

2020

SISTEMA EXTRUSOR MODULAR DE FDM PARA IMPLEMENTAR EN EQUIPOS CONTROLADOS POR CNC

ALFARO CORAIL, JOSE MIGUEL

<https://hdl.handle.net/11673/49993>

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE DISEÑO Y MANUFACTURA
VIÑA DEL MAR - VALPARAISO

**SISTEMA EXTRUSOR MODULAR DE FDM PARA
IMPLEMENTAR EN EQUIPOS CONTROLADOS POR
CNC**

Tesis para optar al título de
INGENIERO EN FABRICACIÓN Y DISEÑO INDUSTRIAL

Alumno
José Miguel Alfaro Corail

Guía de Tesis/Profesor Supervisor
SR. SANTIAGO GEYWITZ BERNAL

Revisores/Comisión Co-Referente
**Santiago Geywitz
Caren Carmona
Graciela Muñoz**

MAYO 2020

RESUMEN

La impresión 3D es una técnica de manufactura aditiva, que por su versatilidad, flexibilidad y bajo costo ha tenido una amplia demanda. 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, y según lo mencionado anteriormente podemos observar el gran potencial que ofrece los sistemas de FDM, para posicionarse como una de las tecnologías de fabricación aditiva con mayor crecimiento en la industria manufacturera, esto frente a la oportunidad y gran brecha del escaso material reciclado reincorporado al mercado en Chile (PET, envases y embalajes), y además, la gran ventaja que tiene esta tecnología al momento de enfrentar las nuevas normas y leyes a las que se ven sometidas, debido a las grandes problemáticas medioambientales, buscando la sostenibilidad en los diferentes procesos manufactureros.

Por este motivo, esta tesis presenta una nueva mejora a estos sistemas con el fin de potenciar la eficiencia del proceso de fabricación aditiva, mediante la disminución de procesos asociados a la obtención de materia prima en la actualidad, dando un paso a una nueva oportunidad de economía circular, que buscar alargar la vida útil de los productos de los diferentes tipos de polímeros utilizados en la industria, además de aplicar en esta memoria nuevos conceptos de modularidad para independizar el sistemas de extrucción de las estructuras conocidas como Impresoras 3D y así, aprovechar la adaptabilidad a diferentes tipos de equipos controlados por CNC.

ABSTRACT

3D printing is an additive manufacturing technique, which due to its versatility, flexibility and low cost It has had a wide demand. This technology has caused a huge impact on science and engineering, and in the industrial, medicine and health, cultural, construction sectors, among others.

However, and as mentioned above we can observe the great potential offered by FDM systems, to position itself as one of the fastest-growing additive manufacturing technologies in the manufacturing industry, this in view of the opportunity and large gap of the low recycled material reincorporated to the market in Chile (PET, containers and packaging), and also, the great advantage that this technology has when facing the new norms and laws to which they are subjected, due to the great environmental problems, seeking sustainability in The different manufacturing processes.

For this reason, this thesis presents a new improvement to these systems in order to enhance the efficiency of the additive manufacturing process, by reducing the processes associated with obtaining raw material today, taking a step to a new opportunity for Circular economy, which seeks to extend the useful life of the products of the different types of polymers used in the industry, in addition to applying in this report new concepts of modularity to make the extruction systems independent of structures known as 3D printers and thus take advantage Adaptability to different types of CNC controlled equipment.

Índice

1. Contexto y Antecedentes Generales	11
1.1. PET en la Industria del Plástico en Chile	11
1.1.1. Industria del Plástico en Chile	12
1.1.1.1. Resinas Consumidas en la Industria Chilena	13
1.1.2. Reciclado de PET en Chile	14
1.1.3. Tendencia de Reciclado en Chile.	15
1.1.4. Ley de Responsabilidad Extendida del Productor. (REP)	15
1.1.5. Economía Circular	16
1.1.5.1. Modelo de Producción y Consumo Lineal	16
1.1.5.2. Modelo de Producción y Consumo Economía Circular	17
1.2. Fabricación Aditiva	19
1.2.1. Definición	19
1.2.2. Concepto	19
1.2.3. Marco Histórico	19
1.2.4. Clasificación de las Tecnología de Fabricación Aditiva	21
1.2.4.1. Estereolitografía SLA	22
1.2.4.2. Sintetización Selectiva láser SLS	23
1.2.4.3. Sintetización Directa Láser DMLS	23
1.3. Modelado por Deposición Fundida (FDM)	24
1.3.1. Componentes de Impresora 3D	24
1.3.2. Sistema de Extrusión	26
1.3.3. Proceso FDM	27
1.3.4. Ventajas y Desventajas de FDM	28
1.3.4.1. Ventajas	28
1.3.4.2. Desventajas	30
1.3.4.3. Tabla de Resumen	32
1.3.5. Materiales Utilizados por la FDM	33
1.3.5.1. Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS).	33
1.3.5.2. Poliacido Láctico (PLA).	34
1.3.5.3. Polietileno Tereftalato (PET).	35
1.3.6. Tendencia en el Mercado de la FDM	36
1.3.6.1. Crecimiento del Sector de Impresión 3D	37
1.4. Oportunidad de Diseño	38
1.4.1. Oportunidad	38
2. Desarrollo del Diseño Conceptual.	39
2.1. Definición de Metodología de Diseño.	39
2.1.1. Descripción del Proceso de Diseño.	39
2.1.1.1. Primera Fases: Diseño Conceptual	40
2.1.1.2. Segunda Fase: Diseño de Configuración.	40
2.1.1.3. Tercera Fase: Diseño de Detalle.	41
2.2. Desarrollo del Diseño Conceptual.	42
2.2.1. Estado del Arte.	42
2.2.2. Listado de Funciones. (Restricciones y/o Requerimientos)	43
2.2.3. Categorización de las Funciones de Diseño.	44
2.2.4. Ponderación de la Lista de Funciones.	44
2.2.5. Cálculo de Pesos Relativos.	44
2.2.5.1. Paso 1: Pesos Relativos entre Grupos de Funciones.	45
2.2.5.2. Pesos Relativos en Operación	45
2.2.5.3. Pesos Relativos de Control de Operación	46
2.2.5.4. Pesos Relativos de Seguridad	46
2.2.5.5. Pesos Relativos de Costos	46
2.3. Análisis Funcional	47
2.3.1. Benchmarking.	49
2.3.2. Requerimientos.	50
2.3.3. Matriz Objetivos-Requerimientos.	50
2.4. Generación de Concepto.	53
2.4.1. Patentes Asociadas a Componentes.	53
2.4.2. Generación del Concepto.	55
2.4.2.1. Concepto de Diseño.	55
2.4.2.2. Concepto Prueba.	56

3. Diseño de Detalle e Ingeniería del Producto.	57
3.1. Arquitectura del Producto.	57
3.1.1. Tipo de Arquitectura Utilizada en el Sistema Extrusor.	57
3.1.2. Arquitectura del Sistema Extrusor Modular.	58
3.2. Diseño de Configuración.	58
3.2.0.1. Módulo Sistema de Control.	58
3.2.0.2. Módulo de Fundido.	59
3.2.0.3. Módulo de Sistema de Extrusión.	59
3.2.0.4. Módulo de Sistema Soporte Estructural.	59
3.2.1. Componentes Especializados.	59
3.2.1.1. Husillo o Tornilo Sin-Fin.	59
3.2.1.2. Tolva	60
3.2.1.3. Estructura de Soporte.	60
3.2.2. Componentes Estándar.	60
3.2.2.1. Motor Husillo.	60
3.2.2.2. Elemento Calefactor.	60
3.2.2.3. Ventilador.	60
3.2.2.4. Acople Mecánico.	60
3.2.2.5. Unidad o Sistema de Control.	61
3.3. Parámetros para la Ingeniería de Diseño.	61
3.3.1. Teoría de Fallas	61
3.3.1.1. Teoría del Esfuerzo Cortante Máximo para Materiales Dúctiles (ECM)	61
3.3.1.2. Teoría de la Energía de Distorsión para Materiales Dúctiles (ED)	61
3.3.1.3. Teoría de Falla por Fatiga.	62
3.3.1.4. Factores que Modifican el Límite de Resistencia a la Fatiga:	63
3.3.1.5. Concentración de Esfuerzo (K_t o K_{ts})	64
3.3.1.6. Caracterización de Esfuerzos Fluctuantes.	66
3.3.1.7. Resistencia a la fatiga por torsión bajo esfuerzos fluctuantes.	67
3.4. Diseño de Detalle.	68
3.4.1. Diseño del Husillo o Sin-Fin.	68
3.4.1.1. Parámetros.	68
3.4.1.2. Cálculo de Diámetro Mínimo (Teoría ED-Gerber)	69
3.4.1.3. Dimensionamiento del Husillo	75
3.4.1.4. Potencia Requerida	81
3.4.1.5. Presiones en la Máquina Extrusora	82
3.4.1.6. Presión de Operación en la Boquilla	84
3.4.1.7. Fuerzas en el Husillo (Comprobación)	85
3.4.1.8. Selección Material Husillo.	88
3.4.1.9. Geometría del Husillo.	89
3.4.2. Motor Sistema Extrusor Modular.	91
3.4.3. Reductor 5,18:1 Sistema Extrusor Modular.	92
3.4.4. Diseño Sistema Hot-End (Cilindro)	93
3.4.4.1. Dimensionamiento del Cilindro. [1]	93
3.4.4.2. Espesor Mínimo que Debe Tener el Cilindro.	93
3.4.4.3. Geometría Cilindro	94
3.4.4.4. Selección Material Cilindro.	95
3.4.5. Diseño Tolva (Alimentación Pellet)	96
3.4.5.1. Dimensionamiento Tolva.	96
3.4.5.2. Autonomía Tolva al Sistema Extrusor.	97
3.4.5.3. Selección del Material	98
3.4.5.4. Geometría de la Tolva.	98
3.4.6. Diseño Estructura.	100
3.4.6.1. Selección de Materiales para la Construcción de la Estructura.	100
3.4.6.2. Geometría Estructura	101
3.4.7. Boquilla	102
3.4.8. Sistema de Calefacción.	102
3.4.8.1. Dimensionamiento.	103
3.4.8.2. Potencia Requerida por el Sistema de Calefacción	105
3.4.8.3. Selección de Sistema de Calefacción (Resistencia Eléctrica)	107
3.4.9. Sistema de Refrigeración.	108
3.4.9.1. Dimensionamiento.	108
3.4.9.2. Selección del Sistema de Refrigeración	110
3.5. Sistema Extrusor Modular para FDM, MOSYS.	111
3.5.1. Modelo 3D de Ensamble 3D.	111
3.5.2. Despiece Sistema Extrusor Modular.	112

4. Estudio Mercado y Viabilidad del Desarrollo de Producto.	114
4.1. Estimación de Demanda	114
4.1.1. Empresas Manufactureras Nacionales.	114
4.1.2. Instituciones Educativas	114
4.1.3. Personas Naturales.	114
4.2. Criterios de Crecimiento y Desarrollo Futuro.	116
4.2.1. Modelo de Negocios	116
4.2.1.1. Canvas	116
4.3. Costos	118
4.3.1. Definición de Costos	118
4.3.1.1. Costos Variables	118
4.3.1.2. Costos Fijo	120
4.3.2. Criterios de Fijación de Precio del Producto.	120
4.3.2.1. Inversión Inicial	121
4.3.2.2. Depreciación	122
4.4. Flujo de Caja	123

Índice de figuras

1.	Códigos de Reconocimiento para el Reciclaje de Variedades de Termoplásticos.	11
2.	Aumento del Consumo Aparente del Plástico en Chile.	12
3.	Cifras del Consumo Aparente de Plástico en Chile, Año 2018.	12
4.	Consumo de Resinas en [To/año] de los Sectores Industriales en Chile.	13
5.	Materiales Utilizados por el Sector Industrial de Plásticos en Chile.	13
6.	Empresas Recicladoras de Plásticos en Chile	14
7.	Modelo de Producción/Consumo Lineal	16
8.	Modelo de Producción/Consumo Economía Circular	18
9.	Modelado 3D, discretización de las capas y conformación de la pieza mediante fabricación aditiva	19
10.	Conformación de un producto o pieza mediante SLA, Esterolitografía.	22
11.	Conformación de un producto o pieza mediante SLS, Sintetizador selectivo láser.	23
12.	Producto o pieza conformada mediante DMLS, Sintetización Directa láser.	23
13.	Fabricación con Filamento Fundido.	24
14.	Componentes principales de una impresora FDM.	24
15.	Componetes del Sistema de Extrusión	26
16.	Sistemas de Extrusión	26
17.	Diagrama de proceso de Modelado por Deposición Fundida	27
18.	Curva de crecimiento de Gartner Hype Cycle.	36
19.	Evolución de la Tecnología de Impresión 3D, según Hype Cycle Gartner.	37
20.	Pronóstico Global de Ingresos de Impresoras 3D por Segmento de Mercado.	37
21.	Diagrama de la Metodología del Diseño	40
22.	Sistema de Impresión 3D a partir de Pellets Plásticos.	42
23.	Modelo Caja Negra	47
24.	Modelo Caja Transparente	48
25.	Matriz Objetivos - Requerimientos.	51
26.	Concepto General de Mejora para Sistema Extrusor Modular.	55
27.	Primer Concepto De Sistema Extrusor Modular.	56
28.	Tipos de Arquitecturas de Diseño.	57
29.	Diagrama de Componentes del Diseño Separado en Módulos.	58
30.	Diagrama de Componentes del Diseño Separado en Módulos.	58
31.	Módulo de Sistema de Control.	58
32.	Módulo de Sistema de Fundido.	59
33.	Módulo de Sistema de Extrusión.	59
34.	Módulo de Sistema Soporte Estructural.	59
35.	Teoría de energía de distorsión (ED) de estados de esfuerzo plano.	62
36.	Sensibilidad a la muesca en el caso de aceros y aleaciones de aluminio forjado, sometidos a flexión inversa de cargas axiales inversas. Para radios de muesca más grandes, use los valores de q correspondientes a la ordenada $r = 0.16$ pulg (4 mm).	65
37.	Sensibilidad a la muesca de materiales sometidos a torsión inversa. En el caso de radios de muesca más grandes, use los valores de $q_{cortante}$ correspondientes a la ordenada $r = 0.16$ pulg (4 mm).	66
38.	Relaciones de Esfuerzos Repetidos en el Tiempo	67
39.	Detalle Husillo.	68
40.	Diagrama de Cuerpo Libre, Cargas Sobre el Husillo.	69
41.	Diagrama de torque en función de rpm Motor Nema 17 Gearbox 5:1.	70
42.	Esquema para Aplicación de Criterios de Diseño en el Husillo	71
43.	Diagrama de Cargas en la Primera Parte del Diseño del Husillo L_x	71
44.	Zonas de un husillo Extrusor y la Evolución de la Presión a lo largo de las Mismas.	75
45.	Gráfico de variación de Caudal en Plástico PLA respecto a las RPM, con una Boquilla de 0.4[mm]	81
46.	Gráfico de Viscosidad Aparente en Función de la Velocidad de Corte en el PET y PLA a 190°C	83
47.	Modelo 3D Geometría Husillo	89
48.	Husillo Fabricado	90
49.	Motor Paso a Paso NEMA 17, Modelo 17HS4401	91
50.	Caja de Reductor Planetario Relación 5.18:1, Motor Paso a Paso NEMA17	92
51.	Modelo 3D Cilindro Sistema Extrusor	94
52.	Pieza Mecanizada Cilindro	95
53.	Diseño de Tolva	98
54.	Despiece de Tolva Para Sistema Extrusor Modular.	99
55.	Diseño de Estructura Sistema Extrusor.	101
56.	Ensamble Sistema Estructura con Componente Hot-End y Motor	101

57.	Boquilla Utilizada en el Sistema Extrusor.	102
58.	Componentes del sistema Hot-End	102
59.	Modelo Simplificado del Bloque y el Sistema Calefactor.	103
60.	Esquema de Sistema de Calefacción.	104
61.	Calentador Cartucho Electrico 12V 40W.	107
62.	Ventilador Dc brushless fan DC 12V	110
63.	Render del Sistema Extrusor Modular	111
64.	Vista de explosión del Sistema Extrusor Modular.	112
65.	Render del Sistema Extrusor Modular 2	113
66.	Diagrama de Venn de las Intercepción de Potencial Demanda para Sistema Extrusor	115
67.	Pronóstico Global de Ingresos de Impresoras 3D por Segmento de Mercado.	116
68.	Modelo de Negocios Canvas para Sistema Extrusor MOSYS	117
69.	Amortización y Valor Cuota Préstamo Requerido Proyecto MOSYS.	121
70.	Depreciación.	122
71.	Flujo de Caja Proyecto MOSYS	123

Índice de tablas

1.	Clasificación de las Tecnologías de FA, Según la ASTM	22
2.	Sistemas de Extrusión, Relacionas con Tecnología FDM.	27
3.	Tabla de Resumen de Ventajas y Desventajas de la Impresora 3D	32
4.	Propiedades Cuantitativas del ABS, Considerando Grado Medio del Material	33
5.	Propiedades Cuantitativas del PLA	34
6.	Propiedades Cuantitativas del PET	35
7.	Categorización de las Funciones de Diseño.	44
8.	Pesos Relativos Entre Grupos Funcionales	45
9.	Pesos Relativos del Grupo de Funciones de Operación.	45
10.	Pesos Relativos del Grupo de Funciones de Control de Operación	46
11.	Pesos Relativos del Grupo de Funciones de Seguridad.	46
12.	Pesos Relativos del Grupo de Funciones de Costos	46
13.	Bencgmarking: Comparación de las Funciones con el Estado de Arte de los Sistemas Extrusores.	49
14.	Requerimientos Sistema Extrusor a Diseñar	50
15.	Metodología de TRIZ para Solución de Contradicción en el Diseño del Sistema Extrusor 52	52
16.	Patentes para Diseño de Componentes del Sistema Extrusor.	54
17.	Parámetros del Factor de la Condición Superficial.	63
18.	Factores de Confiabilidad ke Correspondientes a 8 Desviaciones Estándar Porcentuales del Límite de Resistencia a la Fatiga.	64
19.	Estimaciones de primera iteración de los factores de concentración del esfuerzo K_t y K_{ts}	66
20.	Resultados Flujo Volumétrico Plástico PLA, con una Boquilla de 0.4 [mm] de Diametro. 80	80
21.	Resultados Flujo Volumétrico Plástico PLA, con una Boquilla de 0.8 [mm] de Diametro. 80	80
22.	Resultados Flujo Volumétrico Plástico PET, con una Boquilla de 0.4 [mm] de Diametro. 80	80
23.	Resultados Flujo Volumétrico Plástico PET, con una Boquilla de 0.8 [mm] de Diametro. 80	80
24.	Viscosidad Aparente del PLA y PET a 190°	83
25.	Viscosidad Efectiva PLA a 190°[C]	84
26.	Propiedades Mecánicas y Térmicas AISI 316	88
27.	Resumen Geometría Husillo.	89
28.	Características Importantes Motor NEMA 17	91
29.	Reductor 5.18:1 Modelo PG518	92
30.	Propiedades Mecánicas SAE 640	95
31.	Propiedades Mecánicas A6061	100
32.	Propiedades Mecánicas SAE 640	100
33.	Resultados de Flujo Másico en el Cilindro con Diferentes Boquillas y Materiales. . . 104	104
34.	Resultados Calor de Trabajo con Diferentes Boquillas y Materiales	105
35.	Potencia requerida por el sistema extrusor, para las diferentes boquillas y materiales 106	106
36.	Resultados de Reynolds para Diferentes Diámetros de Boquilla.	108
37.	Propiedades Aire a T=100[°C] y P= P_{atm}	109
38.	Resultados Nusselt para los ddferentes Diámetros de Boquilla.	109
39.	Resultados Coeficiente de Transferencia de Aire para los Diferentes Diámetros. . . . 109	109
40.	Costo de Materiales Construcción MOSYS-FDM	118
41.	Costo de Fabricación de las diferentes piezas de MOSYS-FDM	119
42.	Resumen Costo Total Sistema Extrusor MOSYS	120
43.	Costos Independientes Sistema Extrusor y Controlador	120
44.	Estimado Inversión Inicial	121

ABREVIACIONES Y PALABRAS CLAVES

- FA** : Fabricación Aditiva
FDM : Modelado por Deposición Fundida (Fused Modeling Deposition)
CAD : Diseño Asistivo por Computador (Computer-Aided Design)
CAM : Manufactura Asistida por Computador (Computer-Aided Manufacturing)
PET : Tereftalato de Polietileno (Polythylene terephthalate)

INTRODUCCIÓN

Actualmente, las constantes fluctuaciones y dinámicas en el mercado manufacturero implican con más fuerza, diseños novedosos, diferentes y personalizados, así también la disminución en los tamaños de los lotes de producción, lo que conlleva a su vez la necesidad de diseñar y fabricar con mínimos retrasos.

La aparición de la FDM en los años 1985, y su exponencial crecimiento a partir del 2000, ha llegado a satisfacer esta necesidad y al ser una tecnología emergente, se ha posicionado como una de las tecnologías de mayor impacto dentro del mercado manufacturero. La fabricación aditiva, como su nombre lo dice, llegó a romper las reglas y procesos asociados a la fabricación convencional de sustracción de material para la conformación de alguna pieza o producto.

Esta tecnología se encuentra dentro de la cuarta revolución industrial, o también conocida como “Industrial 4.0”, esta consiste en la digitalización de los procesos industriales por medio de la interacción de la inteligencia artificial con las máquinas y la optimización de recursos enfocada en la creación de efectivas metodologías comerciales.

Desde este punto de vista, la impresión 3D ha llegado posicionarse como una tecnología capaz de presentar modelos flexibles y funcionales de fabricación sustentable y nuevas cadenas productivas, siendo un factor positivo a los importantes cambios medioambientales, no menores, a los cuales nos vemos afectados en la actualidad.

CAPÍTULO I

1. Contexto y Antecedentes Generales

Para comenzar y a modo de un mejor entendimiento sobre la oportunidad de diseño en la presente tesis y el desarrollo de esta, se definirá la industria del plástico en Chile, su estado actual en lo que compete a producción de resinas y la participación de material reciclado en el mercado.

Además de dar a conocer las estrategias nacionales respecto al sobre consumo de estas resinas, y como en función de esto, se ven afectadas las pequeñas y medianas empresas productoras y manufactureras.

1.1. PET en la Industria del Plástico en Chile

La mayoría de los productos plásticos provienen de hidrocarburos, y representa cerca de 5% de la producción total del petróleo y gas del mundo. Estos, como se mencionó anteriormente, pueden clasificarse en dos tipos: los termoplásticos, que pueden someterse a calor para ser moldeados en nuevos productos, sin perder sus propiedades inherentes; y los termoestables, que al ser sometidos a sus temperaturas de procesamiento se favorecen reacciones químicas que alteran las propiedades del material, degradándolo.

A continuación, y a modo de comprender de mejor forma como la industria se ve relacionada con estas resinas, nos enfocaremos en los materiales termoplásticos ya son los más consumidos por la industria y tienen una creciente oportunidad de ser reciclados. Estos materiales termoplásticos han sido clasificados, por la industria, en siete categorías (véase figura 1) según el tipo de resina que compone cada material, en lo que actualmente se reconoce por un número rodeado de un triángulo de flechas.

NÚMERO	ABREVIATURA	NOMBRE
	PET	Polietileno Tereftalato
	PEAD	Polietileno de Alta Densidad
	PVC	Cloruro de Polivinilo
	PEBD	Polietileno de Baja Densidad
	PP	Polipropileno
	PS	Poliestireno
	OTROS	Cualquier otro termoplástico

Figura 1: Códigos de Reconocimiento para el Reciclaje de Variedades de Termoplásticos.
Fuente: Guía para la Elaboración de Estrategias de Gestión de Residuos Plásticos en Chile.

A continuación y para entender la situación actual de estas resinas, como materia prima en la industria, analizaremos su consumo y a los diferentes sectores industriales a los cuales son destinadas las resinas termoplásticas.

1.1.1. Industria del Plástico en Chile

Un estudio[2] realizado por ASIPLA¹ reveló que nuestro país desde inicios del año 2014 ha tenido un aumento sostenido del consumo industrial del plástico para la producción de bienes secundarios de un 1.5% anual. (Tendencias del PIB²).

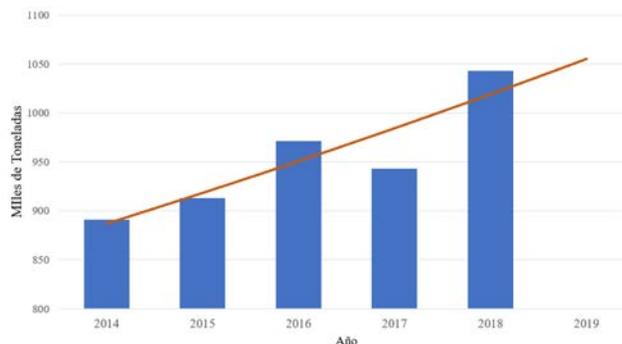


Figura 2: Aumento del Consumo Aparente del Plástico en Chile. Datos obtenidos de ASIPLA, año 2018

Si nos enfocamos en el informe emitido [3] en el año 2018 por ASIPLA sobre la “Estadística Industrial del Plástico”, podemos observar el aumento importante del 10,6% del consumo aparente del plástico, a nivel nacional, equivalente a 1.043 [Miles de Toneladas/Año]. Véase detalle en la figura 3b

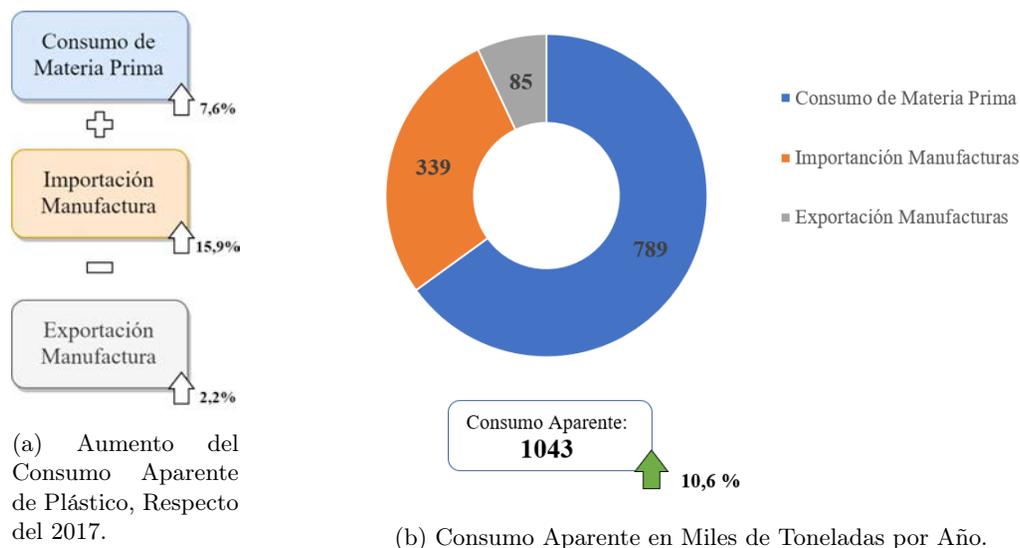


Figura 3: Cifras del Consumo Aparente de Plástico en Chile, Año 2018. Datos Obtenidos “Estadística Industrial del Plástico”.

Ahora bien, cruzando la información de la Figura 3, con datos obtenidos del “Ministerio de Economía y Finanzas”, sobre el sector industrial de las resinas en Chile podemos observar que gran parte del consumo de estas resinas termoplásticas está enfocada al área de producción de envases y embalajes. Véase Figura 4.

¹Asociación Gremial de la Industriales del Plástico

²Producto Interno Bruto

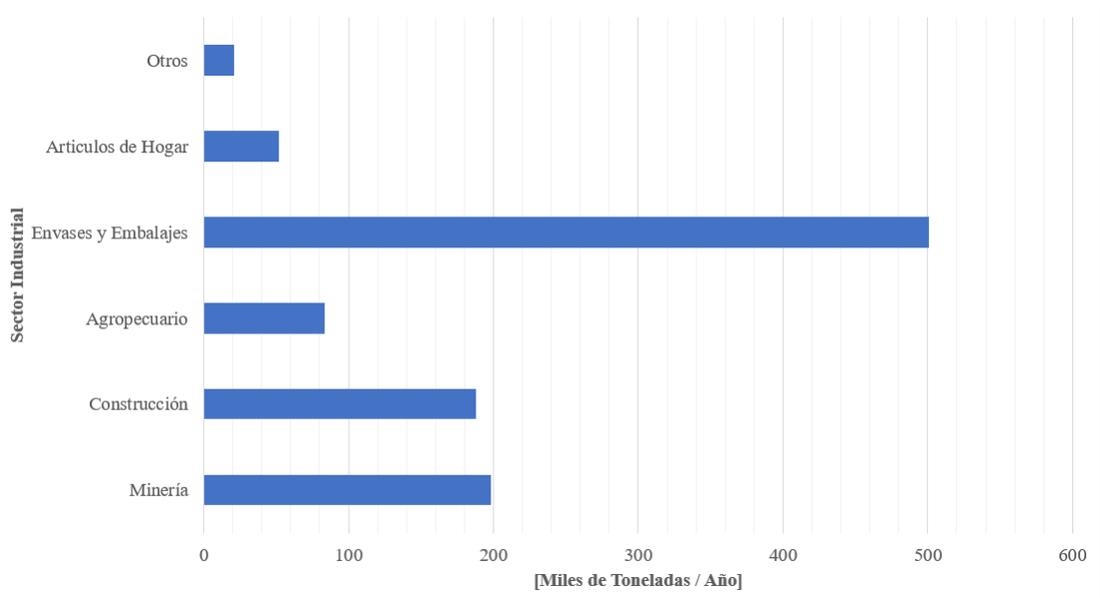


Figura 4: Consumo de Resinas en [To/año] de los Sectores Industriales en Chile. Datos obtenidos de ASIPLA, año 2018

1.1.1.1 Resinas Consumidas en la Industria Chilena

El consumo se concentra en los polietilenos de alta y baja densidad (PEAD y PEBD), y de Tereftalato (PET), con un 64 %, (667,52 miles de toneladas por año) que como se mencionó en la Figura 4 es principalmente la industria destinada a la producción de envases y embalajes.

El 27,6 % destinadas a otras resinas y una participación muy marginal, de un 8,5 % aparecen los materiales reciclados.

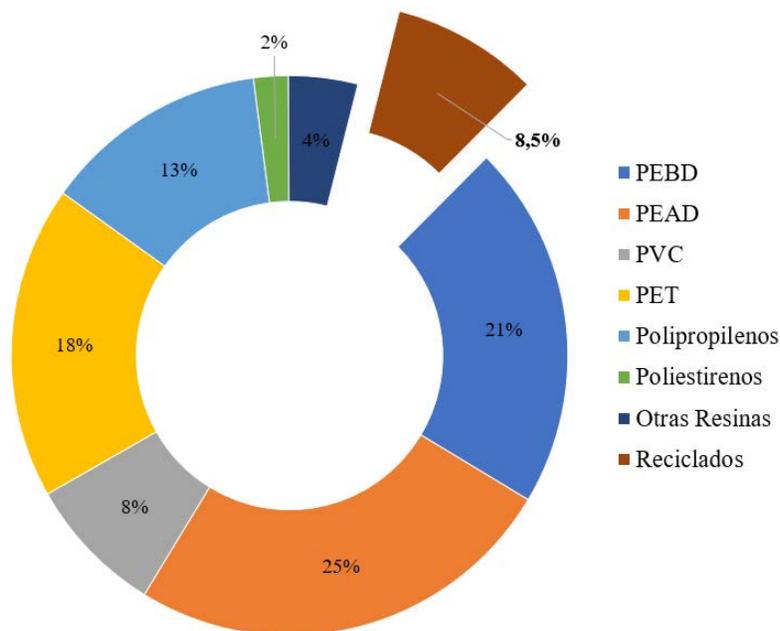


Figura 5: Materiales Utilizados por el Sector Industrial de Plásticos en Chile. Fuente: ASIPLA, Desafíos para los Plásticos.

Si nos enfocamos en las cifras anteriormente obtenidas, podemos estimar que el consumo anual de polietilenos (de alta, baja densidad y tereftalato) virgen en el país puede llegar a ser más de 665 mil toneladas por año, esté destinado a la fabricación de envases y embalajes.

Se estima que menos de 15 % del PET producido, es decir menos de 99 mil toneladas por año[4], llegan a plantas de reciclaje para ser reincorporados al mercado y ser usados nuevamente en productos.

1.1.2. Reciclado de PET en Chile

Actualmente el material plástico reciclado en Chile, es marginalmente menor que el 8.5% del total producido e importado a la industria. Aproximadamente 88 mil de toneladas por año.[5]

Sin embargo, establece el informe [6], hay un gran potencial para aumentar esta tasa, dado que solamente se ocupa el 48% de la capacidad instalada de molienda y el 57% en el caso de la peletización, que corresponden a los dos procesos productivos que caracterizan al reciclaje del plástico.

Con relación del material reciclado, del total de plásticos reciclados, el 17% son de origen domiciliario y el otro 83% de origen no domiciliario (industrial). El PET reciclado de origen domiciliario se concentra en un 55%, lo que es aproximadamente 7.889[ton/año].

La capacidad instalada para reciclaje de plásticos en el país se concentra principalmente en el Polietileno (PE), Polipropileno (PP) y Tereftalato de Polietileno (PET), situación que va en línea con las tendencias mundiales.

Las cifras entregadas por el estudio, de todas formas, pueden verse como una oportunidad, según indicó al respecto Magdalena Balcells, gerente general de Asipla.

“Hay una parte del estudio que apunta a la capacidad ociosa disponible en términos de reciclaje. Si la industria avanza a utilizar el total de la capacidad de molienda y peletización, el volumen del reciclaje de plásticos podría incrementar en al menos 65.000 toneladas al año en los próximos años”, aseguró Balcells.

Otro dato que arrojó el estudio [7] es que la capacidad instalada para reciclaje se concentra mayormente en la región Metropolitana, representando un 79% en molienda y un 83% en peletización. Si bien la Zona Norte de Chile reúne a varios gestores de residuos, la industria se desarrolla a partir de la región de Valparaíso hacia el sur, donde se encuentra la mayor demanda de material reciclado.

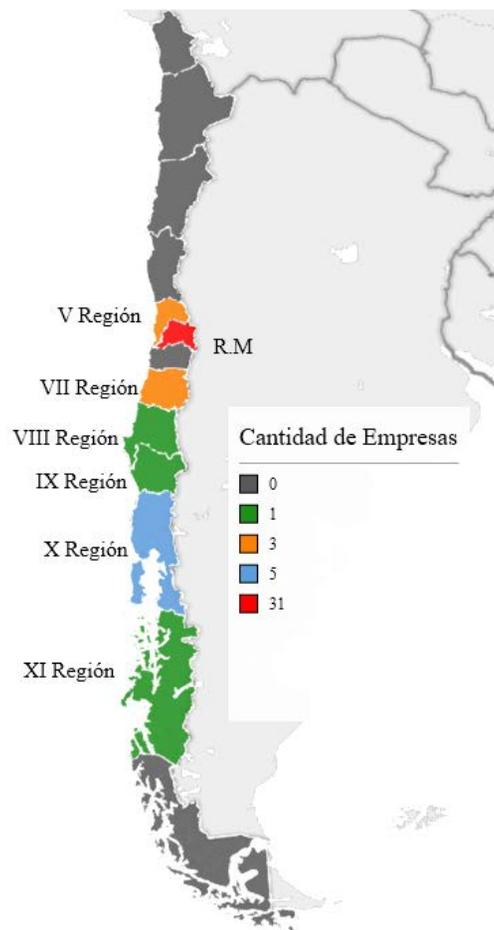


Figura 6: Empresas Recicladoras de Plásticos en Chile

Fuente: Elaboración Propia, datos obtenidos informe ASIPLA (Estudio Sobre Reciclaje de Plásticos en Chile, 2019)

La industria de reciclaje se desarrolla a partir de la V Región hacia el sur, ya que ahí se encuentra la mayor demanda de material reciclado.

Por otra parte, desde hace años en el país hay fábricas que utilizan el rPET³ como materia prima, pero como la recuperación en Chile es tan baja, de solo un 8,5 % anual, las empresas deben importar más de 10 mil toneladas al año de plástico reciclado para cumplir ciertas normativas que se han aplicado en el sector industrial del plástico con el fin de poder para cambiar este panorama.

1.1.3. Tendencia de Reciclado en Chile.

El PET, es el material termoplástico más consumido por la industria en Chile, esto según los datos del punto anterior, es uno de los pocos material plásticos 100 % reciclable, pero solo tiene participación del 15 %. [8]

Chile ha implementado ciertas normativas e iniciativas como la Ley REP o Estrategia de Economía Circular, que pretenden cambiar esta situación y aumentar en más de 50 % la participación del material reciclado en la industria. [9]

1.1.4. Ley de Responsabilidad Extendida del Productor. (REP)

La Ley de Responsabilidad Extendida del Productor (Ley N°20.920), publicada en el diario oficial [11] el 1 de junio del 2016, promueve la disminución en la generación de residuos y fomento del reciclaje, para ello la ley personaliza a los productores e importadores a financiar una correcta gestión de los residuos que generan los productos que son comercializados en el mercado nacional sean importados o de fabrica nacional.

La REP persigue dos objetivos principales: por una parte, promueve el diseño de productos que procuren el aumento de su vida útil y potencial de valorización y, por otra, incentiva la reutilización y valorización de productos al final de su vida útil. Ello permite internalizar las externalidades ambientales propias de los residuos (contaminación suelo y aguas, olores, emisiones, vectores), disminuir la disposición final de residuos, con ello aumentar la vida útil de los rellenos sanitarios, y formalizar el mercado de reciclaje existente en el país.

La Ley obligara gradualmente [11] a las empresas productoras de resinas termoplásticas o productos plásticos:

- El primer decreto establece las metas de recolección para sus productores en Chile (fabricantes o importadores) debe ser de 50 % para 2021, la que ascenderá hasta llegar a 90 % el 2028. Asimismo, las metas de “valorización”, comienzan en 25 % en 2021 y se incrementan progresivamente en el tiempo. Las metas regionales de recolección deberán cumplirse a partir del año 2023, dos años después de que entre en vigencia la primera meta nacional.
- Segundo PP envases y embalajes: Decreto que fija las metas para los productores de envases y embalajes. El jueves 4 de enero de 2018 se publica en el Diario Oficial⁴ el inicio del proceso de elaboración del decreto supremo.

En el Diario Oficial⁵ (10 de junio 2019) fue publicado el extracto del anteproyecto del decreto que establece las metas de recolección y valorización de la categoría ?Envases y Embalajes?. En lo específico, el anteproyecto crea metas tanto para los residuos domiciliarios y no domiciliarios, con la excepción de las microempresas.

- Metas de residuos domiciliarios: a partir de 2022, el 5 % del cartón para bebidas debe ser revalorizado. En el caso de residuos metálicos el porcentaje llega al 6 %; papel y cartón, 5 %, plástico, 3 % y vidrio, 11 %. Estas metas están sujetas a un aumento gradual, por ejemplo, papel y cartón debe revalorizar al menos el 70 % para el 2030.
- Metas de residuos no domiciliarios: Su meta por cada categoría es llegar al 30 % en 2022, pero en una segunda etapa, a partir de 2026, se fijaran metas específicas por categoría.

El incumplimiento de esta ley se castiga desde una amonestación escrita a una multa de 10.000 unidades tributarias, dependiendo de la falta. Por esto se hace relevante, desde el punto de vista organizacional, estudiar la factibilidad de este tipo de iniciativas en nuestro país y establecer procedimientos técnicos y sociales que impulsen el cumplimiento de la ley. [12]

³Tereftalato de Polietileno Reciclado

⁴Diario Oficial (enero 4 de 2018). Da inicio al proceso de elaboración del decreto supremo que establece metas de recolección y valorización y otras obligaciones asociadas de envases y embalajes, y regula un sistema de depósito y reembolso de envases de bebidas retornables de un solo uso. Disponible en: <http://bcn.cl/2aotv> (julio 2019).

⁵Diario Oficial (junio 10 de 2019). Anteproyecto de decreto supremo que establece metas de recolección y valorización y obligaciones asociadas de envases y embalajes. Disponible en: <http://bcn.cl/2aotw> (julio 2019).

1.1.5. Economía Circular

En Resumen Economía circular es una estrategia o sistema de aprovechamiento de recursos que se logra mediante reducción, reutilización y reciclaje. Aboga por re-diseñar y optimizar la fabricación de productos, para que se reintegren al sistema productivo o vuelvan a la naturaleza sin causar daños ambientales.

Para entender de mejor manera ese nuevo concepto industrial es importante conocer como a trabajado el modelo actual lineal de producción/consumo.[13]

1.1.5.1 Modelo de Producción y Consumo Lineal

A modo de generalización, podemos decir que el actual modelo de producción/consumo se compone de cinco principales etapas, desde la extracción de materias primas, su procesamiento, hasta que el producto pasa al consumidor para luego ser convertido en desecho. La figura 7 muestra los principales procesos del funcionamiento de los mercados actualmente.

El ciclo lineal de producción es un derivado de la Revolución Industrial, en donde la especialización del trabajo y el uso de prácticas repetitivas y fáciles en el ciclo de producción focalizado en la productividad de las tareas. Esta filosofía de producción se ha perpetuado a través del tiempo, y actualmente es considerado dentro de los aspectos técnicos de la empresa.

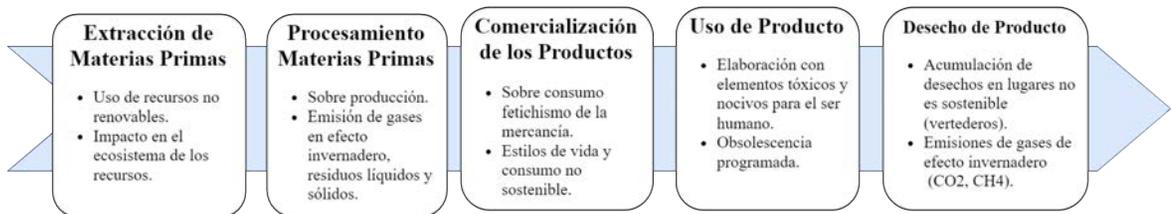


Figura 7: Modelo de Producción/Consumo Lineal
Fuente: Elaboración Propia

Los inicios del estado chileno en temas ambientales, datan del año 1870 con leyes que buscaban la protección en los bosques, desde 1990 se detecta una evolución en el enfoque. Se puntualizan los principales problemas ambientales por región y se forma la COLMA⁶ y la CONAMA⁷ para poder controlar los problemas detectados, dar un marco regulador a los sectores productivos y responder a las presiones internacionales.

En el año 2010 se crea el Ministerio del Medio Ambiente, cuya misión es “Liderar el desarrollo sustentable, a través de la generación de políticas públicas y regulaciones eficientes, promoviendo las buenas prácticas y mejorando la educación ambiental ciudadana”. En este sentido, es al ministerio de Medio Ambiente sobre quien cae la responsabilidad respecto al tema de residuos en nuestro país.

Actualmente el trabajo y esfuerzos desde diversos Ministerios se ha agrupado en Comité de consumo y producción sustentables, organismo dependiente del Ministerio de Medio Ambiente y que tiene como principal objetivo el levantamiento de un Programa de Consumo y Producción Sustentables y su ejecución mediante el trabajo independiente de cada ministerio.

Como se desprende del libro “De la Cuna a la Cuna”⁸ escrito por Micheal Braungart⁹(2002), las empresas ganadoras a largo plazo se caracterizan por fomentar la “eco efectividad“, es decir, crear procesos productivos y productos que sean “alimento para el medio ambiente”. De esta manera buscar que grandes como empeñas empresas generen propuesta de basura cero, viéndose obligadas a reformular el diseño de sus productos y procesos para cumplir las normas establecidas.

El 1 de junio del 2016 se publica la ley 20.920, que establece el marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y el fomento al reciclaje, como marco regulador para el problema de los residuos en nuestro país. La ley gira en torno a la valorización de residuos como catalizador del funcionamiento de su gestión.

⁶Comisión de Legislación Ambiental.

⁷Comisión Nacional del Medio Ambiente.

⁸Libro escrito en 1995 sobre el Rediseño la forma en que hacemos las cosas.

⁹Michael Braungart es un químico y fundador de la Agencia para el Fomento de la Protección Ambiental (EPEA) en Alemania.

Este modelo de leyes está ampliamente aplicado en Europa, pero cabe destacar que estas economías ya funcionaban con una fuerte infraestructura y desarrollo de instrumentos antes de la aplicación de una legislación de la responsabilidad extendida del productor (UE 2012).

Esta propuesta empuja a las organizaciones a procesos de innovación, ya que en algunos casos significará implementar un cambio completo en cómo se hacen las cosas.

1.1.5.2 Modelo de Producción y Consumo Economía Circular

En este sentido es clave tanto para productores como consumidores, primero que se entienda y concientice sobre los actuales efectos de su actividad, y segundo que sean proactivos a la aplicación concreta de rutinas, hábitos y procesos que apliquen y creen estándares éticos “universales” de consumo y la producción, ya no sólo por iniciativa propia, si no para cumplir con los marcos legales actuales.

El concepto de economía circular¹⁰ puede ser la clave para dilucidar formas de atacar los problemas de una manera económicamente viable y, además, establecer nuevas dinámicas sociales y técnicas que conducirán a una producción y consumo responsables. La economía circular nace como una alternativa al sistema lineal de producción. Principalmente se trata de un ciclo que conserva y optimiza el uso de los recursos utilizados en cada proceso y cada etapa de vida del material.

La economía circular surge de la idea de que los ciclos naturales no generan residuos: la materia fluye. La basura de un organismo es recuperada y apreciada por otro. Esta idea de “la basura es comida” es tomada desde la naturaleza y actualmente aplicada a los procesos técnicos humanos para re pensar la manera en cómo funcionan nuestras tecnologías, la forma de diseñar productos y la forma en cómo el consumidor interactúa con ellos. Los productos no bio degradables deben ser diseñados bajo una lógica de “retorno y renovación”(X)(Ellen MacArthur 2015). Los productos deben ser diseñados para que sus materiales puedan volver a ser reprocesados para crear productos nuevos conforme las tecnologías avanzan.

Los principios de la economía circular tienen que ver con la dotación de mecanismos que se desliguen del consumo de recursos finitos. Se basa en tres principios, cuyo fin tiene como medio el desafío de la innovación para poder lograr ser viable.

1. **Preservar y enriquecer el capital natural:** controlando los stocks finitos y balanceando los flujos de recursos renovables.
2. **Optimizar el rendimiento de recursos:** circulando productos, materiales y componentes a su máximo rendimiento en todos los procesos, en los flujos biológicos como en los técnicos.
3. **Velar por la eficacia del sistema:** revelando y rediseñando para dejar fuera las externalidades negativas.

¹⁰Este apartado está basado en gran medida a las investigaciones de Ellen MacArthur Foundation, dedicada a la aceleración de la transición a una economía circular.

La lógica detrás de la economía circular se basa en la predominancia de fuentes de energías renovables, y minimizar el uso de materiales finitos. Para esto se plantean ciclos por los cuales se procede a preservar el valor al máximo en cada etapa del material. Por ejemplo, en los sistemas de materiales técnicos, el usuario debe ocuparse de prolongar y mantener el valor del producto. Se plantea que mientras más interno el ciclo, más valor se mantiene del producto. Para ello, contextualizaremos con la explicación de los ciclos en la Figura 8.

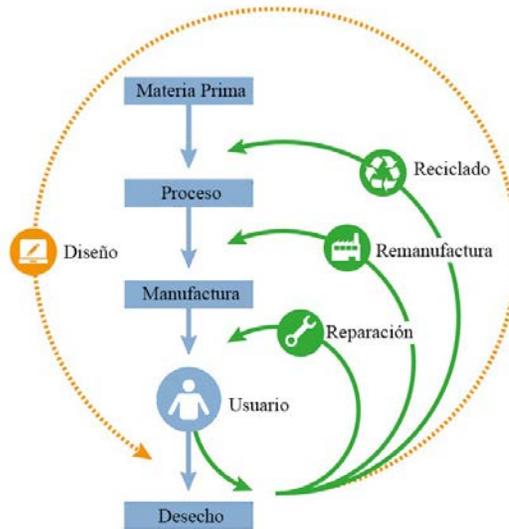


Figura 8: Modelo de Producción/Consumo Economía Circular
Fuente: Ellen MacArthur Foundation.

1. **Mantener / Prolongar:** El primer ciclo del sistema técnico consiste en el constante cuidado de un producto de componentes técnicos. Ante fallas, lo mejor es la reparación. Si consideramos que un producto, además de su valor en materiales, también contiene, entre otros, valor de horas/trabajo y valor energético en su elaboración, el reparar un producto conserva el mayor valor posible en el agregado. Así mismo, el compartir este producto hace que las pérdidas estructurales de eficiencia (el tiempo que el producto pasa en estado ocioso durante su vida útil) se minimicen.
2. **Reusar / Redistribuir:** El segundo ciclo es, luego que el primer usuario ya no está interesado en conservar el bien, hacerlo circular por plataformas de redistribución o reventa, para que pueda volver a tomar valor como activo para un usuario distinto. En este sentido, se incorpora un nuevo agente al ciclo: el proveedor del servicio de redistribución. Esto permite que el producto siga generando valor minimizando la pérdida de valor asociada a crear un nuevo producto para el usuario secundario.
3. **Reacondicionamiento / Remanufactura:** El producto puede ser devuelto a sus fabricantes para que se reacondicione o remanufacture, aprovechando los componentes duraderos de estos para que sean parte de nuevos productos, o mejorar el producto obsoleto para volverlo a introducir al mercado. Esto provoca un ahorro en comparación con la manufactura de un producto totalmente nuevo, ya que no se extraen materiales y se necesita menos energía y trabajo para la reacondicionación o remanufactura.
4. **Reciclar:** Cuando los componentes duraderos ya no tienen vida útil, por ejemplo, debido a un salto tecnológico, lo óptimo, en vez de desechar el producto, es introducirlos al mercado del reciclaje, donde los fabricantes de partes pueden recuperar materiales para fabricar partes nuevas y que tengan utilidad para nuevos productos. Aunque aquí el valor mantenido del producto en términos de materiales, energía y horas trabajo es mínimo, sigue siendo una opción de ahorro cuando se compara con la obtención de materiales vírgenes.

1.2. Fabricación Aditiva

A continuación se definirá el concepto de “Fabricación Aditiva”, un poco de historia y sus clasificación, todo esto para contextualizar la importancia de este tipo de tecnologías y el potencial que ofrece para enfrentar grandes problemáticas de la industria manufacturera moderna.

Posteriormente se dará énfasis en las sistemas FDM, y de como estos, potencian a la industria manufacturera, tanto a grandes como a pequeñas (startups) empresas aplicando las nuevas normas medioambientales mencionadas a final del punto anterior.

1.2.1. Definición

El término *fabricación aditiva* (“Additive Manufacturing” o “AM”) es un término recientemente incorporado el organismo de normalización *ASTM International*¹¹, [14] para hacer referencias a todas la tecnologías de fabricación que comparten el mismo principio básico de fabricación directa.

Fabricación directa quiere decir que se puede llegar a fabricar una pieza, parte o producto directamente de un modelo geométrico 3D (CAD)¹², sin necesidad de considerar parámetros de extracción de material (CAM)¹³ propios de la manufactura convencional.

1.2.2. Concepto

Según[15], se denomina fabricación aditiva, debido al rasgo distintivo que poseen todas las máquinas pertenecientes a esta tecnología. Todas se basan en fabricar una pieza depositando o agregando el material en capas, donde cada capa es una sección procedente de la discretización por secciones planas de la pieza en modelo CAD que la máquina realiza previamente a la fabricación, como se ve en la Figura 9, en otras palabras la pieza se va conformando de manera controlada agregando material capa a capa.



Figura 9: Modelado 3D, discretización de las capas y conformación de la pieza mediante fabricación aditiva

Es importante entender que cada capa tendrá un espesor determinado, cuando menor sea dicho espesor, más se aproximará a la pieza original en el modelo CAD. Por tanto, toda pieza fabricada por este método o por una de las tantas máquinas de fabricación aditiva, siempre será una aproximado a la pieza diseñada en CAD.

1.2.3. Marco Histórico

La impresión 3D es una de las tecnologías más revolucionarias del siglo XXI. Ofrece a todos los usuarios, desde ingenieros y doctores, hasta propietarios y emprendedores de pequeñas empresas, la capacidad de transformar ideas virtuales en objetos “físicos.”

La primera patente relacionada con la tecnología fue presentada en mayo de 1980 por el Dr. Hideo Kodama del Instituto de Investigación Industrial Municipal de Nagoya, que describe un sistema de “*prototipado rápido de foto-polímeros*”. La idea de Kodama consiste en utilizar una tina de foto-polímeros, expuesto a la luz ultravioleta, para endurecer una pieza, este experimento sentó las bases utilizadas posteriormente por Chuck Hull¹⁴, quien en 1986 inventa y patenta[16], un aparato de *estereolitografía (SLA)*¹⁵. Esta técnica se refiere a un método de impresión de objetos “capa a capa” mediante un láser selectivamente provoca que las cadenas de moléculas se unan, formando polímeros.

¹¹American Society for testing and Materials, que en español se define como la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, es una organización de normas internacionales que desarrolla y publica acuerdos voluntarios de normas y técnicas para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios.

¹²En inglés, son las siglas de: Computer-Aided Design (CAD): Diseño Asistido por Computadora.

¹³En inglés, son las siglas de Computer-Aided Manufacturing (CAM): Fabricación Asistida por Computadora.

¹⁴Hull, Chuck (1986). *Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography*.

¹⁵Stereo lithography Apparatus o SL, también conocida fabricación óptica o foto-solidificación es una forma de tecnología de manufactura aditiva patentada con en Estados Unidos, número US - 4,575,330 el 11 de marzo del 1986.

Hull continúa con su trabajo, fundando 3D Systems Corporation, la cual presenta el primer sistema de impresión 3D comercial del mundo, SLA-250

En 1987, Carl Deckard¹⁶ y el asesor académico Joe Beaman, de la Universidad de Texas en Austin fueron pioneros en un método alternativo^[17] de fabricación aditiva, el cual convierte el polvo suelto en un sólido, a diferencia de Chuck Hull, el enfoque de Deckard requiere de un láser para unir el polvo y solidificarlo, este proceso es conocido como *Sinterizado Selectivo por Láser (SLS)*¹⁷, esta tecnología no tuvo un mayor impacto durante esos años, sino hasta el año 2006, saliendo al mercado las primeras impresoras SLS comerciales.

En 1989, la empresa estado unidense Stratasys¹⁸, fundada por Scott Crump inventa y patenta^[18] un nuevo método de fabricación aditiva llamado *Modelado por Deposición Fundida (FDM)*, esta técnica implica fundir filamentos de polímero y depositarlo de forma controlada sobre un sustrato, capa a capa para la conformación de la pieza. Esta es la técnica que eventualmente dará origen a las impresoras 3D conocidas en la actualidad.

Después de un largo tiempo sin grandes avances a lo que se refiere a la F.A en 1995, una empresa alemana "Electro Optical Systems", creada por los doctores Hans J. Langer y Hans Steinbichler, crean la impresión láser 3D de metal (*DMLS*)¹⁹. Esta tecnología es similar a la sinterización selectiva por láser, pero con un láser más potente adaptado para el trabajo con una gran variedad de metales.

A partir 2006, y gracias a un proyecto llamado *Reprap*²⁰^{[19][20]} iniciado por el Dr. Adrian Bowyer en el 2004, se aprueba y liberan los permisos de construcción y autoreplicación de impresoras, lo que da como consecuencia un código abierto para el desarrollo de nuevos equipos de FA a todos quienes deseen construir o elaborar esta tecnología. Este es el comienzo de lo que más tarde se conocerá como *Movimiento Makers*.²¹

¹⁶Deckard, C. "Method and apparatus for producing parts by selective sintering", Patentado en USPTO n° 4863538, publicado el 5 de septiembre de 1989

¹⁷Selective Laser Sintering

¹⁸Stratasys, Ltd. es un fabricante estadounidense de impresoras 3D y sistemas de producción 3D para prototipos rápidos de oficina y soluciones de fabricación digital directa.

¹⁹Sinterización Directa por Láser de Metal, o en inglés y de donde provienen sus siglas, Direct Metal Laser Sintering

²⁰Como sus siglas abreviadas en inglés Replication Rapid Prototypers es una iniciativa con el ánimo de crear una máquina autorreplicable que puede ser usada para prototipado rápido y manufactura.

²¹Es una cultura o subcultura contemporánea que representa una extensión basada en la tecnología de la cultura DIY (Do it Yourself o hágalo-usted-mismo). Esta promueve la idea que todo el mundo es capaz de desarrollar cualquier tarea en vez de contratar a un especialista para realizarla.

1.2.4. Clasificación de las Tecnología de Fabricación Aditiva

En general, el concepto de impresión 3D se asocia con impresoras de polímeros por extrusión, sin embargo, este es solo una de las tantas variedades o tipos de clasificación del concepto de fabricación aditiva.

En los últimos 30 años, el enfoque de estos sistemas han crecido desde la fabricación de prototipos usando depósitos de resina y lechos de polvo, hasta incluir la producción de piezas con metales y materiales cerámicos. Una reciente estandarización actividades de la ASTM²² y la ISO²³ reúne estos procesos en seis categorías.

En el siguiente apartado se detallarán algunas de las clasificaciones, véase Tabla 1 y posteriormente se detallaran las más utilizadas en la industria manufacturera, con el fin de conocer de forma conceptual algunos de estos procesos.

Nombre	Descripción	Categorías
Fotopolimerización	Un depósito líquido de resina fotopolimérica es curada mediante exposición selectiva a la luz (vía láser o por proyector), lo cual inicia la polimerización y solidifica las áreas expuestas	SLA: Sistema de estereolitografía. DLP: Procesamiento digital por luz. 3SP: Escaneo, giro y fotocurado selectivo. CLIP: Interfaz de producción líquida continua.
Fusión de Lecho de Polvo	Materiales en polvo son selectivamente consolidados al fundirlos juntos usando una fuente de calor, como láser o rayo de electrones. El polvo no fundido que rodea la pieza consolidada actúa como material de soporte para características adicionales	SLS: Sinterización selectiva por láser. DMLS: Sinterización directa de metal por láser. EBM: Fusión por rayo de electrones. SHS: Sinterización selectiva por calor. MJF: Multi Jet Fusion.
Inyección por Aglutinante (Binder Jetting)	Agentes líquidos de unión son selectivamente aplicados en pequeñas capas de material en polvo para construir piezas capa por capa. Los aglutinantes incluyen materiales orgánicos e inorgánicos. Las piezas metálicas o cerámicas son, por lo general, llevadas a un horno luego de ser impresas.	3DP - Impresión 3D. ExOne. Voxeljet.
Inyección de Material (material Jetting)	Gotas de material son depositadas capa por capa para la fabricación de piezas. Variaciones comunes incluyen chorros de resina fotocurable y curado con rayos UV, así como chorros de materiales fundidos que luego se solidifican a temperatura ambiente.	Polyjet. SCP: Impresión de curvatura suave. MJM: Multi-Jet Modeling Project.
Laminación de Hojas	Láminas de material son apiladas y laminadas juntas para formar un objeto. El método de laminación puede ser adhesivo o químico (papel, plásticos), soldadura ultrasónica o soldadura con bronce (metales). La zonas que no se necesitan son cortadas, capa por capa y eliminadas luego de que el objeto está terminado.	LOM: Limited Object Manufacture. SDL: laminación por deposición selectiva. UAM: Manufactura aditiva ultrasónica.

Tabla continua en la siguiente página

²²Siglas en inglés para la American Society of Testing Materials, que significa, Asociación Americana de Ensayo de Materiales

²³En la definición más extensa las siglas hacen referencia a Organización Internacional de Normalización (International Organization for Standardization, en inglés).

Nombre	Descripción	Categorías
Extrusión de Material	El material es extruido a través de un cabezal, para formar modelos de múltiples capas.	FFF: fabricación por filamento fundido. FDM: Modelado por deposición fundida.
Deposición Directa de Energía (DED)	Polvo o alambre es alimentado en una superficie donde se adhiere mediante una Fuente de energía, como láser o haz de electrones. Es, en esencia, una forma de soldadura.	LMD: Deposición de metal por láser. LENS: Láser Engineered Net Shaping. DMD: Deposición directa de metal.
<i>Fin de Tabla</i>		

Tabla 1: Clasificación de las Tecnologías de FA, Según la ASTM

1.2.4.1 Estereolitografía SLA

El proceso de esta tecnología se basa en exponer las propiedades de una resina fotosensible que se solidifica mediante la proyección de un láser (UV).

El proceso comienza con el movimiento vertical de un elevador dentro de una piscina de resina fotosensible, el cual es expuesto al láser, esto hace que la resina se solidifique, capa a capa, en la sección y contorno deseado. Luego la capa que es expuesta se desplaza hacia abajo (por el elevador).

Esto se reitera hasta formar la pieza deseada. Véase Figura 10. La pieza una vez generada dentro de la piscina se extrae y es expuesta a un post-curado que garantiza la funcionalidad del producto.

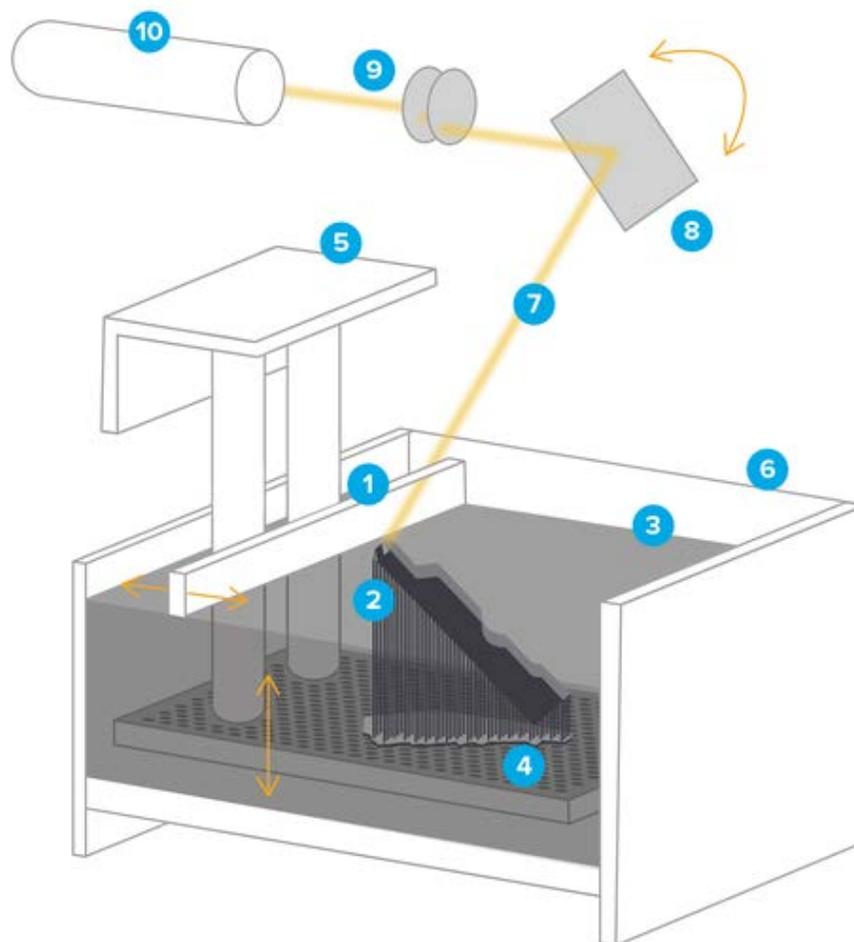


Figura 10: Conformación de un producto o pieza mediante SLA, Esterolitografía.
1-Barrendera. 2-Parte Impresa(pieza o producto). 3-Resina. 4-Plataforma de Construcción. 5-Elevador.
6-Tanque de Resina. 7-Rayo Láser. 8-Motor X-Y de escaneo. 9-lentes. 10-Láser UV.

1.2.4.2 Sintetización Selectiva láser SLS

Es este procedimiento, en vez de emplear un fotopolímero como ocurre con la SLA, para el sintetizado, se utiliza un compuesto en polvo de diversas clases junto a un láser que causa que las partículas se fusionen y se solidifiquen. Como se muestra en la figura 11. El modo de generar piezas es similar a la estereolitografía (construcción capa a capa), posteriormente la pieza es sometida a un post-curado a altas temperaturas.

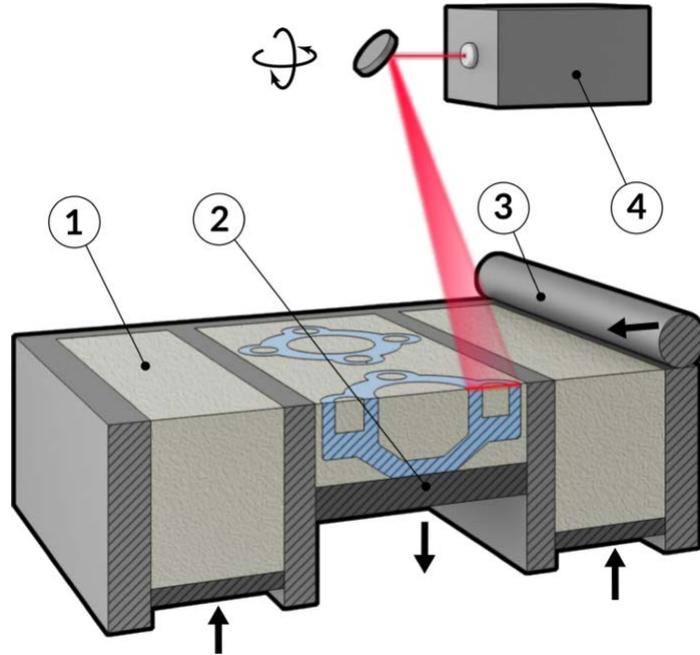


Figura 11: Conformación de un producto o pieza mediante SLS, Sintetizador selectivo láser.
1-Material Polvo. 2-Plataforma de Construcción. 3-Rodillo. 4-lentes.

1.2.4.3 Sintetización Directa Láser DMLS

Esta tecnología funde partículas de polvo metálico a través de una fuente de calor, un láser o un haz de electrones, para conformar una pieza que puede llegar a tener una gran complejidad geométrica.

Para comenzar el proceso de impresión, la impresora de DMLS llena una cámara de gas inerte y luego la calienta a la temperatura de impresión óptima (depende del material en polvo utilizado). Se deposita una fina capa de polvo en la bandeja, de acuerdo con la altura definida previamente. El láser de fibra óptica barre la sección transversal de la pieza, fusionando las partículas metálicas. Véase complejidad de una pieza en la Figura 12

Cuando termina la capa, la bandeja baja y agrega otra capa fina de polvo. El proceso se repite hasta que se obtiene la pieza final.



Figura 12: Producto o pieza conformada mediante DMLS, Sintetización Directa láser.
Alta complejidad de pieza.

A continuación se enfatizará en el proceso al cual la memoria está enfocada, “Sistemas de FDM” o comúnmente llamadas tecnologías de “Impresión 3D” detallando el funcionamiento de éstas, y de como el trabajo de memoria puede ser un aporte a potenciar esta tecnología.

1.3. Modelado por Deposición Fundida (FDM)

Como se mencionó anteriormente, la tecnología y concepto FDM aparecen en la década de los 90’s, explotando comercialmente a partir del año 2006.

FDM son las siglas de “ Fused Deposition Modeling”, que en español se define como “Modelado por Deposición Fundido”. Esta tecnología se basa en el ingreso de un filamento termoplástico, que mediante un cabezal sometido a temperatura y controlado, extruye de forma precisa el material capa a capa sobre una plataforma de construcción. Las estructuras de apoyo se generan cuando son necesarias.

El equipo o maquiná utilizado para realizar este proceso es conocido como Impresora 3D, este equipo simplifica y acelera el proceso de elaboración de prototipos y/o productos. El procedimiento asociado a la impresión 3D es tan sencillo y a la vez tan poderoso que es utilizado hoy en día en negocios de hogares como en medianas y grandes empresas.

La impresora 3D consta de un extrusor y de un sistema de movimientos cartesiano para realizar la pieza. 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. Véase Figura 13

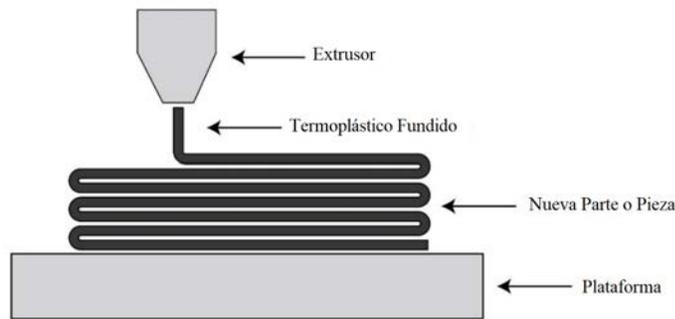


Figura 13: Fabricación con Filamento Fundido.

1.3.1. Componentes de Impresora 3D

Un aspecto importante para comprender el proceso asociado y familiarizarse con términos más específicos de esta tecnología, en esta sección se verán componentes más importantes de las impresoras 3D y su funcionamiento. Véase Figura 14

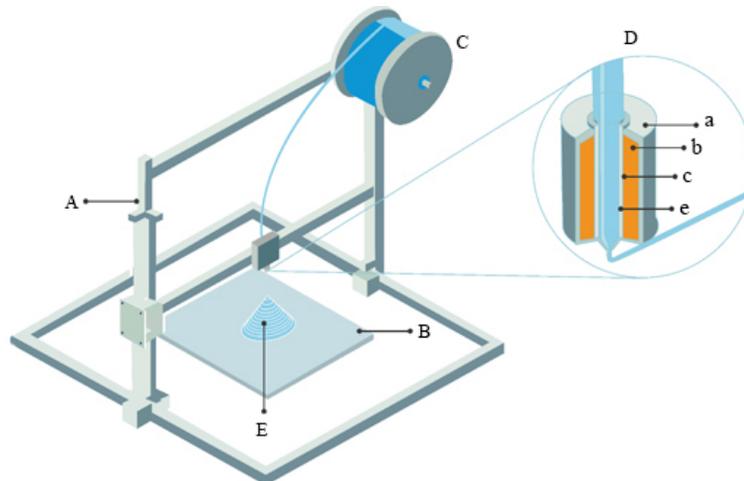


Figura 14: Componentes principales de una impresora FDM.
A-Bastidor y ejes cartesianos. B-Plataforma de construcción. C-Filamento. D-Extrusor. E-Pieza o producto

A-Bastidor y ejes cartesianos: La impresora trabaja en tres ejes -X, Y y Z- de manera que las capas se dibujarán en X e Y. Luego habrá un desplazamiento en Z equivalente a la distancia de la altura de las capas y comenzará la impresión de la capa siguiente. Dependiendo del modelo de la impresora, el movimiento en Z podrá ser un desplazamiento de la plataforma de construcción hacia abajo o un movimiento del extrusor hacia arriba.

B-Plataforma de Construcción: Es la superficie sobre la cual se deposita la primera capa de material. Es fundamental lograr una correcta adhesión del material a la plataforma, ya que de esto dependerá que se construya correctamente la impresión. La mayor parte de los filamentos necesitan una plataforma calefaccionada que mantenga al material extruido a una temperatura que evite que la pieza se contraiga y se despegue de la base. Si es necesario, sobre la plataforma se aplican sprays adhesivos que generan una película adherente. O se cubre la superficie de la plataforma con cinta de papel para crear una superficie rugosa. Dependiendo de la configuración de la impresora, la plataforma se moverá hacia arriba y abajo o hacia atrás y adelante.

C-Filamento: Las impresoras FDM utilizan material termoplástico que vienen en bobinas. Los termoplásticos son polímeros que se funden al aplicarles calor.

D-Extrusor: El extrusor funciona de una manera muy similar a una pistola de silicona. Tiene un orificio por el que se introduce el filamento plástico, que es empujado por una rueda tractora hacia la zona de calentamiento para finalmente salir por una boquilla varias veces más chica que el diámetro original. En impresión 3D se usan dos diámetros de filamento: 3 mm y 1,75 mm. Cada impresora usa solamente uno de estos diámetros y debería estar especificado en los datos técnicos del fabricante.

a-Resistencia (Calefactor): Se ocupa de calentar el barril del extrusor para fundir el filamento.

b-Recubrimiento aislante: Evita que el filamento se adhiera al conducto y tape el extrusor.

c-Boquilla de extrusión: Reduce el diámetro del filamento, que es de 3 mm o de 1,75 mm dependiendo de la máquina que se use. Es por donde saldrá el filamento a lo largo de la impresión y lo que definirá el trazo, con el que se dibujará cada capa. El diámetro estándar de la boquilla suele ser de 0,4 mm, pero pueden encontrarse también boquillas de 0,1 mm a 1 mm. Cuanto mayor sea el diámetro de la boquilla, menor será la definición y mayor será la velocidad de impresión. Esto solo modificará la definición en X e Y, que es dónde veremos los trazos de la boquilla, pero no será tan influyente en la definición en Z. Si se necesita usar la impresora para piezas que no tengan detalles muy pequeños en su cara superior, podría ser conveniente usar una boquilla más grande. Mientras que si tenemos una pieza sumamente detallada convendrá usar una boquilla de menor diámetro a pesar del mayor tiempo de impresión para sacar más provecho de la herramienta.

E-Pieza impresa: Se construye sobre la plataforma y queda adherida a ella hasta que su temperatura baja a temperatura ambiente. Una vez fría, la pieza se desprende sola de la plataforma y está lista para usar o darle terminación.

El enfoque principal de esta memoria se centra en el Sistema de Extrusión incorporado en las impresoras 3D, como se mencionó en el punto anterior, este está compuesto por varios componentes que le permiten al extrusor realizar las múltiples operaciones, iniciando por tomar el material sólido en forma de filamento, aplicar temperatura hasta llevarlo a un estado pastoso “termoformable”, y luego empujarlo a través de la boquilla sin perder continuidad de material en la salida de está.

1.3.2. Sistema de 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.

En este proceso de 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, la cual es empujada por un perfil específico, y así obtener un producto de sección constante y de longitud indefinida. Es importante destacar que un sistema de extrusión contiene dos componentes principales. Para ello véase Figura 15.

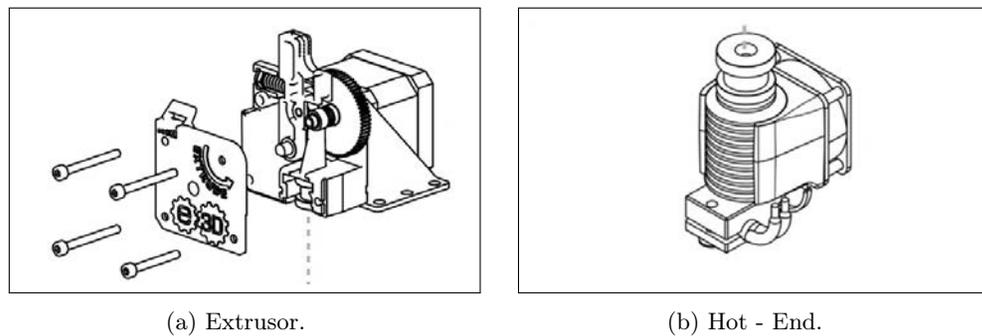


Figura 15: Componentes del Sistema de Extrusión

- **Extrusor:** También llamado *feeder*, *drive* es el conjunto que empuja el filamento, normalmente está formado por un motor, rueda dentada, un rodamiento, etc. Véase Figura 15a.
- **Fusor o HotEnd**²⁴: Es el componente donde se funde el material para depositarlo, y suele tener partes como el *nozzle*, o punta, el disipador, y el bloque calentador. Véase Figura 15b.

Existen dos sistemas de extrusión, principalmente utilizados en la industria de las impresoras 3D, el Sistema Directo y el Sistema Bowden.[23], [24]

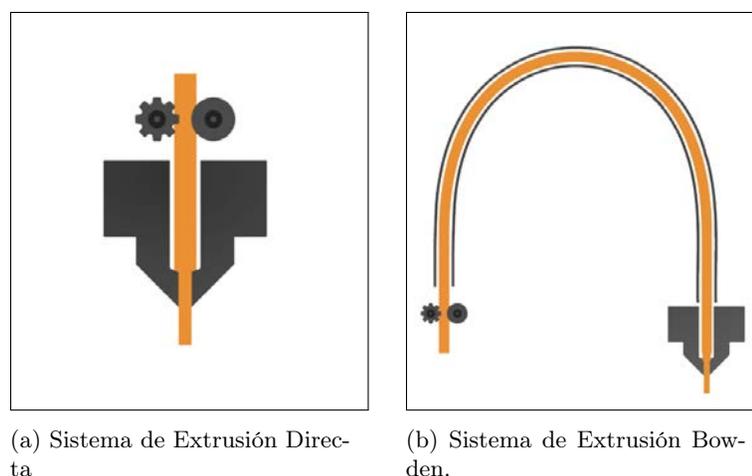


Figura 16: Sistemas de Extrusión

²⁴Es la pieza, encargada de fundir el filamento antes de hacerlo pasar por la boquilla.

Clasificación de los Sistemas de Extrusión para FDM	
Extrusión Directa	<p>La extrusión directa consiste en situar el motor que empuja en el filamento directamente sobre el hot-end, en la propia pieza móvil de la impresora. Uno de los mayores inconvenientes de este extrusor era el uso de un rodamiento para empujar el filamento lo que hacía que muchas veces se resbalará por él.</p> <p>Las ventajas de este sistema son que al empujar el filamento cerca del hot-end es más fácil calibrarlo para lograr un buen control de las retracciones del material, lo que nos permitirá obtener un mejor acabado en las piezas.</p> <p>Como principales debilidades se encuentra el peso añadido a las partes móviles de la impresora lo que al imprimir a altas velocidades puede provocar problemas de vibración.</p>
Extrusión Bowden	<p>La extrusión bowden consiste en sacar el motor de empuje de filamento de las partes móviles y situarlo en la estructura de la impresora. De esta forma guiaremos el filamento hasta el hot-end mediante un tubo de PTFE (Sigla del politetrafluoretileno, Teflón).</p> <p>Este tubo suele tener un diámetro interno mayor al del filamento para compensar las tolerancias de fabricación que pueda tener el filamento y que no se produzcan atascos.</p> <p>La extrusión bowden presenta la ventaja de reducir el peso de las partes móviles lo que implica que podremos a imprimir a velocidades más altas. Como principales inconvenientes nos encontramos con que es un sistema más susceptible a atascos y que nos costará más controlar la retracción. Además nos será más difícil trabajar con filamentos flexibles.</p>

Tabla 2: Sistemas de Extrusión, Relaciones con Tecnología FDM.
Elaboración Propia

De lo anterior, y a modo de resumir, se entiende que el extrusor para tecnologías FDM es un sistema diseñado para empujar material a través de una boquilla.

1.3.3. Proceso FDM

El FDM permite crear prácticamente cualquier geometría que se tenga en mente. Ese es el motivo por el cual se podrán encontrar piezas fabricadas mediante esta técnica en componentes de uso, herramientas de producción o líneas de montaje en fábricas y prototipos.

Como se comento anteriormente, esta es una tecnología basada en filamentos en la que un cabezal controlado mediante temperatura extruye de forma precisa un material termoplástico capa a capa sobre una plataforma de construcción. Las estructuras de apoyo se generan cuando son necesarias y se suelen construir con un material soluble en agua.

A continuación en la Figura 17 se muestra como es el desarrollo para la creación de alguna pieza utilizando este método de fabricación aditiva.

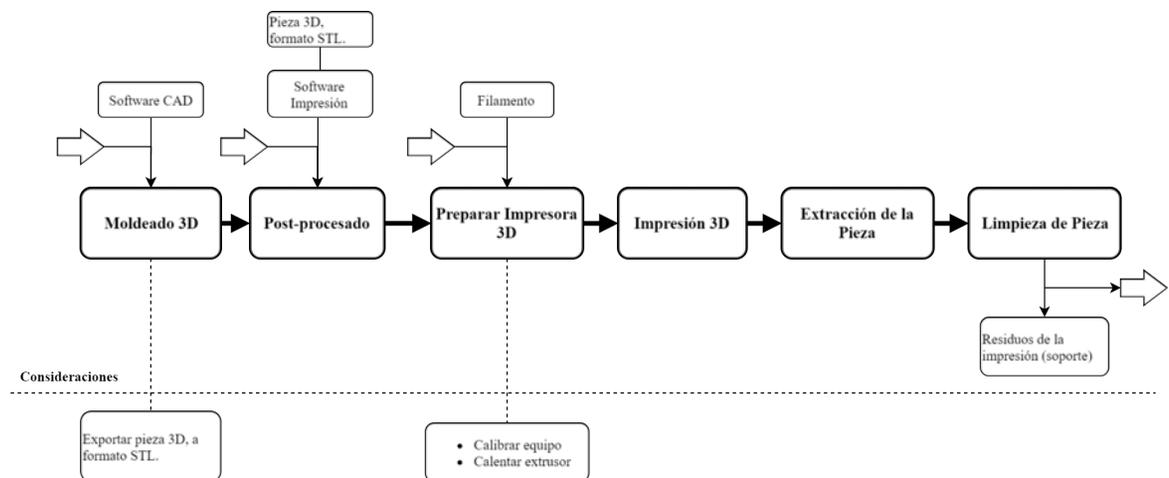


Figura 17: Diagrama de proceso de Modelado por Deposición Fundida
Elaboración Propia

El primer paso inicia proyectando la pieza a fabricar en un software de modelo 3D o mediante técnicas de ingeniería inversa²⁵, posteriormente se exporta en formato STL²⁶ que divide el objeto digital en capas y se lleva al un software, entregado por el fabricante o de código abierto, para la configuración del proceso de impresión, en el cual se ajustan valores que definan la calidad, rugosidad y resistencia de la pieza, además de ajustar los diferentes movimientos en los ejes cartesianos que la impresora a realizar.

Una vez ya configurado todos esos valores, el archivo del postprocesador es guardado en un dispositivo de almacenamiento de información para llevarlo al equipo. Al preparar la Impresora 3D, es importante verificar el eje Z, en relación a la plataforma de trabajo, cargar el material correcto(filamento) en la impresora.

Cuando se haya terminado la preparación del equipo se carga el programa y se da inicio a la etapa de impresión 3D. Al terminar esta etapa, (que puede tardar horas como días, dependiendo de la complejidad o tamaño de la pieza) y pasando el periodo de enfriamiento, se extrae la pieza de la impresora y finalmente pasa a la parte de limpieza, en la cual se remueven todos los restos innecesarios, como los soportes generados por el postprocesador, y lijado de imperfecciones.

1.3.4. Ventajas y Desventajas de FDM

1.3.4.1 Ventajas

Las principales características que distinguen el proceso de Fabricación Aditiva de cualquier otro proceso de fabricación industrial y que, como se verá posteriormente, le confiere enormes ventajas competitivas,[25] que se detallaran a continuación:

- Mayor capacidad de diseño. La tecnología permite que los ensamblajes puedan imprimirse en un proceso y que las formas orgánicas se puedan producir fácilmente, reduciéndose o eliminando las limitaciones tradicionales de fabricación (persiguiendo ergonomía, aerodinámica, hidrodinámica, entre otros). Son retos que en los métodos tradicionales(sustractivos y conformativos) de fabricación de piezas no han resuelto
- A diferencia de muchas técnicas de fabricación ampliamente utilizadas, como el moldeo por inyección, no se requieren herramientas.
- Fabricación en cualquier lugar. Las piezas pueden enviarse digitalmente e imprimirse en hogares o lugares cercanos a los consumidores, lo que reduce los requisitos y la dependencia del transporte.
- En comparación con las técnicas convencionales con más restricciones geométricas, se pueden producir sin limitaciones y prácticamente cualquier forma la fabricación aditiva puede producir modelos de forma muy rápida, en horas.
- Productos aligerados: La complejidad geométrica tiene una gran influencia en el peso de un objeto. Técnicas de conformado como la fabricación por moldeo permiten obtener productos huecos, pero siempre con las limitaciones que impone el desmoldeo (extraer la pieza del molde, una vez solidificada), que en ocasiones impide obtener la pieza deseada o exige utillajes muy complejos que lo hacen inviable técnica o económicamente. Otra solución, empleando métodos convencionales, es descomponer en varias piezas un objeto, pero esto requiere de trabajos adicionales de ensamblaje y añade dificultades (falta de ajuste, por ejemplo) que pueden ser también muy limitantes. Las técnicas de FA superan todas estas restricciones y pueden llegar incluso a materializar gradientes de porosidad en un mismo material, aligerando solo aquellas partes del producto que el diseñador estima que estarán menos solicitadas.
- Utilización de menos recursos para las máquinas y reducida mano de obra calificada, en comparación con la fabricación convencional. Además de Reducir del tiempo de lanzamiento al mercado. La aplicación de la FA a la producción rápida de prototipos ha permitido disminuir los errores de comunicación entre los distintos participantes en un nuevo diseño y acelerar su salida al mercado, así como reducir el riesgo de fracaso, aun cuando la producción en serie se ha seguido haciendo por métodos convencionales. Si se da un paso más, y se puede disponer de una técnica de fabricación para materializar el producto final, ya no como prototipo intermedio, se pueden reducir drásticamente muchas de las fases actuales de lanzamiento y validación, así como flexibilizar su adaptación a las continuas demandas en cambio constante de los mercados.

²⁵La ingeniería inversa es un proceso basado en el análisis y la recreación del diseño de un producto, con el uso de piezas físicas como punto de partida.(escaner de objetos).

²⁶Standar Triangle Language.

- Personalización del producto. FA permite fabricar productos, sin penalizar el coste, independiente de si se tiene que fabricar un determinado número de piezas iguales o todas distintas, lo que facilita la personalización, que es una de las principales tendencias actuales en el desarrollo de productos de alto valor añadido; la personalización en masa es uno de los paradigmas que persigue la industria en países desarrollados y que se considera clave para su sostenibilidad.

Estas características se pueden traducir en ventajas en muchos sectores industriales, que hacen que la FA sea el proceso más competitivo para la fabricación de piezas en muchas aplicaciones. De hecho, permite manufacturar diseños que son imposibles mediante otras tecnologías de fabricación convencionales.

- Uso eficiente del material debido a la producción exacta de piezas y no sobre producción en función de la demanda estimada.
- Ventaja comercial y mayor competitividad, en forma de costes y riesgos reducidos, ya que el tiempo de desarrollo, desde el concepto del producto hasta la elaboración del mismo, se reduce al mínimo. La mayor parte del coste es variable, por lo que no se obtienen economías de escala.
- Productos con series cortas: La fabricación permite reducir los lotes de producción, llegando incluso a la serie unitaria, sin apenas costes extras de fabricación, al prescindir de utillaje, lo que supone una ventaja absoluta respecto a métodos de fabricación sustractivos y/o de conformado.
- Reduce errores de montaje y por lo tanto los costes asociados a ellos: La integración de componentes puede permitir la fabricación en un solo paso del producto acabado, evitando procesos de ensamblaje de componentes y reduciendo además posibles errores durante el ciclo completo de producción (control de inventarios, procesos intermedios de inspección, manipulaciones).
- Eficiencia del material, al coincidir el material requerido con el material utilizado. El material de soporte y el polvo, a menudo, se pueden reciclar en la fuente y volver al sistema. Existen estudios donde se concluye que es posible reducir hasta en un 40 % el volumen de material en bruto en comparación a los procesos convencionales de manufacturado.
- Posibilidad de desarrollar productos multimaterial, ergonómicos o con varios mecanismos integrados en una misma pieza. En algunas tecnologías de FA, como es el caso de Objet, además de jugar con la porosidad de un mismo material, como se ha explicado, la FA puede fabricar aportando simultáneamente varios materiales en un mismo sólido, para así superar las limitaciones actuales en la relación peso/resistencia mecánica, aportando funcionalidades nuevas o abaratando costes. Es cierto que también existen técnicas conformativas de sobremoldeo, que pueden unir varios materiales en una misma pieza, pero la distribución multimaterial en todo el volumen es mucho más limitada, y las zonas de contacto suelen ser conflictivas por el distinto comportamiento (mecánico, térmico, dilatación) de ambos materiales.
- Beneficios ambientales. Las emisiones derivadas del transporte se reducen debido a la proximidad de fabricación.
- Con un número cada vez mayor de máquinas, la impresión 3D es cada vez más asequible, mientras que las máquinas de moldeo por inyección siguen siendo relativamente caras e inaccesibles.
- Reducción de costes en utillajes: La posibilidad de implementar un modelo de negocio donde el producto no esté ligado a utillajes supone no sólo gran flexibilidad de adaptación al mercado, sino que se consigue una reducción o eliminación de los costes asociados (fabricación del utillaje, paradas por cambios de referencia, mantenimiento e inspección), y de muchos procesos intermedios. Además, cuando no es viable prescindir de utillajes (caso de grandes lotes, por ejemplo), las técnicas de FA se pueden aplicar en la simplificación de la fabricación de moldes, troqueles, plantillas con total libertad en el diseño, permitiendo, por ejemplo, canales de refrigeración embebidos, o la adaptación a geometrías complejas.
- Procesos híbridos: Otra posibilidad de fabricación consiste en combinar procesos FA con procesos convencionales (sustractivos y/o conformativos), para aprovechar las ventajas de ambos. Por ejemplo, puede resultar muy conveniente combinar con tecnología de mecanizado por arranque de viruta (MAV). Así, se podría iniciar la fabricación de la pieza por tecnología FM, empleando únicamente la cantidad de material requerido, y aplicar MAV al final, para alcanzar una precisión determinada en el exterior.

A pesar de los evidentes avances que puede aportar a la industria por sus indiscutibles ventajas, existen limitaciones que hacen que las tecnologías FA no se hayan implantado aún de manera generalizada en muchos sectores. Las limitaciones actuales son debidas, como se describe a continuación, tanto a los propios procesos de FA, que aún pueden ser mejorados, como a procesos periféricos o auxiliares (manipulaciones previas de material, postproceso, control de calidad) que condicionan en muchos casos su viabilidad, e incluso al desconocimiento de cómo diseñar los productos o reorientar los negocios industriales para integrar de forma exitosa estas nuevas tecnologías.

1.3.4.2 Desventajas

La I+D+I en este campo en de los últimos años ha permitido que estos puntos débiles de la tecnología hayan mejorado considerablemente, convirtiendo la Fabricación Aditiva en una alternativa cada vez más real a los procesos de fabricación convencionales. Las principales limitaciones de los procesos de FA son:

- Disponibilidad y coste de materiales: Aunque es posible aplicar técnicas de FA en muchos materiales tanto metálicos como no metálicos, la gama disponible es muy inferior a la que se puede trabajar por métodos sustractivos y/o conformativos, y además el coste del material suele ser también bastante superior. Estos problemas de disponibilidad y coste de la materia prima son inherentes a los bajos volúmenes de consumo actuales, que no justifican las inversiones necesarias en los fabricantes de nuevos materiales, y por tanto, repercute negativamente en su consumo. Disponer de nuevos materiales que satisfagan requisitos concretos de la industria y los consumidores es un aspecto crítico para el futuro desarrollo de la FA.
- Acabado superficial de las piezas y velocidad de fabricación: Estos aspectos se presentan juntos, pues el aumento de la velocidad de fabricación condiciona la calidad del acabado superficial. Ambos son también retos importantes que debe resolver la FA para que sea ampliamente aceptada por sectores donde actualmente solo se admiten procesos de fabricación convencionales. Al ser las piezas fabricadas por adición de capas de material, irremediablemente este efecto es apreciable en la superficie. La mejora de esta característica está ligada a la reducción del espesor de la capa, lo que tiene una influencia directa en el tiempo de fabricación final.
- Calidad de producto y repetitividad de proceso: Algunas tecnologías de FA presentan problemas de repetitividad y capacidad de proceso, es decir, no se puede asegurar la precisión dimensional con la que se va a realizar una pieza y la siguiente. Asimismo, la estabilidad en las propiedades físicas del producto (dureza, elasticidad, carga de rotura, metalurgia), aspecto crítico para su homologación en determinados sectores (automóvil, aeronáutico, médico), es también una asignatura pendiente. Una de las principales causas de las desviaciones dimensionales en las piezas son las tensiones que se generan entre las diferentes capas, una vez se ha fabricado la pieza, ya que se producen pequeñas contracciones del material al enfriarse. Al igual que ocurre con otros procesos, se deberá trabajar más en profundidad en el conocimiento de este tipo de efectos, de manera que se puedan predecir y poder realizar el sobredimensionamiento adecuado para su correcta fabricación.
- Tamaño limitado de piezas: El volumen de pieza máximo que se puede construir hoy en día es bastante restringido. En piezas de plástico se puede llegar a dos metros, mientras que empleando metales no se puede superar un cubo de 500 mm de lado. Existe también un límite inferior de las piezas más pequeñas que se pueden fabricar y está condicionado por parámetros, como, por ejemplo:
 - El tamaño de polvo de material que hay que utilizar para que aporte seguridad en su manipulación durante todo el proceso.
 - El diámetro o «spot» mínimo que es capaz de procesar una máquina de tecnología láser, que no podrá conseguir detalles más pequeños que entre una y media y dos veces el diámetro del haz láser.
 - Espesor de capa de deposición de material.
- Coste de la maquinaria: De forma análoga a lo que sucede con el coste de la materia prima por lo limitado del mercado actual, el coste de la maquinaria supone otra barrera de entrada a la FA. Los precios de los equipos varían mucho: desde 15.000 euros una pequeña impresora 3D hasta máquinas de más de un millón de euros, en función de la aplicación final del producto, del tipo de tecnologías de FA que hay que emplear y de la calidad que se requiera para cada caso. La tendencia es que esta maquinaria, como ocurrió en el pasado con otras tecnologías, vaya reduciendo su coste al ir introduciéndose poco a poco en la industria y se alcancen economías de escala. El factor que más influye en el coste de las piezas fabricadas (fundamentalmente en

FA con metal) es precisamente el precio/máquina que hay que repercutir en la fabricación de cada unidad. Estudios realizados por AIMME²⁷ demuestran que el material puede suponer entre el 5 y el 25 % del coste real de la pieza, siendo el resto coste de procesado. En este cálculo afecta notablemente la baja velocidad del proceso de deposición de capas, que hace que la productividad por pieza sea pequeña y, en consecuencia, el coste/máquina por pieza, muy alto.

- Desconocimiento de la dinámica del proceso, especialmente para piezas metálicas: Son escasos los trabajos de investigación que han analizado los diversos aspectos de la mecánica del proceso aditivo y su evolución con el tiempo, por lo que no se controlan suficientemente todos los parámetros que le afectan. Por ejemplo, aún se desconocen las relaciones entre la cantidad de material empleado, la geometría de la pieza que hay que construir, la estructura y densidad de los soportes necesarios, la orientación de las piezas en el volumen de construcción y otros parámetros de operación como la relación entre el aporte de calor de fusión y la disipación de dicho calor. A la hora de fabricar una pieza, es indispensable encontrar la manera de evitar los soportes, conseguir la mejor calidad superficial, el menor tiempo de fabricación, la mejor posición para limitar las tensiones internas y deformaciones y la disminución de problemas de roturas de los soportes durante la fabricación. La principal causa de estos problemas radica en la aportación de calor durante el proceso y su evacuación. Este último se transmite en parte a la atmósfera, pero gran parte se queda y se transmite al resto de la pieza, bien a través de los soportes hacia la plataforma o bien al polvo circundante. Los calentamientos y enfriamientos bruscos, cíclicos, en distintas geometrías de la pieza en construcción generan reacciones incontroladas y distintas en cada caso durante el proceso de fabricación.

²⁷El Instituto Tecnológico Metalmeccánico, se constituyó en 1.987, como Asociación de Investigación de la Industria Metalmeccánica, Afines y Conexas.

1.3.4.3 Tabla de Resumen

En resumen, y modo de tener un mejor entendimiento sobre las ventajas y debilidades existentes en los equipos de impresión 3D. Se presenta la siguiente Tabla 3:

Clasificación	Ventajas	Desventajas
Asociadas a los productos.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ versatilidad ▪ Mayor complejidad geométrica. ▪ Personalización. ▪ Flexibilidad en el diseño y construcción. ▪ Productos aligerados. ▪ Ahorro de material. ▪ Piezas totalmente funcionales. ▪ Piezas multimaterial. ▪ Productos ergonómicos. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Acabado superficial de las piezas. ▪ Calidad de Producto. ▪ Repetitividad de la pieza. ▪ Tamaño limitado de piezas
Asociadas a los procesos de fabricación.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reducción del tiempo de lanzamiento al mercado. ▪ Productos con series cortas. ▪ Reduce errores de montaje. ▪ Reducción de costes en utillaje. ▪ Procesos híbridos. ▪ Liberación de patentes. ▪ Hardware Libre (código abierto). ▪ Avance en ciencias e ingeniería de los materiales- 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Disponibilidad y coste de materiales. ▪ Velocidad de fabricación. ▪ Coste de la maquinaria en función de la calidad de la pieza. ▪ Desconocimiento de la dinámica del proceso. ▪ Materia prima utilizada solo en forma de filamento. ▪ Aumento de productos inútiles.

Tabla 3: Tabla de Resumen de Ventajas y Desventajas de la Impresora 3D
Elaboración Propia.

1.3.5. Materiales Utilizados por la FDM

La impresión 3D, o también conocida como tecnología FDM, es compatible con una amplia variedad de polímeros termoplásticos.

Los polímeros son macromoléculas²⁸, formadas por la unión de unidades repetitivas, denominadas monómeros, que siguen un patrón determinado. Podemos clasificar los polímeros de diferentes formas, esto debido a la gran variedad de características y propiedades que poseen. (A causa de su estructura molecular).

Una forma de clasificarlos es según sus propiedades físicas-térmica, estos son polímeros sintéticos que se pueden moldear con la ayuda de calor o presión, con este tipo de clasificación encontramos los:

- **Termoplásticos:** Son plásticos que se reblandecen a altas temperaturas y se vuelven rígidos por enfriamiento. Pueden fundirse fácilmente una vez formados, y pueden ser remodelados varias veces, debido a que las fuerzas de cohesión entre las cadenas moleculares son débiles. Por ello, se pueden separar con mucha facilidad por acción del calor. Son solubles en solventes orgánicos.

Generalmente, estos polímeros son aquellos que se pueden reciclar, dado que sometido a altas temperaturas se funden, pudiendo cambiar su forma sin modificar su estructura.

- **Termoestables:** Son aquellos plásticos que se moldean solo durante su formación. Al enfriarse, se entrelazan sus cadenas. Esta disposición no permite nuevos cambios de forma mediante calor o presión. Son materiales insolubles, rígidos y duros. Los más importantes son la baquelita y el poliuretano.

Por lo general, este tipo de plástico no pueden ser reciclados, dado que al someterlos a altas temperaturas la estructura del polímero se modifica totalmente.

Debido a las propiedades de reutilización y versatilidad mencionada anteriormente de los “Polímeros Termoplásticos”, estos presentan el 90 % de los plásticos utilizados en la industria en general, y por ende los utilizados en los sistemas de FDM. En la actualidad la materia prima (materiales termoplásticos), ingresa a los sistemas de impresión 3D en formatos de filamento en una bobina.

Algunos materiales termoplásticos más utilizados por los sistemas de FDM son:

1.3.5.1 Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS).

Propiedades ABS (Grado medio)			
Propiedad	Método ASTM	Unidad	Valor
Mecánicas a 23°C			
Resistencia al Impacto IZOD	D2546	$\frac{J}{m}$	215 - 375
Resistencia a la Tensión	D638	$\frac{Kg}{mm^2}$	4,2 - 4,9
Alargamiento de Rotura	D638	%	10 - 50
Módulo de Tensión	D638	-	214 - 255
Coefficiente de Fricción	-	-	0,654
Densidad		$\frac{g}{m^3}$	1,07
Dureza	D785	HRC	95 -105
Peso Específico	D792	-	1,04 - 1,05
Térmicas			
Coefficiente de Expansión Térmica	ASTM D696	$\alpha 10^{-5} \times ^\circ C^{-1}$	7 - 8,8
Distorsión por Calor	ASTM D648	$a_{18,5^\circ C} \left[\frac{Kg}{cm^2} \right]$	1,04 - 1,05

Tabla 4: Propiedades Cuantitativas del ABS, Considerando Grado Medio del Material Norma ASTM.

²⁸.Se entiende por macromolécula aquellas moléculas de gran dimensión y que están formadas por miles o cientos de miles de átomos

El ABS, en inglés Acrylonitrile butadiene styrene. A pesar de ser uno de los plásticos de más difícil fabricación mediante la técnica de impresión 3D, es uno de los materiales más utilizados por este tipo de equipos en el mercado actual. Suelen ser plásticos rígidos, duros y tenaces, de gran estabilidad y resistencia a impacto, vibraciones, incluso a temperaturas bajas. Véase Tabla 4.

1.3.5.2 Poliácido Láctico (PLA).

Propiedades PLA			
Propiedad	Método	Unidad	Valor
Mecánicas a 23°C			
Resistencia al Impacto IZOD	ASTM D256	$\left[\frac{ft \cdot lb}{in}\right]$	0,30 - 0,88
Resistencia a la Tensión	ASTM 638	$[psi]$	8990 - 9040
Alargamiento de Rotura	ASTM D638	%	9,8 - 10
Módulo de Tensión	ASTM D638-	$[psi]$	129000 - 529000
Densidad	ISO 1183	$\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1,24 - 1,27
Dureza Charpy	ISO 179	$\left[\frac{ft \cdot lb}{in^2}\right]$	0,67 - 2,6
Térmicas			
Coefficiente de Expansión Térmica	-	$\left[\frac{\mu Strain}{^\circ C}\right]$	126 - 145

Tabla 5: Propiedades Cuantitativas del PLA
Elaboración Propia

El poli (ácido láctico) o ácido poliláctico (PLA) es un poliéster alifático termoplástico derivado de recursos renovables[28], de productos tales como almidón de maíz (en los Estados Unidos), tapioca (raíces, o almidón principalmente en Asia) o caña de azúcar (en el resto de mundo). Se pueden biodegradar bajo ciertas condiciones, tales como la presencia de oxígeno, y es difícil de reciclar.

El PLA ofrece una buena resistencia a la tracción y calidad superficial, facilita el trabajo a altas velocidades de impresión, simplifica el uso en entornos domésticos y de oficina, permite la creación de piezas de alta resolución. Existe una amplia gama de opciones de colores disponibles. Véase Tabla 5.

1.3.5.3 Polietileno Tereftalato (PET).

Propiedades (PET)			
Propiedad	Método	Unidad	Valor
Mecánicas a 23°C			
Resistencia al Impacto	ASTM D256	$\left[\frac{KJ}{m^2}\right]$	4
Resistencia a la Tensión	ASTM D638	$[MPa]$	78
Alargamiento de Rotura	ASTM D638	%	50
Coefficiente de Fricción	ASTM D1894	-	0,25
Densidad	ASTM D792	$\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1,38
Dureza	ASTM D785	R (scale)	117
Térmicas			
Coefficiente de Expansión Térmica	ASTM D696	$\alpha 10^{-5} \times K^{-1}$	10
Distorsión por Calor	ASTM D648	$a1,82 [Mpa]$	85°C

Tabla 6: Propiedades Cuantitativas del PET
Elaboración Propia

El polietileno tereftalato (PET)[29] es un poliéster de condensación producido por una reacción entre un di-ácido y un di-alcohol. Las principales materias primas para la producción de PET son el di-metil tereftalato (DMT), ácido tereftálico (TPA) y etilén glicol (EG). El PET es un polímero de alta producción con diversas aplicaciones. La naturaleza semi-cristalina de este poliéster permite obtener una gran variedad de propiedades tanto físicas como mecánicas, véase Tabla 6, que se ajustan muy bien a la fabricación de fibras, películas, botellas y diferentes partes moldeadas. Cabe destacar que el PET es un tipo de plástico muy utilizado en diversas industrias bajo procesos de soplado, inyección y extrusión, los cuales sirven para realizar:

El PET es conocido por ser un material termoplástico higroscópico que absorbe la humedad con facilidad. Por lo tanto las condiciones óptimas de secado antes del procesamiento son cruciales. El contenido de humedad en el polímero promueve la degradación durante el procesamiento y conlleva a la reducción del peso molecular, que a su vez afecta las propiedades del producto final.

Podemos encontrar una gran variedad de materiales termoplásticos disponibles en el mercado en forma filamento. En los últimos años y debido a los grandes avances de la tecnología, además de factores de tendencia industrial, podemos encontrar nuevos materiales llamados como materiales de ingeniería, que mediante suplementos o combinación de componentes, buscan mejorar propiedades mecánicas a los termoplásticos, por lo general este tipo de materiales son utilizados por la industria aeroespacial, automotriz y medicina.

1.3.6. Tendencia en el Mercado de la FDM

Como se comenta anteriormente en la tabla de resumen 3, esta tecnología que cuenta actualmente con fuertes planes de investigación e innovación [30], puede reducir enormemente la complejidad actual de los procesos de fabricación convencionales, y también en las actividades de logísticas existentes en cada uno de los integrantes de la cadena de suministro.

Existe una conocida curva de maduración tecnológica[31], denominada Gartner Hype Cycle²⁹, que detalla las fases por las que pasa la adopción de una tecnología emergente hacia la productividad. Cada Hype Cycle está compuesto por cinco fases clave, véase la siguiente Figura 18.

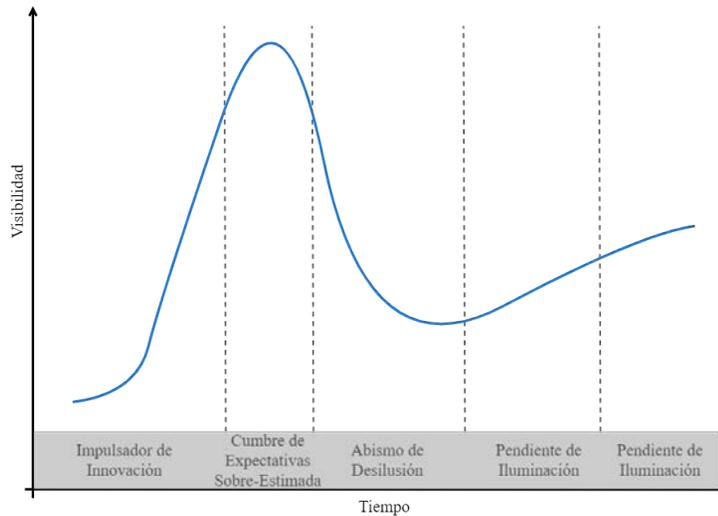


Figura 18: Curva de crecimiento de Gartner Hype Cycle.
Gartner Documents

- **Disparador de innovación (anteriormente llamado Disparador de tecnología):** La primera fase del ciclo es el “lanzamiento”, la presentación del producto o cualquier otro evento que genere interés, presencia y repercusión en los medios. En esta fase pocas veces existen productos utilizables y la viabilidad comercial no está probada.
- **Cumbre de expectativas infladas:** se acumula una ola de “zumbido” y las expectativas de esta innovación se elevan por encima de la realidad actual de sus capacidades. En esta fase el impacto en los medios normalmente genera un entusiasmo y expectativas desmedidas acerca de las posibilidades de la tecnología. Es posible que algunas experiencias pioneras se lleven a cabo con éxito, pero habitualmente hay más fracasos. .
- **Abismo de desilusión:** Inevitablemente, la impaciencia por los resultados comienza a reemplazar la emoción original sobre el valor potencial. Los problemas con el rendimiento, la adopción más lenta de lo esperado o la falta de rendimientos financieros en el tiempo previsto conducen a expectativas perdidas, y surge la desilusión.
- **La pendiente de la iluminación:** algunos de los primeros en adoptar superan los obstáculos iniciales, comienzan a experimentar beneficios y vuelven a comprometerse con los esfuerzos para avanzar. Las organizaciones se basan en la experiencia de los primeros usuarios. Su comprensión crece sobre dónde y cómo se puede utilizar la innovación con buenos resultados y, lo que es más importante, dónde aporta poco o ningún valor.
- **Meseta de productividad:** con los beneficios del mundo real de la innovación demostrada y aceptada. Finalmente, los criterios para determinar la viabilidad comercial comienzan a aclararse. La adopción multitudinaria de la tecnología comienza a ser una realidad. La tecnología comienza a ser rentable..

Es importante entender que no toda novedad tecnológica avanza a la misma velocidad dentro del ciclo de vida representado por el gráfico. Esto es así por muchos factores, que se resumen en “*el tiempo que falta para que el mercado pueda estar preparado para adoptar dicha novedad*”.

²⁹El Hype Cycle de Tecnologías Emergentes de Gartner es una representación gráfica de la madurez, adopción y aplicación comercial de tecnologías específicas

En esta curva puede encontrarse y estimarse un punto de referencia que ayuda a determinar el futuro de la industria de la impresión en 3D, teniendo la ubicación de la tecnología a través de dos años, como se ilustra en la siguiente Figura..

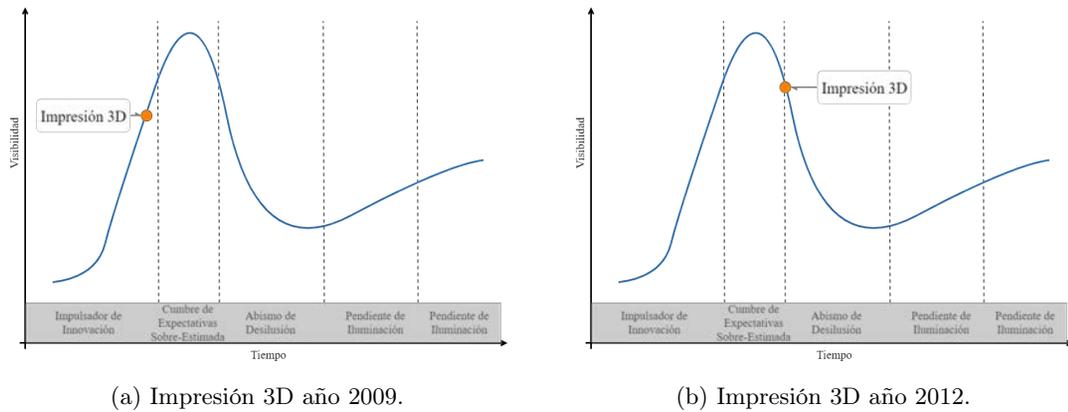


Figura 19: Evolución de la Tecnología de Impresión 3D, según Hype Cycle Gartner.
Elaboración Propia

Analizando la evolución obtenida de los gráficos en la Figuras 19, podemos estimar el tiempo en que los sistemas de impresión 3D pasaron desde el área de “impulso de innovación”, véase en la Figura 19a, al punto de “expectativas sobre-estimada”, véase Figura 19b, y por tanto, podemos concluir que hoy estos sistemas se encuentran dentro del área de “abismo y desilusión”, etapa esencial para innovar en esta tecnología y lograr disminuir la brecha y tiempo (aproximadamente 5 años) en que hoy se encuentra esta tecnología.

Actualmente, existe una nueva visión de las posibilidades que ofrece la tecnología 3D en aplicaciones comerciales e industriales, recuperando un nuevo impulso a partir de grandes corporaciones, que están realizando grandes inversiones en el desarrollo de nuevas soluciones.

Un aspecto a tener muy en cuenta es el actual nivel de confianza. Este se materializa en que las empresas emergentes (startups) de impresión 3D están obteniendo valoraciones muy positivas de la comunidad de empresas de capital riesgo, y lo más importante es que las empresas manufactureras de todos los tamaños están vigilantes a la evolución tecnológica de estas soluciones y la integran en sus planes estratégicos futuros.

1.3.6.1 Crecimiento del Sector de Impresión 3D

Por otra parte un informe [32], emitido en el año 2017 por la consultora “Context” ha cifrado el crecimiento del sector de la impresión 3D en un 42% de CARG³⁰, lo que se ve reflejado en un importante aumento en los ingresos anuales de un casi 80% respecto al 2016, siendo el sector industrial el que más aporta. (debido a la diferencia de precios que existe entre un equipos de impresión 3D destinado a la industria y los destinados a personas o instituciones educativas). Véase Figura 4.2, para ver relación de ingresos por venta entre las impresoras destinadas a la industrias/Profesional y a personas.

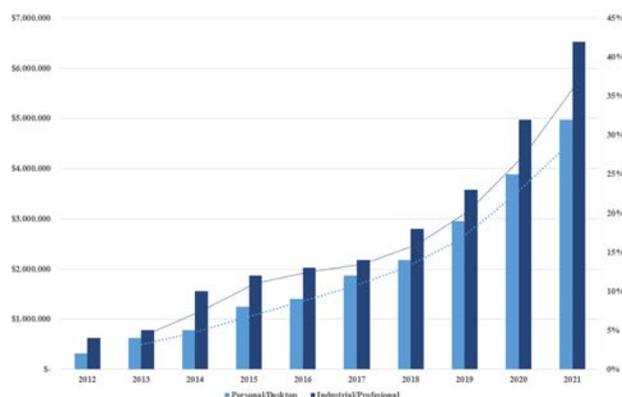


Figura 20: Pronóstico Global de Ingresos de Impresoras 3D por Segmento de Mercado.
Context

³⁰Tasa de crecimiento anual compuesto

Podemos entender de lo anterior, que son cada vez más las empresas y personas que utilizan dentro de su cadena productiva, procesos asociados a la impresión 3D, aportando así un desarrollo tecnológico más rápido.

1.4. Oportunidad de Diseño

Según lo mencionado anteriormente, podemos observar el gran potencial que ofrece los sistemas de FDM, posicionándose como una de las tecnologías de fabricación aditiva con mayor crecimiento en la industria manufacturera, frente a la oportunidad y gran brecha del escaso material reciclado reincorporado al mercado (PET, envases y embalajes), y además, la gran ventaja que tiene esta tecnología al momento de enfrentar las nuevas normas y leyes a las que se ven sometidas las organizaciones manufactureras en busca de sustentabilidad, aumentando así, los índices de I+D+i en cada una de estas.

1.4.1. Oportunidad

La FDM si bien, podría ser un facilitador y fuerza impulsora para mejorar la sustentabilidad industrial en las organizaciones manufactureras de plástico (Startups) o instituciones educativas, logrando así, cumplir con las normas y leyes implementadas por el Ministerio del Medio Ambiente, que no ha logrado debido a pequeños factores propios de los equipos utilizados para la FDM, impresoras 3D.

La materia prima para la impresión 3D, es obtenida de a partir de un proceso de transformación de pellet a filamento, proceso que es totalmente evitable, generando un costo adicional e impacto energético en la obtención de esta.

CAPÍTULO II

2. Desarrollo del Diseño Conceptual.

En este Capítulo, se describe una metodología de diseño sistemático³¹ para el desarrollo a la oportunidad mencionada en el Capítulo I. Se dispone de las distintas fases de diseño, desde la etapa conceptual para enfrentar la oportunidad, hasta el flujo de decisiones para llegar a la etapa de diseño de Ingeniería.

2.1. Definición de Metodología de 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” [33]. 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 y Schmidt, la cual contempla 5 fases [33]:

- **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 la necesidades*.
- **Recolección de la información:** En esta fase es necesario identificar o buscar 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.

2.1.1. Descripción del Proceso de Diseño.

El proceso de diseño se representa como un conducto para seleccionar potenciales diseño para nuevos productos que se adaptan a la necesidades del consumidor. La base de la metodología actual del diseño fue descrita por Morris Asimow [33].

Asimow, demuestra que las fases del diseño siguen un orden secuencia lógico de actividades, para desarrollar el proceso y así, generar resultados eficientes. Los cuales detallaran en la siguiente Figura:21.

³¹Se trata de un marco de fases, un patrón de procedimientos y un conjunto de convenciones para la identificación, evaluación y visualización de los elementos y áreas involucradas en la planificación de un diseño.

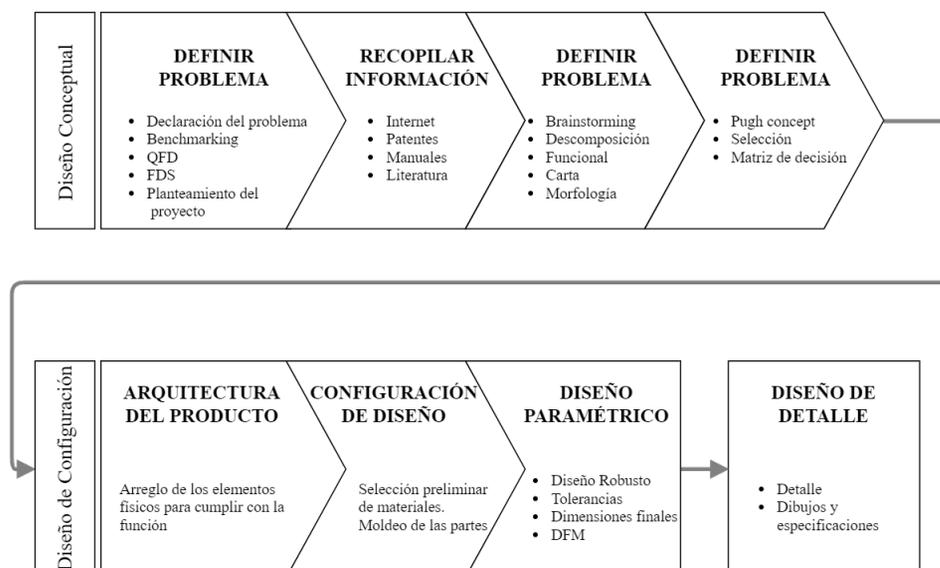


Figura 21: Diagrama de la Metodología del Diseño
Fuente: Dieter, G. y Schmidt, L. "Engineering design"

2.1.1.1 Primera Fases: 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:** 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. 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 diseñados, 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.

2.1.1.2 Segunda Fase: Diseño de Configuración.

Esta fase es de las decisiones, ya que lo estudiado en el paso anterior, se debe llevar 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:

- **Arquitectura del producto:** La arquitectura consiste en dividir el sistema dentro de los 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.
- **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.
- **Diseño paramétrico:** En esta actividad se establece las dimensiones y tolerancias 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.

2.1.1.3 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:

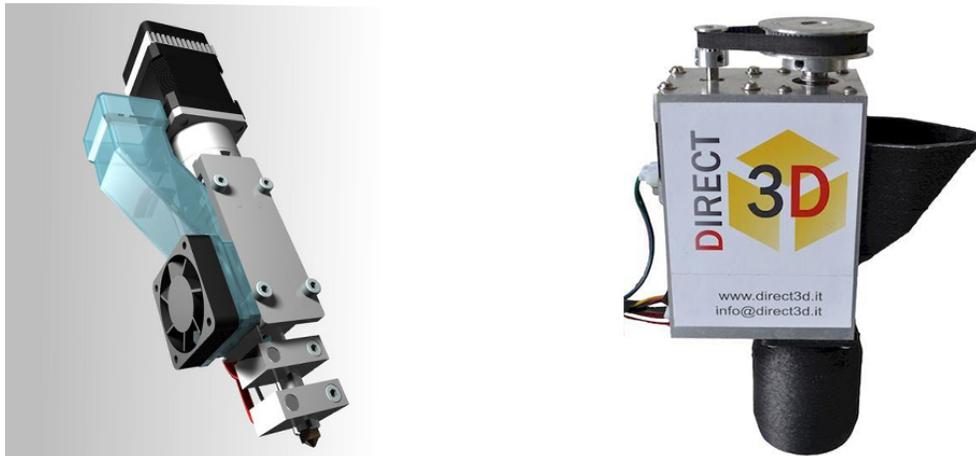
- Obtener los planos de detalle para la fabricación de componentes.
- Realizar las pruebas de verificación de los prototipos, cuyo objetivo es comprobar el desempeño del componente o máquina.
- Desarrollar planos y esquemas de ensamblaje.
- Detallar las especificaciones del producto, actualizando en ellos todos los cambios hechos desde la fase del diseño conceptual.
- Tomar decisiones acerca de las piezas, y si estas deben ser compradas o fabricadas.
- Hacer evaluación de costos para los productos.
- Realizar una revisión final, antes que el producto sea fabricado.

2.2. Desarrollo del Diseño Conceptual.

En este punto, se busca la posible solución a la oportunidad mencionada anteriormente. Posteriormente se define conceptualmente. Para un desarrollo correcto del proceso se emplea la metodología conceptual enunciada anteriormente.

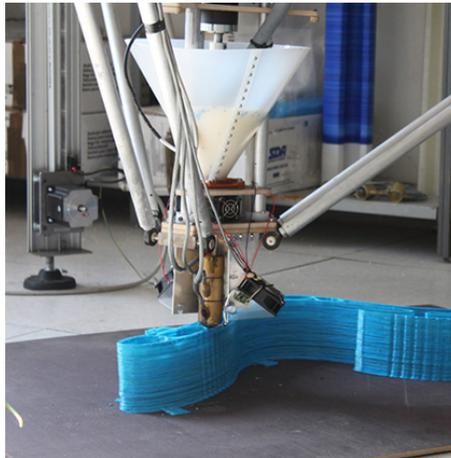
2.2.1. Estado del Arte.

Si observamos y analizamos la funcionalidad de los distintos sistemas de extrucción utilizados en Impresoras 3D, la mayoría de estas utilizan materia prima en forma de filamento, esto significa que el material es sometido a un proceso de donde a partir de pellets plástico se conforma a filamento. Lo que se ve reflejado en un costo adicional en la compra de materia prima para la FDM.



(a) Universal Pellet extruder UPED V1.0.

(b) Direc 3D.



(c) Big 3D Printer Delta Wasp 3MT

Figura 22: Sistema de Impresión 3D a partir de Pellets Plásticos.

Fuente:Elaboración Propia

Por otra parte, si bien, existen algunos sistemas de extrucción directa a partir de pellets, como se observa en la Figura 22, son pocos los criterios o factores que se escapan de forma negativa a la convencional (filamento), por ende, la ventaja competitiva de la propuesta de esta tesis, es mejorar la calidad y funcionalidad estructural del sistema de extrucción, además de dar la posibilidad de utilizar materiales reciclados sin agregar el proceso intermedio de transformación a filamento, finalmente generar un sistema de control modular que permite, al sistema de extrucción no solo ser utilizado en estructuras de “Impresoras 3D”, si no, también en otros equipos de CNC como brazos robóticos.

2.2.2. Listado de Funciones. (Restricciones y/o Requerimientos)

En función al problema definido anteriormente, se han definido funciones que serán necesarios satisfacer por el equipo a diseñar. Dichas funciones, fueron establecidas en base a una investigación referente al productos similares de extrucción, véase la Figura 22.

Las funciones para el equipo extrusor deben ser:

- Fundir el material plástico.
- Extruir el material plástico.
- Permitir material pelletizado de desechos de PET.
- Trabajar con PET/PLA (virgen o reciclado).
- Trabajar con plástico triturado.
- El material producto de la extrucción debe ser utilizable en el proceso de FDM.
- Permitir controlar condiciones térmicas del extrusor.
- Mantener un flujo constante para la impresión 3D.
- Calor aplicado en el “hot-end” del extrusor.
- Conducir el material al interior del hot-end adecuadamente
- Proceso de bajo costo operacional. (En relación al filamento.)
- Requiera sólo un operario para el funcionamiento.
- Diseño Modular.
- Bajo costo de mantención.
- Fácil mantenimiento.
- Materiales empleados en la fabricación de alta resistencia al desgaste y corrosión.
- Resistencia a los 250°C.
- Bajo costo de adquisición.
- Fácil limpieza.
- Larga vida útil. (sobre 3 años.)
- Fácil inspección.
- Facibilidad de manejo y control.
- Aislamiento térmico en el proceso de operación.
- Permitir el reemplazo de piezas.
- Seguridad en todo el proceso de operación.
- Sistema de calentamiento eléctrico.
- Sistema de enfriamiento externo.
- Controlar la temperatura del proceso.
- Almacenar materia prima para 10 [min] de operación.
- Sensar temperatura constantemente.
- Permitir visualizar temperatura.
- Permitir visualizar velocidad de husillo.

2.2.3. Categorización de las Funciones de Diseño.

Las funciones 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.

De acuerdo a lo anterior podemos organizar las funciones de acuerdo a la similitud entre sí. Estas categorías son: Operación, Seguridad, Costos y Control de Operación.

<p>1. Operación</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Facilidad de manejo y control. b) Resistencia a temperaturas de hasta 250°C. c) Mantener flujo constante de material para la impresión 3D. d) Fácil inspección. e) Fundir Material. f) Extruir Material. g) Trabajar con PET/PLA (virgen o reciclado). h) Almacenar materia prima para 10 [min] de operación. i) Requerir sólo un operario para el funcionamiento. 	<p>2. Control de Operaciones</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Controlar la temperatura del proceso. b) Sistema de calentamiento eléctrico. c) Sistema de enfriamiento externo. d) Calor aplicado en el “hot-end” del extrusor. e) Sensar temperatura constantemente. f) Permitir visualizar temperatura. g) Permitir visualizar velocidad de husillo.
<p>3. Seguridad</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Impedir atrapamientos. b) Aislamiento térmico en el proceso de extrusión. c) Materiales utilizados en la fabricación tengan alta resistencia al desgaste y corrosión. 	<p>4. Costo</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Bajo costo de operación. b) Bajo costo del equipo extrusor. c) Bajo costo de mantención. d) Larga vida útil.

Tabla 7: Categorización de las Funciones de Diseño.
Elaboración Propia.

2.2.4. Ponderación de la Lista de Funciones.

Para ordenar los objetivos de acuerdo a su importancia en base a una metodología más objetiva, se utiliza un método de escalas relativas [34], la cual jerarquiza la importancia entre los elementos y genera un valor mostrando cuales funciones son más importantes. A continuación se detallan los pasos para obtener resultados aplicando este método, ordenando de mayor a menos la importancia de cada función y grupo de funciones.

2.2.5. Cálculo de Pesos Relativos.

Se calcula el peso relativo de cada función y cada grupo de funciones (categoría), con el fin de establecer un criterio objetivo

2.2.5.1 Paso 1: Pesos Relativos entre Grupos de Funciones.

Pesos relativos entre grupos funcionales						
Función	Operación	Control de Operaciones	Seguridad	Costo	Total	Peso
Operación	1	5	4	8	18	49 %
Control de Operaciones	0,200	1	4	7	12,200	30 %
Seguridad	0,250	0,25	1	7	8,500	21 %
Costo	0,125	0,125	0,125	1,000	1,375	3 %
Total					40,075	100 %

Tabla 8: Pesos Relativos Entre Grupos Funcionales
Elaboración Propia

De lo anterior se puede deducir, que de los grupos funcionales, los más importante para temas de diseño y funcionalidad es el grupo de Operación con un 49 % y el grupo de Control de Operaciones con un 30 %.

2.2.5.2 Pesos Relativos en Operación

Pesos relativos operación											
Función	1a	1b	1c	1d	1e	1f	1g	1h	1i	Total	Peso
1a	1	2	2	4	2	2	2	2	2	19	11 %
1b	0,500	1	2	4	2	2	4	4	4	23,500	14 %
1c	0,500	0,500	1	8	2	2	4	6	7	31,000	18 %
1d	0,250	0,250	0,125	1	2	2	2	2	4	13,625	8 %
1e	0,500	0,500	0,500	0,500	1	5	7	8	8	31,000	18 %
1f	0,500	0,500	0,500	0,500	0,200	1	7	8	8	26,200	16 %
1g	0,500	0,250	0,250	0,500	0,143	0,143	1	7	7	16,786	10 %
1h	0,500	0,250	0,167	0,500	0,125	0,125	0,143	1	2	4,810	3 %
1i	0,500	0,250	0,143	0,250	0,125	0,125	0,143	0,500	1,000	3,036	2 %
Total										168,956	100 %

Tabla 9: Pesos Relativos del Grupo de Funciones de Operación.
Elaboración Propia

Se puede observar que dentro del grupo de funciones relacionadas con la Operación del sistema extrusor, las que tienen mayor peso relativo son:

- 1c: Mantener el flujo constante de material para la impresión 3D, con un 18 %.
- 1e: Fundir material, con un 18 %.
- 1f: Extruir material, con un 16 %.

2.2.5.3 Pesos Relativos de Control de Operación

Pesos relativos control de operación									
Función	2a	2b	2c	2d	2e	2f	2g	Total	Peso
2a	1	6	5	2	2	4	2	22,000	26 %
2b	0,167	1	4	2	2	5	2	16,167	19 %
2c	0,200	0,250	1	2	2	2	2	9,450	11 %
2d	0,500	0,500	0,500	1	4	5	4	15,500	18 %
2e	0,500	0,500	0,500	0,250	1	7	5	14,750	17 %
2f	0,250	0,200	0,500	0,200	0,143	1	2	4,293	5 %
2g	0,500	0,500	0,500	0,250	0,200	0,500	1,000	3,450	4 %
Total								85,610	100 %

Tabla 10: Pesos Relativos del Grupo de Funciones de Control de Operación
Elaboración Propia

Se puede observar en la tabla 10 que dentro del grupo de funciones relacionadas con el Control de Operación del sistema extrusor, las que tienen mayor peso relativo son:

- 2a: Controlar la temperatura del proceso, con un 26 %.
- 2b: Sistema de calentamiento eléctrico, con un 19 %.
- 2d: Calor aplicado en el “hot-end” del extrusor, con un 18 %.
- 2e: Sensar temperatura constantemente, con un 17 %.

2.2.5.4 Pesos Relativos de Seguridad

Pesos relativos seguridad					
Función	3a	3b	3c	Total	Peso
3a	1	6	8	15,000	59 %
3b	0,167	1	8	9,167	36 %
3c	0,125	0,125	1,00	1,250	5 %
Total				25,417	100 %

Tabla 11: Pesos Relativos del Grupo de Funciones de Seguridad.
Elaboración Propia.

Se puede observar en la tabla 11 que dentro del grupo de funciones relacionadas con la seguridad del sistema extrusor, las que tienen mayor peso relativo son:

- 3a: Impedir atrapamientos, con un 59 %.
- 3b: Aislamiento térmico en el proceso de extrucción, con un 36 %.

2.2.5.5 Pesos Relativos de Costos

Pesos relativos entre grupos en costos						
Función	4a	4b	4c	4d	Total	Peso
4a	1	7	4	2	14	48 %
4b	0,143	1	6	2	9,143	31 %
4c	0,250	0,167	1	2	3,417	12 %
4d	0,500	0,500	0,5	1,00	2,500	9 %
Total					29,060	100 %

Tabla 12: Pesos Relativos del Grupo de Funciones de Costos

Se puede observar en la tabla 12 que dentro del grupo de funciones relacionadas con los costos del sistema extrusor, las que tienen mayor peso relativo son:

- 4a: Bajo costo de operación, con un 48 %.
- 4b: Bajo costo del equipo extrusor, con un 31 %.

Como se puede observar en los pesos ponderados generales en la tabla 8, 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 flujo constante de material. 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.

2.3. 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, véase figura 23, y el modelo de caja transparente, véase figura 24. 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.

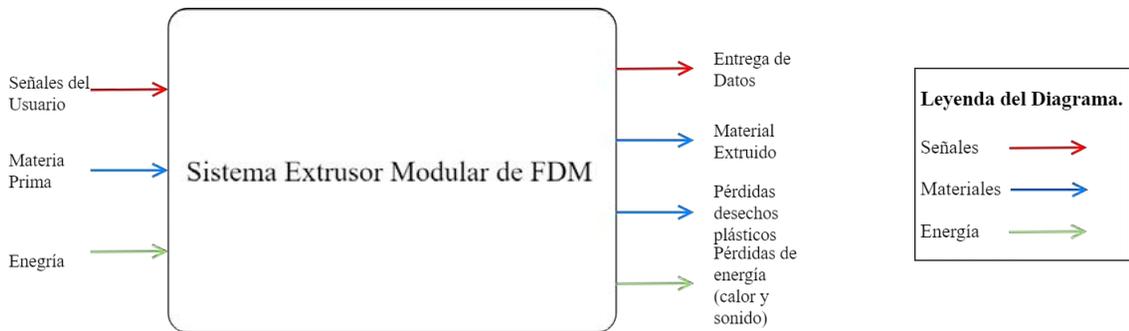


Figura 23: Modelo Caja Negra
Elaboración Propia

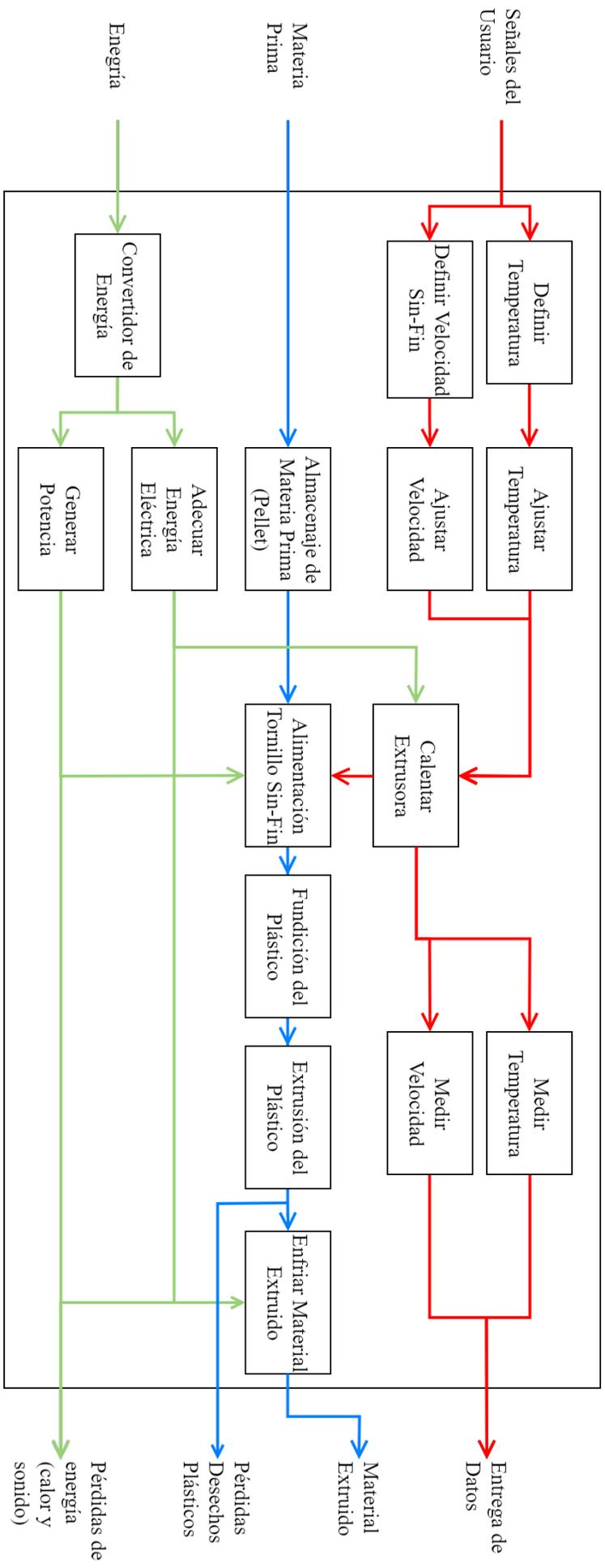


Figura 24: Modelo Caja Transparente
Elaboración Propia

2.3.1. Benchmarking.

En esta fase del diseño se busca comparar las funciones del producto a diseñar, definidos anteriormente en el punto 2.2.3, frente a otros productos que cumplen funciones similares (Estado del Arte, véase punto 2.2.1.), con el objetivo de proveer un punto de referencia y rango, para identificar parámetros específicos de diseño.

La comparación se realiza en base a las funciones de diseño establecidas, y se establece una escala de 1 a 5 para su interpretación, siendo 1 Muy malo y 5 Muy bueno. También se definen en un segundo apartado una comparación de características de los equipos o productos similares.

	UPED V1,0	Direc 3D	Big Delta Wasp 3MT	3D
Facilidad de manejo y Control	3	3	2	
Resistencia a temperaturas de hasta 250 °C	4	4	3	
Mantener flujo constante de material para la impresión 3D	3	4	3	
Fácil inspección	3	2	3	
Fundir Material	4	4	3	
Extruir Material	4	4	3	
Trabajar con PET/PLA (virgen o reciclado)	2	3	3	
Almacenar materia prima para 10[min] de operación	2	2	3	
Requiera solo un operario	4	4	4	
Controlar la temperatura del proceso	3	2	3	
Sistema de calentamiento eléctrico	4	4	5	
Sistema de enfriamiento externo	3	1	4	
Calor aplicado en "hot-end" del extrusor	5	5	5	
Sensar temperatura constantemente	2	1	2	
Permitir visualizar temperatura	1	1	1	
Permitir visualizar velocidad de husillo	1	1	1	
Impedir atrapamientos	2	2	3	
Aislamiento térmico en el proceso de extrusión	2	3	1	
Materiales Utilizados en la fabricación resistente a desgaste	4	2	2	
Bajo costo de operación	3	2	1	
Bajo costo de equipo extrusor	4	3	2	
Bajo costo de mantención	3	2	1	
Larga vida útil	3	3	3	
Total	69	62	61	

Tabla 13: Benchmarking: Comparación de las Funciones con el Estado de Arte de los Sistemas Extrusores.

Elaboración Propia

2.3.2. Requerimientos.

En este apartado, se expone la lista de requerimientos concretos del diseño, en la Tabla 14. Asimismo, se presentan las especificaciones del diseño para desarrollar el objetivo, con criterios medibles y sus parámetros mínimos o máximos que se deban cumplir.

Categoría	Especificación	Valor	Parámetro
Geometría	Altura	200[mm]	Máximo
	Largo	100[mm]	Máximo
	Ancho	100[mm]	Máximo
Costos	Costo Maquina	\$ 150.000	Mínimo
		\$ 200.000	Máximo
Energía	Suministro Eléctrico	220 [V]	-
	Potencia Consumida	100[W]	Máximo
Performance	Velocidad de extrusión	10[RPM]	Mínimo
	Numero de operarios	1	Máximo
	Material Prima	PLA/PET	-
	Volumen alimentador	30[m3]	Mínimo
	Temperatura de trabajo	160 °C	Mínimo
		250°C	Máximo
	Tiempo de preparación máquina	15 [min]	Máximo
	Diámetro extrusión	0,8[mm]	Mínimo
		1,5[mm]	Máximo
	Velocidad de rotación	10[RPM]	Mínima
	Torque	4[Nm]	Mínima
	Tolerancia	± 0,5[mm]	Máximo
Dimensión Pellets	3x16 [mm]	Máximo	

Tabla 14: Requerimientos Sistema Extrusor a Diseñar
Elaboración Propia

2.3.3. Matriz Objetivos-Requerimientos.

En la Figura 25 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 las funciones del diseño tienen una relación directa con la lista de requerimientos para el desarrollo del proyecto.

Categoría	Peso Ponderado por categoría	Funciones / Requerimientos																		
			Largo	Ancho	Altura	Costo máquina	Suministro eléctrico	Potencia Consumida	Velocidad de extrusión	Numero de operarios	Materia Prima	Volumen alimentador	Temperatura de Trabajo	Tiempo preparación máquina	Diametro extrusión	Velocidad de rotación	Torque	Tolerancia	Dimensión pellets	
Operación 49%	11%	Facilidad de manejo y Control																		
	14%	Resistencia a temperaturas de hasta 250 °C																		
	18%	Mantener flujo constante de material para la impresión 3D																		
	8%	Fácil inspección																		
	18%	Fundir Material																		
	16%	Extruir Material																		
	10%	Trabajar con PET/PLA (virgen o reciclado)																		
	3%	Almacenar materia prima para 10[min] de operación																		
	2%	Requiera solo un operario																		
	26%	Controlar la temperatura del proceso																		
Control de Operación 30%	19%	Sistema de calentamiento eléctrico																		
	11%	Sistema de enfriamiento externo																		
	18%	Calor aplicado en "hot-end" del extrusor																		
	17%	Sensar temperatura constantemente																		
	5%	Permitir visualizar temperatura																		
	4%	Permitir visualizar velocidad de husillo																		
	59%	Impedir atrapamientos																		
Seguridad 21%	36%	Aislamiento térmico en el proceso de extrusión																		
	5%	Materiales Utilizados en la fabricación resistente a desgaste																		
	48%	Bajo costo de operación																		
	31%	Bajo costo de equipo extrusor																		
Costo 30%	12%	Bajo costo de mantenimiento																		
	9%	Larga vida útil																		

Figura 25: Matriz Objetivos - Requerimientos.
Elaboración Propia

De lo anterior en la figura 25, podemos inferir lo siguiente:

- Los requerimientos más importantes para cumplir de mejor forma las funciones del sistema extrusor, son los costos asociados al equipo, y gran parte los requerimientos relacionados con la extrusión del material, para así, aprovechar de forma eficiente los recursos, sin perder énfasis en la operación del extrusor, y el control de esta.
- Requerimientos menos importantes, se puede destacar la tolerancia del material extruido.

Como se mencionó anteriormente, los requerimientos del diseño y como estos se relacionan con las funciones del sistema, ya sea de forma positiva o negativa, 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 [35] 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 15 se presenta su desarrollo.

N°	Problema Particular	Problema General	Solución General	Solución Particular
1	Largo, ancho y Alto/Costo del Equipo	4. Longitud estacionaria vs 36. Complejidad del dispositivo.	1. Segmentación	Se puede trabajar con materiales de bajo costo, para obtener dimensiones y complejidad del dispositivo requeridos
2	Costo de Fabricación/Tolerancias	36. Complejidad del dispositivo vs 29. Precisión de fabricación.	10. Acción preliminar	Realizar acciones preliminares para tener mejor tolerancias y calidad sin perjudicar costos
3	Costo Máquina/Volumen Alimentador	36. Complejidad del dispositivo vs 8. Volumen estacionario	1. Segmentación	Se puede trabajar con materiales de bajo costo, para obtener volumen requerido evitando mayores costos.
4	Costo Máquina/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
5	Capacidad producción/Diámetro de Extrusión	39. Productividad vs 3. Longitud de objeto en movimiento	28. Sustitución Mecánica	Definir solo un diámetro de trabajo para varios materiales, para así evitar pérdidas innecesarias de tiempo y lo que ello implica
6	Velocidad Extrusión/Diámetro de Extrusión	39. Productividad vs 3. Longitud de objeto en movimiento	28. Sustitución Mecánica	Definir solo un diámetro de trabajo para varios materiales, para así evitar pérdidas innecesarias de tiempo y lo que ello implica
7	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

Tabla 15: Metodología de TRIZ para Solución de Contradicción en el Diseño del Sistema Extrusor
Elaboración Propia

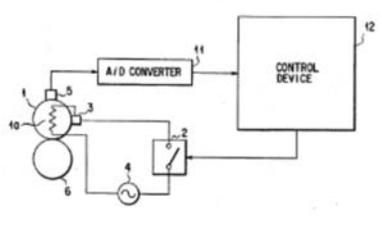
2.4. Generación de Concepto.

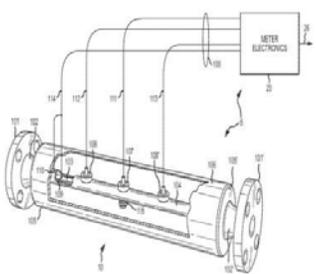
En esta sección se desarrolla la generación del concepto para el diseño, donde la idea es recopilar la información y generar la idea conceptual del diseño, para ello se hará un análisis de los componentes a utilizar y búsqueda de patentes asociadas a estas piezas.

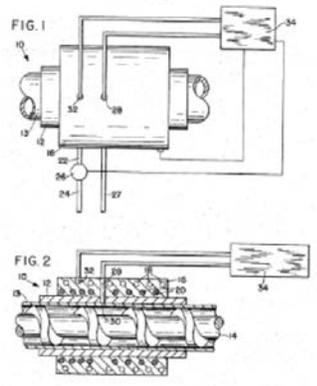
Posteriormente, se realizará un diseño esquemático de la propuesta, la cual busca cumplir con las funcionalidades del sistema extrusor, la idea es mediante este método, aportar una gran cantidad de alternativas y soluciones para cumplir con los requisitos.

2.4.1. Patentes Asociadas a Componentes.

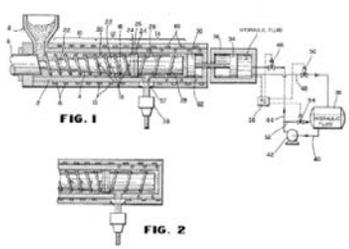
En este apartado se desarrolla una búsqueda de patentes acerca de los componentes y equipos que realizan alguna función relacionada con el diseño del equipo. Se muestran las patentes en la Tabla 16, las cuales cuenta con su nombre, su código, función y una descripción para su entendimiento

Patente #1 - 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 #2 - 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 #3 - 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 facciones por medio de la corriente. Posee una unidad de control de temperatura	

Patente #4 - Control de temperatura.		
Nombre	System and method of temperature control for plastics extruder	Figura
Código	US4272466	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 #5 - 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 #6 - Extrusión		
Nombre	A method for preparing a conductive plastic product	Figura
Código	WO 19992010352	Sin Imagen
Descripción	Moldeo de plástico fundido con alimentación mediante un tornillo sinfín e inyectado en un molde	

Tabla 16: Patentes para Diseño de Componentes del Sistema Extrusor.
Elaboración Propia.

Una vez se ha realizado la búsqueda externa de información, se procede a cruzar la información desde las funciones/requerimientos y generar la alternativa de diseño.

2.4.2. Generación del Concepto.

En esta sección del diseño, se recoge la información e ideas de las secciones anteriores, con la intención de generar conceptos que satisfagan las necesidades del sistema extrusor modular, ingeniería y diseño y a su vez, que cumplan las funciones del proceso.

2.4.2.1 Concepto de Diseño.

En primer lugar y básicamente la idea del concepto es la transformación de material prima para impresión 3D, la cuál hoy en día es a partir de filamento, y mediante esta tesis se propone imprimir directamente por pellet.

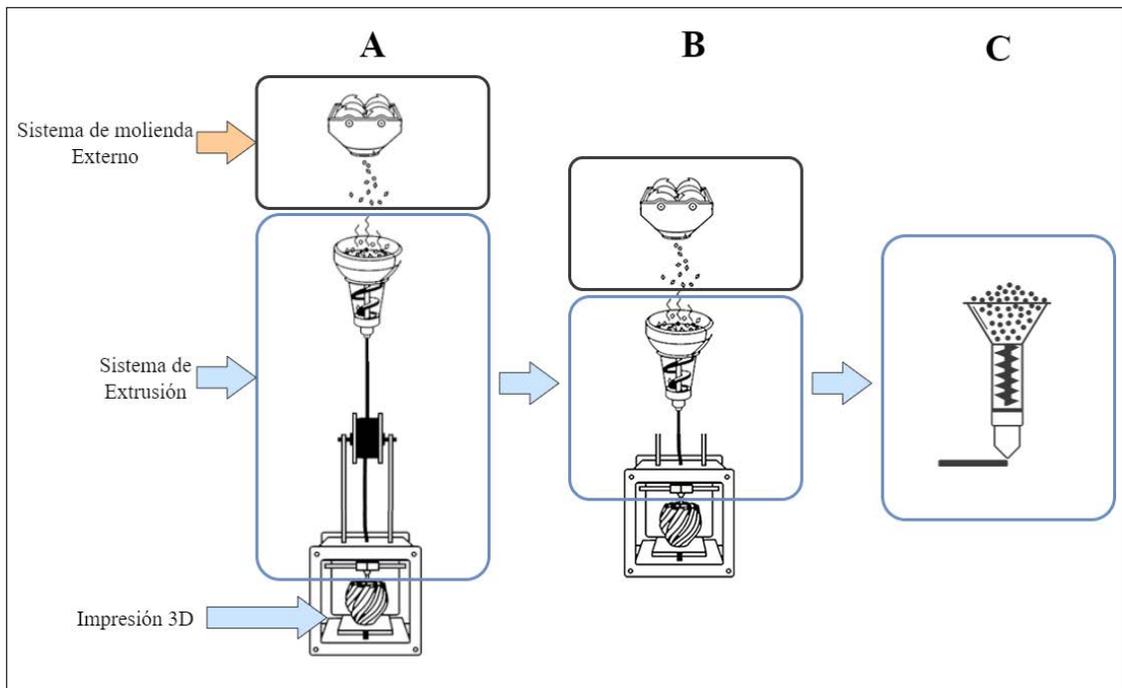


Figura 26: Concepto General de Mejora para Sistema Extrusor Modular.
Elaboración Propia

Como se observa en la figura 26, la idea del sistema extrusor propuesto en esta tesis, es eliminar el filamento como materia prima en los procesos de impresión 3D, (pasar de etapa A a C, Figura 26). Con ello disminuir el impacto producido por el proceso de fabricación de filamento, y así, aportar a la sustentabilidad de los procesos FDM, como se menciona en la Oportunidad de Diseño, Capítulo 1.

2.4.2.2 Concepto Prueba.

El sistema consta de una extrusión por fricción entre el husillo y el barril (bloque). El extrusor modular tendrá incorporado un contenedor para la materia prima (pellets). El sistema eléctrico y de control se encontrará incorporado en la misma impresora 3D, en primera etapa de concepto, por ende, el control de temperatura y velocidad de husillo se hará de forma automática. La transferencia de calor hacia el polímero se hará mediante una resistencia eléctrica acoplada a un material que se encargara de transmitir la temperatura al polímero. El enfriamiento del sistema como del material extruido será mediante aire forzado por ventiladores.

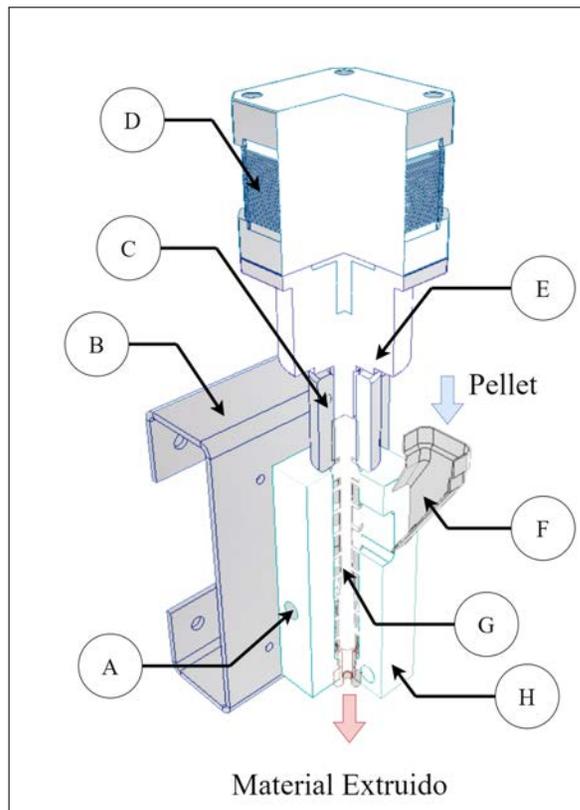


Figura 27: Primer Concepto De Sistema Extrusor Modular.

A-Calefactor Eléctrico, B-Sistema Ensamble Estructura, C-Copla, D-Motor Stepper, E-Reductor Velocidad, F-Tolva (Ingreso Material), G-Husillo (Sin-Fin), H-Bloque.

Mediante el desarrollo de este concepto, utilizando la metodología de diseño mencionada anteriormente, podemos ilustrar o dar forma al “Sistema de Extrusión Modular”, para posteriormente empezar a detallar la arquitectura del diseño, cruzando y a la vez, respaldando mediante ingeniería, esta información con las obtenidas en los pesos relativos de cada función del producto.

CAPÍTULO III

3. Diseño de Detalle e Ingeniería del Producto.

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.

3.1. Arquitectura del Producto.

En esta fase de diseño, se establece el tipo de arquitectura del sistema extrusor, la cual busca solucionar de qué forma se relacionan las funciones de 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 que existe una descomposición, integración y compatibilidad entre los subsistemas.[36]

3.1.1. Tipo de Arquitectura Utilizada en el Sistema Extrusor.

En este apartado, se hablará de la arquitectura modular, ya que caracteriza y es parte de lo propuesto para el diseño total del sistema extrusor, debido a que sus funciones primarias están bien definidas, en el cual se puede desarrollar productos sobre una base.

Existen tres formas de arquitectura modular como se ve en la Figura 28. La arquitectura modular ranurara o *slot* *Figura 28a*, 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 28b*), los distintos módulos se anexas a un dispositivo básico y el módulo es de forma estándar. Finalmente, la arquitectura modular seccional (*Figura 28c*), es aquella en la los distintos módulos se ínter conectan entre ellos, para que cada uno realice un subfunción de forma individual, por lo que tiene muchas reconfiguraciones.

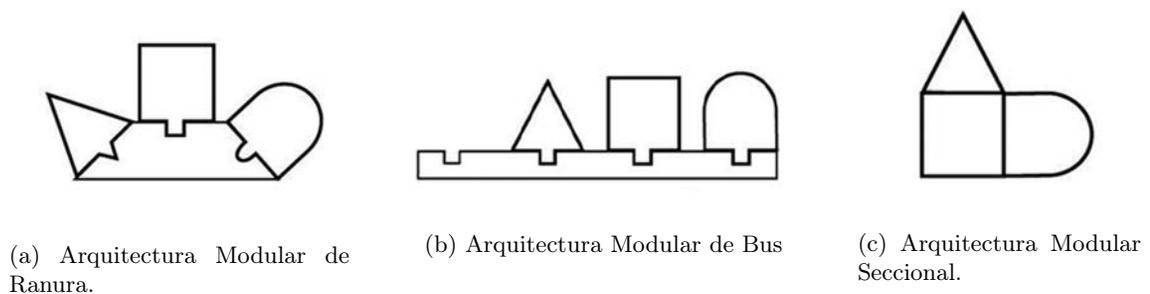


Figura 28: Tipos de Arquitecturas de Diseño.
Ibarra, La arquitectura Integral y Modular

De acuerdo a las características de diseño que se debe cumplir en el sistema de extrusión propuesto en esta tesis, existen una gran variedad de funciones que son necesarias satisfacer. Cada de una de ellas, se llevará a cabo de manera individual, sobre la base de una estructura o frame. Debido a ello, se escoge una arquitectura modular de bus, para distintos subsistemas conectados a una interfaz estándar.

3.1.2. Arquitectura del Sistema Extrusor Modular.

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.

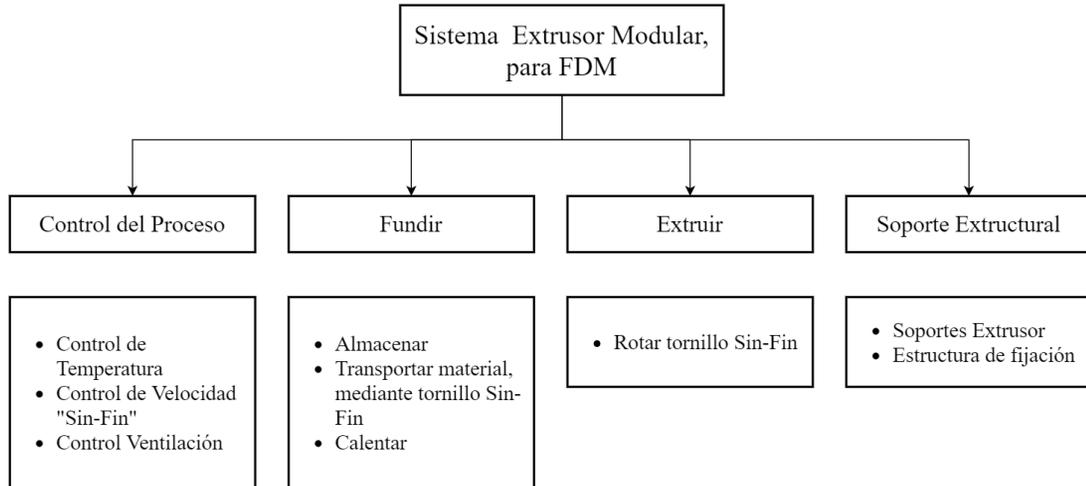


Figura 29: Diagrama de Componentes del Diseño Separado en Módulos.
Elaboración Propia

3.2. Diseño de Configuración.

En este punto 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 30 se listan los componentes separados en los módulos ya establecidos anteriormente, que forman parte del diseño del sistema extrusor.

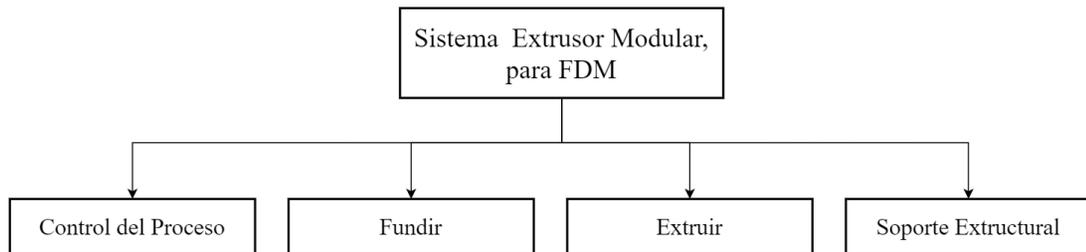


Figura 30: Diagrama de Componentes del Diseño Separado en Módulos.
Elaboración Propia

3.2.0.1 Módulo Sistema de Control.

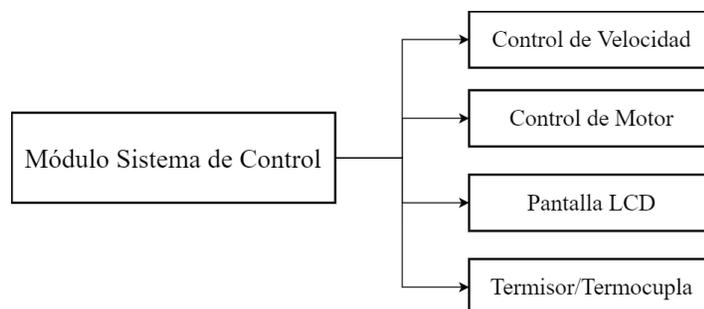


Figura 31: Módulo de Sistema de Control.
Elaboración Propia

3.2.0.2 Módulo de Fundido.

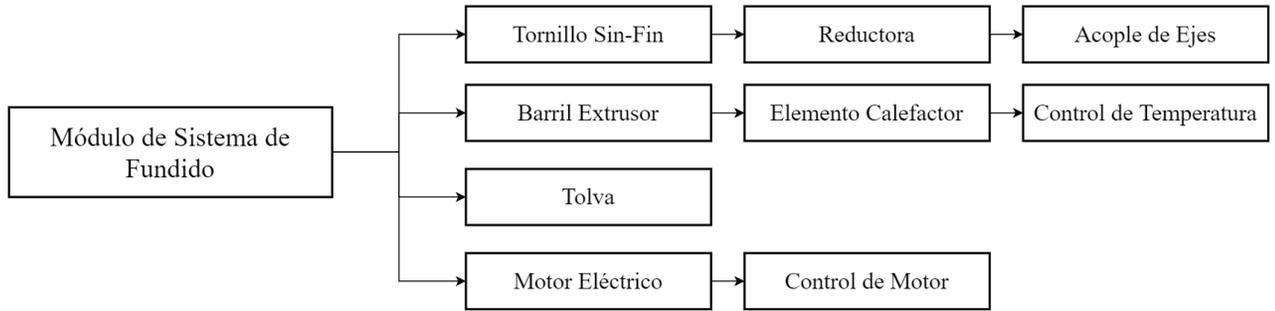


Figura 32: Módulo de Sistema de Fundido.
Elaboración Propia

3.2.0.3 Módulo de Sistema de Extrusión.

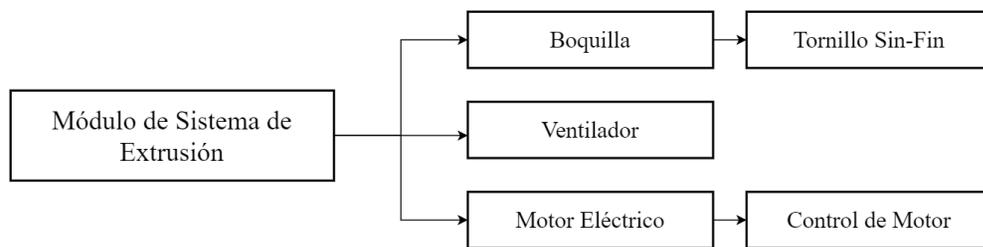


Figura 33: Módulo de Sistema de Extrusión.
Elaboración Propia

3.2.0.4 Módulo de Sistema Soporte Estructural.

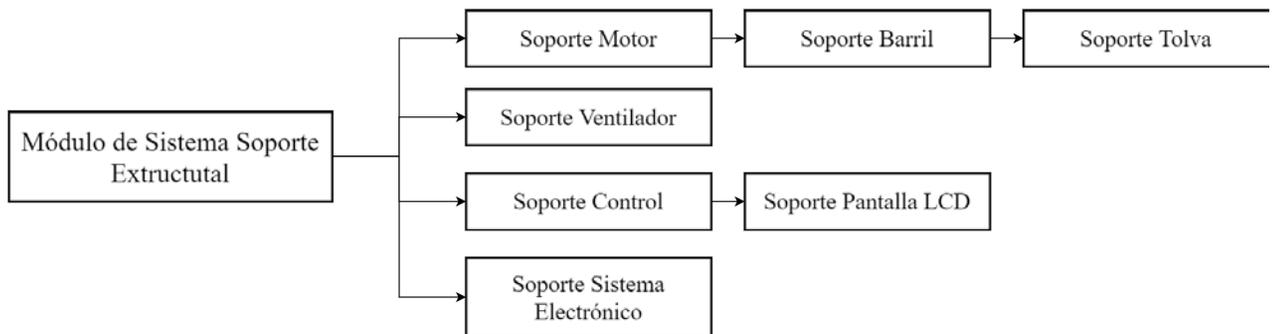


Figura 34: Módulo de Sistema Soporte Estructural.
Elaboración Propia

3.2.1. Componentes Especializados.

Los componentes especializados son los diseñados en este trabajo de acuerdo a las necesidades del sistema de extrusión. Las piezas especializadas son: Tornillo Sin-Fin, Tolva, estructura general del sistema de extrusión y por último todo lo relacionado con la estructura y ensamble de componentes electrónicos del sistema de control.

3.2.1.1 Husillo o Tornilo Sin-Fin.

Para el diseño del husillo, se debe tener en cuenta la lista de requerimientos. Este tornillo dentro del sistema, debe estar cubierto en gran parte por el barril, además el diámetro debe ser compatible con el acoplamiento de ejes y a la vez con el motor a elegir, que debe satisfacer las necesidades del sistema.

Debe presentar un eje apto para acople con el motor, por lo general este tipo de tornillo presenta un rodamiento axial³² para soportar la fuerza generada por la operación, de esta forma se evita fricción y sobrecargas al motor. El montaje del husillo se realizara de forma vertical sobre la estructura que

³²Los rodamientos axiales, o cojinetes de empuje, están diseñados para resistir la fuerza en la misma dirección que el eje.

dará estabilidad al sistema, dando a su vez seguridad y accesibilidad al usuario para la supervisión del ingreso de material al “Hot-End”.

El motor es el encargado de generar el movimiento al tornillo. El husillo esta conectado a una tolva que permite y dirige el material a su interior, también esta parte del sistema posee componentes eléctricos externos (resistencias) que calientan el material y lo funde.

3.2.1.2 Tolva

Este es el componente que da la entrada del material al sistema extrusor, por que tiene que ser de un tamaño apropiado para cumplir con los requerimientos de trabajo. Este va por sobre el husillo, para aprovechar la gravedad y el material descienda hacia la garganta de alimentación. Esta posee un diseño universal que le es capaz de ser ubicada en equipos de FDM o también en equipos CNC, según desee el usuario. El ingreso de material a la Tolva se hará de forma manual para evitar costos innecesarios de automatización.

3.2.1.3 Estructura de Soporte.

El diseño de la estructura de soporte se hace en base a los requerimientos de los distintos componentes que se encuentran en la extrusora. Aplicando en esta etapa gran parte de innovación ya que logra a ser una de las características que da al sistema la ventaja de modularidad. Es necesario que este soporte el motor, reductor, tolva, barril, ventilador, sistema de electrónico y sistema de control.

En este punto es importante destacar que debido a la complejidad del sistema, se divide esta estructura en dos partes, una que soporta la mayor carga (sistema extrusor modular), y otra reservada solo para el sistema de control del extrusor. Esto da una gran ventaja a los sistema convencionales que existen en la actualidad ya que permite o independiza el extrusor de la estructura de impresión 3D, al momento de conformar alguna pieza o producto.

3.2.2. Componentes Estándar.

Componentes que no se desarrollan en detalle, debido a que se seleccionan de catálogos según los requerimientos. Los componentes estándar son: Motor, reductor, acoples mecánicos, resistencia eléctrica, ventilador y componentes eléctricos para sistema de control.

3.2.2.1 Motor Husillo.

Para la correcta selección del motor para el husillo, se debe conocer la potencia necesaria para la operación a realizar. En el apartado posterior de Diseño de Detalle, se puede encontrar la teoría que respalda la potencia y toque. Este motor este acoplado a un reductor, que garantiza la potencia y continuidad de trabajo. El reductor esta acoplado directamente al husillo y es el encargado de transmitir el movimiento rotatorio a este.

3.2.2.2 Elemento Calefactor.

Componente necesario para transmitir energía calorífica y fundir el material. Su disposición física es en el barril extrusor, consumiendo la potencia eléctrica para calentar la zona. Es necesario que tenga un control de la temperatura, para conectar y desconectar de acuerdo a la necesario por el trabajo.

La barra debe resistir la temperatura de trabajo o usar un elemento alternativo para su cuidado. El dimensionamiento y selección del calefactor o resistencia eléctrica se pueden encontrar en el Diseño de Detalle.

3.2.2.3 Ventilador.

Componente encargado de enfriar el material extruido en la salida de la boquilla, además de enviar aire forzado a los componentes y evitar que la temperatura se disipe por todo el sistema extrusor. Su disposición física es fuera de “Hot-End” y sobre la garganta de alimentación. El dimensionamiento y selección del ventilador se puede encontrar en el Diseño de Detalle.

3.2.2.4 Acople Mecánico.

Se presenta un acople mecánico, para transmitir el movimiento de rotación desde el reductor al husillo. Es necesario que el acoplador sea de diámetro de los ejes para transmitir de forma correcta el movimiento y no generar esfuerzos innecesarios, por que dependerá del motor y diámetro seleccionado.

3.2.2.5 Unidad o Sistema de Control.

Unidad de Control, al ser un componente importante para el funcionamiento del sistema, ya que depende de esta, se va a profundizar lo suficiente para entender su funcionamiento.

Estará compuesta por los *Driver*³³ de motor, controlador de temperatura, pantalla LCD³⁴, arduino, Fuente de poder, Reles³⁵ y sensor de temperatura. Los cuales permiten el correcto y continuo proceso de extrusión, entregando seguridad al operario y operación. Su selección se puede encontrar en el Diseño de Detalle.[37]

3.3. Parámetros para la Ingeniería de Diseño.

Es importante entender algunos conceptos y definiciones relacionadas con las teorías de fallas y como serán aplicadas al diseño del husillo, a continuación se definen brevemente algunos términos y las teorías mencionadas en el párrafo anterior:

- **Esfuerzo:** El esfuerzo es una propiedad de estado en un punto específico dentro de un cuerpo, la cual es una función de la carga, la geometría, la temperatura y el proceso de manufactura.
- **Factor de Diseño $[n]$:** Es un método matemáticos para enfrentar las incertidumbres de diseño. El método establece un factor de diseño basado en las incertidumbres absolutas de un parámetro de pérdida de función y un parámetro máximo permisible. En ciertos casos el parámetro puede ser la carga, el esfuerzo, la deflexión, etc

3.3.1. Teoría de Fallas

3.3.1.1 Teoría del Esfuerzo Cortante Máximo para Materiales Dúctiles (ECM)

La teoría del esfuerzo cortante máximo estipula que la fluencia comienza cuando el esfuerzo cortante máximo de cualquier elemento iguala al esfuerzo cortante máximo en una pieza de ensayo a tensión del mismo material cuando esa pieza comienza a fluir. La teoría del ECM también se conoce como la teoría de Tresca o Guest.

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \geq \frac{S_y}{2} \quad o \quad \sigma_1 - \sigma_3 \geq S_y \quad (1)$$

Observe que esto implica que la resistencia a la fluencia en cortante esta dada por:

$$S_{sy} = 0,5S_y \quad (2)$$

Para propósitos de diseño, la ecuación 1 puede modificarse para incorporar un factor de seguridad n . Por lo tanto,

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_y}{2n} \quad o \quad \sigma_1 - \sigma_3 = \frac{S_y}{n} \quad (3)$$

3.3.1.2 Teoría de la Energía de Distorsión para Materiales Dúctiles (ED)

Teoría de la energía de distorsión para materiales dúctiles (ED), predice que la falla por fluencia ocurre cuando la energía de deformación total por unidad de volumen alcanza o excede la energía de deformación por unidad de volumen correspondiente a la resistencia a la fluencia en tensión o en compresión del mismo material.

Si se tuviera un caso simple de tensión, entonces la fluencia podría ocurrir cuando $\sigma \geq S_y$. Por lo tanto, el esfuerzo promedio puede considerarse como un esfuerzo simple, equivalente o efectivo del estado general total del esfuerzo dado por σ_1 , σ_2 y σ_3 . Por lo general, este esfuerzo efectivo se llama *esfuerzo von Mises*, σ' .

$$\sigma' \geq S_y \quad (4)$$

Donde el esfuerzo Von Mises es:

$$\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

³³Un controlador (Driver) de motor es un pequeño amplificador de corriente; la función de los Drivers de motor es tomar una señal de control de baja corriente y luego convertirla en una señal de corriente más alta que pueda conducir un motor.

³⁴Una pantalla de cristal líquido o LCD (sigla del inglés Liquid Crystal Display). Es una pantalla delgada y plana formada por un número de píxeles en color o monocromos colocados delante de una fuente de luz o reflectora

³⁵Dispositivo electromagnético que, estimulado por una corriente eléctrica muy débil, abre o cierra un circuito en el cual se disipa una potencia mayor que en el circuito estimulador.

Para el esfuerzo plano, sean σ_A y σ_B los dos esfuerzos principales diferentes de cero. Entonces, de la ecuación 5, se obtiene

$$\sigma' = (\sigma_A^2 - \sigma_A\sigma_B + \sigma_B^2)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

La ecuación 6 es una elipse rotada en el plano σ_A, σ_B , como se muestra en la figura 35 con $\sigma' = S_y$. Las líneas punteadas en la figura representan la teoría del ECM, que puede verse como más restrictiva y, por ende, más conservadora³⁶

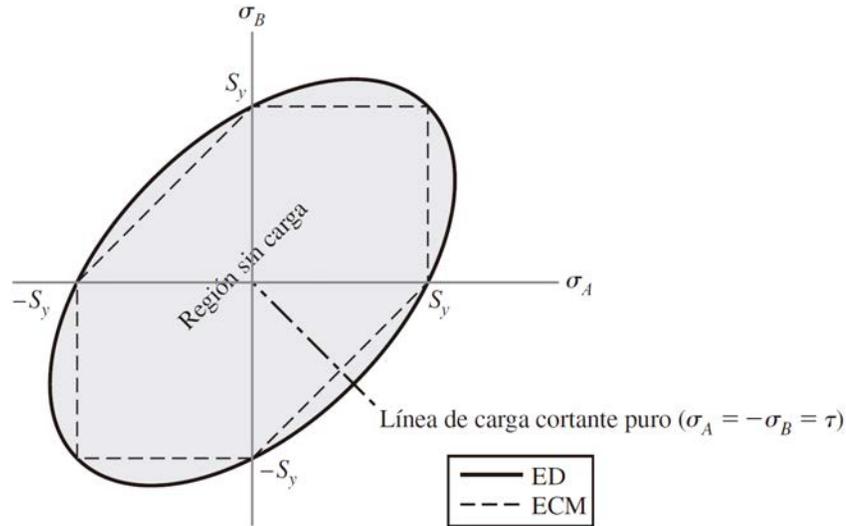


Figura 35: Teoría de energía de distorsión (ED) de estados de esfuerzo plano. Ésta es una gráfica real de puntos que se obtienen mediante la ecuación 6 con $\sigma' = S_y$.

Usando las componentes xyz del esfuerzo tridimensional, el esfuerzo von Mises puede escribirse como

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

La teoría de la energía de distorsión no predice falla bajo presión hidrostática y concuerda con todos los datos del comportamiento dúctil. Por consiguiente, es la teoría más empleada para los materiales dúctiles y se recomienda para los problemas de diseño, a menos que se especifique otra cosa. Una nota final que se relaciona con la resistencia a la fluencia cortante. Considere un caso de cortante puro τ_{xy} , donde para el esfuerzo plano $\sigma_x = \sigma_y = 0$. Para la fluencia, la ecuación 4 proporciona:

$$(3\tau_{xy}^2)^{\frac{1}{2}} = S_y \quad \text{o} \quad \tau_{xy} = \frac{S_y}{\sqrt{3}} = 0,577S_y \quad (8)$$

Es importante saber que la selección de una u otra de estas teorías, para propósitos de diseño, la teoría del esfuerzo cortante máximo es fácil y rápida de usar además de conservadora. Si el problema consiste en saber por qué falló una parte, entonces la teoría recomendable podría ser la de energía de distorsión.

3.3.1.3 Teoría de Falla por Fatiga.

Después de haber estudiado algunas de las diferentes teorías de falla, ahora se evaluarán y se mostrará cómo se aplican en el diseño y el análisis de los diferentes componentes del Sistema Extrusor.

La Falla por fatiga Con frecuencia existe una condición en la cual los esfuerzos varían o fluctúan entre ciertos niveles. Una falla por fatiga tiene una apariencia similar a la fractura frágil, dado que las superficies de la fractura son planas y perpendiculares al eje del esfuerzo con la ausencia de adelgazamientos. La resistencia en este punto se llama límite de resistencia a la fatiga S'_e

³⁶Las ecuaciones tridimensionales de la ED y del ECM pueden graficarse en relación con los ejes tridimensionales $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$. La superficie de la ED es un cilindro circular con un eje inclinado a 45° de cada eje de esfuerzo principal, mientras que la superficie del ECM es un hexágono inscrito dentro del cilindro.

3.3.1.4 Factores que Modifican el Límite de Resistencia a la Fatiga:

Los factores de modificación se definen y usan para tomar en cuenta las diferencias entre la pieza de prueba y la parte de máquina real en relación con las condiciones de la superficie, tamaño, carga, temperatura, confiabilidad y factores diversos. En este punto la carga sigue considerándose simple e invertida.

Marin³⁷ identificó factores que cuantifican los efectos de la condición superficial, el tamaño, la carga, la temperatura y varios otros puntos. La cuestión respecto de ajustar el límite de resistencia a la fatiga por medio de correcciones sustractivas o multiplicativas se resolvió mediante un extenso análisis estadístico, en el que se determinó un coeficiente de correlación de 0.85 para la forma multiplicativa, y 0.40 para la forma aditiva. Por lo tanto, la ecuación de Marin se escribe:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_f S'_e \quad (9)$$

Donde:

- k_a : Factor de modificación por la condición superficial
- k_b : Factor de modificación por el tamaño
- k_c : Factor de modificación por la carga
- k_d : Factor de modificación por la temperatura
- k_f : Factor de modificación por efectos varios
- S'_e : Límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria
- S_e : Límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica

Factor de Superficie [k_a]: Este valor puede representarse mediante la siguiente ecuación 10:

$$k_a = a S_{ut}^b \quad (10)$$

donde S_{ut} es la resistencia mínima a la tensión y los valores de a y b se encuentran en la siguiente tabla:

Acabado superficial	Factor a		Factor b
	S_{ut} [Kpsi]	S_{ut} [Mpa]	
Esmerilado	1,34	1,58	-0,085
Maquinado o laminado en frio	2,7	4,51	-0,265
Laminado en caliente	14,4	57,7	-0,718
Forja	39,9	272	-0,995

Tabla 17: Parámetros del Factor de la Condición Superficial. Marin

Factor de tamaño [k_b]: El factor de tamaño se evaluó en 133 conjuntos de puntos de datos ³⁸ Los resultados para flexión y torsión pueden expresarse como la siguiente ecuación 11:

$$k_b = \begin{cases} (d/0,3)^{-0,107} = 0,879d^{-0,107} & 0,11 \leq d \leq 2[in] \\ 0,91d^{-0,157} & 2 < d \leq 10[in] \\ (d/7,62)^{-0,107} = 1,24d^{-0,107} & 2,79 \leq d \leq 51[mm] \\ 1,51d^{-0,157} & 51 < d \leq 254[mm] \end{cases} \quad (11)$$

Para carga axial no hay efecto de tamaño, por lo cual

$$k_b = 1 \quad (12)$$

³⁷Joseph Marin, Mechanical Behavior of Engineering Materials, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1962, p. 224.

³⁸Charles R. Mischke, "Prediction of Stochastic Endurance Strength", en Trans. of ASME, Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, vol. 109, núm. 1, enero de 1987, tabla 3.

Factor de modificación de carga [k_c]: Cuando se realizan los ensayos de fatiga con carga de flexión rotatoria, axial (empujar y jalar) y de torsión, los límites de resistencia a la fatiga difieren con S_{ut} . Aquí, se especificarán valores medios del factor de carga:

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{Flexión} \\ 0,85 & \text{Axial} \\ 0,59 & \text{Torsión} \end{cases} \quad (13)$$

Factor de temperatura [k_d]: Cuando las temperaturas de operación son mayores que la temperatura ambiente, primero se debe investigar la fluencia porque la resistencia a ésta disminuye con rapidez con la temperatura. Cualquier esfuerzo inducirá flujo plástico en un material que opera a temperaturas elevadas, por lo que también se sugiere considerar este factor. Un ajuste de curva polinomial permite determinar ese factor de la siguiente ecuación:

$$k_d = 0,975 + 0,432(10^{-3})T_F - 0,115(10^{-5})T_F^2 + 0,104(10^{-8})T_F^3 - 0,595(10^{-12})T_F^4 \quad (14)$$

Donde T_F = Temperatura en escala de Fahrenheit, y se encuentra $70 \leq T_F \leq 1000 \text{ }^\circ F$

Cuando se toma en cuenta la temperatura surgen dos tipos de problemas. Si se conoce el límite de la resistencia a la fatiga de una viga rotativa a temperatura ambiente, entonces se emplea:

$$k_d = \frac{S_T}{S_{RT}} \quad (15)$$

De la ecuación 14 y se procede como es usual. Si no se conoce el límite de la resistencia a la fatiga de una viga rotativa, y la resistencia a la tensión con temperatura corregida. Entonces usa $k_d = 1$

Factor de confiabilidad [k_e]: La mayoría de los datos de resistencia a la fatiga se reportan como valores medios. Los datos que presentaron Haugen y Wirching³⁹ muestran desviaciones estándar de la resistencia a la fatiga de menos de 8 por ciento. Por lo tanto, el factor de modificación de la confiabilidad aplicable para esto puede escribirse como:

$$k_e = 1 - 0,08z_a \quad (16)$$

En la siguiente tabla se proporcionan los factores de confiabilidad de algunas confiabilidades estándar específicas:

Confiabilidad [%]	Variación de Transformación z_a	Factor de confiabilidad k_e
50	0	1
90	1,288	0,897
95	1,645	0,868
99	2,326	0,814
99,9	3,091	0,753
99,99	3,719	0,702
99,999	4,265	0,659
99,9999	4,753	0,62

Tabla 18: Factores de Confiabilidad k_e Correspondientes a 8 Desviaciones Estándar Porcentuales del Límite de Resistencia a la Fatiga.

Factor de efectos varios [k_f]: Aunque el factor k_f tiene el propósito de tomar en cuenta la reducción del límite de resistencia a la fatiga debida a todos los otros efectos, en verdad significa un recordatorio que estos efectos se deben tomar en cuenta, porque los valores reales de k_f no siempre están disponibles.

3.3.1.5 Concentración de Esfuerzo (K_t o K_{ts})

Factor teórico o geométrico de la concentración de esfuerzo se entiende como cualquier discontinuidad en una parte o elemento altera la distribución del esfuerzo en las inmediaciones de la discontinuidad, de manera que las ecuaciones elementales del esfuerzo ya no describen el estado de esfuerzo en la parte. A estas discontinuidades se les denomina *intensificadores de esfuerzos*, mientras que a las regiones en las cuales ocurren se les llama *áreas de concentración del esfuerzo*.

³⁹E.B. Haugen y P.H. Wirching, "Probabilistic Design", en Machine Design, vol. 47, núm. 12, 1975, pp. 10-14.

Se emplea un factor teórico o geométrico de la concentración de esfuerzos K_t o K_{ts} para relacionar el esfuerzo máximo real en la discontinuidad con el esfuerzo nominal. El valor del factor de concentración de esfuerzos sólo depende de la geometría de la parte. Es decir, el material particular que se haya utilizado no tiene efecto en el valor de K_t . Ésta es la razón por la que se llama factor teórico de concentración de esfuerzos.

De aquí que algunos materiales no sean completamente sensibles a la presencia de muescas y, por lo tanto, para ellos puede usarse un valor reducido de K_t . En el caso de estos materiales, el esfuerzo máximo es, en realidad,

$$\sigma_{max} = K_f \sigma_0 \quad \text{o bien} \quad \tau_{max} = K_{fs} \tau_0 \quad (17)$$

Donde K_f es un valor reducido de K_t y σ_0 es el esfuerzo nominal. El factor K_f se llama comúnmente *factor de concentración de esfuerzo por fatiga*, y a eso se debe el subíndice f . Entonces, es conveniente pensar en $K : f$ de concentración del esfuerzo reducido de k_t debido a la disminución de la sensibilidad a la muesca. El factor resultante se define mediante la ecuación 18:

$$k_f = \frac{\text{Esfuerzo máximo en la pieza de prueba con muesca}}{\text{Esfuerzo en la pieza de prueba sin muesca}} \quad (18)$$

La sensibilidad a la muesca q , está definida por:

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad \text{o bien} \quad q_{cortante} = \frac{K_{fs} - 1}{K_{ts} - 1} \quad (19)$$

donde q se encuentra usualmente entre cero y la unidad. La ecuación 19 muestra que si $q = 0$, entonces $K_f = 1$, y el material no tiene ninguna sensibilidad a la muesca. Por otro lado, si $q = 1$, entonces $K_f = K_t$ y el material tiene sensibilidad total a la muesca. En el trabajo de diseño, primero se encuentra la K_t , a partir de la geometría de la pieza. Después, se especifica el material, se encuentra la q , y finalmente se despeja K_f de la ecuación.

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad \text{o bien} \quad K_{fs} = 1 + q_{cortante}(K_{ts} - 1) \quad (20)$$

Debido a esta dispersión, siempre es seguro usar $K_f = K_t$ cuando existe alguna duda acerca del valor verdadero de q . También observe que q no está lejos de la unidad en radios de muesca grandes. Las figuras 36 y 37 se basan en la *ecuación de Neuber*, la cual está dada por:

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \sqrt{\frac{a}{r}}} \quad (21)$$

Donde a y r están dando por las siguiente figura 36 para normal y figura 37 para cortante:

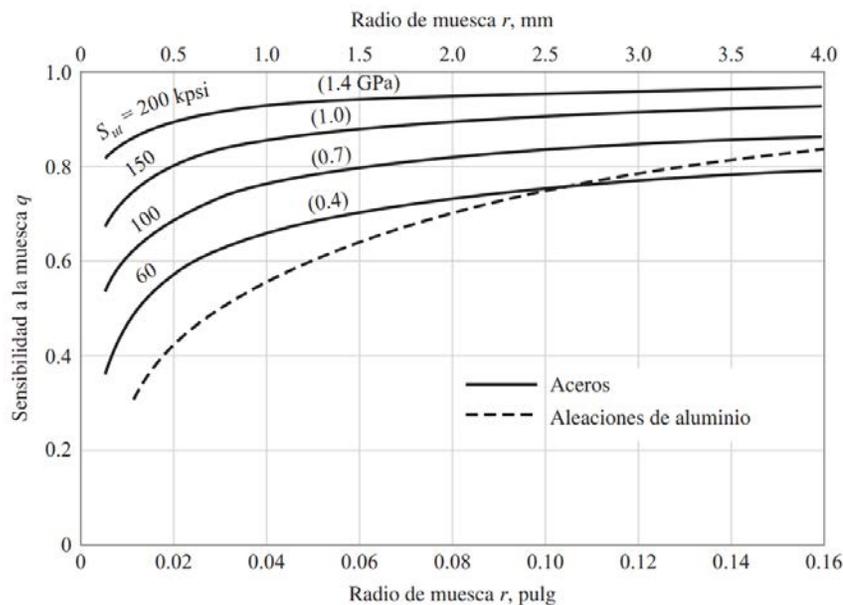


Figura 36: Sensibilidad a la muesca en el caso de aceros y aleaciones de aluminio forjados, sometidos a flexión inversa de cargas axiales inversas. Para radios de muesca más grandes, use los valores de q correspondientes a la ordenada $r = 0.16$ pulg (4 mm).

Fuente: De George Sines y J.L. Waisman (eds.), Metal Fatigue, McGrawHill, Nueva York, Copyright 1969 por The McGraw-Hill Companies, Inc. Reproducido con autorización

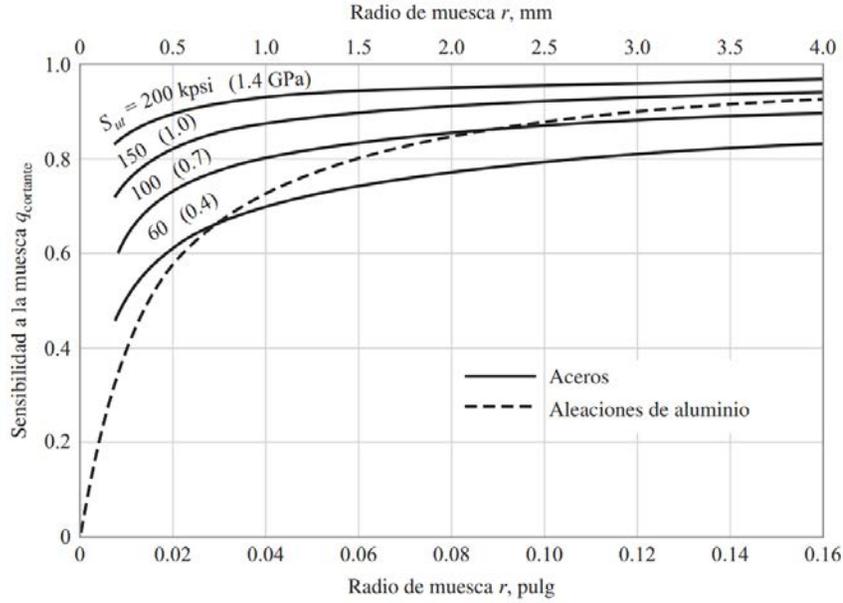


Figura 37: Sensibilidad a la muesca de materiales sometidos a torsión inversa. En el caso de radios de muesca más grandes, use los valores de $q_{cortante}$ correspondientes a la ordenada $r = 0.16$ pulg (4 mm).

Donde \sqrt{a} se define como *constante de Neuber* y es una constante del material. Si se igualan las ecuaciones 19 y 21 se obtiene la ecuación 22 de la sensibilidad a la muesca.

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}} \quad (22)$$

Que se correlacionan con las figuras 36 y 37.

$$\text{Flexión o Axial: } \sqrt{a} = 0,246 - 3,08(10^{-3})S_{ut} + 1,51(10^{-5})S_{ut}^2 - 2,67(10^{-8})S_{ut}^3 \quad (23)$$

$$\text{Torsión: } \sqrt{a} = 0,190 - 2,51(10^{-3})S_{ut} + 1,35(10^{-5})S_{ut}^2 - 2,67(10^{-8})S_{ut}^3 \quad (24)$$

Donde las ecuaciones se aplican al acero y el S_{ut} está en [Kpsi]. La ecuación 22 usada junto con la ecuaciones 23 y 24 es equivalente a las figuras 36 y 37. Al igual que con las gráficas, los resultados de la curva se ajustan a las ecuaciones y sólo proporcionan aproximaciones a los datos experimentales.

En la tabla 7-1 se resumen algunos factores de la concentración del esfuerzo típicos de la primera iteración en el diseño de un eje.

	Flexión	Torsión	Axial
Filete de hombro: agudo ($r/d = 0,02$)	2,7	2,2	3.0
Filete de hombro: bien redondeado ($r/d = 0,1$)	1,7	1,5	1,9
Cuñero fresado ($r/d = 0,02$)	2,14	3.0	-
Cuñero de patín	1,7	-	-
Ranura para anillo de retención	5.0	3.0	5.0

Tabla 19: Estimaciones de primera iteración de los factores de concentración del esfuerzo K_t y K_{ts} .

3.3.1.6 Caracterización de Esfuerzos Fluctuantes.

A menudo los esfuerzos fluctuantes sobre un elemento adopta forma de patrón sinusoidal debido a la naturaleza de algunas cargas rotatorias. Sin embargo, también ocurren otro tipo de patrones, irregulares. Se ha determinado que en los patrones periódicos que presentan sólo un máximo y sólo un mínimo de la fuerza, la forma de la onda no resulta fundamental, pero los picos en el lado alto (máximo) y en el lado bajo (mínimo) son importantes. En consecuencia, F_{max} y F_{min} en un ciclo de fuerza se emplean para caracterizar el patrón de la fuerza. También es cierto que al variar

por arriba y debajo de alguna línea base resulte igualmente eficaz para caracterizar el patrón de la fuerza. Si la fuerza mayor es F_{max} y la fuerza menor es F_{min} , se construye una componente uniforme y alternante como se presenta:

$$F_m = \frac{F_{max} + F_{min}}{2} \quad F_a \left| \frac{F_{max} - F_{min}}{2} \right| \quad (25)$$

Donde F_m es la componente de intervalo medio de la fuerza y F_a es la componente de la amplitud de la fuerza.

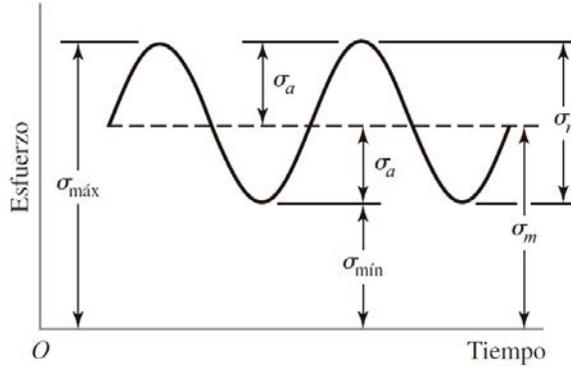


Figura 38: Relaciones de Esfuerzos Repetidos en el Tiempo

En la figura 38 se ilustran algunos de los varios registros esfuerzo-tiempo que ocurren: Donde:

- σ_{min} : Esfuerzo mínimo
- σ_{max} : Esfuerzo máximo
- σ_a : Componente de amplitud
- σ_m : Componente de esfuerzo medio
- σ_r : Intervalo de esfuerzo
- σ_s : Esfuerzo estático o constante

El esfuerzo constante, o estático, no es el mismo que el esfuerzo medio; de hecho, puede tener cualquier valor entre σ_{min} y σ_{max} . El estado constante existe debido a una carga fija o a una pre-carga aplicada a la parte, y por lo general es independiente de la parte variante de la carga.

De la figura 38 resulta evidente las siguientes ecuaciones.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (26)$$

Además obtenemos la *razón de esfuerzo* 27 y la *razón de amplitud* 28:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (27)$$

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (28)$$

3.3.1.7 Resistencia a la fatiga por torsión bajo esfuerzos fluctuantes.

La teoría de falla por energía de distorsión probó ser un método satisfactorio para combinar los esfuerzos múltiples sobre un elemento de esfuerzo en un esfuerzo equivalente de von Mises. En esta tesis se usará el mismo enfoque. Considerando que los esfuerzos flectores, torsionales y axiales tienen componentes alternantes y medios, el esfuerzo de Von Mises de los dos elementos de esfuerzo pueden escribirse como:

$$\sigma'_a = \left\{ \left[(K_f)_{flexin}(\sigma_a)_{flexin} + (K_f)_{axial} \frac{(\sigma_a)_{axial}}{0,85} \right]^2 + 3 [(K_{kfs})_{torsin}(\tau_a)_{torsin}]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (29)$$

$$\sigma'_m = \left\{ [(K_f)_{flexin}(\sigma_m)_{flexin} + (K_f)_{axial}(\sigma_m)_{axial}]^2 + 3 [(K_{kfs})_{torsin}(\tau_m)_{torsin}]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (30)$$

$$\sigma'_{max} = \sigma'_a + \sigma'_m \quad (31)$$

3.4. 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.

3.4.1. Diseño del Husillo o Sin-Fin.

3.4.1.1 Parámetros.

El husillo [38] es el componente principal en el trabajo de una sistema extrusor. Como se muestra en la Figura 39, tanto la producción como la aplicación de la extrusor dependen del diámetro del husillo, de la longitud, de la velocidad de giro, diseño de canal helicoidal, perfil de los filetes y del cabezal, número de zonas, cabezal perfiladora entre muchas otras.

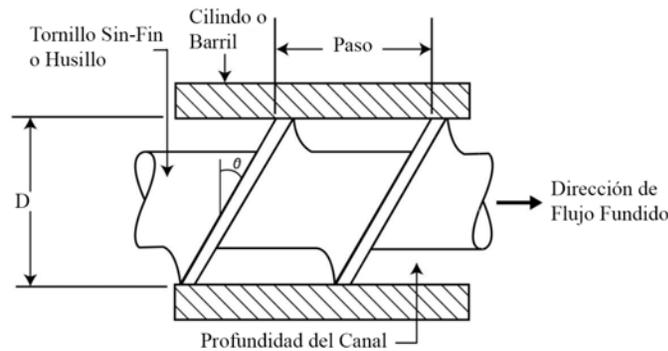


Figura 39: Detalle Husillo.

Groover: Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas.

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 de canal constante o variable. Sin embargo, por su mayor capacidad de producción y facilidad de emplean husillos de paso constante y profundidad de canal variable.[1].La elección se realizara de acuerdo a los materiales a trabajar en esta tesis (PET, PLA). Un Tornillo de uso general para trabajar ambos materiales, debe contemplar tres zonas definidas en el husillo (alimentación, compresión y dosificación), además de un solo canal, con paso constante y profundidad de canal para cada zona.[39]

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, por lo tanto, y según “*Victor K Savgorodny*” [1], aumenta la relación L/D . La relación típica entre 20:1 y 30:1 [39]. Los husillos largos se emplean en procesos rápidos de extrusión. Por otro lado, para la fabricación de perfiles continuos, se recomienda utilizar husillos cortos. [1].El grado de compresión, es decir, la relación de volúmenes de los canales del husillo áreas un paso de las zonas de alimentación y dosificación, se encuentran en un intervalo de 2 a 4, [39]. Para la transformación 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 material continuo en un área transversal definida. 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.

Los parámetros geométricos escogidos para el proyecto se definen en función de los requerimientos dimensionales.

Para el diseño del un eje, se debe determinar un diámetro adecuado para la transmisión de potencia bajo ciertas condiciones de cargar. El diseño de un eje se debe calcular mediante los esfuerzos, resistencias en él y verificar los datos en teoremas de falla por fatiga.[37].Lo primero, es verificar que el husillo no fallara inmediatamente luego de aplicar las cargas de trabajo, para la cual se utilizará la la “Teoría de Energía de Distorsión (ED)”, propuesta por Gerber en condiciones de carga axial, momento flector y momento torsor, que nos dice que la falla se produce por fatiga por torsión bajo esfuerzos fluctuantes. [37]. Con esta teoría, se calculará el diámetro mínimo del husillo para que no falle a la cargas aplicadas.

3.4.1.2 Cálculo de Diámetro Mínimo (Teoría ED-Gerber)

Gerber propone una ecuación que permite en una ecuación cruzar la teoría falla mediante esfuerzos máximo para ejes en flexión y torsión, y el teorema de Von Mises para determinar de forma más exacta el diámetro mínimo para el construcción de un eje sometido a un conjuntos de cargas y/o trabajos. Esta propuesta de Gerber dice para obtener el diámetro mínimo de un eje se debe utilizar la ecuación 4, se aplican Teoremas de Fallas por Fatiga vistos anteriormente en este capítulo y además criterios de diseño, finalmente se puede definir el diámetro utilizando la siguiente ecuación:

$$d = \left(\frac{8nA}{\pi S_e} \left\{ 1 + \left[1 + \left(\frac{2BS_e}{AS_{ut}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (32)$$

Donde:

$$A = \sqrt{4(k_f M_a)^2 + 3(k_{fs} T_a)^2} \quad (33)$$

$$B = \sqrt{4(k_f M_m)^2 + 3(k_{fs} T_m)^2} \quad (34)$$

Entendiendo como:

- d : Diámetro mínimo del eje [m]
- n : Factor de Seguridad [-]
- S_e : Límite de Resistencia a la Fatiga [Pa]
- K_f : Factores de concentración de esfuerzo por fatiga en flexión [-]
- M_a : Momento flexionante alternante [Nm]
- K_{fs} : Factores de concentración de esfuerzo por fatiga en torsión [-]
- T_a : Pares torsión alternante [Pa]
- S_{ut} : Límite de fluencia del material [Pa]
- M_m : Momento flexionante medio [Nm]
- T_m : Pares torsión medio [Nm]

Esta ecuación nos permite estimar el diámetro mínimo para la fabricación del husillo, considerando material a utilizar y cargas a las cual será sometidas (fatiga por trabajo, movimiento, temperatura, entre otros) el husillo.

El siguiente paso para obtener el diámetro del husillo, es obtener los valores necesarios para ingresarlos a la ecuación 3.4.1.2, esto se realizará mediante un diagrama de cuerpo libre, estimando condiciones más críticas de trabajo, estas condiciones se muestran en la siguiente figura 40.

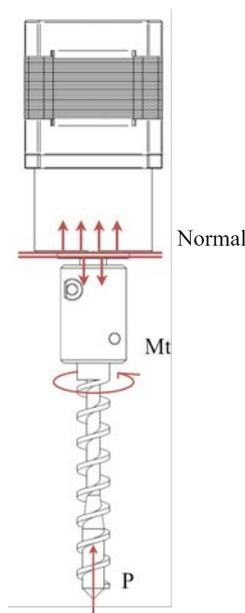


Figura 40: Diagrama de Cuerpo Libre, Cargas Sobre el Husillo.
Elaboración Propia.

En la figura 40, se presenta un diagrama de cuerpo libre para observar las fuerzas que actúan con el husillo. Si se analiza se observa que el movimiento y giro del motor, es transmitido a través de una caja reductora 5:1 que posteriormente transmite el toque al husillo mediante una copla mecánica, a la vez, se observa una carga normal opuesta a la carga P relacionada con la fuerza que ejerce el material sobre la cara inferior del husillo al momento de ser forzado a pasar por la boquilla. Al ser un eje, de tamaño pequeño además de que la forma de trabajo será de forma vertical, se desprecia los esfuerzos relacionados con la flexión.

Es necesario estimar una velocidad de trabajo para cuantificar los valores de esfuerzos internos en el husillo, para ello es necesario tener la velocidad de trabajo y el torque máximo que transmite el motor al husillo. En la siguiente figura 41, entregada por el fabricante (motor NEMA 17 Stepper 17HS19-1684S-PG5, Gearnox 5:1), se observa que el mayor valor de toque se encuentra entre las 10 rpm y 30 rpm de funcionamiento.

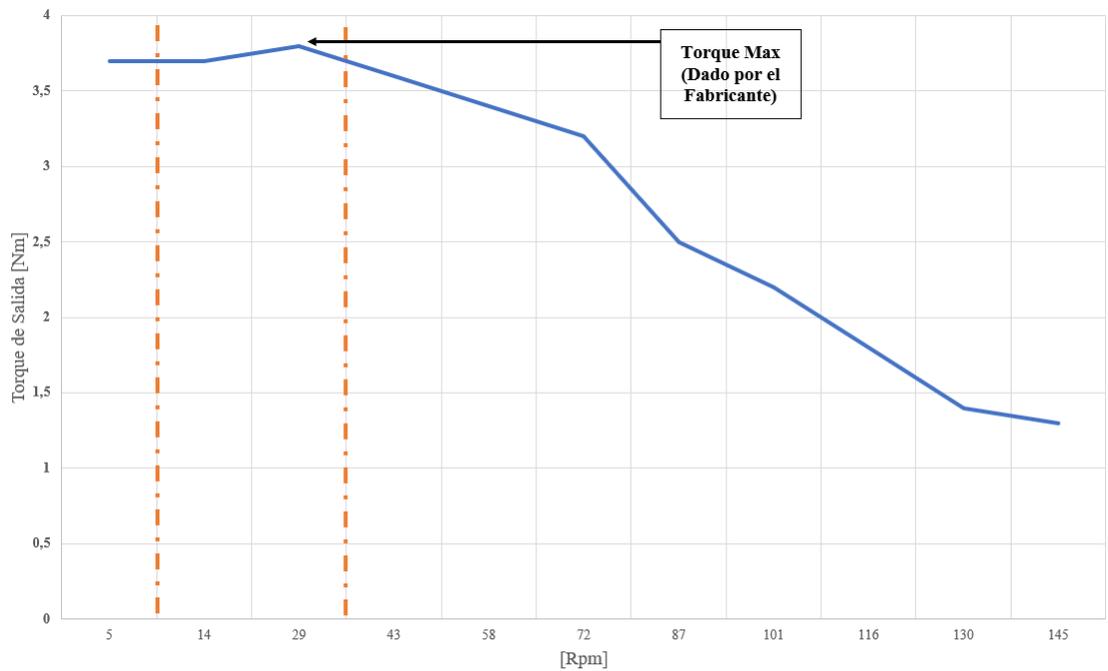


Figura 41: Diagrama de torque en función de rpm Motor Nema 17 Gearbox 5:1.

Fuente: <https://www.omc-stepperonline.com/nema-17-stepper-motor-bipolar-148mm-w-gear-raio-51-planetary-gearbox-17hs19-1684s-pg5.html> .

Al momento de enfocarnos en el diseño del husillo para posteriormente pasar a la etapa de cálculo, observamos en la figura 42 un esquema base para el diseño del husillo considerando como datos bases el diámetro del fabricando del Motor para calcular los esfuerzos y posteriormente estimar el diámetro mínimo para resistir las cargas a la cual será sometido el husillo.

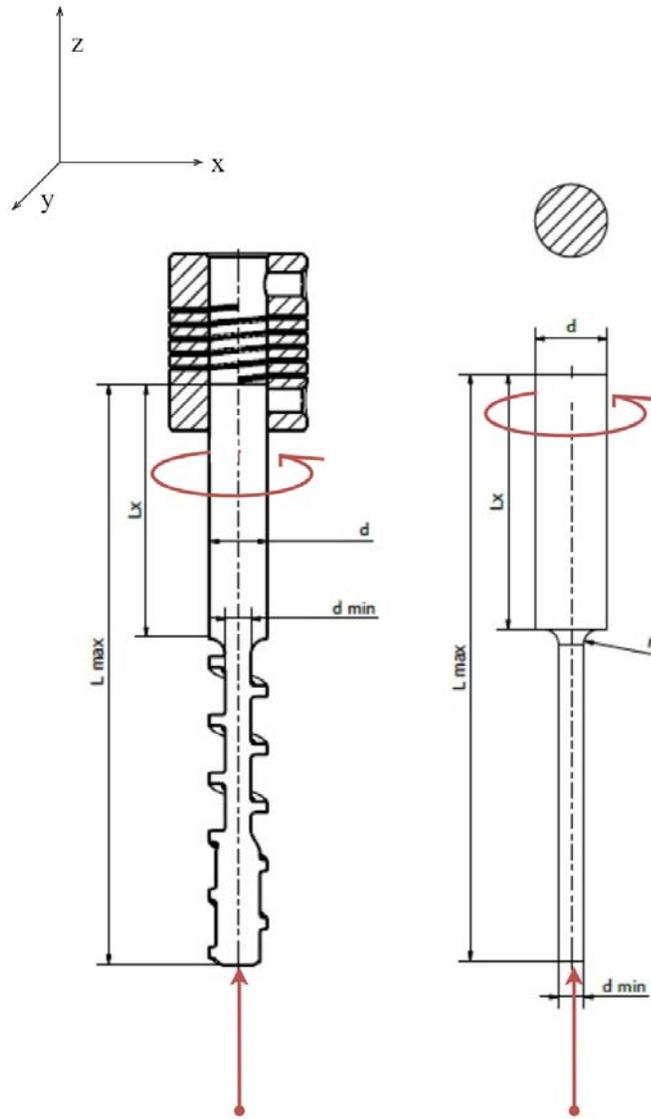


Figura 42: Esquema para Aplicación de Criterios de Diseño en el Husillo
Fuente: Elaboración Propia

Si nos enfocamos en las cargas de la primera parte del husillo L_x , que es la parte que recibe inicialmente el torque enviado desde el motor, analizando las cargas en este tramo se pueden obtener los siguientes esfuerzos, véase figura 43

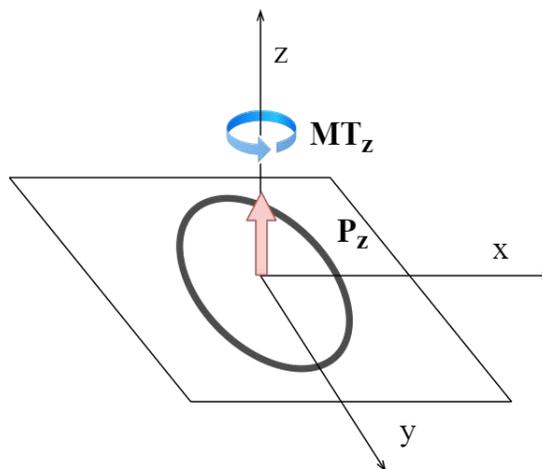


Figura 43: Diagrama de Cargas en la Primera Parte del Diseño del Husillo L_x
Fuente: Elaboración Propia

El primer paso para ejecutar las ecuaciones y estimar el valor del diámetro del husillo es definir las fuerzas fluctuantes, es decir, que valor tomara las fuerzas máximas y mínimas.

Donde se considerará como

- $MT_{Zmax} = 4[KN]$
- $MT_{Zmin} = 2,5[KN]$

El primer valor a determinar en la ecuación general 32 de diámetro, es el valor o factor de seguridad n , utilizando la ecuación 3:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_y}{2n}$$

Despejando n :

$$n = \frac{\sigma_y}{2\tau_{max}}$$

Donde:

- n : Factor de Seguridad [-]
- σ_y : Límite Elástico(Esfuerzo de fluencia) [MPa]
- τ_{max} : Esfuerzo Cortante Máximo

Los valores para σ_y y τ_{max} serán definidos en función del material a elegir para la construcción a husillo, en este punto se evaluará el factor de seguridad n para el material AISI 316, en donde los valores se obtienen a partir de la tabla 26.

Se define τ_{max} el material elegido:

$$\tau_{max} = \frac{Mt * dimetro}{2J}$$

Donde J para un área transversal circular esta dado por:

$$J = \frac{\pi D^4}{32} \quad / \quad \text{Reemplazando valores}$$

$$J = \frac{\pi * (0,008[m])^4}{32}$$

$$J = 4,0212356 * 10^{-10}[m^4]$$

Luego se obtiene que τ_{max} es igual a:

$$\tau_{max} = \frac{Mt * dimetro}{2J} \quad / \quad \text{Reemplazando valores}$$

$$\tau_{max} = \frac{4[Nm] * 0,008[m]}{2 * 4,0212356 * 10^{-10}[m^4]}$$

$$\tau_{max} = 39788735,77[Pa]$$

Calculo de n para AISI 316, utilizando valor de σ_y de la tabla 26

$$n = \frac{\sigma_y}{2\tau_{max}} \quad / \quad \text{Reemplazado valores}$$

$$n = \frac{420 * 10^6[Pa]}{2 * 39788735,77[Pa]}$$

$$\boxed{n = 5,2778} \quad (35)$$

El siguiente paso es encontrar el valor S_e , que es Límite de resistencia a la fatiga para cada material a evaluar. Según la ecuación 9 se obtiene este valor a partir de:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_f S'_e$$

Donde el factor de superficie k_a se determina por (véase ecuación 10):

$$k_a = a.S_{ut}^b \quad / \quad \text{Reemplazado valores para AISI 316}$$

$$\text{AISI 316} \quad k_a = 4,51 * 670[MPa]^{-0,265}$$

$$\text{AISI 316} \quad k_a = 0,8040[MPa] \quad k_a = 804019,7541[Pa]$$

Posteriormente obtenemos el factor de tamaño k_b determinado por (véase ecuación 11), este valor no depende de alguna propiedad propia del material:

$$k_b = \left(\frac{d}{7,62} \right)^{-0,107} \quad 2,79 \leq d \leq 51[mm]$$

Reemplazado valores

$$k_b = \left(\frac{8[-]}{7,62} \right)^{-0,107}$$

$$k_b = 0,9948[-]$$

El factor de tamaño k_c se determina por la ecuación 13, este valor esta dado según la carga a la cual esta sometida:

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{Flexión} \\ 0,85 & \text{Axial} \\ 0,59 & \text{Torsión} \end{cases}$$

$$k_c = 0,59$$

El factor de temperatura k_d se determina por la ecuación 14, este valor esta dado por la temperatura de operación. De la ecuación 14 y se procede como es usual. Si no se conoce el límite de la resistencia a la fatiga de una viga rotativa, y la resistencia a la tensión con temperatura corregida. Entonces usa $k_d = 1$

$$k_d = 1$$

El factor de confiabilidad k_e se determina por la ecuación 16, este valor esta dado según muestras de desviaciones estándar de resistencia a la fatiga:

$$k_e = \frac{1}{K_{fs}}$$

Donde K_{fs} es factor de concentración de esfuerzo a la Torsión. En este caso, el eje presenta concentración de esfuerzo en el hombro del husillo (copla mecánica) por lo cual existe un factor de concentración por fatiga. El factor de concentración k_{fs} se obtiene a partir de la tabla 19, para estimaciones conservadoras. En el caso del hombro del husillo. En este caso del husillo, el radio mínimo estará esta limitado por las especificaciones de fabricación (torno) por lo que el radio será de $r = 0,2[mm]$, de acuerdo con la tabla 19 se obtiene

$$k_t = 2,2[-] \quad \text{y } K_{ts} = 3,0[-]$$

Puesto que el husillo no se encuentra sometido a flexión, y la zona de critica es el soporte a la copla mecánica, por medida de seguridad se utilizará que $k_{fs} = k_{ts}$.

$$k_e = \frac{1}{3}[-]$$

En el caso de los aceros, el límite de resistencia se define como $S'_e = 0,5S_{ut}$, donde S_{ut} es la resistencia a la tensión mínima:

$$S'_e = 0,5S_{ut} \quad / \quad \text{Reemplazado valores}$$

$$S'_e = 0,5 * 670[MPa]$$

$$S'_e = 355[MPa]$$

Finalmente determinamos el valor de S_e . Según la ecuación 9

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_f S'_e \quad / \quad \text{Reemplazado valores}$$

$$S_e = 0,8040[MPa] * 0,9948[-] * 0,59[-] * 1[-] * \frac{1}{3}[-] * 355[MPa]$$

$$\boxed{S_e = 55,84[MPa]} \quad (36)$$

Si analizamos los valores faltante A y B para la Ecuación General de calculo de diámetro 32, podemos reducir algunos datos, ya que el eje no esta sometido a carga flexionantes, quedando de la siguiente manera.

$$A = \sqrt{\underbrace{4(k_f M_a)^2}_0 + 3(k_{fs} T_a)^2} \Rightarrow A = \sqrt{3(k_{fs} T_a)^2}$$

$$B = \sqrt{\underbrace{4(k_f M_m)^2}_0 + 3(k_{fs} T_m)^2} \Rightarrow B = \sqrt{3(k_{fs} T_m)^2}$$

Donde el valor de T_a y T_m se define utilizando la ecuación 25

$$T_m = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad \text{y} \quad T_a = \left| \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \right|$$

Reemplazando valores se obtiene que:

$$T_m = \frac{4[Nm] + 2,5[Nm]}{2} \quad \text{y} \quad T_a = \left| \frac{4[Nm] - 2,5[Nm]}{2} \right|$$

$$T_m = 3,25[Nm] \quad \text{y} \quad T_a = 0,25[Nm] \quad (37)$$

Reemplazando valores en A y B se obtiene que:

$$A = \sqrt{3(k_{fs} T_a)^2}$$

$$A = \sqrt{3(3 * 0,25[Nm])^2}$$

$$\boxed{A = 16,88[Nm]} \quad (38)$$

$$B = \sqrt{3(k_{fs} T_m)^2}$$

$$B = \sqrt{3(3 * 3,25[Nm])^2}$$

$$\boxed{B = 1,29[Nm]} \quad (39)$$

Por último y con el fin de estimar el diámetro mínimo para la fabricación se reemplazan los valores en la ecuación 32

$$d = \left(\frac{8nA}{\pi S_e} \left\{ 1 + \left[1 + \left(\frac{2BS_e}{AS_{ut}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Reemplazando Valores}$$

$$d = \left(\frac{8 * 5,278[-] * 16,88[Nm]}{\pi * 55,84 * 10^6[Pa]} \left\{ 1 + \left[1 + \left(\frac{2 * 1,29[Nm] * 55,84 * 10^6[Pa]}{16,88[Nm] * 670 * 10^6[Pa]} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\boxed{d_{min} = 0,002010[m]} \Rightarrow d_{min} = 2,01[mm]$$

Por temas constructivos y propios en relación al proceso de fabricación del husillo mediante un torno, se determinar que el diámetro mínimo para ejecutar la operación sera de 3,5[mm].

$$\boxed{d_{min} = 3,5[mm]}$$

3.4.1.3 Dimensionamiento del Husillo

Los parámetros geométricos escogidos para el proyecto se basan en las dimensiones máximas que debe tener producto como cumplir correctamente con las restricciones y requerimientos, de acuerdo a esto, se fija un largo máximo para el husillo. Para ello se utilizará las referencias [1].

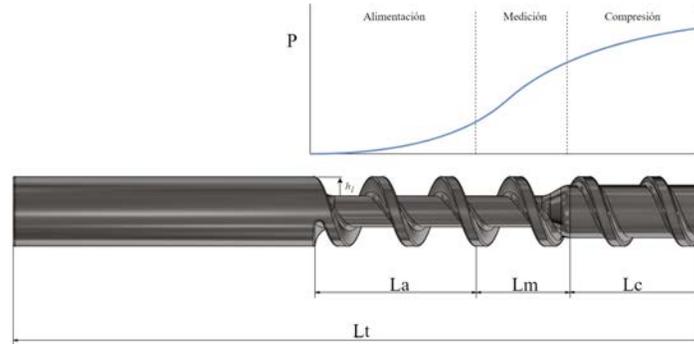


Figura 44: Zonas de un husillo Extrusor y la Evolución de la Presión a lo largo de las Mismas.
Fuente: Elaboración Propia

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, véase figura 44.

- Largo total del husillo esta dado por: $L_t = L_a + L_m + L_c + L_{acople}$

Donde:

- L_t : Longitud total [mm]
- L_a : Longitud de alimentación [mm]
- L_m : Longitud de medición [mm]
- L_c : Longitud de compresión [mm]
- L_{acople} : Longitud de acople a cople mecánica [mm]
- h_1 : Altura canal alimentación [mm]

Para obtener el valor de los largos de cada zona del husillo, se define en primera parte el $D_{externo}$ del husillo:

$$D = d_{min} + 2h_1 \quad (40)$$

Donde h_1 se calcula con la siguiente ecuación 41:

$$\text{Altura Canal Zona de alimentación } h_1 = 0,6 * d_{min} [mm] \quad (41)$$

$$h_1 = 0,6 * 3,5 [mm]$$

$$h_1 = 2,1 [mm]$$

Por lo tanto:

$$D = d_{min} + 2h_1 \quad \text{Reemplazando datos}$$

$$D = 3,5 [mm] + 2 * 2,1 [mm]$$

$$\boxed{D = 7,7 [mm] \rightarrow D = 8 [mm]}$$

- Longitud de alimentación L_a se calcula mediante la ecuación 42 para husillos $L_t \leq 100 [mm]$:

$$L_a = 2,3D \quad \text{Reemplazando datos} \quad (42)$$

$$L_a = 2,3 * 8 [mm]$$

$$\boxed{L_a = 18,4 [mm]}$$

- Longitud de medición o transición L_m se calcula mediante la ecuación 43 para husillos $L_t \leq 100 [mm]$:

$$L_m = 1,4D \quad \text{Reemplazando datos} \quad (43)$$

$$L_m = 1,4 * 8[mm]$$

$$\boxed{L_m = 11,2[mm]}$$

- Longitud de medición o transición L_c se calcula mediante la ecuación 44 para husillos $L_t \leq 100[mm]$:

$$L_c = 2D \quad \text{Reemplazando datos} \quad (44)$$

$$L_c = 2 * 8[mm]$$

$$\boxed{L_c = 16[mm]}$$

- Longitud de acople L_{acople} se estima en función de la distancia disponible entre la copla y zona de calefacción del sistema extrusor, esta distancia esta dada por razones constructivos ya que se debe estimar la distancia para disponer de un ventilador eléctrico, por tanto se define como $L_{acople} \leq 40[mm]$:

Finalmente podemos obtener el largo total del husillo L_t , utilizando la ecuación 3.4.1.3

$$L_t = L_a + L_m + L_c + L_{acople} \quad \text{Reemplazando valores}$$

$$L_t = 18,4[mm] + 11,2[mm] + 16[mm] + 40[mm]$$

$$\boxed{L_t = 85,6[mm]}$$

- Largo husillo (largo de trabajo) = $L_a + L_m + L_c \Rightarrow 18,4[mm] + 11,2[mm] + 16[mm]$

$$\text{Largo de Trabajo Husillo} = \boxed{45,6[mm]}$$

- Número de Filetes

$$\text{N}^\circ \text{ de Filetes} = \frac{\text{Largo de Trabajo}}{\text{Diametro}} \Rightarrow \frac{45,6[mm]}{8[mm]} \Rightarrow \boxed{5,7[-]}$$

- Grado de Compresión $\boxed{i = 2}$

- Paso del Husillo [t]

$$t = 1 * D \quad \text{Reemplazando valores}$$

$$t = 1 * 8[mm]$$

$$\boxed{t = 8[mm]}$$

- Ancho de Filete [e]

$$e = 0,1 * D \quad \text{Reemplazando valores}$$

$$e = 0,1 * 8[mm]$$

$$\boxed{e = 0,8[mm]}$$

- Profundidad de canal en Zona de Alimentación [h_1]

$$h_1 = 0,25 * D \quad \text{Reemplazando valores}$$

$$h_1 = 0,25 * 8[mm]$$

$$\boxed{h_1 = 2[mm]}$$

- Profundidad de canal en Zona de Compresión [h_3]

$$h_3 = \frac{h_1}{i} \quad \text{Reemplazando valores}$$

$$h_3 = \frac{2[mm]}{2}$$

$$\boxed{h_3 = 1[mm]}$$

- Ángulo de Hélice [θ]

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{t}{\pi * D} \right) \quad \text{Reemplazando valores}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{8[mm]}{\pi * 8[mm]} \right)$$

$$\boxed{\theta = 0,308169 \quad \Rightarrow \quad \theta = 17,65^\circ}$$

- Holgura del Husillo/Cilindro [δ]

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 flujo inverso (de presión) del material. Generalmente se emplea una holgura entre el husillo y el cilindro de $0,002 * D$ para los husillos de diámetros grandes y de $0,005 * D$ para los husillos de diámetros pequeños [1]. De acuerdo a ello, la holgura seleccionada que existe entre el cilindro y el husillo será:

$$\delta = 0,005 * D \quad \text{Reemplazando valores}$$

$$\delta = 0,005 * 8[mm]$$

$$\boxed{\delta = 0,05[mm]}$$

- Producción del husillo (flujo volumétrico unitario) [Q]

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 [1], el flujo volumétrico unitario se puede determinar por:

$$Q = \left(\frac{\alpha * K}{K + \beta + \gamma} \right) n * \rho \quad (45)$$

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]
- n : Velocidad 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.

1. Volumen unitario flujo de arrastre (α)[[1]

$$\alpha = \frac{\pi * m * D * h_1 * \left(\frac{t}{m} - e \right) * \cos^2 \theta}{2} [mm^3] \quad (46)$$

Donde:

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

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

$$\alpha = \frac{\pi * 1 * 8[mm] * 2[mm] * \left(\frac{8[mm]}{1} - 0,8[mm]\right) * \cos^2 (17,65^\circ)}{2}$$

$$\boxed{\alpha = 164,320[mm^3]}$$

2. Volumen unitario flujo de presión (β)[[1]

$$\beta = \frac{m * h_1^3 * \left(\frac{t}{m} - e\right) * \sin \theta * \cos^2 \theta}{12 * L} [mm^3] \quad (47)$$

Donde:

- L : Longitud del husillo [mm]

$$\beta = \frac{m * h_1^3 * \left(\frac{t}{m} - e\right) * \sin \theta * \cos^2 \theta}{12 * L} \quad \text{Reemplazando valores}$$

$$\beta = \frac{1 * 2^3[mm] * \left(\frac{8}{1} - 0,8[mm]\right) * \sin (17,65^\circ) * \cos^2 (17,65^\circ)}{12 * 45,6[mm]}$$

$$\boxed{\beta = 0,0289819[mm^3]}$$

3. Volumen unitario flujo de filtración (γ)[[1]

$$\gamma = \frac{\pi^2 * D^2 * \delta^3 * \tan \theta}{10 * e * L} [mm^3] \quad (48)$$

Donde:

- δ : Holgura del husillo/cilindro [mm]

$$\gamma = \frac{\pi^2 * D^2 * \delta^3 * \tan \theta}{10 * e * L} \quad \text{Reemplazando valores}$$

$$\gamma = \frac{\pi^2 * 8^2[mm] * 0,05^3 * \tan (17,65)}{10 * 0,8[mm] * 45,6[mm]} [mm^3]$$

$$\boxed{\gamma = 0,0000687965[mm^3] \quad \Rightarrow \quad \gamma = 6,87965 * 10^{-6}[mm^3]}$$

Por lo general, el volumen unitario de filtración, 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.

4. Constante total de la forma geométrica del cabezal (K)

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[mm] y 0.4 [mm])

Canal cónico [1]

$$K_1 = \frac{3 * \pi * d_o^3 * d_1^3}{128 * L_{canal} * (d_o^2 + d_o * d_1 + d_1^2)} \quad (49)$$

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, boquilla de 0.4 [mm], $d_o = 16[mm]$ y $d_1 = 0,4[mm]$

$$K_1a = \frac{3 * \pi * 8^3[mm] * 0,4^3[mm]}{128 * 12[mm] * (8^2[mm] + 8 * 0,4[mm] + 0,4^2[mm])}$$

$$K_1a = 0,00298[mm^3]$$

Para el segundo caso, boquilla de 1 [mm], $d_o = 16[mm]$ y $d_1 = 1[mm]$

$$K_1b = \frac{3 * \pi * 8^3[mm] * 1^3[mm]}{128 * 12[mm] * (8^2[mm] + 8 * 1[mm] + 1^2[mm])}$$

$$K_1b = 0,0430[mm^3]$$

Canal cilíndrico [1]

$$K_2 = \frac{\pi * d^4}{128 * L_{canal}} \quad (50)$$

Donde:

- d : Diámetro del canal cilíndrico [mm]

Para el primer caso, $d = 0,4[mm]$

$$K_2a = \frac{\pi * 0,4^4[mm]}{128 * 12[mm]}$$

$$K_2a = 0,000052[mm^3]$$

Para el segundo caso, $d = 1[mm]$

$$K_2a = \frac{\pi * 1^4[mm]}{128 * 12[mm]}$$

$$K_2a = 0,00204[mm^3]$$

La constante común del cabezal [1] se determina como la suma de las resistencias experimentadas en las zonas de trabajo, la cual se presenta a continuación:

$$K = \frac{1}{\sum \frac{1}{K_1} + \sum \frac{1}{K_2} + \dots + \sum \frac{1}{K_i}} \quad (51)$$

$$k_a = \frac{1}{\frac{1}{0,00298[mm^3]} + \frac{1}{0,000052[mm^3]}} \Rightarrow K_a = 0,000051[mm^3]$$

$$k_b = \frac{1}{\frac{1}{0,0430[mm^3]} + \frac{1}{0,00204[mm^3]}} \Rightarrow K_b = 0,00194[mm^3]$$

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 volumétrico y seleccionar el adecuado de acuerdo con las necesidades del cliente. Los resultados se pueden ver en la Tabla 20, Tabla 21, Tabla 22 y Tabla 23. Para obtener el flujo volumétrico en $[Kg/h]$, se hará la conversión necesaria según la densidad del ABS y PLA.

Utilizando la ecuación 45 y los datos de densidad obtenidos de las tablas 5 y 6:

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

Donde:

- ρ : Densidad del material $[Kg/mm^3]$
- ρ_{PLA} : Densidad del material 0,00000125 $[Kg/mm^3]$
- ρ_{PET} : Densidad del material 0,00000138 $[Kg/mm^3]$

Plástico PLA-Boquilla de 0,4 [mm]	
Rpm	Flujo Volumétrico [kg/h]
10	0,000216436
15	0,000324653
20	0,000432871
25	0,000541089
30	0,000649307

Tabla 20: Resultados Flujo Volumétrico Plástico PLA, con una Boquilla de 0.4 [mm] de Diametro.

Plástico PLA-Boquilla de 0,8 [mm]	
Rpm	Flujo Volumétrico [kg/h]
10	0,007730198
15	0,011595298
20	0,015460397
25	0,019325496
30	0,023190595

Tabla 21: Resultados Flujo Volumétrico Plástico PLA, con una Boquilla de 0.8 [mm] de Diametro.

Plástico PET-Boquilla de 0,4 [mm]	
Rpm	Flujo Volumétrico [kg/h]
10	0,000238945
15	0,000358417
20	0,00047789
25	0,000597362
30	0,000716834

Tabla 22: Resultados Flujo Volumétrico Plástico PET, con una Boquilla de 0.4 [mm] de Diametro.

Plástico PET-Boquilla de 0,8 [mm]	
Rpm	Flujo Volumétrico [kg/h]
10	0,008534139
15	0,012801209
20	0,017068278
25	0,021335348
30	0,025602417

Tabla 23: Resultados Flujo Volumétrico Plástico PET, con una Boquilla de 0.8 [mm] de Diametro.

Para entender el caso más crítico, en donde se produce la menor cantidad de flujo de material, debido a la reducción de salida de boquilla. Es por ello que las condiciones mínimas de trabajo para obtener un flujo constante de material las da el PLA, con un diámetro de boquilla de 0.4[mm] a 10 [rpm].

En la siguiente figura 45 se presenta la variación de caudal de acuerdo a las RPM del husillo, variando desde 10 a 30 [RPM] y una producción de 0.00022 a 0.00065 [Kg/h] respectivamente, esto con el foco de que se cumplan los requerimientos y requisitos del equipo del mantener un flujo constante de producción de material plástico fundido.

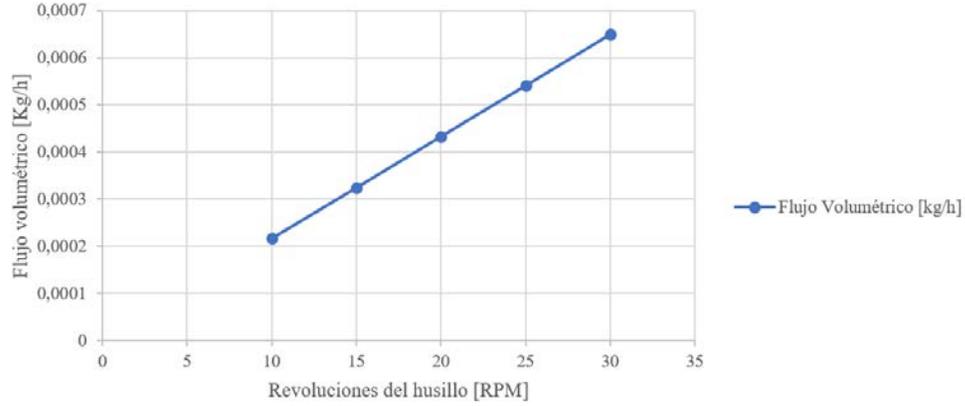


Figura 45: Gráfico de variación de Caudal en Plástico PLA respecto a las RPM, con una Boquilla de 0.4[mm]

Fuente: Elaboración Propia

3.4.1.4 Potencia Requerida

La potencia de accionamiento del husillo es la necesaria para girar el husillo a la velocidad requerida para producir la cantidad deseada de material. Esta dependerá de la potencia necesaria para desplazar el material y la energía consuma por la holgura del cilindro, la cual queda expresada por [1]:

$$N = \left(\frac{\pi^3 * D^3 * n^2}{h_1} \right) * L * \mu + \frac{(\alpha * \Delta P)}{\cos^2(\varphi)} + \left(\frac{\pi^2 * D^2 * n^2 * e}{\delta * \tan(\varphi)} \right) + L * \mu [W] \quad (52)$$

Donde:

- n : 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 [m³]
- ΔP : Diferencias de Presiones en el husillo [Pa]
- φ : Ángulo de hélice[°]
- e : Ancho de filete [m]
- δ : Holgura Husillo/cilindro[m]

El primer paso para obtener la potencia requerida es obtener la el ΔP (delta presión), este se desarrolla en el punto anterior, y posteriormente se reemplazan los valores en al ecuación 52.

$$N = \left(\frac{\pi^3 * 0,008[m]^3 * 0,166[rev/s]^2}{0,002[m]} \right) * 0,0456[m] * 2850[Pa * s] + \frac{(1,65 * 10^{-7}[m^3] * 1,728 * 10^6[Pa])}{\cos^2(17,65)} + \left(\frac{\pi^2 * 0,008[m]^2 * 0,166[rev/s]^2 * 0,0008[m]}{5 * 10^{-6}[m] * \tan(17,65)} \right) + 0,0456[m] * 2850[Pa * s] \quad [W]$$

$$N = 202,33[W] \rightarrow 0,20233[KW]$$

3.4.1.5 Presiones en la Máquina Extrusora

La presión en la maquina 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 acabo del material, la cual debe ser considerada para el diseño del sistema extrusor presente en la tesis.

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

$$P_{MAX} = \frac{6 * \pi * D * L * n * \mu}{h^2 * \tan(\varphi)} \quad (53)$$

Donde:

- D : Diámetro del husillo [m]
- L : Longitud del husillo [m]
- n : Revoluciones del husillo [rev/s]
- μ : Viscosidad efectiva del material [$Pa * s$]
- h : Profundidad del canal en la zona de compresión [m]
- φ : Ángulo de hélice [$^\circ$]

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:

$$\gamma = \frac{\pi * D * N}{h} \quad (54)$$

Donde:

- D : Diámetro del husillo [mm]
- N : Revoluciones del husillo [rev/s]
- h : Distancia entre el filete del husillo y el barril [mm]

Reemplazando valores, donde $10[Rpm] = 0.166 [Rev/s]$ se obtiene lo siguiente

$$\gamma = \frac{\pi * 8[mm] * 0,166[Rev/s]}{0,05[mm]}$$

$$\gamma = 83,44[1/s]$$

De acuerdo a la velocidad de cortadura, se debe obtener la viscosidad efectiva de cada material a trabajar (PET y PLA) [40]. Por tanto, se utilizará la viscosidad efectiva de mayor magnitud para obtener la presión máxima que llegar a trabajar la extrusora. Para el caso del PLA y PET, la temperatura de trabajo sera de 160 a 230 [$^\circ C$], por lo que la viscosidad efectiva se evaluará en el promedio de la temperatura de trabajo aproximadamente a 190 [$^\circ C$]. Mediante el gráfico de la Figura 46, se genera la tabla 24.

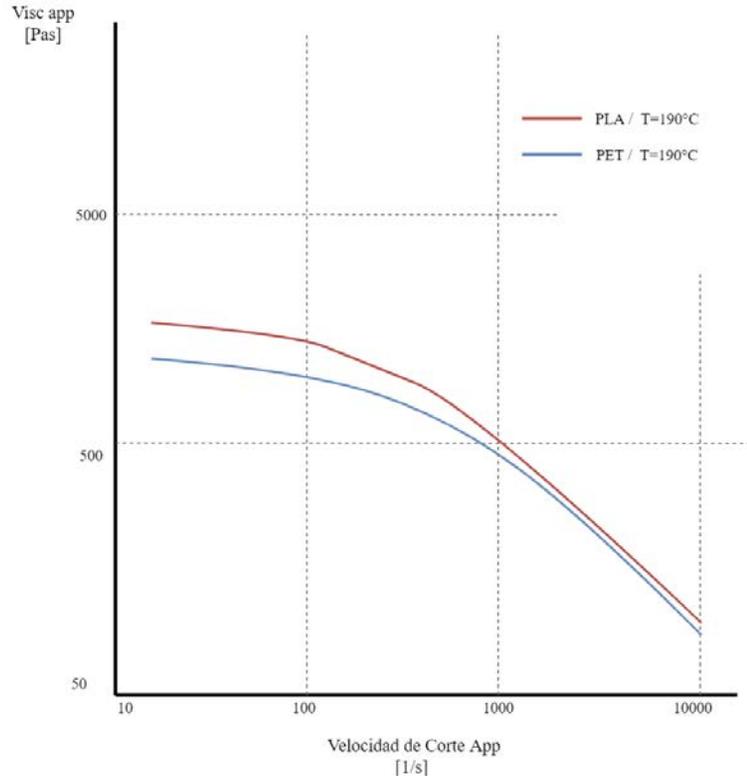


Figura 46: Gráfico de Viscosidad Aparente en Función de la Velocidad de Corte en el PET y PLA a 190°C

Effect of Extrusion on the Mechanical and Rheological Properties.

Material	Velocidad de Corte [1/s]	Viscosidad Aparente [Pa * s]
PLA	83,44	1800
PET	83,44	1650

Tabla 24: Viscosidad Aparente del PLA y PET a 190°

Por tanto, la viscosidad efectiva de mayor valor y que presenta la presión máxima de trabajo, será la del material PLA = 1800 [Pas], con este valor podemos determinar la presión máxima que se genera en el husillo, utilizando la ecuación 53.

$$P_{MAX} = \frac{6 * \pi * D * L * n * \mu}{h^2 * \tan(\varphi)} \quad \text{Reemplazando Valores}$$

$$P_{MAX} = \frac{6 * \pi * 0,008[m] * 0,0456[m] * 0,166[rev/s] * 1800[Pa \cdot s]}{0,001^2[m] * \tan(17,65)}$$

$$P_{MAX} = 6,584 * 10^6 [Pa] \quad \Rightarrow \quad P_{MAX} = 6,584 [MPa]$$

Para determinar la Presión mínima de trabajo se utiliza la misma ecuación reemplazando las revoluciones del motor a la máxima utilizada en trabajo.

$$P_{MIN} = \frac{6 * \pi * D * L * n * \mu}{h^2 * \tan(\varphi)} \quad \text{Reemplazando Valores}$$

$$P_{MIN} = \frac{6 * \pi * 0,008[m] * 0,0456[m] * 0,5[rev/s] * 1800[Pa \cdot s]}{0,001^2[m] * \tan(17,65)}$$

$$P_{MIN} = 4,856 * 10^6 [Pa] \quad \Rightarrow \quad P_{MIN} = 4,856 [MPa]$$

3.4.1.6 Presión de Operación en la Boquilla

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 cortadura por medio de diagramas, que se 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 Cilíndro [1]

$$V_c = \frac{32 * Q}{\pi * d^3} \quad (55)$$

Donde:

V_c : Velocidad de cortadura [1/s]
 d : Diámetro de canal boquilla[mm]
 Q : Flujo Volumétrico[mm³/s]

para el primer caso, $d = 0,4[mm]$ y $Q = 0,00021[kg/h] = 0,06[mm^3/s]$

$$V_{0,4} = \frac{32 * 0,06[mm^3/s]}{\pi * 0,4[mm]^3}$$

$$V_{0,4} = 9,55[1/s]$$

para el segundo caso, $d = 0,8[mm]$ y $Q = 0,00078[kg/h] = 0,22[mm^3/s]$

$$V_{0,8} = \frac{32 * 0,22[mm^3/s]}{\pi * 0,8^3}$$

$$V_{0,8} = 4,38[1/s]$$

Como se observa, existen dos velocidades de cortadura de acuerdo a la boquilla que se utilizará, por lo que se obtendrán dos viscosidades por cada material a trabajar (PLA y PET). 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 el gráfico de la figura 46, se genera la siguiente tabla 25 para determinar la viscosidad efectiva dentro de la boquilla:

Viscosidad Efectiva PLA a 190°C	
Velocidad Cortadura	Viscosidad Efectiva
9,55	2700
4,38	2850

Tabla 25: Viscosidad Efectiva PLA a 190°C
 Elaboración Propia.

Como se observa en la gráfico de comparación de velocidad de corte y viscosidad efectiva, figura 46, el PLA representa una viscosidad efectiva mayor, y por ende la que presenta una presión de trabajo máxima de aproximadamente unos 2850 [Pa * s] según tabla 25.

La presión de trabajo en la boquilla se determina según la ecuación [1]:

$$P_{OP} = \frac{2 * \pi * \mu * D^2 * \eta * h * \sin \varphi * \cos \varphi}{\left(\frac{R^4}{2 * L_{boquilla}} \right) + \left(\frac{D * h^3 * \sin^2 \varphi}{2 * L_p} \right)} \quad (56)$$

Donde: Reemplazando valores:

D :	Diámetro del husillo [m]
η :	Revoluciones del husillo[rev/s]
μ :	Viscosidad efectiva[Pa * s]
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]

$$P_{OP} = \frac{2 * \pi * 2850[Pa * s] * 0,008[m]^2 * \frac{10}{60}[rev/s] * 0,001[m] * \sin 17,65^\circ * \cos 17,65^\circ}{\left(\frac{0,0009[m]^4}{2 * 0,015[m]} \right) + \left(\frac{0,008[m] * 0,001m^3 * \sin^2 17,65}{2 * 0,016[m]} \right)}$$

$$P_{OP} = 1230463,96[Pa]$$

$$P_{OP} = 1,31[MPa]$$

3.4.1.7 Fuerzas en el Husillo (Comprobación)

De acuerdo a las dimensiones previamente asignadas al husillo, es necesario comprobar y determinar los esfuerzos admisibles.

Como se observa en la figura 43 las tensiones al interior se generar principalmente por una fuerza axial, debido a la presión del material y al momento de giro al encontrarse con el material plástico en el interior.

$$M_t = 9550 * \frac{N}{\eta} \quad (57)$$

Donde:

M_t :	Monto torsor [Nm]
N :	Potencia Motor (requerida) [Kw]
η :	Revoluciones del husillo[RPM]

Reemplazando valores se obtiene

$$M_t = 9550 * \frac{0,20233[KW]}{30[rpm]}$$

$$M_t = 64,41[Nm]$$

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 cuál será la presión máxima de trabajo en este, de acuerdo a la formula [1]:

$$F = S * p \quad (58)$$

Donde:

S :	Sección transversal del husillo[m ³]
p :	Presión en la parte delantera del husillo [N/m ²]

Para determinar la sección transversal S , se utilizara la siguiente ecuación:

$$S = \pi * \frac{D^2 (1 - \mu^2)}{4} \quad (59)$$

Donde:

μ : Relación entre los diámetros del husillo[-]

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{3,5[mm]}{8[mm]} \\ \mu &= 0,4[-] \end{aligned} \quad (60)$$

Por tanto la sección transversal:

$$\begin{aligned} S &= \pi * \frac{0,008[m]^2 (1 - 0,4^2)}{4} \\ S &= 0,0000422230[m^2] \end{aligned}$$

Y en tanto quedando la fuerza axial como:

$$\begin{aligned} F &= 0,0000422230[m^2] * 6,584 * 10^6[Pa] \\ F &= 277,996232[N] \rightarrow 0,27799[KN] \end{aligned}$$

Otro factor el cual se debe tener en cuenta, es el esfuerzo de corte sobre la superficie del husillo, este valor esta dado por la siguiente ecuación [1]:

$$\tau = \frac{M_t}{W_p} \quad (61)$$

Donde:

M_t : Momento torsor[Nm]
 W_p : Momento de inercia polar [m^3]

Para obtener el momento de inercia polar, se utilizara la siguiente ecuación:

$$W_p = \frac{\pi * D^3}{16} * (1 - \mu^4) \quad (62)$$

Reemplazando valores se obtiene:

$$\begin{aligned} W_p &= \frac{\pi * 0,008[m]^3}{16} * (1 - 0,4^4) \\ W_p &= 1,004 * 10^{-7}[m^3] \end{aligned}$$

De tal forma que se obtiene el esfuerzo cortante como:

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{64,41[Nm]}{1,004 * 10^{-7}[m^3]} \\ \tau &= 64133763,854[Pa] \rightarrow 64,14[Mpa] \end{aligned}$$

Las tensiones normales en el husillo serán provocadas por la fuerza axial F y una pequeña carga, que en este caso será despreciable, debido al peso del husillo. Además de un esfuerzo debido a la F reflejado como pandeo. Para determinar el valor de este esfuerzo normal se emplea la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (63)$$

Donde:

F : Fuerza axial [N]
 S : Sección transversal del husillo [m^2]

Por tanto, el esfuerzo máximo en tensión será:

$$\sigma = \frac{277,99[N]}{0,0000422230[m^2]}$$

$$\sigma = 6,583852,402[Pa] \rightarrow \sigma = 6,58[Mpa]$$

Aplicando esfuerzos equivalentes para una combinación de cargas (Von Mises), entre un esfuerzo normal y un cortante, debido a trabajo realizado por el husillo y la interacción con el material. Para ello se utiliza la siguiente fórmula:

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \quad (64)$$

Donde:

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

$$\sigma_r = \sqrt{6,58[MPa]^2 + 4 * 64,14[MPa]^2}$$

$$\sigma_r = 88,7552[Mpa]$$

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 utilizado, AISI 316, cuyo valor de tensión admisible es de 420[Mpa] (véase tabla 26).

Para ello, la tensión resultante debe ser menor a la admisible por el material.

$$\sigma_r \leq \sigma_{adm}$$

$$88,8[Mpa] \leq 420[Mpa]$$

Obteniendo un factor de seguridad de aproximadamente:

$$F.S = 4,8[-]$$

3.4.1.8 Selección Material Husillo.

El husillo es el corazón del equipo extrusor. Todo se resuelve alrededor del husillo. La rotación causa el transporte del material, el cual contribuye al calentamiento del polímero 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. [41].

La selección del material se hizo basado en diferentes parámetros:

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

Debido a ello, se eligió un acero AISI 316, 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 requieran alta resistencia mecánica. Por sus características, responde a las temperaturas de trabajo presentes en la extrusora, sin perder sus propiedades. A continuación se presenta una tabla con las propiedades mecánicas y térmicas del material elegido.

Propiedades AISI - 316	
Propiedad Mecánicas a 23°C	Valor
Resistencia a la Tracción	670[MPa]
Límite Elástico	420[MPa]
Módulo Elástico	193[GPa]
Dureza, Brinell	197
Propiedad Termicas	Valor
Conductividad Térmica (a 100 °C)	16,2[W/mK]
Coefficiente de Expansión Térmica (0 a 100°C)	15,9 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$

Tabla 26: Propiedades Mecánicas y Térmicas AISI 316
<http://www.goodfellow.com/S/Acero-Inoxidable-AISI-316.html>

3.4.1.9 Geometría del 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 27 de resumen. En la figura 47 se muestra el modelo 3D realizado en el software Autodesk Inventor.

Husillo Sistema Extrusor Modular		
Descripción	Valor	Unidad
Diámetro	8	mm
Diámetro Alma	3,5	mm
Diámetro Vástago	8	mm
Longitud Total	85,6	mm
Longitud de Trabajo	45,6	mm
Longitud de Vástago	40	mm
Nº de canales	1	-
Nº de Filetes	6	-
Paso	8	mm
Anchura de Filete	0,8	mm
Largo Zona Alimentación	18,4	mm
Largo Zona transición	11,2	mm
Largo Zona compresión	16	mm
Profundidad Zona Alimentación	2,1	mm
Profundidad Zona Dosificación	1	mm

Tabla 27: Resumen Geometría Husillo.
Elaboración Propia.



Figura 47: Modelo 3D Geometría Husillo
Elaboración Propia, Software Autodesk Inventor.

Según la geometría descrita, envía materia (barra redonda de 10[mm] x 1000 [mm] de largo) a mecanizar tomando como referencia plano de fabricación adjuntos al final del documento. A continuación el la figura 48 se presenta una imagen del husillo me fabricado.



Figura 48: Husillo Fabricado
Elaboración Propia, Maestranza Hermano Osorio Quillota.

3.4.2. Motor Sistema Extrusor Modular.

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

El motor seleccionado es un motor paso a paso NEMA 17 modelo 17HS4401 1.7A, Véase figura 49



Figura 49: Motor Paso a Paso NEMA 17, Modelo 17HS4401

Fuente Afel: <https://afel.cl/producto/motor-paso-a-paso-nema-17-modelo-17hs4401-1-7a/>

En la siguiente tabla 28 se pueden observar algunas características importantes del motor.

NEMA 17 - 17HS4401		
Características	Valor	Unidad
Motor paso a paso yipo Bi polar	-	-
Montaje Estandar Nema 17	-	-
Corriente	17	A
Voltaje de Operación	12	V
Torque	0,43	Nm
Ángulo de paso	1,8	Grados
Paso por vuelta	200	-
Resistencia por face	1,5	ohms
Inductancia por fase	2,8	mH
Diametro de eje	5	mm
Largo eje	20	-

Tabla 28: Características Importantes Motor NEMA 17

Fuente: <https://www.geekfactory.mx/tienda/motores-y-controladores/motor-a-pasos-nema-17-17hs4401/>

Para más detalle véase ANEXO 1 datasheet del producto.

3.4.3. Reductor 5,18:1 Sistema Extrusor Modular.

Como se observa en el punto anterior, y a la vez según el desarrollo del capítulo, lo necesario para el correcto funcionamiento del sistema extrusor, es el torque constante, a baja velocidad, que debe transmitir el motor.

Si cruzamos los datos obtenidos en el punto de “Potencia Requerida”, y los datos de la tabla 28, se observa lo cercano que esta la fuerza de torque en la máxima permitida por el motor (según el fabricante), por ello, y para asegurar el funcionamiento estable del sistema se utilizara un reductor de velocidad 5:1, buscando así aumentar el torque transmitido por el motor al husillo.



Figura 50: Caja de Reductor Planetario Relación 5.18:1, Motor Paso a Paso NEMA17
Fuente Afel: <https://es.banggood.com/17HS4401S-PG518-4-lead-Nema17-Extruder-Gear-Ratio-5181-Stepper-Motor-For-3D-Printer-CNC-Part-p-1363190.html?rmmds=buycurwarehouse=CN>

En la siguiente Tabla 29 se observa la considerable mejora en torque que el reductor aporta a la estabilidad del sistema.

NEMA 17 - 17HS4401		
Características	Valor	Unidad
Modelo	PG518	-
Tipo de caja de cambios	Planetario	-
Relación de engranajes	5+2/11	-
Eficiencia	90	%
Contragolpe sin carga	1	Grados
Par máximo adm	2	Nm
Par permitido	4	Nm
Carga axial máxima	50	N
Carga radial máxima	100	N

Tabla 29: Reductor 5.18:1 Modelo PG518
Fuente: <https://es.banggood.com/17HS4401S-PG518-4-lead-Nema17-Extruder-Gear-Ratio-5181-Stepper-Motor-For-3D-Printer-CNC-Part-p-1363190.html?rmmds=buycurarehouse=CN>

Para más detalle véase ANEXO 2 datasheet del producto.

3.4.4. Diseño Sistema Hot-End (Cilindro)

Para el diseño del componente Hot-End, se debe tener en consideración una serie de factores, entre ellos: la holgura entre el filete helicoidal y el barril, y el diámetro del husillo.

3.4.4.1 Dimensionamiento del Cilindro. [1]

Primero se calcula el diámetro interno del cilindro:

$$D_i = D + 2 * \delta \quad (65)$$

Donde:

D_i : Diámetro interno cilindro[mm]
 D : Diámetro del husillo[mm]
 δ : Holgura[mm]

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

$$D_i = 8[mm] + 2 * 0,05[mm]$$

$$D_i = 8,1[mm]$$

La longitud del cilindro debe cubrir gran parte de la zona de trabajo del husillo, dejando espacio para el ingreso del material, que por gravedad y arrastre del hilo sin fin, será trasladado(aplicando temperatura) y forzado a salir por la boquilla ella.

Se estima un largo máximo para cilindro de 40[mm], ya que la zona de trabajo del husillo es de 45.6[mm].

3.4.4.2 Espesor Mínimo que Debe Tener el Cilindro.

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 Bronce SAE 620 (detallado en el punto siguiente), con un esfuerzo admisible de de 124,55 [MPa].

Para estimar el espesor mínimo se utilizara la siguiente ecuación:

$$e_{min} = \frac{F.S * P * r}{\sigma_{adm}} \quad (66)$$

Donde:

e_{min} : Espesor mínimo[mm]
 FS : Factor de Seguridad [-]
 P : Presión máxima de trabajo[Mpa]
 r : Radio interior del cilindro[mm]
 σ_{adm} : Esfuerzo admisible del material[mm]

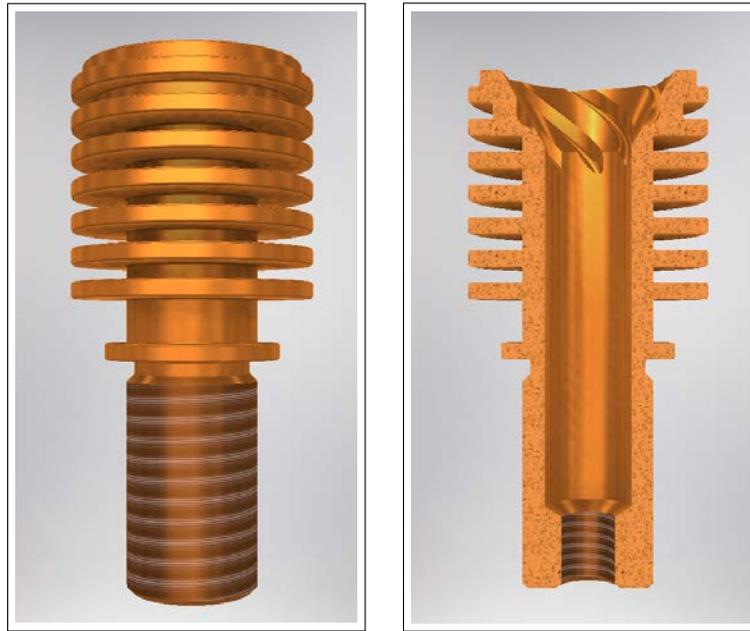
$$e_{min} = \frac{9 * 6,45[MPa] * 4,05[mm]}{124,55[MPa]} \quad (67)$$

$$e_{min} = 1,8[mm] \quad (68)$$

3.4.4.3 Geometría Cilindro

Se entiende que el espesor mínimo para soportar la presión de trabajo máxima debe ser de 2[mm]. Adicionalmente se considera dentro del cilindro membranas disipadoras de temperatura, que permiten disipar la temperatura de puntos no deseados, y considera hilo M12 macho para bloque calefactor y termostato.

A continuación en la figura 51a y la figura 51b se muestra diseño 3D del cilindro para sistema extrusor modular.



(a) Vista General Geometría Cilindro

(b) Vista en Corte Geometría Cilindro

Figura 51: Modelo 3D Cilindro Sistema Extrusor
Elaboración Propia, Autodesk Inventor

3.4.4.4 Selección Material Cilindro.

El cilindro es el componente que transfiere el calor a través de la resistencia (calefactor) hacia el material en el 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 250 [°C] y lo suficientemente resistente al desgaste y a la corrosión, debido al constante trabajo. [1].

La selección del material se hizo basado en diferentes parámetros:

- Temperatura de trabajo.
- Disponibilidad y fabricación.
- Resistencia al desgaste y corrosión.
- Precio

Debido a ello, se eligió un bronce SAE 620, el cual ofrece las consideraciones anteriores. El bronce seleccionado posee un buen comportamiento y resisten a la corrosión con buena resistencia al desgaste por fricción. Por sus características, responde a las temperaturas de trabajo presente en la extrusión, sin perder propiedades. Es un material fácil de adquisición y con buena maquinabilidad. En la siguiente tabla 30 se pueden encontrar las principales propiedades mecánicas.

Propiedades SAE - 620	
Propiedad Mecánicas a 23°C	Valor
Resistencia a la Tracción	275 [MPa]
Punto de Fluencia	125 [MPa]
Elongación	20 [%]
Dureza típica	70 [HB]
Conductividad Térmica a 20 [°C]	43.2 [BTU/hr * Ft ²]
Coefficiente de Expansión Térmica 20 a 68 [°C]	12 [10 ⁻⁶ in]
Temperatura máxima de operación	250 [°C]

Tabla 30: Propiedades Mecánicas SAE 640
<http://www.metalurgicavulcano.com/uploads/ve-903--sae-620-1487716448.pdf>

Según la geometría descrita, se escogió una barra de SAE 620 del proveedor acerosval, con un diámetro de 1 1/2 [in] por 1[m] de largo para mandar a maestranza “Hermanos Osorios, Quillota” para el mecanizado del componente. A continuación, en la figura 52 podemos ver la pieza terminada.



Figura 52: Pieza Mecanizada Cilindro
 Elaboración Propia: Maestranza Osorio Quillota

3.4.5. Diseño Tolva (Alimentación Pellet)

Se diseñó una Tolva con una forma de conducto rectangular, que permita guiar el material pelletizado al interior del cilindro. Esta va fijada a la parte inferior del sistema extrusor mediante vástagos de bronce y pernos de acero inoxidable.

3.4.5.1 Dimensionamiento Tolva.

Su base será de 30[mm] x 30[mm] con una altura aproximada de 35[mm]. Como el diseño de la tolva solo pretende guiar el material hacia el cilindro, y no mantener una reserva de material para un determinado tiempo.

Para determinar el volumen aproximado de la tolva se utilizara la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} V_{tolva} &= (a * b * h) * 60 \% & (69) \\ V_{tolva} &= (30[mm] * 30[mm] * 35[mm]) * 60 \% \\ V_{tolva} &= 18900[mm^3] \end{aligned}$$

Asumiendo las dimensiones máxima de un pellet plástico, que se pueda encontrar el mercado o puede ser generado por medio de un triturador artesanal de material (para reutilizar materiales cotidianos). Aproximadamente el diametro de un pellet en el mercado es de 3[mm].

$$\begin{aligned} V_{pellet} &= \frac{4}{3} * \pi * r^3 & (70) \\ V_{pellet} &= \frac{4}{3} * \pi * 1,5[mm]^3 \\ V_{pellet} &= 14,13[mm]^3 \end{aligned}$$

La tolva será capaz de contener aproximadamente:

$$\begin{aligned} Pellets \text{ en tolva} &= \frac{V_{tolva}}{V_{pellets}} & (71) \\ Pellets \text{ en tolva} &= \frac{18900[m]^3}{2,095[m]^3} \\ Pellets \text{ en tolva} &= 1337 \end{aligned}$$

El peso del material en su interior estará dado por la siguiente ecuación.

$$Peso_{material} = \rho * V_{pellet} \quad (72)$$

Donde:

ρ : Densidad del material[kg/mm³]
 $V_{pellets}$: Volumen de pellet unitario [mm³/kg]

Por tanto, se reemplazará el valor de densidad correspondiente a cada material a trabajar, PLA y PET:

$$\begin{aligned} Peso_{PLA} &= 0,00000127[kg/mm]^3 * 14,13[mm]^3 \\ Peso_{PLA} &= 0,000018[Kg] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Peso_{PET} &= 0,00000138[kg/mm]^3 * 14,13[mm]^3 \\ Peso_{PET} &= 0,00002[Kg] \end{aligned}$$

Se puede determinar la cantidad de material [kg] necesario para llenar la tolva y posteriormente determinar la autonomía del sistema extrusor.

$$Cantidad\ de\ material_{LlenarTolva} = Peso_{material} * Pellets_{Tolva} \quad (73)$$

$$Cantidad\ de\ material_{PLA} = 0,000018[Kg] * 1337$$

$$Cantidad\ de\ material_{PLA} = 0,025[Kg]$$

$$Cantidad\ de\ material_{PET} = 0,00002[Kg] * 1337$$

$$Cantidad\ de\ material_{PET} = 0,027[Kg]$$

3.4.5.2 Autonomía Tolva al Sistema Extrusor.

La autonomía de operación con la tolva llena dependerá del flujo másico a procesar, por tanto, tiene relación con el diametro de la boquilla a utilizar.

$$Autonoma_{DimetroBoquilla} = \frac{V_{Tolva}}{Q_{masico-DimetroBoquilla}} \quad (74)$$

Donde:

$Q_{masico-dimetroboquilla}$: Flujo volumétrico de acuerdo a la boquilla[mm^3/min]

Por tanto:

$$Autonomia_{0,4} = \frac{18900[mm^3]}{108,4[mm^3/min]}$$

$$Autonomia_{0,4} = 174,5[min]$$

$$Autonomia_{0,8} = \frac{18900[mm^3]}{108,4[mm^3/min]}$$

$$Autonomia_{0,8} = 45,36[min]$$

3.4.5.3 Selección del Material

La tolva es la que alimenta de pellets al 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 PLA, para ser impreso en una impresora 3D convencional, esto aporta a la flexibilidad del sistema y disminución de costo, cumpliendo con los criterios de peso, forma, apertura y conexión.

3.4.5.4 Geometría de la Tolva.

A partir de lo anterior se presenta en la figura 53 un modelo 3D de la tolva, este diseño fue elaborado en el software Inventor de Autodesk.



Figura 53: Diseño de Tolva
Elaboración Propia: Modelo 3D Autodesk inventor

Como se observa en la figura 53 la pieza esta general de la tolva esta compuesta por 3 partes, véase la figura 54, la primera es el cuerpo principal de la tolva 54a, la segunda es la parte superior, por donde ingresa el material plástico pelletizado 54b y la tercera es la parte inferior la cual soporta el ventilador para la refrigeración por aire forzado del sistema Hot-End en el extrusor 54c.



(a) Cuerpo Principal



(b) Parte Superior



(c) Parte inferior

Figura 54: Despiece de Tolva Para Sistema Extrusor Modular.
Elaboración Propia, Autodesk Inventor

Es importante volver a destacar, que el proceso de fabricación de estas piezas será mediante impresión 3D, por lo que no se requiere un plano de fabricación, si no un formato de “open-source”⁴⁰

Para este caso el formato será un archivo STEP, el cual puede ser ejecutado un cualquier software de programación para impresión como Ultimaker Cura⁴¹

⁴⁰The Open Source Definition (La Definición de Código Abierto) es un documento publicado por Open Source Initiative (OSI, Iniciativa para el Código Abierto en español), para determinar si la licencia de un software puede ser etiquetado con la marca certificada de software de código abierto.

⁴¹Es una aplicación diseñada para impresoras 3D, en la que se pueden modificar los parámetros de impresión y después transformarlos a código G. Fue creada por David Braan, que después de un tiempo trabajaría para Ultimaker, una empresa dedicada al diseño y fabricación de impresoras 3D.

3.4.6. Diseño Estructural.

La estructura del sistema extrusor para FDM a partir de pellets, se diseño pensando en la modularidad del equipo, versatilidad en el cambio de piezas y/o upgrade⁴² de estas mismas. Se utilizaron materiales fáciles de reutilizar o volver a incorporar al mercado.

El diseño estructural permite la unión de todas las piezas que componen este sistema extrusor y a la vez, brinda estabilidad, resistencia y seguridad al usuario resguardado componentes críticos y alejando de estos la manipulación directa, como por ejemplo el sistema del Sin-Fin del contacto directo con la mano del usuario

3.4.6.1 Selección de Materiales para la Construcción de la Estructura.

La estructura al ser el elemento que el cual unificara los sistemas en el sistema extrusor, estara sometido a importantes cargas y temperaturas de funcionamiento del equipo. Por ende la selección de los materiales que lo componen, se hizo basado en los siguientes parámetros:

- Temperaturas de trabajo.
- Maquinabilidad.
- Resistencia a cargas.
- Precio y disponibilidad.

Debido a lo anterior se utilizara una plancha de aluminio 6061 de 2[mm] de espesor para componentes estructurales enfocados a la unión entre sistema motriz y sistemas Hot-End y bronce SAE 620 hexagonal de 6[mm] como vástagos de estabilidad y resistencia del equipo. A continuación en la tabla 31 y 32 se muestran un resumen de propiedades de cada material respectivamente.

Propiedades A6061	
Propiedad Mecánicas a 23°C	Valor
Resistencia a la Tracción	241[MPa]
Punto de Fluencia	145[MPa]
Elongación	12[%]
Conductividad Térmica a 20 [°C]	151[W/m * k]
Coefficiente de Expansión Térmica 20 a 68[°C]	2.32[10 ⁻⁵ k ⁻¹]

Tabla 31: Propiedades Mecánicas A6061
<https://www.gabrian.com/es/aluminio-6061-conozca-sus-propiedades-y-usos/>

Propiedades SAE - 620	
Propiedad Mecánicas a 23°C	Valor
Resistencia a la Tracción	275[MPa]
Punto de Fluencia	125[MPa]
Elongación	20[%]
Dureza típica	70[HB]
Conductividad Térmica a 20 [°C]	43.2[BTU/hr * Ft ²]
Coefficiente de Expansión Térmica 20 a 68[°C]	12[10 ⁻⁶ in]
Temperatura máxima de operación	250[°C]

Tabla 32: Propiedades Mecánicas SAE 640
<http://www.metalurgicavulcano.com/uploads/ve-903--sae-620-1487716448.pdf>

⁴²Upgrade es sinónimo de actualización, mejoramiento, amplificación, modernización

3.4.6.2 Geometría Estructura

A continuación en la figura 55 se muestra la estructura interna del sistema, el software utilizado es el Autodesk Inventor



Figura 55: Diseño de Estructura Sistema Extrusor.
Elaboración Propia: Modela 3D Autodesk inventor



Figura 56: Ensamble Sistema Estructura con Componente Hot-End y Motor
Elaboración Propia: Modela 3D Autodesk inventor

En la Figura 56 se puede observar como el diseño de la estructura permite estabilidad y comunicación con el sistema motriz, que en este caso es el motor NEMA 17 y el componente Cilindro que permite elevar la temperatura del material.

3.4.7. Boquilla

Para la elección de la boquilla y como se ha considerado en los puntos anteriores de ingeniería de detalle, se determinó un diámetro de trabajo del extrusor de 0.4 y 0.8 [mm]. Estas boquillas serán adquiridas en el mercado nacional, ya que son universales para las impresoras 3D y se pueden encontrar con facilidad en el mercado nacional. véase figura 57



Figura 57: Boquilla Utilizada en el Sistema Extrusor.
Fuente: Boquilla Impresora 3D, PC FACTORY

3.4.8. Sistema de Calefacción.

El sistema de calefacción del extrusor estará a cargo de un calefactor o resistencia eléctrica tipo cilindro. Esta resistencia será ubicada en el sistema mediante un bloque calefactor, el cual será el encargado de transmitir el calor al interior del cilindro extrusor.

En la siguiente figura 58 se puede observar el bloque encargado de transmitir esta energía al interior del husillo..



(a) Resistencia Eléctrica (Heater)



(b) Ensamble del Sistema Hot-End

Figura 58: Componentes del sistema Hot-End
Elaboración Propia, Autodesk Inventor

De acuerdo a lo anterior podemos observar en la figura 58b que la resistencia será insertada en la perforación en la parte posterior del bloque, de forma paralela a la boquilla, con ello se busca tener una mejor disipación de la temperatura en el cilindro del material.

3.4.8.1 Dimensionamiento.

Para el diseño, se hizo un supuesto que el flujo de calor es unidimensional, con un régimen estacionario sin aislamiento.

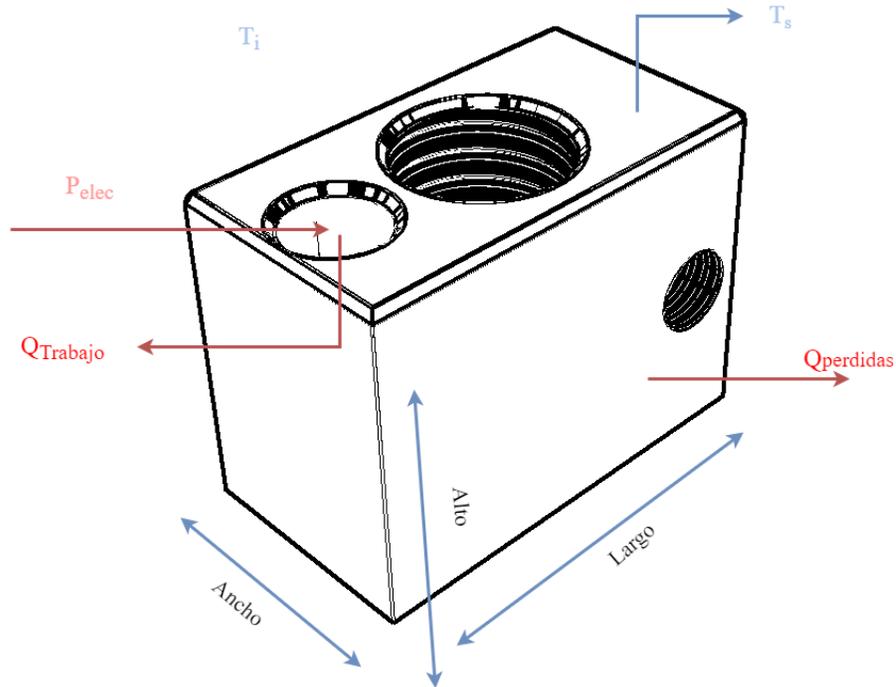


Figura 59: Modelo Simplificado del Bloque y el Sistema Calefactor.
Elaboración Propia

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

$$Q_1 = Q_2 \quad (75)$$

$$V_1 * A_1 = V_2 * A_2$$

Donde:

- Q_1 : Caudal boquilla [m^3/s]
- Q_2 : Caudal cilindro [m^3/s]
- A_1 : Área de la sección transversal de la boquilla [mm^2]
- V_1 : Velocidad de flujo en la boquilla [m/s]
- A_2 : Área de la sección transversal de la cilindro [mm^2]
- V_2 : Velocidad de flujo en la cilindro [m/s]

Q_1 para la boquilla de 0.4[mm] y 0.8[mm] se obtuvo en el punto anterior en el desarrollo del husillo, por ende es solo reemplazar y obtener la velocidad en el cilindro dependiendo de cada boquilla.

$$V_{0,4} = \frac{Q_1[m^2/s]}{A_2[m^2]}$$

$$V_{0,4} = \frac{6 * 10^{-11}[m^2/s]}{0,004^2 * \pi[m^2]}$$

$$V_{0,4} = 1,2 * 10^{-6}[m/s]$$

$$V_{0,8} = \frac{2,2 * 10^{-10} [m^2/s]}{0,004^2 * \pi [m^2]}$$

$$V_{0,8} = 4,4 * 10^{-6} [m/s]$$

Usando la velocidad dentro del cilindro para ambas boquillas, se determina el flujo másico de cada material dentro del cilindro, utilizando la siguiente ecuación [42]:

$$m = \rho * A_{cilindro} * V_{cilindro} \tag{76}$$

Donde:

- ρ : Densidad del Material [kg/m^3]
- $A_{cilindro}$: Área de la sección transversal del cilindro [m^2]
- $V_{cilindro}$: Velocidad del flujo en el cilindro [m/s]

Reemplazando Valores, se puede observar los resultados en la siguiente tabla 33:

variable	Boquilla	Descripción	Valor	Unidad
m_{PET}	0,4	Flujo másico de PET en cilindro con boquilla de 0,4[mm]	$2,09 * 10^{-10}$	kg/s
m_{PET}	0,8	Flujo másico de PET en cilindro con boquilla de 0,8[mm]	$8,33 * 10^{-10}$	kg/s
m_{PLA}	0,4	Flujo másico de PLA en cilindro con boquilla de 0,4[mm]	$1,8 * 10^{-10}$	kg/s
m_{PLA}	0,8	Flujo másico de PLA en cilindro con boquilla de 0,8[mm]	$7,48 * 10^{-10}$	kg/s

Tabla 33: Resultados de Flujo Másico en el Cilindro con Diferentes Boquillas y Materiales.
Elaboración Propia

En la siguiente figura 60 se representa esquemáticamente el modelo a desarrollar. Como se puede observar, 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).

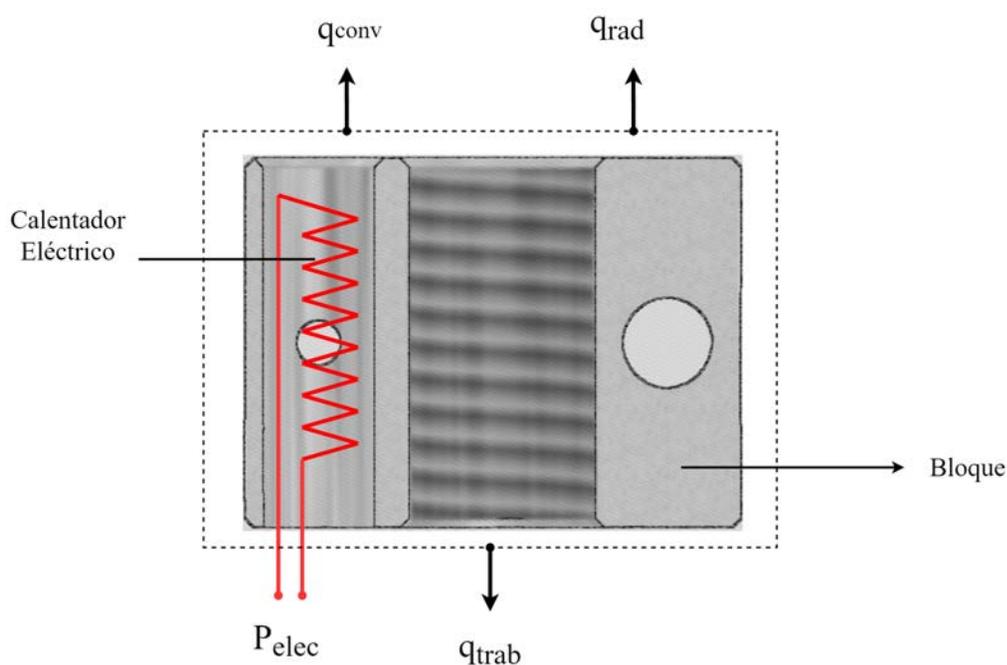


Figura 60: Esquema de Sistema de Calefacción.
Elaboración Propia

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

$$q_{elec} = q_{trabajo} + (q_{conv} + q_{rad}) \quad (77)$$

$$q_{elec} = q_{trabajo} + q_{perdidas}$$

Donde:

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

3.4.8.2 Potencia Requerida por el Sistema de Calefacción

Para calcular la potencia de trabajo es necesario conocer las temperaturas de trabajo: como hay dos materiales, la temperatura de trabajo del PLA es 190°C y para el PET será 160°C, ambos desde la temperatura ambiente 20°C. Cabe destacar que los polímeros trabajos son amorfos, por tanto, no presentan una zona de calor latente para el cambio de fase. Con estos datos, se utiliza la siguiente ecuación para calcular el calor de trabajo [42]:

$$q_{trabajo} = m * C_p * (T_m - T_i) \quad (78)$$

Donde:

- n : Flujo másico de material [kg/s]
- C_p : Calor específico del material [J/Kg°C]
- T_m : Temperatura de mezcla [°C]
- T_i : Temperatura ambiente [°C]

Por tanto, la potencia necesaria para llevar la mezcla o el material a la temperatura de trabajo será:

variable	Boquilla	Descripción	Valor	Unidad
qt_{PET}	0,4	Calor de trabajo de PET en cilindro con boquilla de 0,4[mm]	0.00003	W
qt_{PET}	0,8	Calor de trabajo de PET en cilindro con boquilla de 0,8[mm]	0.00012	W
qt_{PLA}	0,4	Calor de trabajo de PLA en cilindro con boquilla de 0,4[mm]	0.00004	W
qt_{PLA}	0,8	Calor de trabajo de PLA en cilindro con boquilla de 0,8[mm]	0.00015	W

Tabla 34: Resultados Calor de Trabajo con Diferentes Boquillas y Materiales
Elaboración Propia

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 utiliza la siguiente formula [42]:

$$R_{conv} = \frac{1}{h * A_s} \quad (79)$$

Donde:

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

$$R_{rad} = \frac{1}{A * \varepsilon * \sigma * (T_s^2 + T_i^2) * (T_s + T_i)} \quad (80)$$

Donde:

- A_s : Área de superficie expuesta a la radiación [m^2]
- ε : Emisividad del material (0.6 para SAE620) [-]
- σ : Constante de Stefan-Botzmann [W/m^2k^4]
- T_s : Temperatura absoluta de la superficie [$^{\circ}K$]
- T_{sur} : Temperatura absoluta del ambiente [$^{\circ}K$]

Para el desarrollo de la ecuación 79, se considera un $h = 10,57$, esto según criterio relacionado con la geometría y volumen del cilindro. [42], y el área de convección es la cara cilíndrica dentro del bloque que tendrá contacto con la resistencia eléctrica. Reemplazando valores se puede obtener para la resistencia por convección:

$$R_{conv} = \frac{1}{h * A_s} \quad \text{Reemplazando Valores}$$

$$R_{conv} = \frac{1}{10,57[W/m^2^{\circ}K] * 0,00037[m^2]}$$

$$R_{conv} = 0,0039[^{\circ}K/W]$$

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

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

$$R_{radPET} = \frac{1}{0,00037[m^2] * 0,6[-] * 5,67x10^{-8}[W/m^2K^4] * (293,15^2 + 433,15^2) [K] * (293,15 + 433,15) [K]}$$

$$R_{radPET} = 8,02[^{\circ}K/W]$$

Para el caso del PLA

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

$$R_{radPLA} = \frac{1}{0,00037[m^2] * 0,6[-] * 5,67x10^{-8}[W/m^2K^4] * (293,15^2 + 463,15^2) [K] * (293,15 + 463,15) [K]}$$

$$R_{radPLA} = 9,54[^{\circ}K/W]$$

Con estos valores, podemos determinar la potencia requerida para que el sistema extrusor pueda trabajar con los materiales seleccionados más las pérdidas, con el fin de seleccionar una resistencia eléctrica que pueda entregar el valor necesario, para ello véase la siguiente tabla 35 de resumen:

Variable	Boquilla	Descripción	Valor	Unidad
$q_{elecPET}$	0,4	Potencia total para material PET con boquilla de 0,4[mm]	8,413	W
$q_{elecPET}$	0,8	Potencia total para material PET con boquilla de 0,8[mm]	8,4112	W
$q_{elecPLA}$	0,4	Potencia total para material PLA con boquilla de 0,4[mm]	9,619	W
$q_{elecPLA}$	0,8	Potencia total para material PLA con boquilla de 0,8[mm]	9,594	W

Tabla 35: Potencia requerida por el sistema extrusor, para las diferentes boquillas y materiales
Elaboración Propia

De acuerdo a los resultados, se puede observar que el valor necesario para PLA, sin tener una diferencia muy grande entre ambas boquillas, es el más alto (9.619 [W]), por que este valor será el referencia para la selección de resistencia eléctrica.

3.4.8.3 Selección de Sistema de Calefacción (Resistencia Eléctrica)

A partir del dimensionamiento hecho del sistema de calefacción, se pudo elegir un calefactor eléctrico tipo cilindro que permitiera cumplir con cierto margen de seguridad los criterios de selección.

A continuación se muestra una figura 61 del modelo de resistencia eléctrica utilizada por el sistema extrusor.



Figura 61: Calentador Cartucho Electrico 12V 40W.
Fuente: <https://afel.cl/producto/extrusor-e3d-simple-all-metal-v5-j-head/>

Esta resistencia se encuentra sin ningun problema en el mercado nacional, siendo el proveedor a elegir la empresa de AFEL.

3.4.9. Sistema de Refrigeración.

En el sistema de refrigeración del sistema extrusor se utilizará un ventilador para realizar el enfriamiento de los elementos no pertenecientes al sistema Hot-End mediante la convección forzada. La función es disminuir la temperatura tanto a la salida de la boquilla, para evitar la dilatación extra del material extruido, disminuir los cambios de diámetro al final y tener una mayor calidad en él. Por otra parte un ventilador será el encargado de mantener la temperatura sobre el cilindro donde se encuentra la tolva con el material pelletizado.

3.4.9.1 Dimensionamiento.

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 de la extrusora funcione correctamente.

Para calcular la temperatura del filamento luego de pasar por un ventilador, se selecciona un ventilador de 40x40[mm], sus características y Datasheets se pueden ver el Anexo 3. Como se tiene diferentes materiales y el sistema extrusor fue diseñado para funcionar con dos boquilla de diferente diámetro, 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 Prandtl⁴³, el número de Reynolds⁴⁴ y el número de Nusselt⁴⁵.

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 [42]:

$$Re = \frac{V * D}{\nu} \quad (81)$$

Donde:

- V : Flujo del aire del ventilador[m/s]
- D : Diámetro del salida material extruido[m]
- ν : Viscosidad cinemática del aire [m²/s] ($2,32 * 10^{-5}$ T=100°C y P=Patm)

En el caso de estudio, el diámetro del filamento variará entre 0.4 a 0.8[mm], por lo cual primero se determinara la velocidad del aire en la boquilla, para ello se toma como dato el caudal de CFM⁴⁶ del ANEXO 3 y utilizando la siguiente ecuación se obtiene la velocidad del ventilador.

$$Q = V * A_{ventilador} \quad \text{Despejando } v \text{ y reemplazando valores}$$

$$V = \frac{Q[m^3/s]}{A[m^2]}$$

$$V = \frac{0,0345[m^3/s]}{\pi * 0,038^2[m^2]}$$

$$V = 7,618[m/s]$$

Con todos los datos claro para utilizar la ecuación de Reynolds, reemplazos valores y los resultados se muestran en la siguiente tabla 36:

Variable	Boquilla	Descripción	Valor	Unidad
Re	0,4	Reynolds con boquilla de 0,4 [mm]	131,34	-
Re	0,8	Reynolds con boquilla de 0,8[mm]	262,69	-

Tabla 36: Resultados de Reynolds para Diferentes Diámetros de Boquilla.

⁴³valor que relaciona la convección forzada y la natural.

⁴⁴Que caracteriza el movimiento de un fluido.

⁴⁵Valor de transferencia de calor por convección forzada.

⁴⁶Pies cúbicos por minuto (en inglés Cubic Feet per Minute).

Con el valor de Reynolds y cruzando esta información con los valores de Prandtl y características del aire, presente en la siguiente tabla 37, se puede determinar el valor Nusselt mediante la siguiente ecuación [43]:

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62 * Re^{1/2} * Pr^{1/3}}{\left(1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{2/3}\right)^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (82)$$

Donde:

Re : Número de Reynolds[-]

Pr : Número de Prandtl[-]

Variable	Descripción	Valor	Unidad
K	Conductividad térmica del aire	0,03	W/mK
ν	Viscosidad del aire	$2,32 * 10^{-5}$	$[m^2/s]$
Pr	Número de Prandtl	0,7003	-

Tabla 37: Propiedades Aire a $T=100[^\circ C]$ y $P=P_{atm}$

Los resultados para los valores de Nusselt, mediante la ecuación 82 se pueden observar en la siguiente tabla 38:

Variable	Boquilla	Descripción	Valor	Unidad
Nu	0,4	Nussels con boquilla de 0,4 [mm]	6,61	-
Nu	0,8	Nussels con boquilla de 0,8[mm]	8,21	-

Tabla 38: Resultados Nusselt para los diferentes Diámetros de Boquilla.

Con estos datos, es posible calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección, utilizando la siguiente ecuación [42]:

$$h = Nu \frac{k}{D} \quad (83)$$

Donde:

Nu : Número de Nusselt[-]

k : Conductividad térmica del aire[W/mK]

D : Diámetro boquilla[m]

Los resultados para estimar el coeficiente de calor son presentados a continuación en la siguiente tabla 39:

Variable	Boquilla	Descripción	Valor	Unidad
h	0,4	Coficiente de convección con boquilla 0,4[mm]	522,86	W/m^2K
h	0,8	Coficiente de convección con boquilla de 0,8[mm]	324,43	W/m^2K

Tabla 39: Resultados Coeficiente de Transferencia de Aire para los Diferentes Diámetros.

Como se observa, el filamento después de pasar por el aire forzado del ventilador, reduce considerablemente su temperatura, estando por sobre la temperatura de transición vítrea del PET y PLA (80[°C] y 90[°C] respectivamente) en ambas boquillas, por lo que será más estable y se podrá trabajar de mejor manera el sistema extrusor.

3.4.9.2 Selección del Sistema de Refrigeración

A partir del dimensionamiento hecho del sistema de refrigeración, se eligió un ventilador modelo DC BRUSHLESS FAN DC 12V, el cual será adquirido a AFEL. Los datos relevantes del ventilador se encuentran en el ANEXO 3. A continuación vemos en la figura 62 el modelo de ventilador escogido.



Figura 62: Ventilador Dc brushless fan DC 12V
Fuente: <https://afel.cl/producto/ventilador-4010-12v/>

3.5. Sistema Extrusor Modular para FDM, MOSYS.

Una vez definido los componentes que serán parte del sistema extrusor modular, desde ahora nombrado como MOSYS, por sus siglas en ingles de Modular System.

Para la definición de detalles y como se ha trabajado en la parte de diseño se utiliza el software Inventor Autodesk, para detalles constructivos y funcionales, con el fin de determinar métodos de ensambles y fijación en las diferentes piezas. Es importante mencionar que el diseño en modelos si bien ayuda a la toma de decisiones de tamaño y forma de las piezas esta herramienta garantiza el funcionamiento y comunicación de los diferentes sistemas, disminuyendo así, en gran parte el trabajo de diferentes iteraciones de un prototipo.

3.5.1. Modelo 3D de Ensamble 3D.



Figura 63: Render del Sistema Extrusor Modular
Elaboración Propia, Autodesk Inventor

3.5.2. Despiece Sistema Extrusor Modular.

Para entender de mejor forma la forma interna de equipo y de como los componentes se relacionan entre si, se muestra a continuación un vista de explosión del sistema, de igual forma y para más detalle véase los planos de fabricación adjuntos al final del documento.



Figura 64: Vista de explosión del Sistema Extrusor Modular.
Fuente: Elaboración Propia Autodesk



(a) Armado MOSYS



(b) Armado Mosys Sin Carcasa.

Figura 65: Render del Sistema Extrusor Modular 2
Elaboración Propia, Autodesk Inventor

CAPÍTULO IV

4. Estudio Mercado y Viabilidad del Desarrollo de Producto.

En este capítulo se pretende estudiar y cuantificar la demanda del desarrollo del Sistema Modular de Extrusión (MOSYS-FDM) propuesto en esta tesis con el fin, de ver la posibilidad de escalamiento en función de los costos productivos, para poder entregar este sistema como producto en el mercado nacional y contrarrestarlo con productos similares en el mercado.

4.1. Estimación de Demanda

Como se mencionó en el capítulo 1, la impresión 3D cuenta con un abanico de posibilidades para ser inserto tanto en las industrias manufactureras, de gran o baja escala, en instituciones educativas enfocadas en la aplicación de nuevas tecnologías, a esto se le suma las personas naturales que ven como un recurso innovador y accesible la adquisición de una impresora 3D.

Según los analistas de mercado de tecnología, Consultoras Gartner y Canalys [31], se estima que las ventas en el año 2019 de impresoras 3D serían de 5.6 millones de unidades vendidas y fabricadas (open source⁴⁷) a nivel mundial.

Para estimar la cantidad de impresoras insertas y/o fabricadas anualmente en el mercado nacional, se va a cruzar datos emitidos por el Ministerio de Economía y Finanzas, de la cantidad de empresas nacionales dedicadas a la manufactura sumado con los fondos destinados a I+D+i a las distintas Instituciones Educativas y finalmente a las personas naturales que desarrollan o adquieren propiamente impresoras en el retail.

4.1.1. Empresas Manufactureras Nacionales.

Las empresas registrada en el Servicio de Impuesta Interno (Ministerio de Economía y Finanzas), el cual emite un Informe anual de resultados de la cantidad de empresas a nivel nacional[44].

Actualmente en Chile existe un total de 512.147 empresas. De ellas un 52% corresponden a pequeñas y medianas empresas (Pymes), aproximadamente 266.879, donde el 11,7% se dedica al sector manufacturero. Concluyendo de esta forma en 29.356 posibles compradores.

4.1.2. Instituciones Educativas

Luego, otros potenciales clientes se encuentran en instituciones de educación media y superior, como liceos técnico-profesionales[45], universidades[46], centros de formación técnicas e institutos profesionales, que a lo largo de Chile suman un total de 1096 recintos.

4.1.3. Personas Naturales.

Por último, son las personas naturales que tienen un atractivo en la industria de impresoras 3D, ya sea para diseñadores, ingenieros u otros profesionales que valoran la versatilidad de esta herramienta.

Según la comisión de productividad, en Chile hay 8.047.000 personas económicamente activas, del rango etario de 15 a 64 años, se estima que 1 en 500 personas son profesionales relacionados al área de tecnologías, arquitectura, manufactura y/o relacionado con el diseño. La cantidad de personas que cumplen con el perfil son 16.094 aprox.[47]

⁴⁷Las impresoras 3D open-source tienen la característica de que son clonables. Cada una puede imprimir las piezas para construirte otra nueva (replicación).

Finalmente inferimos que, de los tres grupos mencionados anteriormente, como se observa en la Figura 66, del universo obtenemos un total de 46.546 posibles interesados en tecnologías relacionadas con la FDM.

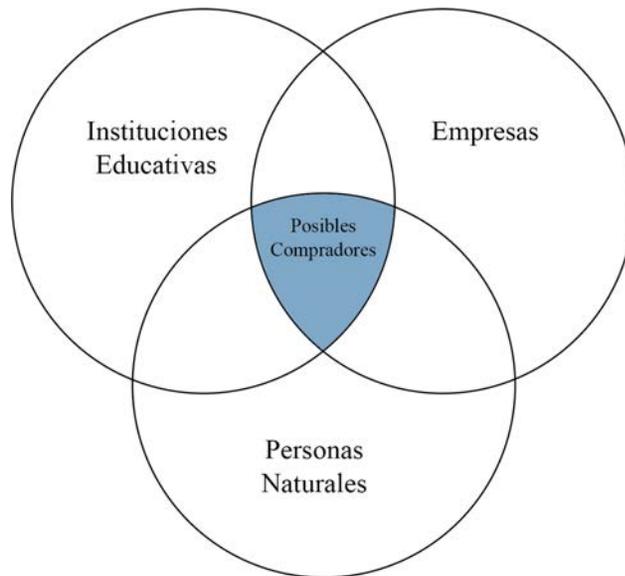


Figura 66: Diagrama de Venn de las Intercepción de Potencial Demanda para Sistema Extrusor
Elaboración Propia.

Particularmente, este Sistema Extrusor Modular de FDM (MOSYS), pretende llegar solo a un 2% de la suma de los grupos mencionados, que equivale a 931 anual. Esta cifra tiene relación con el interés del mercado objetivo total, en la capacidad que ofrecen la nuevas tecnologías de reincorporar materiales al mercado o alargar la vida útil de las ya existentes. Idea que se ve reflejada en el valor agregado de MOSYS (Modular System FDM), disminuyendo el impacto de procesos relacionados con la obtención de materia prima utilizadas en las impresoras 3D convencionales, además de dar la posibilidad de re-utilizar materiales plásticos procesados, velando por nuevas normativas ambientales vigentes en el país.

4.2. Criterios de Crecimiento y Desarrollo Futuro.

La tendencia nacional e internacional de ventas de Impresoras 3D va en alza y así mismo, los accesorios y/o complementos que proporcionen multiplicidad a estos sistemas, gran parte de los futuros clientes mencionados en el apartado anterior, están dispuestos a invertir en productos que contemple un uso inteligente de residuos, de manera sostenible y sustentable. Si bien, el proyecto inicialmente, contempla una situación de mercado crítico (véase punto 4.1 de esta memoria), para analizar la viabilidad y posterior crecimiento de esta nueva tecnología.

Si se ve desde la perspectiva del crecimiento de estas tecnologías FDM, observando la figura mencionada en el capítulo 1, la relación de ingresos por ventas de impresoras a la Industria/Profesional y a personas, la curva obtenida ayuda a estimar un comportamiento en ventas de MOSYS.

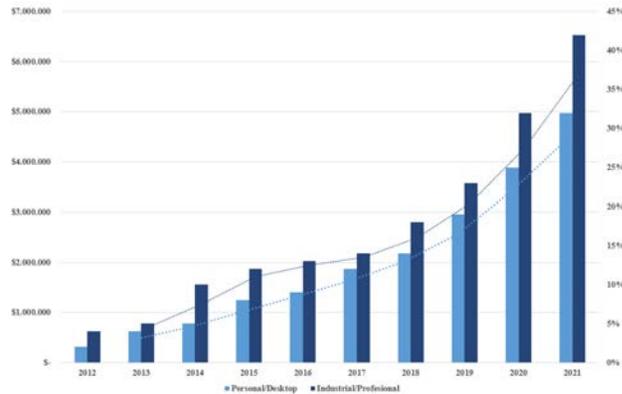


Figura 67: Pronóstico Global de Ingresos de Impresoras 3D por Segmento de Mercado. Context.

Como indica la gráfica, los valores proyectan que, dentro de 5 años, la aceptación rápida del mercado, logra incrementar la demanda de un 7 a 10% en lo que compete a estas tecnologías, y en particular un incremento en la demanda de MOSYS.

4.2.1. Modelo de Negocios

Para determinar la propuesta de valor del producto MOSYS en el mercado, se basará en su costo asociado a la producción y ensamblado, de los dos componentes que conforman el sistema, Extrusor y Controlador.

De manera inicial, considerando que la demanda en primera instancia es de pequeña escala, la fabricación de las piezas será externalizada, y no así el ensamblado y venta. Esta estrategia es adoptada para disminuir el impacto económico en la inversión inicial del proyecto.

4.2.1.1 Canvas

Para conocer los socios, actividades y recursos claves, lo que hace imperante ejemplificar todo con un modelo CANVAS, en la siguiente Figura 68

<p>Socios Claves</p> <p>Mantener una buena comunicación con proveedores regionales. Abaratando costos de traslado de materiales.</p> <ul style="list-style-type: none"> • AFEL • MCI ELECTRONICS • PROINMAR • HERMANOS OSORIOS 	<p>Actividades Claves</p> <p>Un correcto y completo estudio de ingeniería que permita garantizar el funcionamiento del sistema extrusor.</p> <p>Garantizando la fiabilidad del diseño y calidad del producto en lo que compete al control del proceso de extrusión.</p> <p>Actualizaciones de software y hardware, con el fin de mantener y asegurar una mejora constante.</p>	<p>Propuesta de Valor</p> <p>Dispositivo de Transformación de pellets plásticos para procesos asociados a la FDM.</p> <p>Evitando impacto adicional de transformación de filamento usado habitualmente como materia prima. (impresoras 3D)</p> <p>Permitiendo alargar y re-utilizar materiales plásticos de uso cotidiano para la elaboración de nuevos productos o piezas.</p>	<p>Relaciones con el Cliente</p> <p>Comunicación que permita generar actualizaciones a partir del funcionamiento y necesidades del sistema que se presenten en terreno.</p> <p>Generar cercanía con los clientes y personalización en los productos ofrecidos. (Asistencia personalizada de post venta)</p>	<p>Segmentos de Clientes</p> <p>Este sistema pretende llegar a empresas, instituciones educativas y personas que tengan relación con la capacidad que ofrece esta tecnología. (alargar vida útil de materiales ya existentes, procesos de manufactura no convencionales)</p> <p>En especial a ingenieros, arquitectos, diseñadores, empresas manufactureras.</p>
<p>Recursos Clave</p> <p>Se requiere un abastecimiento seguro de componentes electrónicos y materiales para la construcción del sistema extrusor.</p>		<p>Canales</p> <p>Diseñar pagina web y aplicaciones móviles que garanticen la comunicación. Y permitan captar rápidamente la atención de nuevos clientes.</p> <p>Espacios de ferias tecnológicas y redes sociales para llegar a la mayor cantidad de clientes.</p>		
<p>Estructura de costes</p> <p>La base o estructura de negocio, se basa principalmente en la externalización de fabricación de componentes y básicamente preocuparse por el ensamble de los diferentes sistemas, Extrusor y Controlador, además del desarrollo de software.</p> <p>Con esto disminuir la inversión inicial velando por la viabilidad del proyecto para posteriormente invertir en equipamiento que permita abaratar costes.</p>		<p>Fuente de Ingresos</p> <p>En general y como se especifica en el segmento de clientes, la fuente de ingresos o clientes que realmente están dispuestos a pagar se ve relacionado con temas manufactureros. Donde el costo asociado a la calidad de la tecnología tiene un mayor peso que el precio.</p> <p>Hoy en día valores relaciones con la Impresión 3D, esta desde los \$300.0000 a \$800.000</p>		

Figura 68: Modelo de Negocios Canvas para Sistema Extrusor MOSYS
Elaboración Propia

4.3. Costos

Como método, para ordenar y evaluar la factibilidad del proyecto, se analiza los costos asociados, posibles ingresos y egresos durante una proyección de 5 años. A consecuencia de lo anterior, se obtiene el Valor Actual Neto (VAN) que será el responsable de determinar si es viable el proyecto.

4.3.1. Definición de Costos

4.3.1.1 Costos Variables

En la siguiente tabla 40 se muestra los valores de materiales e insumos necesarios para la fabricación del extrusor y sistema controlador. (Cotización ANEXO 1 y ANEXO2)

PRODUCTO	VALOR	PROVEEDOR	CTA.	VALOR TOTAL
CONTROLADOR				
ARDUINO MEGA 2560	\$ 13.437	AFEL	1	\$ 13.437
FUENTE DE PODER 12V - 10A - 120W	\$ 7.983	AFEL	1	\$ 7.983
REGLETA MACHO HEMBRA PIN HEADER	\$ 210	AFEL	3	\$ 630
SHIELD LCD KEYPAD 16X02 - 5 BOTONES	\$ 4.706	AFEL	1	\$ 4.706
SHIELD RELÉ 4 CANALES ARDUINO	\$ 5.462	AFEL	1	\$ 5.462
DRIVER MOTOR PASO A PASO TB6600 0.2- 5A / 12-48VDC	\$ 15.966	AFEL	1	\$ 15.966
CABLE DUPONT PLANO 40 PINES 1MT	\$ 4.193	AFEL	1	\$ 4.193
BARRA ALUMINIO DIAMETRO 12[MM]	\$ 2.333	PROINMAR	4	\$ 9.333
PLANCHA ALUMINIO ESPESOR 3[MM]	\$ 1.971	PROINMAR	1	\$ 1.971
PLANCHA ACRILICO ESPESOR 3[MM]	\$ 1.964	PROINMAR	1	\$ 1.964
SISTEMA EXTRUSOR				
CALENTADOR CARTUCHO EXTRUSOR 12V 40W	\$ 2.521	AFEL	1	\$ 2.521
MOTOR PASO A PASO NEMA 17 MODELO 17HS4401 1.7A	\$ 13.445	AFEL	1	\$ 13.445
NOZZLE PUNTA IMPRESORA 3D 0,5MM M6	\$ 840	AFEL	2	\$ 1.681
NOZZLE PUNTA IMPRESORA 3D 1MM M6	\$ 840	AFEL	2	\$ 1.681
ACOPLAMIENTO FLEXIBLE 5X8MM	\$ 2.101	AFEL	1	\$ 2.101
TERMISTOR 100K NTC 3950 1MTS	\$ 2.101	AFEL	1	\$ 2.101
VENTILADOR 4010 12V	\$ 2.521	AFEL	2	\$ 5.042
BRONCE HEXAGONAL-DIAMETRO 6[MM]	\$ 225	PROINMAR	4	\$ 900
ACERO INOX 316, DIAMETRO 10[MM]	\$ 492	PROINMAR	1	\$ 492
BARRA DE BRONCE 640, DIAMETRO 30[MM]	\$ 9.375	PROINMAR	1	\$ 9.375
PLANCHA ALUMINIO ESPESOR 1,5[MM]	\$ 231	PROINMAR	1	\$ 231

Tabla 40: Costo de Materiales Construcción MOSYS-FDM
Elaboración Propia

En la siguiente tabla 41 se muestra los valores relacionados con el proceso de manufactura de las distintas partes que conforman el sistema MOSYS.

Pieza	Proveedor	Valor Uni.	Cta.	Valor Total
Extrusor				
Husillo Sin-Fin	Maestranza Hermanos Osorios	\$ 22.000	1	\$ 22.000
Separadores	Maestranza Hermanos Osorios	\$ 1.500	4	\$ 6.000
Disipador de Temperatura	Maestranza Hermanos Osorios	\$ 15.000	1	\$ 15.000
Bloque	Maestranza Hermanos Osorios	\$ 6.500	1	\$ 6.500
Plancha Superior	Maestranza Hermanos Osorios	\$ 3.500	1	\$ 3.500
Plancha Inferior	Maestranza Hermanos Osorios	\$ 3.500	1	\$ 3.500
Plancha Fijación	Maestranza Hermanos Osorios	\$ 3.000	1	\$ 3.000

Controlador				
Plancha Posterior	Maestranza Hermanos Osorio	\$ 15.000	1	\$ 15.000
Placha Frontal	Maestranza Hermanos Osorio	\$ 15.000	1	\$ 15.000
Plancha Arduino	Maestranza Hermanos Osorio	\$ 3.500	1	\$ 3.500
Plancha Termocupla	Maestranza Hermanos Osorio	\$ 3.500	1	\$ 3.500
Plancha Reles	Maestranza Hermanos Osorio	\$ 2.500	1	\$ 2.500
Plancha Fuente Poder	Maestranza Hermanos Osorio	\$ 2.500	1	\$ 2.500
Plancha Conectores	Maestranza Hermanos Osorio	\$ 3.500	1	\$ 3.500
Separadores	Maestranza Hermanos Osorio	\$ 4.500	4	\$ 18.000

Tabla 41: Costo de Fabricación de las diferentes piezas de MOSYS-FDM
Elaboración Propia

4.3.1.2 Costos Fijo

Para fines de establecer costos fijos se consideran como recursos humanos (RRHH) a dos personas:

- Ingeniero en Fabricación y Diseño Industrial, con aptitudes y conocimientos para liderar el proyecto, gestión de la producción y planificación, además de aportar en la parte técnica como lo es el ensamble del sistema. Sueldo estimado de \$ 1.500.000.
- Técnico en Electrónica, capas de ensamblar y comunicar los diferentes elementos electrónicos del sistema velando por el correcto funcionamiento y calidad del producto. Sueldo estimado de \$ 850.000

Además se considera un espacio físico ubicado, dentro de la provincia de Quillota, con un área aproximada de $24[m^2]$, espacio suficiente para la primera etapa y puesta en marcha del proyecto, el valor de este es de aproximadamente \$ 150.000

4.3.2. Criterios de Fijación de Precio del Producto.

Una vez ya detallados los costos asociados a materiales y fabricación del producto, además de los costos relacionados con recursos humanos, espacio, entre otros. Es necesario determinar una estrategia de ganancias para la venta del sistema, Para ello se considera la demanda anual vista en el punto 4.1 de este capítulo, de aproximadamente 931 productos.

De lo anterior podemos deducir que el valor total del sistema Extrusor se puede determinar de la siguiente manera.

$$\sum \text{Costo total} * \text{Porcentaje de Ganancia} = \text{Valor Venta del Producto} \quad (84)$$

Donde el costo total esta dado por la suma unitaria de costo fijo y variable del producto. A continuación en la tabla 42 se ve el resumen del costo total del producto (extrusor y controlador).

Materiales	\$ 105.215
Maquina	\$ 123.000
RRHH	\$ 30.128
Arriendo	\$1.923
Costo Total	\$ 260.267

Tabla 42: Resumen Costo Total Sistema Extrusor MOSYS
Elaboración Propia

Si bien, este valor refleja el valor total del sistema (extrusor y controlador), dentro de nuestro modelo de negocios existe la flexibilidad de vender este sistema por separado, para ello y tomando los mismos criterios para estimar el costo total, se puede obtener el valor de sistema por separa. Véase la siguiente tabla 43:

Extrusor		Controlador	
Materiales	\$ 39.569	Materiales	\$ 65.646
Maquina	\$ 59.500	Maquina	\$ 63.500
RRHH	\$ 30.128	RRHH	\$ 30.128
Ariendo	\$1.923	Ariendo	\$1.923
Costo Total	\$ 131.120	Costo Total	\$ 161.198

Tabla 43: Costos Independientes Sistema Extrusor y Controlador
Elaboración Propia

El porcentaje de ganancia para el proyecto MOSYS, al igual que como se plantea al inicio del capítulo, sera un favor critico o mínimo, con el fin de evaluar y garantizar la viabilidad del proyecto en el peor de los casos, par ello se estima un 5 % de porcentaje de ganancia.

Finalmente podemos deducir que el valor de venta del producto sera igual a :

$$\$ 260.267 * 5\% = \$ 273.280 \quad \text{Para el caso de venta por ambos (extrusor y controlador)}$$

$$\$ 131.120 * 5\% = \$ 137.676 \quad \text{Para el caso de venta solo del sistema extrusor}$$

$$\$ 161.198 * 5\% = \$ 169.198 \quad \text{Para el caso de venta solo del controlador}$$

4.3.2.1 Inversión Inicial

Para determinar la inversión inicial, se contemplo un listado de insumo necesarios para el área de trabajo en donde se ejecutara el armado de MOSYS, para ello véase la siguiente tabla 44:

Detalle	Precio Uni.	Cta.	Total
Computador	\$ 650.000	1	\$ 650.000
Notebook	\$ 750.000	1	\$ 750.000
Escritorio	\$ 290.000	2	\$ 580.000
Sillas	\$ 40.000	4	\$ 160.000
Mesones de Trabajo	\$ 130.000	3	\$ 390.000
Herramientas varias	\$ 450.000	1	\$ 450.000
Sub Total			\$ 2.980.000
Sueldo			\$ 2.350.000
Arriendo			\$ 150.000
Total			\$ 5.480.000

Tabla 44: Estimado Inversión Inicial
Elaboración Propia

Se determina que para iniciar el proyecto, se necesita solicitar un préstamo de \$6.000.000, que se detalla en la siguiente figura 69 para obtener el valor cuota durante un periodo de 5 años.

PRESTAMO	\$ 6.000.000	Nº PERIODOS	SALDO INICIAL	CUOTAS	INTERESES	AMORTIZACION	SALDO FINAL
TASA	19%	1	\$ 6.000.000	\$ 2.273.946	\$ 1.140.000	\$ 1.133.946	\$ 4.866.054
PERIODOS	4	2	\$ 4.866.054	\$ 2.273.946	\$ 924.550	\$ 1.349.395	\$ 3.516.659
CUOTA	\$ 2.273.946	3	\$ 3.516.659	\$ 2.273.946	\$ 668.165	\$ 1.605.780	\$ 1.910.879
Ke	0,14	4	\$ 1.910.879	\$ 2.273.946	\$ 363.066,95	\$ 1.910.879	\$ -
IMPUESTO	0,27						
		0	1	2	3	4	
PRESTAMO	\$ 6.000.000						
INTERESES		\$ 1.140.000	\$ 924.550	\$ 668.165	\$ 363.066,95		
AHORRO TRIBUTARIO		\$ 307.800	\$ 249.629	\$ 180.405	\$ 98.028		
RES. DEPSUES DE IMPUESTOS		\$ 832.200	\$ 674.922	\$ 487.761	\$ 265.039		
AMORTIZACION DE CAPITAL		\$ 1.133.946	\$ 1.349.395	\$ 1.605.780	\$ 1.910.879		
FLUJO NETO	\$ 6.000.000	\$ 1.966.146	\$ 2.024.317	\$ 2.093.541	\$ 2.175.918		

Figura 69: Amortización y Valor Cuota Préstamo Requerido Proyecto MOSYS.
Elaboración Propia

4.3.2.2 Depreciación

Es importante definir la depreciación los activos adquiridos con el préstamo, ya que esto permite al proyecto una mejor viabilidad y prestaciones a futuro, debido a que este criterio disminuir el impacto de impuestos. A continuación se presenta una figura 70, para aplicar los valores a flujo de caja.

Activo	Valor	Cta.	Tipo de depreciación	Años	Depreciacion Anual	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Computador	\$ 650.000	1	Acelerada	2	\$ 325.000	\$ 325.000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Notebook	\$ 750.000	1	Acelerada	2	\$ 375.000	\$ 375.000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Escritorio	\$ 290.000	2	Acelerada	2	\$ 145.000	\$ 290.000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Sillas	\$ 40.000	4	Acelerada	2	\$ 20.000	\$ 80.000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Mesa de trabajo	\$ 130.000	3	Acelerada	2	\$ 65.000	\$ 195.000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Herramientas	\$ 450.000	1	Normal	3	\$ 150.000	\$ 300.000	\$ 150.000	\$ -	\$ -	\$ -

Figura 70: Depreciación.
Servicio Puesto Interno. Chile

4.4. Flujo de Caja

Finalmente observamos un flujo de caja, véase figura 71 , en el contexto mencionado durante el capítulo, que da como resultado financiero la factibilidad durante los primero 5 años del proyecto MOSYS

	ANO 0	ANO 1	ANO 2	ANO 3	ANO 4	ANO 5
INGRESOS POR VENTA	\$ -	\$ 254.423.752	\$ 259.512.227	\$ 264.600.702	\$ 269.689.178	\$ 274.777.653
COSTOS VARIABLES	\$ -	\$ -212.468.592	\$ -216.717.964	\$ -220.967.336	\$ -225.216.708	\$ -229.466.079
COSTOS FIJOS	\$ -	\$ -384.615	\$ -384.615	\$ -384.615	\$ -384.615	\$ -384.615
DEPRECIACION ACTIVO FIJO TANGIBLE	\$ -	\$ -1.565.000	\$ -1.565.000	\$ -1.565.000	\$ -1.565.000	\$ -1.565.000
UTILIDAD ANTES DEL IMPUESTO	\$ -	\$ 40.005.545	\$ 40.844.648	\$ 41.683.751	\$ 42.522.855	\$ 43.361.958
IMPUESTO A LA RENTA	\$ -	\$ -10.801.497	\$ -11.028.055	\$ -11.254.613	\$ -11.481.171	\$ -11.707.729
UTILIDAD DESPUES DEL IMPUESTO	\$ -	\$ 29.204.048	\$ 29.816.593	\$ 30.429.139	\$ 31.041.684	\$ 31.654.229
DEPRECIACION ACTIVO FIJO TANGIBLE	\$ -	\$ 1.565.000	\$ 1,565,000	\$ 1,565,000	\$ 1,565,000	\$ 1,565,000
FLUJO DE CAJA OPERACIONAL (FCO)	\$ -	\$ 30.769.048	\$ 31.381.593	\$ 31.994.139	\$ 32.606.684	\$ 33.219.229
INVERSION EN ACTIVO FIJO TANGIBLE E INTANGIBLE	\$ -5.480.000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
PRESTAMOS	\$ 6.000.000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
AMORTIZACION DEL PRESTAMO	\$ -	\$ -1.133.946	\$ -1.349.395	\$ -1.605.780	\$ -1.910.879	\$ -
FLUJO DE CAJA PRIVADO NETO (FC)	\$ 520.000	\$ 29.635.102	\$ 30.032.198	\$ 30.388.359	\$ 30.695.805	\$ 33.219.229
VAN	\$	\$ 105.043.188				

Figura 71: Flujo de Caja Proyecto MOSYS
Elaboración Propia

Conclusión

Como se ha hablado en este documento, el avance en la industria 4.0 y el crecimiento en nuevas tecnologías, deja una amplia demanda y evidencia el comportamiento en el mercado que puede llegar a experimentar SISTEMA EXTRUSOR MODULAR DE FDM.

Luego de realizar un análisis de factibilidad de costos, y un flujo de caja, es posible estimar que MOSYS es viable como negocio, con una proyección de 5 años, y una estrategia financiera que externaliza la fabricación de piezas (disminuye el RRHH y el espacio de trabajo), favorece al no comenzar con una inversión inicial mayor elevada. Con los factores mencionados y con una utilidad del 5 %, El proyecto de Modelo de negocio es exitoso.

Uno de los factores de importancia para concluir en un producto, es la recopilación de antecedentes, donde se evidencia la necesidad por la que nace. Estamos en una generación que es consciente con el medio ambiente, donde la posibilidad de aportar con un equipo que sea capaz de generar economía circular al alcance de muchos aporta un valor mayor, también deja en manifiesto que es una tecnología con una alta proyección, donde incluso hay fondos de recursos estatales dispuestos a financiar la investigación y creación de estos.

Otro factor fundamental es la ingeniería de detalle, que derivó en medidas y características específicas en el prototipo final, generando resultados en la aplicación cercanos a los deseados, como es

Apreciaciones Personales.

Bajo una mirada personal, la creación de una memoria individual no permite desarrollar habilidades blandas, lo que perjudica en un futuro al trabajo cotidiano, donde la toma de decisiones son en base a un equipo de trabajo, muchas veces multidisciplinario, que debate y discute para llegar a una solución final con distintas perspectivas, que beneficia a nutrir nuestras capacidades. En consecuencia de lo anterior, al ser un documento que analiza todas las etapas de fabricación de un producto, desde visualizar un problema y posterior bosquejo de diseño hasta su análisis de posible negocio, me permitió reconocer mis habilidades y debilidades, convirtiéndose en un elemento que puso al límite mi capacidad de resolución de problemas, fortaleciendo las competencias adquiridas a lo largo de la carrera de Ingeniería en Fabricación y Diseño Industrial

Por último, es importante destacar que es un producto que está abierto a posibles mejoras. Si bien cumple satisfactoriamente su función, tiene la posibilidad de optimizar procesos, con el avance a pasos agigantados que tiene la industria o con el punto de vista de entendidos en sus subsistemas, como de extrusión, calefacción, o en el área de electrónica, va a permitir perfeccionar a MOSYS, concluyendo en un SISTEMA EXTRUSOR MODULAR DE FDM final eficiente y de excelencia en el mercado.

Referencias

- [1] Victor K Savgorodny. *TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS*.
- [2] la Universidad de Concepción la Asociación de Industriales del Plástico (ASIPLA) y el Ministerio de Medio Ambiente. Centro de Investigación de Polímeros Avanzados, CIPA. Guía para la elaboración de estrategias de gestión de residuos plásticos en Chile.
- [3] Asoc Gremial de Industriales del Plástico de Chile. Estadísticas industria del plástico informe año 2018 y primer semestre 2019.
- [4] Claudia Maldonado Caballero. Pet, el plástico que abunda en Chile pero que hoy se debe importar para sostener una industria de reciclaje clave para la ley rep.
- [5] Ricardo Pérez Vallejos. Solo el 8
- [6] Magdalena Balcells. Asipla y la economía circular en Chile.
- [7] Listado destinatarios autorizados para residuos no peligrosos.
- [8] Lisa C. Bhada-Tata Perinaz Van Woerden Frank Kaza, Silpa Yao. *What a Waste 2.0 : A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*.
- [9] Asociación Gremial de Industriales del Plástico. Estudio sobre reciclaje de plásticos en Chile.
- [10] Carolina Gatica Jorquera. El problema del plástico en Chile, buscando soluciones.
- [11] Enrique Vivanco Font. Generación y gestión de plástico en Chile.
- [12] Jorge Molina Alomar. Ley rep fija meta de 60 Chile al año 2030.
- [13] Boris Suazo Páez. Economía circular en Chile : alcances, problemas y desafíos en la gestión de la ley rep.
- [14] ASTM International. Terminología estándar para tecnologías de fabricación aditiva, 2012.
- [15] Dr. Brent Stucker Dr. Ian Gibson, Dr. David W. Rosen. *Tecnologías de Fabricación Aditiva: Creación de Prototipos para la Fabricación Digital Directa*.
- [16] Hull Charles W. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography.
- [17] John D. Williams, David R. Miller, and Carl Deckard. Selective laser sintering part strength as a function of powder number, scan rate and spot size, January 1996.
- [18] Crump S Scott. Apparatus and method for creating three-dimensional objects.
- [19] Reece Arnott. The reRap project-open source meets 3d printing, August 2008.
- [20] Ed Sells, Sebastien Bailard, Zach Smith, Adrian Bowyer, and Vik Olliver. *RepRap: The Replicating Rapid Prototyper: Maximizing Customizability by Breeding the Means of Production*, pages 568–580. World Scientific Publishing Company, 2009.
- [21] Trimaker. Guía de impresión 3d: ¿qué es FDM? <https://trimaker.com/contacto/>, Villa Crespo, Buenos Aires, Argentina, 2015.
- [22] Blass Molero Hidalgo. Proceso de fabricación aditiva (AM). 12 Mayo del 2018, Bilbao, España. <https://generativedesignpro.wordpress.com/2018/05/12/procesos-de-fabricacion-aditiva-am/>.
- [23] Tecnología DíaDiario. Tipos de extrusores 3d. *DíaDiarioTeam*, page 1, Julio 19 julio, 2018. <https://www.diadiario.com/tipos-de-extrusores-3d/>.
- [24] Taylor Landry. Extrusoras 101: un curso intensivo sobre un componente esencial de su impresora 3d. *MatterHackers*, 1, Marzo 15 de marzo 2016. <https://www.matterhackers.com/articles/extruders-101>.
- [25] Gideon N. Levy, Ralf Schindel, and J.P. Kruth. Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives. *CIRP Annals*, 52(2):589 – 609, 2003.
- [26] Susana Sanchez Restrepo. FDM o modelado por deposición fundida, te explicamos todo.

- [27] Portal Educativo. Clasificación de los polímeros.
- [28] Ultimake. *Ficha de Datos Técnicos PLA*, versión 3.011 edition.
- [29] Prof. Tom Spurling Parthasarathy Pattarbiraman, Dr. Igor Sbarski. Propiedades térmicas y mecánicas del pet reciclado y sus mezclas.
- [30] José López Parada. Nuevos paradigmas de producción: Fabricación aditiva y transformación logística. Volumen 9.
- [31] Marcos Bloesch Jackie Fenn. Understandig gartner´s hype cycles.
- [32] Chris Connery. Context cifra en un 42para 2021.
- [33] Linda C. Schmidt George E. Dieter. *Enginerring Desing (2009)*. McGraw-Hill Higher Education, 4° edition edition.
- [34] Tomas L. Saaty. *Analytic Hierarchy Process (AHP)*.
- [35] Wilmer Ames. Triz, la herramienta del pensamiento e innovación sistemática, 12 2008.
- [36] Eunice Taboada Lbarra. La arquitectura integral y modular. el caso de la industria automotriz. *Economia y Sociedad.*, (16):65–83, 2005.
- [37] Keith Nisbett and Richard Budynas. *Shigley's Mechanical Engineering Design, 10th Edition*. 01 2015.
- [38] Miguel Ángel Martínez Sarmiento ; revisión técnica Francisco J. Sandoval Palafox Mikell P. Groover ; traducción Carlos M. de la Peña Gómez. Fundamentos de manufactura moderna : materiales, procesos y sistemas.
- [39] Antonio Marcilla Gomis Maribel Beltrán Rico. *Tenología de Polímeros*.
- [40] Victor Peinado, Pere Castell, Lidia García, and Angel Fernandez. Effect of extrusion on the mechanical and rheological properties of a reinforced poly(lactic acid): Reprocessing and recycling of biobased materials. *Materials*, 8:5360, 10 2015.
- [41] Carls Hanser Verlag. Extrusión de polímeros.
- [42] Frank P Incropera; David P DeWitt; Ricardo Cruz. *Fundamentos de Transferencia de Calor*.
- [43] Ephraim M. Sparrow, John P. Abraham, and Jimmy C.K. Tong. *Archival correlations for average heat transfer coefficients for non-circular and circular cylinders and for spheres in cross-flow*, volume 47. Elsevier Limited, November 2004.
- [44] Pamela Arellano. Informe de resultados: Empresa chilenas.
- [45] Ministerio de Educación. Formación técnico profesional.
- [46] Ministerio de Educación. Radiografía de la educación técnica.
- [47] Sebastián Espinoza Andrea Valenzuela Francisco, Carrillo. Mercado laboral y educación en Chile.

ANEXO 1 - Datasheet Motor NEMA17 Modelo 17HS4401

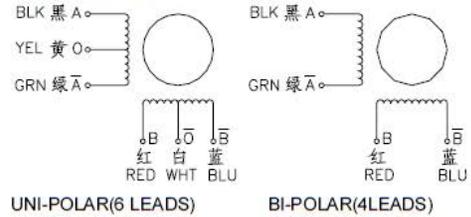


MotionKing (China) Motor Industry Co., Ltd.

2 Phase Hybrid Stepper Motor 17HS series-Size 42mm(1.8 degree)



Wiring Diagram:

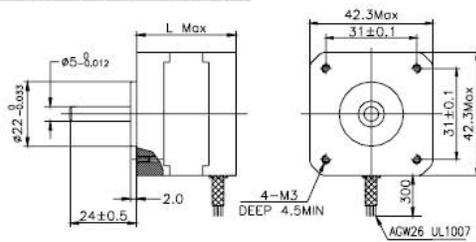


Electrical Specifications:

Series Model	Step Angle (deg)	Motor Length (mm)	Rated Current (A)	Phase Resistance (ohm)	Phase Inductance (mH)	Holding Torque (N.cm Min)	Detent Torque (N.cm Max)	Rotor Inertia (g.cm ²)	Lead Wire (No.)	Motor Weight (g)
17HS2408	1.8	28	0.6	8	10	12	1.6	34	4	150
17HS3401	1.8	34	1.3	2.4	2.8	28	1.6	34	4	220
17HS3410	1.8	34	1.7	1.2	1.8	28	1.6	34	4	220
17HS3430	1.8	34	0.4	30	35	28	1.6	34	4	220
17HS3630	1.8	34	0.4	30	18	21	1.6	34	6	220
17HS3616	1.8	34	0.16	75	40	14	1.6	34	6	220
17HS4401	1.8	40	1.7	1.5	2.8	40	2.2	54	4	280
17HS4402	1.8	40	1.3	2.5	5.0	40	2.2	54	4	280
17HS4602	1.8	40	1.2	3.2	2.8	28	2.2	54	6	280
17HS4630	1.8	40	0.4	30	28	28	2.2	54	6	280
17HS8401	1.8	48	1.7	1.8	3.2	52	2.6	68	4	350
17HS8402	1.8	48	1.3	3.2	5.5	52	2.6	68	4	350
17HS8403	1.8	48	2.3	1.2	1.6	46	2.6	68	4	350
17HS8630	1.8	48	0.4	30	38	34	2.6	68	6	350

*Note: We can manufacture products according to customer's requirements.

Dimensions: unit=mm

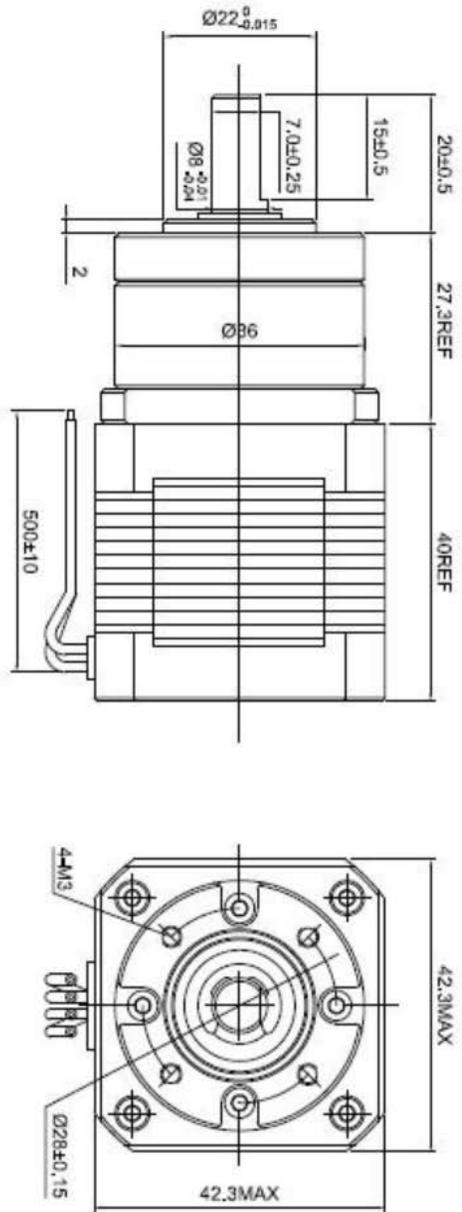


Motor Length:

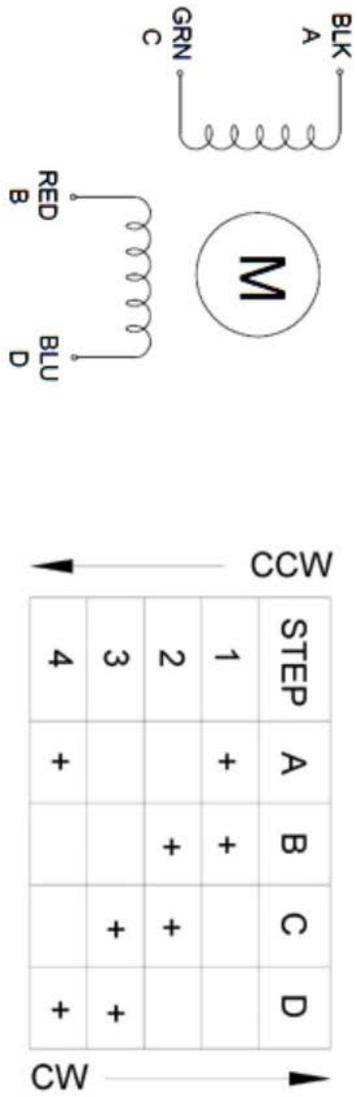
Model	Length
17HS2XXX	28 mm
17HS3XXX	34 mm
16HS4XXX	40 mm
16HS8XXX	48 mm

ANEXO 2 - Datasheet Reductor 5.18:1 Modelo PG518

Dibujo



Conexión de cable



ANEXO 3 - Datasheet DC BRUSHLESS FAN 12V

Fan, DC Types, 40 x 40mm



Features

- High Speed
- Ball Bearings
- 26 AWG Red (+) and Black (-) Leads
- 11.8" (300mm) Lead Length



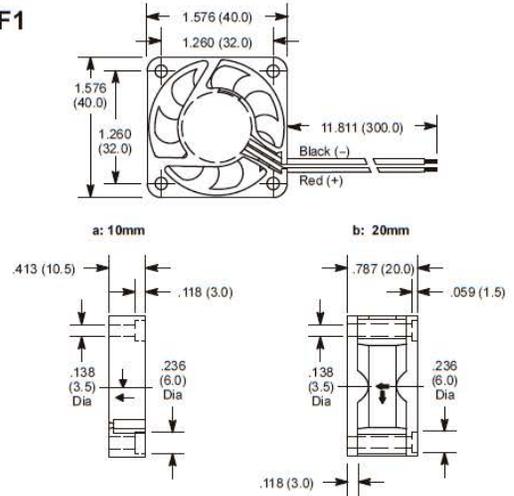
DC OPERATED

NTE Type No.	Rated Voltage	Max. Input Current	Max. Input Power (W)	Speed ±10% (RPM)	Max Air Flow (CFM)	Max Acoustical Noise	Diag No.
77-4010D12	12	0.10A	1.24	7000	7.73	36dB(A)	F1a
77-4010D24	24	0.10A	2.48	7000	7.73	36dB(A)	F1a
77-4020D12	12	0.14A	1.66	7500	8.13	35dB(A)	F1b
77-4020D24	24	0.08A	1.93	7500	8.13	35dB(A)	F1b

ACCESSORIES

FAN TYPE	DESCRIPTION	NTE TYPE NO.
40 X 40mm	Fan Guard, Metal	77-MG40
40 X 40mm	Fan Filter, 3-Piece w/Cover	77-FF40

F1



Specifications

Electrical Characteristics

Insulation Resistance: 10M \pm Min. (at 500VDC) between frame and positive terminal

Dielectric Strength: 500VAC, 1 minute; 600VAC, 1 sec at 5mA Max. between frame and positive terminal

Life Expectancy: Approx. 70000 hours at rated voltage, +40°C, 15% to 65% RH

Mechanical Characteristics

Frame: Thermoplastic, Black, UL94V-0

Impeller: Thermoplastic, Black, UL94V-0

Bearing: 2 Ball Bearings

Weight: Approx. 16g (10mm); 29g (20mm)

Environmental Characteristics

Operating Temperature: -10°C to +70°C

Storage Temperature: -40°C to +75°C

Operating Humidity: 35% to 85% RH

Storage Humidity: 35% to 85% RH

Protection

Polarity: Damage will not occur for up to 10 minutes with positive and negative leads connected in reverse.

Locked Rotor: Within 72 hours of a rotor locking condition, at the rated voltage and operating temperature, the impedance of the motor winding will protect the motor from damage.

ANEXO 2 - Cotización Materiales de Construcción Prototipo



**SOCIEDAD DISTRIBUIDORA DE MATERIALES
INDUSTRIALES Y MARITIMOS
PROINMAR LTDA.
RUT:79.845.300-9
FONO: 322255630**

cotizacion N° **RGG 23I** FECHA: 28-04-2020

SEÑORES: **Universidad Santa Maria**

ATENCION A: **Jose Alfaro**

	DESCRIPCION	V.UNITARIO	V.TOTAL
1	barra duroal 3/4*1000	\$ 21.000	\$ 21.000
3	br sae 640 1 1/2*330	\$ 50.000	\$ 150.000
1	ac 316 inox 1/2*1000	\$ 5.900	\$ 5.900
1	br lam hex 5 /16*1000	\$ 3.600	\$ 3.600
1	Plancha Aluminio 1000x1000x3	\$ 33.450	\$ 33.450
1	Plancha Aluminio 1000x1000x1,5	\$ 27.272	\$ 27.272
1	Plancha Acrilico 1000x500x3	\$ 27.500	\$ 27.500
	Subtotal		\$ 268.722
	IVA		
	Total		\$ 319.779

ANEXO 3 - Cotización Materiales Electrónicos



AFEL Ingeniería SpA

76.570.743-9

(56) 2 240 140 74

Rafael Cañas 114 Of. 1B, Providencia

jueves, 06 de diciembre del 2018

Estimado/a Jose Alfaro,

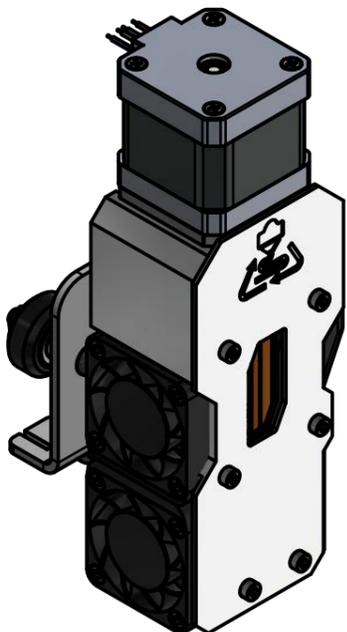
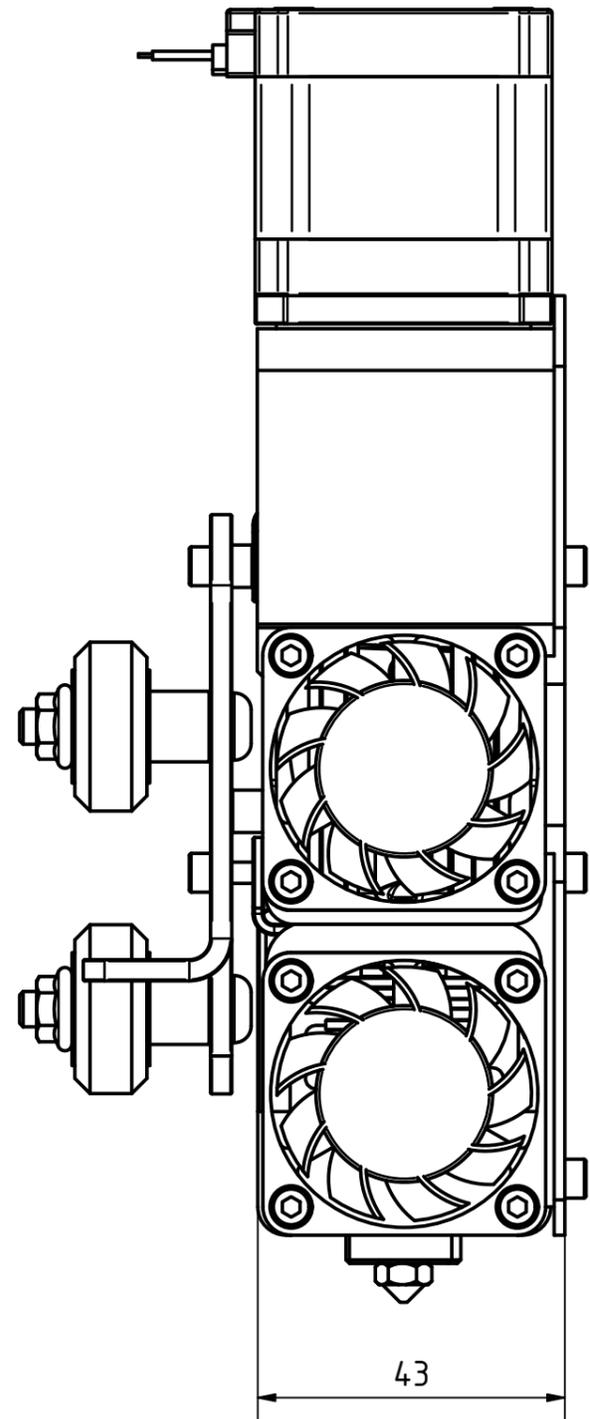
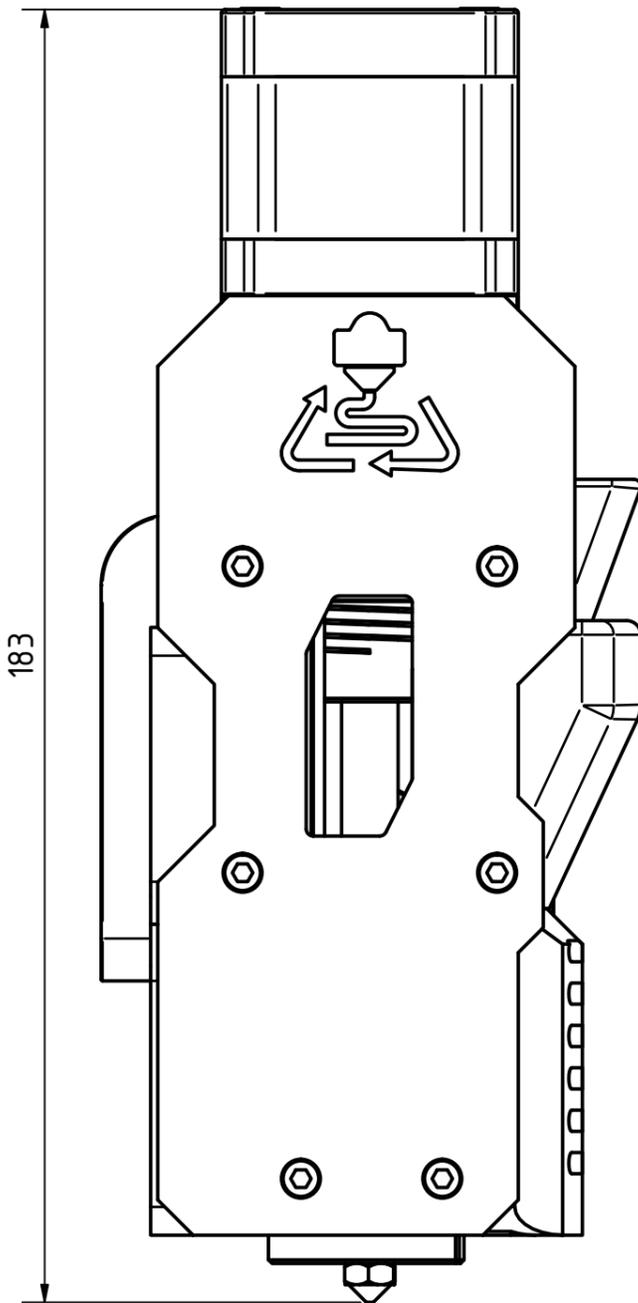
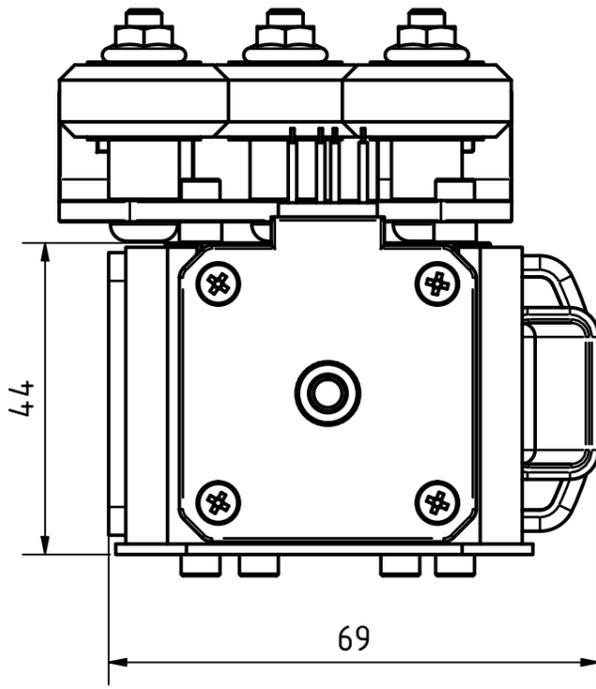
Atendiendo su amable solicitud, enviamos la siguiente cotización.

CLIENTE | UNIVERSIDAD FEDERICO SANTA MARÍA
RUT CLIENTE |
DIRECCIÓN |

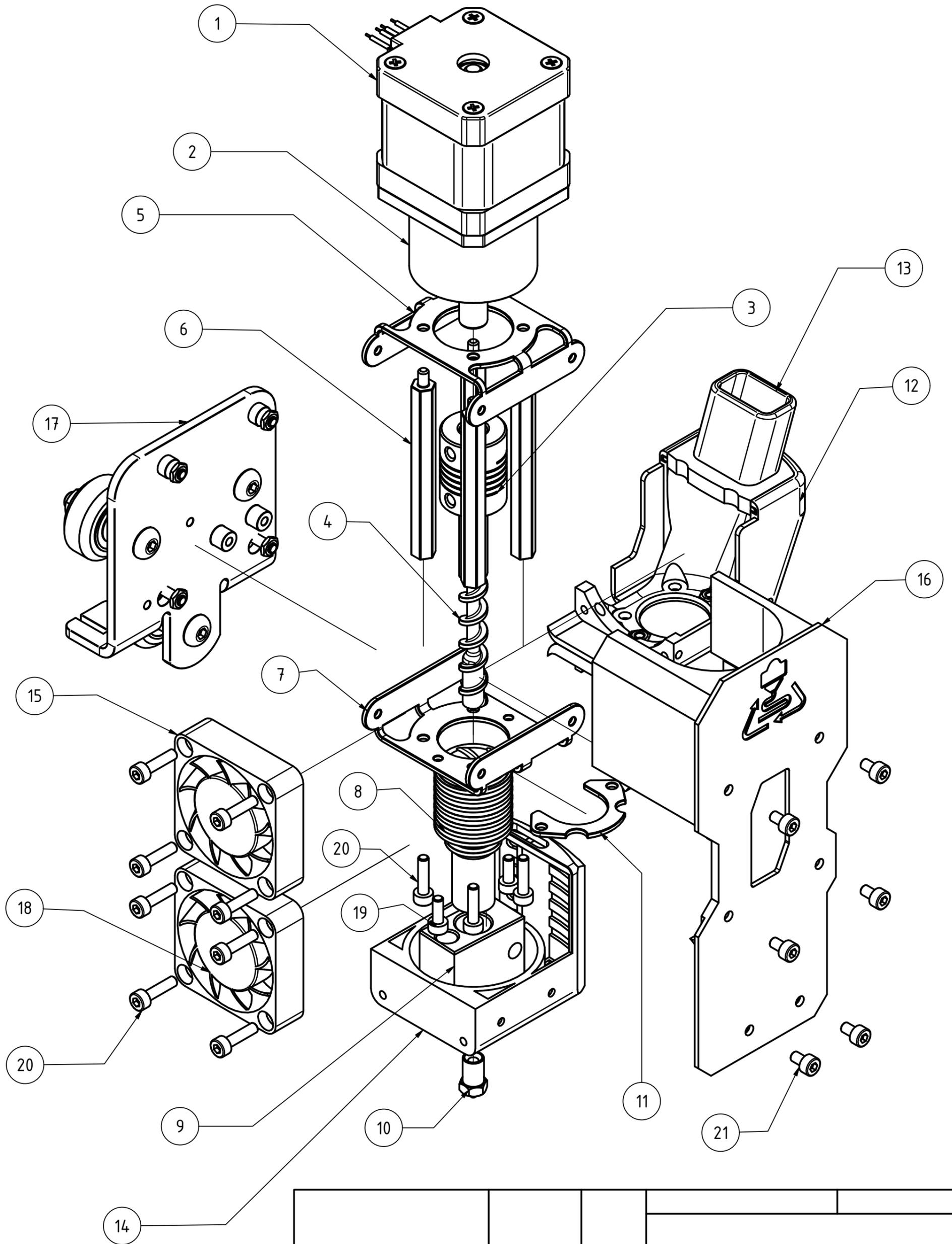
CÓDIGO	PRODUCTO	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	DESCUENTO UNITARIO	VALOR TOTAL
SKU-1018	ARDUINO MEGA 2560 KIT 10 PUNTAS	1	\$ 13,436.97	\$ 0.00	\$ 13,436.97
SKU-1070	FRESAS BROCA CNC 0,3MM A 1,2MM CALENTADOR	2	\$ 4,193.28	\$ 0.00	\$ 8,386.55
SKU-1106	CARTUCHO EXTRUSOR 12V 40W	2	\$ 2,521.01	\$ 0.00	\$ 5,042.02
SKU-1117	FUENTE DE PODER 12V - 10A - 120W	1	\$ 7,983.19	\$ 0.00	\$ 7,983.19
SKU-1193	MOTOR PASO A PASO NEMA 17 MODELO 17HS4401 1.7A	2	\$ 13,445.38	\$ 0.00	\$ 26,890.76
SKU-1230	NOZZLE PUNTA IMPRESORA 3D 0,5MM M6	1	\$ 840.34	\$ 0.00	\$ 840.34
SKU-1233	NOZZLE PUNTA IMPRESORA 3D 1MM M6	1	\$ 840.34	\$ 0.00	\$ 840.34
SKU-1238	REGLETA MACHO HEMBRA PIN HEADER	4	\$ 210.08	\$ 0.00	\$ 840.34
SKU-1262	ACOPLAMIENTO FLEXIBLE 5X10MM	1	\$ 2,100.84	\$ 0.00	\$ 2,100.84
SKU-1263	ACOPLAMIENTO FLEXIBLE 5X8MM	1	\$ 2,100.84	\$ 0.00	\$ 2,100.84
SKU-1355	SHIELD LCD KEYPAD 16X02 - 5 BOTONES	1	\$ 4,705.88	\$ 0.00	\$ 4,705.88
SKU-1356	SHIELD RELÉ 4 CANALES ARDUINO	1	\$ 5,462.18	\$ 0.00	\$ 5,462.18
SKU-1378	DRIVER MOTOR PASO A PASO - TB6600 - 0.2- 5A / 12-48VDC	1	\$ 15,966.39	\$ 0.00	\$ 15,966.39
SKU-1382	TERMISTOR 100K NTC 3950 1MTS	2	\$ 2,100.84	\$ 0.00	\$ 4,201.68
SKU-1388	VENTILADOR COOLING FAN 5015 12V	2	\$ 2,941.18	\$ 0.00	\$ 5,882.35
SKU-1389	VENTILADOR 4010 12V	2	\$ 2,521.01	\$ 0.00	\$ 5,042.02
SKU-1412	CABLE DUPONT PLANO 40 PINES 1MT	2	\$ 4,193.28	\$ 0.00	\$ 8,386.55
SKU-1673	KIT 10 PUNTAS	1	\$ 12,596.64	\$ 0.00	\$ 12,596.64

TITANIUM 1 A 3 MM

SUBTOTAL	\$ 130,705.88
DESCUENTO GLOBAL	\$ 0.00
MONTO NETO	\$ 130,705.88
I.V.A TOTAL	\$ 24,834.12
TOTAL	\$ 155,540



		Fecha	Nombre	Ensamble General Sistema Extrusor Modular FDM			
		Creado 09-06-2020	Jose Alfaro				
		Revisado	S. Geywitz				
		Norma					
				 DEPARTAMENTO DE DISEÑO Y MANUFACTURA UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA		MOSYS-FDM	
						1	
Estado	Cambios	Fecha	Nombre				
				A3			



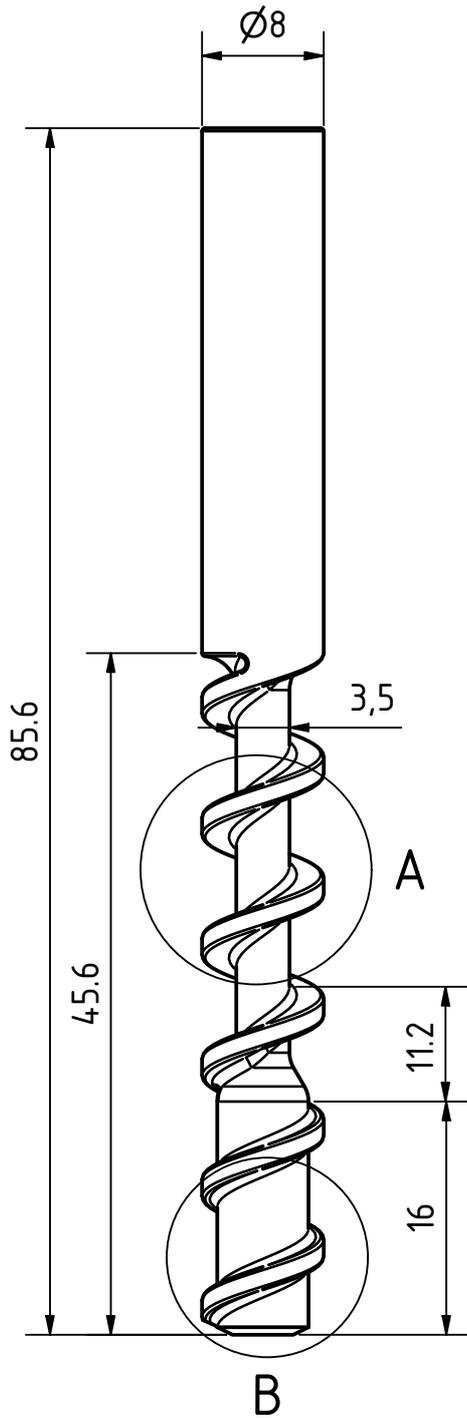
				Fecha	Nombre	Vista Exploración Sistema Extrusor Modular
			Creado	09-06-2020	Jose Alfaro	
			Revisado		S. Geywitz	
			Norma			
				 DEPARTAMENTO DE DISEÑO Y MANUFACTURA UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA		MOSYS-FDM
Estado	Cambios	Fecha	Nombre			2 A3

LISTA DE PIEZAS

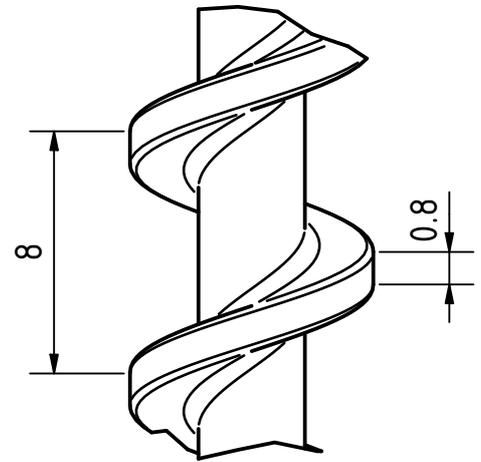
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	MATERIAL
1	1	Motor Nema 17HS4401		Genérico
2	1	caja reductora nema17		Genérico
3	1	Copla Mecánica Flexible		Aluminio 6061
4	1	Husillo Sin-Fin		Acero inoxidable
5	1	Placa Soporte Superior		Aluminio 6061
6	4	Soporte Espaciador		Bronces SAE 620
7	1	Placa Soporte Inferior		Aluminio 6061
8	1	Cilindro Hot-End		Bronce SAE 620
9	1	Bloque Calefactor Hot End		Bronce SAE 620
10	1	Boquilla		Genérico
11	1	Placa Fijación Cilindro		Aluminio 6061
12	1	Tolva		Plástico PLA
13	1	Alimentación Tolva		Plástico PLA
14	1	Carcasa Inferior ventilación		Plástico PLA
15	2	Ventilador 40x40 12V 1		Genérico
16	1	Carcasa Protección Frontal		Aluminio 6061
17	1	Sistema de Anclaje		
18	2	Ventilador 40x40 12V 2		Genérico
19	2	ISO 4762 - M3 x 8(1)	Tornillo de cabeza cilíndrica con hueco hexagonal	Acero inoxidable, 440C
20	12	ISO 4762 - M3 x 12(1)	Tornillo de cabeza cilíndrica con hueco hexagonal	Acero inoxidable, 440C
21	6	ISO 4762 - M3 x 5(1)	Tornillo de cabeza cilíndrica con hueco hexagonal	Acero inoxidable, 440C

				Fecha	Nombre	Lista de Piezas Sistema Extrusor Modular		
				Creado	09-06-2020			Jose Alfaro
				Revisado				S. Geywitz
				Norma				
				 DEPARTAMENTO DE DISEÑO Y MANUFACTURA UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA			MOSYS-FDM	
							3	
							A4	
Estado	Cambios	Fecha	Nombre					

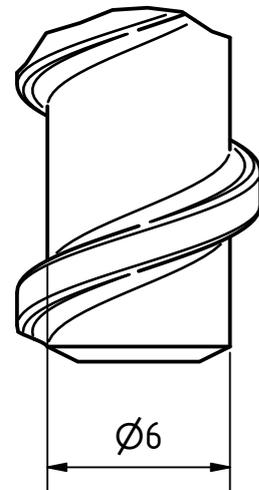
Torneado



A (4 : 1)



B (4 : 1)



Nota 1: Las medidas prevalecen sobre el plano.

Nota 2: Todas las aristas con un radio mínimo de 2[mm]

						Cantidad: 1			
						Barra Acero Inoxidable			
				Fecha	Nombre	Husillo Sin-Fin			
				Creado	09-06-2020				Jose Alfaro
				Revisado					S. Geywitz
				Norma					
				DEPARTAMENTO DE DISEÑO Y MANUFACTURA UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA		MOSYS-FDM		4	
								A4	
Estado	Cambios	Fecha	Nombre						

Nota 1: Las medidas prevalecen sobre el plano.

Nota 2: Espesor plancha de 2[mm]

C (2 : 1)

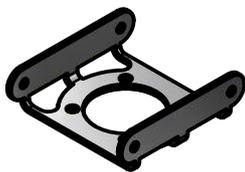
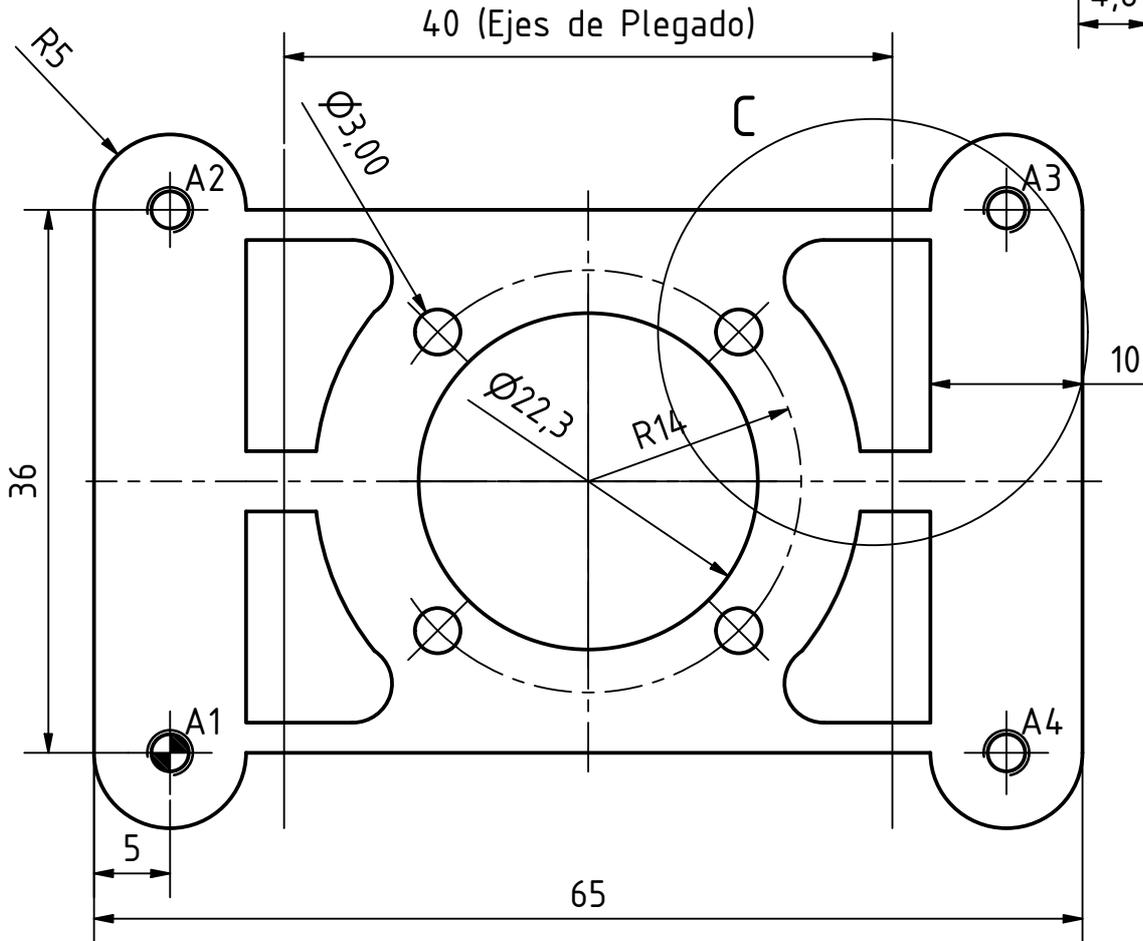
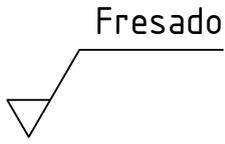
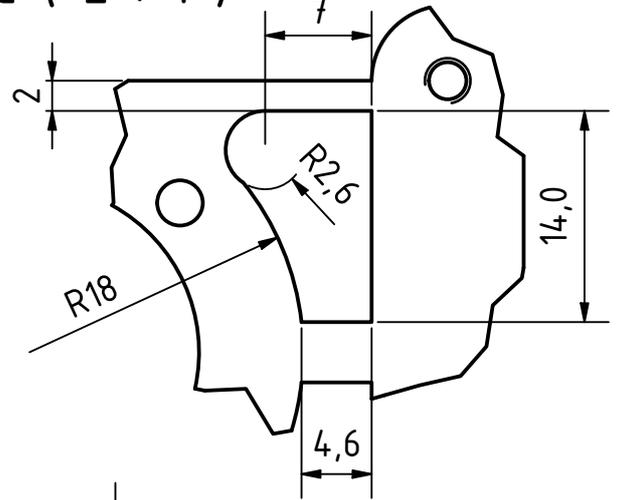
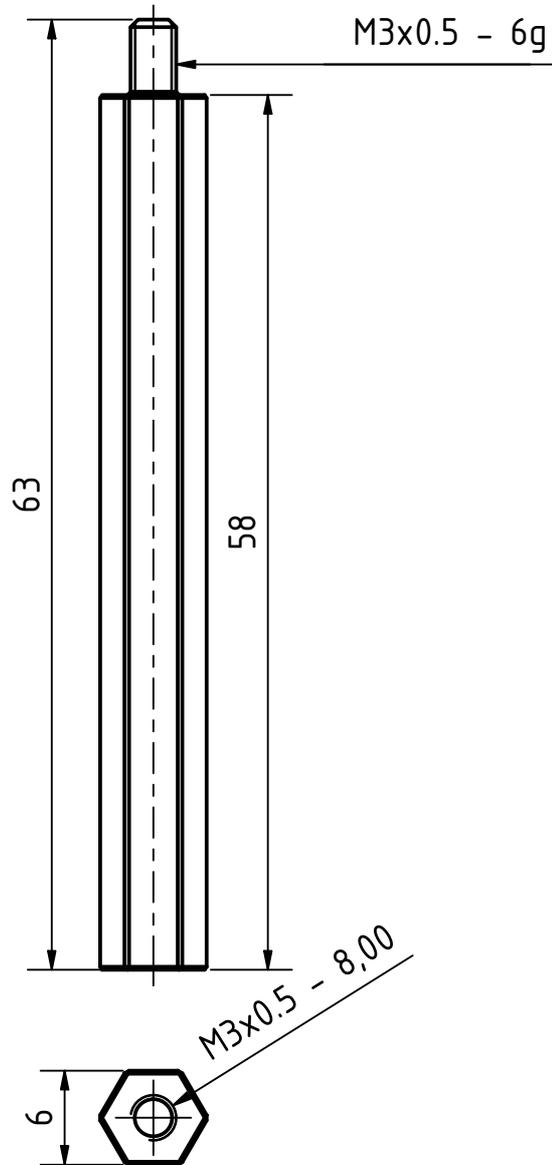


TABLA DE AGUJEROS

AGUJERO	COTA EN X	COTA EN Y	DESCRIPCIÓN
A1	0,00	0,00	M3x0.5 - 6H
A2	0,00	36,00	M3x0.5 - 6H
A3	55,00	36,00	M3x0.5 - 6H
A4	55,00	0,00	M3x0.5 - 6H

				Cantidad: 1		
				Plancha Aluminio 6061		
				<p style="font-size: 24px; text-align: center;">Placa Soporte Superior</p>		
Estado	Cambios	Fecha	Nombre			MOSYS-FDM
						5
						A4
				 DEPARTAMENTO DE DISEÑO Y MANUFACTURA UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA		

Torneado



Nota 1: Las medidas prevalecen sobre el plano.
 Nota 2: Radio de aristas 0.5[mm]

						Cantidad: 4			
						Bronces SAE 640			
				Fecha	Nombre	Soporte Espaciador			
				Creado	09-06-2020				Jose Alfaro
				Revisado					S. Geywitz
				Norma					
				 DEPARTAMENTO DE DISEÑO Y MANUFACTURA UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA		MOSYS-FDM		6	
Estado	Cambios	Fecha	Nombre					A4	

Nota 1: Las medidas prevalecen sobre el plano.

Nota 2: Espesor plancha de 2[mm]

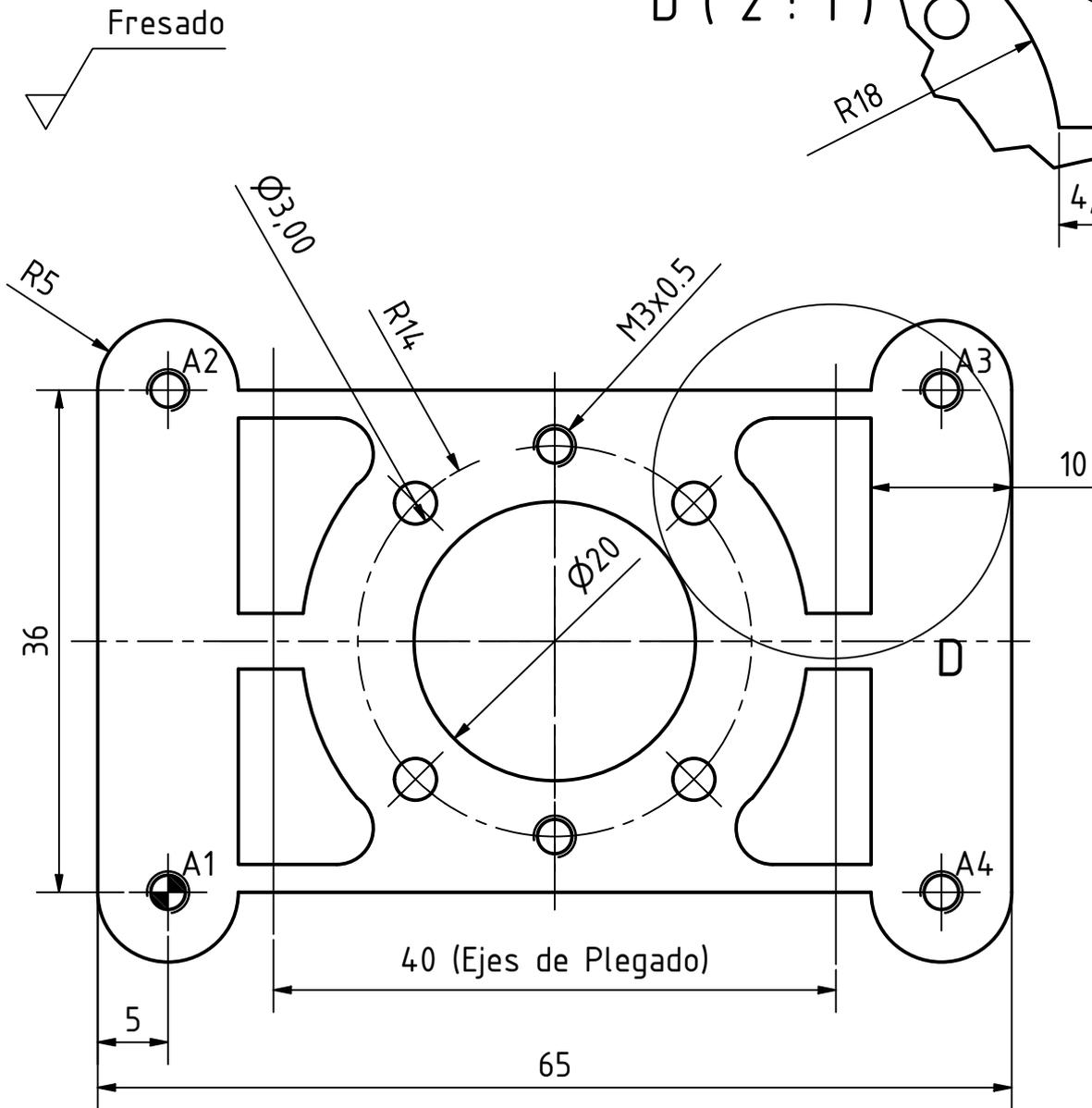
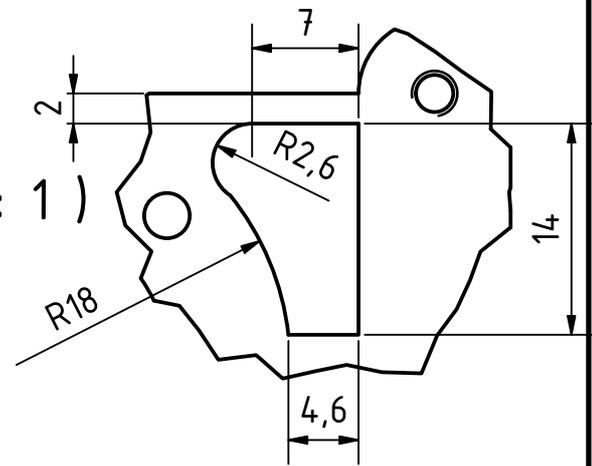
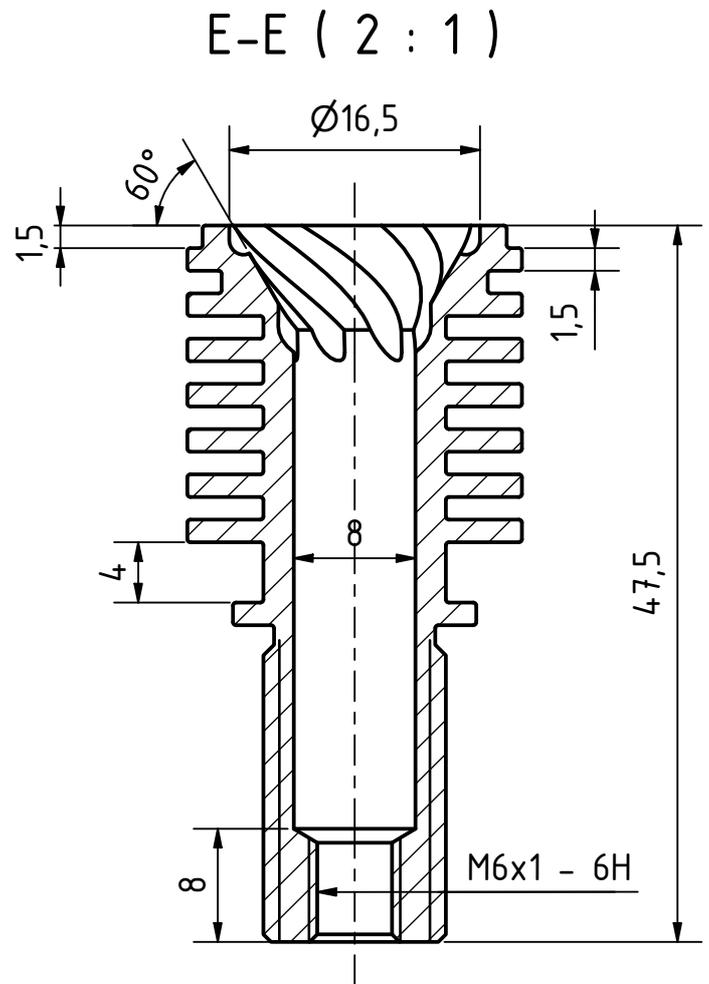
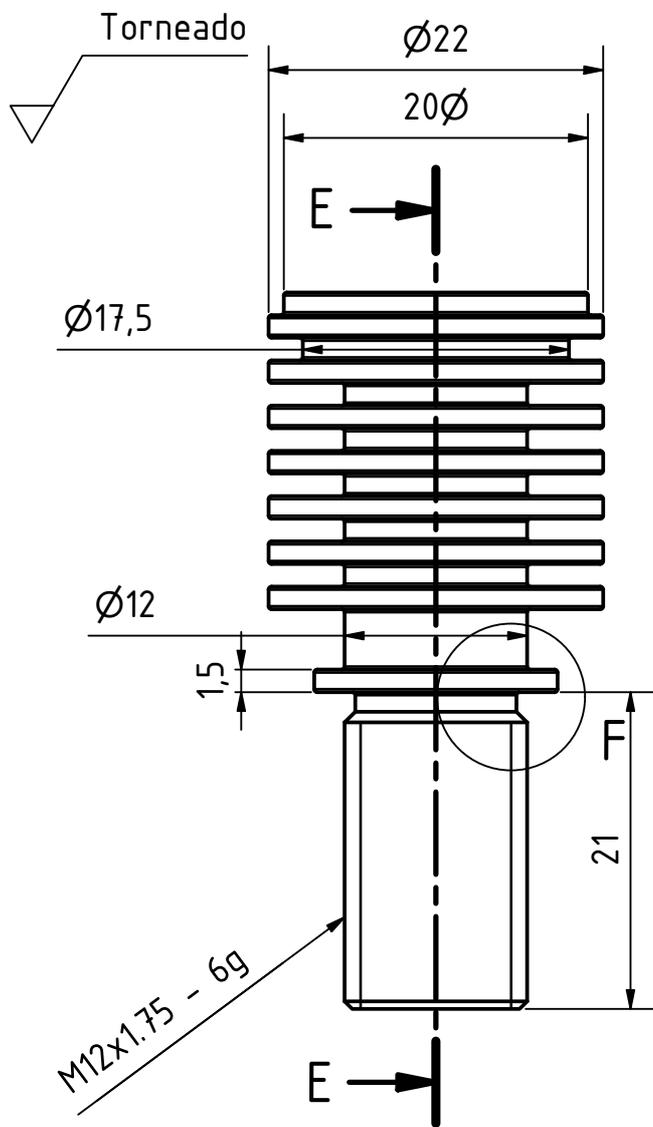


TABLA DE AGUJEROS			
AGUJERO	COTA EN X	COTA EN Y	DESCRIPCIÓN
A1	0,00	0,00	M3x0.5 - 6H
A2	0,00	36,00	M3x0.5 - 6H
A3	55,00	36,00	M3x0.5 - 6H
A4	55,00	0,00	M3x0.5 - 6H

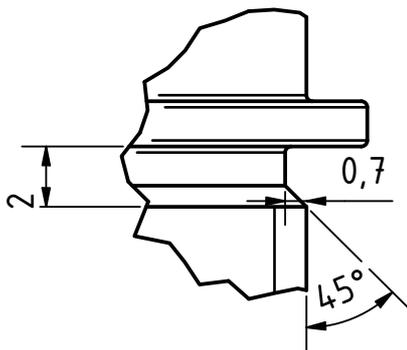
				Cantidad: 1			
				Plancha Aluminio 6061			
				Placa Soporte Inferior			
		Fecha	Nombre				
		Creado	09-06-2020			Jose Alfaro	
		Revisado				S. Geywitz	
		Norma					
				MOSYS-FDM			
				7			
				A4			
Estado	Cambios	Fecha	Nombre				



DEPARTAMENTO DE
DISEÑO Y MANUFACTURA
UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA



F (4 : 1)



Nota 1: Las medidas prevalecen sobre el plano.

Nota 2: Todas las aristas con un bisel de 0.5[mm]

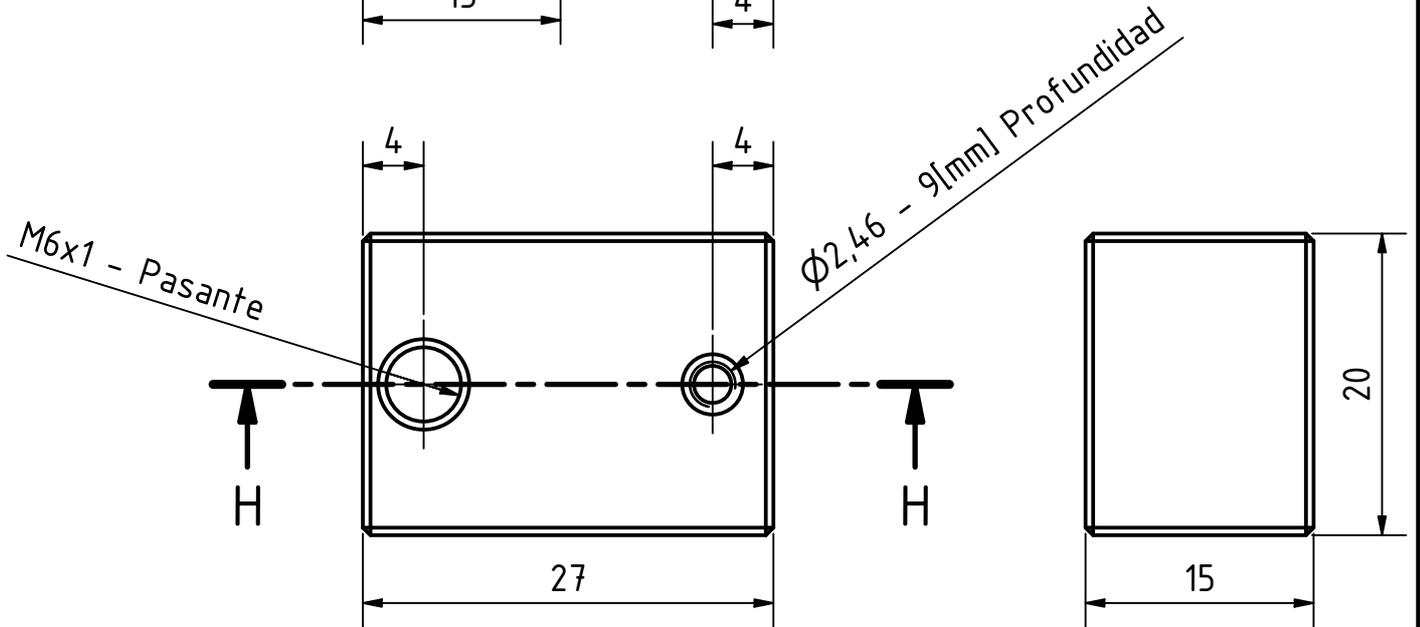
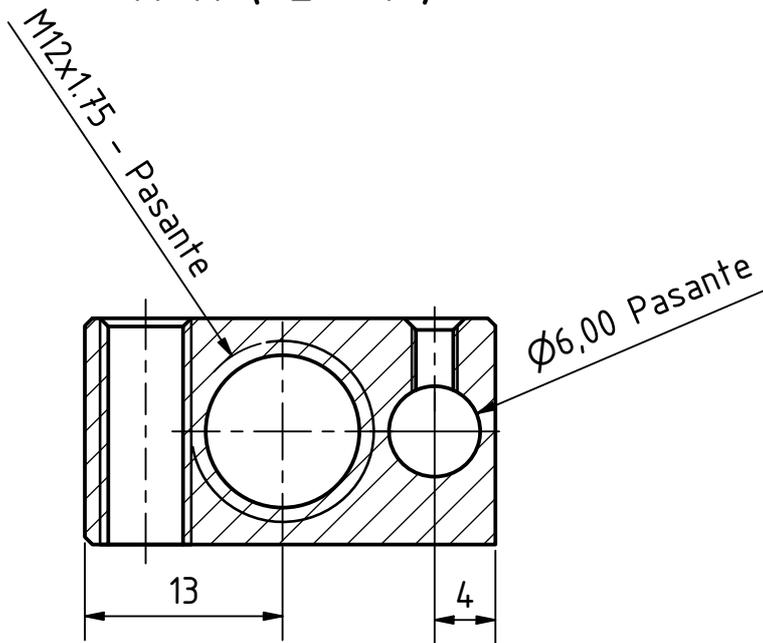
				Cantidad: 1	
				Bronces SAE 640	
			Fecha	Nombre	
			Creado 09-06-2020	Jose Alfaro	
			Revisado	S. Geywitz	
			Norma		
				Cilindro Hot-End	
				MOSYS-FDM	
				8	
				A4	
Estado	Cambios	Fecha	Nombre		



DEPARTAMENTO DE
DISEÑO Y MANUFACTURA
UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Fresado

H-H (2 : 1)

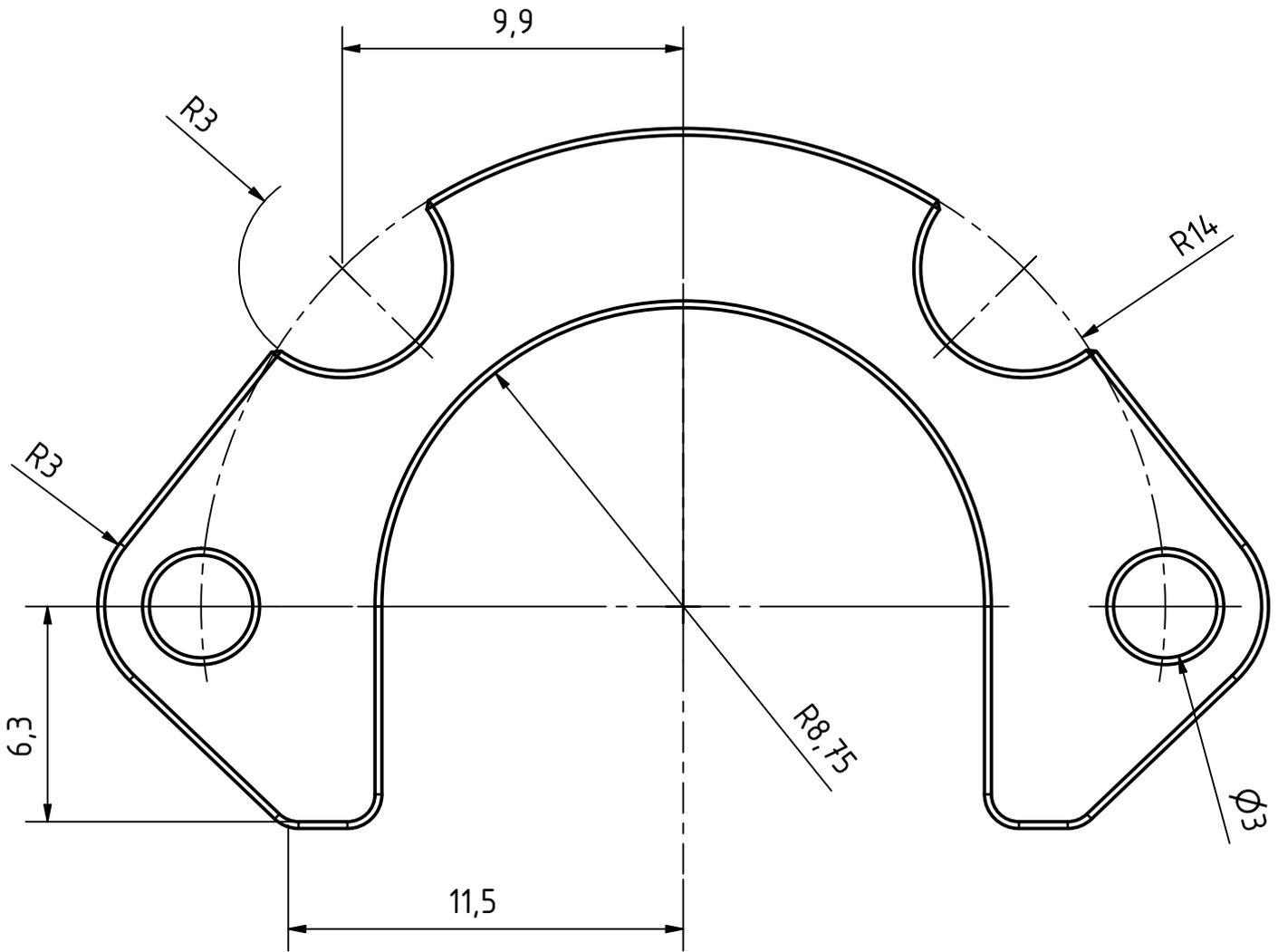
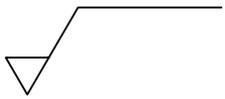


Nota 1: Las medidas prevalecen sobre el plano.

Nota 2: Todas las aristas con un bisel de 0.5[mm]

				Cantidad: 1	
				Bronces SAE 640	
			Fecha	Nombre	
			Creado 09-06-2020	Jose Alfaro	
			Revisado	S. Geywitz	
			Norma		
				DEPARTAMENTO DE DISEÑO Y MANUFACTURA UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA	
				Bloque Calefactor Hot-End	
				MOSYS-FDM	
				9	
				A4	
Estado	Cambios	Fecha	Nombre		

Fresado



Nota 1: Las medidas prevalecen sobre el plano.

Nota 2: Espesor plancha de 1.5[mm]

				Cantidad: 1	
				Plancha Aluminio 6061	
			Fecha	Nombre	
			Creado 09-06-2020	Jose Alfaro	
			Revisado	S. Geywitz	
			Norma		
				 DEPARTAMENTO DE DISEÑO Y MANUFACTURA UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA	
				MOSYS-FDM	
				10	
				A4	
Estado	Cambios	Fecha	Nombre		