD sistema bobinado.	119

Figura 65: Ventilador es el 6010HH12C EC, del distribuidor EverCool empleado en el sistema de refrigeración.	123
Figura 66: Imagen del Motor 32205 MD de Zhengke empleado en el sistema Puller.	125
Figura 67: Modelo CAD Puller.	126
Figura 68: Imagen del Servomotor TowerPRO SG-5010, de Adafruit empleado en el sistema repartidos de filamentos.	130
Figura 69: Modelo CAD Repartidor de Filamentos.	131
Figura 70: Vista Isométrica del Sistema Extrusor.	132
Figura 71: Componentes de izquierda a derecha: Motor, Soporte Motor, Acoplador de Ejes, Soporte extrusora y Tolva, Acoplador Rodamiento, Flange, Cilindro, Bandas calefactoras, Boquilla, Sistema Refrigeración, Sistema Puller, Sistema repartidor y Sistema Bobinado.	132
Figura 72: Vista Frontal del Sistema Extrusor.	133
Figura 73: Driver MC33926 Single. Fuente: https://www.pololu.com/product/1212	138
Figura 74: Fuente de alimentación PJ-24V30WBNA.	138
Figura 75: Driver MC33926 Dual.	139
Figura 76: Fuente de Alimentación MS-50-12.	139
Figura 77: Digital PID F/C SSR.	140
Figura 78: Fuente de Alimentación RoHS D-30A 30W.	141
Figura 79: Esquema Unilineal Sistema Calefacción.	142
Figura 80: Esquema Unilineal Motores.	143
Figura 81: Esquema Unilineal Sistema refrigeración.	143
Figura 82: Calor vs Temperatura para un polímero cristalino (izquierda) y uno amorfo (derecha) [20].	179
Figura 83: Diagrama de cuerpo libre del husillo.	185
Figura 84: Chaveta y Chavetero.	191
Figura 85: Medidas Nominales Chaveta.	192
Figura 86: Modelo CAD de las cuchillas trituradoras móviles [24].	194
Figura 87: Modelo CAD de las cuchillas trituradoras fijas [24].	195
Figura 88: Vista Explosionada Base Extrusora.	196
Figura 89: Montaje Base Extrusora.	196
Figura 90: Vista Explosionada Montaje Motor.	197
Figura 91: Vista Explosionada Soporte Motor.	197
Figura 92: Montaje Motor Extrusora.	198
Figura 93: Vista Explosionada Husillo.	198
Figura 94: Montaje del Husillo en la base de la extrusora.	199
Figura 95: Vista Explosionada Montaje Cilindro.	200
Figura 96: Montaje Cilindro.	200
Figura 97: Vista Explosionada Montaje Cilindro.	201
Figura 98: Montaje Boquilla.	202

Figura 99: Vista Explosionada Sistema de refrigeración.....	202
Figura 100: Vista Explosionada Base sistema refrigeración.	203
Figura 101: Montaje Sistema de refrigeración.	203
Figura 102: Vista Explosionada Montaje Motor Sistema Puller.	204
Figura 103: Vista Explosionada Montaje Motor Sistema Puller.	204
Figura 104: Vista Explosionada Base del motor del sistema Puller.	205
Figura 105: Montaje Motor del sistema Puller.	206
Figura 106: Vista Explosionada Montaje Base Segundo Extractor.	207
Figura 107: Vista Explosionada Eje Principal del segundo extractor.....	208
Figura 108: Vista Explosionada Montaje del Segundo Extractor.	208
Figura 109: Vista Explosionada Soporte Segundo Extractor.	209
Figura 110: Montaje Sistema Puller.	209
Figura 111: Vista Explosionada Repartidor de Filamentos.	210
Figura 112: Vista Explosionada Base del repartidor de filamentos.	211
Figura 113: Montaje Repartidor de Filamentos.....	212
Figura 114: Vista Explosionada Base del Sistema de Bobinado.	213
Figura 115: Vista Explosionada Eje Sistema de Bobinado.	214
Figura 116: Vista Trasera Sistema de bobinado.	215
Figura 117: Montaje Sistema de Bobinado.	215

Índice de Tablas

Tabla 1: Ventajas y desventajas tecnología FDM	2
Tabla 2: Encuestas para recopilar información de las necesidades del cliente.	27
Tabla 3: Objetivos, Restricciones y Funciones	29
Tabla 4: Categorización Objetivos de diseño	31
Tabla 5: Jerarquización de objetivos	32
Tabla 6: Lista de objetivos argumentada.....	33
Tabla 7: Lista de objetivos con pesos ponderados	34
Tabla 8: Lista de requerimientos	41
Tabla 9: Metodología TRIZ para solución de contradicciones	44
Tabla 10: Patentes para diseño de máquina.....	47
Tabla 11: Carta Morfológica	55
Tabla 12: Método selección de pesos ponderados	59
Tabla 13: Máquina Trituradora.....	70
Tabla 14: Resultados Flujo Volumétrico Plástico ABS con una boquilla de 1,75 [mm]	80
Tabla 15: Resultados Flujo Volumétrico Plástico PLA con una boquilla de 1,75 [mm]	81
Tabla 16: Resultados Flujo Volumétrico Plástico ABS con una boquilla de 3[mm]	81
Tabla 17: Resultados Flujo Volumétrico Plástico PLA con una boquilla de 3 [mm]	81
Tabla 18: Viscosidad Efectiva PLA a 190°C].....	85
Tabla 19: Viscosidad Efectiva ABS a 230 [°C]	86
Tabla 20: Viscosidad Efectiva PLA a 190°C].....	88
Tabla 21: Viscosidad Efectiva ABS a 230 [°C]	88
Tabla 22: Geometría del Husillo	95
Tabla 23: Resultados Velocidad del flujo en el cilindro con diferentes boquillas	107
Tabla 24: Resultados Flujo másico en el cilindro con diferentes boquillas y materiales..	108
Tabla 25: Resultados Calor de trabajo con diferentes boquillas y materiales	109
Tabla 26: Resultados Pérdidas de Potencia por materiales	111
Tabla 27: Resultados Potencia requerida por la banda, para las diferentes boquillas y materiales.....	111
Tabla 28: Datos del Sistema de Bobinado.....	117
Tabla 29: Resultados Reynolds para los diferentes diámetros de filamento.	120

Tabla 30: Propiedades aire a $T=100$ [°C] y $P=P_{atm}$	121
Tabla 31: Resultados Nusselt para los diferentes diámetros de filamento.	121
Tabla 32: Resultados Coeficiente de transferencia del aire para los diferentes diámetros de filamento.	122
Tabla 33: Temperatura del filamento al pasar por los ventiladores.	123
Tabla 34: Parámetros Selección para el Puller.	124
Tabla 35: Parámetros para distribución del filamento.	127
Tabla 36: Vueltas necesarias para llenar longitudinalmente el Carrete.	128
Tabla 37: Largo necesario de cada material, de acuerdo a la boquilla.	128
Tabla 38: Tiempo promedio de pasada para cada material y boquilla.	129
Tabla 39: Codificación de planos	133
Tabla 40: Costos Generales Sistema Extrusor.	144
Tabla 41: Resumen del cumplimiento de los requerimientos del proyecto.	146
Tabla 42: Propiedades de los polímeros empleados en extrusión [6].	176
Tabla 43: Perímetros, vueltas y tiempo por vuelta del carrete, para una boquilla de 1,75 [mm].	180
Tabla 44: Perímetros, vueltas y tiempo por vuelta del carrete, para una boquilla de 3 [mm].	181
Tabla 45: Factores de acabado superficial.	182
Tabla 46: Estimación de primera iteración de los factores de concentración del esfuerzo [31].	182
Tabla 47: Factores de concentración de esfuerzos en cuñero [34]	182
Tabla 48: Dimensiones en mm de cuñas cuadradas [32].	183

Introducción

La impresión 3D es una tecnología en auge, una técnica que tiene la capacidad de revolucionar tanto la fabricación tradicional de prototipos como la posibilidad de presentar modelos flexibles y funcionales a través de técnicas de prototipado rápido.

A pesar de que los primeros ejmplos de la impresión 3D se produjeron en 1984 [35], siendo impresoras grandes, caras y muy limitadas en lo que podían producir, esta tecnología ha tenido un gran salto en los últimos años debido al avance de la ciencia.

El funcionamiento de la impresión 3D es a través de procesos aditivos (con aporte de material), donde se crea un objeto mediante el depósito de capas sucesivas de material.

Actualmente existen varias tecnologías de fabricación aditivas disponibles, las cuales se diferencian en la forma de depositar las capas para crear las piezas y en los materiales que utilizan. Están los que funden el material para producir las capas (*SLS: Selective Laser Sintering*) y el modelado por deposición fundida (*FDM: Fused Deposition Modeling*) -del cual se tratará este trabajo-, mientras que otros métodos curan materiales líquidos utilizando diferentes tecnologías, como lo es la estereolitografía (*SLA: Stereo Lithography Apparatus*).

El filamento es la materia prima que emplean las impresoras 3D FDM para producir los modelos sólidos, el cual es un cable plástico que se suele comercializar enrollado en un carrete. El proceso de transformación del material consiste en la extrusión de una resina polimérica (en forma de *pellets* o material granulado) para formar un hilo continuo y macizo. En este trabajo se propone el diseño de una extrusora de filamento a partir de plásticos reciclados, los cuales podrán ser empleados para técnicas de impresión 3D y prototipado rápido. El material empleado será aquel proveniente de cualquier impresión fallida o material sobrante del proceso, siendo una alternativa de reciclaje de residuos del proceso.

1. Estado del Arte

1.1 Impresión 3D

La impresión 3D FDM (*Fused Deposited Modeling* o deposición de hilo fundido) es una tecnología aditiva de fabricación que corresponde a una modelación de cuerpos de tres dimensiones por la adición de algún material fundido, esta técnica está basada en la extrusión de material.

El proceso de impresión comienza cargando el perfil deseado en un software de computador, diseñado previamente en algún programa de modelación 3D (archivos CAD), como SolidEdge, Autodesk Inventor, SolidWorks, Catia, entre muchos otros. Luego, el modelo CAD es convertido a un formato STL (*Standard Tessellation Language*) para ser interpretado por la impresora. La máquina procesa el archivo STL y crea un modelo en capas, el cual al ir incrementando capa a capa, forma el modelo físico o sólido 3D (Ver Figura 1).

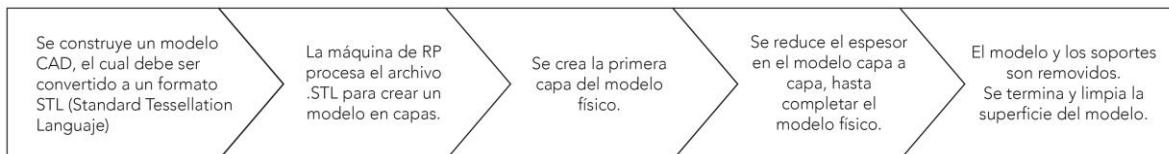


Figura 1: Metodología básica para las técnicas actuales de prototipado rápido.

En una primera etapa del proceso, el insumo es fundido y extruido, donde es empujado a través de una boquilla caliente, con lo que se produce un pequeño hilo plástico que luego se deposita en la cama de la máquina. El perfil se genera por la caída de material capa por capa en la parte superior de la otra (las capas se depositan de arriba hacia abajo), hasta que el producto este completo de acuerdo al modelo requerido. Los termoplásticos como el ABS y el PLA son los filamentos más utilizados, habitualmente estos filamentos son suplidos en carretes de 1 [Kg], con diámetros de 1,75 y 3 [mm].

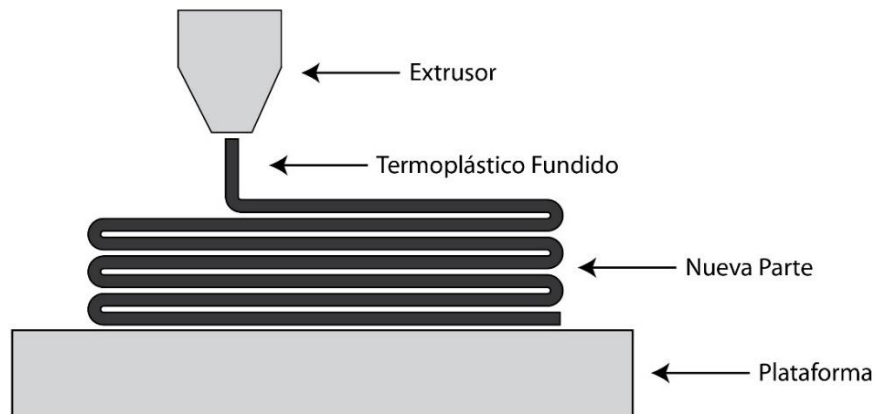


Figura 2: Fabricación con Filamento Fundido (FDM)

La impresora 3D consta de un extrusor y de un sistema de movimientos cartesiano para realizar los moldes. Para formar la primera capa, la máquina realiza 2 movimientos (ejes cartesianos) a través de sus mecanismos para cada coordenada, depositando el material con la disposición requerida. Después, se repite este paso para que el extrusor deposite la segunda capa sobre la primera y así sucesivamente. En la Tabla 1, se presentan las ventajas y desventajas de la tecnología *FDM*:

Tabla 1: Ventajas y desventajas tecnología *FDM*

Ventajas	Desventajas
Tecnología limpia, fácil de usar y segura	Posee una baja resistencia mecánica, por lo que las capas se pueden separar
Los termoplásticos utilizados son amigables con el medio ambiente	Terminación superficial rugosa
No requiere personal calificado para operar	No se pueden hacer paredes muy delgadas
Se fabrican prototipos funcionales	Método lento en piezas voluminosas
Modelos flexibles	Tamaño de construcción limitado

La impresión 3D *FDM*, acelera y simplifica el proceso de elaboración de prototipos y productos terminados.

1.2 Extrusión

La extrusión es uno de los procesos esenciales para dar forma a metales, cerámicos e incluso alimentos, así como también a polímeros. Esta palabra proviene de raíces latinas, aunque las fuentes difieren, para algunos, el significado proviene de “*extrusio*” que significa forzamiento y para otros, de “*extrudere*” que significa expulsar. La extrusión, es un proceso de compresión en el cual se fuerza un material a fluir a través de un orificio practicado en una boquilla, para ser extruido en un perfil específico, y así obtener un producto de sección constante y de longitud indefinida. De acuerdo a lo anterior, la extrusión también se ocupa para dar forma a polímeros, en los cuales se emplean termoplásticos y elastómeros (rara vez termofijos) para producir artículos como tuberías, mangueras, ductos, hojas, películas y filamentos continuos, entre muchos otros, este proceso es utilizado principalmente por las industrias de plástico para generar productos de gran calidad a una rápida velocidad. En la extrusión de polímeros, el material es fundido en una masa homogénea. El proceso toma lugar en un cilindro que aloja un husillo o tornillo de alimentación. Se utiliza un sistema de calentamiento en conjunto con el husillo para generar una masa viscosa.

1.2.1 Tipos de extrusión

1.2.1.1 Configuración del equipo

Extrusión directa: la extrusión directa o extrusión hacia adelante es uno de los procesos más comunes de extrusión. En este caso, se carga material en un recipiente y un pisón comprime el material forzándolo a fluir a través de una o más aberturas de la boquilla situada al extremo opuesto del recipiente. Una de las desventajas de este proceso, es que la fuerza de extrusión requerida, para mover el material y romper la fuerza de fricción que existe entre el material y el pisón, es muy alta. Los equipos empleados en este tipo de extrusión pueden ser horizontales o verticales, dependiendo de los ejes de trabajo. Los horizontales son los más comunes y son accionados normalmente por una fuerza hidráulica [25].

Extrusión indirecta: la extrusión indirecta o extrusión inversa, es aquella en la cual la boquilla o dado está montado sobre el pisón, en lugar de estar en el extremo opuesto. En este

caso, el pistón se mueve en dirección opuesta a la directa y obliga al material a fluir a través de la boquilla hueca. La longitud máxima del extruido se ve limitada por la fuerza de la columna del soporte. En este caso, debido al movimiento, la fricción es eliminada y la fuerza de empuje debe ser menor que la extrusión directa. Las ventajas de este método es la reducción del 25% al 30% de la fuerza de fricción. Su principal desventaja, es que las impurezas y defectos en la superficie del pistón afectan la extrusión [25].

Extrusión hidrostática: la extrusión hidrostática es una adaptación de la extrusión directa. Por lo general se utilizan en materiales que son demasiado frágiles o dúctiles para una operación en una extrusión convencional. En este caso, el pistón de trabajo se rodea por un líquido a presión, salvo donde este hace contacto con el troquel, de esta manera, el segundo pistón empuja al líquido que a su vez presiona al otro, produciendo la extrusión. Este proceso se puede hacer en tibio, caliente o frío. Las ventajas, es que no existe fricción entre el contenedor y el pistón, reduciendo aún más la fuerza requerida. Su desventaja, es que se requiere preparar los pistones iniciales de trabajo [26].

1.2.1.2 Temperatura de Trabajo

Extrusión en Frío: la extrusión en frío por lo general se trabaja a temperatura ambiente, por lo cual no se requiere calentamiento previo del equipo. En este caso, al ser trabajo en frío, no existe oxidación del material como se produce en caliente, lo que se traduce en mejores propiedades mecánicas, mayor resistencia al endurecimiento por deformación, una estrecha tolerancia y buen acabado superficial. Los materiales comúnmente tratados son: aluminio, cobre, magnesio, zinc, estaño y sus aleaciones. También aceros de bajo carbono y aceros inoxidables [27].

Extrusión en Tibio: la extrusión en frío se hace por sobre la temperatura ambiente, pero por debajo de la temperatura de recristalización del material que se trabaja. Por lo general este proceso se utiliza para lograr un equilibrio apropiado de las fuerzas requeridas, ductilidad y propiedades finales del producto extruido. En comparación con la extrusión en frío, la

extrusión en tibio reduce la presión que debe ser aplicada al material y aumenta la ductilidad [28].

Extrusión en Caliente: la extrusión en caliente se hace a temperaturas elevadas (por sobre la temperatura de recristalización), así se reduce la fuerza necesaria en el pistón y se hace más fácil el paso del material a través de la boquilla. También se logra trabajar a mayor velocidad y existe reducción de las características del flujo de grano en el producto final. En este método, se logran mayor reducción de tamaño en el extruido y formas más complejas. Los materiales comúnmente tratados son: aluminio, cobre, magnesio, zinc, estaño y sus aleaciones. También se suelen trabajar aceros [27].

1.2.2 Extrusor

El extrusor es una máquina diseñada para empujar un material a través de una boquilla (*die*). En el contexto de este trabajo (extrusión de polímeros), se refiere a un aparato que funde y transporta un material plástico para hacerlo pasar a través de una boquilla, para producir un producto de sección constante. Existen diferentes tipos de mecanismos en las extrusoras capaces de realizar este proceso, entre ellos se cuenta: de pistón y de uno o varios husillos, cada una con sus ventajas y desventajas. En el caso de este trabajo, se referirá a una extrusora de un solo husillo, la cual es una extrusora continua y directa.

En el proceso de extrusión de plástico, la unidad de extrusión se alimenta con material plástico granulado (*pellets*), el cual es transformado en un producto extruido al pasar por las tres secciones en las que se divide el husillo, como se puede ver en la Figura 3. La primera zona, es la llamada sección de alimentación en donde se recibe el material desde la tolva y se le aplica un precalentamiento, para ser transportado hacia la siguiente zona. La segunda sección, es conocida como la zona de compresión, en la cual el polímero se transforma para adquirir consistencia líquida (fusión del material), se extrae el aire comprimido entre los *pellets* y se comprime el material. La última zona corresponde a la sección de medición, donde se homogeniza el material fundido y se genera presión para bombearlo hacia la boquilla de conformado. Antes de llegar a la boquilla, el fundido pasa por un paquete de pantallas llamada placa rompedora, que contiene agujeros axiales pequeños. Esta placa sirve para filtrar contaminantes y grumos duros del fundido, generar presión en la sección de

medición y forzar al flujo de material a borrar su “memoria” para eliminar la propiedad viscoelástica del polímero, y así eliminar su historia de girar dentro de la cámara de extruido. Cabe destacar que la asignación de funciones a las secciones del husillo no es estricta, el transporte, presurización y homogenización del extruido ocurre a lo largo de toda la unidad extrusora.

Las extrusoras de un solo husillo, son capaces de realizar seis funciones principales:

- Transporte del material sólido hacia la zona de fusión
- Fusión o plastificación del material
- Transporte de presurización del material fundido
- Mezclado
- Desgasificación
- Conformado

Es necesario destacar que las funciones descritas, no tienen lugar durante la operación de todas y cada una de las extrusoras. Por ejemplo, el desgasificado sólo se produce en máquinas preparadas para ello, debido a la alta cantidad de componentes volátiles en los productos a tratar.

En la Figura 3 se puede observar un diagrama de una unidad extrusora de un husillo, en el cual se indican los diferentes componentes que forman la máquina y el proceso de extrusión. A modo general, un sistema extrusor debe cumplir con un sistema de alimentación del material, un sistema de fusión-plastificación del mismo, un sistema de bombeo y presurización y el dispositivo (boquilla) para dar el conformado del extruido.

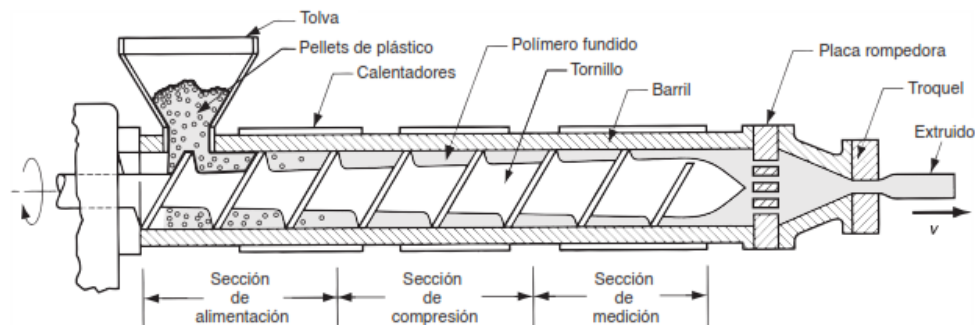


Figura 3: Esquema de una unidad extrusora de un husillo [1]

1.2.3 Componentes de un extrusor

Los componentes de un extrusor de un husillo se pueden identificar por los siguientes:

- Husillo o tornillo (*Screw*)
- Barril (*Barrel*)
- Tolva y apertura de alimentación (*Hopper, Feed throat*)
- Sistema de calentamiento y enfriamiento (*Heaters, Coolers*)
- Cabezal
- Placa Rompedora y filtros
- Boquilla (*Die*)
- Motor (*Drive*)
- Sistema de instrumentación y control

1.2.3.1 Husillo (Screw)

El husillo de una extrusora se considera como el componente principal de la máquina, ya que contribuye a realizar las funciones de transportar, calentar, fundir y mezclar a una temperatura adecuada la materia prima a trabajar, con total homogeneidad. El transporte del material se debe al desplazamiento relativo del husillo con respecto al barril (cilindro que aloja el husillo). La estabilidad y calidad del proceso y producto depende de gran medida del diseño del husillo. De acuerdo a ello, los parámetros más importantes para un buen producto son: Longitud (L), Diámetro (D), Angulo del Filete (θ) y paso de la rosca (w). En la Figura 4 se muestra el husillo de una extrusora y sus principales características.

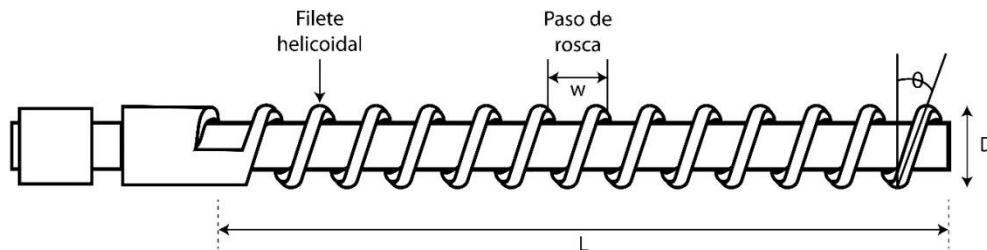


Figura 4: Husillo de una Extrusora. [2]

La producción y aplicación de la extrusora dependerán de muchos factores del husillo, entre ellos: diámetro del husillo, relación de la longitud y el diámetro, velocidad de giro y

particularidades geométricas del canal helicoidal, perfil del vértice de los filetes y cabezal, refrigeración, entre otros.

La materia prima se va presurizando a medida que avanza por el husillo, comenzando con presión atmosférica en la entrada de la tolva y aumentando durante el proceso hasta la salida por la boquilla. Dependiendo del material que se va a trabajar, la profundidad del canal en el tornillo no es constante, si no que varía a medida que avanza en las secciones. La sección de alimentación es relativamente grande para permitir la entrada de mayores cantidades de polímero. En la sección de compresión, el canal se reduce de manera gradual, para aplicar mayor presión sobre el polímero a medida que este se funde, por lo que el aire atrapado entre las partículas escapa hacia el exterior vía la tolva de alimentación. En la sección de medición, el canal continúa reduciéndose y la presión alcanza un máximo antes de la llegada a la boquilla. Aunque esto es apropiado para ciertos polímeros, dependerá del material para diseñar el largo y presión necesaria en cada una de las secciones.

Los diferentes materiales termoplásticos que se utilizan en el proceso de extrusión difieren notablemente entre sí. La elasticidad, el coeficiente de fricción, temperatura de fusión, calor específico, viscosidad, etc, son algunas propiedades que cambian entre materias primas, por lo que se debe considerar para el diseño del husillo.

En la práctica, se utilizan tornillos de uso general, para evitar la necesidad de cambio de husillo, lo que significa una pérdida importante de tiempo.

1.2.3.2 Barril (*Barrel*)

El barril es el cilindro metálico que aloja al husillo en su interior, que juntos son el mecanismo de transporte del material inducido por arrastre, conformando la cámara de fusión y bombeo del material. La superficie interior del cilindro debe ser rugosa para aumentar la tensión de cizalla que soportará el material, facilitando así su flujo a lo largo de la extrusora.

El barril debe tener una resistencia compatible al material que será procesado, es decir, debe presentar la dureza necesaria para reducir al mínimo el desgaste que se pueda producir en su interior. Una forma de evitar la corrosión y el desgaste mecánico, es utilizar aceros de diferentes tipos y si es necesario, realizar un endurecimiento superficial de las paredes interiores, a fin de evitar los efectos de abrasión y corrosión durante la operación.

En el diseño de los cilindros, siempre se busca: maximizar la durabilidad, minimizar el cambio dimensional debido a las temperaturas de trabajo y que el barril posea una alta transferencia de calor.

1.2.3.3 Tolva y apertura de alimentación (*Hopper, Feed throat*)

La tolva de alimentación es el contenedor que se utiliza para introducir el material (en forma de pellets) a la máquina, la función principal es proporcionar un flujo constante de material, sin atascos, ejerciendo una compresión gradual sobre el material. Para mantener este flujo constante, es necesario que la tolva, la garganta de alimentación y la boquilla estén diseñadas y ensambladas perfectamente, con un volumen necesario para albergar materia prima para 2 horas de trabajo. En la Figura 5 pueden observar dos tolvas de alimentación distintas.

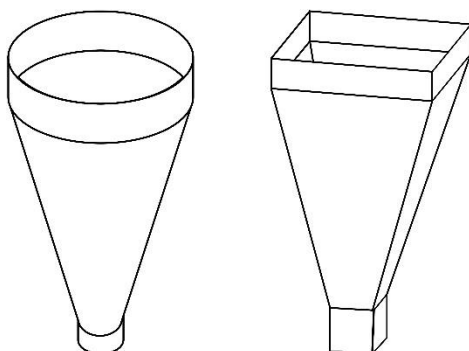


Figura 5: Tolvas para una unidad extrusora [1]

El transporte de material en la tolva es por lo general, por el flujo por gravedad de las partículas, es decir, el material se mueve por la acción de su propio peso. La tolva debe tener las dimensiones apropiadas para ser funcional, ya que, si está mal diseñada, principalmente en el ángulo de bajada del material, el material se puede estancar y generar paros en la producción.

Cuando la materia prima que se compacta fácilmente, es necesario considerar una tolva con sistema vibratorio para resolver problemas, debido a que el movimiento rompe los enlaces del material formado y permite la caída del material y su descenso. Si aun así se presentan problemas, es necesario idear un sistema para producir el movimiento de materia prima, empleando por lo general un tornillo para lograr la alimentación como el de la Figura 6.

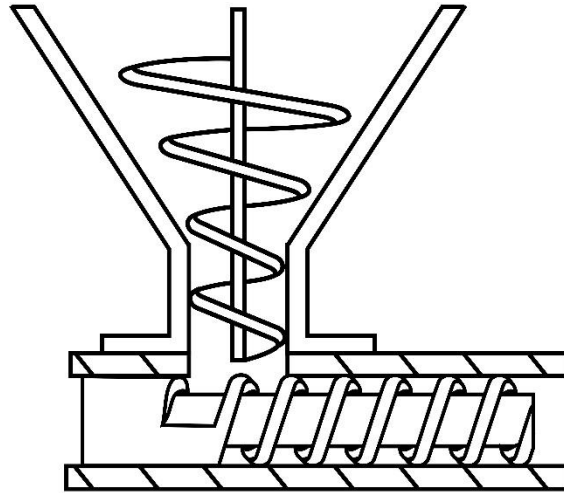


Figura 6: Ejemplo Tornillo de alimentación [2]

La garganta de alimentación suele aislarse térmicamente del extrusor o presentar un sistema de refrigeración para mantener la temperatura de la zona lo más baja posible, con el fin de mantener el material en estado sólido y evitar que este se adhiera a las paredes internas del barril. Esta boquilla de alimentación suele tener una longitud de 1.5 veces el diámetro del cilindro y un ancho de 0.7 veces el mismo, como se observa en la Figura 7. Como se observa en la figura, la boquilla suele estar desplazada del eje del tornillo o husillo para facilitar la caída de material a la máquina.

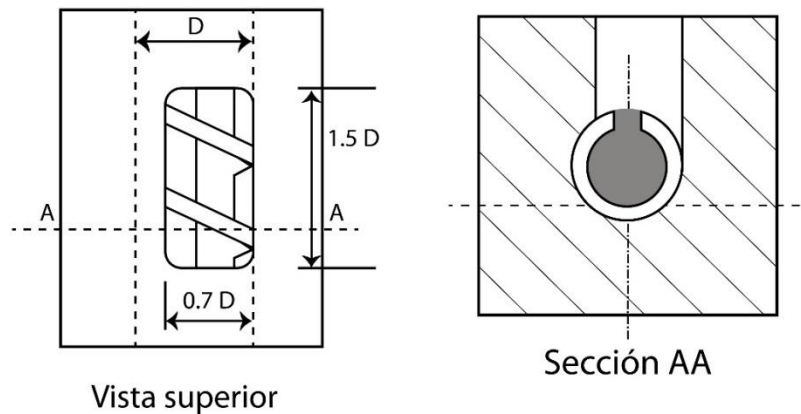


Figura 7: Gargante de alimentación [2]

1.2.3.4 Sistema de calentamiento y enfriamiento (*Heaters, Coolers*)

La temperatura de trabajo en el extrusor es el factor más importante para realizar un buen producto, tanto desde fundir el material hasta enfriarlo para su solidificación, por lo tanto, es necesario tener un sistema de control de temperaturas para obtener un resultado satisfactorio.

Los extrusores comerciales presentan dos sistemas de temperatura: de calentamiento y enfriamiento. Tienen bandas de calentamiento, que constan de un elemento calefactor (por lo general, resistencias eléctricas) para elevar la temperatura en puntos necesarios a lo largo del husillo, como lo muestra la Figura 8. El barril se suele dividir al menos en tres zonas de calefacción, con control independiente entre cada una de ellas, para poder conseguir gradientes de temperaturas razonables en todas las secciones del husillo y el proceso de extrusión.

El sistema de refrigeración se suele utilizar en el caso de una generación interna de calor originada por la cizalla, lo que hace que el plástico rebase la temperatura nominal de trabajo y afecte en el proceso de manera negativa. El enfriamiento por lo general se hace con ventiladores de aire o flujo de líquido a través del cilindro, como se muestra en la Figura 8, por ventiladores.

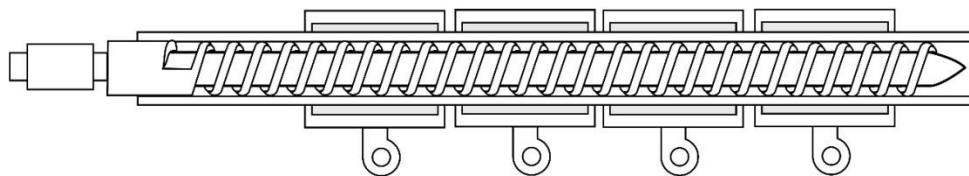


Figura 8: Sistema externo de transferencia de calor de un barril [1]

En un proceso de extrusión convencional, el sistema de motor aporta la mayor parte de la energía necesaria para fundir el material (70% a 80%) [1] a través de la fricción del husillo, mientras que el sistema de calentamiento de la extrusora es responsable de suministrar el resto (entre el 20-30%) [1], para fundir la resina.

1.2.3.5 Cabezal

El cabezal es la pieza final del cilindro, que se encuentra sujetando la boquilla y mantiene a la placa rompedora, y por lo general, se encuentra atornillado al cilindro. La función del

cabezal es facilitar el flujo de materia prima hacia la boquilla, este proceso lo hace a través del torpedo, situado en él. La sección transversal del torpedo se diseña para permitir el flujo proporcional de material a velocidad constante. En la Figura 9 se muestra un esquema general del cabezal.

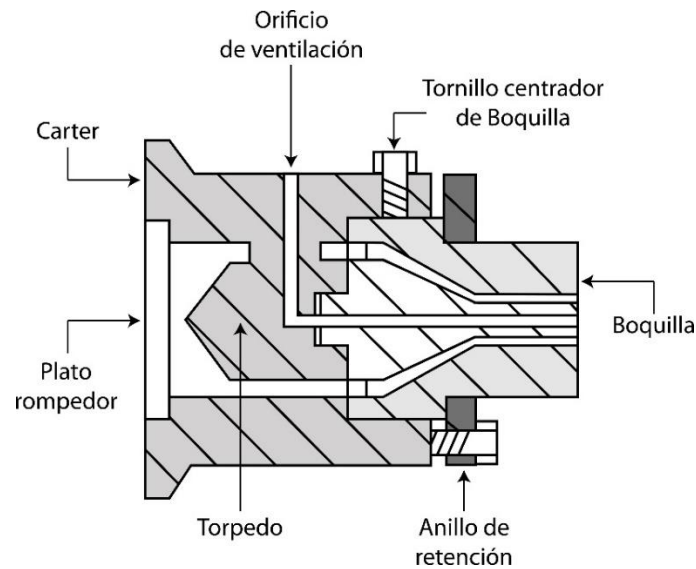


Figura 9: Cabezal [1]

1.2.3.6 Placa Rompedora y filtros

La placa rompedora se encuentra al final del husillo, antes de la boquilla, y constituye un punto de transición entre la extrusora y el cabezal. Se trata de un disco delgado de metal con agujeros, como se ve en la Figura 10.

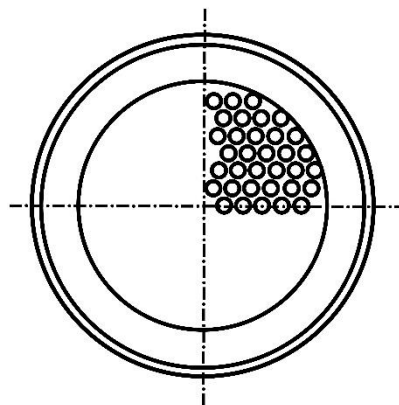


Figura 10: Placa Rompedora [2]

A este componente le corresponde una parte importante de la calidad del material extruido. La placa rompedora es el primer elemento del cabezal destinado a romper con el patrón de flujo en espiral que el tornillo le imparte al material, a su vez, sirve como un soporte a un paquete de filtros cuyo fin es atrapar partículas y/o grumos provenientes de impurezas, pigmentos, aditivos, etc, para que no salgan en el extruido. Los filtros también sirven para mejorar el mezclado y homogeneizar el fundido. A medida que se ensucian los filtros, es necesario sustituirlos para evitar caídas de presión excesiva y disminución de la productividad.

De acuerdo al diseño, la placa rompedora es una placa cilíndrica con agujeros, donde las mallas de filtro deben ser fabricadas de acero inoxidable, para evitar desgaste por la materia prima a trabajar.

1.2.3.7 Boquilla (Die)

La boquilla es el componente que se encuentra en el extremo final del extrusor, el cual es el encargado de dar la forma final al plástico en el proceso de extrusión. Por lo general, se considera un elemento externo al extrusor, debido a que debe fabricarse para el perfil particular que se va a producir.

En el proceso de extrusión, el polímero fundido atraviesa el conducto de la boquilla impulsado por la presión que se forma justo antes del cabezal. El conducto de la boquilla presenta la sección que se pretende dar al material extruido, de acuerdo a esto, las boquillas se pueden clasificar según la forma: boquilla anular para fabricación de tuberías o recubrimientos cilíndricos, boquilla plana para producir planchas o láminas de plástico y también boquillas circulares para obtener fibras y productos con forma cilíndrica. En la Figura 11, se muestra una boquilla anular para la fabricación de tuberías o recubrimientos de material cilíndrico.

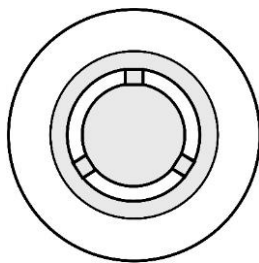


Figura 11: Boquilla Anular [1]

Las boquillas se dividen en tres partes diferenciales, como se muestra en la Figura 12 (corte de una boquilla plana): la primera parte representa una canal de entrada del material, la segunda, una zona de distribución y la tercera, una zona de salida del material.

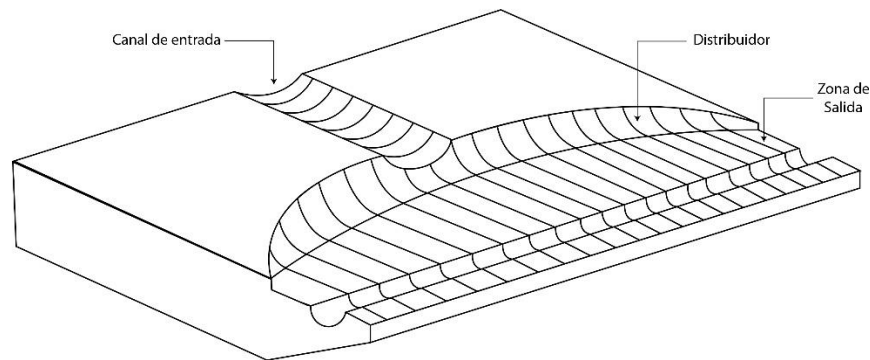


Figura 12: Partes de una boquilla de extrusión [2]

Cabe destacar, que las dimensiones de la boquilla no son exactamente las mismas que el producto extruido, debido a varias razones: contracción del material, enfriamiento y el fenómeno de relajación, los cuales contribuyen a que el extruido cambie de tamaño e incluso forma.

1.2.3.8 Sistema de Motor (*Drive*)

El sistema de motor de un extrusor es el componente responsable de suministrar la energía necesaria para producir: la alimentación, el transporte, mezclado y bombeo del material hacia la boquilla y parte de la fusión del material. Se encarga de impulsar y transmitir potencia al husillo con un movimiento de rotación para poder producir el extruido. Los motores más empleados son eléctricos, por su facilidad de control y operan con voltajes de 220 y 440 [V]. Las extrusoras modernas trabajan con motores de corriente continua, ya que permiten un amplio rango de velocidades de giro, bajo nivel de ruido y un control preciso de la velocidad, característica importante en la calidad del extruido. Se recomienda que la potencia de diseño sea de 1 [HP] por cada 4,5 a 7 [kg/h], aunque esto dependerá de la aplicación y el requerimiento de la mezcla.

Es necesario tener en cuenta que la velocidad alcanzada por motores resulta muy elevada que la requerida por el husillo, por lo cual se suele trabajar con cajas reductoras de velocidad para tener un óptimo desempeño.

Para producir un extruido de dimensiones estables y de buena calidad, el husillo debe girar a velocidad constante para mantener las condiciones del proceso invariables.

1.2.3.9 Sistema de instrumentación y control

Estos elementos se consideran externos a la extrusora y varían de acuerdo a lo necesario para el proceso. Por lo general, se requiere una serie de sensores distribuidos en la extrusora a modo de controlar las variables del proceso. Los sensores más utilizados son:

- Sensores de temperatura en el barril: generalmente se utilizan termopares, que se acoplan en agujeros en el barril, de forma de estar más cerca del fluido
- Sensor de presión en el cabezal: necesario para controlar la presión y así controlar la calidad del producto
- Tacómetro: necesario para conocer la velocidad del husillo y regular el movimiento del material

1.2.4 Defectos Generales en el proceso de extrusión

El material extruido puede sufrir numerosos defectos en el proceso de extrusión. Uno de los peores errores es la llamada fractura de fusión, en el cual los esfuerzos que actúan sobre el material fundido, antes y después del flujo a través de la boquilla, son muy altos, por lo cual se producen rupturas que originan una superficie muy irregular.

Como muestra la Figura 13, la fractura de fusión puede ser causada por una drástica reducción en la entrada de la boquilla, lo que provoca un flujo turbulento que rompe el material fundido. Este flujo, contrasta al flujo laminar que se daría con una convergencia gradual.

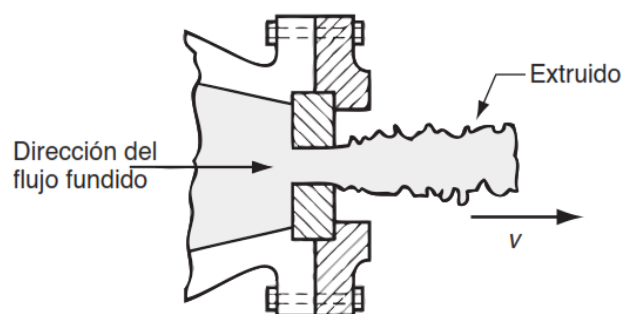


Figura 13: Fractura de fusión [3]

Otro defecto común que se suele dar en estos procesos es la llamada piel de tiburón, en la cual la superficie del extruido presenta una superficie la cual se arruga al salir de la boquilla como lo muestra la Figura 14. Este defecto se da en la salida de la boquilla, conforme el fundido atraviesa la abertura, la fricción con la pared produce un perfil diferencial de velocidades a través de la sección transversal. Debido a esto, se generan esfuerzos de tensión en la superficie del material que al estirarse para estar a la par con el núcleo central que se mueve más rápido, se general rupturas que arrugan el material.

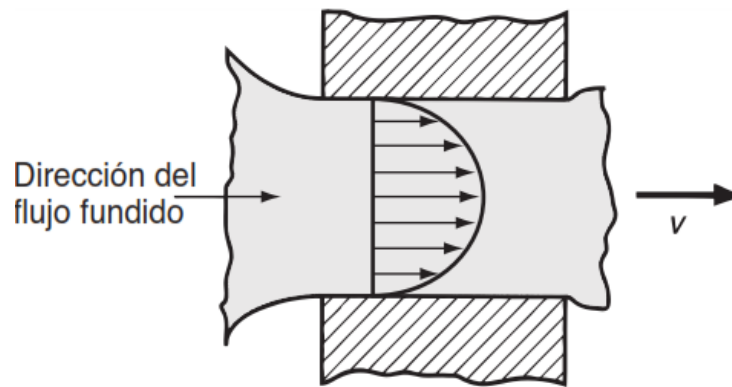


Figura 14: Perfil de velocidades en la llamada piel de tiburón [3]

Si este gradiente de velocidades se vuelve muy grande, aparecerán marcas prominentes en la superficie del producto extruido, lo que da un aspecto de un tallo de bambú; ahí el nombre para este prominente defecto. En la Figura 15 se puede observar este defecto.

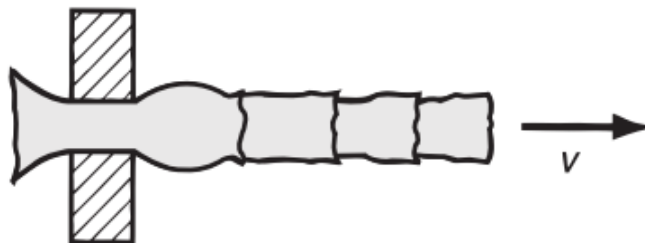


Figura 15: Defecto Bambú [3]

1.3 Polímeros usados en impresión 3D y extrusión.

Hoy en día, los polímeros continúan siendo un material muy útil en la industria, debido a sus diversas características y utilidades.

Los plásticos más comunes utilizados en la impresión 3D son el ABS y PLA. Esto se debe a sus características y ventajas por sobre otros materiales, siendo compatibles con la mayoría de las impresoras 3D del mercado.

En el anexo 10.16 se encuentra la información general de los polímeros y sus propiedades.

1.3.1 ABS

El Acrilonitrilo Butadieno Estireno o ABS es un polímero termoplástico comúnmente utilizado en la industria de plásticos para diferentes aplicaciones. Es un polímero resultante de la combinación de los tres monómeros, le otorga propiedades de acuerdo a ello. Tiene una gran resistencia química, buena resistencia a la fatiga, dureza y rigidez gracias al acrilonitrilo. El butadino, como un componente elastomérico, aporta buena tenacidad y resistencia al impacto. El estireno aporta resistencia al calor, aumenta procesabilidad, dureza y rigidez y permite la adición de color. Normalmente la resina de ABS contiene entre un 21 a 27% de acrilonitrilo, de un 12 a 25% de butadieno y un 54 a 63% de estireno.

Es uno de los materiales más comunes utilizados en filamentos de impresión 3D. El ABS es un plástico duro y muy resistente al impacto, con una larga vida útil, que lo hace ideal para aplicaciones mecánicas [8].

En un proceso típico el rango de temperaturas varía entre 215-250 °C [9], y se pueden producir vapores tóxicos, por lo que se debe tener un canal de ventilación durante el periodo de duración.

1.3.2 PLA

El ácido poliláctico o PLA (*Polylactic Acid*) también es un material común utilizado por los consumidores en las impresoras 3D FDM. Es un poliéster termoplástico alifático que procede de recursos renovables como plantas de maíz, raíces de tapioca, trozos de madera o caña de azúcar, por lo que es un material biodegradable, el cual se degrada fácilmente en

agua y oxido de carbono [8]. Es un termoplástico rígido que puede ser semicristalino o totalmente amorfo.

La ventaja de este material es que no emite gases nocivos al momento de la impresión y tampoco requiere una base de impresión caliente como el ABS para ser impreso.

La temperatura de fusión es baja y varía entre 160- 230 °C [9]. Es necesario tener en cuenta que los modelos impresos en PLA son más frágiles que los impresos en ABS.

1.3.3 Otros

El 95% del mercado de impresión 3D utilizan ABS y PLA, pero existen otros materiales menos conocidos y con buenas propiedades, los cuales se destacan:

- **Nylon:** material de uso complejo en impresiones 3D, debido a la falta de adhesión de la pieza en la bandeja o cama de impresión, pero presenta propiedades como flexibilidad, ligereza y resistencia a altas temperaturas.
- **PVA:** el Alcohol Polivinilo, se utiliza en impresiones de cabezal múltiple, ideal para construir modelos de formas complejas. Este polímero es soluble en agua y la absorbe en gran cantidad, por lo que la humedad es un problema a tener presente.
- **PC:** El policarbonato, es un material no biodegradable con una alta temperatura de fusión, entre 280 y 305°C, por lo que no se utiliza mucho en procesos convencionales. Es un material fuerte y durable.
- **HDPE:** *High density polyethylene* o polietileno de alta densidad, es un material resistente a casi todos los disolventes, aunque no es ideal para impresión 3D, ya que se encoge cuando se enfría, por lo que no tiene una precisión adecuada.

Dado que la mayoría de los materiales usados en impresión 3D son reciclables, existen algunos dispositivos que podrían realizar esta labor, la cual consiste en convertir el material de desecho en filamento de impresión. A continuación, se analizan algunas tecnologías que podrían ayudar a tal fin.

1.4 Equipos Actuales

En el mercado actual existen equipos que producen filamentos para impresoras 3D FDM en el hogar, el problema de ellos es que no se enfocan ni tampoco piensan en resolver el problema original: cada fabricante vende sus propios pellets para producir el filamento y el

reciclado de los residuos de impresión 3D siguen siendo basura. Cabe mencionar que estos aparatos son excesivamente caros sin mencionar costos de importación. Actualmente destacan 2 equipos comerciales: FilaStruder y ProtoCycler.

1.4.1 FilaStruder

La idea principal de FilaStruder es proveer acceso a los productos necesarios para realizar impresiones 3D en casa, a un menor costo. Esta máquina tiene el concepto de DIY (*Do it Yourself*) y se puede adquirir con todos los elementos e instrucciones para su ensamblado. Este producto funciona solamente con polímeros de PLA y ABS, bajo estrictos requerimientos y cuidados, sin garantizar un óptimo proceso.



Figura 16: FilaStruder [10]

1.4.2 ProtoCycler

ProtoCycler es un nuevo reciclador de filamentos, integrando el proceso de molienda y distribución de filamentos en una misma máquina. Trabaja con plásticos como el ABS y PLA, prometiendo en un futuro poder trabajar con varios tipos de plásticos de desecho, aunque aún no hay nada concreto. Este producto fue integrado al mercado en enero del año 2016, por lo que tiene algunos problemas de operación; constantemente suben nuevas implementaciones, actualizaciones al software, problemas con los mecanismos del producto, entre otros. El precio de mercado es de 899.99 dólares, sólo por la máquina [11].

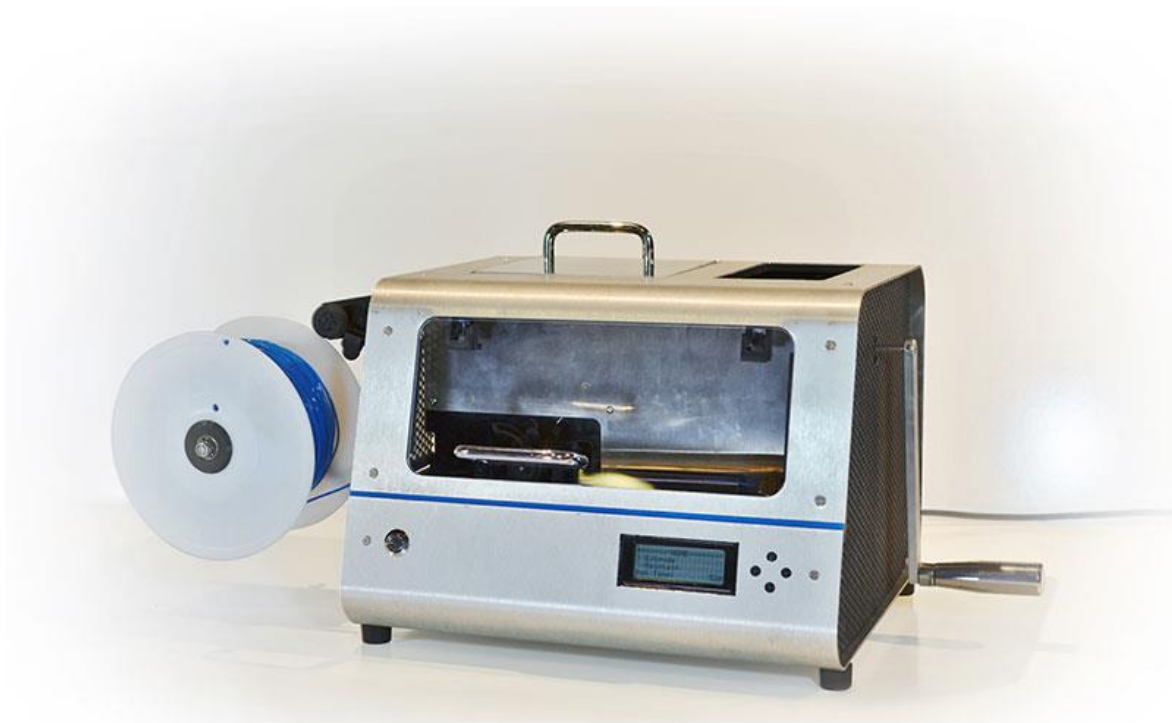


Figura 17: ProtoCycler [11]

Los equipos nombrados permiten utilizar los desechos de impresión 3D, pero advierten de su uso y reciclaje. En el equipo Filastruder, no existe un estudio del proceso ni los materiales, sólo se busca extruir sin preocuparse por la tasa de extrusión ni la calidad. La compra de Protocycler no es un proceso inmediato, ya que depende de fechas estimadas por la compañía, de acuerdo a sus patrocinadores y capacidad de producción, por lo cual el envío de la compra puede demorar hasta un trimestre [11] desde la orden.

2. Metodología de diseño

En este capítulo, se describe una metodología de diseño sistemático para la generación creativa de soluciones. Se dispone de las fases de diseño que se han de seguir en futuros apartados, haciendo énfasis en la aplicación de esta metodología al proceso de diseño de ingeniería mecánica.

2.1 Definición: Diseño

En ingeniería se define Diseño como aquel proceso que “establece y define soluciones y estructuras pertinentes para problemas antes no resueltos, o nuevas soluciones a problemas que ya han sido anteriormente resueltos de otra forma” [12]. Por lo tanto, el diseño es una herramienta que ayuda a resolver problemas de forma estructurada, dando la mejor y más óptima solución.

Una posible metodología para solucionar un problema, es la desarrollada por Dieter & Schmidt, la cual contempla 5 fases [12]:

- Definición del problema: el paso más crítico, es la definición del problema o formulación. Este paso, debe expresar específicamente cual es el posible problema, debe contener objetivos y metas, el estado actual y el deseado del problema, cualquier dificultad en la solución del problema. Esta fase también es llamada *análisis de las necesidades*.
- Recolección de información: En esta fase es necesario identificar o buscar las piezas que nos entregan información acerca del problema.
- Generación de alternativas de solución: generar soluciones o conceptos acerca del diseño envuelve distintos métodos creativos, la aplicación de principios físicos o razonamientos cualitativos y la habilidad de encontrar la información.
- Evaluación de las alternativas y toma de decisiones: la evaluación de alternativas envuelve métodos sistemáticos para la selección del mejor concepto, proveyendo lo básico para tomar la mejor decisión acerca del rendimiento para el diseño.
- Comunicación de los resultados: se debe tener en cuenta que el propósito del diseño es satisfacer las necesidades del cliente.

Esta metodología se puede utilizar en cualquier proceso de diseño, sin importar cuál sea la concepción del producto o el diseño del componente.

2.2 Descripción del Proceso de diseño

El proceso de diseño se representa como un conducto para seleccionar potenciales diseños para nuevos productos que se adaptan a las necesidades del consumidor. La base de la metodología actual de diseño fue descrita por Morris Asimow [12], la cual detalla la totalidad del proceso de diseño. En la



Figura 18, se muestran las fases del diseño de Asimow: Diseño conceptual, Diseño de configuración y diseño de detalle. Estas fases siguen una secuencia lógica de actividades, para desarrollar el proceso y así, generar resultados eficientes.



Figura 18. Diagrama de la Metodología del Diseño [12].

2.2.1 Primera Fase: Diseño conceptual

En esta fase se establece el problema a resolver, se buscan posibles soluciones y se selecciona la mejor teniendo en cuenta criterios bien definidos. El diseño conceptual es una fase en la cual se necesita una gran creatividad, donde existe una gran incertidumbre y requiere coordinación en el trabajo de diseño. Esta primera fase comprende las siguientes actividades:

- Identificación de las necesidades del cliente: la clave de esta actividad es recopilar y entender las necesidades del cliente y comunicarlas al equipo de diseño.
- Definición del problema: la clave de esta actividad es generar ideas de lo que tiene que ser llevado a cabo para satisfacer las necesidades del cliente. Para ello se realiza un análisis competitivo del producto, se establecen especificaciones y restricciones para cumplir con los objetivos de diseño.
- Búsqueda de información: en esta actividad es necesario contar con un amplio espectro de información, para manejar de mejor forma los requerimientos del producto.
- Conceptualización: consiste en realizar un set de conceptos que satisfagan las demandas del cliente y el problema establecido.
- Selección del concepto: se evalúan iterativamente los conceptos de diseños, modificando y escogiendo una idea preferente.

- Refinar las especificaciones de diseño: se revisan las especificaciones luego de la selección del concepto. En esta actividad se buscan los puntos críticos y también se evalúa la relación entre el desempeño del concepto y su costo.
- Revisión del diseño: como última actividad del diseño conceptual, se debe asegurar que el diseño sea físicamente posible y económicamente rentable.

2.2.2 Segunda Fase: Diseño de configuración

Esta fase es de decisiones, ya que lo estudiado en el paso anterior, debe llevarse a cabo, se desarrolla la estructura del diseño conceptual. Se toman decisiones sobre el tipo de material, tamaño, forma y espacio. Esta fase se divide en tres tareas principales:

1. Arquitectura del producto: la arquitectura consiste en dividir el sistema dentro de subsistemas o módulos. En esta actividad se deciden los componentes físicos del diseño y como son dispuestos y combinados para cumplir las funciones del producto.
2. Diseño de partes y componentes: Se determinan las características principales de cada parte del diseño, cómo éstas interactúan con otras y trabajan en conjunto para satisfacer las especificaciones del diseño. Cada parte y componente tiene su propia característica, como: curvas, agujeros, estrías, etc.
3. Diseño paramétrico de partes: en esta actividad se establece el dimensionamiento y la tolerancia de las partes de acuerdo al objetivo. Si no se hizo previamente, se termina de definir los materiales de cada pieza, para desempeñar su función adecuadamente.

2.2.3 Tercera Fase: Diseño de detalle

En esta última fase, se desarrolla una descripción completa de la ingeniería del producto probado y producible. Se establecen las especificaciones del producto, así como también la información faltante relativa a la disposición, calidad superficial, materiales, etc. En esta fase se desarrollan las siguientes tareas:

1. Se obtienen los planos de detalle para la fabricación de componentes.
2. Se realizan las pruebas de verificación de los prototipos, cuyo objetivo es comprobar el desempeño del componente o máquina.
3. Se desarrollan planos y esquemas de ensamblaje

4. Se detallan las especificaciones del producto, actualizando en ello todos los cambios hechos desde la fase del diseño conceptual.
5. Se toman decisiones acerca de las piezas, y si estas deben ser compradas o fabricadas
6. Se hace una evaluación de costos para los productos.
7. Se realiza una revisión final, antes que el producto sea fabricado.

3. Desarrollo del Diseño Conceptual

En este capítulo, se explica el problema a resolver, se buscan posibles soluciones y se elige el mejor concepto. Para un desarrollo correcto del proceso, se emplea la metodología de diseño conceptual del enunciado anterior.

3.1 Definición del problema

Diseñar una extrusora de filamento para impresoras 3D a partir de plásticos reciclados. Estos filamentos tienen la función de poder ser empleados en impresión 3D aditiva. La finalidad de esto, es proponer una nueva opción de reutilización para satisfacer las necesidades de reciclaje de residuos no biodegradables, otorgando valorización del desecho plástico del proceso de impresión 3D. La materia prima utilizada será aquella proveniente de cualquier impresión fallida o material sobrante del proceso de impresión 3D. La extrusora debe ser capaz de triturar los desechos plásticos y convertirlos en materia prima de una impresora 3D, para así, obtener un material a bajo costo y con una buena calidad.

3.1.1 Entendimiento del problema

Para poder entender y comprender de mejor forma el problema, se hicieron visitas a empresas de índole nacional: La primera visita se hizo a Ingeniería Procatell, cuyo principal proceso de fabricación es la extrusión de polímeros. La segunda visita se hizo a las dependencias de la Universidad en San Joaquín, en el laboratorio de Manufactura avanzada del departamento de mecánica, donde existe una sección de fabricación de prototipos a escala con impresión 3D.

En la visita a la empresa Ingeniería Procatell, orientada a otorgar soluciones integrales en la manufactura de alambres, cables y carretes para la actividad de tronaduras en minería, el objetivo de era profundizar conceptos e ideas con respecto a los procesos de extrusión, empleados para la fabricación de sus productos. Se conversó con los operarios acerca de las máquinas extrusoras y se realizaron encuestas de acuerdo las funciones que se querían estudiar en el producto a diseñar, para relacionar su experiencia con el proceso de extrusión y así entender de mejor manera el problema.

Por otro lado, en las dependencias de la Universidad, en el laboratorio de Manufactura avanzada, se profundizaron los conceptos e ideas acerca de la impresión 3D, se conversó

con los operarios y se realizaron encuestas de acuerdo a su función, para relacionar su experiencia con el proceso de impresión y así entender de mejor manera el problema. Este lugar está orientado en obtener prototipos funcionales o físicos, de los trabajos realizados en el aula, proyectos a desarrollar o la materialización de una idea.

Las encuestas estaban enfocadas en entender el producto que se realizaba diseñar, el proceso de la máquina y los términos específicos y generales del problema. Las personas entrevistadas se encuentran en la Tabla 2, y sus respuestas en el anexo 10.1.

Tabla 2: Encuestas para recopilar información de las necesidades del cliente.

Empresa	Nombre	Cargo
Ingeniería Procatell	Ariel López	Gerente de Operaciones
Ingeniería Procatell	Oscar Vega	Supervisor área Extrusora
DIMAC Laboratorio Prototipo a Escalas	Paulo Torres	Estudiante
DIMAC Laboratorio Prototipo a Escalas	Rene Pérez	Estudiante

Se hicieron dos formatos de encuestas, enfocadas a profundizar aspectos relevantes en cuanto a la impresión 3D y la extrusión. La encuesta realizada a la empresa Ingeniería Procatell, aborda información acerca del producto el cual se trabaja y el proceso. La encuesta realizada al laboratorio de Prototipado a Escala, aborda información del producto el cual se trabaja, la materia prima y el proceso de impresión 3D.

3.1.2 Listado de Atributos

En función al problema, se han definido atributos que serán necesarios satisfacer por el equipo a diseñar. Dichos atributos, fueron establecidos en base a una investigación en encuestas y bibliográficos.

Los atributos para el equipo deben ser:

1. Fundir el material
2. Extruir el material
3. Reciclar desechos plásticos de la impresora 3D
4. Moler desechos plásticos de la impresora 3D a un tamaño definido
5. Trabajar con PLA/ABS
6. Trabajar con plástico triturado

7. Filamento producto de la extrusión debe ser utilizable por una impresora 3D
8. Permitir controlar las dimensiones del filamento
9. Filamento continuo sin aire interior
10. Calor aplicado a lo largo del barril extrusor
11. Permitir enrollar el filamento en carretes de 1 [Kg]
12. Conducir el filamento apropiadamente
13. Molienda de bajo costo operacional
14. Que requiera sólo un operario para su funcionamiento
15. Diseño Modular
16. Bajo costo operación
17. Bajo costo Mantenición
18. Fácil Mantenimiento
19. Materiales empleados en la fabricación tengan alta resistencia al desgaste y corrosión
20. Resistencias a temperaturas de hasta 300 [°C]
21. Generar poco ruido
22. Bajo costo de equipo
23. Fácil de limpiar
24. Larga vida útil
25. Fácil inspección
26. Facilidad de manejo y de control
27. Aislamiento térmico en el proceso de operación
28. Permitir reemplazo de piezas
29. Ausencia de agentes contaminantes y dañinos para la salud
30. Impedir atrapamientos
31. Seguridad en todo el proceso de operación
32. Incluir un sistema de detención rápida en caso de emergencia
33. Sistema de calentamiento eléctrico
34. Sistema de enfriamiento externo
35. Controlar la temperatura del proceso
36. Incorpore contador de metraje

- 37. Almacenar materia prima mínima para 15 minutos de producción
- 38. Capacidad mínima de producción de 0.25 [Kg/h]
- 39. Sensor temperatura constantemente
- 40. Permitir visualizar temperaturas
- 41. Extrusora con distintas zonas de calefacción
- 42. Consumo de Potencia entre 60-100 [W]

3.1.3 Objetivos, Restricciones y Funciones

Los atributos nombrados en el enunciado anterior, se clasifican de acuerdo a objetivos, restricciones y funciones de diseño. Los objetivos son metas que el equipo a diseñar debe cumplir. En tanto, las restricciones son limitaciones que el diseño del producto debe cumplir, de acuerdo a las necesidades del cliente. Finalmente, las funciones de diseño son atributos que deben lograr para cumplir con la funcionalidad del producto.

Tabla 3: Objetivos, Restricciones y Funciones

Objetivos	Restricciones
• Reciclar desechos plásticos de la impresora 3D • Trabajar con plástico triturado • Filamento producto de la extrusión debe ser utilizable por una impresora 3D • Permitir controlar las dimensiones del filamento • Filamento continuo sin aire interior	• Trabajar con PLA/ABS • Molienda de bajo costo operacional • Almacenar materia prima mínima para 15 minutos de producción • Capacidad mínima de producción de 0.25 [Kg/h] • Que requiera sólo un operario para su funcionamiento • Consumo de Potencia entre 60-100 [W]

• Calor aplicado a lo largo del barril extrusor • Permitir enrollar el filamento en carretes de 1 [kg] • Conducir el filamento apropiadamente • Diseño Modular • Bajo costo operación • Bajo costo Mantención • Fácil Mantenimiento • Materiales empleados en la fabricación tengan alta resistencia al desgaste y corrosión • Resistencias a temperaturas de hasta 300 [°C] • Generar poco ruido • Bajo costo de equipo • Fácil de limpiar • Larga vida útil • Fácil inspección • Facilidad de manejo y de control • Aislamiento térmico en el proceso de operación • Permitir reemplazo de piezas • Ausencia de agentes contaminantes y dañinos para la salud • Impedir atrapamientos • Seguridad en todo el proceso de operación • Incluir un sistema de detención rápida en caso de emergencia • Sistema de calentamiento eléctrico • Sistema de enfriamiento externo • Controlar la temperatura del proceso • Incorpore contador de metraje • Sensar temperatura constantemente • Permitir visualizar temperaturas • Extrusora con distintas zonas de calefacción	Funciones • Fundir el material • Extruir el material Moler desechos plásticos de la impresora 3D a un tamaño definido
---	---

3.1.4 Categorización de los objetivos de diseño

En este punto, se organizan los objetivos de diseños por categorías de acuerdo a la similitud entre sí. Estas categorías son: Operación, Seguridad, Costos y Control de operación.

Tabla 4: Categorización Objetivos de diseño

Operación • Filamento continuo sin aire interior • Permitir enrollar el filamento en carretes de 1 [Kg] • Conducir el filamento apropiadamente • Resistencias a temperaturas de hasta 300 [°C] • Fácil de limpiar • Fácil inspección • Facilidad de manejo y de control	Costos • Bajo costo operación • Bajo costo Mantención • Bajo costo de equipo • Larga vida útil
Seguridad • Materiales empleados en la fabricación tengan alta resistencia al desgaste y corrosión • Generar poco ruido • Aislamiento térmico en el proceso de operación • Ausencia de agentes contaminantes y dañinos para la salud • Impedir atrapamientos • Incluir un sistema de detención rápida en caso de emergencia • Seguridad en todo el proceso de operación	Control de operación • Sistema de calentamiento eléctrico • Sistema de enfriamiento externo • Controlar la temperatura del proceso • Sensor temperatura constantemente • Incorpore contador de metraje • Permitir visualizar temperaturas • Extrusora con distintas zonas de calefacción

3.1.5 Jerarquización de Objetivos

A continuación, los objetivos de diseño son ordenados según el nivel de importancia que le entrega el diseñador, ordenando de acuerdo a su apreciación, para así encontrar los objetivos más relevantes entre categorías. En la Tabla 5 se muestran los resultados:

Tabla 5: Jerarquización de objetivos

1.Operación	2.Control de Operación
Facilidad de manejo y de control Resistencias a temperaturas de hasta 300 [°C] Filamento continuo sin aire interior Conducir el filamento apropiadamente Permitir enrollar el filamento en carretes de 1 [Kg] Fácil inspección Fácil de limpiar	Controlar la temperatura del proceso Sistema de calentamiento eléctrico Sistema de enfriamiento externo Extrusora con distintas zonas de calefacción Sensor temperatura constantemente Incorpore contador de metraje Permitir visualizar temperaturas
3.Seguridad	4.Costo
Incluir un sistema de detención rápida en caso de emergencia Impedir atrapamientos Ausencia de agentes contaminantes y dañinos para la salud Aislamiento térmico en el proceso de operación Seguridad en todo el proceso de operación Materiales empleados en la fabricación tengan alta resistencia al desgaste y corrosión Generar poco ruido	Bajo costo operación Bajo costo de equipo Bajo costo Mantención Larga vida útil

3.1.6 Lista de objetivos argumentada

En la Tabla 6 se encuentra la lista de objetivos argumentada, donde a los objetivos de diseño se le añaden las restricciones y funciones, para generar una mejor idea de las relaciones entre los objetivos.

Tabla 6: Lista de objetivos argumentada

1.Operación	2.Control de Operación
1.1 Facilidad de manejo y de control 1.2 Resistencias a temperaturas de hasta 300 [°C] 1.3 Filamento continuo sin aire interior 1.4 Conducir el filamento apropiadamente 1.5 Permitir enrollar el filamento en carretes de 1 [Kg] 1.6 Fácil inspección 1.7 Fácil de limpiar F.1 Fundir el material F.2 Extruir el material F.3 Moler desechos plásticos de la impresora 3D a un tamaño definido R.1 Trabajar con PLA/ABS R.2 Almacenar materia prima mínima para 15 minutos de producción R.3 Capacidad mínima de producción de 0.25 [Kg/h] R.4 Que requiera sólo un operario para su funcionamiento	2.1 Controlar la temperatura del proceso 2.2 Sistema de calentamiento eléctrico 2.3 Sistema de enfriamiento externo 2.4 Extrusora con distintas zonas de calefacción 2.5 Sensar temperatura constantemente 2.6 Incorpore contador de metraje 2.7 Permitir visualizar temperaturas
3.Seguridad	4.Costo
3.1 Incluir un sistema de detención rápida en caso de emergencia 3.2 Impedir atrapamientos 3.3 Ausencia de agentes contaminantes y dañinos para la salud 3.4 Aislamiento térmico en el proceso de operación 3.5 Seguridad en todo el proceso de operación 3.6 Materiales empleados en la fabricación tengan alta resistencia al desgaste y corrosión 3.7 Generar poco ruido	4.1 Bajo costo operación 4.2 Bajo costo de equipo 4.3 Bajo costo Mantención 4.4 Larga vida útil R.5 Molienda de bajo costo operacional R,7 Consumo de Potencia entre 60-100 [W]

Como se observa de la tabla, las categorías que presentan restricciones son las de operación y costos, por lo que se debe poner especial énfasis en ellas para lograr el diseño deseado.

3.1.7 Lista de objetivos con pesos ponderados

Para ordenar los objetivos de acuerdo a su importancia en base a una metodología más objetiva, se utiliza un método de escalas relativas [13], la cual jerarquiza la importancia entre los elementos y genera un valor mostrando cuales objetivos son más importantes. Para ver el detalle de los pasos ver el Anexo 10.2. En la Tabla 7 se muestra un resumen de los resultados de este método, ordenando de mayor a menor la importancia de sus objetivos y grupos.

Tabla 7: Lista de objetivos con pesos ponderados

1.Operación (0,406)	2.Control de Operación (0,34)
1.1 Facilidad de manejo y de control (0,119)	2.1 Controlar la temperatura del proceso (0,116)
1.2 Resistencias a temperaturas de hasta 300 [°C] (0,094)	2.2 Sistema de calentamiento eléctrico (0,078)
1.3 Filamento continuo sin aire interior (0,074)	2.3 Sistema de enfriamiento externo (0,061)
1.4 Conducir el filamento apropiadamente (0,049)	2.4 Extrusora con distintas zonas de calefacción (0,054)
1.5 Permitir enrollar el filamento en carretes de 1 [Kg] (0,041)	2.5 Sensar temperatura constantemente (0,017)
1.6 Fácil inspección (0,021)	2.6 Incorpore contador de metraje (0,007)
1.7 Fácil de limpiar (0,008)	2.7 Permitir visualizar temperaturas (0,0068)
3.Seguridad (0,22)	4.Costo (0,04)
3.1 Incluir un sistema de detención rápida en caso de emergencia (0,07)	4.1 Bajo costo operación (0,019)
3.2 Impedir atrapamientos (0,051)	4.2 Bajo costo de equipo (0,014)
3.3 Ausencia de agentes contaminantes y dañinos para la salud (0,037)	4.3 Bajo costo Mantenimiento (0,005)
3.4 Aislamiento térmico en el proceso de operación (0,029)	4.4 Larga vida útil (0,002)
3.5 Seguridad en todo el proceso de operación (0,018)	
3.6 Materiales empleados en la fabricación tengan alta resistencia al desgaste y corrosión (0,013)	
3.7 Generar poco ruido (0,004)	

Como se puede observar en los pesos ponderados, la categoría más relevante de acuerdo a los objetivos es la operación, esto se debe a que es necesario un buen manejo de la máquina y sus funcionalidades, para poder trabajar de manera adecuada y obtener un filamento de calidad y apto para el uso. El segundo objetivo a tener en cuenta es el control de operación, ya que son los encargados de procesar la materia prima y manejar el proceso de extrusión para un óptimo resultado. La seguridad también es importante, en comparación con los costos, ya que en la máquina, lo relevante es cuidar al operario y mantener un buen uso de la misma.

3.2 Análisis Funcional

En este apartado, se establecen las funciones del producto a diseñar, en base a entradas y salidas que tendrá el sistema. Para ello se desarrollarán dos modelos para ver la estructura funcional del objeto: el modelo de caja negra y el modelo de caja transparente. El primer modelo nombrado muestra las entradas que recibe y salidas o respuestas que produce en el sistema, sin considerar cuál es su funcionamiento interno, priorizando qué es lo que hace sobre cómo lo hace. El segundo modelo también muestra las entradas y salidas que se producen en el sistema, pero prioriza el cómo se hace, mostrando las interacciones internas entre las entradas y salidas para ver las funciones y subfunciones del objeto a diseñar.

El modelo de la Caja Negra y Caja Transparente se muestra a continuación:



Figura 19. Modelo Caja Negra

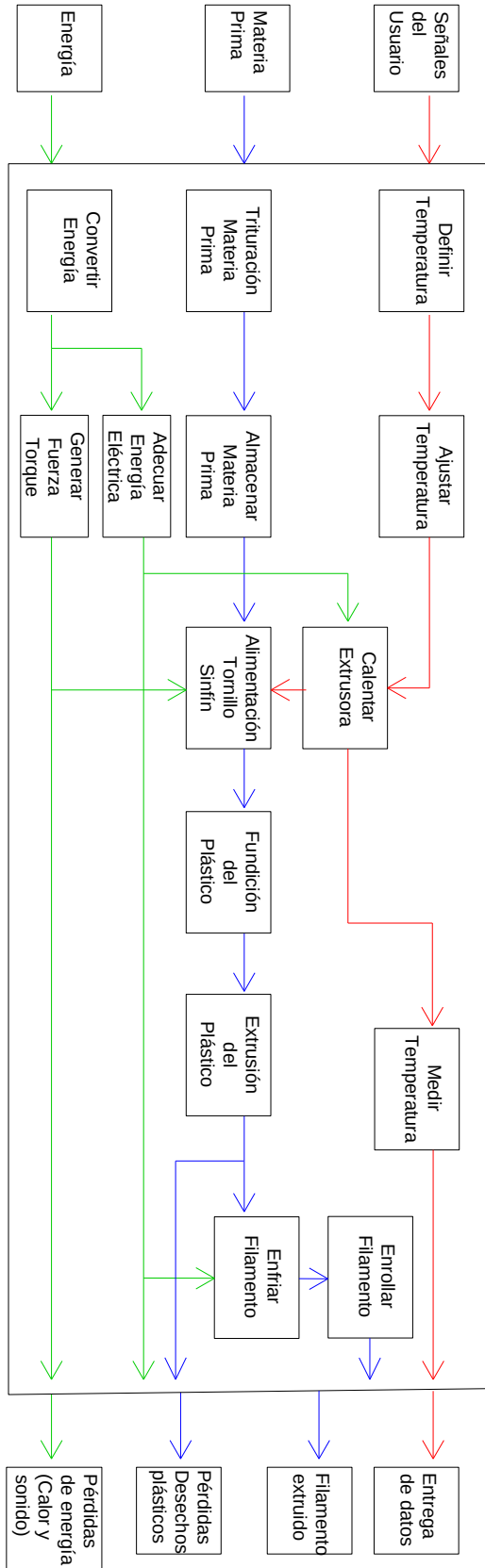


Figura 20. Modelo Caja Transparente

3.2.1 Benchmarking

En esta fase del diseño se busca comparar los objetivos del producto a diseñar frente a otros productos que cumplan funciones relacionadas con el reciclaje de plásticos de impresión 3D, con el objetivo de proveer un punto de referencia y rango, para identificar parámetros específicos de diseño. La comparación se realiza en base a los objetivos de diseño establecidos, y se establece una escala de 1 a 5 para su interpretación, siendo 1 Muy malo y 5 Muy bueno. También se agrega un segundo *Benchmarking* comparando atributos entre los distintos involucrados.

Es necesario considerar, que la competencia cercana en el mercado no contempla el triturado previo del plástico, se enfocan en su mayoría en la compra de plásticos en pellets, algunos tienen el accesorio capaz de realizar esta función, los cuales son vendidos como una pieza adicional, por lo que es necesario tener en cuenta en el análisis.

En la Figura 21 se muestra *Benchmarking* con escala y en la Figura 22 el *Benchmarking* con los resultados comparativos de las máquinas disponibles en el mercado.

Objetivos	 ProtoCycler	 Filastruder	 Filabot	 Strooder	 Noztek Pro
Facilidad de manejo y de control	4	1	1	1	1
Resistencias a temperaturas de hasta 300 [°C]	5	2	5	2	3
Filamento continuo sin aire interior	4	3	3	3	3
Permitir enrollar el filamento en carretes de 1 [Kg]	3	2	1	2	2
Conducir el filamento apropiadamente	3	2	1	2	1
Fácil inspección	4	4	2	2	2
Fácil de limpiar	3	3	2	2	2
Controlar la temperatura del proceso	3	3	3	3	3
Sistema de calentamiento eléctrico	3	3	3	3	3
Sistema de enfriamiento externo	3	1	1	1	2
Extrusora con distintas zonas de calefacción	3	3	3	3	3
Incorpore contador de metraje	4	1	1	1	1
Sensar temperatura constantemente	3	2	2	3	4
Permitir visualizar temperaturas	4	2	3	4	4
Seguridad en todo el proceso de operación	3	1	2	3	2
Impedir atrapamientos	4	2	3	3	3
Ausencia de agentes contaminantes y dañinos para la salud	4	2	3	3	3
Aislamiento térmico en el proceso de operación	4	2	3	3	2
Incluir un sistema de detención rápida en caso de emergencia	2	1	2	2	2
Generar poco ruido	3	2	2	3	2
Materiales empleados en la fabricación tengan alta resistencia al desgaste y corrosión	4	3	3	4	4
Bajo costo operación	4	1	1	2	3
Bajo costo de equipo	1	4	3	2	1
Bajo costo Mantenimiento	2	4	3	3	3
Larga Vida Útil	3	2	3	4	3
Total	83	56	59	64	62

Figura 21: Benchmarking con escala

Característica	ProtoCycler	Filastruder	Filabot	Strooder	Noztek Pro
					
	Precio	\$899	\$299	\$899	\$335
	Material Reciclado	Si	No	\$440 Extra	\$1,000
	Tamaño	355 x 304 x 254 [mm]	533 x 152 x 152 [mm]	431 x 177 x 203 [mm]	No disponible
	Potencia	60[W]	50 [W]	500 [W]	300 x 300 x 800 [mm]
	Temperatura de trabajo	Hasta 300 [°C]	Hasta 260 [°C]	Hasta 450 [°C]	No Reportado
	Volumen de Alimentación	Expandible	No Reportado	No Reportado	Hasta 300 [°C]
	Velocidad Alimentación Husillo	80 [RPM]	8 [RPM]	35 [RPM]	1,25[Kg] de Pellets - Expandible
	Velocidad de Extrusión	3 [m/min]	0,9 [m/min]	0,6 [m/min]	15 [RPM]
	Capacidad de producción	0,5 [Kg/hr]	0,16 [Kg/hr]	0,1 [Kg/hr]	0,9 [m/min]
	Diámetros de Extrusión	1,75 - 3,0 [mm]	1,75 - 3,0 [mm]	1,75 - 2,85 - 3,0 [mm]	0,16 [Kg/hr]
	Tolerancia	/ - 0,02 [mm]	No Reportado	No Reportado	1,75 [mm]
	Diseño Modular	No	Si	No	/ - 0,04[mm]
	Fácil de Usar	Si	No	Si	Si
					No

Figura 22: *Benchmarking* con características comparativas

3.2.2 Lista de requerimientos

En este apartado, se expone la lista de requerimientos concretos del diseño, en la Tabla 8. Asimismo, se presentan las especificaciones del diseño para desarrollar el objetivo, con criterios medibles y sus parámetros mínimos o máximos que se deban cumplir.

Tabla 8: Lista de requerimientos

Categoría	Especificación	Valor	Parámetro
Geometría	Altura	0,5 [m]	Máximo
	Largo	1,5 [m]	Máximo
	Ancho	0,8 [m]	Máximo
Costos	Costo de Fabricación Material	5 [USD/Kg]	Máximo
	Costo Máquina	200 [USD]	Mínimo
		700 [USD]	Máximo
Energía	Suministro Eléctrico	220 [V]	-
	Potencia Consumida	100 [W]	Máximo
Performance	Capacidad de producción	0,25 [Kg/hr]	Mínima
	Velocidad de Extrusión	0,5 [m/min]	Mínima
	Numero de Operarios	1 operario	Máximo
	Materia Prima	Plástico Reciclado Impresora 3D	No aplicable
	Volumen Alimentador	100000 [mm3]	Mínimo
	Temperatura de Trabajo	160 [°C]	Mínimo
		300 [°C]	Máximo
	Tiempo Preparación Máquina	30 [minutos]	Máximo
	Diámetro Extrusión	3 [mm]	Máximo
		1,75 [mm]	Mínimo
	Velocidad de Rotación	10 [RPM]	Mínima
	Torque	10 [NM]	Mínima
	Tolerancia	+/- 0,10[mm]	Máximo
	Dimensión Pellets	3x16 [mm]	Máximo

3.2.3 Matriz Objetivos-Requerimientos

En la Figura 23 se presenta una matriz de objetivos-métricas, que representa la relación que existe entre los objetivos y las especificaciones técnicas de ingeniería. En esta matriz se busca mostrar que los objetivos del diseño tienen una relación directa con la lista de requerimientos para el desarrollo del proyecto.

Peso Ponderado	Objetivos	Requerimientos																	
		Número Columna	Largo 1 máx [m]	Ancho 0.8 máx [m]	Altura 0.5 máx [m]	Costo Fabricación Máximo 5 [USD]	Costo Máquina 200-500 [USD]	Potencia 60-100 [W]	Capacidad de producción mín 0.25 [Kg/h]	Velocidad de Extrusión mín 0.5 [m/min]	Numero de Operarios máx 1	Volumen Alimentador mín 1 [Kg]	Temperatura de Trabajo Máx 260 [°C]	Tiempo preparación Máquina Máx. 30 [min]	1.75 < Diámetro Extrusión < 3 [mm]	Velocidad de Rotación mín 10 [rpm]	Torque mín 10 [Nm]	Tolerancia máx. +/- 10 [mm]	Tamaño Pellets Máximo 1 [cm]
0.107	Facilidad de manejo y de control	1									●	●		●	●	●			●
0.086	Resistencias a temperaturas de hasta 300 [°C]	2					●						●	●					
0.074	Filamento continuo sin aire interior	3					●		●	●					●	●		●	
0.049	Conducir el filamento apropiadamente	4	●			●	●			●	●				●				
0.045	Permitir enrollar el filamento en carretes de 1 [Kg]	5	●				●		●	●		●			●				
0.025	Fácil inspección	6	●	●	●		●												
0.008	Fácil de limpiar	7	●	●	●		●							●					
0.116	Controlar la temperatura del proceso	8					●	●	●	●			●	●	●				
0.078	Sistema de calentamiento eléctrico	9					●	●									●		
0.061	Sistema de enfriamiento externo	10	●				●							●					
0.054	Extrusora con distintas zonas de calefacción	11	●				●						●						
0.017	Sensar temperatura constantemente	12					●	●					●						
0.007	Incorpore contador de metraje	13					●												
0.0068	Permitir visualizar temperaturas	14					●						●						
0.07	Incluir un sistema de detención rápida en caso de emergencia	15					●				●								
0.051	Impedir atrapamientos	16					●												
0.037	Ausencia de agentes contaminantes y dañinos para la salud	17																	
0.029	Aislamiento térmico en el proceso de operación	18					●												
0.018	Seguridad en todo el proceso de operación	19					●												
0.013	Materiales empleados en la fabricación tengan alta resistencia al desgaste y corrosión	20					●						●						
0.004	Generar poco ruido	21														●	●		
0.019	Bajo costo operación	22						●					●						
0.014	Bajo costo de equipo	23					●												
0.005	Bajo costo Mantenición	24					●				●								
0.002	Larga vida útil	25					●												

Figura 23. Matriz Objetivos – Requerimientos

3.2.4 Despliegue de la función de Calidad (QFD)

En este apartado se presenta el despliegue de la casa de la calidad (*Quality Function Deployment*), encargada de reunir los puntos desarrollados en este trabajo y relacionarlos entre sí. Para ello, es necesario tener: los requerimientos del cliente, según sus pesos ponderados, los requerimientos de ingeniería y *benchmarking*. Este despliegue determina las relaciones entre los requerimientos, mostrando así cuáles son sinérgicos y cuáles se contraponen entre sí. Este *QFD* servirá para definir los deseos del cliente, priorizar estos y traducirlo en requerimientos de ingeniería.

A continuación se encuentra la Figura 24, el cual en su parte superior presenta las relaciones entre los requerimientos. En el centro de la Casa, presenta la relación que existe entre los objetivos de diseño y los requerimientos. En la parte derecha se encuentra el *Benchmarking* asociado con los objetivos del diseño, con sus respectivas escalas.

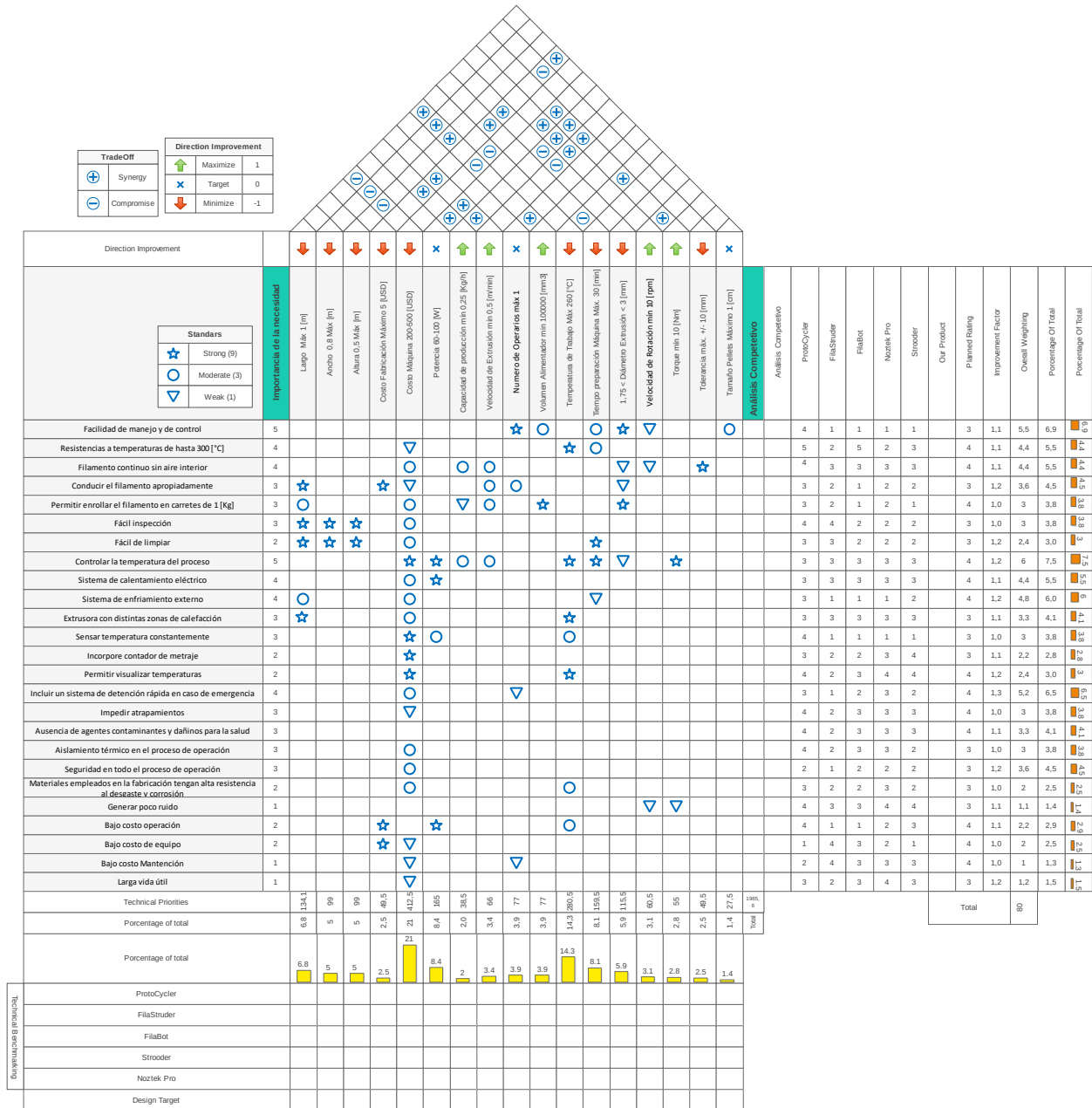


Figura 24: Despliegue de la función de Calidad (QFD)

De la casa de la calidad, se puede inferir:

- Los requerimientos más importantes y los cuales se deben priorizar, es el costo de la máquina, la temperatura de trabajo y el tiempo de preparación de la máquina, requerimientos que conllevan grandes relaciones con las necesidades del cliente
- Los requerimientos con menor importancia, son: el tamaño del pellets, el torque y la velocidad de rotación, entre otros.

3.2.5 Resolución de problemas y contradicciones de diseño

Como se mencionó en el punto anterior, la parte superior de la casa de la calidad presenta los requerimientos del diseño y como estos se relacionan, de forma positiva, negativa o no tienen puntos en común. Para ello, es necesario resolver los puntos conflictivos para así evitar problemas en el diseño posterior del producto. Se aplicará la metodología TRIZ [23] para buscar soluciones a las contradicciones de diseño. Esta metodología busca resolver contradicciones entre dos especificaciones de diseño (una que mejora y otra que empeora). En la Tabla 9 se presenta su desarrollo.

Tabla 9: Metodología TRIZ para solución de contradicciones

N °	Problema Particular	Problema General	Solución General	Solución Particular
1	Largo/Costo Máquina	4. Longitud Estacionaria vs. 36. Complejidad del dispositivo	1. Segmentación	Se puede trabajar con materiales de bajo costo, para obtener el largo requerido
2	Ancho/Costo Máquina	4. Longitud Estacionaria vs. 36. Complejidad del dispositivo	1. Segmentación	Se puede trabajar con materiales de bajo costo, para obtener el ancho requerido
3	Altura/Costo Máquina	4. Longitud Estacionaria vs. 36. Complejidad del dispositivo	1. Segmentación	Se puede trabajar con materiales de bajo costo, para obtener el alto requerido

N °	Problema Particular	Problema General	Solución General	Solución Particular
4	Costo Fabricación/Tolerancia	39. Productividad vs. 29. Precisión de fabricación	10. Acción Preliminar	Realizar acciones preliminares en la máquina para tener una mejor tolerancia dimensional sin perjudicar los costos
5	Costo Máquina/Volumen Alimentador	36. Complejidad del dispositivo vs. 8. Volumen Estacionario	1. Segmentación	Se puede trabajar con materiales de bajo costo, para obtener el volumen requerido evitando mayores costos
6	Costo Maquina/Temperatura de Trabajo	36. Complejidad del dispositivo vs. 17. Temperatura	13. De otra manera	Se puede abaratar costos en cuanto a los dispositivos para obtener la temperatura requerida, trabajando sobre el torque y la velocidad para obtener energía calórica de una forma alternativa
7	Capacidad Producción/Diámetro Extrusión	39. Productividad vs. 3. Longitud del objeto en movimiento	28. Sustitución Mecánica	Tener un elemento mecánico para los distintos diámetros a trabajar, para así evitar pérdidas innecesarias de tiempo y lo que ello implica
8	Velocidad Extrusión/Diámetro Extrusión	39. Productividad vs. 3. Longitud del objeto en movimiento	28. Sustitución Mecánica	Tener un elemento mecánico para los distintos diámetros a trabajar, para así evitar pérdidas innecesarias de tiempo y lo que ello implica

N º	Problema Particular	Problema General	Solución General	Solución Particular
9	Temperatura de Trabajo/Tiempo de preparación	17. Temperatura vs. 25. Pérdida de tiempo	35. Cambio de parámetros	Variar a valores más óptimos la temperatura a utilizar, para evitar pérdidas innecesarias de tiempo

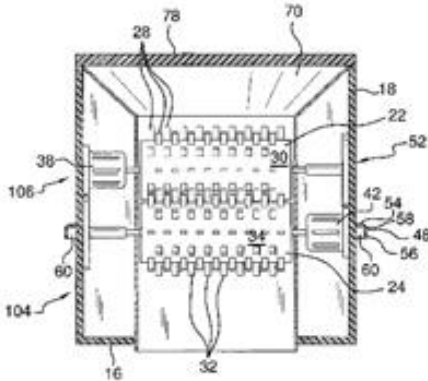
3.3 Generación de Conceptos

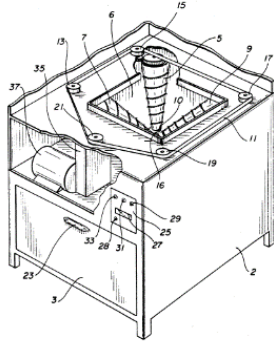
En esta sección se desarrolla la generación del concepto para el diseño, donde la idea es recopilar información y generar ideas, para ello se hará una búsqueda de patentes de los componentes y equipos que realicen alguna función relacionada con el diseño. Posteriormente, se realizará una Carta Morfológica, donde se descomponen las funciones y se proponen soluciones capaces de cumplir las funcionalidades del equipo. Por último, se realizará un *Brainstorming* donde se genera una gran cantidad de ideas para solucionar distintos aspectos relacionados con el diseño, los cuales se dividen en subgrupos para aportar la mayor cantidad de alternativas y soluciones para el diseño, de esta forma generar un concepto lo más detallado posible. Finalmente, se generan soluciones basados en las características que cumplan con los requisitos de diseño.

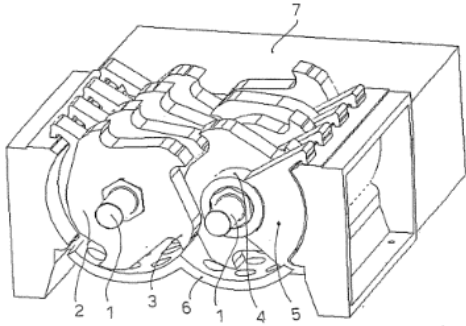
3.3.1 Búsqueda de Patentes

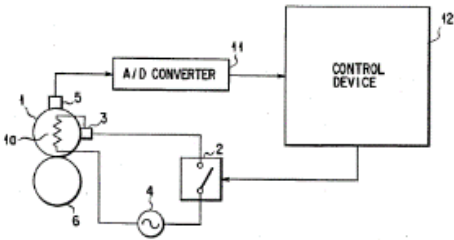
En este apartado se desarrolla una búsqueda de patentes acerca de los componentes y equipos que realizan alguna función relacionada con el diseño del equipo. Se muestren las patentes en la Tabla 10, las cuales cuentan con su nombre, su código, función y una descripción para su entendimiento.

Tabla 10: Patentes para diseño de máquina

Patente #1 - Triturar		
Nombre	Plastic shredder	
Código	US 8393562	
Descripción	Trituradora de Plástico, con depósito directo. Cuenta con dos rodillos, uno superior y otro inferior, paralelos entre sí	

Patente #2 - Triturar		
Nombre	Automatic plastic crusher apparatus	
Código	US 5102057	
Descripción	Máquina automática para triturar plástico a través de cilindros cónicos convergentes. Eléctrica. Cada cilindro posee dientes puntiagudos dispuestos en un patrón helicoidal a lo largo de la superficie.	

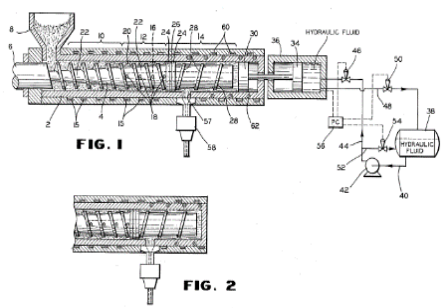
Patente #3 - Triturar		
Nombre	Two-shaft industrial shredder	Figura
Código	US 20050242221	
Descripción	Trituradora industrial, para diversos materiales. Comprende dos ejes que giran en sentido contrario, paralelos entre sí, sobre los cuales existen cuchillas con dientes intercaladas con espaciadores.	

Patente #4 - Control de Temperatura		
Nombre	Temperature controller	Figura
Código	US 5412453	
Descripción	Controlador de temperatura que detiene la operación cuando temperatura excede un nivel predeterminado de operación	

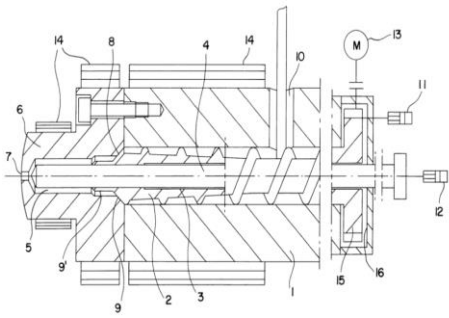
Patente #5 - Control de Temperatura		
Nombre	Multiple temperature sensor system	Figura
Código	US 20130223480	
Descripción	Sensor de temperatura múltiple, con una red de sensores, que incluyen resistencias de detección de temperatura. Posee un controlador de medición de temperatura	

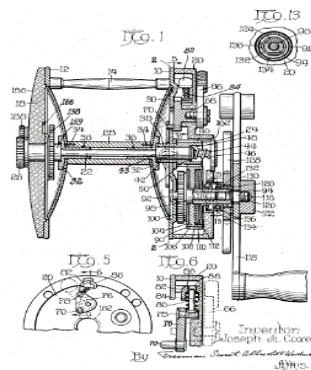
Patente #6 - Control de Temperatura		
Nombre	Extruder and temperature control apparatus therefor	Figura
Código	US 3866669	
Descripción	Aparato para mantener la temperatura del barril extrusor constante, para calentar en distintas fracciones por medio de la corriente. Posee una unidad de control de temperatura	

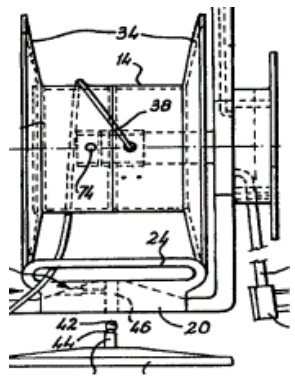
Patente #7 - Control de Temperatura		
Nombre	System and method of temperature control for plastics extruder	Figura
Código	US 4272466	Sin imagen
Descripción	Sistema y método de control de temperatura para un extrusor de plástico, con un sensor interior y otro exterior, en cada zona de control de temperatura. Los sensores detectan la temperatura superficial del barril extrusor, las cuales comparan con una temperatura predeterminada y establece si es necesario calentar o refrigerar la zona.	

Patente #8 - Extrusión		
Nombre	Plastic extrusion	Figura
Código	US 4118163	
Descripción	Máquina extrusora de tornillo, que drena masa fundida por un orificio central del tornillo. La temperatura de la masa fundida se controla de forma independiente, proporcionando una presión esencial en el trabajo	

Patente #9 - Extrusión		
Nombre	A method for preparing a conductive plastic product	Figura
Código	WO 1992010352	Sin imagen
Descripción	Moldeo de plástico fundido con alimentación mediante un tornillo sinfín e inyectado en un molde	

Patente #10 - Extrusión		
Nombre	Injection moulding machine	Figura
Código	US 6200126	
Descripción	Moldeo por Inyección alimentado por un tornillo sinfín con un orificio axial en la salida. Su constitución hace que esta máquina sea de fácil limpieza y mantenimiento	

Patente #11 - Enrollar Filamento		
Nombre	Reel	Figura
Código	US 6200126	
Descripción	Carrete de eje estacionario, de accionamiento manual, para enrollar cable, a través de un tambor rotador	

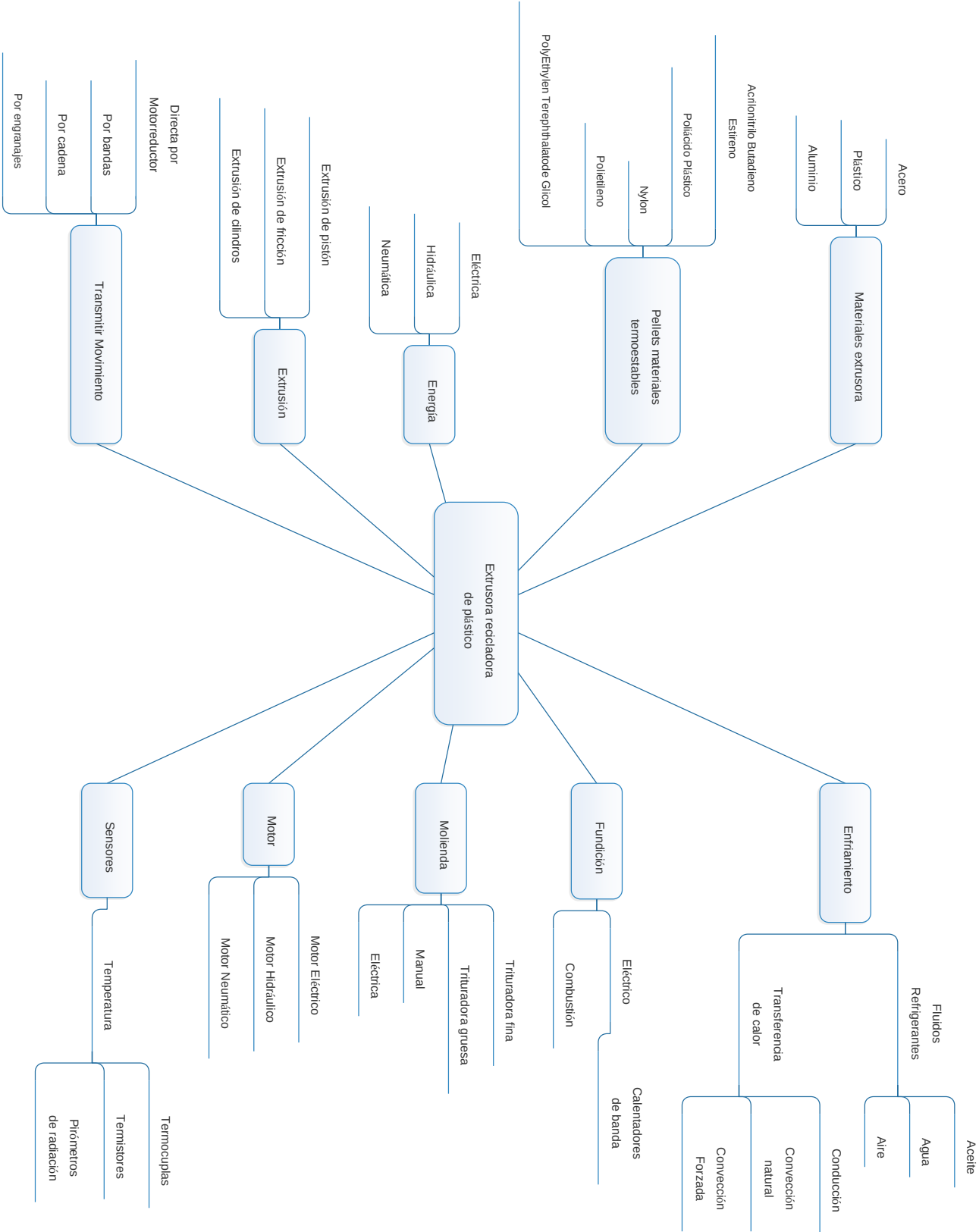
Patente #12 - Enrollar Filamento		
Nombre	Reel	Figura
Código	WO 1999055613	
Descripción	Carrete de eje estacionario, de accionamiento eléctrico, para enrollar cable, a través de un tambor rotador	

Una vez se ha realizado la búsqueda externa de información, se procede a emplear métodos sistemáticos para generar nuevas ideas de solución. De los métodos existentes, se han seleccionado el Brainstorming y la Carta morfológica, debido a su versatilidad y a la cantidad de información que puede derivarse a partir de estos. A continuación, se resume el resultado de estos dos métodos para posteriormente generar las alternativas de solución.

3.3.2 Brainstorming

En este apartado, se desarrolla el *Brainstorming*, el cual nos muestra el concepto principal del objeto a desarrollar: Extruir Plástico, del cual emanan distintos componentes, alternativas y funcionalidades que componen el objeto, con la idea de generar alternativas para solucionar aspectos del diseño, de las cuales se generan alternativas para generar un concepto final. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra el *Brainstorming*.

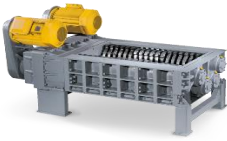
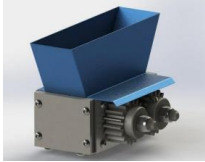
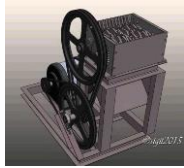
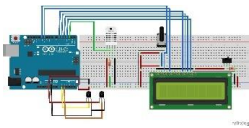
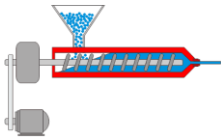
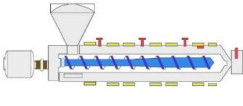
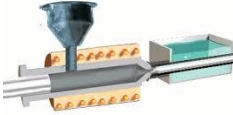
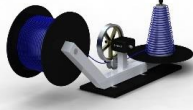
Figura 25: *Brainstorming*



3.3.3 Carta Morfológica

En la carta morfológica, mostrada en la Tabla 11, se analizan las diferentes posibilidades que pueden satisfacer los subsistemas del equipo. La tabla se genera a partir de la investigación bibliográfica y la búsqueda de patentes.

Tabla 11: Carta Morfológica

Función	Concepto		
Triturar Materia Prima			
Almacenar Materia Prima			
Control Temperatura			
Sistemas de medición			
Calentar Extrusora			
Fundir/Extruir Plástico			
Enfriar Filamento			
Enrollar Filamento			

3.3.4 Generación del concepto

En esta sección del diseño, se recogen alternativas e ideas de las secciones anteriores, con la intención de generar conceptos que satisfagan las necesidades del cliente, ingeniería y diseño y a su vez, que cumplan las funciones del proceso.

Concepto A

El sistema consta de una extrusión por fricción entre el husillo y el barril, para transportar el polímero a través de la máquina y generar precalentamiento en la materia prima, con un movimiento constante de material. La máquina tendrá incluido un triturador manual para la molienda de material, dejando caer el plástico dentro de un recipiente para contener la materia prima, y que este se pueda retirar para llevar el material a la tolva. El sistema eléctrico se encontrará en el interior del equipo. El control de la temperatura se hará de forma automática midiendo los niveles de esta mediante termocuplas que estarán acopladas a un controlador de temperatura digital PID. La transferencia de calor hacia el polímero se hará mediante resistencias de bandas cerámicas, capaces de brindar la temperatura necesaria para fundir el material.

El enfriamiento del sistema estará a cargo de un tanque de enfriamiento de agua, por medio de una convección forzada. La forma de transmitir el movimiento se hará a través de un motorreductor con acople directo. El carrete para el bobinado del material extruido será un elemento externo al sistema, de fácil instalación en él.

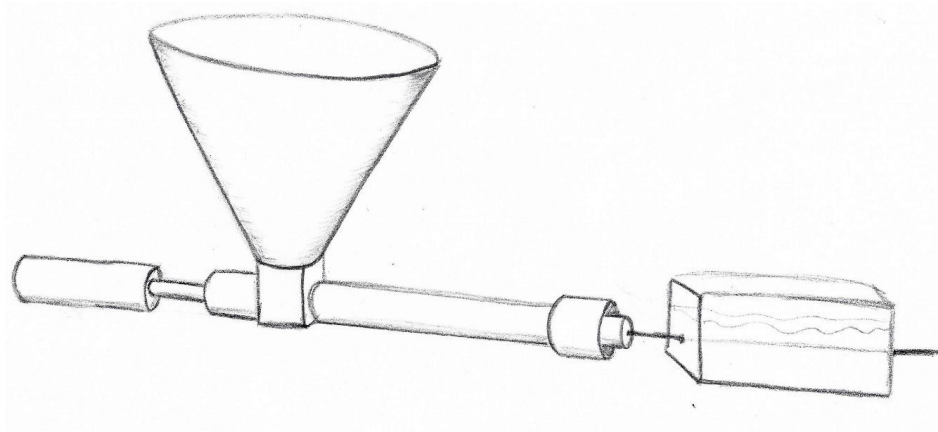


Figura 26: Ilustración del Concepto A

Concepto B

El sistema consta de una extrusión por fricción entre el husillo y el barril, para transportar el polímero a través de la máquina y generar precalentamiento en la materia prima, con un movimiento constante de material. La máquina tendrá de forma externa un triturador manual para la molienda de material, dejando caer el plástico dentro de un recipiente para contener la materia prima, y que este se pueda retirar para llevar el material a la tolva. El sistema eléctrico se encontrará en el interior del sistema. El control de la temperatura se hará de forma automática midiendo los niveles de esta mediante termistores. La transferencia de calor hacia el polímero se hará mediante resistencias de bandas cerámicas, capaces de brindar la temperatura necesaria para fundir el material.

El enfriamiento en el sistema estará a cargo del aire, por medio de una convección forzada a través de ventiladores. La forma de transmitir el movimiento será por cadenas. El carrete para el bobinado del material extruido será un elemento externo al sistema, de fácil instalación en él.

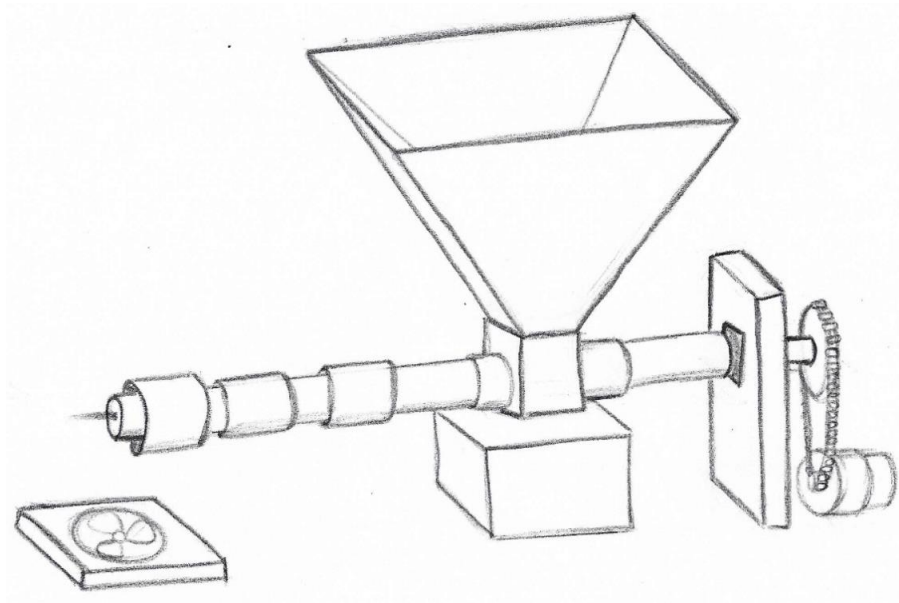


Figura 27: Ilustración del Concepto B

Concepto C

El sistema consta de una extrusión por fricción entre el husillo y el barril, para transportar el polímero a través de la máquina y generar precalentamiento en la materia prima, con un movimiento constante de material. La máquina tendrá un triturador para la molienda de material, el cual operará de forma independiente a esta, y contará con un motor para triturar el plástico en el interior; la molidora actuará por gravedad, depositando la materia prima dentro de un recipiente, para poder retirarlo y llevar el material a la tolva. El sistema eléctrico se encontrará en el interior del equipo. Los sensores de temperatura serán termocuplas y los calentadores eléctricos serán resistencias de bandas eléctricas, mediante bandas eléctricas, los cuales son capaces de brindar la temperatura necesaria en el sistema para fundir el material. El enfriamiento en el sistema estará a cargo del aire, por medio de una convección forzada a través de ventiladores. La forma de transmitir el movimiento será con un acople directo al motor. El carrete para el material será un elemento externo al sistema, de fácil instalación en él. La boquilla será perpendicular al cabezal del husillo. Este sistema contará con un sistema *Puller* y un sistema de repartidor del filamento hacia el carrete.

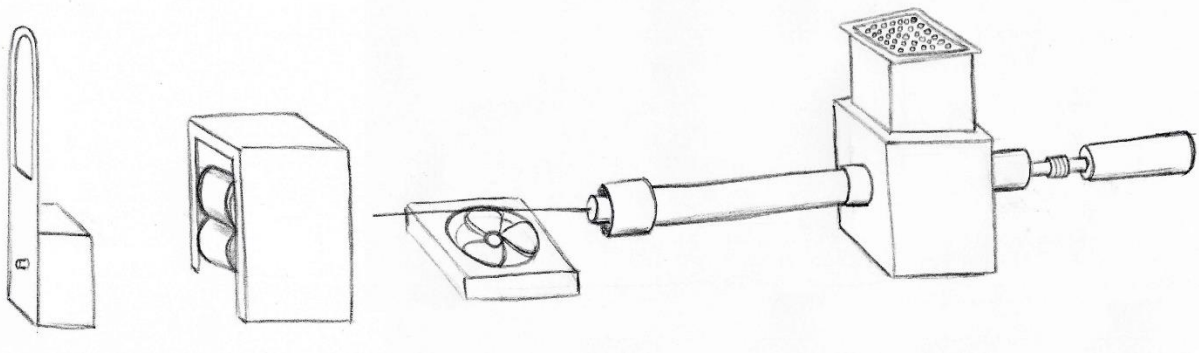


Figura 28: Ilustración del Concepto C

3.4 Selección del Concepto

En la presente sección, se realiza la selección del concepto que mejor cumple con los requerimientos del cliente. Es por ello, que el criterio de selección serán los objetivos de diseño y se empleará el método de pesos ponderados como técnica de selección. Para ello, se establece una escala de 1 a 5 para su interpretación, siendo 1 Muy malo y 5 Muy bueno, para la calificación de cada alternativa, con respecto a los objetivos. Asimismo, se emplean los puntajes de los objetivos de diseño, que fueron obtenidos en el análisis de las necesidades del cliente, con el fin de tener en cuenta la importancia de cada atributo en la selección. En la Tabla 12 se presenta en detalle el resultado del proceso.

Tabla 12: Método selección de pesos ponderados

Objetivo Máquina	Peso Objetivo	Conceptos					
		Concepto A		Concepto B		Concepto C	
		Puntaje	Peso	Puntaje	Peso	Puntaje	Peso
Facilidad de manejo y de control	11,9%	3	0,357	3	0,357	5	0,595
Resistencias a temperaturas de hasta 300 [°C]	9,4%	5	0,47	5	0,47	5	0,47
Filamento continuo sin aire interior	7,4%	3	0,222	4	0,296	4	0,296
Conducir el filamento apropiadamente	4,9%	4	0,196	4	0,196	4	0,196
Permitir enrollar el filamento en carretes de 1 [Kg]	4,1%	4	0,164	4	0,164	4	0,164
Fácil inspección	2,1%	2	0,042	4	0,084	4	0,084
Fácil de limpiar	0,8%	2	0,016	4	0,032	4	0,032
Controlar la temperatura del proceso	11,6%	3	0,348	3	0,348	3	0,348
Sistema de calentamiento eléctrico	7,8%	5	0,39	5	0,39	5	0,39
Sistema de enfriamiento externo	6,1%	3	0,183	4	0,244	4	0,244
Extrusora con distintas zonas de calefacción	5,4%	4	0,216	4	0,216	4	0,216

		Conceptos					
		Concepto A		Concepto B		Concepto C	
Objetivo Máquina	Peso Objetivo	Puntaje	Peso	Puntaje	Peso	Puntaje	Peso
Sensar temperatura constantemente	1,7%	4	0,068	2	0,034	4	0,068
Incorpore contador de metraje	0,7%	3	0,021	3	0,021	3	0,021
Permitir visualizar temperaturas	0,7%	3	0,0204	3	0,0204	3	0,0204
Incluir un sistema de detención rápida en caso de emergencia	7,0%	1	0,28	1	0,28	1	0,28
Impedir atrapamientos	5,1%	4	0,204	4	0,204	4	0,204
Ausencia de agentes contaminantes y dañinos para la salud	3,7%	3	0,111	3	0,111	3	0,111
Aislamiento térmico en el proceso de operación	2,9%	4	0,116	1	0,029	4	0,116
Seguridad en todo el proceso de operación	1,8%	4	0,072	1	0,018	4	0,072
Materiales empleados en la fabricación tengan alta resistencia al desgaste y corrosión	1,3%	4	0,052	3	0,039	4	0,052
Generar poco ruido	0,4%	4	0,016	2	0,008	4	0,016
Bajo costo operación	1,9%	4	0,076	4	0,076	4	0,076
Bajo costo de equipo	1,4%	3	0,042	1	0,014	3	0,042
Bajo costo Mantención	0,5%	3	0,015	4	0,02	3	0,015
Larga vida útil	0,2%	4	0,008	2	0,004	4	0,008
Puntaje Total		3,7054		3,6754		4,1364	
Elección		2		3		1	

De acuerdo a los resultados, se obtiene que la alternativa con mayor puntaje total es el concepto C, siendo este entonces el que satisface de mejor manera los objetivos de diseño. Este diseño tiene una serie de ventajas por sobre el resto como: Un filtro para filtrar la materia prima, de forma de ayudar al proceso, un sistema de seguridad para la molienda de material, una extrusión continua y con una gran calidad por medio de la fricción, un tamaño menor de la máquina por sobre las otras opciones, entre otros.

4. Diseño de Configuración

En este apartado se presenta el diseño de configuración del equipo, el cual incluye la arquitectura del producto: la disposición física de los sistemas y subsistemas para cumplir las funciones de diseño. Asimismo, presenta el diseño de partes y componentes: se analiza cada parte del sistema para cumplir con las necesidades de diseño.

4.1 Arquitectura del producto

En esta fase del diseño de la máquina, se establece el tipo de arquitectura del producto, la cual busca solucionar de qué forma se relacionan las funciones del diseño, su distribución y como se conectan. Existen dos modalidades de arquitectura: Integral o Modular. En ambas, se debe decidir cómo conducir el desarrollo de componentes y la producción de ellos. La arquitectura integral, se diseña para que solo una o pocas partes del producto tengan múltiples funciones, por lo que existe una gran interdependencia entre los componentes. La arquitectura modular, separa el diseño en subsistemas que satisfacen funciones, por lo que existe una descomposición, integración y compatibilidad entre los subsistemas [14].

4.1.1 Tipo de arquitectura

En este apartado, se hablará de la arquitectura modular, ya que caracteriza el diseño total de una extrusora, debido a que sus funciones primarias están bien definidas, en la cual se puede desarrollar productos sobre una base. Existen tres formas de arquitectura modular como se ve en la Figura 29. La arquitectura modular de ranura o *slot* (Figura 29 a), es aquella en la cual un dispositivo básico o base, permite que se anexas distintos módulos de distintas maneras. Por su parte, en la arquitectura modular de bus (Figura 29 b), los distintos módulos se anexas a un dispositivo básico o interface. En este caso, a diferencia del anterior, la relación entre la base y el módulo es de forma estándar. Finalmente, la arquitectura modular seccional (Figura 29 c), es aquella en la que los distintos módulos se interconectan entre ellos, para que cada uno realice una sub función de forma individual, por lo que tiene muchas reconfiguraciones.

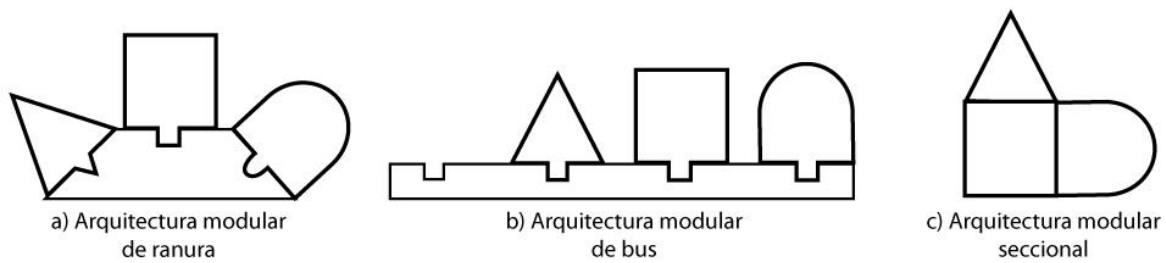


Figura 29: Tipos de Arquitectura de Diseño

De acuerdo a las características de diseño que debe cumplir el sistema, existe una gran variedad de funciones que son necesarias satisfacer. Cada una de ellas, se llevará a cabo de manera individual, sobre la base de la máquina. Debido a ello, se escoge una arquitectura modular de bus, para distintos subsistemas conectados a una interfaz estándar.

4.1.2 Arquitectura del equipo

En este apartado, se desarrolla un diagrama con funciones, sub funciones y los elementos necesarios para cumplir con sus tareas, para poder definir la arquitectura del equipo y la distribución física de los componentes.

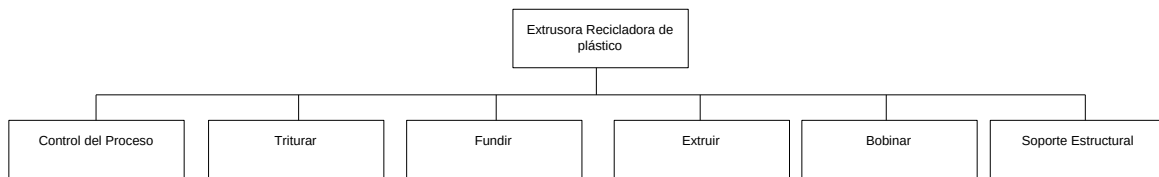


Figura 30: Diagrama de componentes y funciones de la máquina

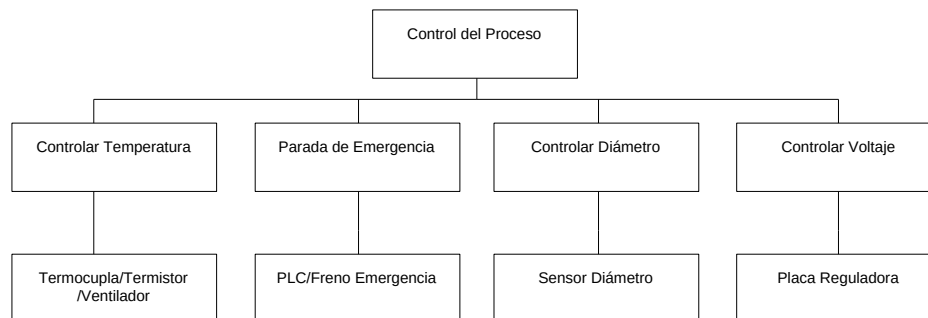


Figura 31: Módulo de Control

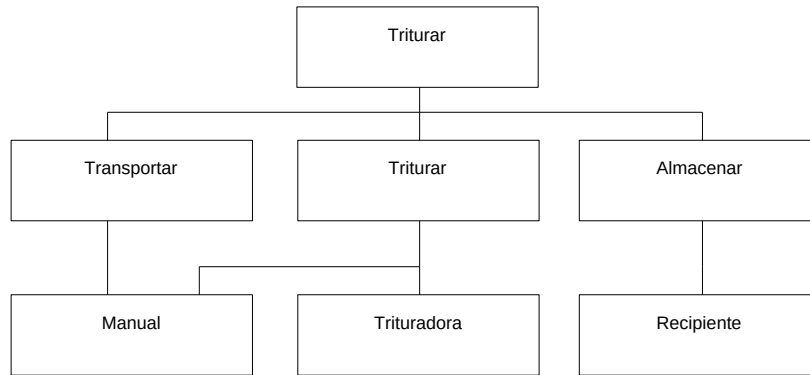


Figura 32: Módulo de Triturado

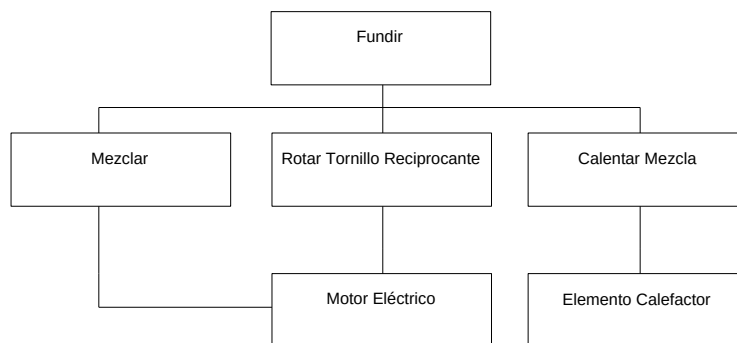


Figura 33: Módulo de Fundido

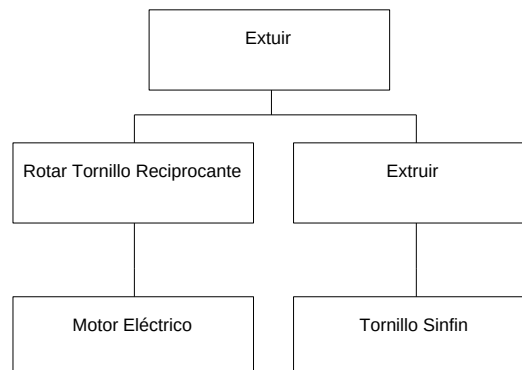


Figura 34: Módulo de Extruido

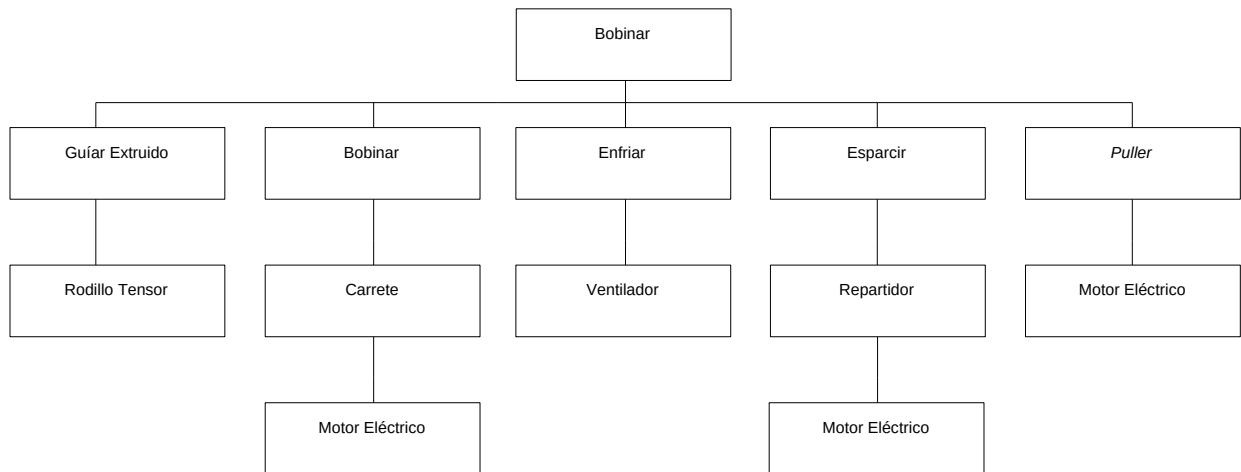


Figura 35: Módulo de Bobinado

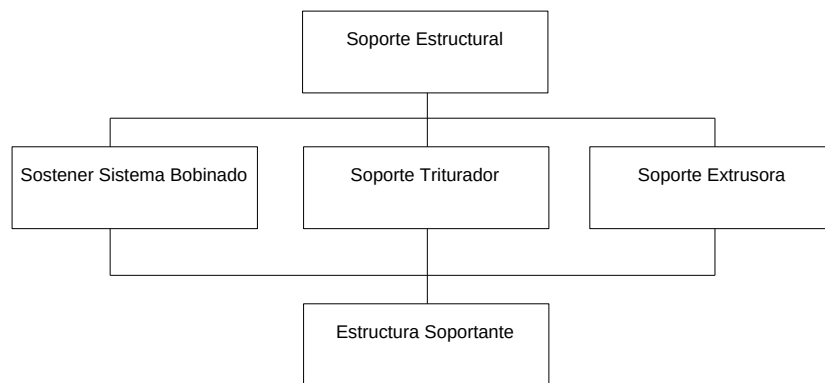


Figura 36: Módulo de Soporte

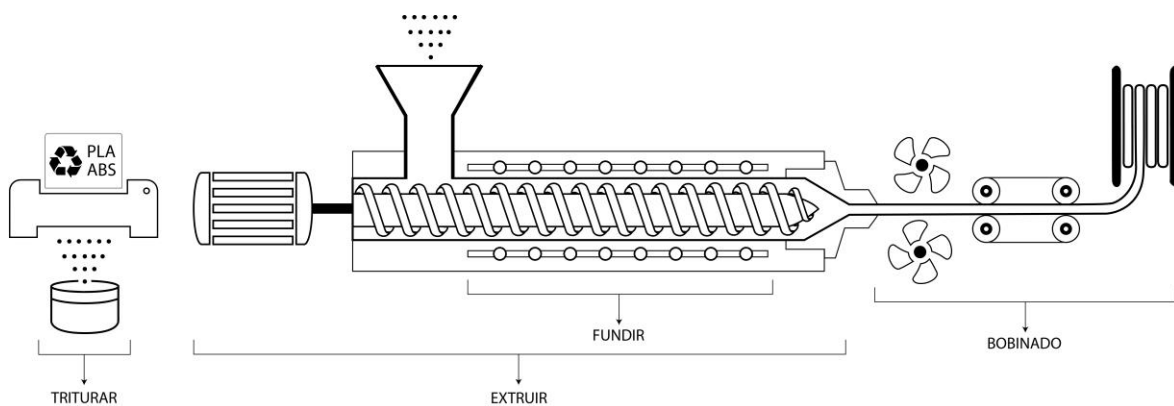


Figura 37: Bosquejo de funciones y grupos.

4.2 Diseño de configuración

En el presente apartado se diseñan las partes y componentes del sistema. Se determinan las características principales de los componentes, como interactúan y trabajan en conjunto. También se establecen características básicas de los componentes especiales y estándar. En la Figura 38 se listan los componentes separados en módulos que forman parte del diseño de la máquina. En las siguientes, el desglose de cada una.

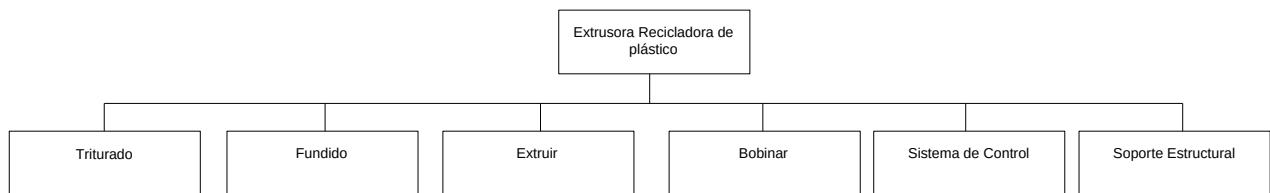


Figura 38: Diagrama de componentes del diseño separados en módulos

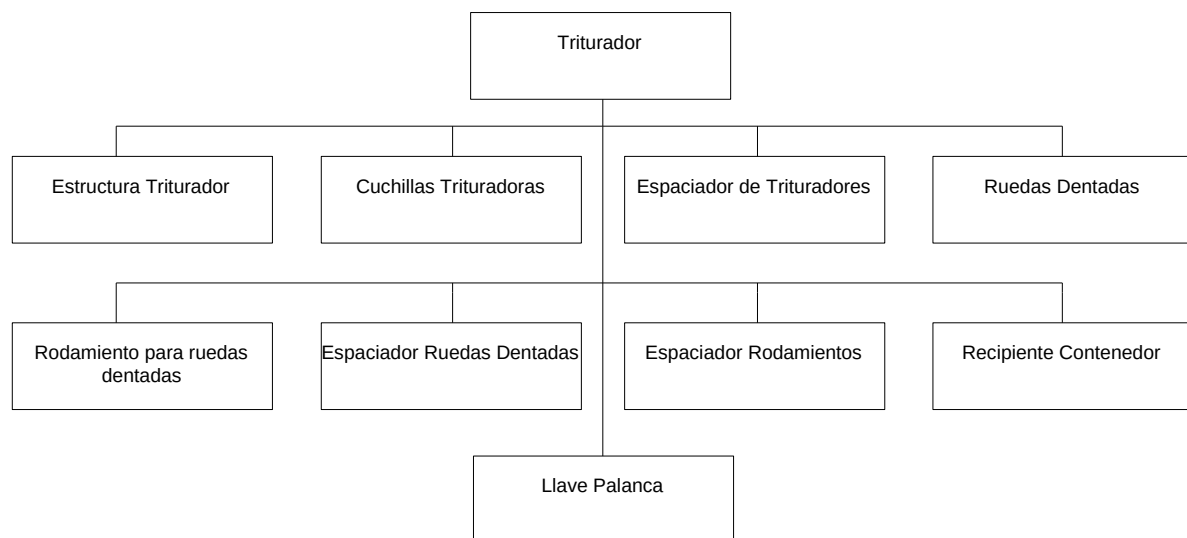


Figura 39: Módulo de Triturado

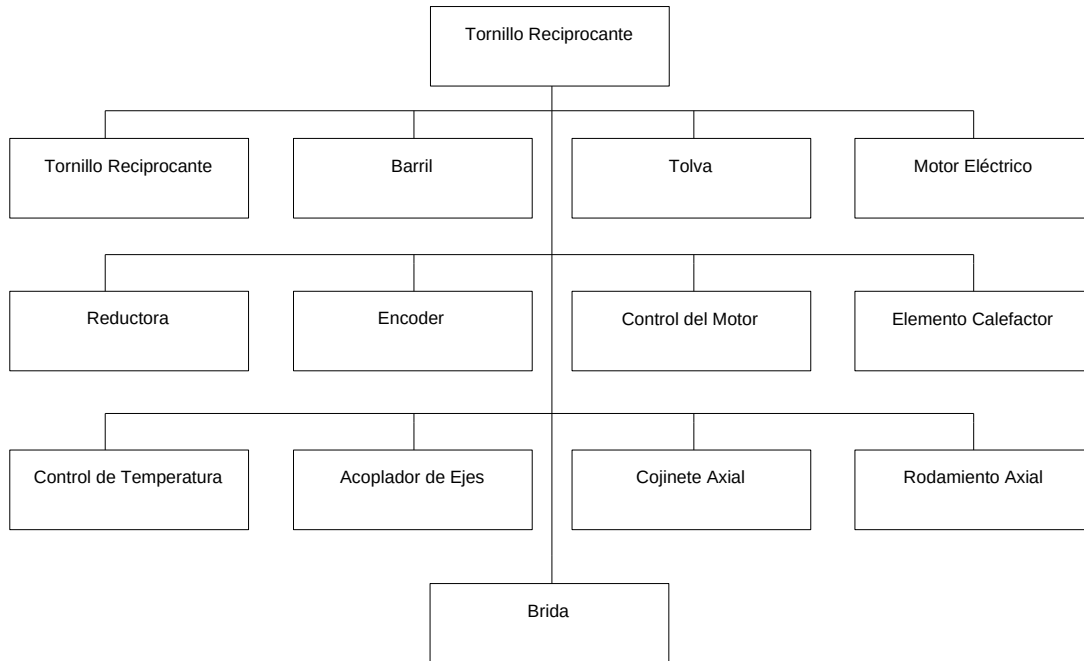


Figura 40: Módulo de Fundido

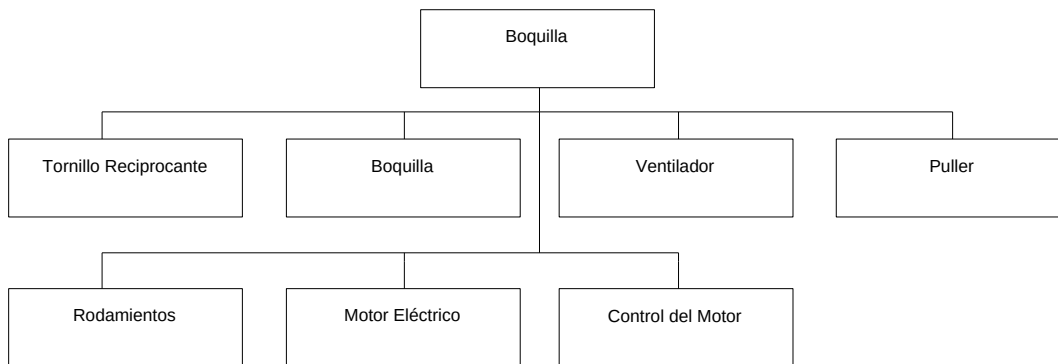


Figura 41: Módulo de Extruir

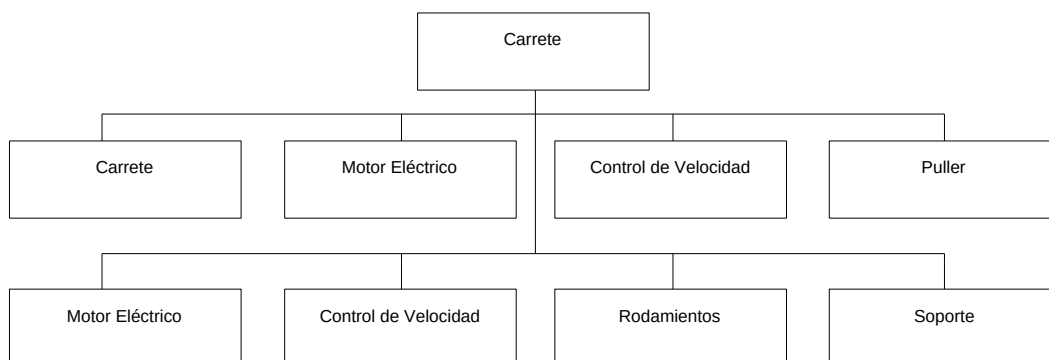


Figura 42: Módulo de Bobinar

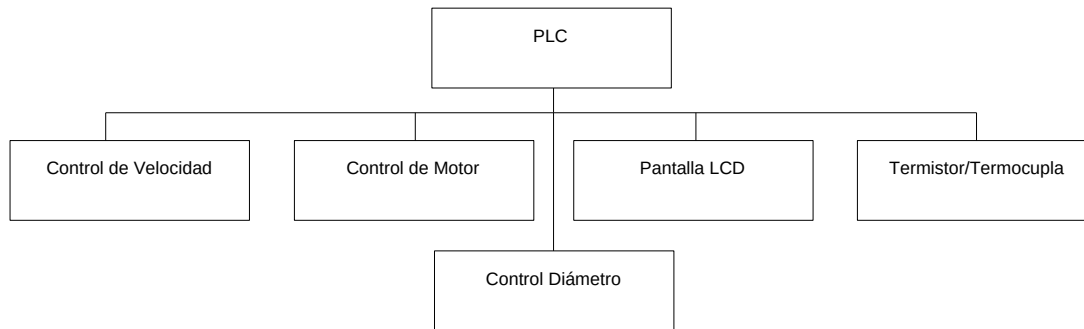


Figura 43: Módulo de Sistema de Control

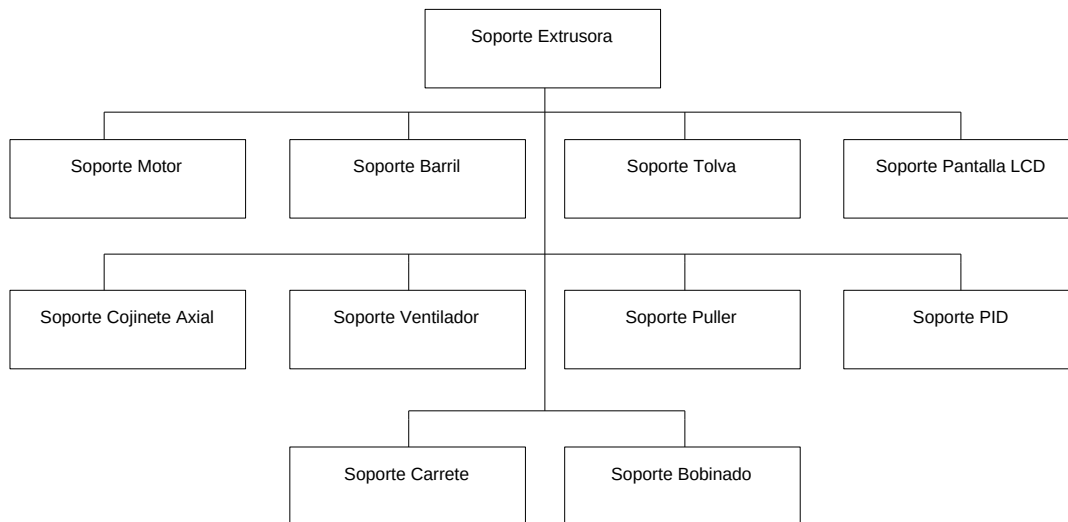


Figura 44: Módulo de Soporte Estructural

4.2.1 Componentes Especializados

Los componentes especializados son los diseñados en este trabajo de acuerdo a las necesidades del producto. Las piezas especializadas son: Tornillo Reciprocante, Tolva, Boquilla y Estructura Soportante.

Husillo

Para el diseño del husillo, se debe tener en cuenta la lista de requerimientos. Este tornillo está cubierto por el barril y su diámetro debe ser compatible con el acoplamiento de ejes, entre este y el motor y a su vez, satisfacer las necesidades del cliente en cuanto a producción. Debe presentar un eje apto para acoplarlo este al motor, como componentes, presenta un

rodamiento axial para soportar la fuerza axial del husillo generada por la operación, transmitiendo el movimiento y girando con menor fricción. El montaje del husillo se hace sobre un soporte para brindar estabilidad, seguridad, limpieza y accesibilidad. El motor eléctrico es el encargado de generar el movimiento del tornillo. El husillo está compuesto por una tolva que recibe la mezcla, también posee un sistema eléctrico externo de resistencias que calienta la mezcla y la funde.

Tolva

Este componente es la entrada de materia prima a la extrusora, por lo que tiene que ser de gran tamaño para acumular plástico triturado. Este va por sobre el husillo, para aprovechar la gravedad y el material descienda hacia la garganta de alimentación. La parte superior de la tolva puede ser un diseño modular para poder ser ampliada en caso de ser necesario. La entrada de material se hará de forma manual para evitar costos innecesarios de transporte.

Boquilla

El diseño de la boquilla debe ser acorde a las necesidades del cliente y la capacidad de producción de la extrusora. Como uno de los elementos más importante del extruido, su orificio de salida debe ser circular, debido a la forma del filamento para impresoras 3D. Para el correcto funcionamiento es necesario considerar la forma deseada del material extruido, cantidad de material a extruir y el ángulo y presión de entrada en la boquilla.

Estructura de Soporte

El diseño de la estructura de soporte se hace con base en los requerimientos de los distintos componentes que se encuentran en la extrusora y trituradora. Es necesario que este soporte: el motor, barril, tolva, rodamiento axial, ventilador, *puller*, sistema PID, carrete y bobinado. La estructura soportante de mayor carga será la extrusora con sus derivados.

4.2.2 Componentes Estándar

Componentes que no se desarrollan en detalle, debido a que se seleccionan de catálogos según requerimientos. Los componentes estándar son: Motores, Triturador, Elemento Calefactor, Ventilador, Carrete, Unidad de control y Acoplados de Ejes.

Motores

El diseño del sistema está compuesto por varios motores, cada uno con distintas funcionalidades. Cada uno de los motores requiere distintos parámetros para su selección, entre ellos está:

Motor Husillo: Para la correcta selección de los motores para el husillo, se debe conocer la potencia necesaria para la operación del mismo. En el apartado posterior de diseño detallado, se puede encontrar la teoría que respalda la potencia y el torque calculado. Este motor esta acoplado de forma directa con el husillo y es el encargado de girar y mover a este. Su selección es parte del diseño de detalle.

Motores Bobinado y distribución: Para la correcta selección de los motores para el bobinado y distribución, se debe conocer las velocidades necesarias de operación de él. En el diseño detallado, se puede encontrar la teoría que respalda dichos cálculos. Su selección es parte del diseño de detalle.

Motor Puller: El motor del *puller* no requiere cálculos detallados, ya que su función solo es mantener la velocidad con que se extrae el material, sólo es necesario un par y velocidad adecuado para ello. Su selección es parte del diseño de detalle.

Triturador

El triturador es un componente que complementa el proceso de la extrusora, que permite la molienda de material plástico.

Esta máquina fue seleccionada para realizar el trabajo de cortar el material reciclado y convertirlo en pellet. La selección de esta máquina se realiza para simplificar el proceso de diseñar un sistema de triturado completo. Las características y el modelo seleccionado se pueden ver en la Tabla 13 y Figura 45. En el anexo 10.22 se pueden encontrar mayor detalle del triturador.

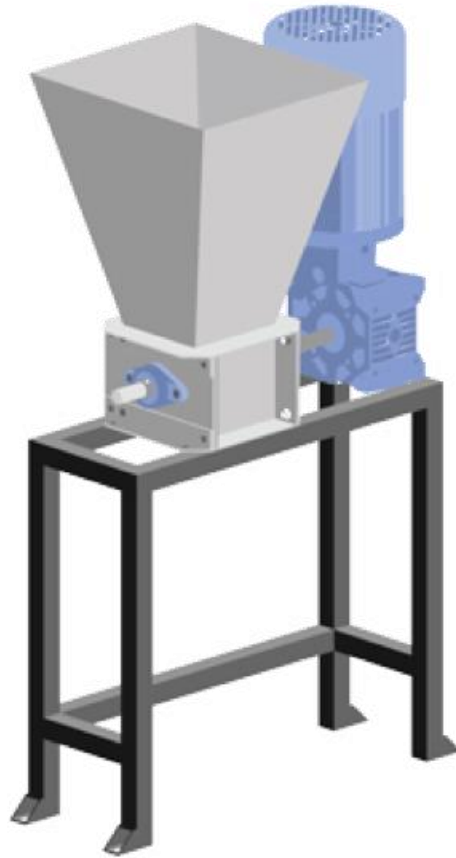


Figura 45: Shredder Proyecto Precious Plastics [24].

Tabla 13: Máquina Trituradora

Trituradora Proyecto <i>Precious Plastics</i>	
Modelo	V1
Peso	40 [Kg]
Dimensiones	600x210x1200 [mm]
Voltaje Entrada	220
Potencia	2 [Kw]
Velocidad	15 [RPM]
Cuchillas	Moviles y Fijas
Precio	180€

Elemento Calefactor

Componente necesario para fundir el material. Su disposición física es alrededor del barril extrusor, consumiendo potencia eléctrica para calentar la zona. Es necesario que tenga un

control de la temperatura, para conectar y desconectar de acuerdo a la temperatura de trabajo. La barra debe resistir las temperaturas de trabajo o usar un elemento alternativo para su cuidado. El dimensionamiento y selección del elemento calefactor se puede encontrar en el diseño detallado.

Ventilador

Componente encargado de enfriar el material extruido en la salida de la boquilla, para que pueda pasar por el puller. Su disposición es por la salida del material, en la estructura para su soporte. El dimensionamiento y selección del ventilador se puede encontrar en el diseño detallado.

Carrete

Componente que se encuentra en la parte final del proceso de extrusión, donde se enrolla el material extruido. Se encuentra sobre la estructura del extrusor, en un soporte base. El extruido una vez que pasa por el *Puller*, es hilado en los carretes a través de un motor seleccionado para ello.

Unidad de control

La unidad de control está formada por *drivers* de motores y controladores de temperatura, los cuales permiten el correcto y continuo proceso de extrusión, entregando seguridad al operario y a la operación. Su selección se puede encontrar en el diseño detallado.

Acoplados de Ejes

Se presentan acopladores de ejes, para transmitir el movimiento de rotación del eje del motor al husillo. Es necesario que el acoplador sea del diámetro de los ejes para transmitir de forma correcta el movimiento y no generar esfuerzos innecesarios, por lo que dependerá del motor y diámetro seleccionados. Los acoples seleccionados se encuentran en el anexo 10.15.

Rodamientos

Los rodamientos son seleccionados de acuerdo a los ejes y características necesarias para el diseño del extrusor. Los rodamientos seleccionados se encuentran en el anexo 10.14.

Resorte

Componente que se encuentra en el sistema Puller. Su función es otorgar firmeza al brazo del sistema para posicionar el sistema extractor de manera correcta.

5. Diseño de Detalle

En el presente apartado, se completa y se añade información faltante de las etapas anteriores. Se detallan especificaciones del producto, dimensiones, materiales y selección de componentes.

5.1 Diseño Husillo

5.1.1 Dimensionamiento

5.1.1.1 Parámetros

El husillo es el componente principal en el trabajo de una máquina extrusora. Como se muestra en la Figura 46, tanto la producción como la aplicación de la extrusora dependen del diámetro del husillo, de la longitud, de la velocidad de giro, diseño del canal helicoidal, perfil de los filetes y del cabezal, número de zonas, cabeza perfiladora, entre muchas otras.

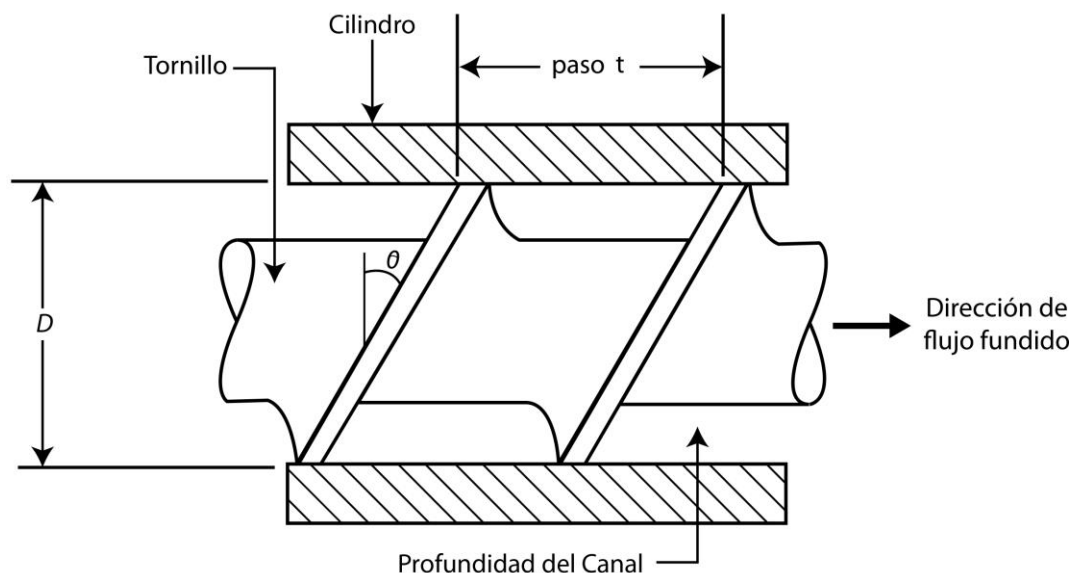


Figura 46: Detalles del Husillo [3]

Según el material a transformar y en parte según la forma y finalidad de los artículos a fabricar, los husillos se construyen de uno o varios canales, con paso y profundidad del canal constante o variable. Sin embargo, por su mayor capacidad de producción y facilidad de fabricación, se emplean husillos de paso constante y profundidad del canal variable [15]. La elección se hará de acuerdo a los materiales a trabajar (ABS y PLA). Un tornillo de uso general para trabajar ambos materiales, con tres zonas de definidas en el husillo (alimentación, compresión y dosificación) y de un (1) solo canal, con paso constante y profundidades de canal para cada zona [1].

La relación que existe entre el largo y el diámetro del husillo posee una gran importancia. Al aumentar la longitud del husillo, aumenta el efecto del calor sobre el material, la velocidad de giro y la producción de la extrusora, por lo tanto, aumenta la relación L/D [15]. La relación típica entre el largo y el diámetro para la extrusión de polímeros termoplásticos varía entre 20:1 y 30:1 [1]. Los husillos largos se deben emplear en extrusoras rápidas, para la fabricación de películas, fibras, entre otros. Por otro lado, para la fabricación perfiles continuos, se recomienda utilizar husillos cortos [15].

El grado de compresión, es decir, la relación de volúmenes de los canales del husillo en las áreas correspondientes a un paso de las zonas de alimentación y dosificación, se encuentra en un intervalo de 2 a 4 [1]. Para la transformación de cables, se requiere mayor presión de extrusión, por lo que el grado de compresión utilizado debe ser bajo. Se recomienda menor profundidad del canal helicoidal de la zona de dosificación para la fabricación de filamentos [15]. De acuerdo a estas recomendaciones, se elige un grado de compresión de 2, para tener el canal de la zona de extrusión de pequeña profundidad, para obtener un gradiente de presión mayor para la fabricación de filamentos.

Los parámetros geométricos escogidos para el proyecto se basan en las necesidades del cliente, de acuerdo al largo máximo de la extrusora como también la producción de extruido, manteniendo las relaciones indicadas anteriormente para su correcta fabricación. Los parámetros son:

- Largo total del husillo (incluyendo vástago)

$$L_t = 386 [mm]$$

- Largo del husillo (de trabajo)

$$L = 320 [mm]$$

- Largo del Eje del husillo

$$l_e = 66 [mm]$$

- Diámetro del husillo

$$D = 16 [mm]$$

- Relación L/D

$$\frac{L}{D} = 20$$

- Número de Filetes

$$N^{\circ} \text{ Filetes} = \frac{L}{D} = 20$$

- Grado Compresión

$$i = 2$$

Para los demás cálculos de un husillo, se recomienda utilizar los siguientes parámetros geométricos [15]:

- Paso del husillo

$$t = (0,8 - 1,2) * D$$

$$t = 1 * 16 \approx 16 [mm]$$

- Ancho de filete

$$e = (0,06 - 0,1) * D$$

$$e = 0,1 * 12 = 1,6 [mm]$$

- Profundidad del Canal Zona alimentación

$$h_1 = (0,15 - 0,2) * D$$

$$h_1 = 0,2 * 12 \approx 3,2 [mm]$$

- Profundidad del Canal Zona de dosificación o medición

$$h_3 = \frac{h_1}{i}$$

$$h_3 = \frac{3,2}{2} = 1,6 [mm]$$

- Diámetro del alma

$$d = 0,6 * D$$

$$d = 9,6 [mm]$$

- Ángulo de Hélice

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{t}{\pi * D} \right)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{16}{16 * \pi} \right) = 17,6^\circ$$

Para la longitud útil del husillo, se especifican 3 zonas a lo largo, entre ellas está: la zona de alimentación, la zona de medición y la zona de compresión. Al igual que los parámetros anteriores, existen intervalos recomendados para cada una de las zonas. Para extrusoras universales, se recomiendan [15]:

- Para la longitud en la zona de alimentación, el parámetro debe ser:

$$L_a = 8 * D$$

Donde

L_a : Longitud en la zona de alimentación [mm]

- Para la longitud en la zona de medición, el parámetro debe ser:

$$L_m = 7 * D$$

Donde

L_m : Longitud en la zona de medición [mm]

- Para la longitud en la zona de compresión, el parámetro debe ser:

$$L_c = 5 * D$$

Donde

L_c : Longitud en la zona de compresión [mm]

A partir de lo expuesto, se calculan los largos necesarios para cada zona:

- Longitud zona de alimentación:

$$L_a = 8 * 16 = 128 \text{ [mm]}$$

- Longitud zona de medición:

$$L_m = 7 * 16 = 112 \text{ [mm]}$$

- Longitud zona de compresión:

$$L_c = 5 * 16 = 80 \text{ [mm]}$$

5.1.1.2 Holgura del husillo/cilindro

La holgura entre la cresta del filete del husillo y la superficie interior del cilindro en una extrusora tienen una gran importancia, cuando la holgura es grande, el material se mezcla con mayor efectividad, pero disminuye el avance del mismo al aumentar el fujo inverso (de presión) del material. Generalmente se emplea una holgura entre el husillo y el cilindro de $0,002D$ para los husillos de diámetros grandes y de $0,005D$ para los husillos de diámetros pequeños [15]. De acuerdo a ello, la holgura seleccionada que existe entre el cilindro y el husillo será:

$$\delta = 0,005 * D$$
$$\delta = 0,005 * 16 = 0,08 \text{ [mm]}$$

5.1.1.3 Producción del husillo

La producción expresada como flujo volumétrico, es el resultado de tres diferentes flujos dentro del canal. El primero, el flujo de arrastre (α), es el provocado por el giro del tornillo. El segundo, el flujo de presión (β), es el componente que se opone al flujo en el sistema. Por último, el flujo de filtración (γ), el cual reduce la producción debido a pérdidas de material entre la holgura del husillo-cilindro. Por lo tanto, la producción en la zona de medición es la equivalente a la producción total del tornillo. Según Savgorodny [15], el flujo volumétrico unitario se puede determinar por:

$$Q = \left(\frac{\alpha * K}{k + \beta + \gamma} \right) \eta$$

Donde

α :	Volumen unitario del Flujo de arrastre [mm ³]
β :	Volumen unitario del Flujo de presión [mm ³]
γ :	Volumen unitario del Flujo de filtración [mm ³]
K :	Constante total de la forma geométrica del cabezal [mm ³]
η :	RPM del husillo [rev/min]

Cada uno de estos parámetros están definidos por su propia ecuación, que relaciona las dimensiones del husillo con las variables de la máquina. A continuación, se calcula cada una de estas variables.

- Volumen unitario flujo de arrastre (α) [15]

$$\alpha = \frac{\pi * m * D * h_1 * \left(\frac{t}{m} - e\right) * \cos^2 \varphi}{2} [mm^3]$$

Donde

m :	Número de canales del husillo [-]
D :	Diámetro del husillo [mm]
h_1 :	Profundidad del canal en la zona de alimentación [mm]
t :	Paso del husillo [mm]
e :	Ancho del filete [mm]
φ :	Ángulo de la Hélice [°]

Reemplazando, se obtiene:

$$\alpha = \frac{\pi * 1 * 16 * 3,2 * \left(\frac{16}{1} - 1,6\right) * \cos^2(17,6)}{2}$$

$$\alpha = 1051,5 [mm^3]$$

- Volumen unitario flujo de presión (β) [15]

$$\beta = \frac{m * h_1^3 * \left(\frac{t}{m} - e\right) * \sen \varphi * \cos^2 \varphi}{12 * L}$$

Donde:

L :	Longitud del husillo [mm]
-------	---------------------------

Reemplazando, se obtiene:

$$\beta = \frac{1 * 3,2^3 * \left(\frac{16}{1} - 1,6\right) * \sen(17,6) * \cos(17,6)}{12 * 320}$$

$$\beta = 0,0355[mm^3]$$

- Volumen unitario flujo de filtración (γ) [15]

$$\gamma = \frac{\pi^2 * D^2 * \delta^3 * \tan \varphi}{10 * e * L}$$

Donde

δ : Holgura del husillo/cilindro [mm]

Reemplazando, se obtiene:

$$\gamma = \frac{\pi^3 * 16^2 * 0,08^3 * \tan 17,6}{10 * 1,6 * 320}$$

$$\gamma = 8,04 * 10^{-5}[mm^3]$$

Por lo general, el volumen unitario de filtración γ , no es de gran importancia en los cálculos, pero tiene utilidad para comprobar el desgaste y la pérdida de volumen en los filetes, controlando así, las pérdidas en la producción.

- Constante total de la forma geométrica del cabezal

Esta constante representa el coeficiente de la forma geométrica del cabezal, por lo que dependerá de las diferentes configuraciones en él. Las geometrías presentes en el cabezal serán un canal cónico en la entrada del cabezal y un canal cilíndrico en la boquilla, para dar forma al material a extruir. Se desarrollará esta fórmula para cada uno de los diámetros de boquilla (1,75 y 3 [mm])

- Canal Cónico [15]

$$K_1 = \frac{3 * \pi * d_o^3 * d_1^3}{128 * L_{canal} * (d_o^2 + d_o * d_1 + d_1^2)}$$

Donde

d_o : Diámetro de entrada del material en un canal cónico [mm]

d_1 : Diámetro de salida del material en un canal cónico [mm]

Para el primer caso, $d_o = 16 [mm]$ y $d_1 = 1,75 [mm]$

$$K_{1a} = \frac{3 * \pi * 16^3 * 1,75^3}{128 * 10 * (16^2 + 16 * 1,75 + 1,75^2)}$$

$$K_{1a} = 0,563 [mm^3]$$

Para el segundo caso, $d_o = 16 [mm]$ y $d_1 = 3 [mm]$

$$K_{1b} = \frac{3 * \pi * 16^3 * 3^3}{128 * 10 * (16^2 + 16 * 3 + 3^2)}$$

$$K_{1b} = 2,6 [mm^3]$$

○ Canal Cilíndrico [15]

$$K_2 = \frac{\pi * d^4}{128 * L_{canal}}$$

Donde

d : Diámetro del canal cilíndrico [mm]

Para el primer caso, $d = 1,75 [mm]$

$$K_{2a} = \frac{\pi * 1,75^4}{128 * 10}$$

$$K_{2a} = 0,023 [mm^3]$$

Para el segundo caso, $d = 3 [mm]$

$$K_{2b} = \frac{\pi * 3^4}{128 * 10}$$

$$K_{2b} = 0,199 [mm^3]$$

La constante común del cabezal [15] se determina como la suma de las resistencias experimentadas en las zonas de trabajo, la cual se presenta a continuación:

$$K = \frac{1}{\sum \frac{1}{K_1} + \sum \frac{1}{K_2} + \dots + \sum \frac{1}{K_i}}$$

$$K_a = \frac{1}{\frac{1}{0,563} + \frac{1}{0,023}}$$

$$K_a = 0,0221 [mm^3]$$

$$K_b = \frac{1}{\frac{1}{2,6} + \frac{1}{0,199}}$$

$$K_b = 0,184 [mm^3]$$

Con estos resultados, se puede obtener el flujo volumétrico del husillo para cada uno de los casos. Las RPM del husillo se variarán para obtener distintos flujos volumétricos y seleccionar el adecuado de acuerdo con las necesidades del cliente. Los resultados se pueden ver en la Tabla 14, Tabla 15, Tabla 16 y Tabla 17.

Para obtener el flujo volumétrico en Kg/h, se hará la conversión necesaria según la densidad del ABS y PLA.

$$Q = \left(\frac{\alpha * K}{K + \beta + \gamma} \right) \eta * \rho$$

Donde

ρ : Densidad del material [Kg/mm³]

ρ_{ABS} : Densidad del ABS 0,00000105 [Kg/mm³]

ρ_{PLA} : Densidad del PLA 0,00000125 [Kg/mm³]

Tabla 14: Resultados Flujo Volumétrico Plástico ABS con una boquilla de 1,75 [mm]

Plástico ABS - Boquilla de 1,75 [mm]	
RPM	Flujo Volumétrico [Kg/h]
10	0,25
15	0,38
20	0,5
30	0,76

Tabla 15: Resultados Flujo Volumétrico Plástico PLA con una boquilla de 1,75 [mm]

Plástico PLA - Boquilla de 1,75 [mm]	
RPM	Flujo Volumétrico [Kg/h]
10	0,3
15	0,45
20	0,6
30	0,9

Tabla 16: Resultados Flujo Volumétrico Plástico ABS con una boquilla de 3[mm]

Plástico ABS - Boquilla de 3 [mm]	
RPM	Flujo Volumétrico [Kg/h]
10	0,55
15	0,83
20	1,1
30	1,6

Tabla 17: Resultados Flujo Volumétrico Plástico PLA con una boquilla de 3 [mm]

Plástico PLA - Boquilla de 3 [mm]	
RPM	Flujo Volumétrico [Kg/h]
10	0,66
15	0,99
20	1,3
30	1,98

El caso más crítico, donde se produce menos material, es en la boquilla de 1,75 [mm], debido a la reducción de la salida. Es por ello, que las RPM se seleccionarán en el caso del ABS con esta boquilla, al ser el caso de menor producción.

En la Figura 47 se presenta la variación de caudal de acuerdo a las RPM del husillo, variando desde 10 a 30 [rpm] y una producción de 0,25 a 0,76 [kg/h] respectivamente.

La selección óptima de producción del husillo será a las 10 [rpm], ya que con esto se cumplen los requerimientos de producción y las especificaciones del cliente, de 0,25 [Kg/h] mínimos.

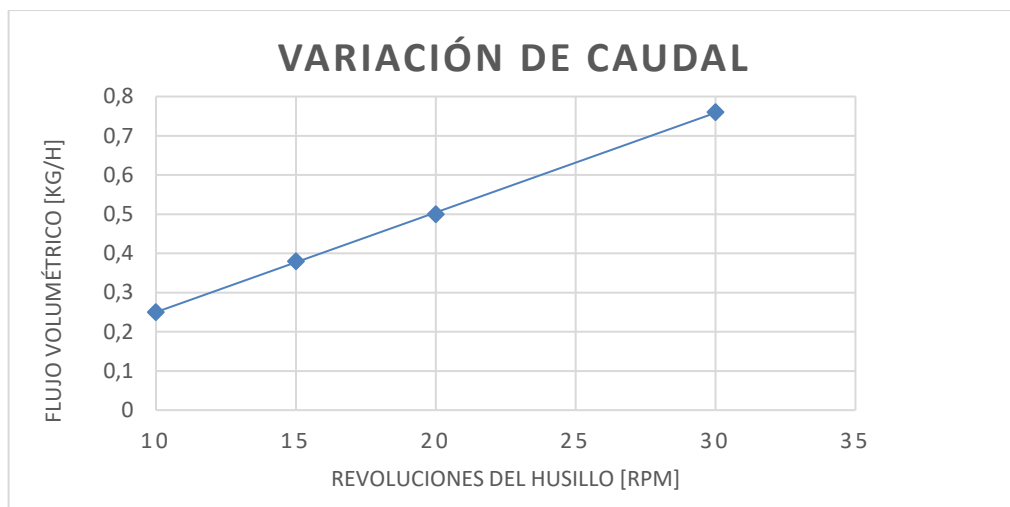


Figura 47: Gráfico de Variación del caudal en Plástico ABS respecto a las RPM, con una boquilla de 1,75 [mm]

5.1.1.5 Potencia Requerida

La potencia de accionamiento del husillo es la necesaria para girar el husillo a la velocidad requerida para producir el material extruido. Esta dependerá de la potencia necesaria para desplazar el material y la energía consumida por la holgura del cilindro, la cual queda expresada por [15]:

$$N = \left(\frac{\pi^3 * D^3 * \eta^2}{h_1} \right) * L * \mu + \frac{(\alpha * \Delta P)}{\cos^2(\varphi)} + \left(\frac{\pi^2 * D^2 * \eta^2 * e}{\delta * \tan(\varphi)} \right) * L * \mu [W]$$

Donde

η :	Revoluciones del husillo [rev/s]
D :	Diámetro del husillo [m]
L :	Longitud del husillo [m]
μ :	Viscosidad efectiva del material [Pas]
h_1 :	Profundidad del canal en la zona de alimentación [m]
α :	Volumen unitario del Flujo de arrastre [m ³]
ΔP :	Diferencia de presiones en el husillo [Pa]
φ :	Ángulo de la Hélice [°]
e :	Ancho del filete [m]
δ :	Holgura del husillo/cilindro [m]

Se utilizará la viscosidad efectiva de mayor magnitud en el husillo (Tabla 18 y Tabla 19) para obtener la potencia máxima requerida, y se utilizará la presión de operación del husillo. Por lo tanto, se obtiene:

$$N = \left(\frac{\pi^3 * (0,016)^3 * \left(\frac{10}{60}\right)^2}{(0,0032)} \right) * 0,320 * 2100$$

$$+ \frac{((1051,57 * 10^{-9}) * (13443990 - 101325))}{\cos^2(17,6)}$$

$$+ \left(\frac{\pi^2 * (0,016)^2 * \left(\frac{10}{60}\right)^2 * 0,00,6}{0,00008 * \tan(17,6)} \right) * 0,320 * 2100$$

$$N = 11,3 [W]$$

5.1.1.6 Presiones en la máquina extrusora

La presión en la máquina extrusora se genera a medida que el material avanza a través del husillo, donde la presión generada en la parte delantera del husillo, cumple un papel importante en el proceso y acabado del material, la cual debe ser considerada para el diseño de la máquina.

- **Presión Máxima en el husillo [29]**

La presión máxima en el husillo se genera cuando no existe movimiento de caudal en el interior del cilindro, por lo cual la masa está estática y no existe flujo de arrastre.

$$P_{MAX} = \frac{6 * \pi * D * L * \eta * \mu}{h^2 * \tan \varphi}$$

Donde

D :	Diámetro del husillo [m]
L :	Largo del husillo [m]
η :	Revoluciones del husillo [rev/s]
μ :	Viscosidad efectiva [Pas]
h :	Profundidad del canal en la zona de dosificación [m]
φ :	Ángulo de la Hélice [°]

La viscosidad efectiva se determina en función de la velocidad de cortadura por medio de diagramas, que están preparados para los diferentes materiales, en función de la temperatura de trabajo.

La velocidad de cortadura dependerá de la forma geométrica del canal del husillo, la cual viene dada por:

$$\gamma = \frac{\pi * D * N}{h}$$

Donde

D : Diámetro del husillo [mm]

N : Velocidad del husillo [rev/s]

h : Distancia entre el filete del husillo y el barril [mm]

Por lo que se obtiene una velocidad de cortadura de:

$$\gamma = \frac{\pi * 16 * 0,166}{0,08}$$

$$\gamma = 105 [1/s]$$

De acuerdo a la velocidad de cortadura, se debe obtener la viscosidad efectiva de cada material a trabajar (ABS y PLA). Por lo tanto, se utilizará la viscosidad efectiva de mayor magnitud para obtener la presión máxima que puede llegar a trabajar la extrusora.

Para el caso del PLA, la temperatura de trabajo será de 160 a 230 [°C], por lo que la viscosidad efectiva se evaluará en el promedio de la temperatura de trabajo, aproximadamente a 190 [°C]. Mediante al gráfico de la Figura 48, se genera la Tabla 18:

Visc app vs. SR app @ T=190°C

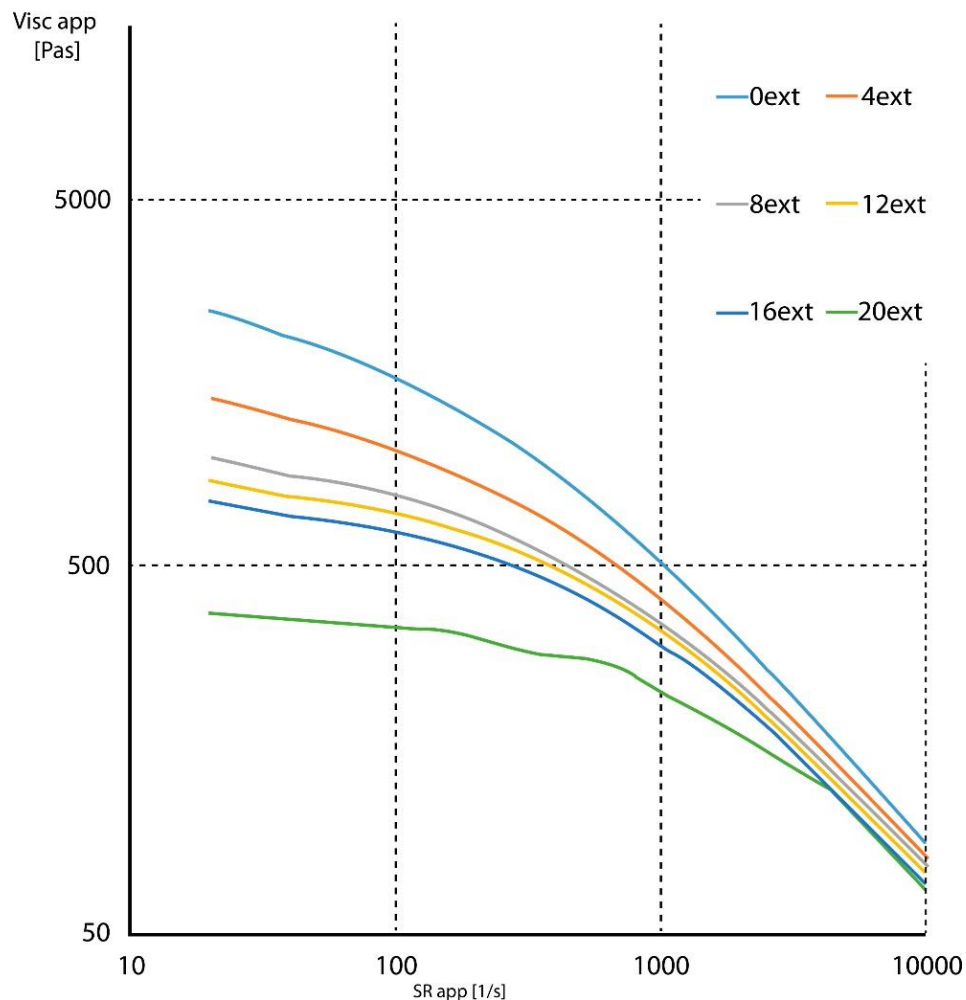


Figura 48: Gráfico Viscosidad Aparente en el PLA a 190 [°C] [21]

Tabla 18: Viscosidad Efectiva PLA a 190[°C]

Viscosidad Efectiva PLA a 190 [°C]	
Velocidad Cortadura [1/s]	Viscosidad Efectiva [Pas]
105	1600

Para el caso del ABS, la temperatura de trabajo será de 215 a 250 [°C], por lo que la viscosidad efectiva se evaluará en el promedio de la temperatura de trabajo, aproximadamente a 230 [°C]. Mediante el gráfico de la Figura 49, se genera la Tabla 19:

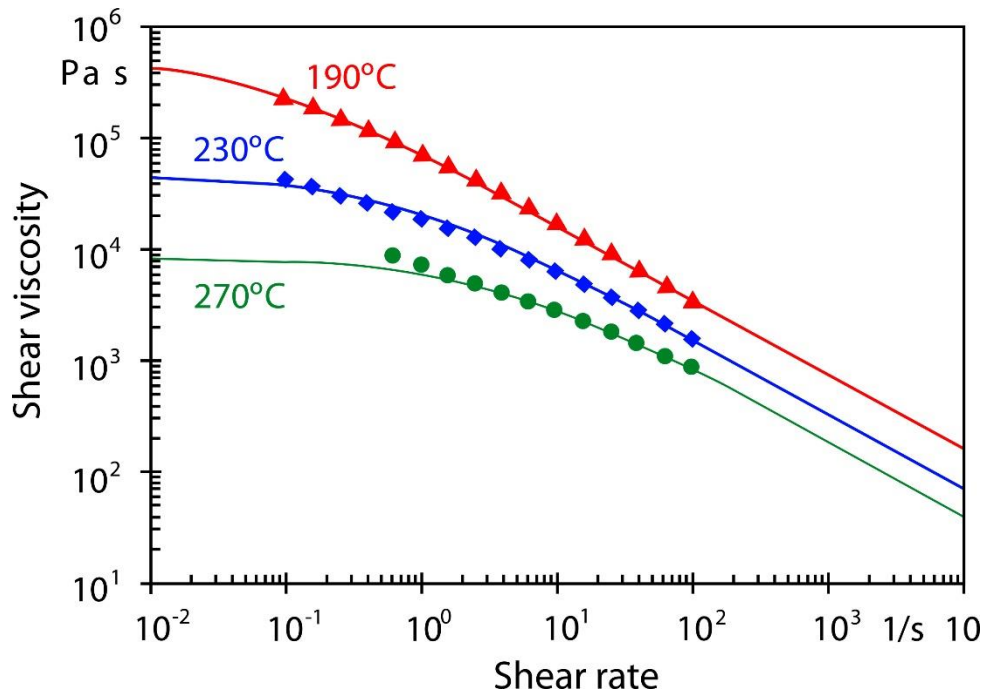


Figura 49: Gráfico Viscosidad Aparente en el ABS a 190,230 Y 270 [°C] [22]

Tabla 19: Viscosidad Efectiva ABS a 230 [°C]

Viscosidad Efectiva ABS a 230 [°C]	
Velocidad Cortadura [1/s]	Viscosidad Efectiva [Pas]
105	1500

Por lo tanto, la viscosidad efectiva de mayor valor y la que presenta la presión máxima de trabajo, será de 1600 [Pas].

Con estos resultados, se puede obtener la presión máxima que se genera en el husillo.

$$P_{MAX} = \frac{6 * \pi * D * L * \eta * \mu}{h^2 * \tan \varphi}$$

$$P_{MAX} = \frac{6 * \pi * 0.016 * 0.32 * \frac{10}{60} * 1600}{0.0032^2 * \tan 17.6}$$

$$P_{MAX} = 31.6 [MPa]$$

- **Presión de operación en la boquilla [29]**

La presión de operación en la boquilla, es la presión máxima que se puede establecer en este elemento, esta depende de la viscosidad del material, las revoluciones del husillo, la geometría de la boquilla, entre otros.

La viscosidad efectiva se determina en función de la velocidad de cortadura por medio de diagramas, que están preparados para los diferentes materiales, en función de la temperatura de trabajo.

La velocidad de cortadura dependerá de la forma geométrica final de la boquilla:

- Canal Cilíndrico [15]

$$V_c = \frac{32 * Q}{\pi * d^3}$$

Donde

d : Diámetro del canal cilíndrico [mm]

Para el primer caso, $d = 1,75$ [mm]

$$V_{1.75} = \frac{32 * 67,16}{\pi * 1,75^3}$$

$$V_{1.75} = 127,64$$
 [1/s]

Para el segundo caso, $d = 3$ [mm]

$$V_3 = \frac{32 * 220,41}{\pi * 3^3}$$

$$V_3 = 55,4$$
 [1/s]

Como se observa, existen dos velocidades de cortadura de acuerdo a la boquilla que se utilizará, por lo que se obtendrán dos viscosidades efectivas por cada material a trabajar (ABS y PLA). De acuerdo a ello, se utilizará la viscosidad efectiva de mayor magnitud para obtener la presión de operación máxima que puede llegar a trabajar la boquilla.

Para el caso del PLA, la temperatura de trabajo será de 160 a 230 [°C], por lo que la viscosidad efectiva se evaluará en el promedio de la temperatura de trabajo, aproximadamente a 190 [°C]. Mediante al gráfico de la Figura 48, se genera la Tabla 23:

Tabla 20: Viscosidad Efectiva PLA a 190°C]

Viscosidad Efectiva PLA a 190 [°C]	
Velocidad Cortadura [1/s]	Viscosidad Efectiva [Pas]
55	1900
127	1400

Para el caso del ABS, la temperatura de trabajo será de 215 a 250 [°C], por lo que la viscosidad efectiva se evaluará en el promedio de la temperatura de trabajo, aproximadamente a 230 [°C]. Mediante el gráfico de la Figura 49, se genera la Tabla 21:

Tabla 21: Viscosidad Efectiva ABS a 230 [°C]

Viscosidad Efectiva ABS a 230 [°C]	
Velocidad Cortadura [1/s]	Viscosidad Efectiva [Pas]
55	2100
127	1200

Por lo tanto, la viscosidad efectiva de mayor valor y la que presenta la presión máxima de trabajo, será de 2100 [Pas]. La presión de operación se calcula según [29]:

$$P_{OP} = \frac{2 * \pi * \mu * D^2 * \eta * h * \text{sen } \varphi * \cos \varphi}{\left(\frac{R^4}{2 * L_{boquilla}} \right) + \left(\frac{D * h^3 * \text{sen}^2 \varphi}{2 * L_p} \right)}$$

Donde

D :	Diámetro del husillo [m]
η :	Revoluciones del husillo [rev/s]
μ :	Viscosidad efectiva [Pas]
h :	Profundidad del canal en la zona de dosificación [m]
φ :	Ángulo de la Hélice [°]
R :	Radio del dado [m]

$L_{boquilla}$: Longitud Cilíndrica de la boquilla [m]

L_p : Longitud de trabajo propia [m]

$$P_{OP} = \frac{2 * \pi * 2100 * 0,016^2 * \frac{10}{60} * 0,0016 * \sin 17,6 * \cos 17,6}{\left(\frac{0,000875^4}{2 * 0,01}\right) + \left(\frac{0,016 * 0,0016^3 * \sin^2 17,6}{2 * 0,320}\right)}$$

$$P_{OP} = 6,7[MPa]$$

5.1.1.7 Fuerzas en el husillo

De acuerdo a las dimensiones previamente asignadas al husillo, es necesario comprobar y determinar la flecha máxima admisible.

En la Figura 50, se aprecia un diagrama de las tensiones que se producen en el husillo. Sobre él actúa una fuerza axial, el momento de giro y una carga uniformemente repartida debido al peso del husillo.

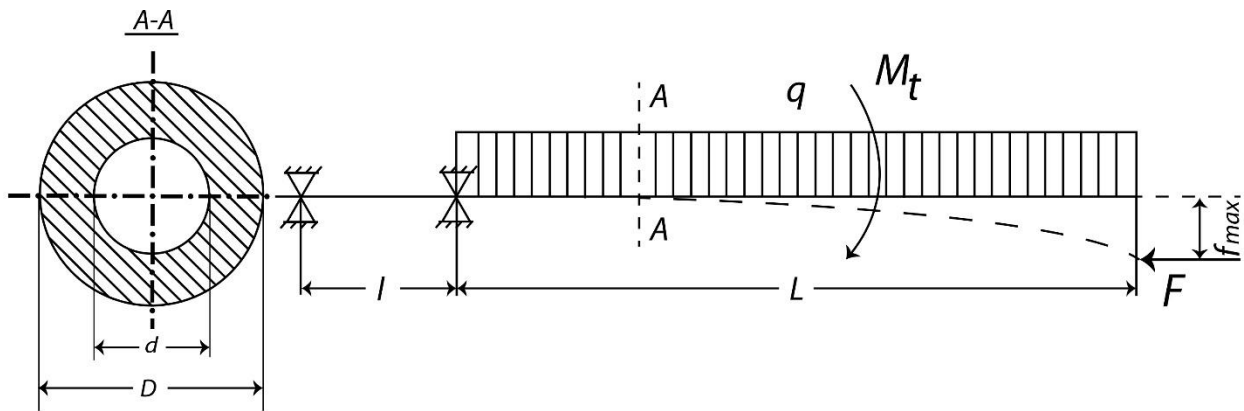


Figura 50: Diagrama de fuerzas de un husillo. [15]

Primero, se calcula el momento torsor originado por el motor sobre el husillo, mediante la siguiente fórmula [15]:

$$M_t = 9550 * \frac{N}{\eta}$$

Donde

N : Potencia del Motor [Kw]

η : Revoluciones del husillo [RPM]

Por lo cual se obtiene:

$$M_t = 9550 * \frac{0,0113}{10}$$

$$M_t = 10,8 [Nm]$$

Luego, se calcula la fuerza axial que se ejerce sobre el Husillo, para ello, hay que tener en cuenta la superficie de la sección transversal del husillo y la presión del material en la parte delantera, la cual será la presión máxima de trabajo en el husillo. De acuerdo a la fórmula [15]:

$$F = S * p$$

Donde

S : Sección transversal del husillo [m^2]

p : Presión en la parte delantera del husillo [N/m^2]

Para calcular la sección transversal, se utiliza la fórmula [15]:

$$S = \pi * \frac{D^2(1 - u^2)}{4}$$

Donde

u : relación entre los diámetros del husillo [-]

$$u = \frac{9,6}{16} = 0,6 [-]$$

Por lo tanto,

$$S = \pi * \frac{0,016^2(1 - 0,6^2)}{4}$$

$$S = 0,00012868 [m^2]$$

$$F = 0,00012868 * P_{max}$$

$$F = 4,06 [KN]$$

Otro cálculo el cual se debe tener en cuenta, es el esfuerzo de corte sobre la superficie del husillo, el cual se calcula como [15]:

$$\tau = \frac{M_t}{W_p}$$

Donde

M_t : Momento torsor [Nm]

W_p : Momento polar de inercia [m³]

Para calcular el momento polar de inercia, se utiliza la fórmula [15]:

$$W_p = \frac{\pi * D^3}{16} (1 - u^4)$$

Por lo tanto,

$$W_p = \frac{\pi * 0,016^3}{16} (1 - 0,6^4)$$

$$W_p = 7 * 10^{-7} [m^3]$$

$$\tau = \frac{10,8}{7 * 10^{-7}}$$

$$\tau = 15,51 [MPa]$$

Las tensiones normales en el husillo serán provocadas por la fuerza axial F y la carga uniformemente repartida debido al peso del husillo, q. Para su cálculo, se emplea [15]:

$$\sigma = \frac{F}{S} + \frac{M_f}{W_o}$$

Donde

F : Fuerza axial [N]

S : Sección transversal del husillo [m²]

M_f : Momento flector máximo [Kgm]

W_o : Momento inercia respecto a eje Neutro [m³]

Para calcular el momento de inercia respecto al eje neutro, se utiliza la fórmula [15]:

$$W_o = \frac{\pi * D^3}{32} (1 - u^4)$$

$$W_o = \frac{\pi * 0,016^3}{32} (1 - 0,6^4)$$

$$W_o = 3,5 * 10^{-7} [m^3]$$

Para calcular el momento flector máximo, se utiliza la fórmula [15]:

$$M_f = \frac{\rho * L^2}{2} * \frac{\pi * D^2}{4} * (1 - u^3) * g$$

Donde

ρ : densidad del material del husillo [Kg/m³]

L :	largo del husillo [m]
D :	diámetro del husillo [m]
u :	relación entre diámetros del husillo [-]
g :	Aceleración de gravedad [m/s^2]

De acuerdo al material elegido para el husillo, acero AISI 4140, se calcula:

$$M_f = \frac{7850 * 0,32^2}{2} * \frac{\pi * 0,016^2}{4} * (1 - 0,6^3) * 9,81$$

$$M_f = 0,62 [Nm]$$

Por lo tanto, la máxima tensión será:

$$\sigma = \frac{4064}{0,00012868} + \frac{0,62}{7 * 10^{-7}}$$

$$\sigma = 33,35 [MPa]$$

Aplicando esfuerzos equivalentes para una combinación de cargas, entre un esfuerzo tangencial y tensor, se busca obtener una tensión resultante. Para ello, se utiliza la siguiente fórmula [16]:

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma^2 + 4 * \tau^2}$$

Donde

σ_r :	Tensión resultante [MPa]
σ :	Tensión máxima [MPa]
τ :	Tensión tangencial [MPa]

Por lo tanto, se obtendrá:

$$\sigma_r = \sqrt{33,35^2 + 4 * 15,51^2}$$

$$\sigma_r = 45,55 [MPa]$$

Con el esfuerzo equivalente en la combinación de cargas, se debe comprobar si el husillo es capaz de soportar esta tensión. Para ello, es necesario conocer el esfuerzo admisible del material, un acero AISI 4140 cuyo valor de tensión admisible es 415 [MPa] (ver Anexo 10.3).

Para que el husillo soporte y se pueda utilizar, la tensión resultante debe ser menor que la admisible por el material.

$$\sigma_r = 45,55[MPa] < \sigma_{adm} = 415 [MPa]$$

Obteniendo un factor de seguridad de:

$$FS = 9,1$$

Por último, se calcula la flecha máxima del husillo al aplicar la carga repartida, mediante la fórmula [15]:

$$f_{m\acute{a}x} = \frac{q * L^4}{8 * E * J}$$

Donde

q :	Peso lineal del husillo [Nm]
L :	Longitud del husillo [m]
E :	Modulo elasticidad del husillo [Pa]
J :	Momento de inercia de la sección transversal [m ⁴]

Para calcular el peso lineal del husillo, se utiliza la fórmula [15]:

$$q = \rho * g * S$$

Donde

ρ :	densidad del material del husillo [Kg/m ³]
g :	gravedad [1/s ²]
S :	sección transversal del husillo [m ²]

Para calcular el momento de inercia (J) de la sección transversal, se utiliza la fórmula [15]:

$$J = \frac{\pi * D^4}{64} (1 - u^4)$$

Por lo tanto, la flecha máxima será:

$$f_{m\acute{a}x} = \frac{\rho * g * S * L^4}{8 * E * \frac{\pi * D^4}{64} (1 - u^4)}$$

$$f_{m\acute{a}x} = \frac{7850 * 9,81 * 0,00012868 * 0,32^4}{8 * 2,1 * 10^{11} * \frac{\pi * 0,016^4}{64} (1 - 0,6^4)}$$

$$f_{m\acute{a}x} = 0,022 \text{ [mm]}$$

Esta flecha máxima deberá ser menor que la holgura del filete del husillo con respecto al barril, para que no haya interferencia entre ellos.

$$f_{m\acute{a}x} = 0,022 \text{ [mm]} < \delta = 0,08 \text{ [mm]}$$

Con los datos calculados, se comprueba si el rodamiento en el husillo será apto para soportar la carga axial máxima generada en el husillo, por lo que la fuerza que soporte el rodamiento debe ser mayor que la ejercida.

$$F_{rodamiento} > F_{husillo}$$

$$10,4 \text{ [kN]} > 4,06 \text{ [kN]}$$

Por lo tanto, el rodamiento soporta la fuerza axial máxima que se puede generar en el husillo. En el anexo 10.24, se calculan los requerimientos del rodamiento en operación para la vida útil.

5.1.2 Selección Material

El husillo es el corazón de la máquina. Todo se revuelve alrededor del husillo. La rotación causa el transporte del material, el cual contribuye al calentamiento del polímero y provoca la homogenización de él. Los desgastes más típicos en los husillos son los abrasivos y corrosivos. Los husillos deben tener una alta dureza para minimizar el desgaste provocado por las partículas abrasivas. También deben tener una alta resistencia a la corrosión, para evitar el deterioro del husillo, debido a la degradación del polímero [36].

La selección del material se hizo basado en diferentes parámetros:

- Temperaturas de trabajo
- Disponibilidad y maquinabilidad
- Condiciones de operación
- Resistencia a la torsión

Debido a ello, se eligió un acero AISI 4140, el cual ofrece las consideraciones anteriores. El acero seleccionado tiene una alta resistencia a la fatiga, resistencia a la abrasión y al impacto, dureza, resistencia a la torsión y una buena maquinabilidad. Se utiliza generalmente en piezas de medianas dimensiones que requieren alta resistencia mecánica y tenacidad. Por sus

características, responde a las temperaturas de trabajo presentes en la extrusora, sin perder sus propiedades. En el anexo 10.3 se puede encontrar las principales propiedades mecánicas del acero.

5.1.3 Selección Husillo

A partir del dimensionamiento hecho del husillo, se debe mecanizar un husillo con las geometrías calculadas, las cuales se pueden ver en la Tabla 22. En la Figura 51 se muestra el modelo del husillo a mecanizar. En el anexo 10.20 y 10.21, se puede ver el cálculo realizado para el diámetro mínimo del eje y la chaveta, respectivamente.

Tabla 22: Geometría del Husillo

Husillo Extrusora	
Descripción	Valor
Diámetro	16 [mm]
Diámetro Alma	9,6 [mm]
Diámetro Vástago	12 [mm]
Longitud Total	386 [mm]
Longitud Husillo (de trabajo)	320 [mm]
Longitud Vástago (Eje)	66 [mm]
N° Canales	1
N° Filetes	20
Paso	16 [mm]
Anchura Filete	1,6 [mm]
Largo Zona Alimentación	128 [mm]
Largo Zona Compresión	112 [mm]
Largo Zona Dosificación	80 [mm]
Profundidad Canal Zona de alimentación	3,2 [mm]
Profundidad Canal Zona de Dosificación	1,6 [mm]

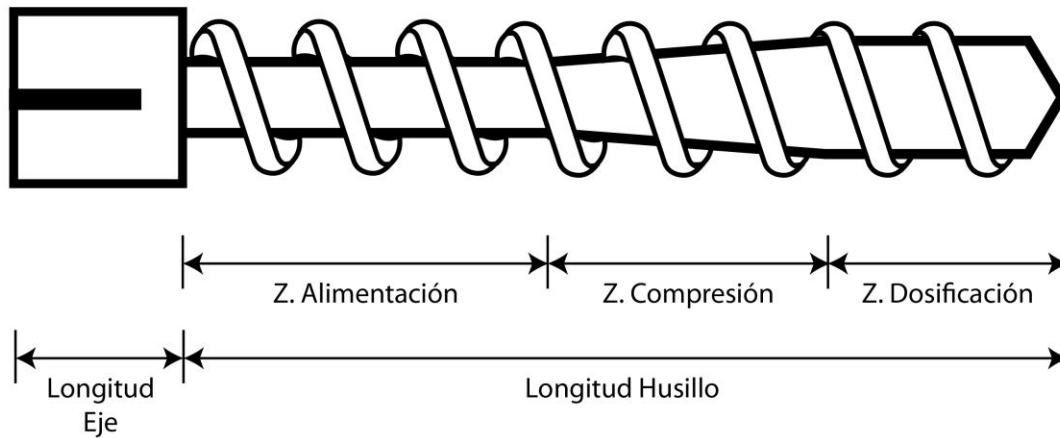


Figura 51: Modelo Husillo universal a mecanizar.

Según la geometría descrita, se elige una barra de Acero AISI/SAE 4140 del distribuidor Aceros Bravo Ltda. Se trata de una barra de redonda de 20 [mm] de 500 [mm] de largo.

Los datos del material seleccionado se pueden encontrar en el anexo 10.3.

En el anexo 10.23, se puede encontrar el montaje de este elemento en el sistema extrusor.

Para el mecanizado del husillo, se debe considerar su plano en el anexo B.

5.1.4 Selección Motor del Husillo

A partir del dimensionamiento hecho en el husillo, se pudo elegir un motor que permitiera cumplir los criterios de selección con cierto margen de seguridad.

El motor seleccionado es el 3274, del distribuidor Phidgets (Figura 52). Se trata de un motorreductor de corriente continua de 24 [V]. La reductora permite obtener el par necesario para la máquina sin añadir mayores componentes.



Figura 52: Motor 3273E de Phidget empleado en el husillo. Fuente:
http://www.phidgets.com/products.php?category=24&product_id=3274_1

Los datos del motorreductor, se pueden encontrar en el anexo 10.4.

5.2 Diseño Cilindro

5.2.1 Dimensionamiento

Para el diseño del cilindro, se deben tener en consideración una serie de factores, entre ellos: la holgura entre el filete helicoidal y el barril, y el diámetro del husillo.

Primero, se calcula el diámetro interior del cilindro que se desea:

- Diámetro interior del cilindro [15]

$$D_i = D + 2 * \delta$$

Donde

D : Diámetro del husillo [mm]

δ : Holgura [mm]

De acuerdo a ello, el diámetro interior del cilindro será:

$$D_i = 16,16 + 2 * 0,08$$

$$D_i = 16,16 [mm]$$

La longitud del cilindro debe cubrir la zona útil del husillo, por lo que tendrá un largo de 330 [mm] mínimo.

Para el espesor mínimo que debe tener el cilindro para soportar las presiones, se debe conocer el material del cilindro. Para ello, se seleccionó un acero AISI 316, con un esfuerzo admisible del material de 205 [MPa] (ver anexo 10.7)

Por lo tanto, el espesor mínimo debe ser:

$$e_{min} = \frac{P * r}{\sigma_{adm}}$$

Donde

P : Presión máxima de trabajo [MPa]

r : Radio interior cilindro [mm]

σ_{adm} : Esfuerzo admisible del material [mm]

$$e_{min} = \frac{31,58 * 8,08}{205}$$

$$e_{min} = 1,24 [mm]$$

El cilindro tendrá 2 espesores en su geometría, un espesor de 6,92 [mm] en su parte cilíndrica y un espesor de pared en la parte roscada que dependerá del paso. Para un paso fino será de 5,5 [mm] y para un paso grueso será de 4,45 [mm]. Por lo tanto, los factores de seguridad serán:

$$FS_{cilin} = 5,5 [-]$$

$$FS_{pf} = 4,4 [-]$$

$$FS_{pg} = 3,5 [-]$$

5.2.2 Selección Material

El cilindro es el componente que transfiere el calor a través de las bandas hacia el material interior y el encargado de soportar las presiones generadas en el interior del husillo. Los cilindros deben ser suficientemente sólidos para soportar altas presiones, resistentes a los efectos térmicos para aguantar temperaturas de hasta 400 [°C] y lo suficientemente resistentes al desgaste y a la corrosión [15].

La selección del material se hizo basado en diferentes parámetros:

- Temperaturas de trabajo
- Disponibilidad y fabricación
- Resistente al desgaste y corrosión
- Precio

Debido a ello, se eligió un acero AISI 316, el cual ofrece las consideraciones anteriores. El acero seleccionado posee una excelente resistencia a la corrosión, con una buena resistencia a oxidación. Por sus características, responde a las temperaturas de trabajo presentes en la extrusora, sin perder sus propiedades. Es un acero de fácil adquisición y con una buena maquinabilidad. En el anexo 10.5 se puede encontrar las principales propiedades mecánicas del acero.

5.2.3 Selección del Cilindro

Según la geometría descrita, se elige una barra de Acero AISI/SAE 316 del distribuidor Acermet. Se trata de una barra de 30 [mm] con un largo de 500 [mm]. En la Figura 53 se muestra el modelo del cilindro.

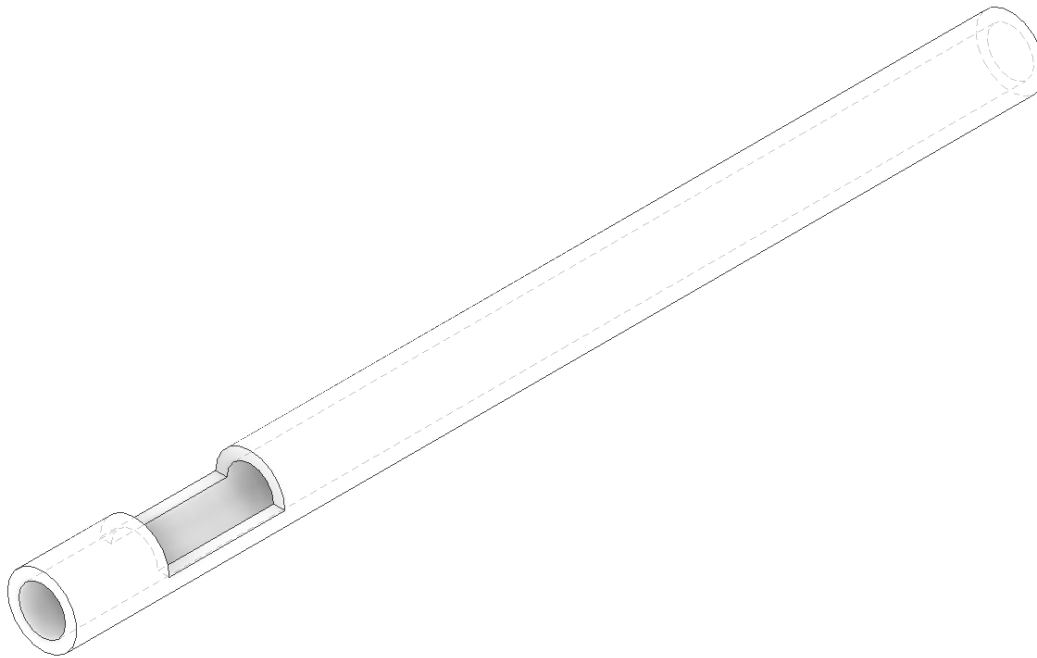


Figura 53: Cilindro de Acero AISI/SAE 316.

Los datos del material seleccionado se pueden encontrar en el anexo 10.5.

En el anexo 10.23, se puede encontrar el montaje de este elemento en el sistema extrusor.

5.3 Diseño Tolva

5.3.1 Dimensionamiento

Se diseña una tolva con forma de un prisma rectangular, que se adapta a la base de la extrusora para poder ser retirada fácilmente y a su vez, extensible. Su base será de 7,2 x 9,4 [cm] y una altura de 10 [cm]. Con ello, se procesa a calcular el volumen total de la tolva y los gramos capaces de contener.

- El volumen de un prisma rectangular será de:

$$V_{tolva} = a * b * h$$

Donde

a :	Cateto “a” [mm]
b :	Cateto “b” [mm]
h :	Altura del prisma [mm]

Por lo tanto:

$$V_{tolva} = 64 * 90 * 100$$

$$V_{tolva} = 576000 [mm^3]$$

- El volumen de un pellet será el volumen de un prisma rectangular, por lo tanto:

$$V_{pellets} = a * b * h$$

Donde

a : Cateto “a” [mm]

b : Cateto “b” [mm]

h : Altura del prisma [mm]

Asumiendo las dimensiones máximas de un pellet, el cateto a será de 3 [mm], el cateto b será de 3 [mm] y la altura, de 16 [mm] para cada pellet, el volumen será:

$$V_{pellets} = 3 * 3 * 10$$

$$V_{pellets} = 144 [mm^3]$$

- La tolva será capaz de contener:

$$Pellets\ en\ tolva = \frac{V_{tolva}}{V_{pellets}}$$

$$Pellets\ en\ tolva = 4000 [unidades]$$

- El peso de un pellet de ABS será:

$$Peso_{abs} = \rho * V_{pellets}$$

Donde

ρ : Densidad del ABS [Kg/mm³]

$V_{pellets}$: Volumen de un pellet de ABS [mm³/kg]

Por lo tanto:

$$Peso_{abs} = 1,05 * 10^{-6} * 144$$

$$Peso_{abs} = 0,0001512 \left[\frac{Kg}{u} \right]$$

- El peso de una unidad de pellet de PLA será:

$$Peso_{PLA} = \rho * V_{pellets}$$

Donde

ρ : Densidad del PLA [Kg/mm³]

$V_{pellets}$: Volumen de un pellet de PLA [mm³/kg]

Por lo tanto:

$$Peso_{PLA} = 1,25 * 10^{-6} * 144$$

$$Peso_{PLA} = 0,00018 \left[\frac{Kg}{u} \right]$$

- Los gramos de pellets de ABS para llenar la tolva serán:

$$Gramos_{abs} = Peso_{abs} * Pellets \text{ en tolva}$$

$$Gramos_{abs} = 0,0001512 * 4000$$

$$Gramos_{abs} = 0,6 [Kg]$$

- Los gramos de pellets de PLA para llenar la tolva serán:

$$Gramos_{PLA} = Peso_{PLA} * Pellets \text{ en tolva}$$

$$Gramos_{PLA} = 0,00018 * 4000$$

$$Gramos_{PLA} = 0,72 [Kg]$$

- La autonomía de operación con la tolva llena dependerá del flujo másico a procesar, por lo tanto, será para una boquilla de 1,75 [mm] y otra para 3 [mm].

$$Autonomía_{Diámetro Boquilla} = \frac{V_{tolva}}{Q_{másico-Diámetro Boquilla}}$$

Donde

$Q_{másico-diámetro boquilla}$: Flujo volumétrico de acuerdo a la boquilla [mm³/min]

Por lo tanto:

$$Autonomía_{1,75} = \frac{576000}{6044,5}$$

$$Autonomía_{1,75} = 95 [minutos]$$

$$Autonomía_3 = \frac{576000}{13224,7}$$

$$Autonomía_3 = 44 [minutos]$$

5.3.2 Selección Material

La tolva es la que alimenta de *pellets* el husillo. Es necesario introducir la materia prima a una velocidad constante sin obstrucciones y que esta sea fácil de remover. Para el diseño de la tolva, se tomaron en cuenta las siguientes características:

- Tamaño de apertura
- Forma
- Conexión
- Peso

De acuerdo a ello, se escoge un polímero de la impresora 3D de la Universidad, para ser impreso de forma rápida, cumpliendo con los criterios de peso, forma, apertura y conexión, debido al tipo de material y diagrama CAD realizado de acorde a las necesidades.

5.3.3 Modelo CAD

El modelo CAD de la tolva que se muestra en la Figura 54 dibujado en el software Inventor 2015, muestra la forma y el diseño realizado de esta estructura.

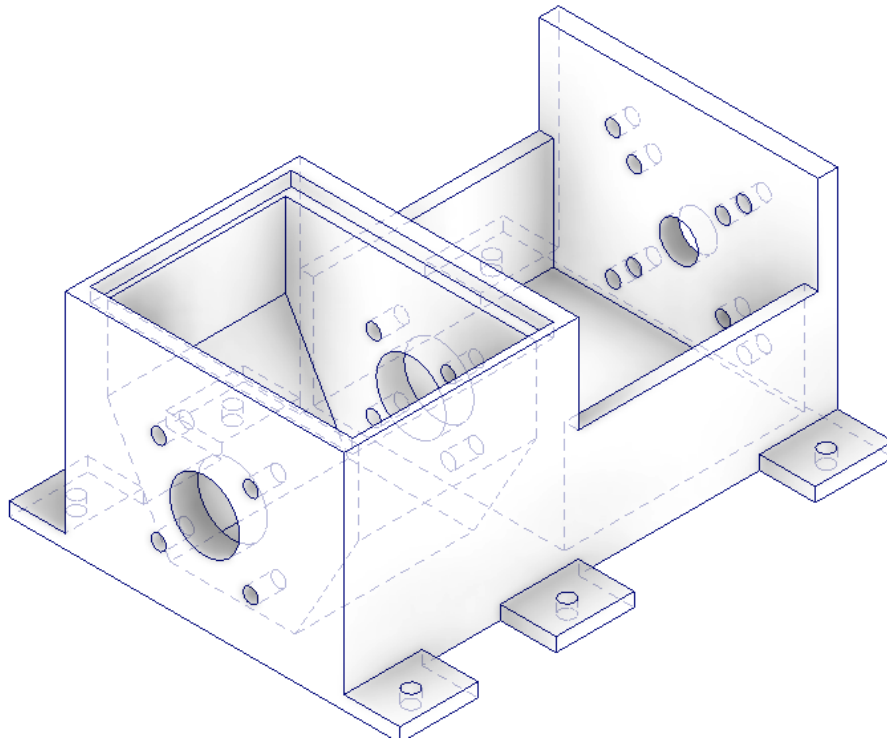


Figura 54: Modelo CAD Estructura y Tolva.

En el anexo 10.23, se puede encontrar el montaje de este elemento en el sistema extrusor.

5.4 Diseño Estructura

5.4.1 Selección Material

La estructura se diseñó de acuerdo con las características de la extrusora y sus componentes, utilizando como material Plástico ABS de impresión 3D, para su prototipado rápido, siendo ligero y de forma que se adapta a la estructura.

5.4.2 Modelo CAD

El modelo CAD del soporte que se muestra en la Figura 54 dibujado en el software Inventor 2015, muestra la forma y el diseño realizado de esta estructura.

En el anexo 10.23, se puede encontrar el montaje de este elemento en el sistema extrusor.

5.5 Diseño Boquilla

5.5.1 Dimensionamiento

Para el espesor mínimo que deben tener las boquillas para soportar la presión de trabajo, se debe conocer el material de este. Para ello, de acuerdo a la selección de material, se utiliza Latón 360, con un esfuerzo admisible del material de 310 [MPa] (ver Anexo 10.6)

El caso crítico, es cuando hay un menor espesor de pared en la boquilla, esto se dará en la entrada de la boquilla, con 16,16 [mm] de diámetro interior. Por lo tanto, el espesor mínimo que se debe considerar será:

$$e_{min} = \frac{P * r}{\sigma_{adm}}$$

Donde

P :	Presión de operación [MPa]
r :	Radio interior mayor de la boquilla [mm]
σ_{adm} :	Esfuerzo admisible del material [mm]

$$e_{min-1,75} = \frac{6,72 * 8,08}{310}$$
$$e_{min} = 0,17 [mm]$$

Obtiendo un factor de seguridad de:

$$FS = 39 [-]$$

5.5.2 Selección Material

La función de la boquilla es llevar el plástico a través de la cámara, para dar forma al material a la salida de ella. Al seleccionar el material de la boquilla, dos parámetros fueron importantes:

- Simplicidad en el mecanizado
- Conductividad térmica

Por ello, se eligió utilizar una boquilla de Latón por su simplicidad en el mecanizado y conductividad térmica elevada (en comparación a un acero). El latón es un buen conductor térmico, presenta resistencia a la corrosión y una excelente maquinabilidad. La temperatura en la boquilla debe ser controlada de tal manera que el material no se solidifique en su interior, pero tampoco permita que la mezcla tarde mucho tiempo en enfriarse a su salida.

En la Figura 55 se puede ver una representación de la boquilla y su forma.

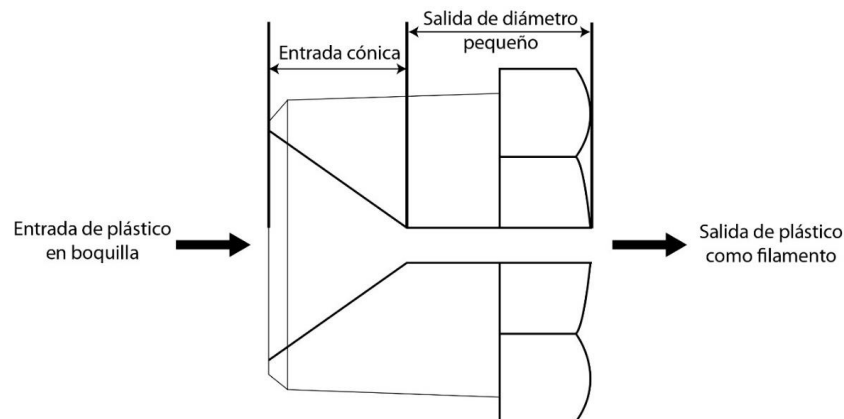


Figura 55: Diagrama geométrico de la boquilla

La unión de la boquilla con el cilindro se hace a través de una rosca macho, para facilitar la fijación a la cámara roscada del cilindro mediante acoplamiento, lo cual permite que sea fácil desmontarla para su limpieza e intercambio de boquillas.

5.5.3 Selección Boquilla

Según la geometría descrita, se elige una barra de Latón 360 del distribuidor Acermet. Se trata de una barra de 30 [mm] con un largo de 100 [mm].

Los datos del material seleccionado se pueden encontrar en el anexo 10.6.

5.5.4 Modelo CAD

El modelo CAD de la Boquilla que se muestra en la Figura 56 dibujado en el software Inventor 2015, muestra la forma y el diseño realizado de esta estructura.

En el anexo 10.23, se puede encontrar el montaje de este elemento en el sistema extrusor.

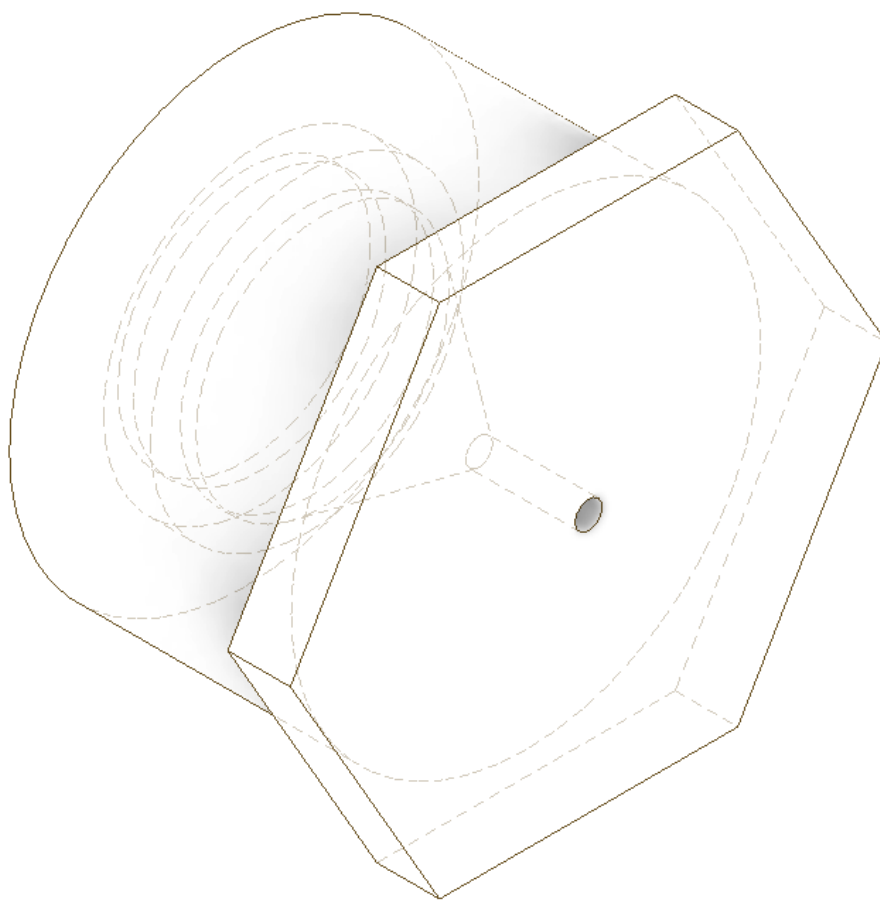


Figura 56: Modelo CAD Boquilla extrusora.

5.6 Diseño Sistema Calefacción

5.6.1 Dimensionamiento

El sistema de calefacción del extrusor estará a cargo de un calefactor eléctrico tipo banda. Esta banda deberá un diámetro interior al tamaño del cilindro (30 [mm]) para poder calentar el material.

De acuerdo a los requerimientos para seleccionar la banda adecuada, es necesario realizar cálculos de transferencia de calor para simular el problema.

En la Figura 57 se muestra un modelo simplificado del elemento calefactor. Para el diseño, se hizo un supuesto que el flujo de calor es un flujo unidimensional, con un régimen estacionario y sin aislamiento.

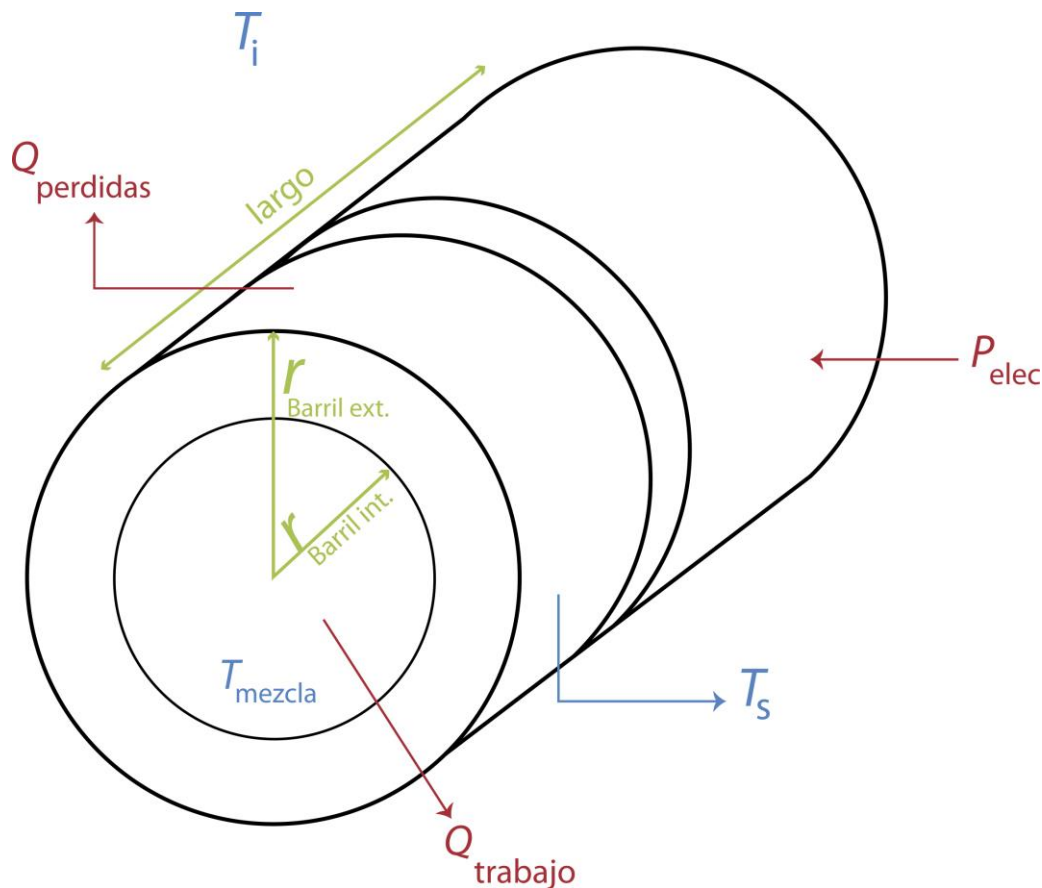


Figura 57: Modelo Simplificado Del Cilindro y el sistema de calefacción.

Para calcular la potencia necesaria de la banda, se debe tener en cuenta la velocidad de extrusión, la cual cambiara de acuerdo al tipo de material a trabajar, ya sea ABS o PLA y la boquilla a utilizar. Utilizando las velocidades de extrusión de ambas boquillas y las secciones transversales de ellas y el cilindro, se calculó la velocidad al interior del cilindro. Para ello se utilizó:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2$$

Donde

A_1 : Área de la sección transversal de la boquilla [mm²]

V_1 : Velocidad del flujo en la boquilla [m/s]

A_2 : Área de la sección transversal del cilindro [mm²]

V_2 : Velocidad del flujo en el cilindro [m/s]

Por lo tanto, se obtuvo:

Tabla 23: Resultados Velocidad del flujo en el cilindro con diferentes boquillas

Variable	Descripción	Valor	Unidad
$V_{D-1,75}$	Velocidad en Cilindro con Boquilla de 1,75 [mm]	$3,27 \cdot 10^{-10}$	m/s
V_{D-3}	Velocidad en Cilindro con Boquilla de 3 [mm]	$7,16 \cdot 10^{-10}$	m/s

Usando la velocidad dentro del cilindro para ambas boquillas, se calculó el flujo másico de material dentro del cilindro, utilizando [17]:

$$\dot{m} = \rho * A_{cilindro} * v_{cilindro}$$

Donde

ρ : Densidad del material a trabajar [kg/m³]

$A_{cilindro}$: Área de la sección transversal del cilindro [mm²]

$v_{cilindro}$: Velocidad del flujo en el cilindro [m/s]

Por lo tanto, se obtuvo:

Tabla 24: Resultados Flujo másico en el cilindro con diferentes boquillas y materiales

Variable	Descripción	Valor	Unidad
$m_{\text{ABS D-1,75}}$	Flujo Másico de ABS en Cilindro con Boquilla de 1,75 [mm]	$7,052 \cdot 10^{-5}$	Kg/s
$m_{\text{PLA D-1,75}}$	Flujo Másico de PLA en Cilindro con Boquilla de 1,75 [mm]	$8,395 \cdot 10^{-5}$	Kg/s
$m_{\text{ABS D-3}}$	Flujo Másico de ABS en Cilindro con Boquilla de 3 [mm]	$1,54 \cdot 10^{-4}$	Kg/s
$m_{\text{PLA D-3}}$	Flujo Másico de PLA en Cilindro con Boquilla de 3 [mm]	$1,83 \cdot 10^{-4}$	Kg/s

La Figura 58 representa esquemáticamente el modelo a desarrollar. Como se puede ver, la potencia eléctrica que debe entregar el calentador debe ser igual a la potencia requerida para fundir la mezcla (de trabajo) más las pérdidas que existen en el ambiente (de convección y radiación).

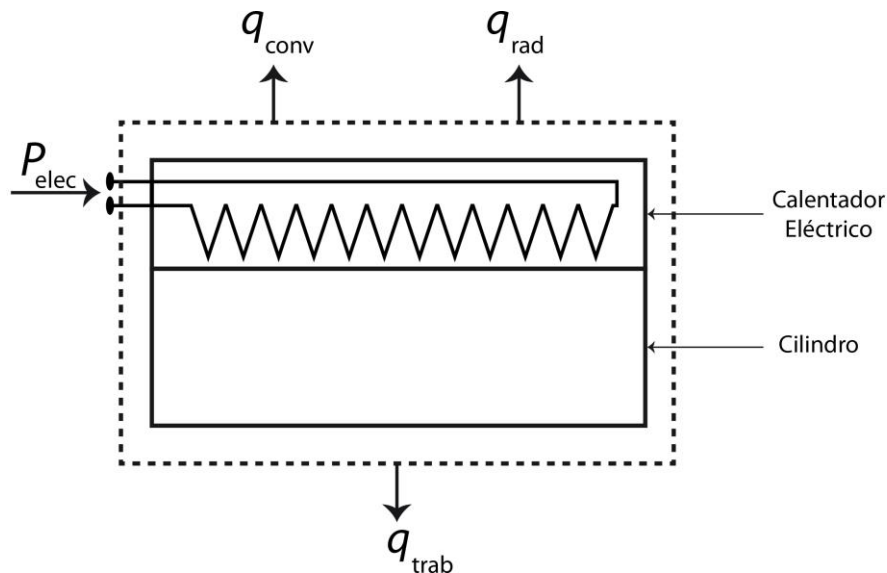


Figura 58: Esquema del sistema de calefacción.

Para encontrar la potencia necesaria que debe entregar la banda, se utiliza:

$$q_{elec} = q_{trabajo} + (q_{conv} + q_{rad}) = q_{trabajo} + q_{perdidas}$$

Donde

q_{elec} : Potencia que entrega el calentador eléctrico [W]

q_{conv} :	Potencia perdida hacia el ambiente mediante convección [W]
q_{rad} :	Potencia perdida hacia el ambiente mediante radiación [W]
$q_{trabajo}$:	Potencia necesaria para llevar la mezcla a la temperatura de trabajo [W]
$q_{perdidas}$:	Potencia perdida hacia el ambiente [W]

Para calcular la potencia de trabajo, es necesario conocer las temperaturas de trabajo: como hay dos materiales a trabajar, la temperatura de trabajo para el ABS será de 230 [°C] y para el PLA será de 190 [°C], ambos desde la temperatura ambiente 20 [°C]. Cabe destacar que los polímeros trabajados son amorfos, por lo tanto, no presentan una zona de calor latente de fusión para llevar a cabo esta fase, por lo que no será necesario energía adicional para el cambio de fase (Anexo 10.16.1.3). Con estos datos, se utiliza la siguiente fórmula para calcular el calor de trabajo [17]:

$$q_{trabajo} = \dot{m} * C_p * (T_m - T_i)$$

Donde

$\dot{m}$:	Flujo másico de material [Kg/s]
C_p :	Calor específico del material [J/Kg°C]
T_m :	Temperatura de la mezcla [°C]
T_i :	Temperatura ambiente [°C]

Por lo tanto, el calor necesario para llevar la mezcla a la temperatura de trabajo será:

Tabla 25: Resultados Calor de trabajo con diferentes boquillas y materiales

Variable	Descripción	Valor	Unidad
$q_{tABS\ D-1,75}$	Calor de trabajo de ABS en Cilindro con Boquilla de 1,75 [mm]	20,73	Watts
$q_{tPLA\ D-1,75}$	Calor de trabajo de PLA en Cilindro con Boquilla de 1,75 [mm]	16,8	Watts
$q_{tABS\ D-3}$	Calor de trabajo de ABS en Cilindro con Boquilla de 3 [mm]	45	Watts

$q_{t_{PLA D-3}}$	Calor de trabajo de PLA en Cilindro con Boquilla de 3 [mm]	36,8	Watts
-------------------	--	------	-------

Para calcular la potencia perdida al ambiente, es necesario calcular la resistencia térmica del sistema. Esta resistencia dependerá del intercambio de calor del cilindro con el ambiente: a través de la convección y la radiación. Para ello, se utilizan las siguientes fórmulas [17]:

$$R_{conv} = \frac{1}{h * A_s}$$

Donde

h : Coeficiente de transferencia de calor en convección natural [W/m²°C]
 A_s : Área de la superficie expuesta a convección [m²]

$$R_{rad} = \frac{1}{A * \varepsilon * \sigma * (T_s^2 + T_i^2) * (T_s + T_i)}$$

Donde

A_s : Área de la superficie expuesta a radiación [m²]
 ε : Emisividad del material (0,27 para el AISI 316) [-]
 σ : Constante de Stefan-Boltzmann [W/m²k⁴]
 T_s : Temperatura absoluta de la superficie [°K]
 T_{sur} : Temperatura Absoluta del ambiente [°K]

Para la conductividad del aire a la temperatura de trabajo, se adjunta en el anexo 10.9 su respectivo cálculo. La resistencia por convección será:

$$R_{conv} = \frac{1}{10,57 * (\pi * 0,030 * 0,32)}$$

$$R_{conv} = 3,13 \left[\frac{^{\circ}K}{W} \right]$$

La resistencia por radiación dependerá del polímero a trabajar, ya que ambos tienen temperaturas de trabajo diferentes. Para el caso del ABS será:

$$R_{raABS} = \frac{1}{(\pi * 0,030 * 0,32) * 0,27 * 5,67 * 10^{-8} * (293,15^2 + 503,15^2) * (293,15 + 503,15)}$$

$$R_{rad-PLA} = 8,02 \left[\frac{^{\circ}K}{W} \right]$$

Para el caso del PLA:

$$R_{raPLA} = \frac{1}{(\pi * 0,030 * 0,32) * 0,27 * 5,67 * 10^{-8} * (293,15^2 + 463,15^2) * (293,15 + 463,15)}$$

$$R_{rad-PLA} = 9,54 \left[\frac{^{\circ}K}{W} \right]$$

Con ello, se calcula el calor perdido al ambiente por convección y radiación:

Tabla 26: Resultados Pérdidas de Potencia por materiales

Variable	Descripción	Valor	Unidad
qPérdidas _{ABS convección}	Pérdidas de Potencia por convección para la mezcla de ABS	66,9	Watts
qPérdidas _{PLA convección}	Pérdidas de Potencia por convección para la mezcla de PLA	54,1	Watts
qPérdidas _{ABS Radiación}	Pérdidas de Potencia por radiación para la mezcla de ABS	26,15	Watts
qPérdidas _{PLA Radiación}	Pérdidas de Potencia por radiación para la mezcla de PLA	17,8	Watts

Por lo tanto, la potencia total requerida que debe entregar la banda, será la potencia de trabajo mas las pérdidas, el cual será:

Tabla 27: Resultados Potencia requerida por la banda, para las diferentes boquillas y materiales

Variable	Descripción	Valor	Unidad
qElec _{ABS D-1,75}	Potencia total para la mezcla de ABS con Boquilla de 1,75 [mm]	113,83	Watts
qElec _{PLA D-1,75}	Potencia total para la mezcla de PLA con Boquilla de 1,75 [mm]	88,8	Watts
qElec _{ABS D-3}	Potencia total para la mezcla de ABS con Boquilla de 3 [mm]	138,45	Watts
qElec _{PLA D-3}	Potencia total para la mezcla de PLA con Boquilla de 3 [mm]	108,8	Watts

De acuerdo a los resultados, se puede ver que el calor necesario para el ABS con una boquilla de 3 [mm] es el más alto (138,45 [W]), por lo que este valor será el referencial para la selección de las bandas.

5.6.2 Selección del sistema de Calefacción

A partir del dimensionamiento hecho del sistema de calefacción, se pudo elegir un calefactor eléctrico tipo banda que permitiera cumplir con cierto margen de seguridad los criterios de selección. El primer calefactor seleccionado es el A13062400UX1085 del distribuidor ASSISI, el cual irá ubicado al final del cilindro, antes de la boquilla. Se trata de una banda térmica de 30x30 [mm], con potencia de 150 [W] y con un soporte de temperatura de hasta 400 [°C].

Se agregará otra banda térmica en el sistema para mantener una temperatura uniforme a lo largo del cilindro y suministrar mayor potencia al sistema, la banda irá ubicada al comienzo del cilindro, en la zona de alimentación. Este calefactor es el A16113000UX0129 del distribuidor ASSISI. Se trata de una banda térmica de 30x30 [mm], con potencia de 75 [W] y con un soporte de temperatura de hasta 400 [°C].

El cilindro y las bandas estarán aisladas térmicamente para reducir las pérdidas al ambiente y proteger al usuario de las elevadas temperaturas de trabajo.



Figura 59: Band Heater A13062400UX1085, del distribuidor ASSISI empleado en el sistema de calefacción. Fuente: <http://www.ebay.com/itm/220V-150W-30mmx30mm-Ceramic-Band-Heater-for-Plastic-Injection-Machine-/291555090214?hash=item43e2099f26:g:KbAAASwZKBZNeXp>

Los datos de las bandas seleccionadas que forman el sistema de calefacción se pueden encontrar en el anexo 10.10 y 10.11 respectivamente.

En el anexo 10.23, se puede encontrar el montaje de este elemento en el sistema extrusor.

5.7 Diseño Sistema Bobinado

5.7.1 Dimensionamiento

Para el diseño del sistema bobinado, se debe conocer la velocidad de salida del material desde la extrusora para el cálculo del sistema y así determinar los demás parámetros. Para la velocidad de salida, se tienen dos casos: cuando se utiliza una boquilla de 1.75 [mm] y cuando se utiliza una boquilla de 3 [mm]. Para ambos casos, la velocidad de salida se calcula como:

$$V = \frac{Q}{S} \left[\frac{m}{s} \right]$$

Donde

Q : Flujo Volumétrico de Material [m^3/s]

S : Sección transversal de la boquilla [m^2]

Por lo tanto, se calcula para ambos casos. Para la boquilla de 1,75 [mm]:

$$V_{D-1,75} = \frac{6,71 * 10^{-8}}{2,4 * 10^{-6}} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$V_{D-1,75} = 0,0279 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Para la boquilla de 3 [mm]:

$$V_{D-3} = \frac{1,47 * 10^{-7}}{7,0685 * 10^{-6}} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$V_{D-3} = 0,02 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Para calcular las revoluciones que debe girar el carrete, conociendo la velocidad de salida del filamento, se utiliza:

$$\eta = \frac{V}{\pi * D} [rpm]$$

Donde

V : Velocidad de salida del filamento [mm/min]

D : Diámetro interior del carrete [mm]

Por lo tanto, se calcula para ambos casos. Para la boquilla de 1,75 [mm]:

$$\eta_{D-1,75} = \frac{0,0279 * 1000 * 60}{\pi * 90}$$

$$\eta_{D-1,75} = 5,9 [rpm]$$

Para la boquilla de 3 [mm]:

$$\eta_{D-3} = \frac{0,02 * 1000 * 60}{\pi * 90}$$

$$\eta_{D-3} = 4,4 [rpm]$$

Para seleccionar el motor de acuerdo al par necesario a realizar por el motor para producir el movimiento en el carrete, se debe calcular el torque máximo que se producirá en el sistema. El diseño del sistema de bobinado se presenta en Figura 60, en la cual el motor genera el movimiento con un acople directo para mover la carga.

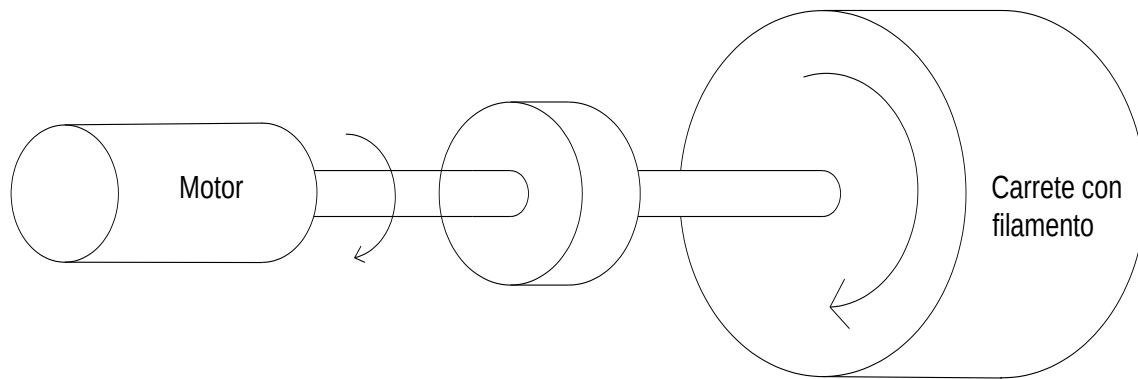


Figura 60: Representación Sistema de Bobinado

El torque máximo que debe realizar el motor, dependerá de tres factores: el torque por la carga a mover, la cual sería el peso del carrete y el filamento, el torque por el roce a vencer, el cual sería el peso del filamento y carrete y finalmente, el torque generado por la aceleración de inercia de los componentes del sistema (el cual depende de la geometría de cada uno). En el diagrama de cuerpo libre del carrete presentado en la Figura 61, se observa el torque de la carga y el torque por roce.

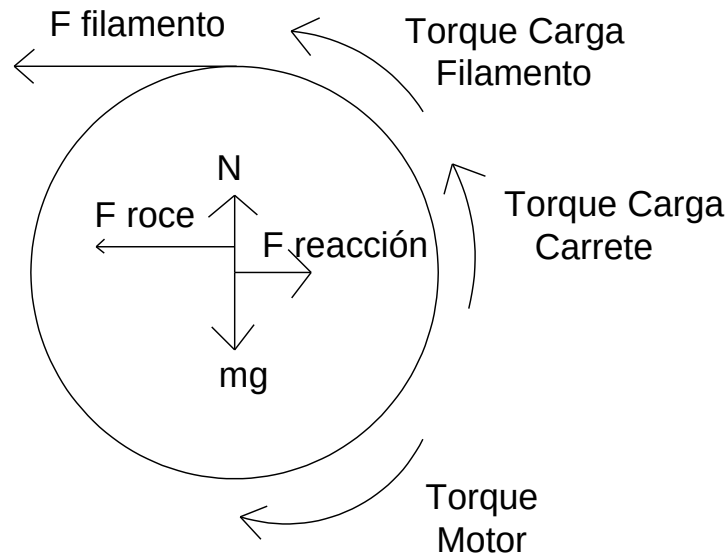


Figura 61: DCL Carrete del Sistema de Bobinado

Donde

$F_{\text{filamento}}$:	Fuerza que se ejerce sobre el filamento para bobinar [N]
N :	Normal generada por el peso del carrete y el filamento [N]
mg :	Fuerza generada por el peso del carrete y filamento [N]
F_{roce} :	Fuerza de roce en el eje del carrete [N]
$F_{\text{reacción}}$:	Fuerza de reacción que se genera debido al movimiento horizontal del carrete, por el soporte del carrete [N]
$T_{\text{carga-filamento}}$:	Torque de carga del filamento [Nm]
$T_{\text{carga-carrete}}$:	Torque de carga del carrete [Nm]
T_{motor} :	Torque a generar por el motor [Nm]

En este caso, la fuerza que se debe ejercer para bobinar el filamento ($F_{\text{filamento}}$) será igual a cero, ya que el filamento avanza debido al sistema *Puller* y la extrusora.

En la Figura 62 se presenta el esquema con los parámetros descritos, el torque de carga, el torque generado por el roce y la aceleración de inercia por los componentes del sistema (que sólo estará presente cuando el sistema parta del reposo hasta una velocidad constante).

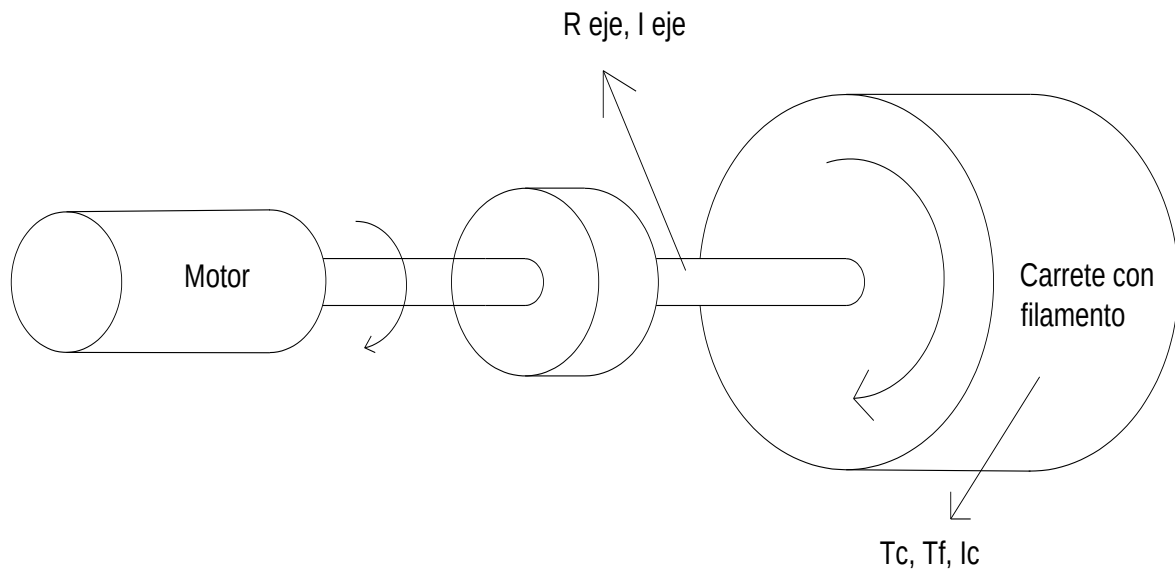


Figura 62: Representación Sistema de Bobinado con parámetros

Donde

T_c : Torque generado por la carga [Nm]

T_f : Torque generado por el roce [Nm]

I_c : Inercia de la carga [kgm²]

R_{eje} : Radio del eje [m]

I_{eje} : Inercia del eje[Nm]

Por lo tanto, el torque máximo se calcula por:

$$T_m = T_c + T_f + T_I$$

Donde

T_c : Torque generado por la carga [Nm]

T_f : Torque generado por el roce [Nm]

T_I : Torque generado por la aceleración de Inercia [Nm]

Con los datos presentados en la Tabla 28, se calcula el torque máximo de acuerdo a:

$$T_m = [P_{carrete} * g * r_{carrete} + P_{filamento} * g * r_{filamento}] + [\mu * g * (P_{carrete} + P_{filamento}) * r_{eje}] + [((I_{carrete} + I_{filamento}) + I_{eje}) * \alpha]$$

Tabla 28: Datos del Sistema de Bobinado

Variable	Valor	Unidad
Peso Carrete	0,1	kg
Peso Filamento	1	kg
Peso Eje	0,1	kg
Radio Interior Carrete	0,045	m
Radio Exterior Carrete	0,06	m
Radio Eje	0,003	m
Roce Eje - Carrete (Acero - Plástico) [30]	0,4	-
Inercia del carrete	0,000132813	kgm ²
Inercia del filamento en el carrete	0,001328125	kgm ²
Inercia del Eje	0,00000008	kgm ²
Aceleración sistema (de 0 a 5,6 en 2 segundos)	5,6	rev/s ²

Por lo tanto:

$$T_m = 0,632 + 0,0129 + 0,0043 = 0,65 \text{ [Nm]}$$

Asumiendo un factor de seguridad del 20%, el torque a realizar por el motor debe ser mayor a 0,78 [Nm] para el peak de torque. Como se observa en el cálculo de, el Torque por fricción y aceleración de inercia, son casi insignificantes en comparación al de carga.

5.7.2 Selección Motor Bobinado

A partir del dimensionamiento hecho del sistema de bobinado, se pudo elegir un motor que permitiera cumplir con cierto margen de seguridad los criterios de selección.

El motor seleccionado es el 32204 MD, del distribuidor Zhengke (Figura 63). Se trata de un motor de corriente continua de 12 [V], de 30 [rpm] y un torque de 1,4 [Nm].



Figura 63: Imagen del Motor 32204 MD de Zhengke empleado en el sistema de bobinado. Fuente:
<http://www.mpja.com/12VDC-30-RPM-Gearhead-Motor/productinfo/32204+MD>

Los datos del motor que forma el sistema bobinado, se puede encontrar en el anexo 10.7.

5.7.3 Modelo CAD

El modelo CAD del sistema bobinado que se muestra en la Figura 64 dibujado en el software Inventor 2015, muestra la forma y el diseño realizado de esta estructura.

En el anexo 10.23, se puede encontrar el montaje de este elemento en el sistema extrusor.

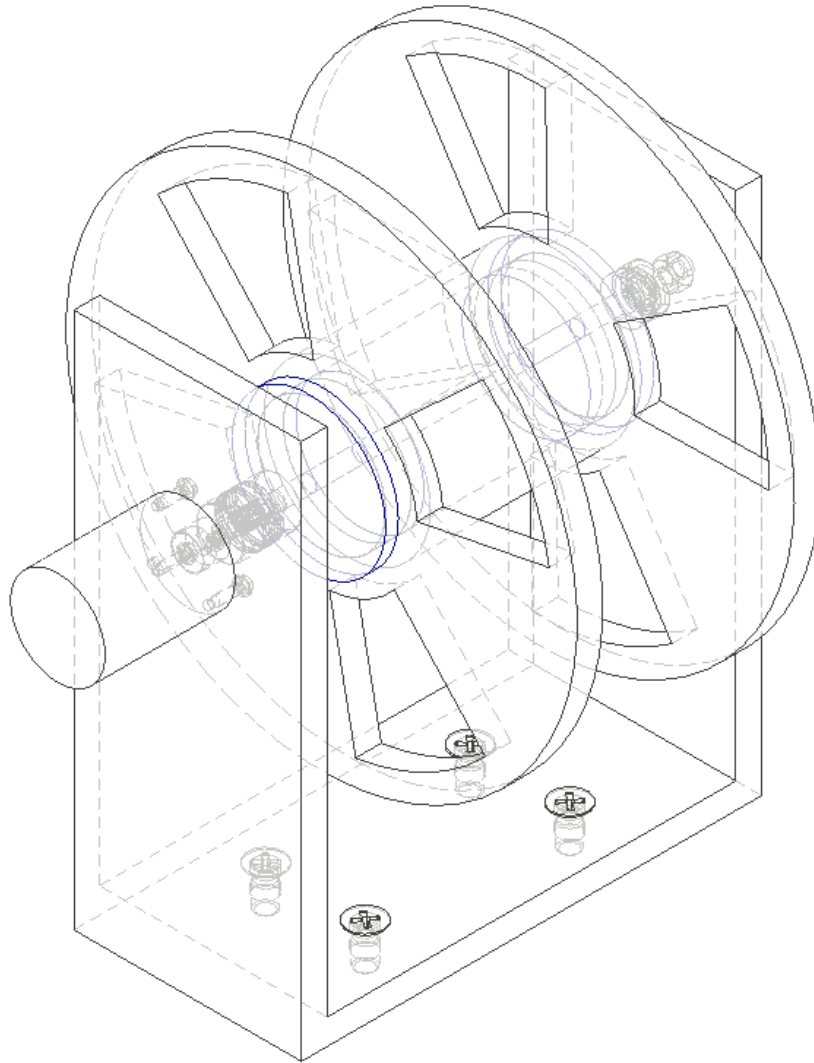


Figura 64: Modelo CAD sistema bobinado.

5.8 Diseño Sistema refrigeración

5.8.1 Dimensionamiento

En el sistema de refrigeración del extruido se utilizará un ventilador para realizar el enfriamiento mediante la convección forzada. La función es disminuir la temperatura a la salida de la boquilla, para evitar la dilatación extra del filamento, disminuir los cambios en el diámetro final y tener mayor calidad en él. La temperatura que se desea alcanzar debe ser superior a la temperatura de transición vítrea del material, ya que por debajo de ella el

polímero será rígido y quebradizo, y por encima es blando y flexible, característica necesaria para que el sistema *Puller* de la extrusora funcione correctamente.

Para calcular la temperatura de salida del filamento luego de pasar por un ventilador, se selecciona un ventilador de 60x60x10 [mm], sus características se pueden ver en el anexo 10.12. Como se tienen dos boquillas en la extrusora y dos materiales a trabajar, la temperatura final variará entre cada estudio.

Lo primero que se debe calcular, es el coeficiente de transferencia de calor en convección forzada del aire, el cual actúa sobre el filamento. Para ello es necesario conocer el número de Prandtl (relaciona la convección forzada y la natural), el número de Reynolds (caracteriza el movimiento de un fluido) y el número de Nusselt (transferencia de calor por convección forzada).

El número de Prandtl se obtiene de acuerdo a las características del aire, a una temperatura de 100 [°C] y a presión atmosférica.

El número de Reynolds se calcula mediante la fórmula [17]:

$$R_e = \frac{V * D}{\nu}$$

Donde

V : Flujo de aire del ventilador [m/s]

D : Diámetro del filamento [m]

ν : Viscosidad cinemática del aire [m²/s]

En el caso de estudio, el diámetro del filamento variará entre 1,75 y 3 [mm], por lo cual se obtiene:

Tabla 29: Resultados Reynolds para los diferentes diámetros de filamento.

Variable	Descripción	Valor	Unidad
Re _{D-1,75}	Reynolds con Boquilla de 1,75 [mm]	366,5	-
Re _{D-3}	Reynolds con Boquilla de 3 [mm]	628,4	-

Con el número de Reynolds y Prandtl, dada las características del aire de la Tabla 30, se calcula el número de Nusselt para los diferentes diámetros, con la fórmula [18]:

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62 * R_e^{\frac{1}{2}} * Pr^{\frac{1}{3}}}{\left(1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{\frac{2}{3}}\right)^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{4/5}$$

Donde

Re : Número de Reynolds [-]

Pr : Número de Prandtl [-]

Los resultados se pueden ver en la Tabla 31.

Tabla 30: Propiedades aire a T=100 [°C] y P=P_{atm}.

Variable	Descripción	Valor	Unidad
K	Conductividad térmica del aire	0,03162	W/mK
ν	Viscosidad cinemática del aire	$2,32 \cdot 10^{-5}$	m ² /s
Pr	Número de Prandtl	0,7003	-

Tabla 31: Resultados Nusselt para los diferentes diámetros de filamento.

Variable	Descripción	Valor	Unidad
Nu _{D-1,75}	Nussels con Boquilla de 1,75 [mm]	9,66	-
Nu _{D-3}	Nussels con Boquilla de 3 [mm]	12,62	-

Con estos datos, es posible calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección, los cuales se presentan en la Tabla 32. La fórmula para calcular el coeficiente de convección es [17]:

$$h = Nu \frac{k}{D}$$

Donde

Nu : Número de Nusselt [-]

k : Conductividad térmica del aire [W/mK]

D : Diámetro filamento [m]

Tabla 32: Resultados Coeficiente de transferencia del aire para los diferentes diámetros de filamento.

Variable	Descripción	Valor	Unidad
$h_{D-1,75}$	Coeficiente de convección con Boquilla de 1,75 [mm]	174,6	W/m ² K
h_{D-3}	Coeficiente de convección con Boquilla de 3 [mm]	133	W/m ² K

Aplicando conservación de la energía en un volumen control estacionario, a través de la cual se mueve el filamento, se puede calcular la temperatura de acuerdo a la posición:

$$\rho V_e A_c c_p T - \rho V_e A_c c_p (T + dT) - dq_{conv} = 0$$

$$-\rho V_e \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) c_p T - \pi D dx [h(T - T_\infty)] = 0$$

$$\frac{dT}{dx} = -\frac{4}{\rho V_e D c_p} [h(T - T_\infty)]$$

$$\int_{T_o}^T \frac{dT}{(T - T_\infty)} = -\frac{4h}{\rho V_e D c_p} \int_0^x dx$$

$$T = T_\infty + (T_o - T_\infty) e^{-\frac{4hx}{\rho V_e D c_p}}$$

Donde

T_∞ :	Temperatura ambiente [-]
T_o :	Temperatura de salida del filamento [W/mK]
h :	Coeficiente de convección [W/m ² K]
ρ :	Densidad del material [Kg/m ³]
V_e :	Velocidad de salida del filamento de la boquilla [m/s]
D :	Diámetro filamento [m]
c_p :	Calor específico material [J/Kg°C]

Evaluando la temperatura a una posición de 0,06 [m] (donde termina el ventilador), con una temperatura ambiente de 20 [°C], se obtiene:

Tabla 33: Temperatura del filamento al pasar por los ventiladores.

Variable	Descripción	Valor	Unidad
$T_{D-1,75 \text{ ABS}}$	Temperatura a los 12 [cm] desde la salida de la boquilla de 1,75 [mm] para el ABS	137,1	°C
$T_{D-3 \text{ ABS}}$	Temperatura a los 12 [cm] desde la salida de la boquilla de 3 [mm] para el ABS	168,2	°C
$T_{D-1,75 \text{ PLA}}$	Temperatura a los 12 [cm] desde la salida de la boquilla de 1,75 [mm] para el PLA	115	°C
$T_{D-3 \text{ PLA}}$	Temperatura a los 12 [cm] desde la salida de la boquilla de 3 [mm] para el PLA	140,1	°C

Como se observa, el filamento después de pasar por el ventilador, reduce considerablemente su temperatura, estando por sobre la temperatura de transición vítrea del ABS y PLA (115 [°C] y 60 [°C] respectivamente) en ambas boquillas, por lo que será más estable y se podrá trabajar de mejor manera en el sistema *Puller* de la extrusora.

5.8.2 Selección del sistema de refrigeración

A partir del dimensionamiento hecho del sistema de refrigeración, se eligió:

Un Ventilador modelo 6010HH12C EC, del distribuidor EverCool (Figura 65). Se trata de un ventilador de alto rendimiento de 60x60x10 [mm], de 4800 [RPM] y corriente continua de 12 [V].



Figura 65: Ventilador es el 6010HH12C EC, del distribuidor EverCool empleado en el sistema de refrigeración. Fuente: http://www.diotronic.com/ventilador-60x60x10-12v-3p-30d_9319/

Los datos del ventilador seleccionado que forma el sistema de refrigeración se pueden encontrar en el anexo 10.12.

El modelo representativo y el montaje del elemento se pueden encontrar en el montaje de las piezas, en el anexo 10.23.

5.9 Diseño *Puller*

5.9.1 Dimensionamiento

El sistema *Puller* es el encargado de tirar el filamento para que el material salga de la boquilla del extrusor a una velocidad constante. Este sistema es importante para la calidad del filamento extruido, ya que la estabilidad del diámetro del filamento depende de gran medida de la velocidad con que se extrae el filamento y que no se produzcan movimientos oscilatorios mediante su funcionamiento.

Debido a lo anterior, es necesario que el sistema pueda tirar el filamento a la velocidad de salida desde la boquilla, como un requerimiento mínimo para mantener la calidad del filamento. Es necesario regular la velocidad para el diámetro del filamento, por lo que la velocidad del motor debe ser regulable.

Los parámetros para la elección del motor deben ser:

Tabla 34: Parámetros Selección para el *Puller*.

Variable	Descripción	Valor	Unidad
$V_{D-1,75}$	Velocidad de salida filamento con Boquilla de 1,75 [mm]	0,0279	m/s
V_{D-3}	Velocidad de salida filamento con Boquilla de 3 [mm]	0,0207	m/s

Para calcular las revoluciones que debe girar el *Puller*, conociendo la velocidad de salida del filamento, se utiliza:

$$\eta = \frac{V}{\pi * D} [rpm]$$

Donde

V : Velocidad de salida del filamento [mm/min]

D : Diámetro de la guía del *Puller* [mm]

Por lo tanto, se calcula para ambos casos. Para la boquilla de 1,75 [mm]:

$$\eta_{D-1,75} = \frac{0,0279 * 1000 * 60}{\pi * 12}$$
$$\eta_{D-1,75} \approx 44,4 [rpm]$$

Para la boquilla de 3 [mm]:

$$\eta_{D-3} = \frac{0,0207 * 1000 * 60}{\pi * 12}$$
$$\eta_{D-3} \approx 33,08 [rpm]$$

5.9.2 Selección Motor Puller

A partir del dimensionamiento hecho del sistema *Puller*, se pudo elegir un motor que permitiera cumplir con cierto margen de seguridad los criterios de selección.

El motor seleccionado es el 32205 MD, del distribuidor Zhengke (Figura 66). Se trata de un motor de corriente continua de 12 [V], de 50 [rpm] y un torque de 0,86 [Nm].



Figura 66: Imagen del Motor 32205 MD de Zhengke empleado en el sistema *Puller*. Fuente:
<http://www.mpja.com/12VDC-50-RPM-Gearhead-Motor/productinfo/32205+MD/>

Los datos del motor que forma el sistema bobinado se pueden encontrar en el anexo 10.8.

5.9.3 Modelo CAD

El modelo CAD del *Puller* que se muestra en la Figura 67 dibujado en el software Inventor 2015, muestra la forma y el diseño realizado de esta estructura.

En el anexo 10.23, se puede encontrar el montaje de este elemento en el sistema extrusor.

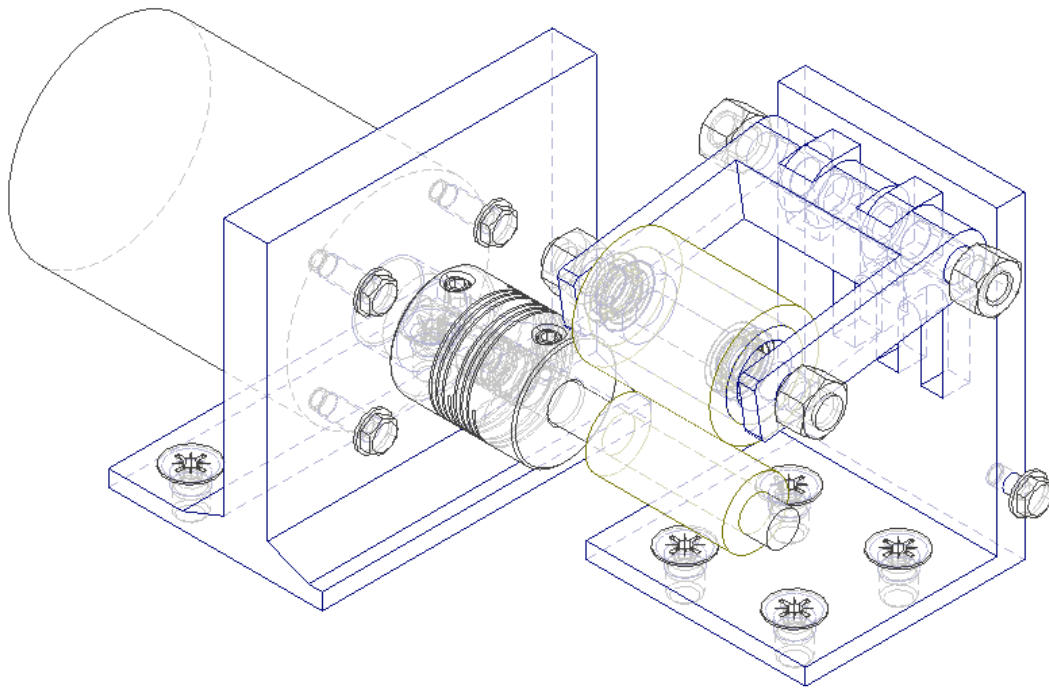


Figura 67: Modelo CAD *Puller*.

5.10 Diseño Repartidor de Filamento

5.10.1 Dimensionamiento

El sistema para repartir el filamento es el encargado de distribuir el filamento en carretes. Para ello, es necesario conocer distintos parámetros para realizar una distribución adecuada. A continuación, en la Tabla 35 se resumen los parámetros conocidos del sistema:

Tabla 35: Parámetros para distribución del filamento.

Variable	Descripción	Valor	Unidad
$V_{D-1,75}$	Velocidad de Salida con Boquilla de 1,75 [mm]	0,0418	m/s
V_{D-3}	Velocidad de Salida con Boquilla de 1,75 [mm]	0,03118	m/s
$D_{int-carrete}$	Diámetro Interior del carrete	65	mm
$D_{ext-carrete}$	Diámetro exterior del carrete	200	mm
Rho_{Abs}	Densidad ABS	1050	Kg/m ³
Rho_{Pla}	Densidad PLA	1250	Kg/m ³

De acuerdo a las características del Carrete, se tendrá un largo interior para el enrollado del filamento de aproximadamente 54 [mm], por lo cual, las vueltas necesarias para llenar de forma longitudinal el carrete dependerá de la boquilla a utilizar. De acuerdo a ello, se utiliza la fórmula:

$$Vueltas_{necesarias} = \frac{L_{i-carrete}}{D_{boquilla}}$$

Donde

$L_{i-carrete}$: Largo interior del carrete [mm]

$D_{boquilla}$: Diámetro de la boquilla [mm]

Por lo tanto, los resultados se generan en la Tabla 36:

Tabla 36: Vueltas necesarias para llenar longitudinalmente el Carrete.

Variable	Descripción	Valor	Unidad
Vueltas $D-1,75$	Vueltas necesarias con Boquilla de 1,75 [mm]	31	-
Vueltas $D-3$	Vueltas necesarias con Boquilla de 3 [mm]	18	-

El largo necesario de cada material, para realizar un Kilogramo de plástico, dependerá de la boquilla a utilizar y el material, por lo cual, se utilizó:

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow L = \frac{4m}{\pi D^2 \rho}$$

Donde

m : Masa de filamento necesario (1) [Kg]

D : Diámetro del filamento [m]

ρ : Densidad del material [Kg/m³]

Los resultados se presentan en la Tabla 37.

Tabla 37: Largo necesario de cada material, de acuerdo a la boquilla.

Variable	Descripción	Valor	Unidad
Largo $D-1,75$ ABS	Largo necesario para un Kilogramo de ABS con una Boquilla de 1,75 [mm]	396	m
Largo $D-3$ ABS	Largo necesario para un Kilogramo de ABS con una Boquilla de 3 [mm]	135	m
Largo $D-1,75$ PLA	Largo necesario para un Kilogramo de PLA con una Boquilla de 1,75 [mm]	333	m
Largo $D-3$ PLA	Largo necesario para un Kilogramo de PLA con una Boquilla de 3 [mm]	113	m

Para calcular la velocidad que se debe mover el repartidor, es necesario conocer el tiempo que se demora en dar cada pasada de acuerdo al largo total que se requiere, lo que dependerá del número de vueltas para llenar el carrete y el perímetro de cada pasada. Para ello, se calculó el perímetro interior del carrete y con ello, los milímetros necesarios de cable para cada vuelta, los cuales se presentan en la Tabla 43 y Tabla 44.

De acuerdo a los tiempos obtenidos, se calcula un promedio para cada una de las boquillas y plásticos. Los resultados se presentan en la Tabla 38.

Tabla 38: Tiempo promedio de pasada para cada material y boquilla.

Variable	Descripción	Valor	Unidad
Tiempo _{D-1,75 ABS}	Tiempo promedio de pasada para el ABS con una Boquilla de 1,75 [mm]	401	s
Tiempo _{D-3 ABS}	Tiempo promedio de pasada para el ABS con una Boquilla de 3 [mm]	426	s
Tiempo _{D-1,75 PLA}	Tiempo promedio de pasada para el PLA con una Boquilla de 1,75 [mm]	329	s
Tiempo _{D-3 PLA}	Tiempo promedio de pasada para el PLA con una Boquilla de 3 [mm]	348	s

Por lo tanto, se asume un tiempo promedio de 376 [s] para cada pasada de material.

El movimiento del receptor se hará a través de un Servomotor capaz de distribuir el filamento en distintas posiciones, dentro de un intervalo de operación, por lo que se deberá mover aproximadamente 54 [mm] en un tiempo de 376 [s], por cada pasada.

5.10.2 Selección Repartidor de Filamentos

A partir del dimensionamiento hecho del sistema repartidos de filamentos, se pudo elegir un motor que permitiera cumplir con cierto margen de seguridad los criterios de selección.

El motor seleccionado es un Servomotor TowerPRO SG-5010, del distribuidor Adafruit (Figura 68). Se trata de un motor de corriente continua de 6 [V], con un alto torque, que puede rotar aproximadamente 180°.



Figura 68: Imagen del Servomotor TowerPRO SG-5010, de Adafruit empleado en el sistema repartidos de filamentos. Fuente: <https://www.adafruit.com/products/155>

Los datos del servomotor que forma el sistema repartidos se pueden encontrar en el anexo 10.13.

5.10.3 Modelo CAD

El modelo CAD del Repartidor de filamentos que se muestra en la Figura 69 dibujado en el software Inventor 2015, muestra la forma y el diseño realizado de esta estructura.

En el anexo 10.23, se puede encontrar el montaje de este elemento en el sistema extrusor.

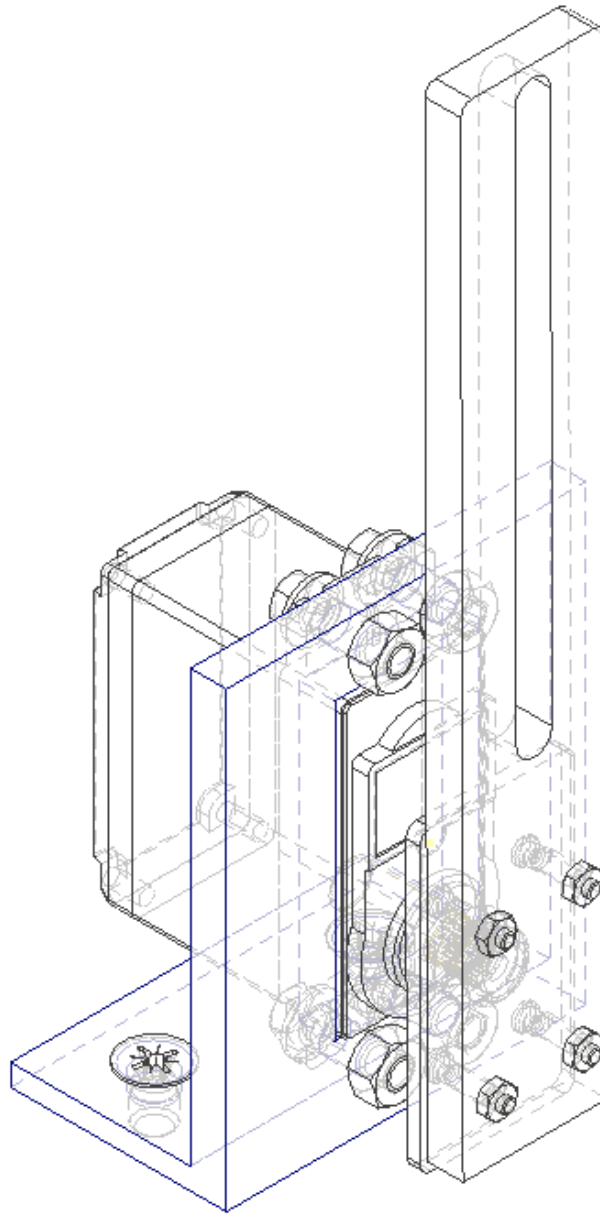


Figura 69: Modelo CAD Repartidor de Filamentos.

5.11 Modelo CAD Sistema Extrusor

Modelo CAD del sistema extrusor desarrollado en el software CAD Inventor 2015 con diferentes vistas.

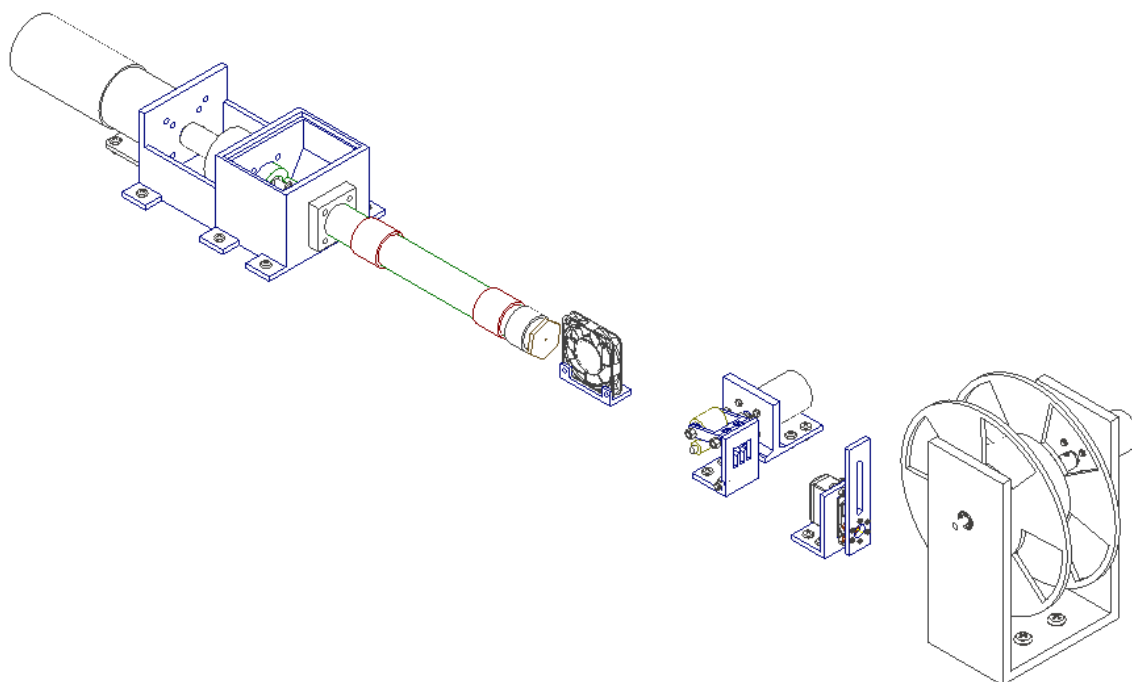


Figura 70: Vista Isométrica del Sistema Extrusor.

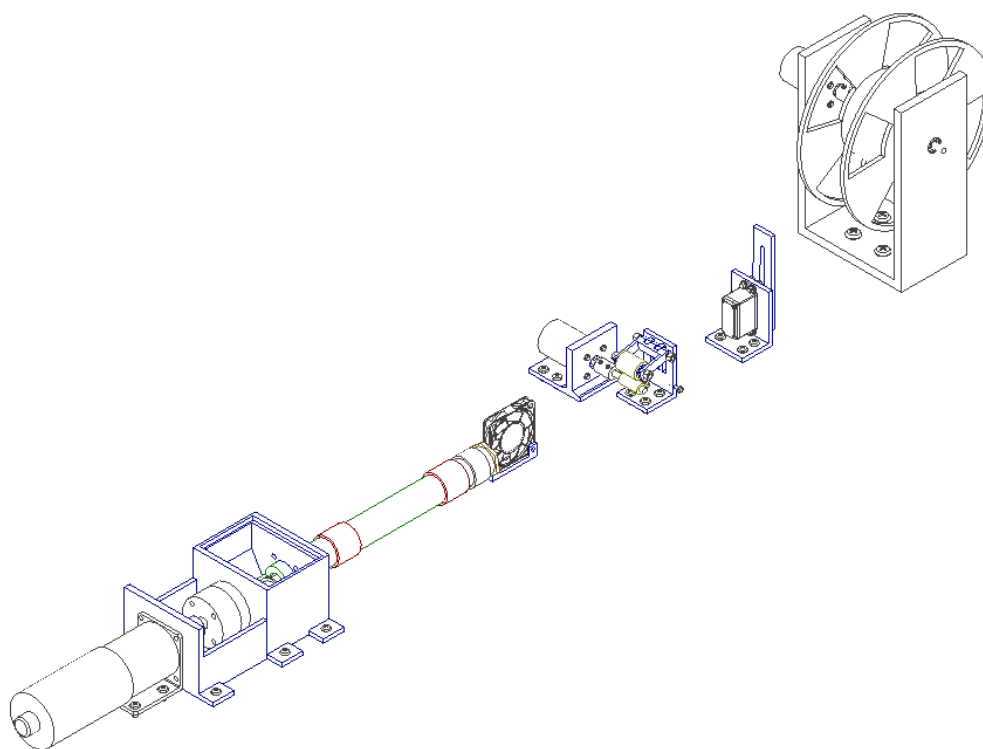


Figura 71: Componentes de izquierda a derecha: Motor, Soporte Motor, Acoplador de Ejes, Soporte extrusora y Tolva, Acoplador Rodamiento, Flange, Cilindro, Bandas calefactoras, Boquilla, Sistema Refrigeración, Sistema *Puller*, Sistema repartidor y Sistema Bobinado.

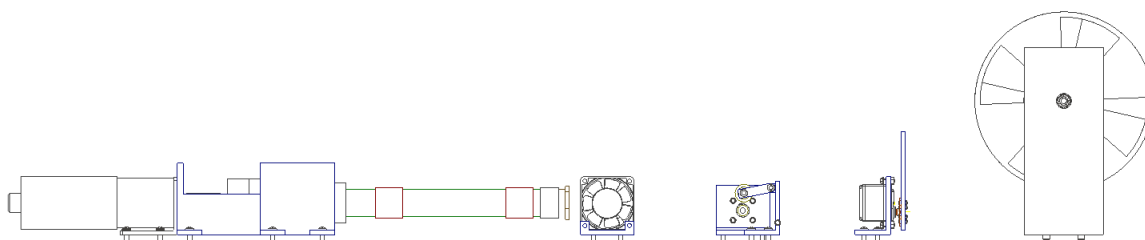


Figura 72: Vista Frontal del Sistema Extrusor.

5.11 Planos

Los planos de todas las piezas especializadas se pueden encontrar en el anexo B con las numeraciones presentes en la Tabla 39 para los sistemas y componentes.

Tabla 39: Codificación de planos

Código	Sistema	Componentes Especializados
1.01	Extrusora	8
1.02	Sistema Ventilación	1
1.03	<i>Puller</i>	6
1.04	Repartidor de filamentos	2
1.05	Sistema Bobinado	3

5.12 Dilatación Térmica

Antes de trabajar con la máquina, se debe comprobar la expansión térmica en los elementos de trabajo debido a las altas temperaturas de operación, para que no exista posibilidad de choque entre los componentes. Para ello, se ha calculado las dilataciones superficiales y lineales que sufrirán el husillo y el cilindro.

Para el cálculo de la dilatación térmica lineal, se utiliza la ecuación [17]:

$$\Delta L = L_o(\alpha * \Delta T)$$

Donde

L_o : Longitud lineal [mm]

α : Coeficiente de dilatación térmica del material [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]

ΔT : Diferencia de temperaturas entre la temperatura de trabajo (final) y del ambiente (inicial) [$^{\circ}\text{C}$]

En el caso del cilindro, se supone una longitud lineal de 300 [mm], el cual sufrirá un cambio de temperatura de 20 [$^{\circ}\text{C}$] a 230 [$^{\circ}\text{C}$] en el caso de mayor solicitud, desde la temperatura ambiente hasta la de trabajo. El material del cilindro es un acero AISI 316 con un coeficiente de dilatación térmica α de $15,9 * 10^{-6}$ [$^{\circ}\text{C}^{-1}$], por lo cual se obtiene:

$$\Delta L = 300(15,9 * 10^{-6} * (230 - 20))$$

$$\Delta L = 0,96831[mm]$$

Lo que representa un 0,33% del largo, una dilatación lineal despreciable.

En el caso del husillo, se supone una longitud lineal de 240 [mm], con un cambio de temperatura igual al caso anterior. El material del husillo es un acero AISI 4140 con un coeficiente de dilatación térmica α de $12,2 * 10^{-6}$ [$^{\circ}\text{C}^{-1}$], por lo cual se obtiene:

$$\Delta L = 240(12,2 * 10^{-6} * (230 - 20))$$

$$\Delta L = 0,61488[mm]$$

Lo que representa un 0,26% del largo, una dilatación lineal despreciable.

Para el cálculo de la dilatación térmica superficial, se utiliza la ecuación:

$$\Delta S = 2 * \alpha * S_o * \Delta T$$

Dónde,

S_o : Área de la superficie [mm^2]

α : Coeficiente de dilatación térmica del material [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]

ΔT : Diferencia de temperaturas entre el ambiente y la de trabajo [$^{\circ}\text{C}$]

En el caso del cilindro, se calcula:

$$\Delta S = 2 * 15,9 * 10^{-6} * 115,37 * (230 - 20)$$

$$\Delta S = 0,77 [\text{mm}^2]$$

El radio y diámetro dilatado serán:

$$r = \sqrt{\frac{116,14}{\pi}}$$

$$r = 6,08 [mm]$$

$$d = 12,16 [mm]$$

En el caso del husillo, se supone el caso de un cilindro con radio exterior constante, por lo que se calcula:

$$\Delta S = 2 * 113,09 * 12,2 * 10^{-6} * (230 - 20)$$

$$\Delta S = 0,579 [mm^2]$$

El radio y diámetro dilatado serán:

$$r = \sqrt{\frac{113,67}{\pi}}$$

$$r = 6,015 [mm]$$

$$d = 12,03 [mm]$$

Se puede observar que todas estas dilataciones no interfieren entre el barril y la broca, de hecho, existe un aumento de la holgura entre ambos componentes.

La holgura que se tendrá en el proceso de operación será:

$$\Delta \delta = 6,08 - 6,015 = 0,0648 [mm]$$

De igual forma, es necesario cuantificar el cambio de sección que se produce en el filamento debido al cambio de temperatura a la salida de la boquilla, para ello, se utiliza la misma ecuación de la dilatación térmica superficial, con diámetros de trabajo de 1,75 y 3 [mm] para el filamento. Como los plásticos de trabajos son dos, se harán los cálculos para cada uno: el coeficiente de dilatación térmica del ABS será $\alpha = 85 * 10^{-6} [^{\circ}C^{-1}]$ y el coeficiente de dilatación térmica del PLA será $\alpha = 126 * 10^{-6} [^{\circ}C^{-1}]$.

Para el caso de la boquilla de 1,75 [mm] y polímero ABS:

$$\Delta S_{1,75-ABS} = 2 * 2,405 * 85 * 10^{-6} * (230 - 20)$$

$$\Delta S_{1,75} = 0,0858 [mm]$$

El radio y diámetro dilatado serán:

$$r_{1,75-ABS} = \sqrt{\frac{2,4911}{\pi}}$$

$$r_{1,75-ABS} = 0,89[mm]$$

$$d_{1,75-ABS} = 1,78[mm]$$

Para el caso de la boquilla de 3 [mm] y polímero ABS:

$$\Delta S_{3-ABS} = 2 * 7,068 * 85 * 10^{-6} * (230 - 20)$$

$$\Delta S_3 = 0,2523[mm]$$

El radio y diámetro dilatado serán:

$$r_{3-ABS} = \sqrt{\frac{7,32}{\pi}}$$

$$r_{3-ABS} = 1,526 [mm]$$

$$d_{3-ABS} = 3,05[mm]$$

Para el caso de la boquilla de 1,75 [mm] y polímero PLA:

$$\Delta S_{1,75-PLA} = 2 * 2,4052 * 126 * 10^{-6} * (230 - 20)$$

$$\Delta S_{1,75} = 0,127[mm]$$

El radio y diámetro dilatado serán:

$$r_{1,75-PLA} = \sqrt{\frac{2,53}{\pi}}$$

$$r_{1,75-PLA} = 0,89 [mm]$$

$$d_{1,75-PLA} = 1,79[mm]$$

Para el caso de la boquilla de 3 [mm] y polímero PLA:

$$\Delta S_{3-PLA} = 2 * 7,068 * 126 * 10^{-6} * (230 - 20)$$

$$\Delta S_3 = 0,374[mm]$$

El radio y diámetro dilatado serán:

$$r_{3-PLA} = \sqrt{\frac{7,44}{\pi}}$$

$$r_{3-PLA} = 1,53 [mm]$$

$$d_{3-PLA} = 3,07 [mm]$$

Como era de esperar, se produce una dilatación del material luego de salir de la boquilla, debido al hinchamiento del filamento, fenómeno típico en los procesos de extrusión. Esto ocurre debido a la capacidad de recuperación elástica del polímero (viscoelasticidad), por lo cual el diámetro debe ser regulado por el sistema *Puller*, para extraer el extruido a una velocidad mayor que la velocidad de extrusión.

6 Sistema Electrónico

El sistema de extrusión se debe controlar para poder operar de forma satisfactoria e influir en las propiedades finales del filamento, para que este sea uniforme. Para ello, es necesario controlar diferentes partes de la extrusora, por lo que se dividió en sistemas independientes de control de acuerdo a su función. Existen cuatro sistemas, los cuales son:

- Sistema de Control para Motor Husillo
- Sistema de Control para el sistema de *puller* y bobinado
- Sistema de Control para el sistema de calefacción
- Sistema de Control para el sistema de refrigeración

A continuación, se describe cada uno de los elementos eléctricos seleccionados para los sistemas de control.

6.1 Sistema de Control para Motor Husillo

El control del motor se realiza mediante un driver específico para motores de corriente continua, el MC33926 Motor Driver Carrier Single del fabricante Polulu. Una imagen del mismo se encuentra en la Figura 73.

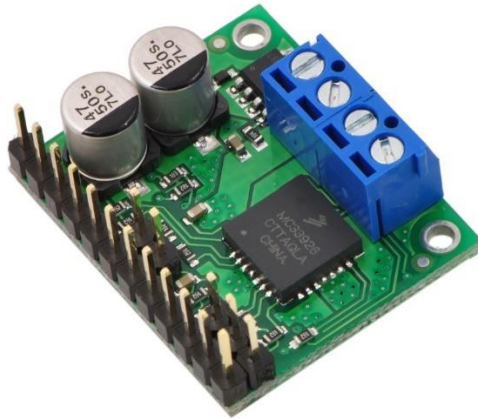


Figura 73: Driver MC33926 Single. Fuente: <https://www.pololu.com/product/1212>

El driver seleccionado opera en un rango de 5 – 28 [V] y puede entregar 3 [A] con picos de hasta de 5 [A] para un motor DC. Estas características lo hacen adecuado para el motor seleccionado.

La alimentación para el sistema de control del motor se hará mediante una fuente con sólo una salida de 24 [V] capaz de entregar hasta 30 [W]. El modelo del driver es el PJ-24V30WBNA del fabricante DigiKey. Una imagen del mismo se encuentra en la Figura 74.



Figura 74: Fuente de alimentación PJ-24V30WBNA. Fuente: <http://www.digikey.com/product-detail/es/delta-electronics/PJ-24V30WBNA/1145-1055-ND/4386526>

6.2 Sistema de Control para el sistema de *puller* y bobinado

El sistema *Puller* y Bobinado se controlarán juntos debido a que existe una dependencia entre ellos y presentan motores de iguales características.

El control de los motores se realiza mediante un driver específico para motores de corriente continua, el MC33926 Motor Driver Carrier Dual del fabricante Pololu. Una imagen del mismo se encuentra en la Figura 75.

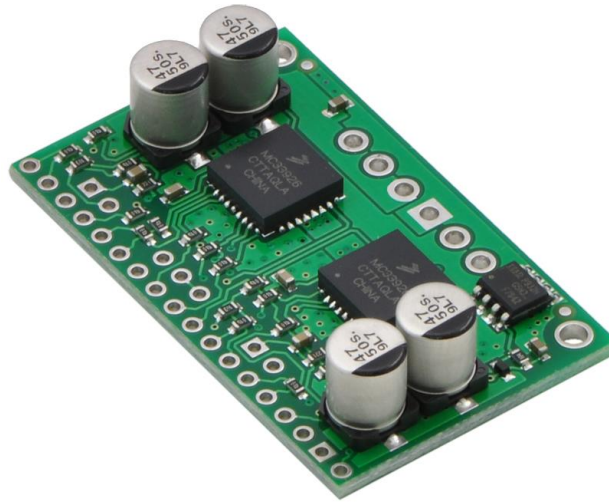


Figura 75: Driver MC33926 Dual. Fuente: <https://www.pololu.com/product/1213>

El driver seleccionado opera en un rango de 5 – 28 [V] y puede entregar 3 [A] con picos de hasta de 5 [A] por cada salida de un motor DC. Estas características lo hacen adecuado para controlar los motores seleccionados.

La alimentación para ambos motores se hará mediante una fuente con una salida de 12 [V] capaz de entregar hasta 50 [W]. El modelo del driver es el MS-50-12 del fabricante MakerElectric. Una imagen del mismo se encuentra en la Figura 76.



Figura 76: Fuente de Alimentación MS-50-12. Fuente: <http://www.ebay.com/itm/Universal-MS-50-12-50W-12v-4-2a-minute-extension-switching-power-supply-with-ce-/222198908168>

6.3 Sistema de Control para el sistema de calefacción

El sistema de calefacción debe aumentar la temperatura del extrusor, controlar la temperatura y leerla. Para ello, se seleccionó un controlador de temperatura digital PID TA7-SNR, con un relé de estado sólido SSR-25D y una Termocupla PT100. Una imagen del mismo se encuentra en la Figura 77.



Figura 77: Digital PID F/C SSR. Fuente: <http://www.ebay.com/itm/Digital-PID-F-C-SSR-Thermostat-Temperature-Controller-PT100-Thermocouple-Sensor-/280879156946/>

El controlador seleccionado puede medir entre 20 a 420 [°C], acoplar diferentes modelos de termocuplas y operar en un rango de 24 a 380 [V]. Estas características lo hacen adecuado para controlar el sistema de calefacción. – control on off

La alimentación para ambos motores se hará mediante una fuente con una salida de 12 [V] capaz de entregar hasta 50 [W]. El modelo del controlador es el MS-50-12 del fabricante MakerElectric. Una imagen del mismo se encuentra en la Figura 76.

6.4 Sistema de alimentación para el sistema de refrigeración

El sistema de refrigeración sólo necesita una fuente de alimentación para el ventilador.

La alimentación para el ventilador se hará mediante una fuente de una salida de 12 [V], capaz de entregar hasta 20 [W]. El modelo de la fuente es el MS-20 -1.33A 20W del fabricante MakerElectric. Una imagen del mismo se encuentra en la Figura 78.



Figura 78: Fuente de Alimentación MS-20 -1,33A 20W. Fuente: <http://www.ebay.com/itm/Hot-Sale-20W-15v-1-33a-MS-20-15-24v-dc-single-switching-power-supply-from-maker-/322205024176>

6.5 Esquema Unilineal

El esquema unilineal es una representación básica de cómo se distribuyen los componentes en una instalación eléctrica. En la Figura 79, Figura 80 y Figura 81 se presenta el esquema característico de este sistema.

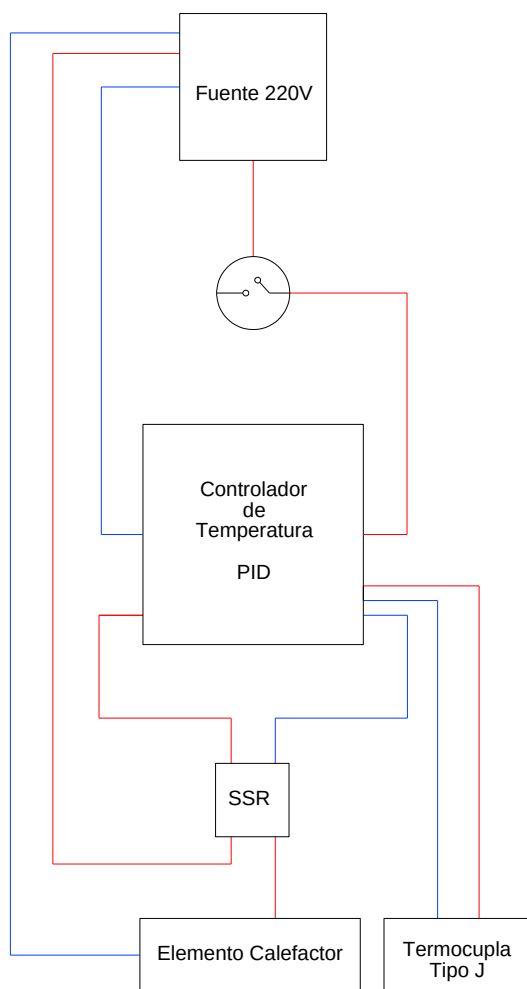


Figura 79: Esquema Unilineal Sistema Calefacción

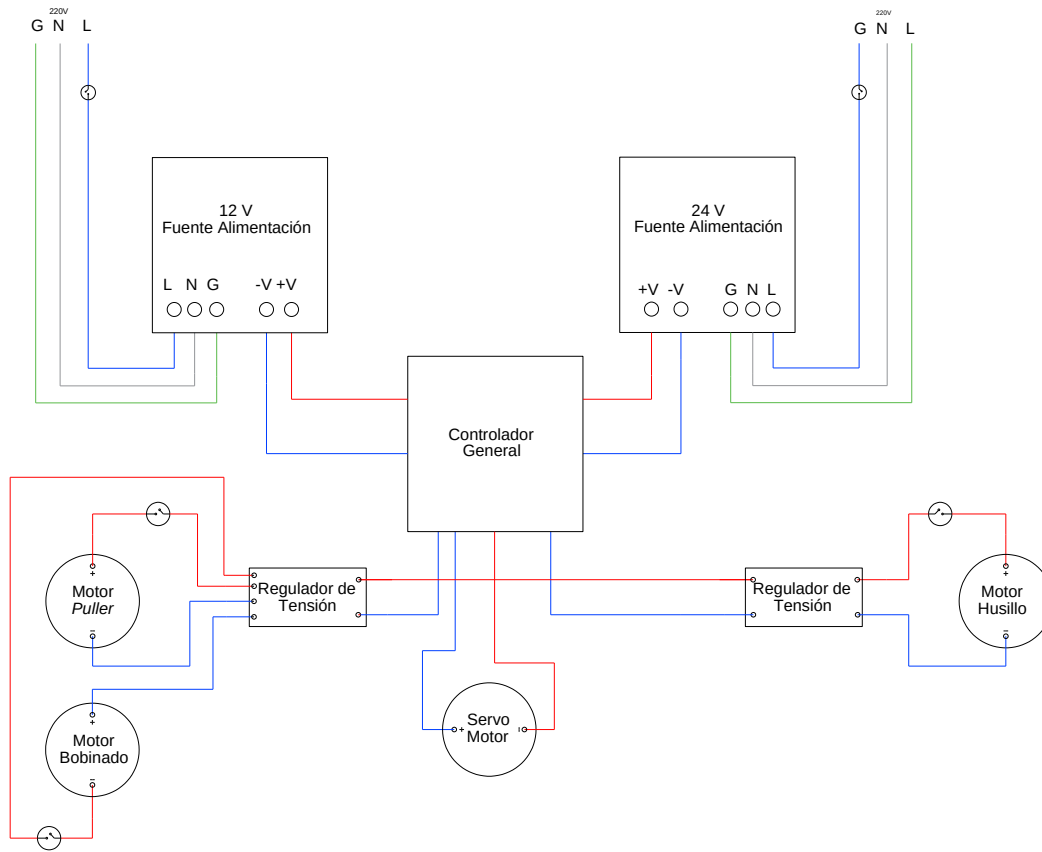


Figura 80: Esquema Unilineal Motores

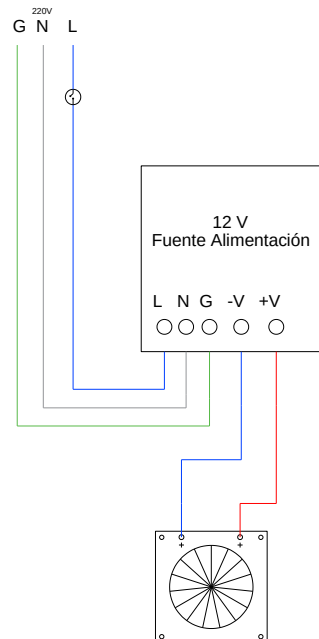


Figura 81: Esquema Unilineal Sistema refrigeración

7 Costos

En este apartado se muestran los costos generales de realizar el Sistema de extrusión. Los costos se pueden ver en la Tabla 40 y los costos detallados completos en el anexo 10.25. Los costos no incluyen el mecanizado de ciertos componentes, sólo el precio de los materiales.

Tabla 40: Costos Generales Sistema Extrusor

Subsistema	Costo [CLP]
Sistema Extrusión	\$155.947
Sistema Puller	\$42.712
Sistema Refrigeración	\$10.823
Sistema Bobinado	\$11.895
Sistema Repartidor	\$3.250
Extras	\$10.350
Total	\$234.796

8 Conclusión

El diseño desarrollado es una extrusora de filamentos a partir de plástico reciclado. Fue diseñada para producir filamento de ABS y PLA en diferentes diámetros, con un caudal mínimo de 0,25 [kg/h] (un kilogramo cada 4 [h]) para el ABS de 1,75 [mm] y un caudal máximo de 0,66 [kg/h] (un kilogramo cada 1,5 [h]) para el PLA de 3 [mm]. Las funcionalidades de la extrusora incorporan:

- Motor del husillo con velocidad regulable.
- Una tolva con autonomía de 44 minutos mínimos.
- Una zona de control de temperatura.
- Diseño Modular.
- Sistema de extracción (*puller*) de velocidad regulable, que permite la fabricación de diferentes diámetros y tolerancias.
- Sistema de refrigeración por aire, controlado por el usuario.
- Sistema repartidor de filamentos.
- Sistema de bobinado del filamento en carretes, con velocidad regulable.

El resultado final del diseño se puede observar en la Figura 70, Figura 71 y Figura 72. De acuerdo al cumplimiento de los requerimientos, se establecieron especificaciones mínimas y máximas para desarrollar el objetivo, las cuales se encuentran en el apartado Lista de requerimientos. En la Tabla 41 se presenta el requerimiento y el resultado obtenido. Según lo descrito, los requerimientos han sido cumplidos en su mayoría, logrando así extrusora capaz de producir filamentos a partir de plástico reciclado, para su uso en impresión 3D. No todos requerimientos se pudieron medir, debido a que este proyecto se basó en el diseño conceptual de la extrusora, por lo que los resultados requeridos quedan abiertos para su realización en un futuro.

El diseño desarrollado no cumple con los estándares de una extrusora industrial, puesto que es dirigido para un nivel de investigación y docencia. Debido a ello, es difícil emplear el diseño para una producción comercial de filamento, donde las especificaciones de capacidad están muy por encima de los obtenibles con este proyecto.

Si se requiere producir una mayor cantidad de filamento por hora, es necesario variar las revoluciones del motor del husillo. El motor seleccionado tiene una velocidad máxima de

rotación de 33 [rpm] con un torque de 7 [Nm], por lo que la producción de filamento puede llegar a duplicarse, pero se debe considerar un aumento de la potencia requerida, las presiones de operación, las fuerzas de trabajo y un sinnúmero de parámetros, que representan un deterioro de la máquina, incluso su falla en algunos casos. De la misma forma, el diseño propuesto está basado en una velocidad de giro de 10 [rpm], por lo que un aumento representa un cambio significativo en los elementos seleccionados y un deterioro en la calidad final del filamento.

La extrusora presentada es susceptible a ser perfeccionada en varias de sus áreas; a continuación, se presentan algunas propuestas:

- Es necesario seleccionar y configurar un controlador general para el equipo extrusor, para centralizar todas las funciones y variables en un único dispositivo programable.
- Con la adición de un controlador, también se puede incluir una interfaz de usuario con una pantalla LCD.

Tabla 41: Resumen del cumplimiento de los requerimientos del proyecto.

Especificación	Objetivo	Resultado
Altura	<0,5 [m]	0,2 [m]
Largo	<1,5 [m]	1,2 [m]
Ancho	<0,8 [m]	0,2 [m]
Costo de Fabricación Material	<5 [USD/Kg]	-
Costo Máquina	<700 [USD]	360 [USD]
Potencia Consumida	<100 [W]	-
Capacidad de producción	>0,25 [Kg/hr]	>0,25 [Kg/hr]
Velocidad de Extrusión	>0,5 [m/min]	>1,6 [m/min]
Volumen Alimentador	>100000 [mm ³]	>576000 [mm ³]
Temperatura de Trabajo	>160 [°C]	180 [°C]
	<300 [°C]	300 [°C]
Tiempo Preparación Máquina	<30 [minutos]	-
Diámetro Extrusión	<3 [mm]	<3 [mm]
	>1,75 [mm]	>1,75 [mm]
Velocidad de Rotación	<10 [RPM]	10 [RPM]
Torque	>5 [NM]	10,8 [Nm]
Tolerancia	/- 0,10[mm]	-
Dimensiones Pellets	<3x16 [mm]	-

9 Referencias

- [1] Beltrán, M., & Marcilla, A. (2012). Tecnología de polímeros. *Universidad de Alicante*.
- [2] Rosato, D. V., Rosato, A. V., & Di Mattia, D. P. (2004). *Blow molding handbook: technology, performance, markets, economics: the complete blow molding operation*. Hanser Verlag.
- [3] Groover, M. P. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. Pearson Educación.
- [4] Store.makerbot.com. (2016). *Shop MakerBot Filament | MakerBot*. [online] Available at: <https://store.makerbot.com/filament/> [Accessed 1 Aug. 2016].
- [5] SANCHEZ, S. (2016). *Descubriendo los plásticos de la impresión 3D - 3Dnatives*. [online] 3Dnatives. Available at: <http://www.3dnatives.com/es/plasticos-impresion-3d-22072015/> [Accessed 30 Jul, 2016].
- [6] Wagner, J.R., Mount, E. M, & Giles, H.F, Plastic Behavior in the Extruder-4.
- [7] ISO. (2016). *ISO 1133-1:2011 - Plastics -- Determination of the melt mass-flow rate (MFR) and melt volume-flow rate (MVR) of thermoplastics -- Part 1: Standard method*. [online] Available at: http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=44273 [Accessed 6 Jun. 2016].
- [8] ABS Plastic.eu. (2016). *PLA vs. ABS Plastic - The Pros and Cons - ABS Plastic.eu*. [online] Available at: <http://www.absplastic.eu/pla-vs-abs-plastic-pros-cons/> [Accessed 9 Jun. 2016].
- [9] ProtoParadigm. (2016). *3D Printer Filament Buyer's Guide*. [online] Available at: <http://www.protoparadigm.com/news-updates/3d-printer-filament-buyers-guide/> [Accessed 2 Jul. 2016].
- [10] Filastruder. (2016). *Filastruder: The World's Premier DIY Filament Extruder/Maker*. [online] Available at: <https://www.filastruder.com/> [Accessed 25 May. 2016].
- [11] Redetec. (2016). *ProtoCycler creates 3D printer filament from new or recycled plastic*. [online] Available at: <http://www.redetec.com/products/protocycler/> [Accessed 5 Nov. 2016].
- [12] Dieter, G.E. and Schmidt, L.C., "Engineering Design," ISBN 9780072837032, 2009.].
- [13] Saaty, T. L. (1989). Decision making, scaling, and number crunching. *Decision Sciences*, 20(2), 404-409.
- [14] Ibarra, E. T. (2005). La arquitectura integral y modular. El caso de la Industria Automotriz. *Economía y Sociedad*, 10(16), 65-83.
- [15] Savgorodny, V. K., & Uralde, L. (1978). *Transformación de plásticos*. Editorial Gustavo Gili.
- [16] Mott, R. L., Salas, R. N., Flores, M. A. R., & Martínez, E. B. (2009). *Resistencia de materiales* (Vol. 5). Pearson.
- [17] Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. Pearson Educación.
- [18] Sparrow, E. M., J. P. Abraham, and J. C. K. Tong, Int. J. (2004). *Heat Mass Transfer*, **47**, 5285.
- [19] Kemmish, D. (2011). *Practical guide to high performance engineering plastics*. ISmithers.
- [20] Relaño Pastor, A. (2013). Estudio comparativo de piezas de ABS y PLA procesadas mediante modelado por deposición fundida.

- [21] Peinado, V., Castell, P., García, L., & Fernández, Á. (2015). Effect of Extrusion on the Mechanical and Rheological Properties of a Reinforced Poly (Lactic Acid): Reprocessing and Recycling of Biobased Materials. *Materials*, 8(10), 7106-7117.
- [22] Altınkaynak, A., Gupta, M., Spalding, M. A., & Crabtree, S. L. (2011). Melting in a single screw extruder: experiments and 3D finite element simulations. *International Polymer Processing*, 26(2), 182-196.
- [23] Triz40.com. (2016). *TRIZ Matrix, Contradictions table, overcome contradiction with TRIZ*. [online] Available at: http://www.triz40.com/aff_Matrix_TRIZ.php [Accessed 4 Jun. 2016].
- [24] Preciousplastic.com. (2016). Precious Plastic. [online] Available at: <https://preciousplastic.com/en/plan/> [Accessed 15 Sep. 2016].
- [25] Laue, K., & Stenger, H. (1981). Extrusion: processes, machinery, tooling. American Society for Metals.
- [26] Kalpakjian, S. (2001). Manufacturing engineering and technology. Pearson Education India.
- [27] Oberg, E., Jones, F. D., Horton, H. L., & Ryffel, H. H. (2008). Machinery's Handbook. 28th. Edition: Industrial Press, New York, 3455.
- [28] Avitzur, B. (1987). Metal Forming. Encyclopedia of Physical Science & Technology.
- [29] Jones, M., & David, H. (1989). Polymer processing.
- [30] Engineeringtoolbox.com. (2017). Friction and Friction Coefficients. [online] Available at: http://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html [Accessed 5 May 2017].
- [31] Shigley, J. E., Mischke, C. R., & Budynas, R. G. (2004). *Mechanical engineering design*. McGraw-Hill.
- [32] SHIGLEY, J. Y. M. (2002). CR, Diseño en Ingeniería Mecánica, tercera. Edición, Editorial McGraw Hill.
- [33] Casillas, A. L. A. L. (1977). Máquinas: Cálculos de taller.
- [34] Faires, V.M. (1999). Diseño de elementos de máquinas. Limusa,.
- [35] Hull, C.W. (1986). Apparatus for production of three -dimensional objects by stereolithography.
- [36] Rauwendaal, C. (2014). *Polymer extrusion*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.

10 Anexo A

10.1 Respuesta de Encuestas

10.1.1 Encuestas a Ingeniería Procatell

Proceso de extrusión		Trabajo de Título: Diseño de Extrusora d filamento para impresión 3D a partir de plásticos reciclados.
Nombre del encuestado: Ariel López Alegría _____		
Empresa a la que pertenece: Ingeniería Procatell S.A. _____		
Cargo que desempeña: Gerente de Operaciones _____		
Firma Encuestado: _____		
Proceso productivo de la extrusión de materiales plásticos		
Estimado Encuestado(a), usted ha sido invitado a participar de esta entrevista porque sus conocimientos, experiencia y opinión son importantes. Las preguntas tienen como finalidad caracterizar, tanto al proceso productivo, como los productos generados a través de la extrusión. Si acepta participar, estará contribuyendo con información fundamental para el trabajo de título de ingeniería civil mecánica. Sus datos personales y respuesta no serán revelados en los informes y puede, en cualquier momento de la entrevista, dejar de responder si lo desea. Esta entrevista consta de 16 preguntas, las cuales tardarán aproximadamente 15 minutos en ser respondidas. Agradecemos su tiempo y experiencia.		
Acerca del producto		
1. ¿Qué productos genera su empresa?		
Cables para ser usados en la minería, específicamente para tronaduras		
2. ¿Qué materia prima utilizan?		
Principalmente Polietileno, PVC y Polipropileno y alambre de Cobre desnudo		

Proceso de extrusión

Trabajo de Título: Diseño de Extrusora de
filamento para impresión 3D a partir de
plásticos reciclados.

3. ¿Qué desperdicios generan?

Cobre y resinas tales como PP, PVC o PE durante las partidas y cuando se produce el cambio de carretes de Cobre

4. ¿Qué características o propiedades tienen sus productos?

Nuestros productos son fabricados especialmente a pedido y se utilizan exclusivamente en tronaduras mineras, por lo cual algunas de sus principales características son por ejemplo: resistencia al roce, al corte, aislamiento estáticamente disipativo, etc.

5. ¿Qué materia prima es más costosa económicamente?

El Cobre, ya que su precio sigue las fluctuaciones especulativas del mercado de metales de Londres, en segundo lugar y con mucha menor incidencia son las resinas utilizadas en la aislación (PP, PVC, PE, TPU, etc.).

Acerca del proceso

1. ¿Cuáles son las máquinas principales que constituyen la cadena productiva?

Extrusoras, con su correspondiente cabezal, enrolladores, tiradores, acumuladores, sistema de refrigeración

2. ¿Qué máquinas son críticas en el proceso productivo?

El tipo de proceso hace que la disposición de las máquinas y su actuar conformen una línea secuencial, por lo tanto, todas las máquinas son críticas, si es que se quiere obtener un producto de calidad con una eficiencia aceptable.

3. ¿Cuál es la tasa de producción de cada máquina?

Nuestra producción estándar de extrusión de cables es de 100m/min

4. ¿Cuál es el grado de dificultad en la operación de las máquinas?

Un grado de dificultad mediano en lo que se refiere a operación propiamente tal, y dificultad elevada cuando se está desarrollando algún producto con especificaciones exigentes.

Proceso de extrusión

Trabajo de Título: Diseño de Extrusora d
filamento para impresión 3D a partir de
plásticos reciclados.

5. ¿Cuál es la maquina más costosa?

La extrusora.

6. ¿Cuántas personas operan las líneas de producción?

Dependiendo del grado de automatización que la línea posea y la velocidad con que se extruye, pero la mínima cantidad es un operario para una línea de producción automatizada y velocidad de producción baja.

7. ¿Cuántos mantenimientos se realizan al año?

El mantenimiento debe estar regido por la cantidad de horas de trabajo efectuadas de la línea, por ejemplo según fábrica cada 4.500 hr., se debe hacer mantenimiento al motor eléctrico.

8. ¿Actualmente, existen problemas a solucionar dentro del proceso productivo?

Si, como por ejemplo mejorar la velocidad de extrusión.

9. ¿Qué aptitudes deben tener los operarios para operar las maquinas?

Para empezar, deben tener un conocimiento intermedio del proceso, de las materias primas y de como se utilizan, deben ser pro activos, disciplinados para seguir los procedimientos de fabricación, y con mentalidad compatible con el aprendizaje continuo.

10. ¿Existe alguna etapa en el proceso productivo que aumente los tiempos de producción?
(cuellos de botella), ¿Cómo se puede solucionar?

Si, en nuestro proceso el cambio de carrete en forma manual hace que nuestra velocidad de producción tenga un límite, la solución es invertir en una máquina enrolladora automática.

11. ¿Existen riesgos al operar las maquinas? ¿Dónde se encuentran?

Si por ejemplo, riesgos de sufrir quemaduras si accidentalmente se entra en contacto con las superficies calientes de la extrusora o con el cabezal (230°C), choque eléctrico si se entra en contacto con el Spark Tester, lesiones en las manos (tirador) y fuerzas mal hechas al levantar carretes con productos.

Muchas gracias por su amabilidad y por el tiempo dedicado a contestar esta encuesta.

Proceso de extrusión

Trabajo de Título: Diseño de Extrusora de filamento para impresión 3D a partir de plásticos reciclados.

Nombre del encuestado: OSCAR UEGA JARA.

Empresa a la que pertenece: INGENIERIA PROCATU

Cargo que desempeña: Supervisor de Area y operador de extrusora.

Firma Encuestado: 

Proceso productivo de la extrusión de materiales plásticos

Estimado Encuestado(a), usted ha sido invitado a participar de esta entrevista porque sus conocimientos, experiencia y opinión son importantes. Las preguntas tienen como finalidad caracterizar, tanto al proceso productivo, como los productos generados a través de la extrusión. Si acepta participar, estará contribuyendo con información fundamental para el trabajo de título de ingeniería civil mecánica. Sus datos personales y respuesta no serán revelados en los informes y puede, en cualquier momento de la entrevista, dejar de responder si lo desea. Esta entrevista consta de 16 preguntas, las cuales tardarán aproximadamente 15 minutos en ser respondidas. Agradecemos su tiempo y experiencia.

Acerca del producto

1. ¿Qué productos genera su empresa?

ALAMBRES PARA LA MINERIA

2. ¿Qué materia prima utilizan?

- ALAMBRE de cobre de distintos calibres, PVC, PP, PE, MASTER-BATTE de distintos colores

Proceso de extrusión

Trabajo de Título: Diseño de Extrusora de filamento para impresión 3D a partir de plásticos reciclados.

3. ¿Qué desperdicios generan?

Generalmente el plástico

4. ¿Qué características o propiedades tienen sus productos?

- Los plásticos en su mayoría son antiestáticos.
- el alambre de cobre tiene que ser blando y mas del 90% Puresa

5. ¿Qué materia prima es más costosa económicamente?

- El alambre de cobre y algunos polietilenos que son de exportación

Acerca del proceso

1. ¿Cuáles son las máquinas principales que constituyen la cadena productiva?

- la extrusora y enrolladoras

2. ¿Qué máquinas son críticas en el proceso productivo?

- todas son críticas porque si falla 1 se retrasa la producción

3. ¿Cuál es la tasa de producción de cada máquina?

- 100 mts por minutos. de alambre

4. ¿Cuál es el grado de dificultad en la operación de las máquinas?

- El mayor grado de dificultad en nuestro caso, es el centrado del alambre con respecto al plástico

Proceso de extrusión

Trabajo de Título: Diseño de Extrusora de filamento para impresión 3D a partir de plásticos reciclados.

5. ¿Cuál es la maquina más costosa?

- LA extrusora. por sus matriceria

6. ¿Cuántas personas operan las líneas de producción?

- EN NUESTRA EMPRESA SONOS 2, pero LA OPERA UNA PERSONA POR TURNO

7. ¿Cuántos mantenimientos se realizan al año?

- LAS MANTENCIONES NO SE HACEN POR FECHAS SI NO POR HORAS TRABAJADAS, UN EJEMPLO CAMBIO DE ACEITE DEL REDUCTOR 7,500 HORAS DE TRABAJO

8. ¿Actualmente, existen problemas a solucionar dentro del proceso productivo?

- SI, UNO DE ELLOS ES EL ENFRIADOR DE AGUA

9. ¿Qué aptitudes deben tener los operarios para operar las maquinas?

- LO PRIMERO LA RESPONSABILIDAD,

10. ¿Existe alguna etapa en el proceso productivo que aumente los tiempos de producción? (cuellos de botella), ¿Cómo se puede solucionar?

UNO DE LAS LIMITANTES PARA AUMENTAR EL PROCESO, ES EL POCO TIEMPO QUE HAY PARA CAMBIAR CARRETES, SE PUEDE SOLUCIONAR CON CAMBIO AUTOMATICO DE CARRETES

11. ¿Existen riesgos al operar las maquinas? ¿Dónde se encuentran?

- EL MAYOR RIESGO ES LAS QUEMADURAS, POR EL EFECTO DE QUE SE TRABAJAN CON ALTAS TEMPERATURAS

Muchas gracias por su amabilidad y por el tiempo dedicado a contestar esta encuesta.

10.1.2 Encuestas a Laboratorio de Prototipado a Escala DIMEC



Proceso de extrusión

Trabajo de Título: Diseño de Extrusora de filamento para impresión 3D a partir de plásticos reciclados.

+

Nombre del encuestado: Paulo C. Torres Osorio

Empresa a la que pertenece: UTFSM SJ

Cargo que desempeña: Estudiante

Firma Encuestado: 

Proceso productivo de la impresión 3D

Estimado Encuestado(a), usted ha sido invitado a participar de esta entrevista porque sus conocimientos, experiencia y opinión son importantes. Las preguntas tienen como finalidad caracterizar, tanto al proceso productivo, como los productos generados a través de la impresión 3D. Si acepta participar, estará contribuyendo con información fundamental para el trabajo de título de ingeniería civil mecánica. Esta entrevista consta de 17 preguntas, las cuales tardarán aproximadamente 15 minutos en ser respondidas. Agradecemos su tiempo y experiencia.

Acerca de la Impresión 3D

1. ¿Cuándo utilizan la impresión 3D?

Casi todas las semanas del semestre académico.

2. ¿Con que frecuencia?

De dos a cinco días por semana, normalmente.



1

Proceso de extrusión

Trabajo de Título: Diseño de Extrusora de filamento para impresión 3D a partir de plásticos reciclados.

3. ¿Qué ventajas y desventajas tiene la impresión 3D?

Como ventaja, permite obtener rápidamente prototipos, para ser estudiados en el proceso de desarrollo y mejora de un producto.

Como desventaja, los residuos plásticos (raft, soportes, prototipos o impresiones defectuosos) no son reutilizables, perdiéndose ese material.

4. ¿Qué herramientas y máquinas se necesitan para trabajar con una impresora 3D?

Al experimentar, se ha visto que el uso de cinta Kapton sobre la mesa de trabajo y esparcir sobre la mismo residuo de plástico (ABS) diluido en acetona, ayuda a una mejor impresión al usar ABS.

Por lo general, solo la impresora y su filamento, y un poco de conocimiento de CAD y del software de la impresora es suficiente.

Acerca de la Materia Prima

1. ¿Cuál es la característica fundamental que debe cumplir un filamento de impresión 3D?

Fundamentalmente, debe ser un termoplástico. Además, debe venir en forma de filamento, homogéneo y sin burbujas de aire, con el diámetro adecuado para cada impresora.

2. ¿Cuál no es tan importante?

El color del filamento, a no ser que el cliente o usuario final requiera uno en particular.

3. ¿Qué tipo de filamento es el que más acostumbra a trabajar?

Principalmente ABS, luego PLA.

4. ¿En que se fija usted al comprar el filamento?

El diámetro del filamento, la variedad de colores y el precio.

Proceso de extrusión

Trabajo de Título: Diseño de Extrusora de filamento para impresión 3D a partir de plásticos reciclados.

Acerca del proceso de impresión 3D

1. ¿Cuál es la materia prima más costosa económicamente del proceso?

El filamento. Muy pocas veces, el tiempo.

2. ¿Qué desperdicios se generan al utilizar momento de impresión? ¿Cuánto?

Siempre hay plástico residual, como la base (~~skirt~~, ~~raft~~, ...). De acuerdo a la complejidad de la geometría de la pieza a imprimir y su diseño, puede que se requiera una gran cantidad de soportes.

3. ¿Cuáles son los principales problemas al momento de imprimir?

Hay que conocer bien los parámetros de la impresión para el material que se está usando y la complejidad del diseño. Una mala gestión puede llevar a grandes pérdidas de filamento y tiempo.

4. ¿Cuál es el grado de dificultad en la operación?

No tiene mayor dificultad imprimir, salvo que es recomendable manejar el idioma inglés para los softwares de las impresoras. Conocer CAD ayuda.

5. ¿Cuántas personas operan al momento impresión?

Con una persona es suficiente.

6. ¿Qué aptitudes deben tener los operarios para operar?

Deben estar familiarizados con los parámetros básicos de impresión (~~support~~, ~~infill~~, ~~base and extruder temperature~~, ...) y deben estar pendientes de cómo va el inicio de la impresión y asegurarse cada cierto tiempo que todo vaya bien.

7. ¿Con qué frecuencia se realizan mantenimientos a las máquinas?

Depende del factor a mantener, pero se debe revisar que el extrusor no esté tapado antes de cada impresión, cambiar las cintas ~~kaptan~~ cada semana, aproximadamente, revisar la alineación cada mes, etc.



Proceso de extrusión

Trabajo de Título: Diseño de Extrusora de filamento para impresión 3D a partir de plásticos reciclados.

8. ¿Actualmente, existen problemas a solucionar dentro del proceso?

Más que gestionar qué hacer con los residuos de material, no hay problemas. Encontrar los parámetros justos para cada impresión es parte del proceso y es un criterio que se gana con la experiencia.

9. ¿Existen riesgos al operar las máquinas? ¿Dónde se encuentran?

Más que pasar a llevar la cama de trabajo o el extrusor cuando están calientes, no hay grandes riesgos para el operador. Al imprimir, puede ser complicado si se acumula y se solidifica material sobre el extrusor, lo que no ocurre si se conocen los parámetros de impresión y se está pendiente de la máquina mientras trabaja.

Muchas gracias por su amabilidad y por el tiempo dedicado a contestar esta encuesta.

Proceso de extrusión

Trabajo de Título: Diseño de Extrusora de filamento para impresión 3D a partir de plásticos reciclados.

Nombre del encuestado: Rene Perez López_____

Empresa a la que pertenece: UTFSM_____

Cargo que desempeña: Estudiante_____

Firma Encuestado: _____

Proceso productivo de la impresión 3D

Estimado Encuestado(a), usted ha sido invitado a participar de esta entrevista porque sus conocimientos, experiencia y opinión son importantes. Las preguntas tienen como finalidad caracterizar, tanto al proceso productivo, como los productos generados a través de la impresión 3D. Si acepta participar, estará contribuyendo con información fundamental para el trabajo de título de ingeniería civil mecánica. Esta entrevista consta de 17 preguntas, las cuales tardarán aproximadamente 15 minutos en ser respondidas. Agradecemos su tiempo y experiencia.

Acerca de la Impresión 3D

1. ¿Cuándo utilizan la impresión 3D?

Cuando me toca realizar trabajos asociados a mi cargo como ayudante

2. ¿Con que frecuencia?

Todos los días en funcionamiento constante

Proceso de extrusión

Trabajo de Título: Diseño de Extrusora de filamento para impresión 3D a partir de plásticos reciclados.

3. ¿Qué ventajas y desventajas tiene la impresión 3D?

Ventajas: Velocidad de poder obtener un prototipo, bajo costo para producción altamente personalizada,

Desventajas: Alto costo de entrada, poca variedad de materiales para trabajar,

4. ¿Qué herramientas y máquinas se necesitan para trabajar con una impresora 3D?

Además de la impresora, se requieren ciertos consumibles, como cinta Khapton (adherencia a alta temperatura), Acetona (producto químico que afecta al ABS) la cual permite una mejor terminación superficial,

Acerca de la Materia Prima

1. ¿Cuál es la característica fundamental que debe cumplir un filamento de impresión 3D?

Que este sea constante en su diámetro para no afectar el flujo durante una impresión

Que no tenga burbujas de aire, además que el carrete no este enredado previamente.

2. ¿Cuál no es tan importante?

Color

3. ¿Qué tipo de filamento es el que más acostumbra a trabajar?

Generalmente ABS y PLA

Tenemos otros materiales como el "NinjaFlex" (Filamento flexible) y material soluble (ocupado para las estructuras de soporte).

4. ¿En que se fija usted al comprar el filamento?

Reputación de la empresa, ya que lo asocio a la homogeneidad del diámetro.

Proceso de extrusión

Trabajo de Título: Diseño de Extrusora de
filamento para impresión 3D a partir de
plásticos reciclados.

Acerca del proceso de impresión 3D

1. ¿Cuál es la materia prima más costosa económicamente del proceso?

Filamento

2. ¿Qué desperdicios se generan al utilizar momento de impresión? ¿Cuánto?

El principal desperdicio del proceso de extrusión son los materiales (filamento) de soporte y los ocupados como base. Además, hay ocasiones donde se debe cambiar la cinta Khapton la cual no se puede reciclar

3. ¿Cuáles son los principales problemas al momento de imprimir?

Diferencia de temperatura con el medio lo que produce una contracción en el plástico provocando que las capas inferiores se curven.

Otro problema, es que los rollos no vienen bien armados provocando que se formen nudos en el material antes de la máquina, esto causa una detención de la impresión repentina e implica un desperdicio de todo el plástico utilizado

4. ¿Cuál es el grado de dificultad en la operación?

La operación más compleja es la preparación de la misma, verificando los valores óptimos para cada impresión, estos valores son: velocidad de extrusión para cada proceso (rellenos, paredes, base, techo, etc.), velocidad en vacío, temperatura de extrusión, temperatura de la mesa, soporte (de poseer), densidad del componente a producir.

5. ¿Cuántas personas operan al momento impresión?

El proceso de impresión se puede realizar de a una persona; bajo el contexto educativo del laboratorio, puede haber más personas operando la máquina

6. ¿Qué aptitudes deben tener los operarios para operar?

Paciencia, capacidad de soportar la frustración

Proceso de extrusión

Trabajo de Título: Diseño de Extrusora de filamento para impresión 3D a partir de plásticos reciclados.

7. ¿Con que frecuencia se realizan mantenimientos a las máquinas?

1 vez cada 6 meses se realiza un desarme de la maquina con su correspondiente lubricación de las guías

8. ¿Actualmente, existen problemas a solucionar dentro del proceso?

Siempre existen problemas a solucionar en cualquier proceso, en este caso, las impresiones de más de 30 hrs, presentan curvatura en su base, haciendo que el prototipo no sea tan bueno.

9. ¿Existen riesgos al operar las maquinas? ¿Dónde se encuentran?

De no verificar apropiadamente los parámetros antes de imprimir y no revisar la maquina se pueden producir fallas por acumulación de filamento en la punta, choque del extrusor con la mesa

Muchas gracias por su amabilidad y por el tiempo dedicado a contestar esta encuesta.

10.2 Cálculo de Pesos Relativos

Se calcula el peso relativo de cada objetivo y cada categoría de estos, con el fin de establecer un criterio objetivo.

Pesos relativos entre categorías						
Criterio	Operación	Control de Operación	Seguridad	Costo	Total	Peso
Operación	1	4	3	8	16	0,41
Control de Operación	0,25	1	5	7	13,25	0,34
Seguridad	0,33	0,2	1	7	8,53	0,22
Costo	0,125	0,14	0,14	1	1,405	0,04
Total					39,185	1,01

Pesos relativos Operación										
Criterio	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	Total	Peso	Peso Relativo
1.1	1	3	3	4	5	6	6	28	0,29	0,119
1.2	0,33	1	3	3	4	5	6	22,33	0,23	0,094
1.3	0,33	0,33	1	2	3	5	6	17,66	0,18	0,074
1.4	0,25	0,33	0,5	1	2	3	4	11,08	0,12	0,049
1.5	0,2	0,25	0,33	0,5	1	3	4	9,28	0,1	0,041
1.6	0,17	0,2	0,2	0,33	0,33	1	3	5,23	0,05	0,021
1.7	0,17	0,17	0,17	0,25	0,25	0,33	1	2,34	0,02	0,008
Total								95,92	0,99	0,406

Pesos relativos Control de operación										
Criterio	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	Total	Peso	Peso Relativo
2.1	1	3	4	5	6	7	7	33	0,34	0,116
2.2	0,33	1	3	4	4	5	5	22,33	0,23	0,078
2.3	0,25	0,33	1	2	3	5	6	17,58	0,18	0,061
2.4	0,2	0,25	0,5	1	4	5	5	15,95	0,16	0,054
2.5	0,17	0,25	0,33	0,25	1	3	5	5	0,05	0,017
2.6	0,14	0,2	0,2	0,2	0,33	1	3	2,07	0,02	0,007
2.7	0,14	0,2	0,17	0,2	0,2	0,33	1	2,24	0,02	0,0068
Total								98,17	1	0,34

Pesos relativos Seguridad										
Criterio	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	Total	Peso	Peso Relativo
3.1	1	3	4	5	6	7	8	34	0,32	0,07
3.2	0,33	1	2	4	5	5	7	24,33	0,23	0,051
3.3	0,25	0,5	1	2	3	5	6	17,75	0,17	0,037
3.4	0,2	0,25	0,5	1	3	4	5	13,95	0,13	0,029
3.5	0,17	0,2	0,33	0,33	1	3	4	9,03	0,08	0,018
3.6	0,14	0,2	0,2	0,25	0,33	1	4	6,12	0,06	0,013
3.7	0,13	0,14	0,17	0,2	0,25	0,25	1	2,14	0,02	0,004
Total								107,32	1	0,22

Pesos relativos Costo							
Criterio	4.1	4.2	4.3	4.4	Total	Peso	Peso Relativo
4.1	1	4	5	6	16	0,47	0,019
4.2	0,25	1	4	7	12,25	0,36	0,014
4.3	0,2	0,25	1	3	4,45	0,13	0,005
4.4	0,17	0,14	0,33	1	1,64	0,05	0,002
Total					34,34	1	0,04

10.3 Ficha técnica acero AISI 4140

Mechanical Properties	
Parámetro	Valor
Tensile strength, ultimate	655 Mpa
Tensile strength, yield	415 MPA
Modulus of elasticity	190-210 GPA
Shear modulus (typical for steel)	80 GPA
Bulk modulus (typical for steel)	140 GPA
Hardness, Brinell	197
Thermal Properties	
Thermal conductivity	42,6 W/mK
Thermal Expansion	12,2 (10-6/°C)

Fuente: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6769>

10.4 Ficha técnica Motorreductor 3273E de Phidgets

Parámetro	Valor
Tipo de Motor	Dc Motor
Potencia	30 W
Velocidad máxima al voltaje nominal	15 RPM
Par Nominal	173 kg·cm (17 Nm)
Par de detenimiento	1,2 Mkg·cm (120,9 Nm)
Voltaje Nominal	24 V DC
Corriente Nominal	2.2 A
Corriente de detenimiento	10.8 A
Diámetro del Eje	12 mm
Longitud del cable	300 mm
Masa	2 kg
Parámetro	Valor
Tipo de Reductora	Planetario

Parámetro	Valor
Ratio	167 ⁶⁰¹ / ₆₂₅ : 1
Numero de ruedas planetarias	4
Par máximo de la reductora	460 kg·cm
Carga axial máxima del eje	200 N
Carga radial máxima del eje	100 N
Error de backlash	3°

Fuente: http://www.phidgets.com/products.php?category=24&product_id=3274_1

10.5 Ficha técnica acero AISI 316

Mechanical Properties	
Parámetro	Valor
Tensile strength, ultimate	670 Mpa
Tensile strength, yield	415 MPA
Modulus of elasticity	190-210 GPA
Hardness, Brinell	197
Thermal Properties	
Thermal conductivity	16,2 W/mK
Thermal Expansion	15,9 (10-6/°C)
Emissivity	0,27

Fuente:

http://www.efunda.com/materials/alloys/alloy_home/show_alloy_found.cfm?ID=AISI_Type_316&show_pro
[p=all&Page_Title=AISI%20Type%20316](http://www.efunda.com/materials/alloys/alloy_home/show_alloy_found.cfm?ID=AISI_Type_316&show_pro)

10.6 Ficha técnica Latón 360

Mechanical Properties	
Parámetro	Valor
Tensile strength, ultimate	469 Mpa
Tensile strength, yield	310 MPA
Modulus of elasticity	97 GPA
Hardness, Brinell	78
Thermal Properties	
Thermal conductivity	16,2 W/mK
Thermal Expansion	20,5 (10-6/°C)

Fuente: <http://www.anchorbronze.com/c36000.htm>

10.7 Ficha técnica Motor 32204MD de Zhengke

Parámetro	Valor
Tipo de Motor	Dc Motor
Velocidad máxima al voltaje nominal	30 RPM
Par Nominal	14 kg·cm (1,4 Nm)
Voltaje Nominal	12 V DC
Corriente Nominal	1.1 A
Diámetro del Eje	6 mm
Longitud	63 mm
Masa	0,5 kg

Fuente: <http://www.mpja.com/12VDC-30-RPM-Gearhead-Motor/productinfo/32204+MD>

10.8 Ficha técnica Motor 32205MD de Zhengke

Parámetro	Valor
Tipo de Motor	Dc Motor
Velocidad máxima al voltaje nominal	50 RPM
Par Nominal	8,8 kg·cm (0,86 Nm)
Voltaje Nominal	12 V DC
Corriente Nominal	1.1 A
Diámetro del Eje	6 mm
Longitud	69,85 mm
Masa	0,5 kg

Fuente: <http://www.mpja.com/12VDC-30-RPM-Gearhead-Motor/productinfo/32204+MD>

10.9 Cálculo Conductividad del aire de acuerdo a características de operación

El cálculo de la conductividad del aire se hizo en el programa EES, y los cálculos se adjuntan a continuación:

$$k = k(\text{Air}_{\text{ha}}; T = T; P = P)$$

$$Pr = Pr(\text{Air}_{\text{ha}}; T = T; P = P)$$

$$v = \text{KinematicViscosity}(\text{Air}_{\text{ha}}; T = T; P = P)$$

$$B = \frac{1}{318}$$

$$T = 100 \text{ [C]}$$

$$P = 101,3 \text{ [kPa]}$$

$$\text{Diametro} = 0,03$$

$$T_s = 230$$

$$T_{\text{inf}} = 20$$

$$\text{gravity} = 9,81$$

$$Ra_d = Pr \cdot \text{gravity} \cdot B \cdot (T_s - T_{\text{inf}}) \cdot \frac{\text{Diametro}^3}{v^2}$$

$$v = \left[0,6 + \frac{0,387 \cdot Ra_d^{(1/6)}}{\left(1 + \left[\frac{0,559}{Pr} \right] \left[\frac{9}{16} \right] \right)^{(8/27)}} \right]^2$$

$$h = k \cdot \frac{v}{\text{Diametro}}$$

Resultados:

B = 0,003145	Diametro = 0,03	gravity = 9,81	h = 10,19	k = 0,03162
v = 9,667	P = 101,3 [kPa]	Pr = 0,7003	R _{ad} = 228399	T = 100 [C]
T _{inf} = 20	T _s = 230	v = 0,00002316		

10.10 Ficha técnica Band Heater A16113000UX0129 de ASSISI

Electric

Product Name	Band Heater
Material	Stainless Steel, Ceramic
Power	75W
Voltage	220V
Wishtand Temperature	400 Celsius
Dimension	30 x 30mm/ 1,1" x 1x18" (D*H)
Total Lenght	155mm/6,1"
Color	White, Silver Tone
Net Weight	74g
Package Content	1 x Stainless Steel Band Heater

Fuente: <http://www.ebay.com/itm/AC-220V-75W-30mm-x-30mm-Metal-Screw-Fixing-Circular-Flexible-Mica-Band-Heater-/122404260561?hash=item1c7fdccad1:g:pisAAOSwLsBZOob~>

10.11 Ficha técnica Band Heater A13062400UX1085 de ASSISI

Electric

Product Name	Band Heater
Material	Stainless Steel, Ceramic
Power	150W
Voltage	220V
Wishtand Temperature	400 Celsius
Dimension	30 x 30mm/ 1,1" x 1x18" (D*H)
Total Lenght	160mm/6,3"
Color	White, Silver Tone
Net Weight	81g
Package Content	1 x Stainless Steel Band Heater

Fuente: <http://www.ebay.com/itm/220V-150W-30mmx30mm-Ceramic-Band-Heater-for-Plastic-Injection-Machine-/291555090214?hash=item43e2099f26:g:KbAAAOSwZKBZNeXp>

10.12 Ficha técnica Ventilador 6010HH12C EC de EverCool

DC Fan Product

EC-5025xxxx

EC-6015xxxx

EC-6020xxxx

EC-6025xxxx

Model Type: tEC-6010xxxx

Dimension : 60 x 60 x 10 mm

Voltage	5V		12V		24V	
Fan Speed	LL	L	M	H	HH	TH
Certificate	UL		CE		TUV	
Bearing Type"	Sleeve		1 Ball	2 Ball	EL	

Model	Voltage VDC	Current AMP	Input Watts	Fan Speed RPM	AirFlow (Max) CFM	Pressure" InchH ₂ O	Noise dBA	Life Hour
EC6010HH12B	12	0.22	2.64	4800	20.18	0.15	<36	50000
EC6010HH12C								35000
EC6010HH12S								25000
EC6010HH12E								40000
EC6010H12B								50000
EC6010H12C	12	0.2	2.4	4400	17.7	0.12	<33	35000
EC6010H12S								25000
EC6010H12E								40000
EC6010M12B								50000
EC6010M12C								35000
EC6010M12S	12	0.16	1.92	4000	15.49	0.1	<30	25000
EC6010M12E								40000
EC6010L12B								50000
EC6010L12C								35000
EC6010L12S								25000
EC6010L12E	12	0.14	1.68	3600	15.03	1.78	<26	40000
EC6010HH24B								50000
EC6010HH24C								35000
EC6010HH24S								25000
EC6010HH24E								40000
EC6010H24B	24	0.18	4.32	4800	20.18	0.15	<36	50000
EC6010H24C								35000
EC6010H24S								25000
EC6010H24E								40000
EC6010M24B								50000
EC6010M24C	24	0.14	3.36	4000	15.49	0.1	<30	35000
EC6010M24S								25000
EC6010M24E								40000
EC6010L24B								50000
EC6010L24C								35000
EC6010L24S	24	0.12	2.88	3600	15.03	0.09	<26	25000
EC6010L24E								40000
EC6010LL24B								50000
EC6010LL24C								35000
EC6010LL24S								25000

Fuente: http://www.diotronic.com/docs/fan_ec60-pdf.pdf

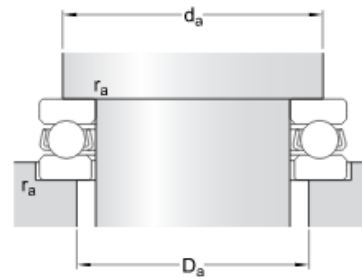
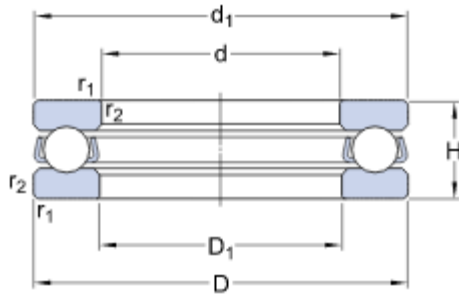
10.13 Ficha técnica Servomotor TowerPRO SG-5010 de Adafruit

Technical Details	
Parámetro	Valor
Power	4.8V - 6V DC max (5V works well)
Average Speed	0.2sec/60degree (@ 4.8V), 0.16sec/60degree (@ 6V)
Weight	39g (1.37 oz)
Torque	At 5V, 5.5kg-cm / 76oz-in, and at 6V 6.5kg-cm / 90oz-in.
Size mm	(L x W x H) 40 x 20.0 x 38 mm
Splice Count	25

Fuente: <https://www.adafruit.com/products/155>

10.14 Rodamientos

10.14.1 Rodamiento Husillo



Dimensiones	Valor	Unidad
d	12	mm
D	26	mm
H	9	mm
d1	26	mm
D1	13	mm
r1,2	0,3	mm
Dimensiones de los resaltes		
da	21	mm
Da	17	mm
ra	0,3	mm
Datos del Cálculo		
Capacidad de carga dinámica básica	10,4	kN
Capacidad de carga estática básica	16,6	kN
Carga límite de fatiga	0,62	kN
Velocidad de referencia	9000	r/min
Velocidad límite	13000	r/min
Factor de carga mínima	0,0014	-
Masa	0,022	kg

Fuente: <http://www.skf.com/cl/products/bearings-units-housings/ball-bearings/thrust-ball-bearings/single-direction/index.html?designation=51101&unit=metricUnit>

10.14.2 Rodamiento Sistema Puller

Rodamiento	
Inside Diameter	4 mm
Outside Diameter	9 mm
Width	4 mm
Bearing Material	Chrome Steel 52100
Ball Material	Chrome Steel 52100, ACEC #1/ISOPO
Enclosure	Two Shield
Enclosure Material	Chrome Steel
Retainer Material	Chrome Steel
Radial Play	P25
RPM Grease	53000
RPM Oil	63000

Fuente: <https://www.amazon.com/dp/B00DMFTXV2?psc=1>

10.14.3 Rodamiento Sistema Bobinado

Rodamiento	
Inside Diameter	6mm
Outside Diameter	17 mm
Width	6mm
Static Load Capacity	740 N
Dynamic Load Capacity	1950 N
Weight	4,5 g

Fuente: <https://www.thebigbearingstore.com/606-2rs-606-zz-radial-ball-bearing-6x17x6/>

10.15 Acoples

10.15.1 Acople Eje Husillo

Acople	
Material	Black-Oxide Steel
For Shaft Diameter	12mm
Overall Length	38mm
OD	22mm
Keyway	
Width	4mm
Depth	1.8mm
Maximum Speed	3,450 rpm
Maximum Torque	570 in.-lbs.
For Shaft Type	Keyed
For Shaft Misalignment Type	None
For Motion Type	Forward/Reverse, Start/Stop, Continuous
Shaft Coupling Type	Rigid
Construction	One Piece
Shaft Mount Type	Set Screw
Set Screw	
Type	Hex Socket
Material	Steel
Number Included	2
RoHS	Compliant

Fuente: <https://www.mcmaster.com/#5395t412/=18554gb>

10.15.2 Acople Eje Puller y Sistema Bobinado

Acople	
Material	Black-Oxide Steel
For Shaft Diameter	6mm
Overall Length	20mm
OD	15mm
Maximum Speed	3,450 rpm
Maximum Torque	34 in.-lbs.
For Shaft Type	Round
For Shaft Misalignment Type	None
For Motion Type	Forward/Reverse, Start/Stop, Continuous
Shaft Coupling Type	Rigid
Construction	One Piece
Shaft Mount Type	Set Screw
Set Screw	
Type	Hex Socket
Material	Steel
Number Included	2
RoHS	Compliant

Fuente: <https://www.mcmaster.com/#5395T111>

10.16 Información General de los polímeros

Los polímeros son materiales compuestos de cadenas de unidades repetidas llamadas monómeros, donde las propiedades de cada polímero dependerán en gran medida a la estructura de sus moléculas individuales, la forma y el tamaño de la molécula. El proceso de unión de estos monómeros se llama polimerización. Los polímeros se categorizan en tres grupos de acuerdo a su comportamiento mecánico y naturaleza: termoestables, termoplásticos y elastómeros.

- **Termoplásticos:** los termoplásticos son polímeros lineales (sus átomos se arreglan más o menos en una larga cadena), ya sean ramificados o no. Al no encontrarse entrecruzados entre sus líneas, son polímeros solubles en ciertos disolventes orgánicos, y por lo tanto, son reciclables. Los termoplásticos pueden presentar una temperatura de transición vítrea T_G en caso de ser amorfos o una temperatura de fusión T_M en caso de un material cristalino superior a la temperatura ambiente. Generalmente, no existe un material 100% cristalino, por lo que se registran con temperaturas T_G de la parte amorfa y una temperatura T_M de la parte cristalina. Estos compuestos son de carácter sólido a temperatura ambiente, pero al aumento de temperatura, cambian su estado a líquidos viscosos. Lo interesante de los termoplásticos, es que se pueden fundir y solidificar varias veces.
- **Termoestables:** los termoestables no son polímeros lineales, estos adquieren un estado final reticulado o entrecruzado (átomos enlazados), por lo que los hace incapaces de fundirse. Poseen métodos de transformación lentos y presentan buenas propiedades a altas temperaturas. Al ser estables térmicamente, es difícil reprocesarlos, ya que no permiten más ciclos de calentamiento, por lo que, al cambiar de forma, será difícil volver atrás.
- **Elastómeros:** Estos compuestos poseen dobles enlaces (comparten dos electrones) en la cadena principal. Las cadenas de estos polímeros se encuentran enrolladas sobre sí mismas, por lo que confieren una gran flexibilidad. Los elastómeros casi no sufren deformación plástica cuando se les aplica tensión, por lo que pueden deformarse y volver a su forma original.

En la tecnología de impresión 3D FDM se suelen utilizar materiales termoplásticos, debido al proceso de impresión, un filamento extruido que es depositado sobre una cama para dar forma al objeto. El comportamiento de los termoplásticos depende de muchas variables, así como su estructura y composición. Entre los más importantes, están la temperatura y la velocidad de deformación.

En impresión 3D mediante la tecnología FDM, se comercializan muchos polímeros en forma de filamentos: ABS, PLA, Nylon, PE, PETT, PETG, entre muchos otros [4]. De ellos los primeros y más empleados, son el ABS y el PLA, que continúan siendo los más populares en la actualidad [5]. En la Tabla 42 se muestran los principales polímeros empleados en extrusión.

Tabla 42: Propiedades de los polímeros empleados en extrusión [6]

Material	Punto de Fusión [°C]	Transición Vítrea [°C]	Densidad [g/cc]	Conductividad Térmica k [J/msC]	Calor Específico, Cp [KJ/kgC]
PS	-	101	1,06	0,12	1,2
PVC	-	80	1,4	0,21	1,1
PMMA	-	105	1,18	0,2	1,45
SAN	-	115	1,08	0,12	1,4
ABS	-	115	1,02	0,25	1,4
PC	-	150	1,2	0,19	1,4
PLA	-	60	1,25	0,13	1,8
LDPE	120	-120	0,92	0,24	2,3
LLDPE	125	-120	0,92	0,24	2,3
HDPE	130	-120	0,95	0,25	2,25
PP	175	-10	0,91	0,15	2,1
PA-6	225	50	1,13	0,25	2,15
PA-6,6	265	55	1,14	0,24	2,15
PET	275	70	1,35	0,29	1,55
PBT	250	45	1,35	0,21	1,25
PVF	275	-40	1,76	0,16	1,38
PA-6,6	275	70	2,15	0,2	1,18

10.16.1 PROPIEDADES DE LOS POLÍMEROS

El proceso de extrusión dependerá en gran medida del plástico a utilizar y las propiedades del polímero, por ello, a continuación se detallan algunas propiedades relevantes para el proceso.

10.16.1.1 Viscosidad

Una definición informal de la viscosidad, es la resistencia a fluir de un material. En una definición estricta, la viscosidad (η), es la relación entre el esfuerzo cortante (τ) y el gradiente de velocidad del fluido ($\dot{\gamma}$):

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

En sí, los polímeros fundidos presentan una alta viscosidad, se resisten a fluir, por lo que es una buena propiedad que permite que sean procesados por extrusión.

Un fluido se conoce como newtoniano si su viscosidad es independiente del gradiente de velocidad (taza de cizallamiento, *shear rate*) que se le aplique. En el caso de los plásticos, pertenecen a los fluidos no newtonianos, ya que tienen un comportamiento llamado pseudoplástico. Esta característica, implica que la viscosidad disminuye a medida que el gradiente de velocidad que se somete el fluido aumenta. Por lo tanto, en un polímero procesado, que se ve sometido a esfuerzos cortantes, disminuirá su viscosidad si aumenta la velocidad de procesamiento. Otro elemento a considerar, es la temperatura de trabajo, debido a que la viscosidad depende en gran manera de ello, a mayor temperatura, la viscosidad del polímero disminuye.

10.16.1.2 *Melt Flow Index (MFI)*

El *Melt Flow Index* (MFI) es un índice que indica la facilidad de fluir de un polímero. Para determinar dicho índice, se emplea un procedimiento normado descrito en la norma ISO 1133-1 o en ASTM D-1238 [7]. Según esta norma, es una prueba con una duración de 10 minutos, en la cual se calienta una muestra del polímero a estudiar, y se somete a una presión ejercida por un peso determinado, haciendo fluir el material a través de un orificio. En el resultado del test, se expresa la masa que ha fluido a través del orificio en gramos/10 minutos. El índice obtenido es en función de la presión, el diámetro del orificio (el estándar es de

2,0955 [mm] de diámetro y 8,000 [mm] en largo) y la viscosidad. Cuanto mayor sea el índice evaluado, menor será su viscosidad, y por lo tanto, el peso molecular promedio del polímero es menor. Polímeros de mayor peso molecular serán más viscosos y fluirán menos en las mismas condiciones debido al índice [19].

En impresión 3D, es necesario trabajar con polímeros con alta fluidez, para que puedan ser procesados por el extrusor de la impresora 3D.

10.16.1.3 Temperatura de fusión y transición vítrea

En los polímeros existe una temperatura llamada temperatura de transición vítrea T_G , por debajo de la cual los polímeros amorfos presentan muchas propiedades asociada a vidrios inorgánicos ordinarios, como la rigidez, fragilidad o transparencia, por lo cual es rígido y quebradizo. Con esta temperatura, el polímero empieza a experimentar grandes cambios en sus propiedades. Por encima de ella, el polímero comienza a aumentar su plasticidad, por lo que disminuye su dureza, densidad y rigidez. Conforme se eleva la temperatura por sobre la transición, el polímero aumenta gradualmente su fluidez, estando en un estado blando y flexible.

No hay que malinterpretar la temperatura de transición vítrea con algún tipo de fusión del material. La fusión ocurre en polímeros cristalinos y la transición vítrea en polímeros amorfos. Como se comentó en un apartado anterior, es difícil conseguir un polímero totalmente cristalino, por lo que habitualmente se encontrarán con una temperatura de fusión T_M y una temperatura de transición vítrea T_G en los polímeros semicristalinos. Los polímeros amorfos sólo presentan una temperatura de transición, la T_G .

La diferencia más característica entre ambas temperaturas, desde el punto de vista térmico, es como absorbe el calor el material. Al calentar un polímero cristalino a velocidad constante, se verá un aumento de la temperatura (el calor requerido para aumentar la temperatura es la capacidad calorífica). Sin embargo, en este caso, al llegar al punto de fusión del material, la temperatura se mantiene constante mientras se sigue suministrando calor, debido a que la fusión requiere energía para producirse. Pasado este punto, se necesita más calor para aumentar la temperatura, por lo tanto, tiene más capacidad calorífica.

Al tratar con un polímero amorfo y calentarlo a la temperatura de transición vítrea, no existe un punto de calor latente, si no que la temperatura seguirá subiendo de manera normal sin

detenerse. Pasada la T_G , la velocidad de calentamiento no es la misma y se produce un aumento de la capacidad calorífica del material.

En la Figura 82, se puede observar para un polímero 100% cristalino (izquierda) que, al alcanzar la temperatura de fusión, se produce un incremento del flujo de calor, pero no la temperatura. En la derecha, que representa la transición vítrea, no hay una ruptura en la curva durante el aumento de temperatura, sólo se incrementa la pendiente, lo que tiene relación con la capacidad calorífica.

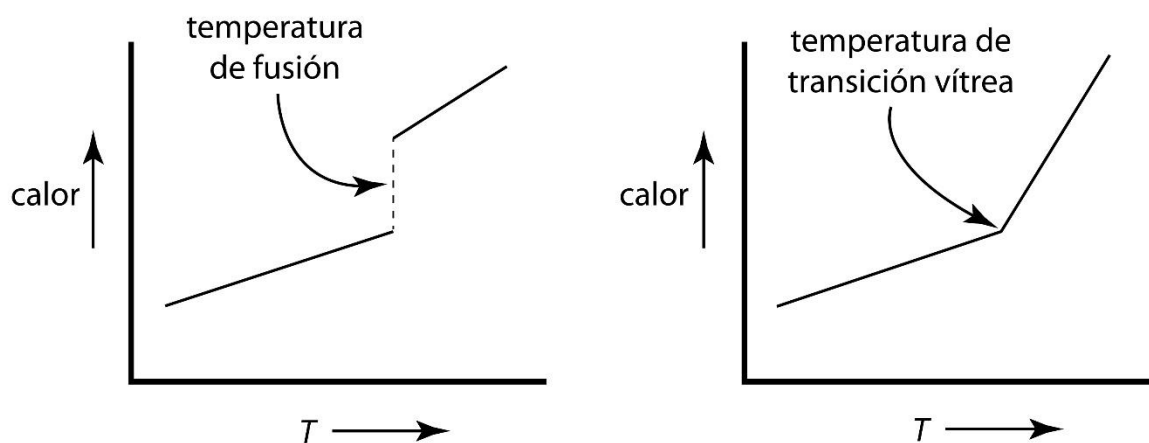


Figura 82: Calor vs Temperatura para un polímero cristalino (izquierda) y uno amorfo (derecha) [20]

10.17 Tiempo por vuelta de carretes para el distribuidor de filamentos

Tabla 43: Perímetros, vueltas y tiempo por vuelta del carrete, para una boquilla de 1,75 [mm].

Número de Vuelta	Diámetro interior Carrete [mm]	Perímetro [mm]	Vuelta en Metros [m]	Metros Acumulados [m]	Tiempo en Pasada [s]
1	65	204,20	6,30	6,30	226
2	68,5	215,20	6,64	12,94	238
3	72	226,19	6,98	19,92	250
4	75,5	237,19	7,32	27,24	262
5	79	248,19	7,66	34,90	274
6	82,5	259,18	8,00	42,90	286
7	86	270,18	8,34	51,23	299
8	89,5	281,17	8,68	59,91	311
9	93	292,17	9,02	68,92	323
10	96,5	303,16	9,35	78,28	335
11	100	314,16	9,69	87,97	347
12	103,5	325,15	10,03	98,01	359
13	107	336,15	10,37	108,38	371
14	110,5	347,15	10,71	119,09	384
15	114	358,14	11,05	130,14	396
16	117,5	369,14	11,39	141,53	408
17	121	380,13	11,73	153,26	420
18	124,5	391,13	12,07	165,33	432
19	128	402,12	12,41	177,74	444
20	131,5	413,12	12,75	190,49	457
21	135	424,12	13,09	203,58	469
22	138,5	435,11	13,43	217,00	481
23	142	446,11	13,77	230,77	493
24	145,5	457,10	14,10	244,87	505
25	149	468,10	14,44	259,32	517
26	152,5	479,09	14,78	274,10	529
27	156	490,09	15,12	289,22	542
28	159,5	501,08	15,46	304,68	554
29	163	512,08	15,80	320,49	566
30	166,5	523,08	16,14	336,63	578

Número de Vuelta	Diámetro interior Carrete [mm]	Perímetro [mm]	Vuelta en Metros [m]	Metros Acumulados [m]	Tiempo en Pasada [s]
31	170	534,07	16,48	353,11	590
32	173,5	545,07	16,82	369,93	602
33	177	556,06	17,16	387,08	615
34	180,5	567,06	17,50	404,58	627

Tabla 44: Perímetros, vueltas y tiempo por vuelta del carrete, para una boquilla de 3 [mm].

Número de Vuelta	Diámetro interior Carrete [mm]	Perímetro [mm]	Vuelta en Metros [m]	Metros Acumulados [m]	Tiempo en Pasada [s]
1	65	204,20	3,68	3,68	177
2	72	226,19	4,07	7,75	196
3	79	248,19	4,47	12,21	215
4	86	270,18	4,86	17,08	234
5	93	292,17	5,26	22,34	253
6	100	314,16	5,65	27,99	272
7	107	336,15	6,05	34,04	291
8	114	358,14	6,45	40,49	310
9	121	380,13	6,84	47,33	329
10	128	402,12	7,24	54,57	348
11	135	424,12	7,63	62,20	367
12	142	446,11	8,03	70,23	386
13	149	468,10	8,43	78,66	405
14	156	490,09	8,82	87,48	424
15	163	512,08	9,22	96,70	443
16	170	534,07	9,61	106,31	462
17	177	556,06	10,01	116,32	481
18	184	578,05	10,40	126,73	501
19	191	600,04	10,80	137,53	520

10.18 Factores Fatiga

10.18.1 Factores de acabado superficial

Tabla 45: Factores de acabado superficial

Acabado de Superficie	Factor a		Exponente b
	kpsi	Mpa	
Esmerilado (Rectificado)	1,34	1,59	-0,086
Maquinado o laminado en frío	2,67	4,45	-0,265
Laminado en Caliente	14,5	56,1	-0,719
Forjado	39,8	271	-0,995

10.18.2 Factor Efectos Diversos.

Tabla 46: Estimación de primera iteración de los factores de concentración del esfuerzo [31].

	Flexión	Torsión	Axial
Filete de hombro: agudo ($r/d = 0,02$)	2,7	2,2	3
Filete de hombro: bien redondeado ($r/d = 0,1$)	1,7	1,5	1,9
Cuñero Fresado ($r/d = 0,02$)	2,2	3,2	-
Cuñero de patín o trapezoidal	1,7	-	-
Ranura para anillo de retención	5	3	5

10.18.3 Factor Concentración de Esfuerzos en Chaveteros.

Tabla 47: Factores de concentración de esfuerzos en cuñero [34]

Clase de Chavetero	Recocido		Endurecido	
	Flexión	Torsión	Flexión	Torsión
Perfil	1,6	1,3	2	1,6
De patin	1,3	1,3	1,6	1,6

10.19 Dimensiones cuñas cuadradas

Tabla 48: Dimensiones en mm de cuñas cuadradas [32].

Diámetro del árbol d, mm	Medida nominal de la chaveta, mm		Medida nominal del chavetero, mm				
	bxh	Chafilán S		Profundidad		Radio r	
		Max	Min	En el árbol, t1	En el cubo, t2	Max	Min
6 a 8	2x2	0,25	0,16	1,2	1	0,16	0,08
8 a 10	3x3			1,8	1,4		
10 a 12	4x4			2,5	1,8		
12 a 17	5x5	0,4	0,25	3	2,3	0,25	0,15
17 a 22	6x6			3,5	2,5		
22 a 30	7x7			4	3,3		
22 a 30	8x7			4	3,3		
30 a 38	10x8	0,6	0,4	5	3,3	0,4	0,25
38 a 44	12x8			5	3,3		
44 a 50	14x9			5,5	3,8		
50 a 58	16x10			6	4,3		
58 a 65	18x11			7	4,4		
65 a 75	20x12	0,8	0,6	7,5	4,8	0,6	0,4
75 a 85	22x14			9	5,4		
85 a 95	25x14			9	5,4		
95 a 110	28x16			10	6,4		
110 a 130	32x18			11	7,4		
130 a 150	36x20	1,2	1	13	8,4	1	0,7
150 a 170	40x22			13	9,4		
170 a 200	45x25			15	10,4		
200 a 230	50x26			17	11,4		

10.20 Diseño Vástago del Husillo

Para el diseño de un eje, se debe determinar un diámetro adecuado para la transmisión de potencia bajo ciertas condiciones de carga. El diseño de un eje se debe calcular mediante los esfuerzos y resistencias presentes en él y verificar por fatiga [31].

Lo primero, es verificar que el eje no fallará inmediatamente luego de aplicar las cargas de trabajo, para la cual existen dos teorías de comprobación, la primera, la Teoría del esfuerzo cortante máximo, para condiciones con carga axial, momento flector y momento torsor, y la segunda, la teoría de Von Mises [31]. Con estas dos teorías, se calculará el diámetro mínimo del eje para que no falle por las cargas aplicadas.

Empleando la teoría del esfuerzo cortante máximo para ejes en flexión y torsión:

$$d^3 \geq \frac{32 * n}{\pi * S_y} \sqrt{\left(M_f + F_a * \frac{d_h}{8}\right)^2 + T^2}$$

Donde

d :	Diámetro mínimo del eje [m]
n :	Factor de Seguridad [-]
S_y :	Límite de fluencia del material [Pa]
M_f :	Momento Flector [Nm]
F_a :	Fuerza Axial de operación [N]
d_h :	Diámetro Husillo [m]
T :	Momento Torsor [Nm]

Se calcula el diámetro mínimo, con un factor de seguridad de 3, un límite de fluencia de 410 [MPa] para el AISI 4140:

$$d^3 \geq \frac{32 * 3}{\pi * 410 * 10^6} \sqrt{\left(0,62 + 864,9 * \frac{0,016}{8}\right)^2 + 10,8^2}$$
$$d \geq 9,3 [mm]$$

Ahora, empleando la teoría de Von Mises para determinar el diámetro:

$$d^3 \geq \frac{32 * n}{\pi * S_y} \sqrt{\left(M_f + F_a * \frac{d_h}{8}\right)^2 + 3 * \left(\frac{T}{2}\right)^2}$$

Donde

d :	Diámetro mínimo del eje [m]
n :	Factor de Seguridad [-]
S_y :	Límite de fluencia del material [Pa]
M_f :	Momento Flector [Nm]
F_a :	Fuerza Axial de operación [N]
d_h :	Diámetro Husillo [m]
T :	Momento Torsor [Nm]

Se calcula el diámetro mínimo, con un factor de seguridad de 3, un límite de fluencia de 410 [MPa] para el AISI 4140:

$$d^3 \geq \frac{32 * 3}{\pi * 410 * 10^6} \sqrt{\left(0,62 + 864,9 * \frac{0,016}{8}\right)^2 + 3 * \left(\frac{10,8}{2}\right)^2}$$

$$d \geq 8,9 [mm]$$

Luego, se verifica el diámetro calculado mediante la falla por fatiga. Su evaluación no se debe realizar en todos los puntos de un eje, sólo se hará en los puntos potencialmente críticos, las cuales pueden estar ubicadas en: superficie exterior, ubicaciones axiales donde el momento flexionante es grande, donde el par de torsión está presente y donde existen concentraciones de esfuerzo.

En la Figura 83, se presenta un diagrama de cuerpo libre de las tensiones sobre el eje. Sobre él actúa una carga uniformemente repartida q , debido a su peso, una reacción N , en el apoyo del eje en el rodamiento y un momento torsor M_t , debido al giro del motor. La fuerza axial de la Figura 50 que produce un momento flector en el eje, se ha omitido debido a su pequeña magnitud en operación (0,019 [Nm]).

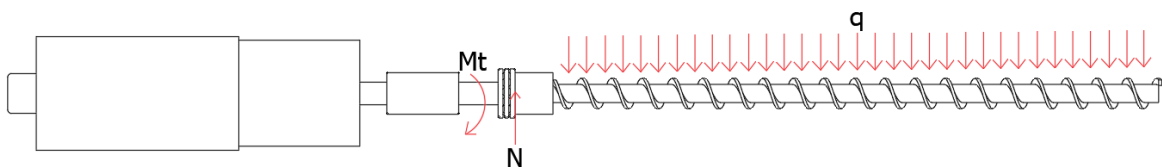


Figura 83: Diagrama de cuerpo libre del husillo.

Las magnitudes de estas fuerzas se pueden encontrar en el apartado 5.1.1.7 Fuerzas en el husillo.

En el caso puntual de esta aplicación, como muestra la Figura 83, el momento torsor se aplica sobre todo el eje de manera uniforme y el momento flector producido por la carga q es máximo en el apoyo, donde está el máximo, por lo que los puntos críticos a trabajar serán donde existe concentración de esfuerzos: en el hombro del husillo para el apoyo rodamiento y en el cuñero o chavetero. Los diagramas de momento flector y torsor en el eje, se presentan en la Figura 84 y Figura 85.

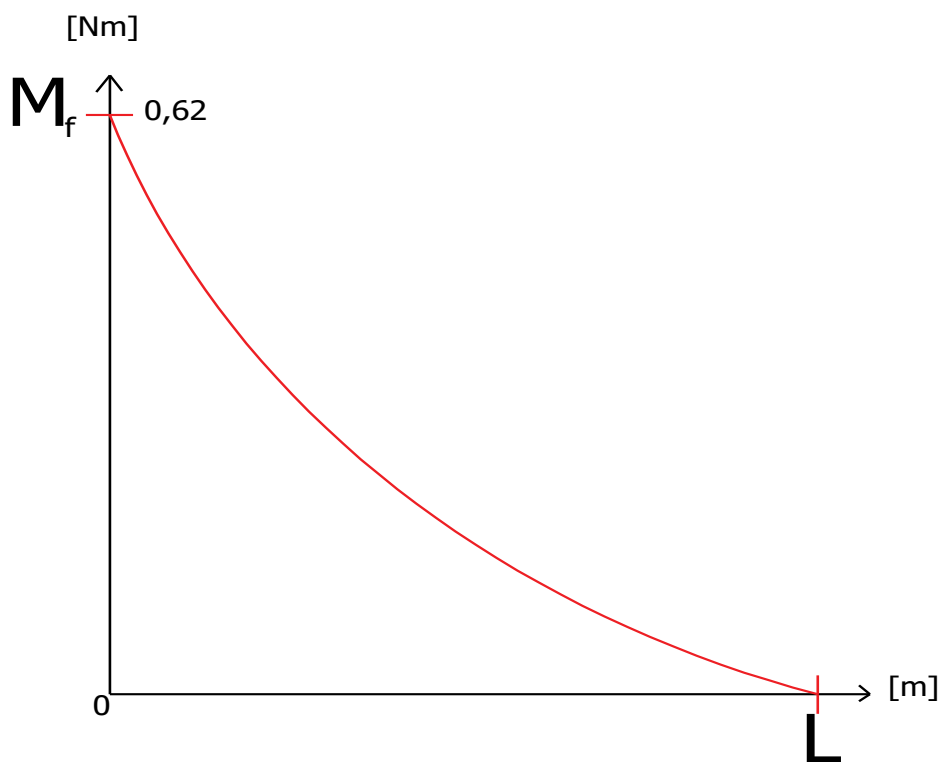


Figura 84: Momento Flector en el eje.

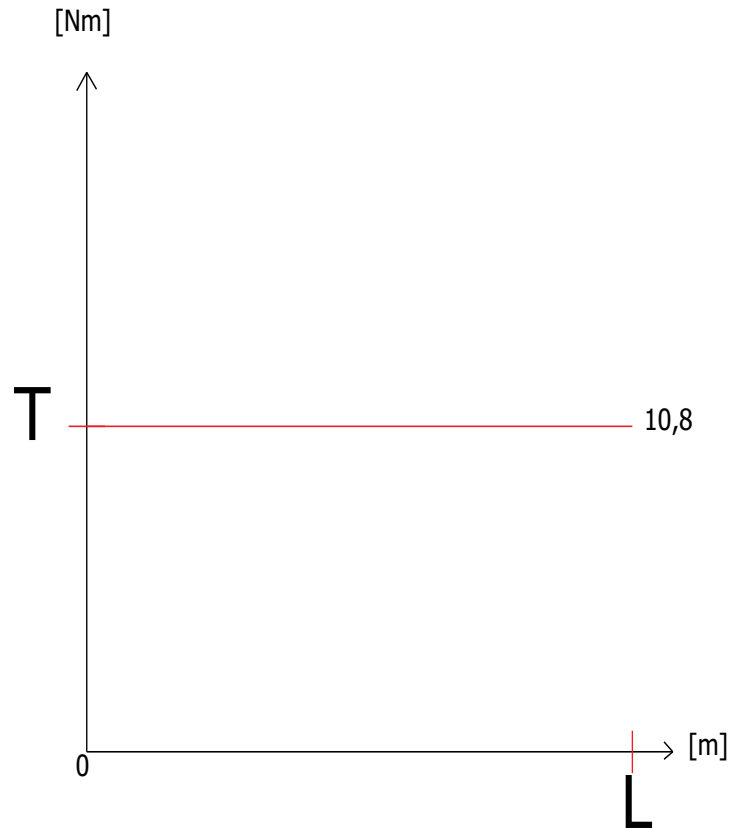


Figura 85: Momento torsos en el eje.

Para la estimación del factor de seguridad por fatiga del diámetro calculado, se determinará el factor por el criterio de la fórmula elíptica de la norma ASME [31]. Este criterio es bueno para un diseño inicial, puesto que es bastante conservador. Su cálculo viene dado por:

$$\left(\frac{\sigma'_a}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{\sigma'_m}{S_y}\right)^2 = \frac{1}{n^2}$$

Donde

n :	Factor de Seguridad [-]
S_e :	Límite de resistencia a la fatiga del elemento [Pa]
S_y :	Límite de resistencia a la tracción [Pa]
σ'_a :	Resistencia Alternante [Pa]
σ'_m :	Resistencia media [Pa]

El límite de resistencia a la fatiga del elemento depende de múltiples factores, representados por [31]:

$$S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * S_e'$$

Donde

S_e' : Límite de resistencia a la fatiga de la muestra [Pa]

k_a : Factor de superficie [-]

k_b : Factor de tamaño o forma [-]

k_c : Factor de Carga [-]

k_d : Factor de Temperatura [-]

k_e : Factor de Efectos Diversos [-]

Para el cálculo de S_e' , se emplea la fórmula:

$$S_e' = 0,504 * S_{ut}$$

Ya que el límite de tracción es menor a 1400 [MPa], por lo que se obtiene:

$$S_e' = 0,504 * 655 = 330,12 \text{ [MPa]}$$

Para el cálculo de k_a , el cual depende del acabado superficial y de la resistencia a la tensión, se emplea la fórmula:

$$k_a = a * S_{ut}^b$$

Donde

a : Factor dependiente de la resistencia a la tracción [-]

S_{ut} : Límite de resistencia a la tracción del material [Pa]

b : Factor dependiente de la resistencia a la tracción [-]

Como la pieza se debe mecanizar, el factor del acabado superficial debe ser [Anexo 10.18.2]:

$$k_a = 4,45 * 655^{-0,265}$$

$$k_a = 0,79$$

Para el cálculo de k_b , el cual depende del tamaño o forma, se emplea la fórmula:

$$k_b = \left(\frac{d}{7,62} \right)^{-0,1133} [mm] \text{ para } 2,79 \leq d \leq 51 [mm]$$

Como parámetro inicial se tiene que el diámetro debe ser 9,3 [mm] mínimo, por lo cual el factor debe ser:

$$k_b = \left(\frac{9,3}{7,62} \right)^{-0,1133} = 0,977$$

Para el cálculo de k_c , el cual depende de la carga, estará sometido a flexión y torsión, pero como la torsión esta combinada con otros esfuerzos, se debe utilizar la carga por flexión, por lo cual se emplea la fórmula:

$$k_c = 1$$

Para el cálculo de k_d , el cual depende de la temperatura, se emplea la fórmula:

$$k_d = 1$$

Ya que la resistencia del elemento no varía en los límites de la temperatura de trabajo.

Para el cálculo de k_e , el cual depende de efectos diversos, se emplea la fórmula:

$$k_e = \frac{1}{K_f}$$

Donde

K_f :	Factor de concentración del esfuerzo por fatiga [-]
K_{fs} :	Factor de concentración del esfuerzo en Torsión [-]
K_f :	Factor de concentración del esfuerzo en flexión [-]

En este caso, el eje presentará concentración de esfuerzos en el hombro del husillo y en el chavetero, por lo cual existen dos factores de concentración por fatiga. El factor de concentración se obtiene de la Tabla 46, para estimaciones conservadoras. En el caso del

hombro del husillo, el radio de entalle esta limitado por las especificaciones del rodamiento, por lo que su radio será de $r = 0,2$ [mm], de acuerdo a la Tabla 46 se obtiene:

$$K_t = 2,2 \text{ y } K_{ts} \approx 3,0 [-]$$

En el caso del chavetero, el factor viene dado por la Tabla 47, para un perfil recocido, de acuerdo ello, se obtiene:

$$K_t = 1,6 \text{ y } K_{ts} \approx 1,3 [-]$$

Por lo cual el hombro del husillo será más de crítico que el chavetero, debido a que sus índices son de mayor magnitud, por lo que se utilizará este factor para los calculos. Por medida de seguridad y siendo conservadores, se utilizará $K_{fs} = K_{ts}$.

Así, el límite de resistencia a la fatiga del elemento se calcula por:

$$S_e = 0,79 * 0,977 * 1 * 1 * \frac{1}{3} * 330,12 = 85,8 \text{ [MPa]}$$

La resitenacia alternate y media se calculan por [31]:

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_a^2 + 3 * \tau_a^2}$$

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_m^2 + 3 * \tau_m^2}$$

Como el momento torsor y flector son constantes en el vástago, la ecuación se simplifica al igualar τ_a y σ_m a 0. Con ello, las ecuaciones quedan:

$$\sigma'_a = \frac{M_f * 32}{\pi * d^3}$$

$$\sigma'_a = 7,73 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma'_m = \sqrt{3} * \left(\frac{T * 16}{\pi * d^3} \right)$$

$$\sigma'_m = 117 \text{ [MPa]}$$

Así, el factor de seguridad por fatiga del diámetro calculado, bajo la ecuación elíptica de la norma ASME, será:

$$\left(\frac{7,73}{85,8}\right)^2 + \left(\frac{117}{410}\right)^2 = \frac{1}{n^2}$$

$$n = 3,3$$

Por lo tanto, el diámetro del eje debe ser mayor a 9,35 [mm] para tener un factor de seguridad de 3, por lo tanto, el diámetro del vástago seleccionado será de 12 [mm] para que coincida con el del motor.

10.21 Diseño chaveta en el husillo

La chaveta o cuña es un elemento mecánico, que se inserta entre dos elementos que son solidarios, como elemento de fijación. En la aplicación actual, es el encargado de transmitir el par torsional entregado por el motor del husillo y así, generar el movimiento.

La chaveta se encuentra localizada al inicio del eje del husillo, en un orificio axial que se le denomina chavetero, como se muestra en la Figura 86. En la Figura 87, se muestra una chaveta con sus medidas nominales.

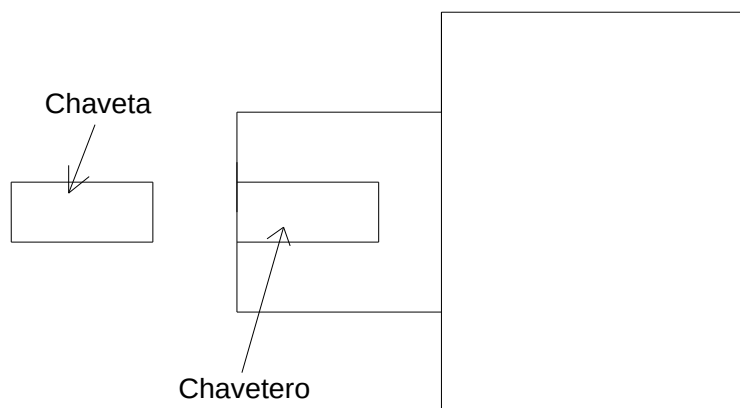


Figura 86: Chaveta y Chavetero.

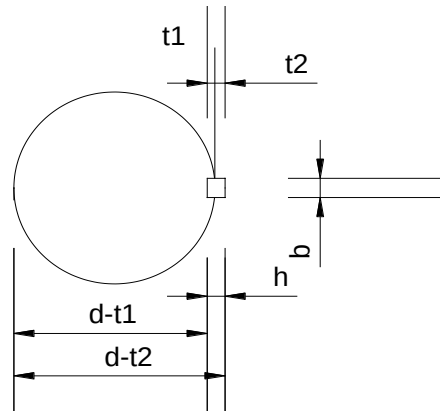


Figura 87: Medidas Nominales Chaveta.

Donde

- b : Base de la cuña [mm]
 h : Altura de la cuña [mm]
 d : Diámetro del eje [mm]
 t_1 : Medida insertada en el eje [mm]
 t_2 : Medida que sobresale del eje [mm]

Para este caso, se utilizó una cuña cuadrada, debido a que este tipo de chavetas son útiles con ejes pequeños.

De acuerdo al tamaño del eje de 12 [mm], se debe seleccionar una medida estándar para la chaveta, seleccionada de la Tabla 48, en el anexo 10.19.

Por lo tanto, los valores seleccionados serán:

$$b = 4 \text{ [mm]}$$

$$h = 4 \text{ [mm]}$$

$$t_1 = 2,5 \text{ [mm]}$$

$$t_2 = 1,8 \text{ [mm]}$$

Con los parámetros de la chaveta seleccionada, se deben verificar los esfuerzos presentes en ella para un correcto diseño. Los esfuerzos que se producen en la cuña serán dos: de Corte y de Aplastamiento.

El par de torsión aplicado en el eje será el calculado en el husillo, de 10,8 [Nm], por lo que la fuerza aplicada sobre la superficie del eje será:

$$F = \frac{M_t}{r} = \frac{10,8}{\frac{0,012}{2}} = 1807 \text{ [N]}$$

La falla por corte se aplicará a lo largo (l) de la altura de la cuña, con un esfuerzo de:

$$\tau = \frac{F}{l * b}$$

Sustituyendo el esfuerzo de corte por la resistencia del material dividido por el factor de seguridad, se debe cumplir [31]:

$$\frac{S_y}{2n} > \frac{F}{l * b}$$

Con un factor de seguridad de 3 y un esfuerzo de fluencia para la chaveta de 195 [MPa] (para un SAE 1020), se obtiene un largo mínimo de:

$$l > \frac{F * 2 * n}{b * S_y} = 13,9 [mm]$$

Para resistir el aplastamiento, se utiliza el área de la mitad de la cara de la cuña [31]:

$$\frac{S_y}{n} > \frac{F}{l * \frac{h}{2}}$$

Con un factor de seguridad de 3 y un esfuerzo de fluencia para la chaveta de 195 [MPa] (para un SAE 1020), se obtiene un largo mínimo de:

$$l > \frac{F * n}{\frac{h}{2} * S_y} = 13,9 [mm]$$

Por lo tanto, la geometría de la chaveta debe ser:

$$b = 4 [mm]$$

$$h = 4 [mm]$$

$$l_{min} = 13,9 [mm]$$

$$t_1 = 2,5 [mm]$$

$$t_2 = 1,8 [mm]$$

10.22 Proyecto Precious Plastics

El proyecto Open Source “*Precious Plastic*”[24], está encargado de desarrollar máquinas de nivel industrial para trabajar con plástico reciclable y de esta forma, ayudar al medioambiente. La idea principal es permitir a las personas, en cualquier parte del mundo, transformar los desechos plásticos en objetos valiosos. El proyecto consta del desarrollo de

una máquina Extrusora, Inyectora, Compresora y Trituradora. El sistema de triturado para este proyecto, será el creado por *Precious Plastic*.

La trituradora expuesta, consta de distintos cuchillos trituradores para cumplir el objetivo. Existen dos tipos:

- Cuchillas Trituradoras móviles
- Cuchillas Trituradoras fijas

A continuación, se describe cada uno de los elementos seleccionados para el sistema de molienda.

Cuchillas Trituradoras Móviles

Las cuchillas trituradoras móviles son las encargadas de girar y moler el material, presionándolo contra las cuchillas fijas. El material de ellas debe ser acero con una buena resistencia al desgaste, larga vida útil y una gran dureza. Para ello se utiliza un acero AISI 304.

El diseño de *Precious Plastic* posee tres tipos de cuchillas trituradoras móviles, las cuales varían con respecto al ángulo de eje hexagonal. Una imagen del modelo CAD de las cuchillas se encuentra en la Figura 88.

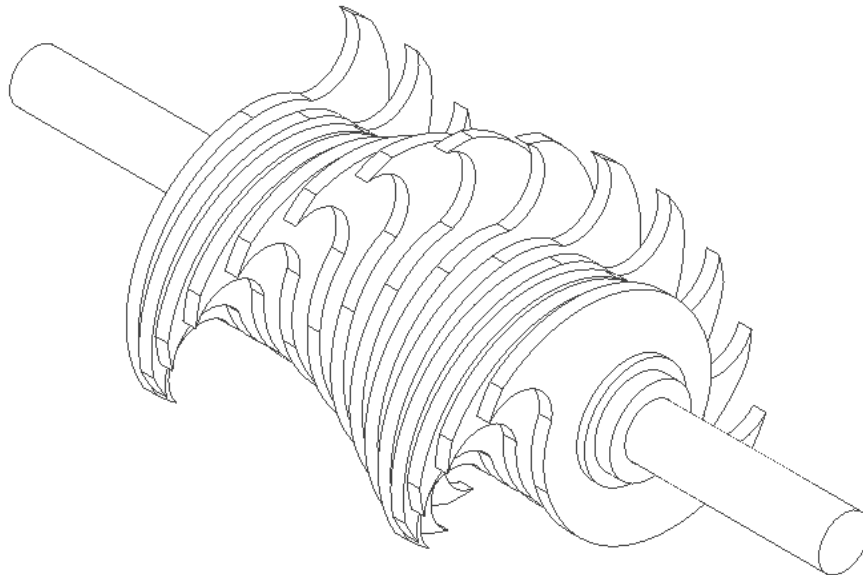


Figura 88: Modelo CAD de las cuchillas trituradoras móviles [24].

Cuchillas Trituradoras Fijas

Las cuchillas trituradoras fijas son las encargadas de moler el material, a través de la presión ejercida por las cuchillas móviles. El material de ellas debe ser acero con una buena resistencia al desgaste, larga vida útil y una gran dureza. Para ello se utiliza un acero AISI 304.

El diseño de *Precious Plastic* posee dos tipos de cuchillas trituradoras fijas, las cuales varían con respecto al tamaño de las cuchillas móviles. Una imagen del modelo CAD de las cuchillas se encuentra en la Figura 89.

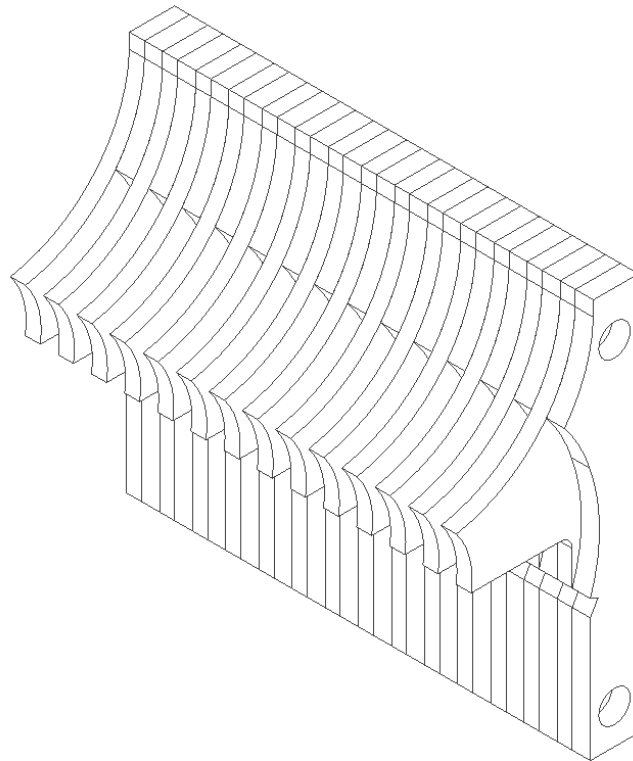


Figura 89: Modelo CAD de las cuchillas trituradoras fijas [24].

10.23 Montaje de Piezas

En este apartado, se presenta el montaje de las piezas del sistema extrusor desarrollado en el software CAD Inventor 2015.

10.23.1 Base de la Extrusora

Para ensamblar los componentes asociados a la base la extrusora, se deben guiar por las siguientes figuras y detalles.

La base de la extrusora es la guía principal para el resto de los componentes, su unión se hace a la base de madera de la extrusora, mediante 6 tornillos M5 con una longitud de 12 [mm], como lo muestra la Figura 90.

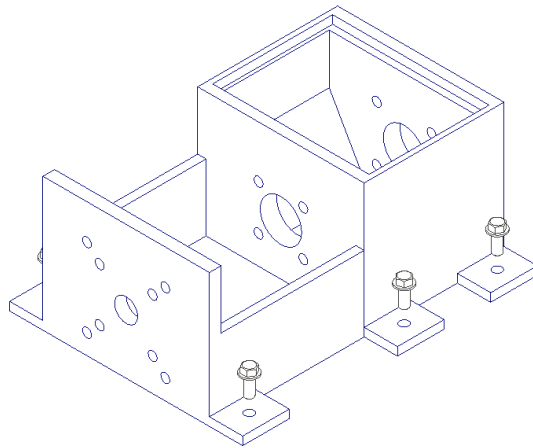


Figura 90: Vista Explosionada Base Extrusora

La Figura 91 muestra el montaje de la base extrusora.

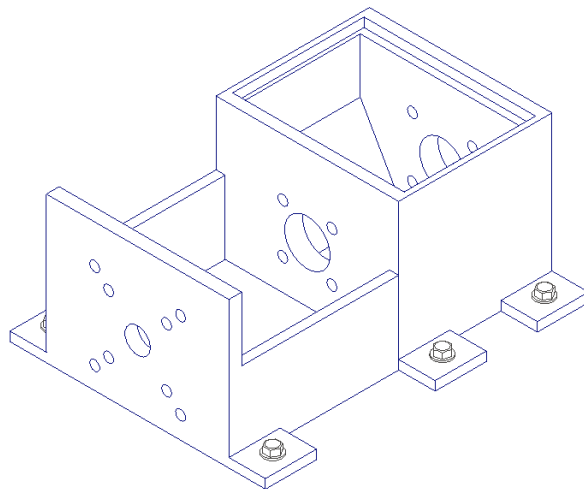


Figura 91: Montaje Base Extrusora

10.23.2 Motor Extrusora

Para ensamblar los componentes asociados al motor, se deben guiar por las siguientes figuras y detalles.

El motor principal de la extrusora va montado sobre el soporte del motor, la unión frontal del motor y el soporte del mismo se hacen mediante 4 pernos M5 con una longitud de 12 [mm] y sus respectivas golillas como lo muestra la Figura 91. El soporte del motor va unido a la base de la extrusora, mediante 4 Tornillos M5 con una longitud de 12 [mm] y sus respectivas tuercas y golillas, como lo muestra Figura 93.

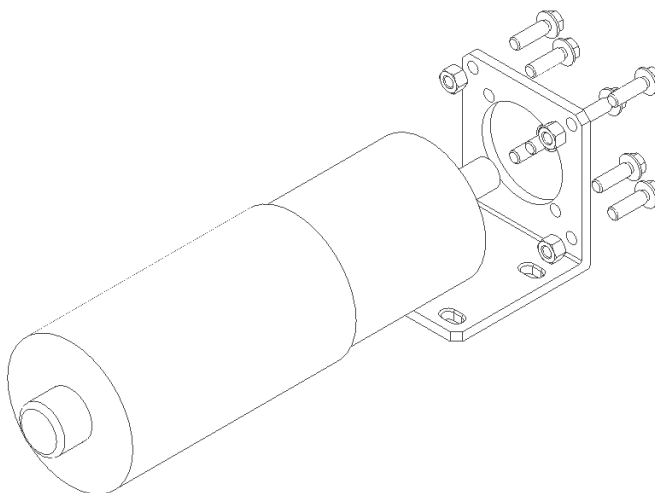


Figura 92: Vista Explosionada Montaje Motor. De izquierda a derecha, se observa: Motor Extrusora, Base o soporte del motor, Tuerca M5, Golillas y Pernos M5.

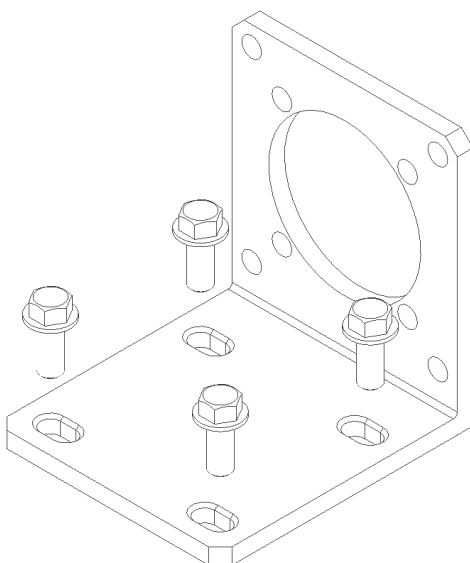


Figura 93: Vista Explosionada Soporte Motor.

Finalmente, el montaje debe quedar como en la Figura 94.

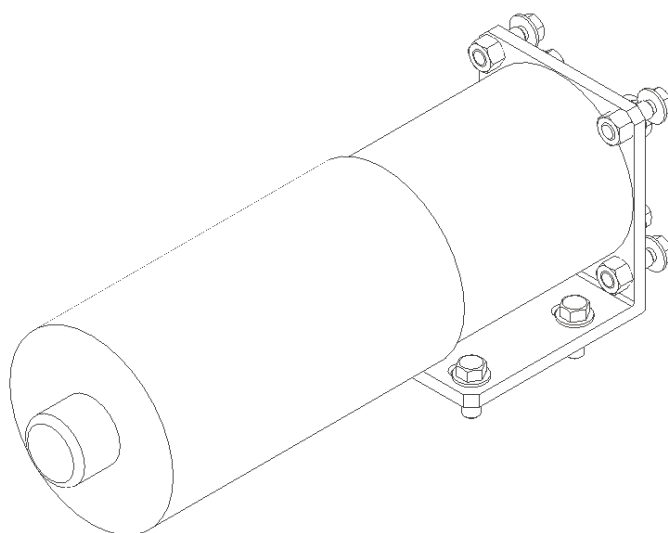


Figura 94: Montaje Motor Extrusora.

10.23.3 Husillo

Para ensamblar los componentes asociados al Husillo, se deben guiar por las siguientes figuras y detalles.

El husillo va unido al motor principal de la extrusora mediante un acople, como se muestra en la Figura 95.

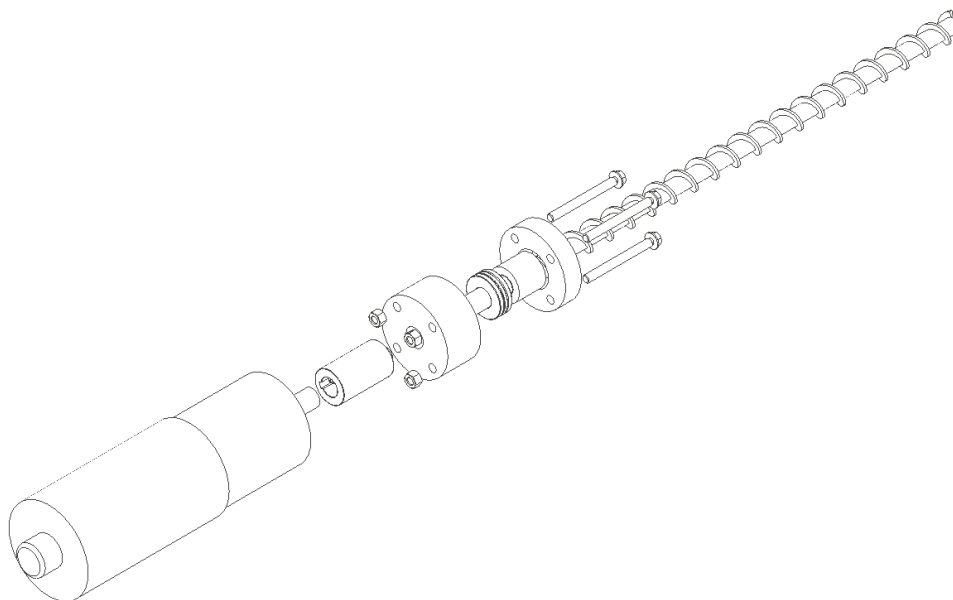


Figura 95: Vista Explosionada Husillo. De izquierda a derecha, se observa: Motor Extrusora, Acoplador rígido, Tuercas M5, Acople Rodamiento, Rodamiento Husillo, Flange Acero, Pernos y golillas M5, Husillo.

El husillo se debe introducir por la apertura de la base de la extrusora, añadiendo al final de la misma el acople del rodamiento, el rodamiento axial y el flange de acero, para luego ensamblar el conjunto a la base de la extrusora, mediante los pernos M5 con una longitud de 55 [mm], con sus respectivas golillas y tuercas, como muestra la Figura 96.

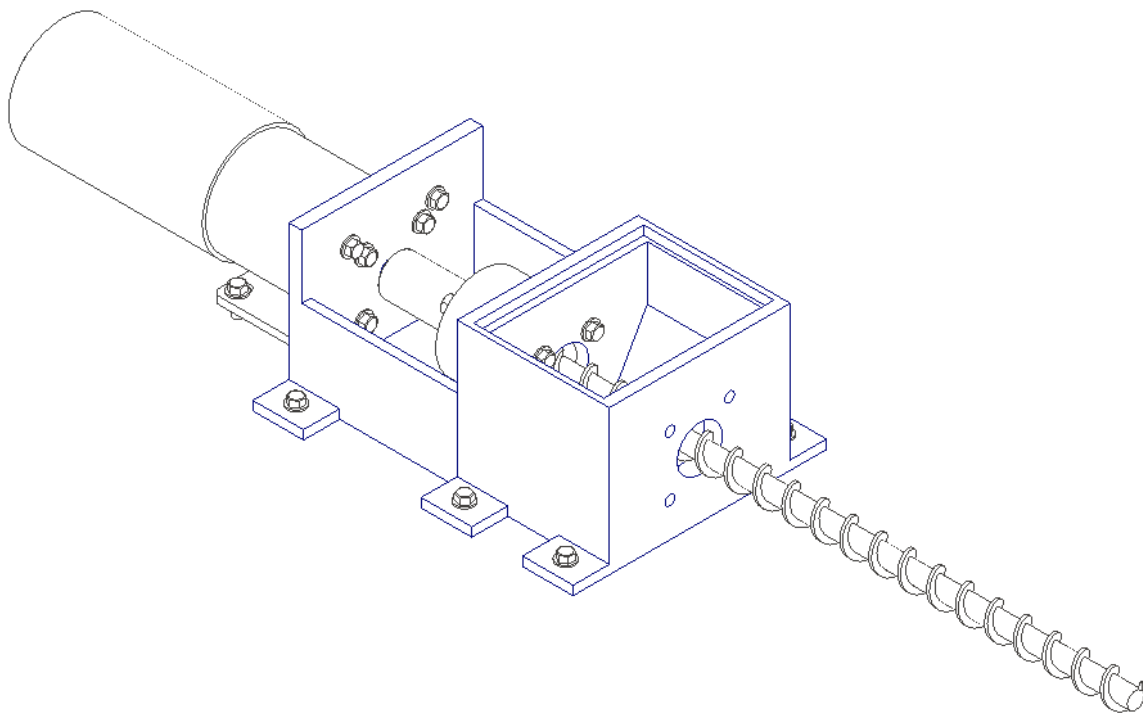


Figura 96: Montaje del Husillo en la base de la extrusora.

10.23.4 Cilindro

Para ensamblar los componentes asociados al cilindro, se deben guiar por las siguientes figuras y detalles.

El cilindro de la extrusora va montado sobre el acople del flange mediante una unión roscada M30, siendo el cilindro el que va acoplado al flange. El cilindro está separado de la base de la extrusora por un aislante de madera. El aislante va unido a la base de la extrusora mediante 4 pernos M5 con una longitud de 40 [mm], con sus respectivas tuercas y golillas, como lo muestra la Figura 97.

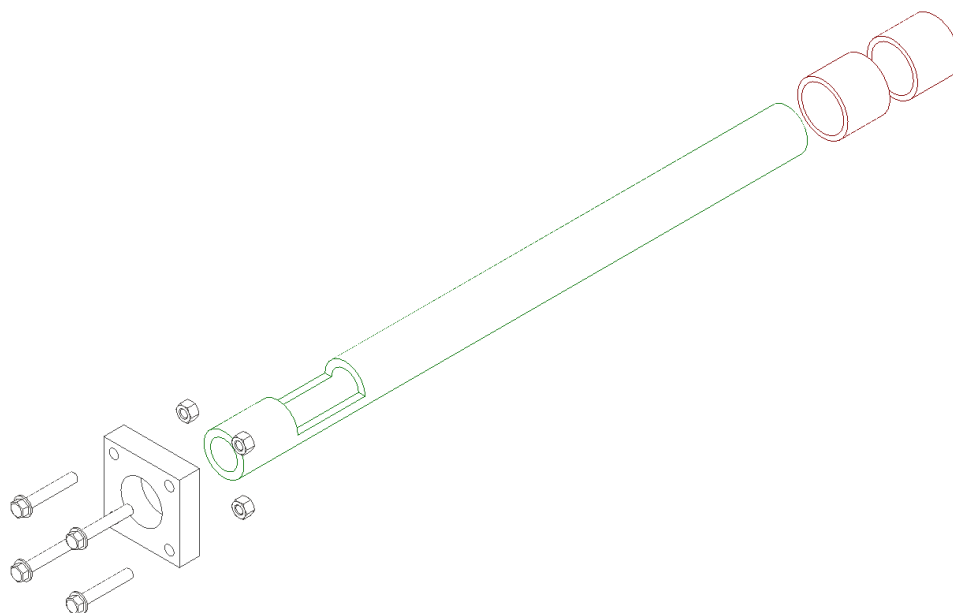


Figura 97: Vista Explosionada Montaje Cilindro. De izquierda a derecha, se observa: Pernos y Golillas M5, Aislador de Madera, Tuercas M5, Cilindro Extrusora, Bandas Térmicas Eléctricas.

Las bandas térmicas se deben montar sobre el cilindro, están irán ubicadas: al comienzo del cilindro y al final de él, antes de la boquilla, como lo muestra la Figura 98. El cilindro y las bandas deben ir aisladas térmicamente mediante un aislante de fibra de vidrio, por lo tanto, se debe recubrir de ello. Luego, se debe situar las termocuplas cercanas a las bandas, una contigua a la boquilla y otra inmediata al aislador de madera, sin que haya contacto entre ellas, para conocer la temperatura real del cilindro y que esta, opere de forma correcta sin sobrecargarse.

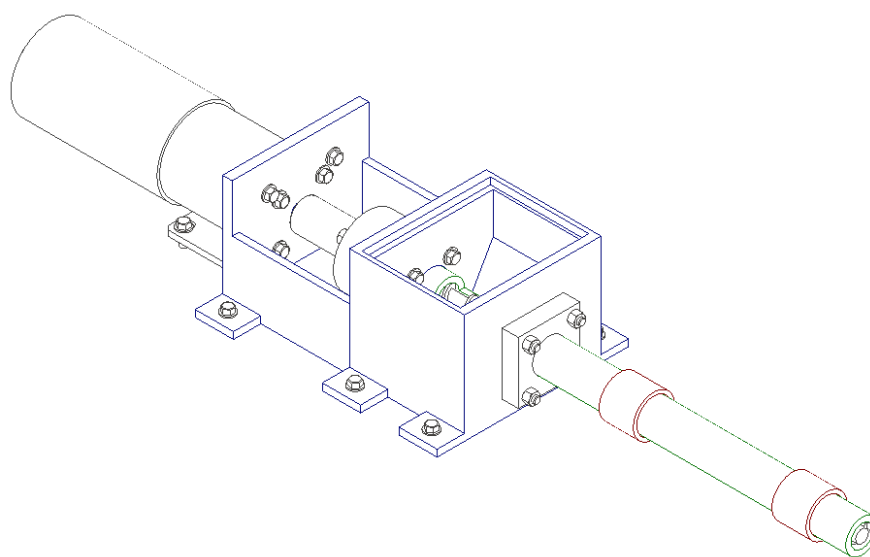


Figura 98: Montaje Cilindro.

10.23.5 Boquilla

Para ensamblar los componentes asociados a la boquilla, se deben guiar por las siguientes figuras y detalles.

La boquilla de la extrusora va montada sobre el acoplador mediante una unión roscada M30, siendo la boquilla la que va dentro del acoplador. El acoplador es el encargado de conectar la boquilla con el cilindro, por lo cual también va acoplado a este mediante una unión roscada M30, como muestra la Figura 99.

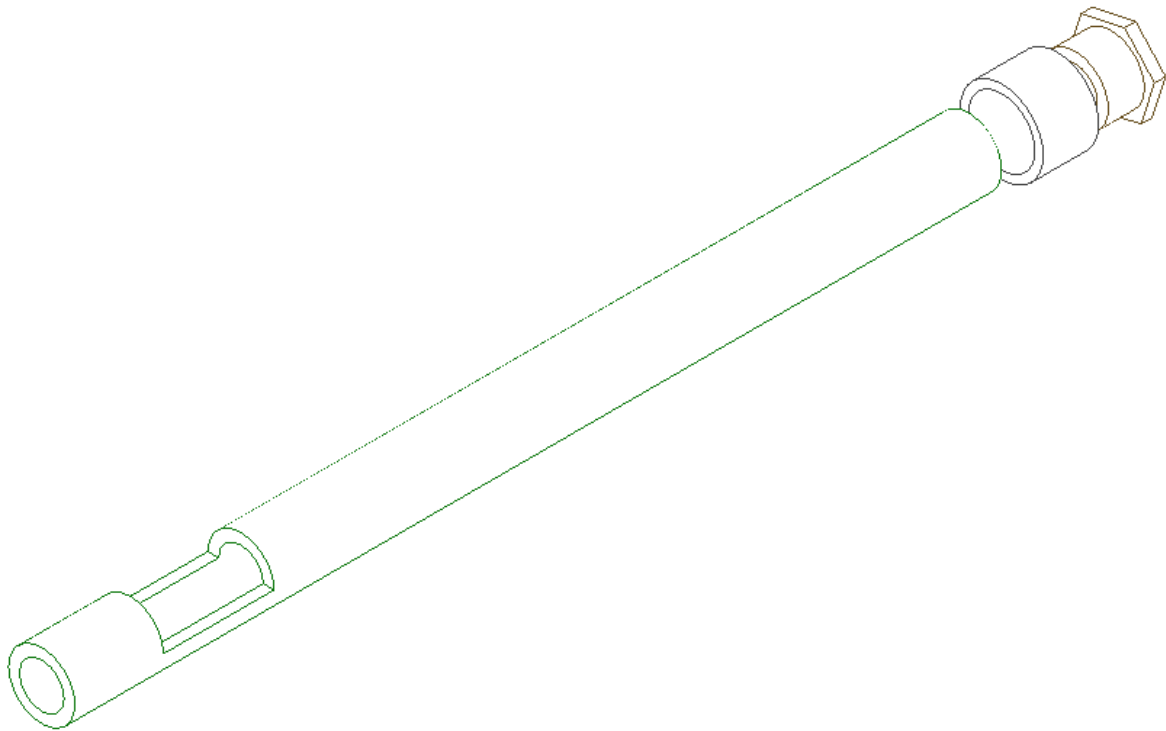


Figura 99: Vista Explosionada Montaje Cilindro. De izquierda a derecha, se observa: Cilindro Extrusora, Acoplador Cilindro-Boquilla, Boquilla.

La Figura 100 muestra el montaje de la boquilla en el sistema extrusor.

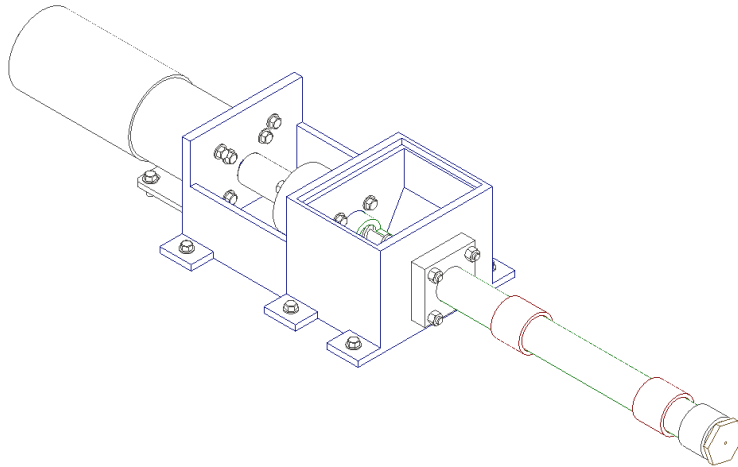


Figura 100: Montaje Boquilla.

10.23.6 Sistema de Refrigeración

Para ensamblar los componentes asociados al sistema de refrigeración, se deben guiar por las siguientes figuras y detalles.

El sistema de refrigeración es aparte de la extrusora, por lo cual este se debe situar posterior a la boquilla. El ventilador que conforma el sistema de refrigeración debe ir montado en la base del mismo, el cual consta de 2 pernos M4 de 20 [mm] de longitud y sus respectivas tuercas y golillas para la unión de ambas partes, como lo muestra la Figura 101.

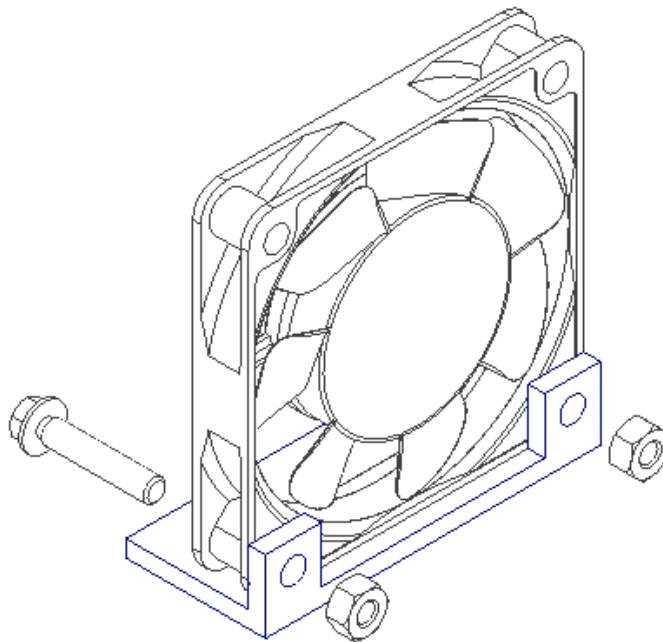


Figura 101: Vista Explosionada Sistema de refrigeración. De izquierda a derecha, se observa: Pernos y golillas M4, Ventilador, Base o soporte Ventilador, Tuercas M4.

La base del ventilador debe ir montada sobre la base de madera de la extrusora, mediante 2 Tornillos M5 con una longitud de 12 [mm], como lo muestra la Figura 102.

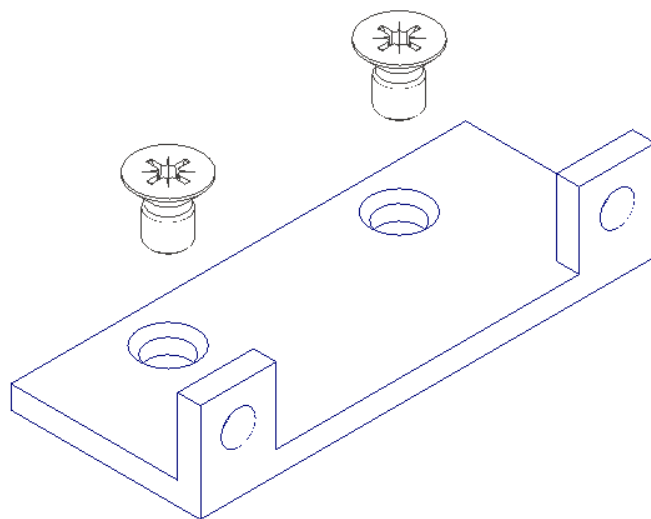


Figura 102: Vista Explosionada Base sistema refrigeración.

Finalmente, el montaje del sistema de refrigeración queda como el de la Figura 103.

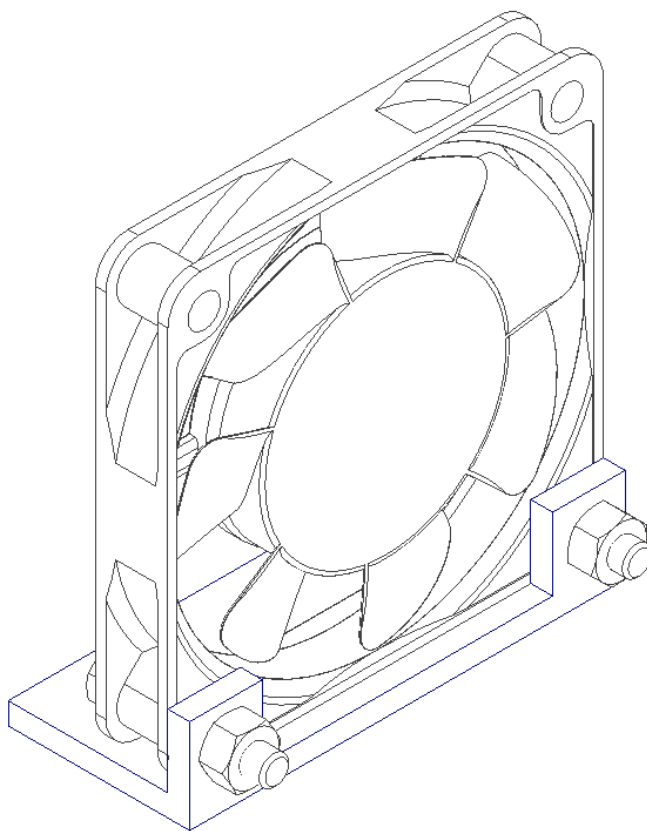


Figura 103: Montaje Sistema de refrigeración.

10.23.7 Sistema Puller

Para ensamblar los componentes asociados al sistema *Puller*, se deben guiar por las siguientes figuras y detalles.

El sistema *Puller* es aparte de la extrusora, por lo cual este se debe situar posterior al sistema de refrigeración. El motor del sistema *Puller* va montado sobre el soporte del mismo, el cual consta de 4 pernos M3 con una longitud 12 [mm] y sus respectivas golillas para su unión frontal, como lo muestra Figura 104.

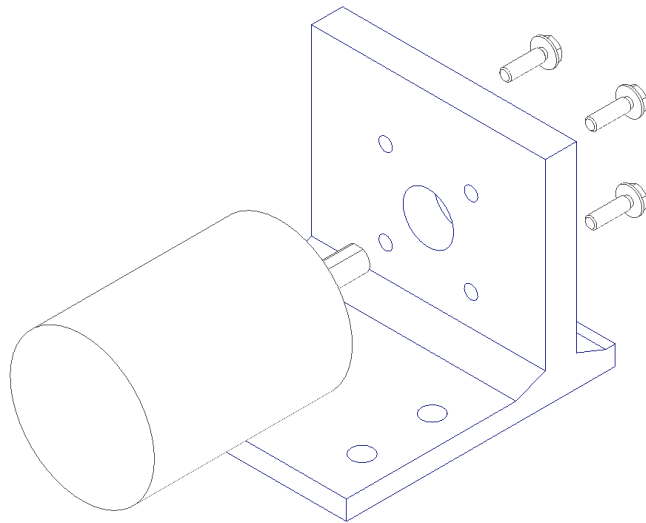


Figura 104: Vista Explosionada Montaje Motor Sistema *Puller*. De izquierda a derecha, se observa: Motor Sistema Puller, Base o soporte Motor, Pernos y golillas M3.

Una vez montado el motor a su soporte, se debe ensamblar a su eje un acoplador rígido, para unir el motor con el eje del extractor, como se muestra en la Figura 105.

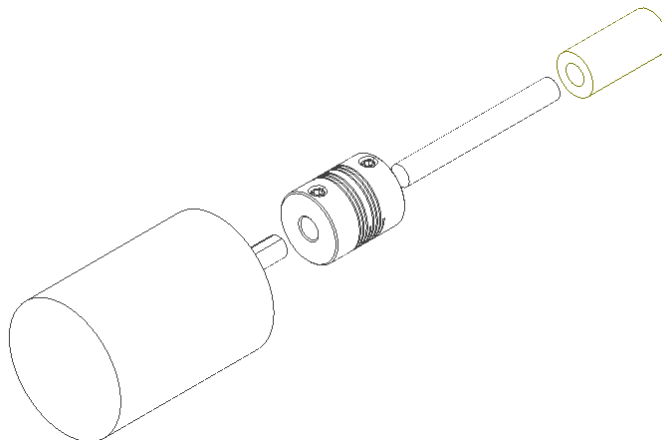


Figura 105: Vista Explosionada Montaje Motor Sistema *Puller*. De izquierda a derecha, se observa: Motor Sistema Puller, Acoplador Rígido Motor-Eje, Eje Motor, Extractor de Latex del motor.

El soporte del motor debe ir montada sobre la base de madera de la extrusora, mediante 4 Tornillos M5 con una longitud de 12 [mm], como lo muestra la Figura 106.

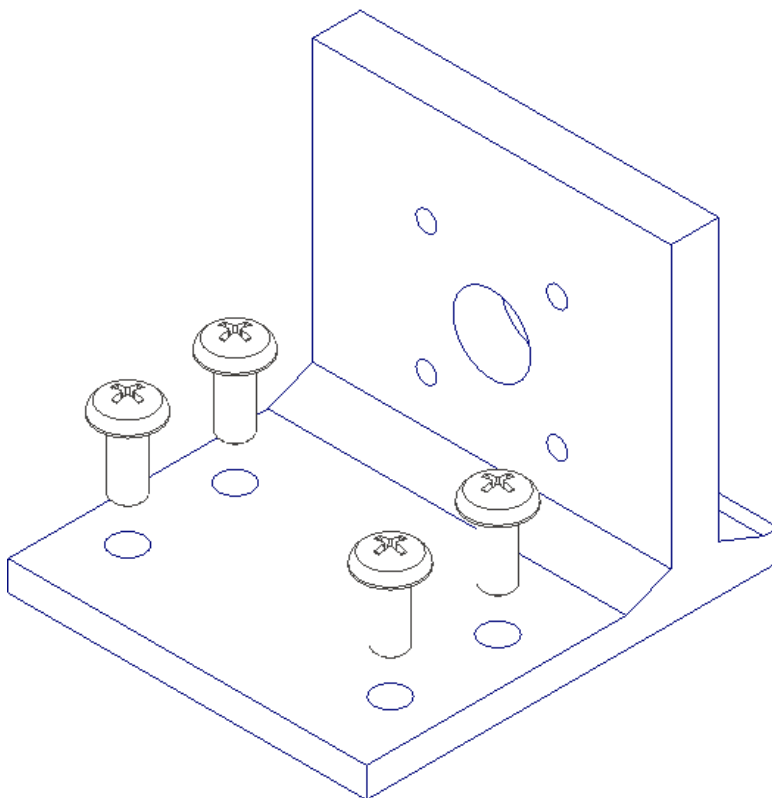


Figura 106: Vista Explosionada Base del motor del sistema *Puller*.

Finalmente, el montaje del motor debe quedar como en la Figura 107.

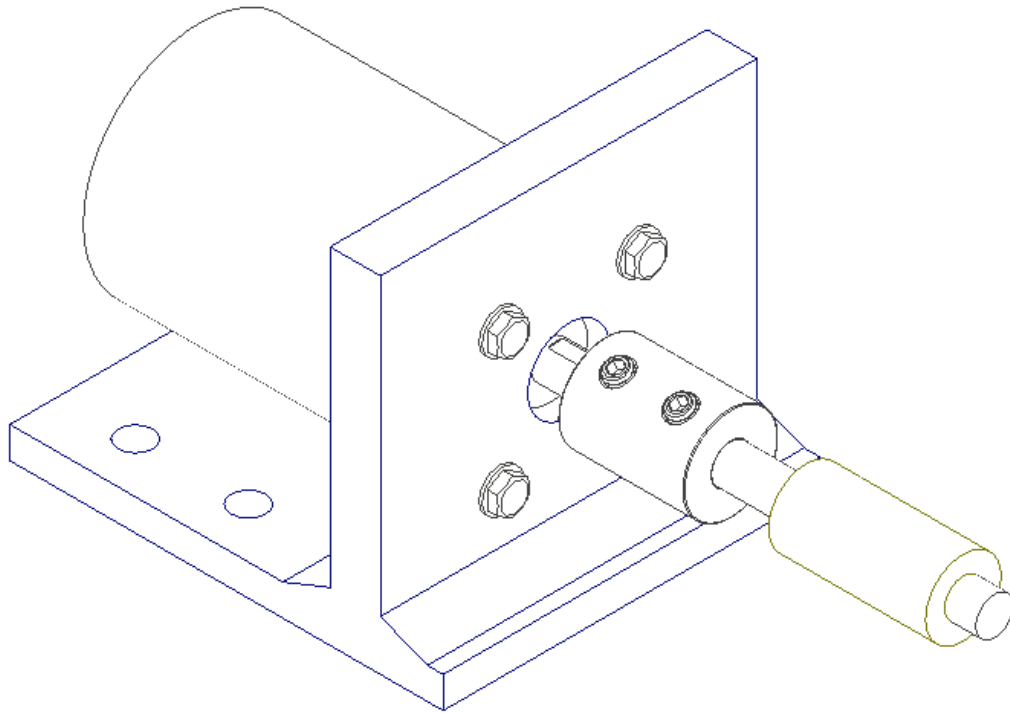


Figura 107: Montaje Motor del sistema *Puller*.

El montaje del sistema extractor se muestra en la Figura 108, en ella, un eje secundario une la base del extractor con el brazo del mismo, siendo limitado en ambas esquinas por tuercas M5. En la parte inferior de la base, se inserta un perno M3 con una longitud de 12 [mm], que servirá para sostener el resorte que presionará el sistema *Puller*.

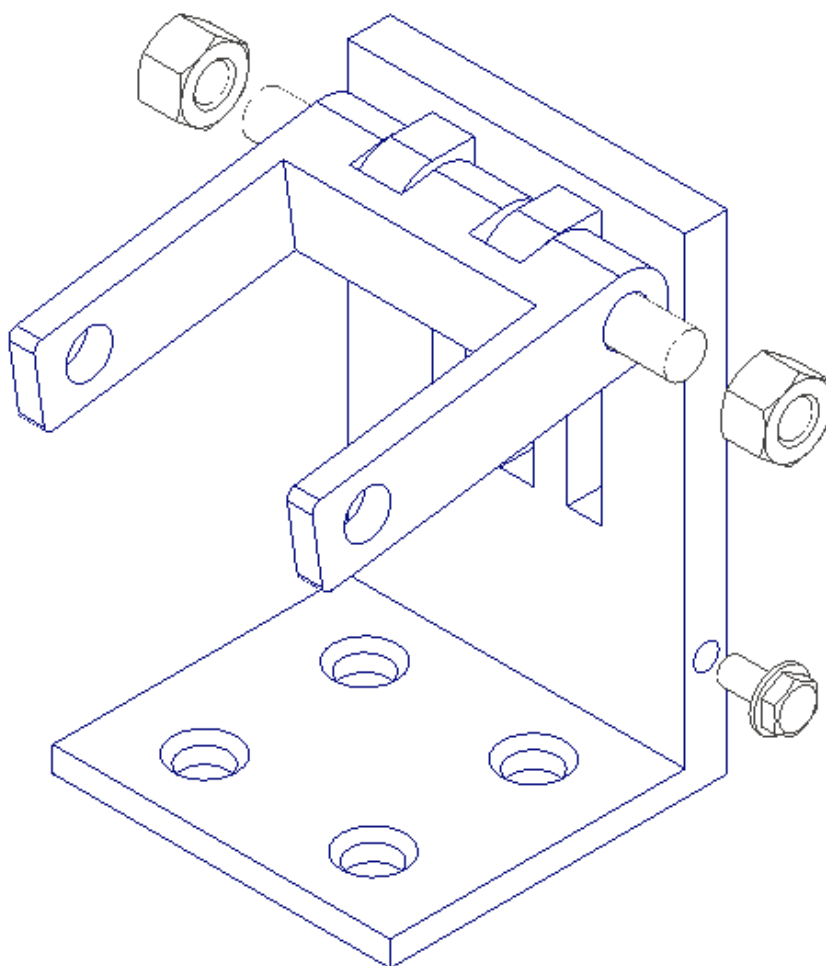


Figura 108: Vista Explosionada Montaje Base Segundo Extractor. De izquierda a derecha, se observa: Base o Soporte Sistema Extractor, Brazo Sistema Extractor, Tuercas M5, Eje Secundario, Perno M3.

El eje principal del extractor, debe ir montado sobre el brazo del sistema extractor, como lo muestra la Figura 110, siendo limitado por tuercas M5 con una longitud de 6 [mm] en cada esquina. El montaje del eje principal se muestra en Figura 109, sobre el soporte del extractor de latex, se inserta el eje principal, para luego encajar los rodamientos en el soporte. Luego, se debe montar el extractor de latex sobre su soporte para completar el extractor.

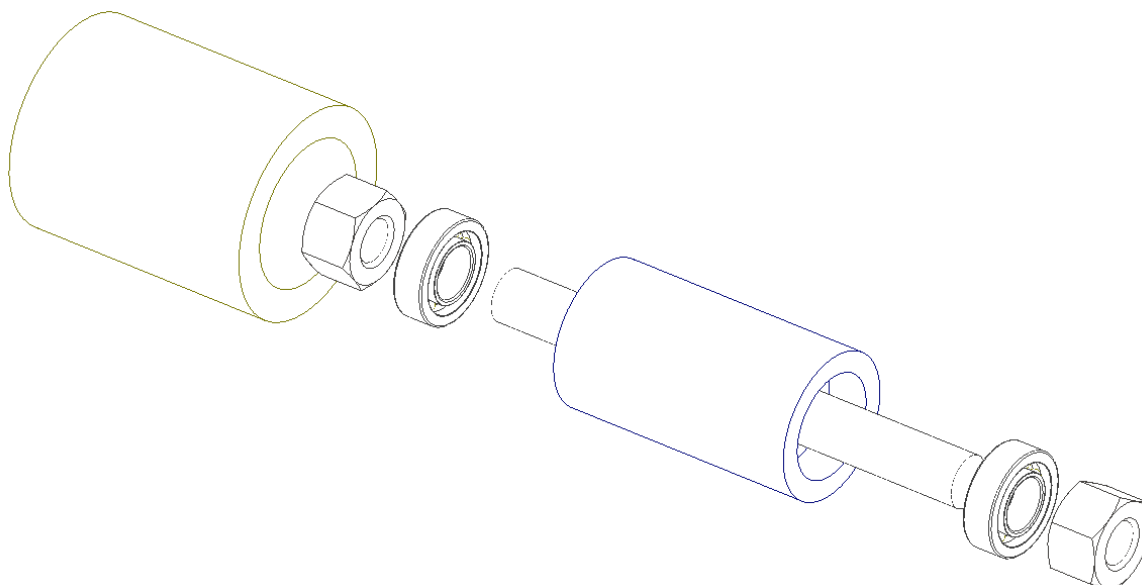


Figura 109: Vista Explosionada Eje Principal del segundo extractor. De izquierda a derecha, se observa: Extractor de Latex Principal, Tuercas M5, Rodamientos soporte Extractor de Latex, Eje principal, Soporte Extractor de Latex.

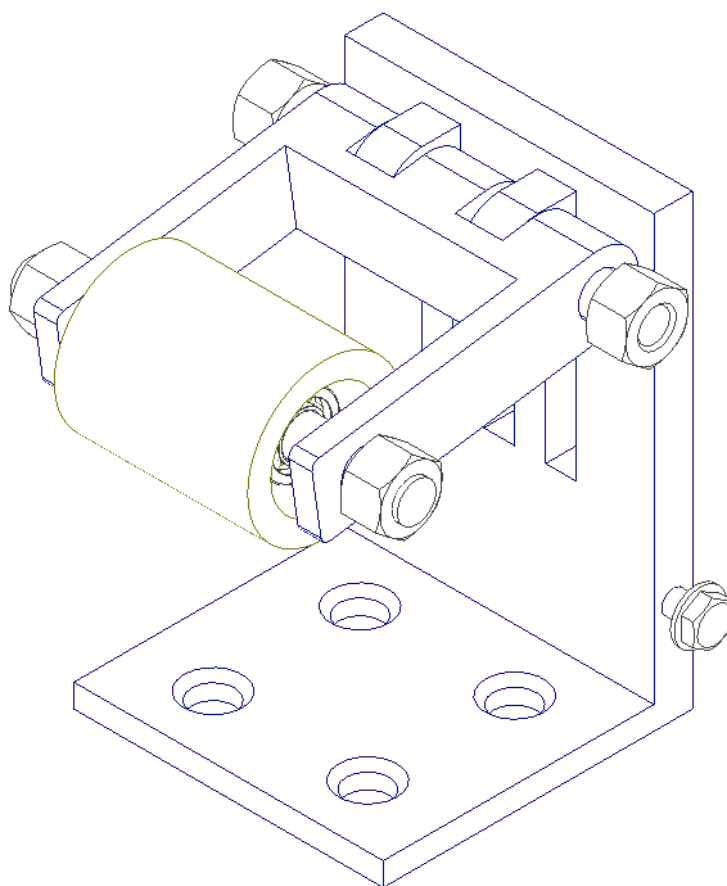


Figura 110: Vista Explosionada Montaje del Segundo Extractor.

El soporte del extractor debe ir montado sobre la base de madera de la extrusora, mediante 4 Tornillos M5 con una longitud de 12 [mm], como lo muestra la Figura 111.

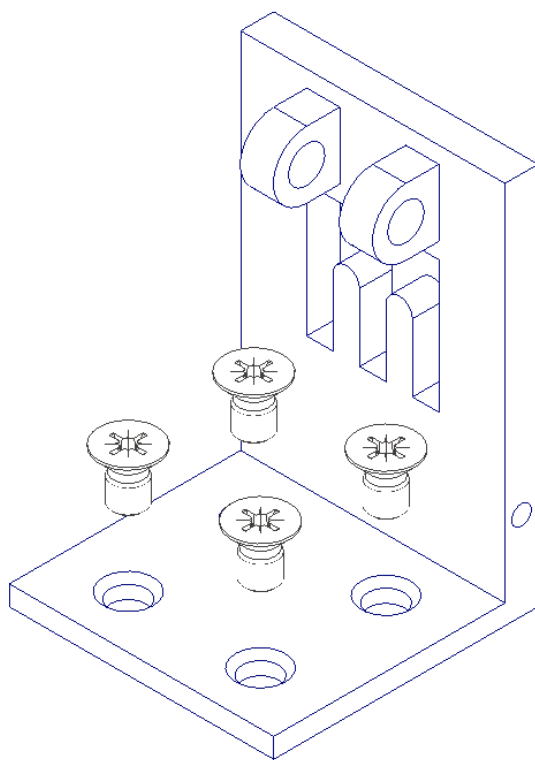


Figura 111: Vista Explosionada Soporte Segundo Extractor.

Finalmente, el montaje del sistema *Puller* debe quedar como en la Figura 112.

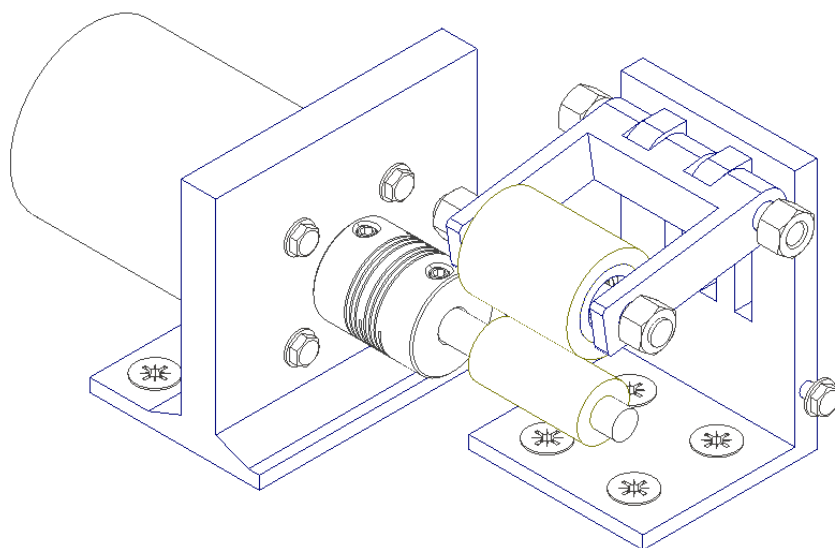


Figura 112: Montaje Sistema Puller.

10.23.8 Repartidor de Filamento

Para ensamblar los componentes asociados al sistema repartidor de filamento, se deben guiar por las siguientes figuras y detalles.

El sistema Repadidor de filamento es aparte de la extrusora, por lo cual este se debe situar posterior al sistema *Puller*. El servomotor debe ir montado sobre el soporte del mismo, el cual consta de 4 pernos M4 con una longitud 12 [mm] y sus respectivas tuercas y golillas para la unión frontal de ambas partes, como lo muestra la Figura 113. Sobre el eje del servomotor, se monta un acople circular y en él, el repartidor, los cuales se unen mediante 6 pernos M2 con una longitud de 10 [mm] y sus respectivas tuercas y golillas.

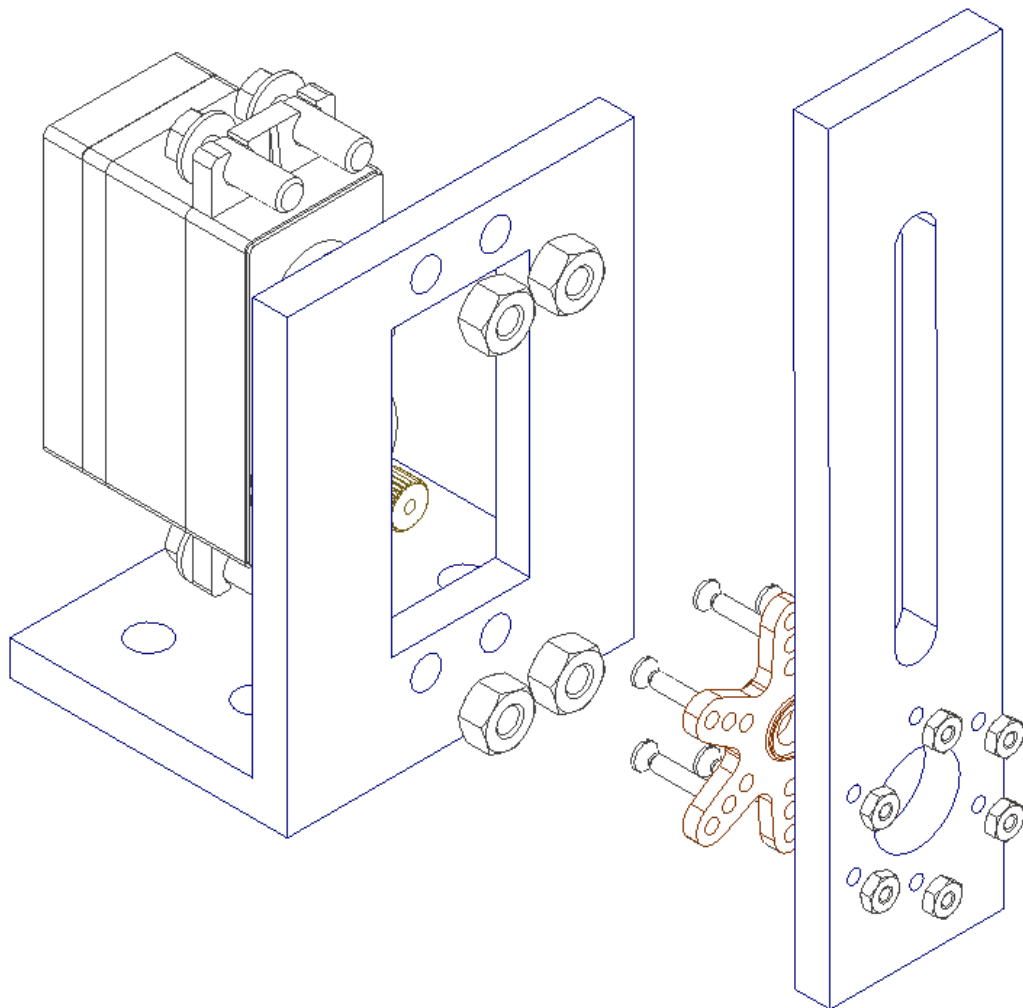


Figura 113: Vista Explosionada Repartidor de Filamentos. De izquierda a derecha, se observa: Servomotor, Pernos y golillas M4, Base Repartidor de Filamentos, Tuercas M4, Pernos y Golillas M2, Acople Circular, Repartidor, Tuercas M2.

El soporte del repartidor de filamentos debe ir montado sobre la base de madera de la extrusora, mediante 4 tornillos M5 con una longitud de 12 [mm], como lo muestra la Figura 114.

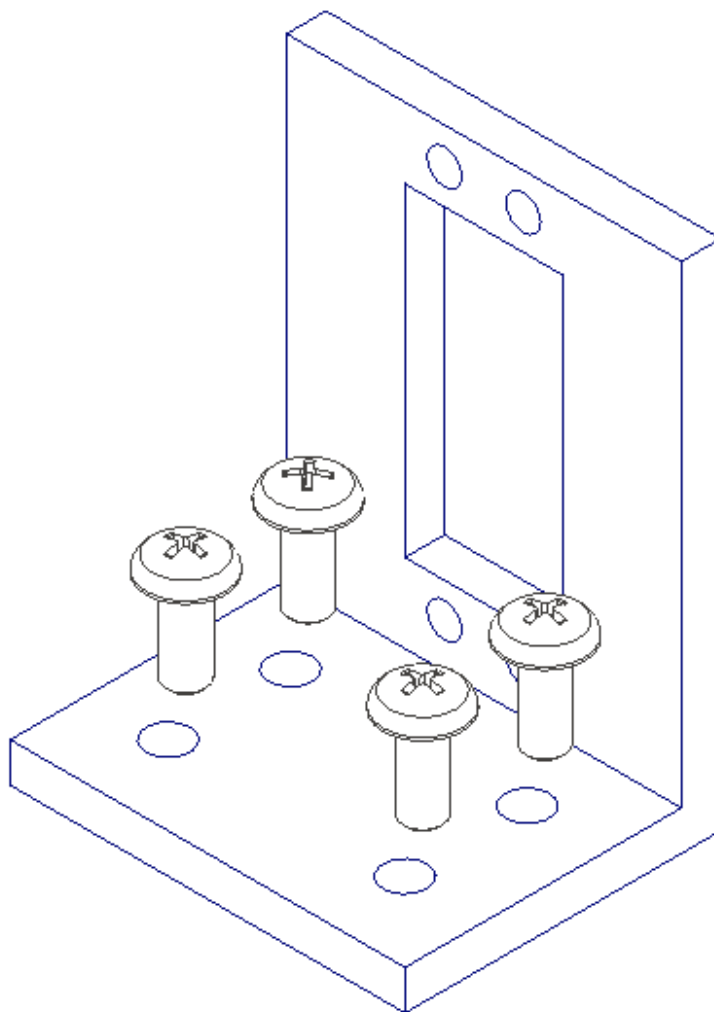


Figura 114: Vista Explosionada Base del repartidor de filamentos.

Finalmente, el montaje del repartidor de filamentos debe quedar como en la Figura 115.

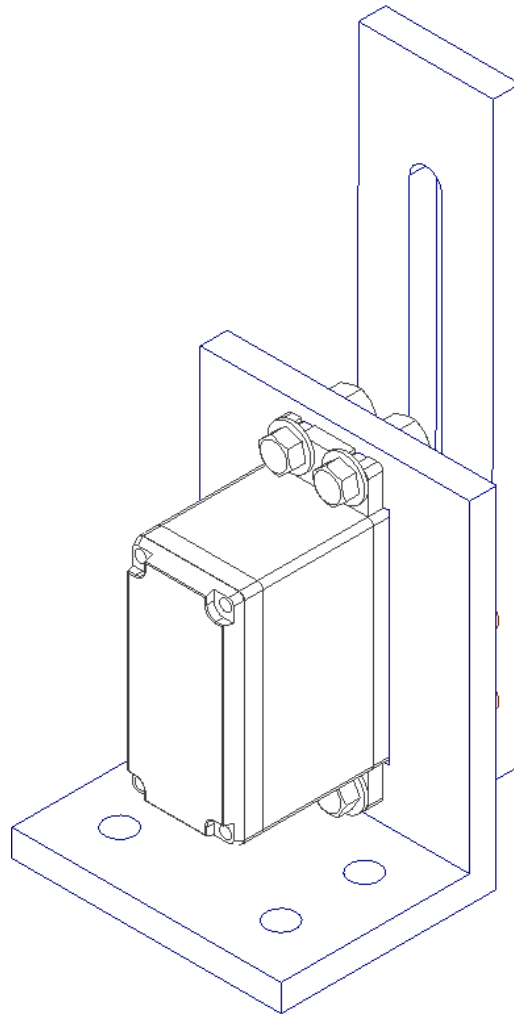


Figura 115: Montaje Repartidor de Filamentos.

10.23.9 Sistema de Bobinado

Para ensamblar los componentes asociados al sistema de bobinado, se deben guiar por las siguientes figuras y detalles.

El sistema de bobinado es aparte de la extrusora, por lo cual este se debe situar posterior al sistema repartidor de filamento. Para montar el sistema de bobinado, primero hay que unir el soporte del mismo a la base de madera de la extrusora, mediante 4 tornillos M8 con una longitud de 16 [mm], como lo muestra la Figura 116. Sobre el soporte del sistema de bobinado, se debe acoplar el motor del mismo, en la parte superior, mediante 4 pernos M3 con una longitud 12 [mm] y sus respectivas golillas. Luego, se monta el rodamiento en la esquina lateral del soporte.

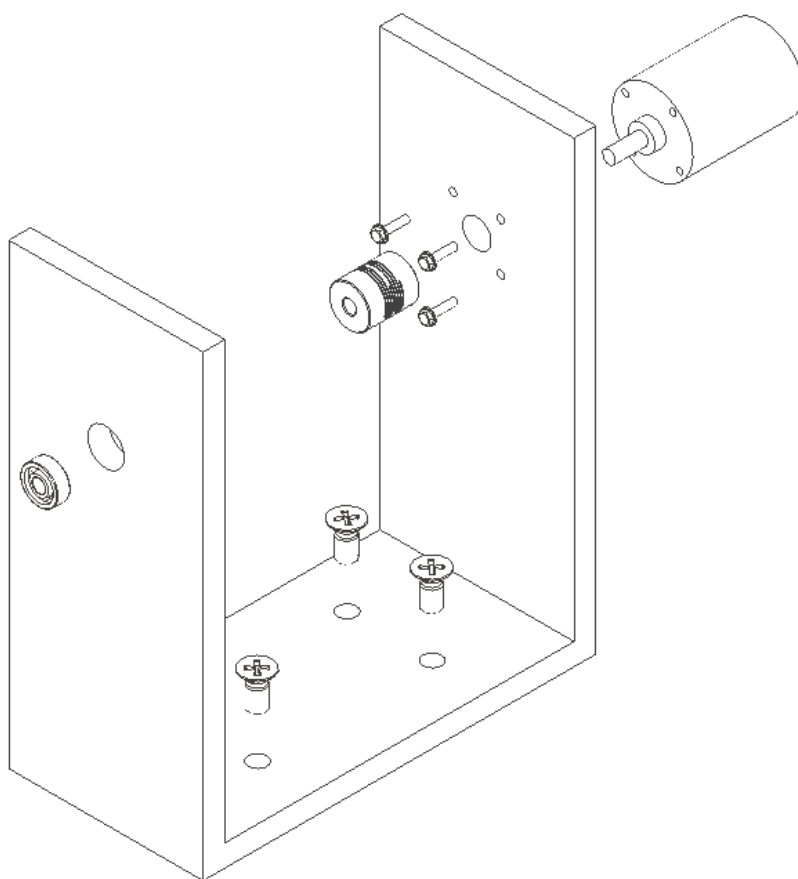


Figura 116: Vista Explosionada Base del Sistema de Bobinado. De izquierda a derecha, se observa: Rodamiento Eje, Base o Soporte sistema de bobinado, Tornillos M8, Acople Motor, Pernos y Golillas M3, Motor Sistema de bobinado.

El siguiente paso es montar el carrete bobinador en la base, por lo que se debe pasar el eje por la entrada del rodamiento, quedando en el interior de la base: el carrete los apoyos del carrete y las tuercas interiores, para luego, insentar ambos apoyos roscados en el carrete. Una vez montado el eje, se debe ajustar al acople del motor para unir así al eje con el motor. Una representación se muestra en la Figura 117 y Figura 118.

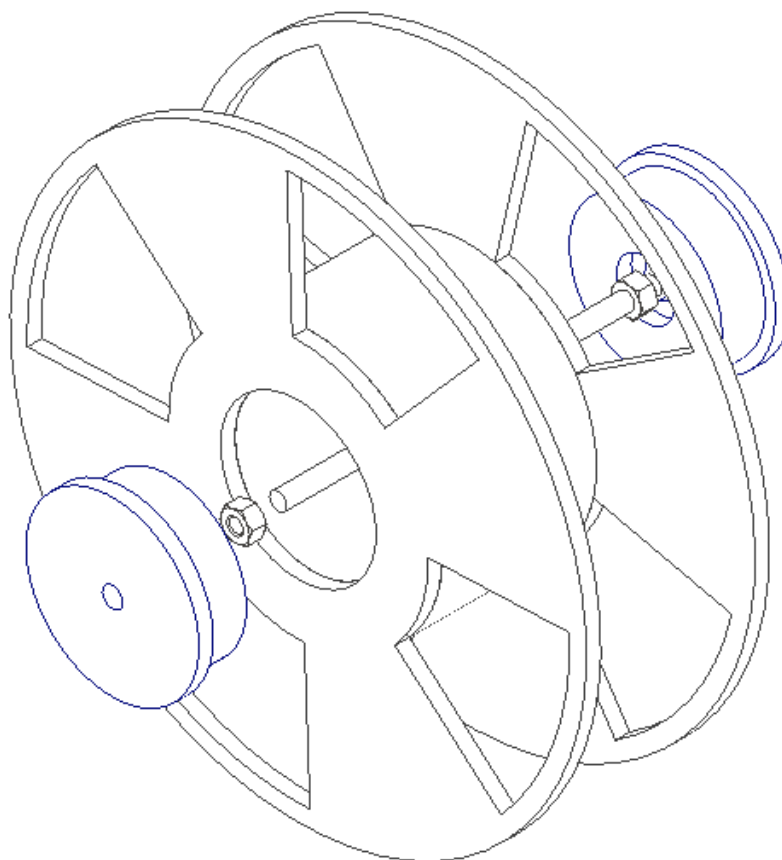


Figura 117: Vista Explosionada Eje Sistema de Bobinado. De izquierda a derecha, se observa: Apoyo Carrete, Tuercas M5 interior, , Eje Carrete, Carrete.

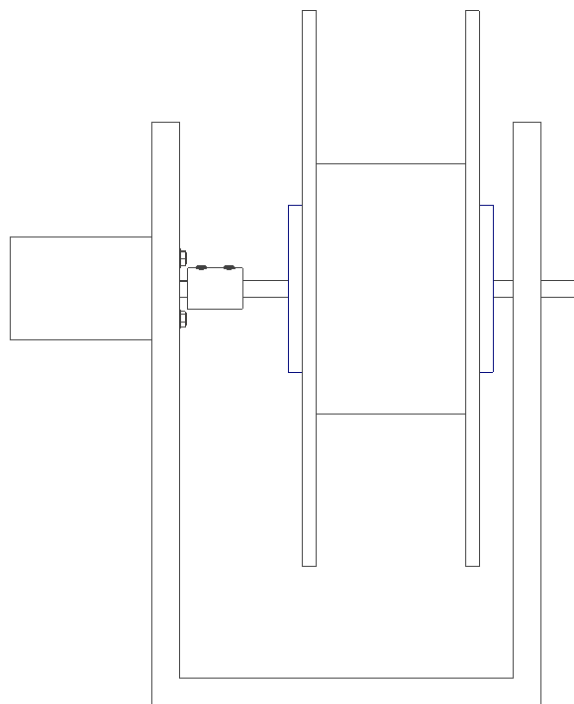


Figura 118: Vista Trasera Sistema de bobinado.

Finalmente, el montaje del sistema de bobinado debe quedar como en la Figura 119.

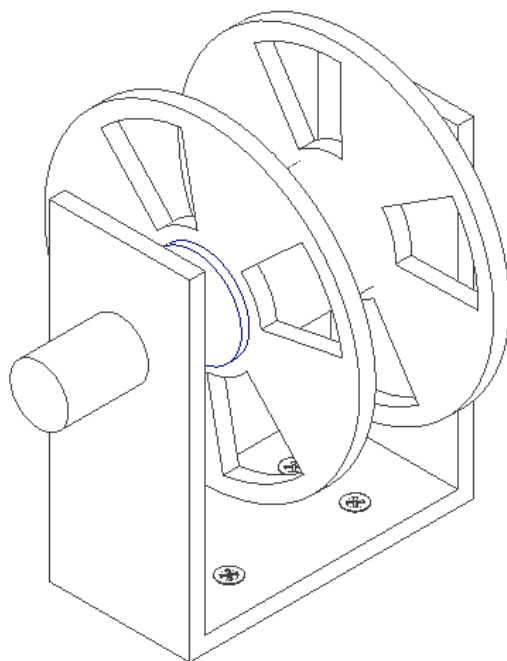


Figura 119: Montaje Sistema de Bobinado.

10.24 Vida útil Rodamiento

En este apartado se calcula los requerimientos mínimos que debe cumplir el rodamiento axial seleccionado para el sistema extrusor, para que cumpla con la duración mínima establecida. Se desea una vida de 50.000 [horas] y una confiabilidad de 0,95. Como requerimiento, el rodamiento debe cumplir para una carga dinámica:

$$C_{10-requerido} < C_{10-catálogo}$$

Donde

$C_{10-requerido}$: Carga dinámica requerida [kN]

$C_{10-catálogo}$: Carga dinámica del rodamiento [kN]

Para calcular la carga dinámica requerida, se debe utilizar [31]:

$$C_{10-requerido} = (a_f * P) * \left(\frac{\frac{L_D * n_D * 60}{10^6}}{0,02 + 4,439 * \sqrt[1,483]{\ln\left(\frac{1}{R}\right)}} \right)^{\frac{1}{a}}$$

Donde

a_f : Factor de carga [-]

P : Carga axial deseada [kN]

L_D : Vida deseada [horas]

n_D : Velocidad deseada [rpm]

R : Confiabilidad [-]

a : Factor forma, para rodillos de bolas = 3 [-]

Por lo tanto, la carga dinámica requerida en el rodamiento será:

$$C_{10-requerido} = 1,4 * 0,86 * \left(\frac{\frac{50000 * 10 * 60}{10^6}}{0,02 + 4,439 * \sqrt[1,483]{\ln\left(\frac{1}{0,95}\right)}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$C_{10-requerido} = 9,5[kN]$$

Para que el rodamiento axial soporte la carga dinámica requerida, la soportada debe ser mayor, así, del anexo 10.14:

$$9,5 [kN] < 10,4[kN]$$

Por lo tanto, el rodamiento seleccionado cumple con los requerimientos de vida útil según la operación.

10.25 Lista de Materiales

Lista de Materiales							
#	Nombre	Cant	Proveedor	Ref.	Precio Unitario USD	Precio Unitario CLP	Precio total
1	Barra Acero 20x500 [mm] SAE 4140	1	Acermet	SAE 4140	-	\$4.250	\$4.250
2	Motor DC con caja de engranajes y encoder	1	Phidgets	3274	76	\$49.400	\$49.400
3	Driver para Motor DC	1	Polulu	MC339 26 Single Driver	17,95	\$11.668	\$11.668
4	Montador Stepper Bracket	1	Phidgets	3339_0	4	\$2.600	\$2.600
6	Acople eje 12 mm con chavetero	1	McMaster	5395T4 12	12,48	\$8.112	\$8.112
7	Tubo Cilíndrico Acero Inoxidable 30x500 [mm]	1	Acermet	AISI 316		\$8.200	\$8.200
8	Madera Aisladora rígida	1	Sodimac	-	-	\$1.000	\$1.000
9	Rodamiento Axial 12 mm	1	Rs Pro	51101	10,57	\$6.871	\$6.871
10	Tablero Madera	1	Sodimac	-	-	\$5.000	\$5.000
11	Goma Antideslizante para Madera	4	True Value Hardware	-	0,5	\$325	\$1.300
12	Band Heater 75 W	1	Ebay (SellerBible)	A16113 000UX0 129	6,34	\$4.121	\$4.121
13	Band Heater 150 W	1	Ebay (SellerBible)	A13062 400UX1 085	4,28	\$2.782	\$2.782
14	PID Controller + Termopar K + SSR	2	AliExpress (ShenZhen E)	REX-C100	12,08	\$7.852	\$15.704
15	Barra de Acero para Acoplador Boquilla - Barril 30 [mm]	1	Acermet	AISI 316	-	\$2.950	\$2.950
16	Barra de Bronce para Boquilla 30 [mm]	1	Acermet	C36000 (HT)	-	\$3.150	\$3.150

Lista de Materiales							
#	Nombre	Cant	Proveedor	Ref.	Precio Unitario USD	Precio Unitario CLP	Precio total
17	Filtro de la mezcla	1	FilaStruder	960753960	1,99	\$1.294	\$1.294
18	C-Clip interno para filtro	1	FilaStruder	960753960	1,99	\$1.294	\$1.294
19	Aislante lana de Vidrio	1	AmazonSupply	Uxcell	6	\$3.900	\$3.900
20	Power Supply Motor Husillo	1	DigiKey	PJ-24V30WBNA	16,7	\$10.855	\$10.855
21	Power Supply Motor Puller y Bobinado	1	eBay (makerele)	MS-50-12	14,15	\$9.198	\$9.198
22	Acople Rodamiento - Tubo Cilíndrico	1	Acermet	SAE 4140	-	\$1.150	\$1.150
23	Acople Flange - Tubo Cilíndrico	1	Acermet	SAE 4140	-	\$1.150	\$1.150
24	Estructura Extrusora y Tolva	1	DIMEC - UTFSM	ABS	-	-	-
25	Motor DC 30 RPM	1	Zhengke	32204MD	12,95	\$8.418	\$8.418
26	Acople Flexible para eje 6x6 [mm]	1	McMaster	5395T111	2,81	\$1.827	\$1.827
27	Barra de Acero para Eje de 5 [mm]	2	eBay (Dsebuy)	N02089	2	\$1.300	\$2.600
28	Barra de Acero para Eje de 6 [mm]	1	eBay (Dsebuy)	N02095	1,5	\$975	\$975
29	Rodamiento radial	1	AmazonSupply	MR684-ZZ	4,5	\$2.925	\$2.925
30	Tubo de goma de látex de 6 [mm]	1	VidraFoc	1577/4	1,5	\$975	\$975
31	Tubo de goma de látex de 14 [mm]	1	VidraFoc	1577/9	1,5	\$975	\$975
32	Driver para Motor DC Puller y Bobinado	1	Polulu	MC33926 Dual Driver	29,95	\$19.468	\$19.468
33	Resorte Extensión 40 [mm]	1	eBay (zenlis4)	40 Length Extension	2,5	\$1.625	\$1.625

Lista de Materiales							
#	Nombre	Cant	Proveedor	Ref.	Precio Unitario USD	Precio Unitario CLP	Precio total
34	Base Motor	1	DIMEC - UTFSM	ABS	-	-	-
35	Base sistema extractor	1	DIMEC - UTFSM	ABS	-	-	-
36	Brazo Sistema Extractor	1	DIMEC - UTFSM	ABS	-	-	-
37	Soporte Extractor de Latex	1	DIMEC - UTFSM	ABS	-	-	-
38	Ventilador para refrigeración	1	EverCool	6010HH 12C EC	6,3	\$4.095	\$4.095
39	Power Supply Ventilador	1	eBay (makerele)	MS-20 D-1,33A 20W	10,35	\$6.728	\$6.728
40	Base Ventilador	1	DIMEC - UTFSM	ABS	-	-	-
41	Carrete plástico	1	DIMEC - UTFSM	-	-	-	-
42	Apoyo eje Carrete	2	DIMEC - UTFSM	ABS	-	-	-
43	Cuerpo Spooler	1	DIMEC - UTFSM	MADE RA	-	-	-
44	Barra de Acero para Eje de 6 [mm]	1	eBay (Dsebuy)	N02095	1,5	\$975	\$975
45	Rodamiento 6x17x6 de bolas	1	TheBigBea ringStore	606-2RS	1,04	\$676	\$676
46	Acople Flexible para eje 6x6 [mm]	1	McMaster	5395T1 11	2,81	\$1.827	\$1.827
47	Motor DC 50 RPM	1	Zhengke	32205 MD	12,95	\$8.418	\$8.418
48	ServoMotor para repartidor	1	AdaFruit	TowerPr o SG-5010	5	\$3.250	\$3.250
49	Soporte Repartidor	1	DIMEC - UTFSM	ABS	-	-	-
50	Repartidor	1	DIMEC - UTFSM	ABS	-	-	-
51	Switch	5	MercadoLi bre	Off/On	-	\$550	\$2.750

Lista de Materiales							
#	Nombre	Cant	Proveedor	Ref.	Precio Unitario USD	Precio Unitario CLP	Precio total
			(KMXStore)				
52	Perno M5 X 55	4	Sodimac	M5	-	\$80	\$320
53	Perno M5 X 30	4	Sodimac	M5	-	\$75	\$600
54	Perno M5 X 16	8	Sodimac	M5	-	\$70	\$280
55	Perno M4 X 20	8	Sodimac	M4	-	\$75	\$600
56	Perno M3 X 12 (Motor Bobinado)	8	Sodimac	M3	-	\$70	\$560
57	Perno M3 X 6 (Base Puller)	1	Sodimac	M3	-	\$50	\$50
58	Perno M2 X 10 (Union repartidor)	4	Sodimac	M2	-	\$50	\$200
59	Tuerca M6	1	Sodimac	M6	-	\$150	\$150
60	Tuerca M5	16	Sodimac	M5	-	\$110	\$1.760
61	Tuerca M4	4	Sodimac	M4	-	\$50	\$200
62	Tuerca M2	4	Sodimac	M2	-	\$40	\$160
63	Tornillo M6 X 16	4	Sodimac	M6	-	\$115	\$460
64	Tornillo M5 X 12	26	Sodimac	M5	-	\$80	\$2080
						Total	\$234.976

11 Anexo B