



**Diseño y construcción de un prototipo de extrusor de doble tornillo (EDT) para fabricación de filamento polimérico con alta carga metálica para impresión 3D mediante tecnología FDM.**

Chávez Larrea, Roberto Andrés y Narváez Porras, Andrés Patricio

Departamento de Ciencias de la Energía Y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Ing. Ocaña Garzón, Edwin Marcelo, PhD.

Sangolquí, 07 de diciembre del 2021



#### Document Information

---

<b>Analyzed document</b>	TesisEDT_Chavez-Narvaez_20211117.pdf (D118958936)
<b>Submitted</b>	2021-11-17 20:15:00
<b>Submitted by</b>	Farroyo
<b>Submitter email</b>	frarroyo@uce.edu.ec
<b>Similarity</b>	3%
<b>Analysis address</b>	frarroyo.uce@analysis.orkund.com

#### Firma:



Firmado electrónicamente por:  
**EDWIN MARCELO  
OCAÑA GARZÓN**

---

Ing. Edwin Marcelo Ocaña Garzón PhD.  
C.C: 1714013610



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

### Certificación

Certifico que el trabajo de titulación, **“Diseño y construcción de un prototipo de extrusor de doble tornillo (EDT) para fabricación de filamento polimérico con alta carga metálica para impresión 3D mediante tecnología FDM”** fue realizado por los señores **Chávez Larrea, Roberto Andrés** y **Narváez Porras, Andrés Patricio**, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 07 de diciembre del 2021

Firma:



Firmado electrónicamente por:  
**EDWIN MARCELO  
OCAÑA GARZÓN**

---

Ing. Ocaña Garzón, Edwin Marcelo, PhD.  
C.C: 1714013610



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**Responsabilidad de Autoría**

Nosotros, **Chávez Larrea, Roberto Andrés**, con cédula de ciudadanía N°1715599195, y **Narváez Porras Andrés Patricio** con cédula de ciudadanía N°1715797492 declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación **“Diseño y construcción de un prototipo de extrusor de doble tornillo (EDT) para fabricación de filamento polimérico con alta carga metálica para impresión 3D mediante tecnología FDM”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 17 de noviembre de 2021

Firma:

**Chávez Larrea, Roberto Andrés**

**C.C: 1715599195**

**Narváez Porras, Andrés Patricio**

**C.C: 1715797492**



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**

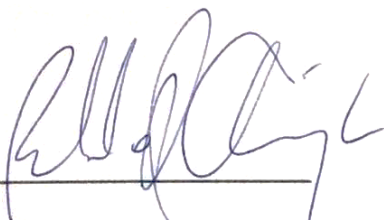
**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**Autorización de Publicación**

Nosotros, **Chávez Larrea, Roberto Andrés**, con cédula de ciudadanía N°1715599195, y **Narváez Porras Andrés Patricio** con cédula de ciudadanía N°1715797492 autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Diseño y construcción de un prototipo de extrusor de doble tornillo (EDT) para fabricación de filamento polimérico con alta carga metálica para impresión 3D mediante tecnología FDM”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad

Sangolquí, 17 de noviembre de 2021


Firma:



---

**Chávez Larrea, Roberto Andrés**

C.C: 1715599195



---

**Narváez Porras, Andrés Patricio**

C.C: 1715797492

**Dedicatoria.****Roberto**

A mis padres Fernando y Mariana, que han sido siempre mi fuente de inspiración, trabajo y pasión. Siempre demostrando su apoyo tanto en los malos como los buenos momentos. Con sus educación y valores me han llevado a convertirme en la persona que soy hoy.

A mi hermana Daniela, por su cariño, el siempre sacarme adelante con sabios consejos y su amor. A ella dedico todo el esfuerzo que he dado para ser la persona que soy al día de hoy.

A mi familia por su sabiduría, paciencia y humor, siempre han sabido brindarme palabras de aliento y empuje cuando más lo he necesitado.

A mis amigos por su apoyo incondicional, han sido las personas que me han ayudado a aclarar el camino cuando todo ha estado nublado.

**Andrés**

El presente trabajo es dedicado a mi mamá Lucía quien es mi pilar y el amor de mi vida que por su paciencia, amor y bendición he llegado a cumplir mi objetivo.

A mi hermano Kevin que desde el cielo me ha cuidado y acompañado siempre.

A mis Hermanos Esteban y Adrián por llenarme de alegría.

A mis abuelitos Manuel, Carlotita, Efraín y Consuelo por su apoyo, palabras, ejemplo y enseñanzas.

**Agradecimiento.****Roberto**

A mi padre, Fernando que siempre me ha enseñado que el trabajo duro y honesto siempre es bien recompensado y ha sido mi guía para salir adelante. Por todo su amor, cariño y sabiduría siempre voy a estar agradecido.

A mi madre, Marianita que me ha apoyado en cada decisión tomada, que me ha brindado siempre palabras de aliento y cariño y por todo su amor incondicional. Siempre ha sido la luz en los momentos más difíciles.

A mi hermana, Dani que más que hermana es mi mejor amiga, le agradezco el apoyo y confianza que me permite conseguir siempre mis metas incluso las más complicadas de lograr.

A mi familia y amigos por todas las palabras, las risas, los consejos a lo largo de los años, me permiten conseguir uno de mis sueños más deseados.

A los docentes de la Carrera de Ingeniería Mecatrónica, que, con todo el conocimiento impartido, permiten convertirme en una persona lista para enfrentarme a los problemas y retos de la vida laboral y personal.

**Andrés**

Agradezco a Dios por llenarme de bendiciones y darme fuerzas en los momentos más difíciles. A mi mamá por estar junto a mí en todo momento que con su cariño y dedicación me ha sacado adelante. A mi papá por ayudarme incondicionalmente y por ser siempre a donde puedo regresar a ver. A mi tía Paty y tía Zoilita por criarme, enseñarme, aconsejarme incondicionalmente y hacer de mi un hombre de principios y valores. A mi Tío Xavier por su ejemplo, palabras y consejos incondicionales. A mi familia Narváez y a mi familia Porras por su apoyo y consejos quienes jamás me dejaron caer.

Agradezco a mis amigos por estar cada momento compartido y sus palabras de aliento.

Al Ing. Borys Culqui por su ayuda y confianza quien ha sido un gran guía dentro de la universidad quien con sus consejos me ayudo a superar adversidades e inconvenientes que se presentaron en mi formación académica.

**Acrónimos.**

EDT	Extrusor De Doble Tornillo
AM	Additive Manufacturing
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fuse Filament Fabrication
MIM	Metal Injection Moulding
CPM	Concentración De Polvo Metálico
CAD	Diseño asistido por computador
STL	Stereolithography
PP	Polipropileno
PVC	Policloruro de vinilo
PA	Poliamida de nylon
PETG	Glicol-Polyethylene Terephthalate
PLA	Ácido Poliláctico
ABS	Acrilonitrilo-Butadieno-Stireno
PEEK	Poliéster-éter-cetona



**Contenido**

Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Acrónimos.....	8
Resumen.....	22
Abstract.....	23
Capítulo I: Generalidades.....	24
Tema.....	24
Objetivos:.....	25
Objetivo general.....	25
Objetivos específicos.....	25
Importancia.....	26
Justificación.....	26
Alcance del proyecto.....	27
Componentes mecánicos.....	27
Componentes eléctricos y electrónicos.....	27
Filamento de alta carga metálica.....	28
Pruebas y resultados.....	28
Capítulo II: Estado del Arte.....	29
Antecedentes.....	29
Manufactura Aditiva.....	29

Proceso de fabricación de una pieza metálica.....	31
Metal Injection Moulding (MIM). ....	31
Fused Filament Fabrication (FFF).....	32
Extrusora De Filamento. ....	34
Extrusión .....	34
Maquina Extrusora.....	35
Tipos de extrusoras.....	39
Extrusora de filamento con alta carga metálica .....	53
Filamentos para FDM.....	55
Filamento Polimérico.....	55
Propiedades relevantes de las bases poliméricas.....	57
Filamento con carga metálicas .....	60
Polvo Metálico. ....	62
Aplicaciones generales de polvos metálicos en impresión 3D. ....	64
Propiedades relevantes de las cargas metálicas.....	67
Bases poliméricas con refuerzos de carga metálica utilizados en filamentos.....	69
Calentamiento por calefacción eléctrica. ....	70
Calor.....	71
Temperatura. ....	71
Transferencia de calor. ....	71

Método de calentamiento.....	72
Calentador eléctrico.....	72
Medición de temperatura.....	73
Termorresistencia RTD.....	73
Termistores.....	73
Termocupla.....	74
Sistema de Control.....	74
Sistema de Control en Lazo Abierto.....	75
Sistema de Control en Lazo Cerrado.....	75
Control ON/OFF.....	75
Estudio del Arte.....	76
Capítulo III: Materiales y Métodos.....	78
Metodología.....	78
Requisitos.....	79
Diseño del sistema.....	79
Ámbito específico del diseño.....	79
Modelización y análisis del modelo.....	79
Integración del sistema.....	79
Verificación/Validación.....	80
Producto.....	80

Diseño Conceptual .....	80
Requerimientos.....	80
Función de calidad (QFD).....	81
Selección de materiales para filamento. ....	82
Selección de polvo metal. ....	82
Selección de matriz polimérica. ....	83
Selección de materiales para maquina extrusora.....	85
Material del barril. ....	85
Material del Tornillo. ....	86
Material de la boquilla. ....	86
Material del dado Extrusor. ....	86
Material aislante. ....	87
Capítulo IV: Diseño Mecánico – Térmico .....	88
Viscosidad Efectiva.....	88
Potencia Requerida.....	89
Barril.....	90
Garganta de alimentación.....	90
Tolva.....	90
Tornillo Extrusor.....	91
Calculo relación L/D. ....	94

Volumen uno.....	95
Volumen dos. ....	96
Volumen tres.....	96
Volumen total. ....	97
Caudal Teórico. ....	98
Cambio de presión de presión axial.....	98
Flujo de fuga de calentamiento. ....	99
Flujo de fuga de espacio tetraédrico. ....	100
Flujo de fuga de espacio de vuelo.....	100
Flujo de fuga de espacio lateral. ....	101
Caudal total.....	102
Presión Máxima en el tornillo extrusor. ....	102
Presión de operación en la boquilla.....	103
Fuerzas del tornillo. ....	103
Placa Rompedora. ....	108
Dado Extrusor. ....	109
Transmisión de potencia.....	111
Diseño de Engranés.....	111
Diseño de Eje.....	116
Gradiente de temperatura.....	117

Diámetro del perfil extruido. ....	118
Base de la maquina extrusora.....	119
Diseño conceptual. ....	120
Simulación térmica. ....	123
Simulación mecánica. ....	124
Capítulo V: Sistema electrónico y construcción.....	128
Sistema Eléctrico.....	128
Sistema de control. ....	132
Construcción. ....	133
Materia Prima. ....	135
Capítulo VI: Pruebas y resultados .....	138
Pruebas Mecánicas. ....	138
Extrusora. ....	138
Velocidad de rotación de los tornillos. ....	138
Velocidad de salida de material. ....	141
Diseño de experimentos (DOE).....	142
Diámetro Obtenido. ....	143
Ensayo de tracción. ....	145
Análisis Morfológico y de dispersión de PM en el filamento.....	147
Capítulo VII: Conclusiones y recomendaciones .....	150

Conclusiones.....	150
Recomendaciones y Trabajos futuros.....	152
Bibliografía.....	154
Anexos.....	165

## Índice de Tablas

Tabla 1	<i>Guía general para el diseño de un tornillo simple.</i>	43
Tabla 2	<i>Tipos de flujos presentes en el proceso de extrusión de doble tornillo.</i>	46
Tabla 3	<i>Comparación del funcionamiento en diferentes configuraciones de tornillos.</i>	48
Tabla 4	<i>Propiedades de los Filamentos poliméricos existentes.</i>	56
Tabla 5	<i>Propiedades de los polvos metálicos.</i>	64
Tabla 6	<i>Rango de temperatura de las termorresistencias</i>	73
Tabla 7	<i>Especificaciones de extrusoras comerciales.</i>	77
Tabla 8	<i>Matriz de selección para polvo metálico.</i>	82
Tabla 9	<i>Matriz de selección para matriz polimérica.</i>	84
Tabla 10	<i>Variables geométricas de tornillo extrusor</i>	92
Tabla 11	<i>Datos de entrada para el cálculo de variables geométricas del tornillo extrusor.</i>	93
Tabla 12	<i>Variables geométricas obtenidas.</i>	93
Tabla 13	<i>Valores de V1 para cada paso del tornillo.</i>	95
Tabla 14	<i>Valores de V2 para cada paso del tornillo</i>	96
Tabla 15	<i>Valores de V3 para cada paso del tornillo</i>	97
Tabla 16	<i>Valores de volumen total para cada paso del tornillo</i>	97
Tabla 17	<i>Valores de caudal teórico para cada paso del tornillo.</i>	98
Tabla 18	<i>Valores de cambio de presión para cada paso del tornillo.</i>	99
Tabla 19	<i>Valores de flujo de fuga de calentamiento para cada paso del tornillo</i>	99
Tabla 20	<i>Valores de Flujo de fuga de espacio tetraédrico para cada paso del tornillo</i>	100
Tabla 21	<i>Valores de Flujo de fuga de espacio de vuelo para cada paso del tornillo.</i>	101
Tabla 22	<i>Valores de Flujo de fuga de espacio lateral para cada paso del tornillo.</i>	101
Tabla 23	<i>Valores del caudal total para cada paso del tornillo.</i>	102



Tabla 24 <i>Volumen y masa total del tornillo extrusor</i> .....	103
Tabla 25 <i>Datos de entrada para estimación de modulo</i> .....	112
Tabla 26 <i>Cálculo del Módulo real</i> .....	112
Tabla 27 <i>Formulas constructivas para engranes</i> .....	113
Tabla 28 <i>Datos de entrada para el diseño del Engrane y Piñón</i> .....	113
Tabla 29 <i>Valores calculados para el diseño del engrane y piñón</i> .....	114
Tabla 30 <i>Fórmulas para cálculo de resistencia de diente</i> .....	114
Tabla 31 <i>Resultados obtenidos para el cálculo de la resistencia del diente</i> .....	115
Tabla 32 <i>Datos de Entrada para el cálculo del eje para engrane y piñón</i> .....	116
Tabla 33 <i>Diámetro de ejes para Engrane y Piñón</i> .....	117
Tabla 34 <i>Temperatura de las zonas de la maquina EDT</i> .....	117
Tabla 35 <i>Maquinas disponibles para mecanizado de piezas del EDT</i> .....	133
Tabla 36 <i>Material adquirido para el mecanizado de la maquina EDT</i> .....	134
Tabla 37 <i>Piezas mecanizadas del EDT</i> .....	134
Tabla 38 <i>Eficiencia de la maquina EDT</i> .....	138
Tabla 39 <i>Factores y Niveles del Experimento</i> .....	142
Tabla 40 <i>Temperaturas en la Maquina EDT para la extrusión de filamento</i> .....	142
Tabla 41 <i>Diseño del experimento</i> .....	142

## Índice de Figuras

Figura 1 <i>Industrias que utilizan los sistemas tecnológicos de AM.</i> .....	30
Figura 2 <i>Process Metal Injection Moulding (MIM).</i> .....	32
Figura 3 <i>Proceso de fabricación de piezas metálicas mediante FFF.</i> .....	33
Figura 4 <i>Partes de una maquina Extrusora.</i> .....	35
Figura 5 <i>Tornillo extrusor.</i> .....	37
Figura 6 <i>Partes del husillo.</i> .....	37
Figura 7 <i>Zonas de una extrusora.</i> .....	38
Figura 8 <i>Diagrama esquemático de un extrusor de tornillo doble.</i> .....	39
Figura 9 <i>Esquema de un extrusor de tornillo simple.</i> .....	40
Figura 10 <i>Elementos de un tornillo.</i> .....	42
Figura 11 <i>Clasificación por la dirección de rotación de los tornillos.</i> .....	45
Figura 12 <i>Tipos de extrusores de doble tornillo.</i> .....	45
Figura 13 <i>Comparación entre tornillos entrelazados y no entrelazados.</i> .....	47
Figura 14 <i>Parámetros de diseño de tornillos en un sistema de extrusión de doble tornillo.</i> .....	49
Figura 15 <i>Relación de torque y volumen libre.</i> .....	50
Figura 16 <i>Ejemplo de transición consistente en tornillos co-rotantes.</i> .....	51
Figura 17 <i>Ejemplo de montaje y diseño de tornillos.</i> .....	51
Figura 18 <i>Tipos de segmentos de transporte.</i> .....	52
Figura 19 <i>Disco de mezcla y segmentos de mezcla para un tornillo extrusor.</i> .....	53
Figura 20 <i>Proceso de extrusión de filamento.</i> .....	54
Figura 21 <i>Esquema de la Brabender TSE 20/40.</i> .....	54
Figura 22 <i>Resistencia a tracción de termoplásticos, se resalta: PEEK, ABS, PET, y PLA.</i> .....	57
Figura 23 <i>Elongación de termoplásticos, se resalta: PEEK, ABS, PET, y PLA.</i> .....	58

Figura 24 <i>Conductividad térmica de termoplásticos.</i> .....	58
Figura 25 <i>Coefficiente de expansión térmica de termoplásticos.</i> .....	59
Figura 26 <i>Temperatura de vitrificación de termoplásticos.</i> .....	60
Figura 27 <i>Industrias que utilizan Impresión de metales.</i> .....	66
Figura 28 <i>Resistencia a la tracción en materiales.</i> .....	67
Figura 29 <i>Elongación de materiales.</i> .....	68
Figura 30 <i>Conductividad térmica de materiales.</i> .....	68
Figura 31 <i>Mecanismos de transferencia de calor</i> .....	72
Figura 32 <i>Forma de niquelinas en el mercado</i> .....	72
Figura 33 <i>Termocupla</i> .....	74
Figura 34 <i>Sistema de Control en lazo cerrado con control PID.</i> .....	75
Figura 35 <i>Modelo en forma de V, norma VDI 2206.</i> .....	78
Figura 36 <i>QFD de la maquina EDT.</i> .....	81
Figura 37 <i>Barril y soporte de barril de la maquina EDT.</i> .....	85
Figura 38 <i>Viscosidad de la masa fundida vs la velocidad de cizallamiento para LDPE / PLA.</i> .....	89
Figura 39 <i>Garganta de alimentación.</i> .....	90
Figura 40 <i>Variables geométricas de un perfil de tornillo extrusor.</i> .....	91
Figura 41 <i>Tornillo extrusor</i> .....	95
Figura 42 <i>Diagrama de fuerzas en un tornillo.</i> .....	104
Figura 43 <i>Variables geométricas del plato rompedor.</i> .....	108
Figura 44 <i>Secciones del dado.</i> .....	110
Figura 45 <i>Ángulos para el PVC y el nylon.</i> .....	110
Figura 46 <i>Variables para el diseño de un dado.</i> .....	110
Figura 47 <i>Dado Extrusor.</i> .....	111

Figura 48 <i>Caja de transmisión de potencia Moto reductor – tornillos extrusores.</i> .....	117
Figura 49 <i>Temperaturas de la sección de Alimentación y mezcla.</i> .....	118
Figura 50 <i>Boquilla y dado extrusor.</i> .....	119
Figura 51 <i>Base de maquina extrusora.</i> .....	119
Figura 52 <i>Primera propuesta de diseño de la extrusora.</i> .....	120
Figura 53 <i>Segunda propuesta de diseño de extrusora.</i> .....	121
Figura 54 <i>Tercera propuesta de diseño de extrusora.</i> .....	121
Figura 55 <i>Penúltima propuesta de diseño de la extrusora.</i> .....	122
Figura 56 <i>Diseño de conceptual de la extrusora para filamento Polímero – Metal.</i> .....	123
Figura 57 <i>Simulación térmica de la EDT.</i> .....	124
Figura 58 <i>Deformaciones presentes en el Piñón.</i> .....	124
Figura 59 <i>Esfuerzos presentes en el piñón.</i> .....	125
Figura 60 <i>Desplazamiento presente en el plato rompedor.</i> .....	125
Figura 61 <i>Esfuerzos presentes el plato rompedor.</i> .....	126
Figura 62 <i>Desplazamiento presente en el tornillo extrusor.</i> .....	126
Figura 63 <i>Esfuerzo presente en el tornillo extrusor.</i> .....	127
Figura 64 <i>Sistema eléctrico de la extrusora.</i> .....	129
Figura 65 <i>Variador de frecuencia WEG CFW100.</i> .....	130
Figura 66 <i>Conexión eléctrica para la moto reductor.</i> .....	130
Figura 67 <i>Sistema de Calefacción.</i> .....	131
Figura 68 <i>Tarjeta de adquisición de datos Autonics TM4-N2SB 4.</i> .....	132
Figura 69 <i>Convertidor USB a RS232 Aislado.</i> .....	133
Figura 70 <i>Polvo Metálico Inoxidable 316L.</i> .....	136
Figura 71 <i>Pellet de PLA.</i> .....	136

Figura 72 <i>Mezcla de PLA y Polvo metálico.</i> .....	137
Figura 73 <i>Velocidad del motor y tornillos extrusores con y sin carga a 45 Hz.</i> .....	139
Figura 74 <i>Velocidad del motor y tornillos extrusores con y sin carga a 60 Hz.</i> .....	140
Figura 75 <i>Velocidad del motor y tornillos extrusores con y sin carga a 75 Hz.</i> .....	141
Figura 76 <i>Filamento obtenido por la EDT.</i> .....	143
Figura 77 <i>Histograma del diámetro de las muestras obtenidas</i> .....	144
Figura 78 <i>Parámetros que afectan al diámetro del filamento</i> .....	145
Figura 79 <i>Histograma de datos del ensayo de tracción</i> .....	146
Figura 80 <i>Parámetros que afectan la resistencia del filamento.</i> .....	146
Figura 81 <i>Probetas con tres muestras del filamento de cada corrida.</i> .....	147
Figura 82 <i>Imágenes obtenidas en el microscopio 100x.</i> .....	147
Figura 83 <i>Análisis de imagen en "ImageJ".</i> .....	148
Figura 84 <i>Histograma de ensayo morfológico</i> .....	149
Figura 85 <i>Efectos principales para el ensayo morfológico</i> .....	149

### **Resumen.**

En la actualidad los procesos de manufactura tradicionales han sido reemplazados por nuevos métodos para obtener piezas o componentes. La manufactura aditiva da al usuario la libertad de diseño y fabricación de componentes con geometrías complejas y costosas con respecto a la manufactura por arranque de viruta

El presente trabajo reúne el diseño y construcción de un prototipo de extrusor de doble tornillo para la extrusión de filamento con alta carga metálica de diámetro 1.75mm con producción de 2kg/h, de control robusto, con componentes modulares, de fácil mantenimiento y bajo costo.

Para lo cual se inició con un diseño conceptual de las partes necesarias para llevar el proceso de extrusión, posteriormente se reunieron los requerimientos necesarios los mismos que dictaminaban el funcionamiento de la máquina. Con los requerimientos obtenidos se realizaron los cálculos de los esfuerzos a los cuales iban a estar sometidas las piezas del prototipo para su posterior simulación y fabricación. Con ello se hizo el ensamble, pruebas y calibración de la maquina obteniendo un filamento con 60% y 80% de carga metálica, el cual puede ser utilizado para impresión en 3D por tecnología FDM.

Palabras Claves:

- **FDM**
- **EXTRUSOR DE DOBLE TORNILLO**
- **FILAMENTO CON ALTA CARGA METÁLICA**

### **Abstract.**

Nowadays, traditional manufacturing processes have been replaced by new methods to obtain parts or components. The additive manufacturing gives the user the freedom to design and manufacture complex and expensive geometries compared to manufacturing by chip removal. The present work brings together the design and construction of a prototype of a twin-screw extruder to obtain a filament with high metallic load with a diameter of 1.75mm (standard), with an outlet of 2kg per hour, robust control, modular components, easy and low maintenance fees. For which it began with a conceptual design of the necessary parts to carry on the extrusion process, later we obtain the essential requirements, the same that dictated the operation of the machine. Those obtained requirements, lend us to the calculation of stresses to which the prototype parts were going to be subjected were carried out, for later simulate and manufacture them.

With this, the assembly, testing and calibration of the prototype was carried out; obtaining a filament with 60% and 80% of metallic load, which can be used for 3D printing by FDM technology.

#### Keywords

- **FDM**
- **TWIN SCREW EXTRUDER**
- **FILAMENT WITH HIGH METALLIC LOAD**

## **Capítulo I: Generalidades**

En este capítulo se encuentra el tema, objetivos, importancia, justificación y alcance del trabajo de titulación.

### **Tema.**

Diseño y construcción de un prototipo de extrusor de doble tornillo (EDT) para fabricación de filamento polimérico con alta carga metálica para impresión 3D mediante tecnología FDM.



**Objetivos:*****Objetivo general.***

Diseñar y construir un prototipo de extrusor de doble tornillo (EDT) para fabricación de filamento polimérico con alta carga metálica para impresión 3D mediante tecnología FDM.

***Objetivos específicos.***

Los objetivos específicos para la fabricación del EDT, son los siguientes:

- Diseñar el prototipo del EDT conceptualmente;
- Seleccionar materiales para el filamento y el prototipo de extrusor;
- Diseñar mecánica y electrónicamente el extrusor, mediante metodologías de diseño de producto;
- Verificar el funcionamiento del EDT mediante simulación mecánica y térmica;
- Construir, montar, probar y calibrar el EDT;
- Caracterizar el filamento polimérico con alta carga metálica obtenido;

**Importancia.**

Los procesos tradicionales como fundición o arranque de viruta tienen como objetivo una producción a gran escala más no una producción unitaria es por lo que el costo de elaboración de una pieza es costoso por el diseño y por desperdicio de material.

La creciente demanda de piezas realizadas mediante manufactura aditiva como Selective Laser Sintering (SLS) y Selective Laser Melting (SLM), el bajo costo y la alta difusión del Modelado por Deposición Fundida (FDM), brindan una oportunidad para desarrollar materiales del tipo filamento con carga metálica por el método de extrusión de filamento polimérico, tecnología que está iniciando a explorar, debido a la creciente demanda de piezas fabricada por AM (Wolhers, 2018).

La influencia de los parámetros en el proceso de extrusión de un filamento polimérico con alta carga metálica contribuirá con nuevos conocimientos sobre las nuevas tecnologías de fabricación de piezas metálica (Sa'ude, Ibrahim, & Saidin, 2013).

**Justificación.**

El Modelado por Deposición Fundida (FDM) es el método más usado dentro de las impresiones 3D por su simple proceso, rentabilidad y bajo costo de producción frente a los otros métodos (Hwang & Reyes, 2015), por lo cual, parte del proceso de AM mediante FDM, involucra la utilización de un filamento técnicamente capaz de cumplir con las exigencias que tienen partes metálicas fabricadas mediante AM, por lo que para su fabricación requiere de un entendimiento y desarrollo de un extrusor capaz de brindar una correcta dosificación y a su vez permita estudiar las diferentes posibilidades de conseguir adecuadas mezclas de materiales polímero-metal que cumpla con las exigencias fabricación de partes metálicas construidas por impresión 3D.

**Alcance del proyecto.*****Componentes mecánicos.***

Se construirá una estructura modular de 70cm x 20cm x 25cm, con una estructura externa hecha a partir de perfiles metálicos que darán soporte a los componentes de la extrusora y al motor. El cañón estará compuesto de un tubo de acero el cual tendrá internamente dos tornillos extrusores maquinados a partir de ejes de acero. Al final del cañón estará la boquilla que permitirá la salida del material la cual puede ser variada para dos diámetros de filamento diferentes (1.75 mm y 2.85 mm).

***Componentes eléctricos y electrónicos.***

Los componentes electrónicos estarán divididos en tres lazos de control interconectados entre sí para un funcionamiento correcto de la extrusora. El sistema de control de temperatura consta de 6 níquelinas para el calentamiento del material, 3 sensores de temperatura localizados al inicio, medio del cañón y en la boquilla y un control PID de temperatura. El sistema de control de velocidad del motor será realizado por un sensor localizado en el eje del motor que permitirá obtener el valor de velocidad y un controlador que permita variar la velocidad de rotación del motor. El sistema de entrada del material se realizará en las tolvas que tendrán una contrapuerta de entrada que podrán abrirse o cerrarse manualmente.

***Filamento de alta carga metálica.***

Los principales materiales constituyentes del filamento, metal-polímero serán seleccionados mediante matrices comparando propiedades mecánicas, térmicas y costos. Adicionalmente, se requerirán de ciertos agentes dispersantes y aditivos para mejorar la capacidad de fluir del compuesto dentro del cañón y mejorar la capacidad de mezcla de los componentes principales.

***Pruebas y resultados.***

Al filamento obtenido se le realizaran pruebas mecánicas con la finalidad de poder comparar con filamentos comerciales y verificar si las propiedades que se desean obtener han sido alcanzadas

## Capítulo II: Estado del Arte

En segundo capítulo del trabajo de titulación se realiza una investigación del proceso de fabricación de piezas metálicas mediante manufactura aditiva y de los componentes tanto de una extrusora de doble tornillo como de filamentos comerciales, polímero metal, con alta carga metálica.

### **Antecedentes.**

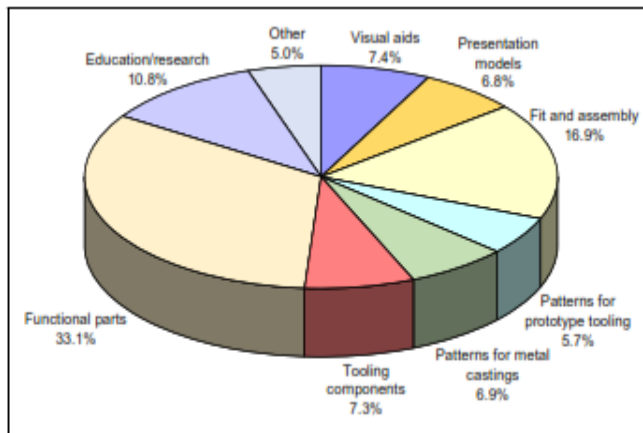
#### ***Manufactura Aditiva.***

La manufactura aditiva (AM-Additive Manufacturing, por sus siglas en inglés) es una tecnología para fabricar objetos reales tridimensionales (3D), utilizando materiales metálicos, cerámicos, poliméricos, compuestos, inteligentes y funcionales, los mismos que son depositados en capas sucesivas hasta conformar el objeto. El primer método para crear objetos tridimensionales generados capa por capa basados en diseños asistido por computador es el prototipado rápido, que fue desarrollado en los años 80; su uso más común es para producir modelos y prototipado de partes. La principal ventaja de la AM es que posee la habilidad de crear casi todas las formas imaginables (Gardan, 2016).

Los objetos creados por AM pueden ser utilizados para varias aplicaciones (Chua & Leong, 2016; I. Gibson et al., 2015; Wohlers, 2018). Para el año 2017, las principales aplicaciones de esta tecnología estuvieron dentro de la industria de partes funcionales y las partes de encaje o ensamble ocupan los primeros lugares con el 33.1 y 16.9 % como se ve en la Figura 1 Este crecimiento de manera general para todas las industrias ha sido de manera exponencial, ya que la AM permite grandes ahorros de tiempo y recursos al fabricar elementos de grande complejidad que usualmente se lo hacía por procesos tradicionales (Wohlers, 2018).

**Figura 1**

*Industrias que utilizan los sistemas tecnológicos de AM.*



*Nota: Obtenido de (Wohlers, 2018).*

Existen una amplia gama de tecnología de impresión 3D, para partes funcionales, en gran parte utilizan materiales metálicos. El crecimiento de materiales metálicos disponibles para sistemas de AM es impresionante, desde tradicionales como aceros inoxidables y aluminios hasta aleaciones especiales como titanio, cobalto o tántalo. Las partes metálicas producidas por sistemas AM tienen infinidad de aplicaciones como partes de automóviles, aeronáutica, prótesis, etc. Estos procesos han sido dominados por tecnologías de empresas como ExOne, EOS, Morris, Voxeljet que utilizan equipos, materiales y tecnologías generalmente costosas. Estos procesos generalmente trabajan con metales en polvo tanto en procesos primarios o directos como secundarios (post-procesamientos). Todos estos procesos y materiales son relativamente costosos además de que el producto final necesita menos procesos post manufactura.

Por otra parte, otro tipo de tecnología, considerada una de la más difundida en los últimos años, debido a su bajo costo de equipos y materiales, además de su versatilidad y fácil manejo para todo tipo de usuarios es la tecnología "Fused Deposition Modeling (FDM)". El

proceso FDM comúnmente utiliza alambres termoplásticos como Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) y Polylactic Acid (PLA) debido a su bajo costo y rentabilidad de los mismos (Hwang, Kim, et al., 2015).

### **Proceso de fabricación de una pieza metálica.**

#### ***Metal Injection Moulding (MIM).***

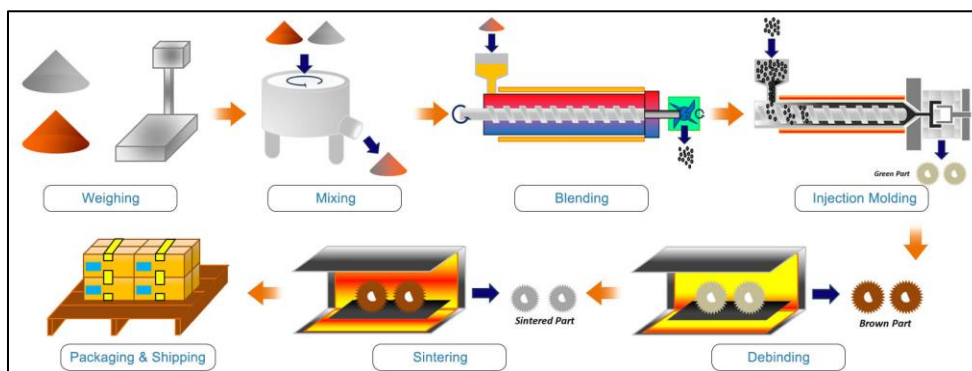
El moldeo por inyección de metal inicio en la década de 1970 para la fabricación de armas de fuego y productos comerciales. Este proceso de fabricación de piezas metálicas es una combinación de moldeo por inyección termoplástica y tecnologías convencionales de pulvimetalurgia, lo cual permite fabricar piezas de alta complejidad con bajos y altos volúmenes de producción utilizando la mayoría de metales del mercado (Merhar, 1990; Li et al., 1999; Todd & Sidambe, 2013).

El proceso MIM, mostrado en la Figura 2, consiste en mezclar de manera uniforme la materia prima: polvo metálico fino (menor a 20 micras), polvo de polímero, aglutinantes y lubricantes. A continuación, el material resultante se lo granula, y se introduce en una máquina de moldeo por inyección para ser calentado y mezclado. Cuando esta mezcla alcanza una consistencia similar a la pasta dental, éste es empujado al molde mediante una cavidad, con flujo constante, baja presión y temperatura (menos de 260 °C y menos de 10,000 psi). Es aquí donde el material se compacta, enfría y se endurece, produciendo un material denominado pieza verde (Merhar, 1990; Todd & Sidambe, 2013).

Para obtener una pieza 100% metálica, la pieza verde se somete a un proceso llamado desmoldeante, es decir, se retira el polímero y aglutinante a bajas temperaturas a fin de no afectar la pieza verde. La pieza en verde con poco o nulo contenido de polímero y aglutinantes pasa al proceso de sinterización a temperaturas más altas y tiempos prolongados (ver Figura 2) sufriendo una contracción de hasta el 20% (Li et al., 1999; Merhar, 1990).

**Figura 2**

*Process Metal Injection Moulding (MIM).*



*Nota: Obtenido de <https://www.sdmmagnetic.com/metal-injection-molding/>*

### **Fused Filament Fabrication (FFF).**

El proceso FDM, también conocido como “Fused Filament Fabrication” (FFF) es uno del proceso de AM más populares que permite la fabricación de piezas complejas sin necesidad de herramientas especializadas y reduciendo el desperdicio de material. Por lo cual, actualmente es utilizado en institutos de investigación, industrias y usuarios domésticos (Harris et al., 2019). Como materia prima para impresión se utiliza un filamento, generalmente polimérico o de composiciones diferentes.

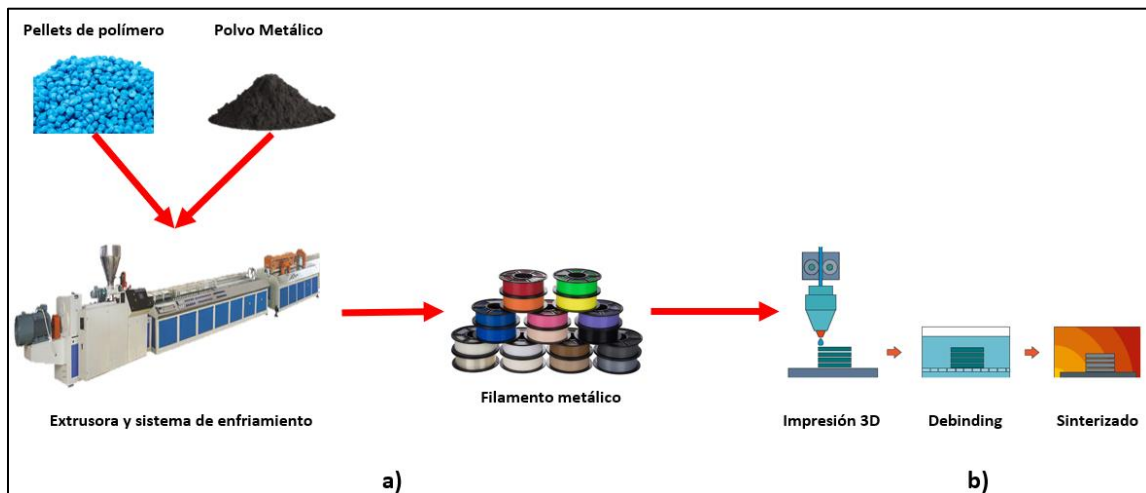
Un proceso común de fabricación del filamento utilizado como material de construcción en FDM se lo realiza mediante procesos de extrusión por tornillo, denominado “metallic deposition” (Brenken et al., 2018). Si el filamento contiene una carga metálica, su fabricación por este método consiste en depositar pellets de polímero, polvo metálico fino (menor a 20



micras) y aglutinantes en una extrusora de tornillo, donde el polímero se funde y se mezcla con el polvo metálico y aglutinantes, los cuales son compactados y empujados para conseguir la extrusión y formar un filamento de 1.75 o 2.85 mm de diámetro, como se muestra en la Figura 3 (Brenken et al., 2018; Harris et al., 2019).

**Figura 3**

*Proceso de fabricación de piezas metálicas mediante FFF.*



*Nota. a) Proceso de obtención de filamento metálico para impresión 3D b) Proceso de impresión, separación química y sinterizado para obtención de piezas metálicas. Obtenido de (Kukla et al., 2017)*

La impresión de una pieza 3D parte de un diseño o modelo virtual creado a partir de una herramienta CAD, la información es transformada en un archivo STL, el cual se encarga de dividir el modelo 3D en secciones o láminas. Esta información es ingresada en el software de la impresora la cual se encarga de imprimir capa por capa la pieza diseñada con el filamento escogido.

Al imprimir con filamento con carga metálica, se obtiene una “pieza verde” (Abel et al., 2019), la cual generalmente debe pasar por dos post procesos para obtener la pieza final: “Debinding” y sinterizado, esquematizada en Figura 3. El primer postproceso es conocido como “Solvent Debinding” consiste en un lavado químico donde la pieza verde es sumergida en un

solvente (ciclohexano) para separar el material polimérico del metálico a temperaturas alrededor de los 60°C por periodos de 8 a 10 horas, dependiendo del tamaño de la pieza y su forma (Abel et al., 2019; Burkhardt et al., 2016). El segundo postproceso conocido como “Thermal Debinding” o “Sinterizado” consiste en ingresar el prototipo, previamente retirado el polímero, a un horno con una atmósfera generalmente de gas inerte, sea hidrogeno al 100% o hidrogeno al 80% más 20% de argón. Las temperaturas para alcanzar son ligeramente inferiores a la temperatura de fusión del material por periodos de 3 a 8 horas (Abel et al., 2019; Burkhardt et al., 2016; M. A. Gibson et al., 2018).

Las dos formas para obtener una pieza totalmente metálica son similares, tanto para el proceso MIM como para FDM, ya que los dos procesos necesitan que la pieza sea sinterizada con la diferenciación en el método de obtención de la pieza verde. En el proceso MIM se inyecta la mezcla de polímero y metal al molde que posee la geometría de la pieza deseada, mientras que el proceso FDM utiliza una impresora 3D para imprimir la pieza en verde capa por capa.

### **Extrusora De Filamento.**

#### ***Extrusión***

De acuerdo con la RAE (Real academia española) la extrusión es:

“Acción y efecto de extrudir.” Y, de acuerdo con la RAE, extrudir significa: “Dar forma a una masa metálica, plástica, etc., haciéndola salir por una abertura especialmente dispuesta.”

El proceso de extrusión es utilizado por varias industrias para obtener un material continuo y de cierta forma predeterminada. Para desarrollar este objeto continuo se utiliza una maquina extrusora.

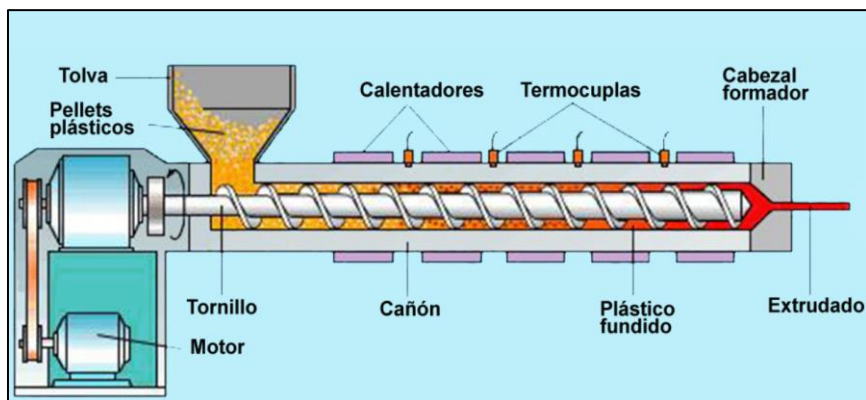
### **Maquina Extrusora.**

Una máquina extrusora es aquella que mediante un proceso de fundición y compresión se obliga a un cierto material a ser expulsado (Extruido) por una boquilla que posee una forma predeterminada, de tal forma que, el material extruido tome la forma transversal de dicha boquilla. Las extrusoras son utilizadas en cualquier tipo de industrias para obtener objetos continuos como: fideos, tubos, mangueras, etc. (Mariano, 2011b).

Una maquina extrusora posee las siguientes partes, como se puede observar en la Figura 4.

#### **Figura 4**

##### *Partes de una maquina Extrusora.*



*Nota: Obtenido de (Mariano, 2011b).*

**Tolva.** La tolva es el lugar por el cual se va a depositar el material para que este entre al cañón, el diseño de esta parte de la extrusora es fundamental ya que el ángulo de caída puede o no provocar estancamiento de material y por lo tanto un paro en la producción (Druetta & Fazi, 2018).

**Motor.** El motor es una de las partes más importantes de una extrusora, ya que será quien se encargue de suministrar la energía necesaria para que el material sea extruido por el cabezal. “Se recomienda que la potencia de diseño sea de 1 HP por cada 10 a 15 lb/h de caudal, sin embargo, para las aplicaciones de alto requerimiento de mezclado esta relación puede llegar a ser de 1HP por cada 3 a 5 lb/h (Mariano, 2011b).”

**Cañón.** El Cañón o cilindro es el lugar en donde se alberga el tornillo extrusor, su parte interna tiende a ser rugosa y protección para la corrosión, por lo cual tanto el cañón y el tornillo extrusor deben ser de un metal con la dureza necesaria para soportar el desgaste; en su parte exterior se ubica un sistema de calentamiento el cual tiene el objetivo de fundir el material el cual se desea extruir y es controlado mediante un sistema de control externo el cual permite establecer la temperatura de acuerdo al material a extruir (Druetta & Fazi, 2018).

**Tornillo** El tornillo o husillo es un cilindro en forma de cono el cual posee un filete helicoidal el cual se encarga de mezclar y transportar el material hacia la boquilla. El diseño del tornillo estará reflejado en la calidad del material obtenido, para lo cual, se debe tomar en cuenta su longitud, diámetro, ángulo de filete y paso de rosca (Beltrán & Marcilla, 2013).

La rosca por lo general no posee un paso constante ya que se necesita aumentar la presión hacia la salida del material, por lo tanto, el tornillo comienza con un paso amplio el cual disminuye con forme avanza hacia el extremo que se ubica cerca de la boquilla, como se muestra en la Figura 5.

**Figura 5**

*Tornillo extrusor.*

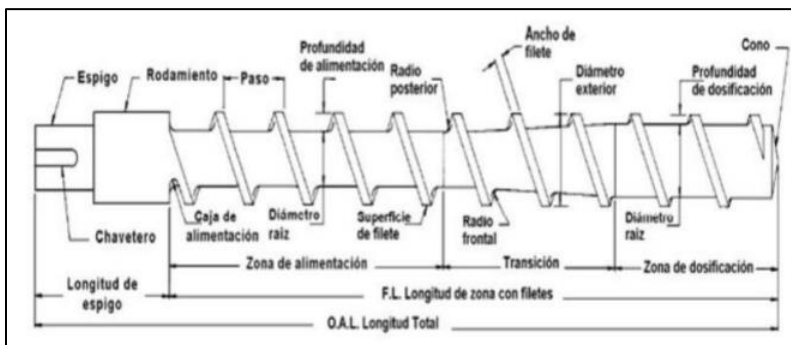


*Nota: Obtenido de (Beltrán & Marcilla, 2013).*

Dependiendo del material a extruir, el tornillo extrusor es diseñado, ya que de esto dependerán las partes del husillo como: filete, longitud y diámetro, como se puede observar en a la Figura 6. Posteriormente al diseño del tronillo este se somete a un modelamiento matemático, de fusión y de presión para lo cual se considera el flujo de arrastre y flujo de presión (Druetta & Fazi, 2018).

**Figura 6**

*Partes del husillo.*



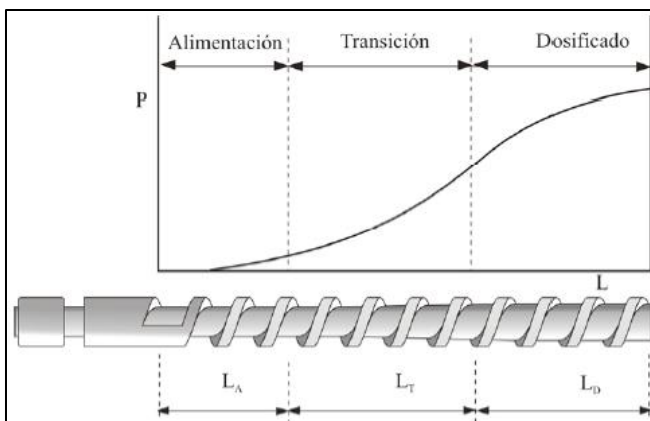
*Nota: Obtenido de (Druetta & Fazi, 2018).*

**Cabezal.** El ensamblaje de la boquilla incluye varias partes como la placa de ruptura, el adaptador de la boquilla y la boquilla. Cada uno de estos componentes cumplen funciones distintas para obtener un hilo de polímero funcional. El adaptador de la boquilla permite unir la boquilla con la estructura del cañón de manera que la boquilla pueda ser removida con facilidad, pero correctamente fijada cuando se encuentre en operación la extrusora. La boquilla permite dar la forma deseada para el hilo además de que es un punto de control de presión y temperatura en la extrusora.

Se considera también que la extrusora se divide en tres zonas, como se muestra en la Figura 7 la cual muestra el camino que recorre el material introducido por la tolva y extruido por el cabezal de la máquina extrusora, las cuales son: Zona de alimentación, zona transición y zona de dosificación (Beltrán & Marcilla, 2013).

**Figura 7**

*Zonas de una extrusora.*



*Nota: Obtenido de (Beltrán & Marcilla, 2013).*

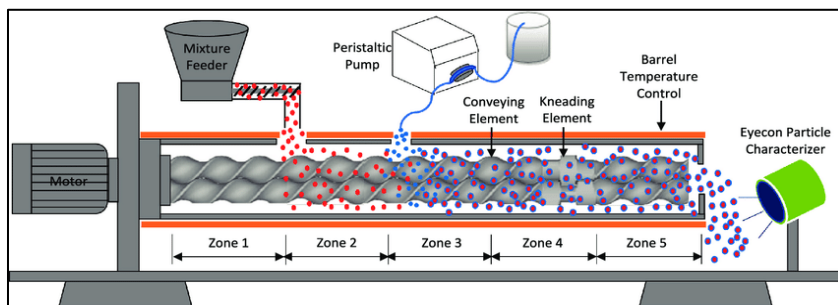
El tornillo extrusor está en constante desgaste por el contacto que este tiene con las partículas de alta dureza y agresividad de la mezcla, por lo cual, esta parte de la extrusora se la fabrica con aceros de alta resistencia además de ser recubiertos con materiales antifricción a base de níquel o cromo o también se suele realizar tratamientos térmicos para aumentar la dureza (c3media, 2010).

### ***Tipos de extrusoras.***

Los filamentos poliméricos usualmente son fabricados en extrusores de tornillos. Los extrusores de tornillos son dispositivos que consisten en un tornillo transportador con incremento en su diámetro central y paso variable dentro de una carcasa calentada. El tornillo gira y empuja el material a través del tornillo con el concerniente incremento de presión. El material es al mismo tiempo parcialmente fundido y forzado a salir por un cabezal de extrusión (Christiyan, 2016). El tornillo transportador puede ser doble (twin-screw extruder – TSE) para permitir un incremento y mejor control del flujo de salida del filamento extrudido como se muestra en la Figura 8. Este tipo de extrusor ha sido desarrollado para fundición de aleaciones inmiscibles semisólida (Tang et al., 2003).

### **Figura 8**

*Diagrama esquemático de un extrusor de tornillo doble.*

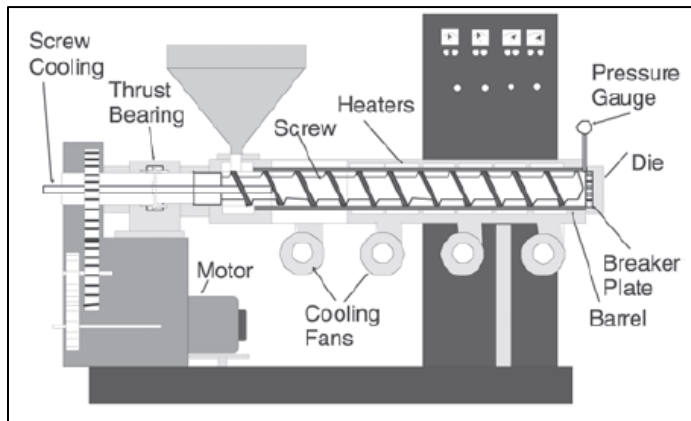


*Nota: Obtenido de (Liu et al., 2019).*

**Extrusora de tornillo Simple.** Una extrusora de tornillo simple está compuesta de 5 sistemas principales: sistema de rotación, alimentación, calentamiento, control y dado cabezal, como podemos observar en la Figura 9 (Giles et al., 2005a).

**Figura 9**

*Esquema de un extrusor de tornillo simple.*



*Nota: Obtenido de (Giles et al., 2005a).*

Para la extrusión de polímeros que inicialmente son sólidos y son fundidos en el proceso, la extrusora realiza seis funciones principales:

- Transporte de material;
- Fusión o plastificación;
- Bombeo y presurización del material fundido;
- Mezclado;
- Desgasificación;
- Conformado.

Debido a la acción de la gravedad el material a ser extruido generalmente cae dentro de la zona de alimentación del extrusor, el tornillo rota y crea fricción, lo que genera dentro del husillo calor. Este calor es insuficiente para poder realizar la fusión de todo el material dentro del husillo por lo que se utiliza un sistema de calentamiento añadido a las paredes externas del husillo. El material es transportado y atraviesa por un sistema de cabezal y dado los cuales, dan la forma al producto final (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012; Poudel, 2015).



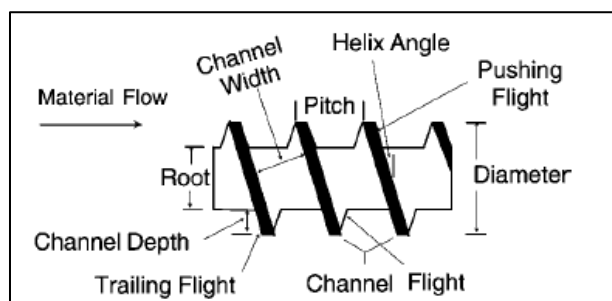
Este tipo de extrusoras son las más comunes ya que poseen un solo tornillo dentro del cañón; el tornillo puede ser de uno o dos hilos los cuales disminuyen su profundidad a medida que estos se acercan al dado, lo cual facilitará la extrusión del material ya que aumenta la presión a lo largo de la extrusión (J. J. Gómez & Gutiérrez, 2007).

Las extrusoras de tornillo simple están divididas en zonas, que son delimitadas estrictamente por el diseño del tornillo; hay que tener presente que algunas extrusoras de tornillo simple se puede diseñar una zona de mezclado, pero esto depende totalmente del material a extruir. La zona de alimentación es la más cercana a la tolva y la distancia entre las paredes del canal y el diámetro interno del tornillo es la máxima, esto permite compactar el material para poder llevarlo a la siguiente zona. La zona de transición cambia gradualmente la profundidad entre el canal y el diámetro interno del tornillo y el material previamente sólido se va fusionando hasta obtener un material completamente líquido. En la zona de dosificado la profundidad entre el canal y el diámetro interno del tornillo es la mínima, lo que generará presión la cuál ayudará para que el material pueda ser extruido a través del dado (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012; Giles et al., 2005a; J. J. G. Gómez & Gutiérrez, 2007; Gutiérrez Paredes & Vargas Ayala, 2017; Poudel, 2015).

En la Figura 10 tenemos los elementos básicos que presenta un tornillo simple: profundidad de canal, ancho del canal, diámetro externo, diámetro interno y ángulo de la hélice. Los elementos definen las zonas por donde se mueve el material, además de otras variables como velocidad de avance del material y la capacidad de procesamiento del extrusor.

**Figura 10**

*Elementos de un tornillo.*



*Nota: Obtenido de (Giles et al., 2005a).*

Para el diseño de un tornillo simple existe un término llamado relación de compresión, esta relación es crítica en el procesamiento de diferentes tipos de materiales poliméricos (Giles et al., 2005a). La relación de compresión está dada por los diámetros internos en la zona de alimentación y dosificación del tornillo. Generalmente en el caso de los polímeros la relación de compresión deseada es de 2.5:1, pero existen materiales que utilizan relaciones de compresión mayores, como el Kevlar, PP, PVC o materiales compuestos, por lo que es necesario conocer que tornillo trabaja mejor con diferentes tipos de polímeros (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012; Giles et al., 2005a).

En la Tabla 1, se puede observar los parámetros que influyen en el diseño de un tornillo simple, tales como la salida de material, el número de salidas de gas para reducir la humedad dentro del cañón, la rugosidad interna del barril, relación de densidad aparente y real y viscosidad, velocidad y calidad de fusión del material (Giles et al., 2005a; Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2006).

**Tabla 1**

*Guía general para el diseño de un tornillo simple.*

<b>Parámetro</b>	<b>Efecto en el diseño del tornillo</b>
Salida	Se obtiene a partir del cálculo de los parámetros del tornillo
Número de desgasificadores	0 con una relación L/D=25 1 con una relación L/D=30 2 con una relación L/D=35-40 3 con una relación L/D=45
Barril	Liso: se recomienda el uso de una relación de compresión normal. Estriado: recomendado para una relación de compresión baja.
Relación de densidad aparente / real	>50% densidad de fusión: se recomienda usar una profundidad de alimentación normal. <50% densidad de fusión: se recomienda usar una mayor profundidad de alimentación.
Viscosidad de fusión	Para una viscosidad alta, utilizar una profundidad mayor en la zona de dosificación. Para una viscosidad baja, utilizar una profundidad normal en la zona de dosificación.
Velocidad de fusión	Para una mayor velocidad de fusión, utilizar una menor ancho de canal, mayor ángulo de hélice y múltiples canales. También se puede utilizar un sistema de calentamiento interno en el tornillo
Calidad de fusión	Para obtener una mejor calidad de fusión, se recomienda utilizar una sección de mezclado eficiente.

*Nota: Los datos fueron obtenidos de (Giles et al., 2005a).*

**Extrusora de tornillo Doble.** La máquinas extrusoras de doble tornillo son comúnmente utilizadas para fabricar materiales compuestos ya que su capacidad de mezclado y desgasificación es buena, así como, la excelente mezcla dispersiva de materiales altamente viscosos, el procesamiento continuo, el comportamiento del flujo del tapón y la capacidad de múltiples etapas son las principales ventajas del extrusor de tornillo doble (J. J. Gómez & Gutiérrez, 2007).

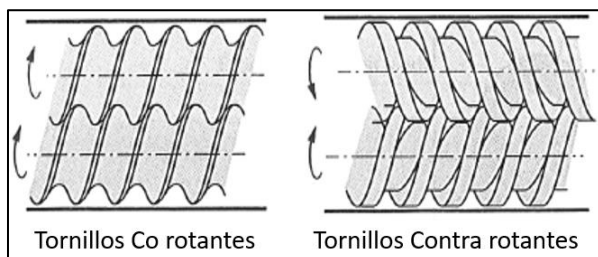
La principal diferencia entre un extrusor de tornillo doble con el simple es el tipo mecanismo de transporte del material, en los tornillos simples es el arrastre viscoso en la zona de fusión, mientras que en el doble tornillo el mecanismo de transporte se basa en el desplazamiento “positivo” del fluido. Otra gran diferencia es el perfil de velocidad en los canales del tornillo, el perfil de velocidad que se obtiene en un tornillo doble es de mayor complejidad que el de un tornillo simple, esta complejidad permite una mejor mezcla, transferencia de calor y desgasificación del material (Goger, 2013).

Un extrusor de doble tornillo generalmente está basado en un sistema de dos tornillos paralelos, con la capacidad de rotar en el interior del barril que tiene una sección de dos circunferencias intersecadas (forma de ocho) (Agassant et al., 2017).

Existen diferentes tipos de extrusoras de doble tornillo, los criterios principales para su clasificación son la dirección de la rotación de sus tornillos: tornillos co-rotantes y contra-rotantes. Los tornillos co-rotantes como su nombre lo especifica, la dirección de rotación de los dos tornillos es la misma mientras que en los contra-rotantes la dirección de rotación de uno de los tornillos es invertida, como se puede observar en la Figura 11 (Agassant et al., 2017; Giles et al., 2005a). Las aplicaciones según la rotación de los tornillos se muestran en la Figura 11.

**Figura 11**

*Clasificación por la dirección de rotación de los tornillos.*



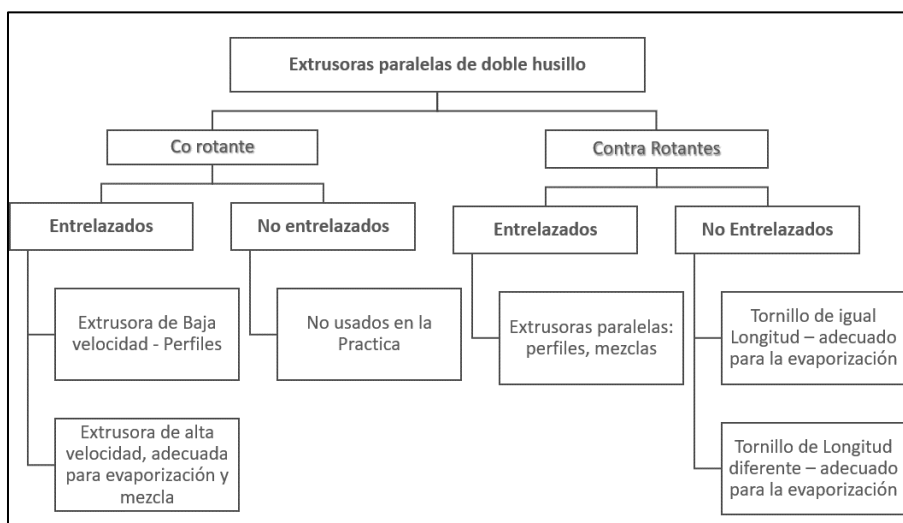
*Nota: Obtenido de (Agassant et al., 2017).*

Otro criterio de clasificación de los tornillos para los sistemas de extrusión de doble tornillo es por la distancia entre los ejes de los tornillos, si la distancia entre los dos ejes es menor a la del diámetro del tornillo, a estos se los conoce como tornillos entrelazados. Pero si la distancia entre los ejes de los tornillos es igual a la del diámetro del tornillo a estos se los conoce como tornillos no entrelazados (Giles et al., 2005a).

En la Figura 12, se puede observar la clasificación de los tornillos en este tipo de sistemas, con su principal aplicación.

**Figura 12**

*Tipos de extrusores de doble tornillo.*

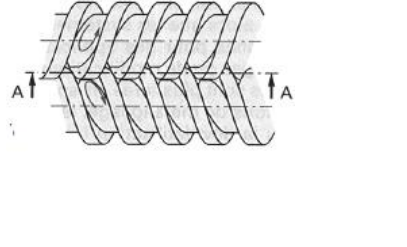
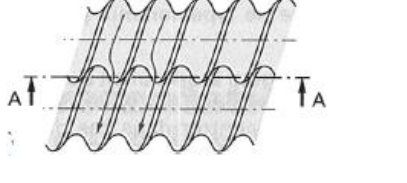
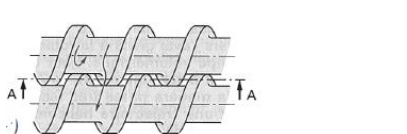


*Nota: Obtenido de (Giles et al., 2005a).*

Una vez clasificados los tipos de tornillos, ahora se puede definir los tipos de flujo que se puede encontrar en un sistema de extrusión de doble tornillo los cuales están detallados en la Tabla 2.

**Tabla 2**

*Tipos de flujos presentes en el proceso de extrusión de doble tornillo.*




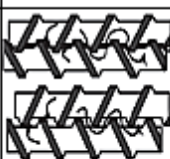
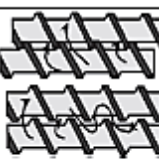


Tipo de fluido	Descripción	Esquema
Cámara "C"	Fluido recirculante, con poca interacción con el otro tornillo. El material se mueve hasta el dado por la rotación de los tornillos, actuando como una bomba de desplazamiento continuo	
Canal continuo	El material pasa fácilmente de un tornillo a otro describiendo una trayectoria en ocho. Fluido característico de tornillos co-rotantes entrelazados.	
Canal continuo restringido	El material pasa de un tornillo a otro con dificultad. Fluido característico de tornillos parcialmente entrelazados.	

*Nota: Obtenido de (Agassant et al., 2017).*

El diseño de los tornillos está definido como abierto o cerrado dependiendo si el material tiene la capacidad de fluir en los diferentes tipos que se mencionó previamente. Si el material puede fluir de manera axial o longitudinal desde la alimentación hasta el dado, el extrusor es conocido como abierto longitudinalmente. Si el material fluye de canal en canal a lo largo del tornillo a este sistema se lo conoce como sistema cerrado, en la Figura 13, se puede observar una comparación entre los diferentes tipos de configuraciones existentes y su aplicabilidad (Agassant et al., 2017; Giles et al., 2005a; White, 1991, 1991, 1991).

Figura 13

Comparación entre tornillos entrelazados y no entrelazados.

Screw Distance	Material Flow	Counterrotating	Corotating
Fully Intermeshing	Closed to Length and Cross		Impossible
	Open to Length Closed to Cross	Impossible	
	Open to Length and Cross	Possible, Not Practical	Kneading Blocks and Gear Mixers
Partially Intermeshing	Open to Length Closed to Cross		Impossible
	Open to Length and Cross		
Nonintermeshing	Open to Length and Cross		

Nota: Obtenido de (Giles et al., 2005a).

De manera similar a los sistemas de tornillo simple, las extrusoras de doble tornillo presentan las zonas de: alimentación, transición y dosificación, pero con la peculiaridad de que la geometría de los tornillos es compleja. El diseño de la mayoría de este tipo de extrusores se lo hace por módulos, que son pequeños elementos de longitudes predeterminadas que son arreglados sobre un eje para obtener la configuración deseada para el proceso de extrusión. En la mayoría de estos sistemas el diseño de la configuración de los tornillos se basa en la prueba y error (Agassant et al., 2017; White, 1991).

Sin embargo, existen parámetros que cambian el funcionamiento de los sistemas de extrusión de doble tornillo, que hacen a un tipo de tornillo con mejores prestaciones con respecto a los otros de acuerdo con la aplicación que se le dé al sistema, como se puede observar en la Tabla 3, estos parámetros son:

- Tiempo de permanencia práctico: tiempo que el material permanecen desde la alimentación hasta el dado;
- Distribución de tiempo de permanencia: tiempo del más corto al más extenso de las partículas en permanecer en la extrusora;
- Dispersión: capacidad para romper grandes partículas o aglomerados y crear una mezcla uniforme para fusión;
- Transferencia de calor: capacidad del sistema de calefactores para transferir el calor al material procesado;
- Venteo: habilidad del extrusor para eliminar la humedad que se encuentra en el barril;
- Bombeo: capacidad para entregar una presión uniforme al dado;
- Auto-limpieza: habilidad del tornillo para remover polímero del tornillo adyacente;
- Zonificación: capacidad para poder especificar áreas en el extrusor que cumplen los procesos de extrusión;
- Razón de salida: mide la capacidad del extrusor para procesar el material;
- Mezclado distributivo: capacidad para distribuir uniformemente todos los componentes y la temperatura de fusión en el material procesado (Giles et al., 2005a).

**Tabla 3**

*Comparación del funcionamiento en diferentes configuraciones de tornillos.*

<b>Parámetros de funcionamiento</b>	<b>Co-rotantes, entrelazados</b>	<b>Contra-rotantes, entrelazados</b>	<b>Contra-rotantes, no entrelazados</b>
Tiempo de permanencia práctico (min)	0.35 – 6	0.35 – 6	0.35 – 6
Distribución de tiempo de permanencia	Variable	Variable	Variable
Dispersión	Alta	Alta	Moderada
Transferencia de calor	Excelente	Excelente	Excelente
Venteo	Excelente	Excelente	Excelente
Bombeo	Buena	Excelente	Regular
Auto-limpieza	Excelente	Buena	Regular



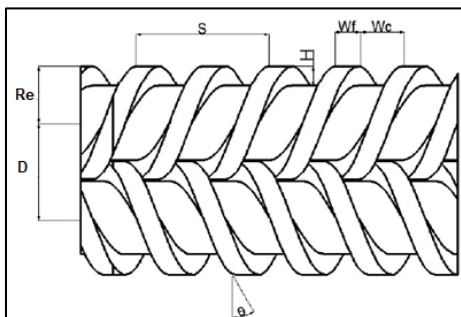
Parámetros de funcionamiento	Co-rotantes, entrelazados	Contra-rotantes, entrelazados	Contra-rotantes, no entrelazados
Zonificación	Excelente	Excelente	Buena
Razón de salida	Alta	Moderada	Alta
Mezclado distributivo	Buena	Buena	Excelente

*Nota: Obtenido de (Giles et al., 2005a).*

Para poder realizar el diseño de los módulos para un extrusor de doble tornillo es necesario identificar la geometría del tornillo, además de las propiedades del material a procesar y las condiciones del proceso de extrusión. Los elementos de la geometría de los tornillos tienen que engranar, pero no debe existir rozamiento entre ellos y se debe procurar que los tornillos estén lo más cerca posible para generar un sellado entre ellos. Estas características se las puede conseguir con una selección apropiada de parámetros de diseño. Figura 14 como son: largo del eje, distancia entre ejes, diámetro exterior, diámetro base y las correlaciones geométricas de los tornillos como el número de canales o filetes (Giles et al., 2005a; Goger, 2013; RA, 2004).

#### Figura 14

*Parámetros de diseño de tornillos en un sistema de extrusión de doble tornillo.*



*Nota: Obtenido de (Goger, 2013).*

Donde:

$R_e$ : Radio externo

$D$ : Distancia entre centros de tornillos

$\theta$ : Ángulo de Hélice

$S$ : Longitud de paso

$I$ : Profundidad del hilo

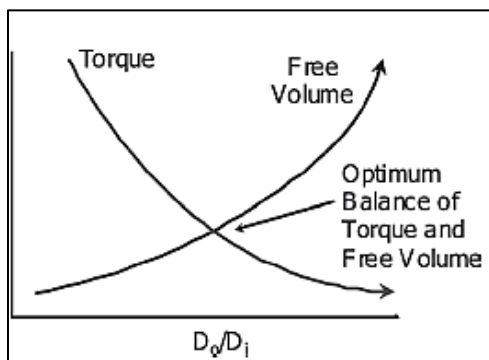
$W_f$ : Ancho del hilo

$W_c$ : Ancho del canal

Una vez obtenidos los parámetros adecuados para el diseño del tornillo, se pueden obtener valores característicos del extrusor como: volumen libre, relaciones de corte y relación diámetro externo e interno. El volumen libre de un extrusor es la medida del espacio disponible en el barril para la entrada de material y está directamente relacionado con la relación diámetro externo e interno del tornillo y la distancia entre los ejes. Se debe procurar balancear el valor del volumen libre con el torque del extrusor, si el volumen libre incrementa, el tamaño de los canales también, esto se puede traducir en mayor capacidad de procesamiento del extrusor, así también el diámetro de los ejes ( $D_o$ ) de los tornillos disminuye lo que disminuye su capacidad para soportar mayor torque como se puede observar en la Figura 15 (Giles et al., 2005a; RA, 2004; White, 1991).

**Figura 15**

*Relación de torque y volumen libre.*

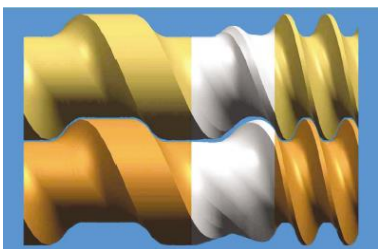


*Nota: Obtenido de (Giles et al., 2005a).*

En términos de diseño de los segmentos del tornillo hay un objetivo muy claro, que es conseguir una transición consistente y prácticamente perfecta entre todos los segmentos utilizados en la máquina para obtener un perfil de tornillo uniforme como de muestra en la Figura 16 (RA, 2004).

**Figura 16**

*Ejemplo de transición consistente en tornillos co-rotantes.*

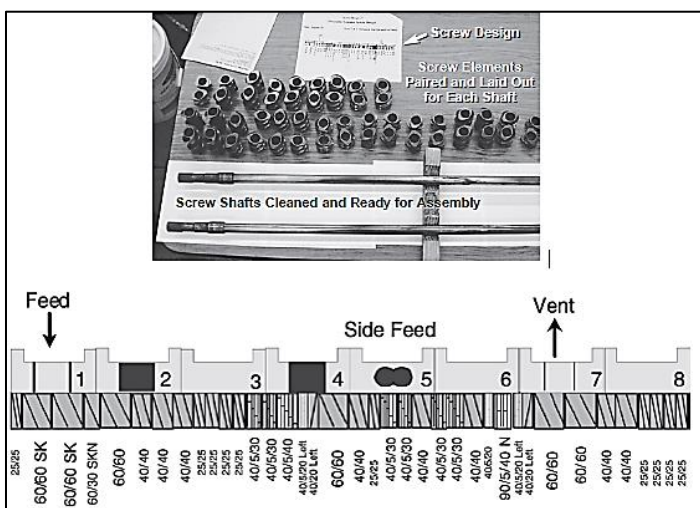


*Nota: Obtenido de (RA, 2004).*

Existen diferentes tipos de segmentos para el diseño de los tornillos del extrusor, como se puede observar en la Figura 17, estos cambian dependiendo de su aplicación para el proceso de extrusión. Existen segmentos de transporte, fusión, mezclado, desgasificación y bombeo. Las secciones del barril permiten determinar el número de segmentos que pueden tener los tornillos, esto se da por la diferencia que existe entre las extrusoras de tornillo simple, su barril es una sola pieza, que con las de tornillo doble, que su barril es dividido en secciones para facilitar el montaje y mantenimiento de los tornillos (Giles et al., 2005a; White, 1991).

**Figura 17**

*Ejemplo de montaje y diseño de tornillos.*

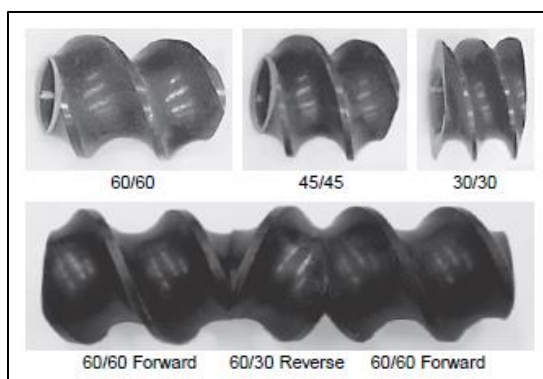


*Nota: Obtenido de (Giles et al., 2005a).*

Los segmentos de transporte son utilizados en múltiples partes del extrusor, porque ellos mantienen definido su largo, pueden variar el paso de la hélice y se puede definir la dirección de transporte (Figura 18). Un paso largo permite el transporte de mayor cantidad de material y reduce el tiempo que el material se encuentra en el segmento, mientras que con un paso corto se reduce la cantidad de material en el canal y se incrementa el tiempo que se encuentra el material dentro del segmento, lo que hace que los segmentos de paso corto se utilicen cuando se produce la fusión de material. La nomenclatura para este tipo de segmentos se describe como paso/longitud. El paso del segmento está directamente relacionado con el diámetro externo del tornillo; un segmento que tiene un paso largo normalmente tiene de 1.5 a 2 veces el diámetro externo del tornillo (Agassant et al., 2017; Giles et al., 2005a; Goger, 2013; Stasiek, 2000; White, 1991).

### Figura 18

*Tipos de segmentos de transporte.*



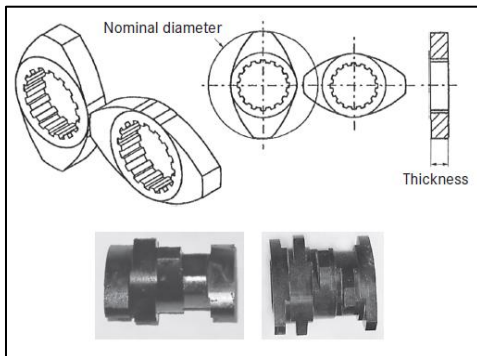
*Nota: Obtenido de (Giles et al., 2005a).*

Para el diseño de los segmentos de mezcla estos están basados en su geometría, de igual manera que los de transporte. Los segmentos de mezcla se componen de discos sin hélice, con la misma sección transversal que un segmento de transporte y con un ancho determinado. Son montados en el eje con un desfase en el ángulo de un disco con relación a otro; esto causa que el fluido sufra cambios en su movimiento, que a su vez permite generar una mejor mezcla.

Los más conocidos son los bloques de amasar y sus parámetros principales son: longitud, ángulo de escalonamiento, número y ancho de los discos, número de filetes y dirección de transporte, como se puede observar en la Figura 19 (Agassant et al., 2017; Giles et al., 2005a; Goger, 2013; White, 1991).

**Figura 19**

*Disco de mezcla y segmentos de mezcla para un tornillo extrusor.*



*Nota: Obtenido de (Agassant et al., 2017; Giles et al., 2005a).*

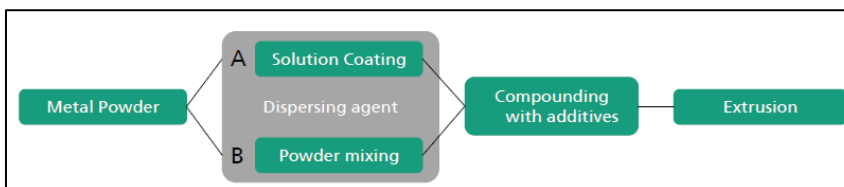
### ***Extrusora de filamento con alta carga metálica***

La gran variedad de las diferentes tecnologías de Manufactura Aditiva se ha venido haciendo más populares desde sus inicios. Aplicaciones simples como las impresoras de escritorio hasta las profesionales de uso privado que se usan para estudios de diseño, prototipado hasta la Manufactura Aditiva a nivel industrial. Lo que las vuelve tan atractivas son su baja complejidad de impresión y mantenimiento y sus bajos costos.

La utilización del proceso de extrusión para crear filamentos de base polimérica es el punto de partida en el planteamiento para la obtención de filamento con alta carga metálica. Riecker et al. (2016), propone un proceso para poder obtener un filamento con carga metálica como se puede observar en la Figura 20.

**Figura 20**

*Proceso de extrusión de filamento.*



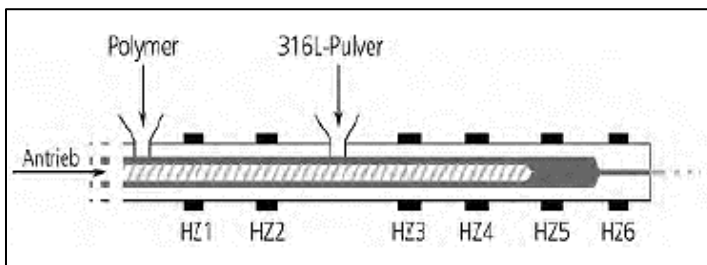
*Nota: Obtenido de (Riecker, 2016).*

El proceso empieza por agregar el polvo metálico en el proceso de extrusión, para la mezcla se puede utilizar dos tipos de procesos. El primero, es hacer una capa de solución con un agente dispersante, la siguiente opción sería mezclar el termoplástico seleccionado con el polvo de metal y el agente dispersante todo esto mientras se continúa el proceso de extrusión. Posteriormente, se agrega a la mezcla aditivos que permitan mejorar la fluidez del compuesto y la adhesión de la mezcla, finalmente pasa a ser extruido por la boquilla del extrusor (Riecker, 2016).

Para la extrusión (Riecker, 2016), utilizaron la extrusora Brabender TSE 20/40, de grado alimenticio de doble tornillo, con seis zonas de calentamiento entre los 210 a 280°C, de sección ovalada, según se muestra en la Figura 21

**Figura 21**

*Esquema de la Brabender TSE 20/40.*



*Nota: Obtenido de (Riecker, 2016).*

Los resultados obtenidos mostraron que los filamentos de matriz PLA se mantienen relativamente frágiles. Los mejores resultados se obtuvieron a partir de una matriz de PA con

una carga de polvo metálico superior al 55% en volumen. En este caso en particular el filamento fue lo suficientemente resistente para la impresión, de sección circular con un diámetro de 2.6 mm (Riecker, 2016).

### **Filamentos para FDM.**

#### ***Filamento Polimérico.***

Para realizar piezas por manufactura aditiva, se necesita una impresora, un diseño realizado mediante un programa CAD y el filamento que va a ser depositado capa por capa (Rodríguez C., 2018). En la actualidad en el mercado existen varios filamentos los cuales dependiendo de las características del diseño final y del presupuesto se puede usar:

PLA (Poliácido Láctico), este material biodegradable, es uno de los más utilizados en la impresión 3D. ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), este material plástico procedente del petróleo es muy utilizado en la industria. PET (Tereftalato de Polietileno), esta variedad de plástico es muy utilizado como material de uso alimenticio como pueden ser: envases de alimentos, botellas, etc. PETG (Tereftalato de Polietileno Glicol), este material es una modificación del PET, concretamente, se le añade Glicol para conseguirlo. Nylon, se trata de un polímero que contiene enlaces de tipo amida, lo que se conoce como poliamidas. Por eso, en la sección de filamentos de impresión 3D lo encontrarás como PA-Nylon. HIPS (Poliestireno de alto impacto), se trata de un polímero mezclado con estructuras repetitivas de estireno y butadieno, generando una alta capacidad de resistencia a impactos. Flexible (Elastómero termoplástico o TPE), este filamento consiste en una combinación de plástico (termoplástico) y caucho (elastómero), el cual, ofrece las mejores propiedades de cada tipo. Fibra de Carbono, es uno de los materiales más usados y más famoso en todas las ramas de la industria, ingeniería y en otros campos por su resistente y ultra peso (S. Gómez, 2016).

En la Tabla 4 se muestra las propiedades que muestran los filamentos poliméricos frente a la impresión mediante FDM.

**Tabla 4**

*Propiedades de los Filamentos poliméricos existentes.*

<b>Propiedad/Material</b>	<b>PLA</b>	<b>ABS</b>	<b>PETG</b>	<b>Polipropileno</b>
Densidad, (Kg/m <sup>3</sup> )	1240-1270	1020-1080	1260-1280	903
Temperatura de Impresión, (°C)	180 – 230	210 – 250	220 – 250	220
Temperatura de Fusión, (°C)	170	200	210	230
Temperatura de cama, (°C)	20 – 60	80 – 110	50 – 75	100
Velocidad de impresión, (mm/s)	30	30-60	30-60	30-60
Glass Transition Temperature, (°C)	55-60	88-120	81-91	-14 - -6
Alargamiento, (%)	2.5-6	20-100	102-118	6
Conductividad térmica, (W/m°C)	0.13-0.16	0.266-0.235	0.257-0.267	0.205-0.214
Índice de Fluidéz	0.75	0.25	0.6	0.35
Límite de Elasticidad, (MPa)	55-72	29.6-44.1	47.9-52.9	31.9-36.4
Tensile strength, (MPa)	47-70	30-50	60 – 66	27
Costo, (\$/kg)	2.82-3.71	2.7-3.24	2.6-2.71	1.36
Biodegradable	Si	No	No	No
Reciclable (%)	0.1-1.1	3.8-4.2	20-22	5.26-5.81

*Nota: Obtenido de Filament2Print, 2015; Rohringer, 2020; Übel, 2020; cesedupack, 2019.*



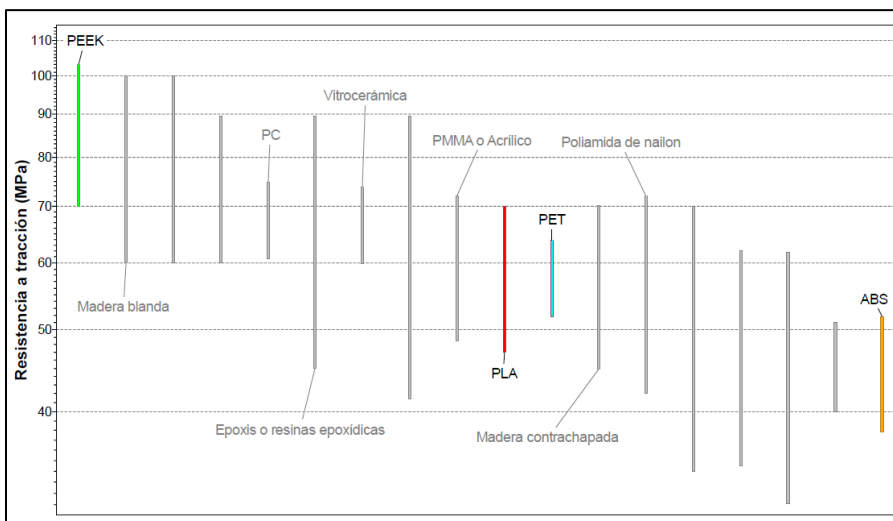
### **Propiedades relevantes de las bases poliméricas.**

Con base a las propiedades anteriormente revisadas para la base polimérica de un filamento, se ha realizado un análisis comparativo en el software CesEdupak para poder visualizar las principales propiedades de los termoplásticos más utilizados en la fabricación de filamentos con carga metálica.

En la Figura 22 se observa que en la familia de los termoplásticos el que presenta una mejor resistencia a la tracción es el PEEK (verde), seguido del PLA (rojo), PET (celeste) y ABS (naranja).

**Figura 22**

*Resistencia a tracción de termoplásticos, se resalta: PEEK, ABS, PET, y PLA.*

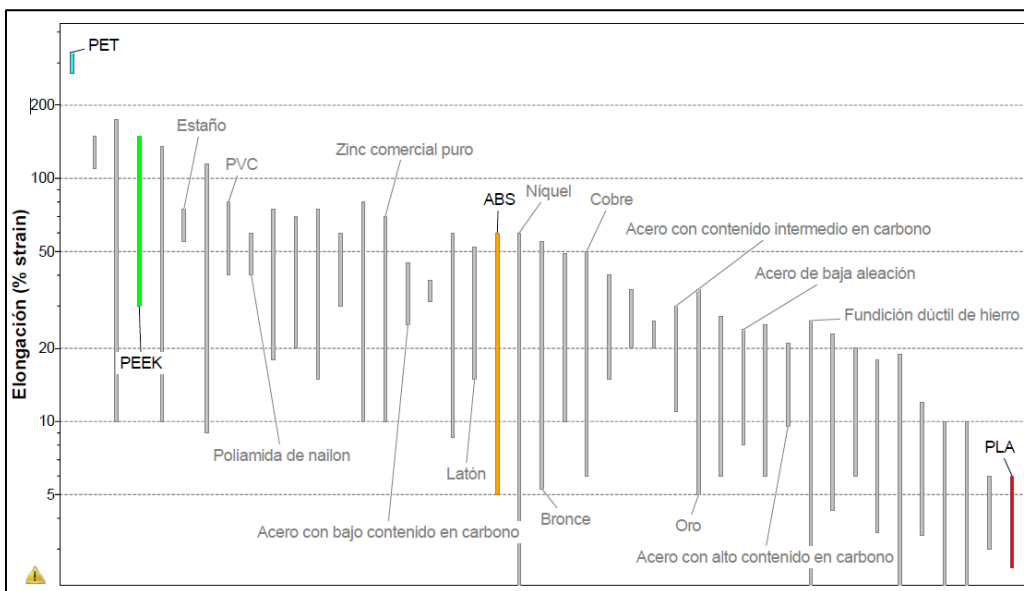


*Nota: Obtenido de cesedupack, 2019. Se resalta PET, PEEK, ABS, PLA.*

De igual manera se comparó los termoplásticos con relación a su porcentaje de elongación, Figura 23. Siendo PET (celeste) el termoplástico de mayor elongación, seguido del PEEK (verde), ABS (naranja) y finalmente PLA (rojo).

**Figura 23**

*Elongación de termoplásticos, se resalta: PEEK, ABS, PET, y PLA.*

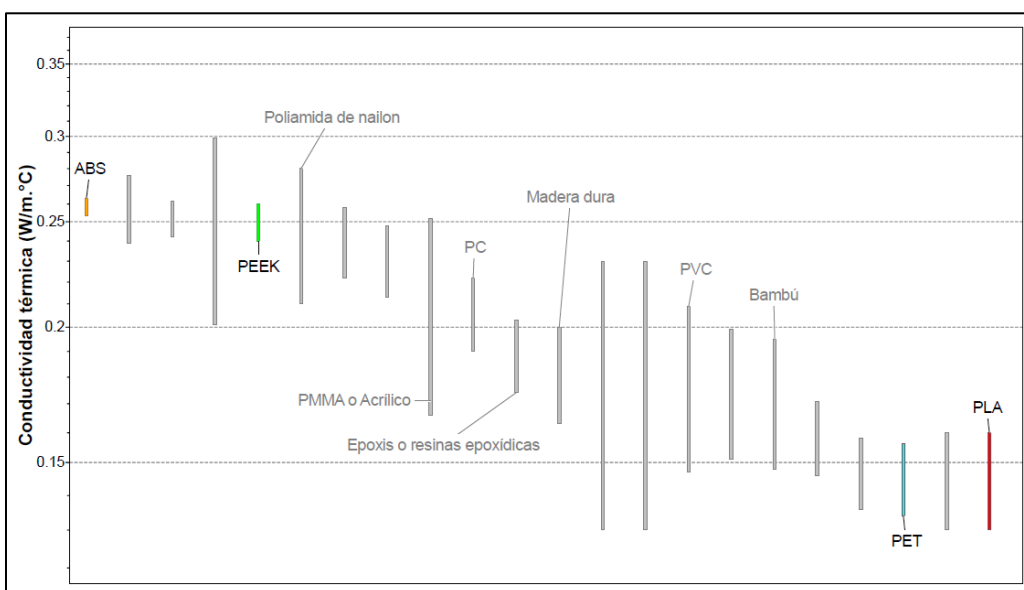


*Nota: Obtenido de cesedupack, 2019. Se resalta PET, PEEK, ABS, PLA.*

El material con la mejor conductividad térmica (Figura 24), es el ABS (naranja), seguido de PEEK (verde), PET (celeste) y finalmente el PLA (rojo).

**Figura 24**

*Conductividad térmica de termoplásticos.*

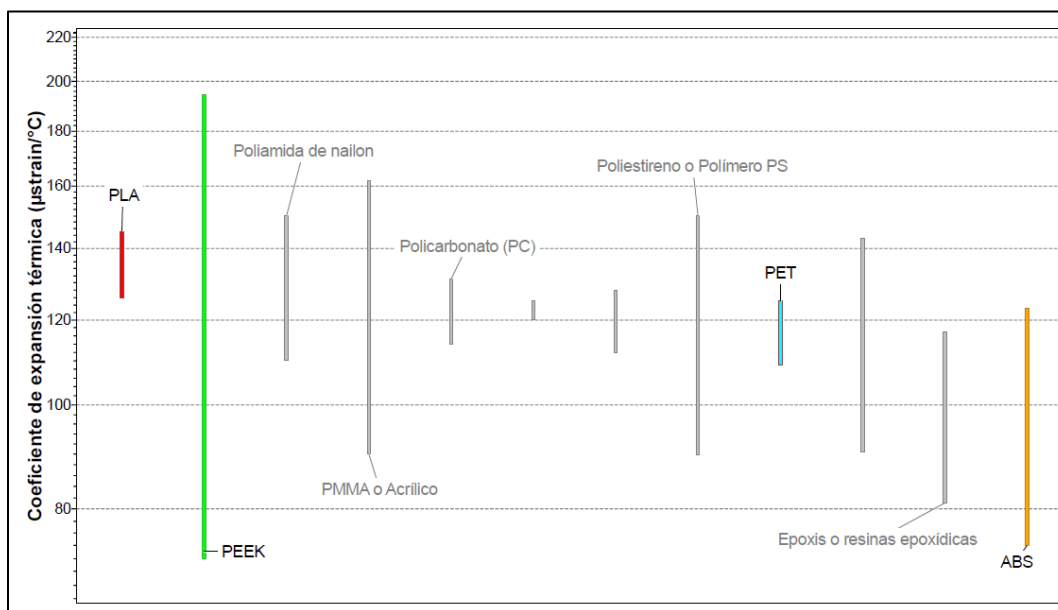


*Nota: Obtenido de cesedupack, 2019. Se resalta PET, PEEK, ABS, PLA.*

El material con un amplio rango en su coeficiente de expansión térmica es el PEEK, verde, siendo a la vez el de mayor y menor valor, lo que puede resultar en errores de diseño si se no se selecciona este material con las características deseadas, como se muestra en la Figura 25.

**Figura 25**

*Coefficiente de expansión térmica de termoplásticos.*

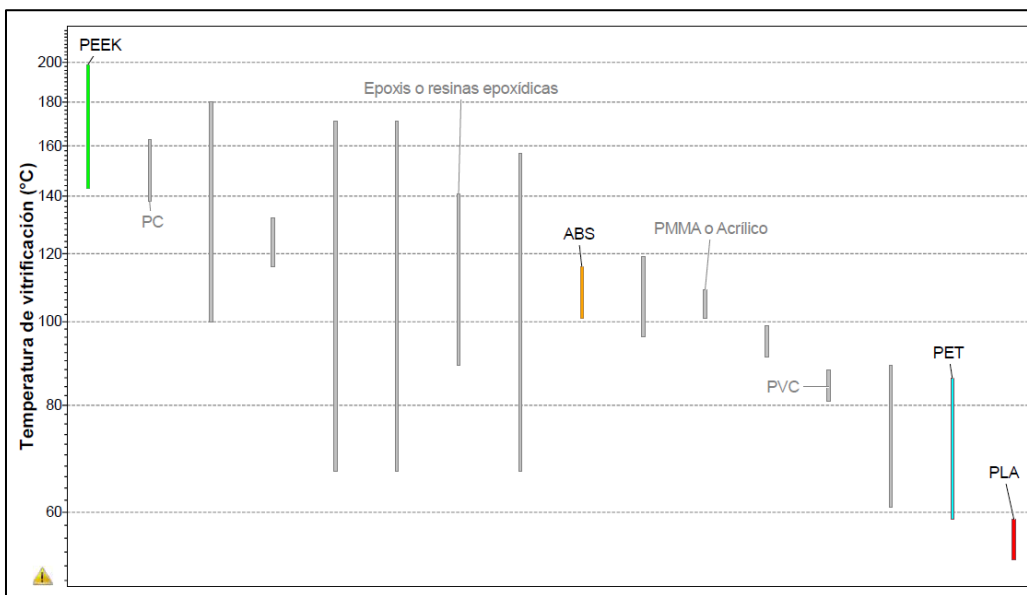


*Nota: Obtenido de cesedupack, 2019. Se resalta PET, PEEK, ABS, PLA.*

En la temperatura de vitrificación (Figura 26), característica de los termoplásticos, el material con mejores resultados es el PEEK (verde) y siendo el último en esta comparación es el PLA (rojo).

Figura 26

Temperatura de vitrificación de termoplásticos.



Nota: Obtenido de cesedupack, 2019. Se resalta PET, PEEK, ABS, PLA.

### Filamento con carga metálicas

Actualmente existen filamentos poliméricos con cargas de madera, cerámico y metal, generalmente en bajas concentraciones (de la carga), destinadas a dar apenas una apariencia de estos materiales. Tan solo en los últimos años ha comenzado a surgir filamentos con alta carga metálica para producir partes ya no poliméricas sino metálicas, lo que ha dado una opción de bajar los altos costos de producción de partes metálicas mediante AM, aprovechando las inmensas ventajas de este proceso. Un filamento puede ser considerado de alta carga cuando el contenido metálico se encuentra entre un 45% a 65% del volumen de la mezcla (Gonzalez-Gutierrez et al., 2019). Sin embargo, en el mercado existen filamentos que poseen entre el 60% al 80% de polvo de metal en peso, mientras que el material restante es comúnmente PLA o ABS (Masood & Song, 2004<sup>a</sup>). Las empresas que fabrican filamento con alta carga metálica son: Basf llegando a utilizar hasta en un 80% en peso, filament2print hasta un 95%, MarkForged hasta 95%, FormFutura hasta 80% y The Virtual Foundry hasta 90% de peso de polvo metálico (*Best*

*Filaments for 3D Printing, 2019; Filamet tungsteno | Filament2Print, 2019; Ultrafuse 316L | BASF Polymer and 316L Stainless Steel Composite Filament, 2019).*

Las ventajas que presenta una producción mediante AM en piezas metálicas son:

- Línea de producción corta
- Reducción de desperdicio de fabricación
- Diseño de piezas más complejas
- Reducidos espacios de producción

Un filamento con alta carga metálica para FDM, se compone de dos partes, primero el “filler” o polvo metálico, que pueden ser: acero, aluminio, bronce, cobre, titanio o tungsteno (All3dp, 2017). El segundo componente es la base aglutinante polimérica o matriz polimérica; la cual está compuesta generalmente de 3 partes: el aglutinante principal, el polímero base y el compatibilizante (Kukla et al., 2016); el aglutinante puede ser: goma arábiga, ceras, aceites, resinas sintéticas, plastificantes, colorantes. El polímero base puede ser: ABS, PLA o Ultem. El compatibilizante puede ser: estearatos metálicos, amidas y ácidos grasos, ceras hidrocarbonadas y polietilenos de bajo peso molecular (Mariano, 2011c). Los cuales son introducidos en una extrusora para ser mezclados y mediante una transformación de la materia prima obtener un filamento macizo y continuo.

Las piezas impresas con filamentos de alta carga metálica se las debe someter a dos postprocesos, debinding y sinterizado mencionados anteriormente, para eliminar las partículas de PLA existentes y obtener una pieza netamente metálica. Cabe recalcar que no es recomendable realizar utensilios para comida con este tipo de filamento (Vayre et al., 2012).

**Polvo Metálico.**

**Polvo de titanio.** El polvo de titanio puro es uno de los metales comúnmente utilizados por ser versátil, ya que es duro y ligero a la vez, además de su alta resistencia a la corrosión y a su biocompatibilidad. Se utiliza tanto en la fusión en lecho de polvo como en los procesos de inyección con aglutinante (Übel, 2020).

Las aplicaciones en las que se utiliza el titanio son: médicas, aeroespaciales, automotriz y herramientas. La desventaja del polvo de titanio además de su costo, es que el titanio en polvo es altamente reactivo, puede fácilmente explotar cuando está en polvo, por lo cual, para realizar impresiones 3D con este tipo de material se recomienda hacerlo en el vacío o en una atmósfera de gas argón para con lo que también se evitara las impurezas obtenidas durante la fase de soldadura (3DNatives, 2016; Übel, 2020).

**Polvo de Acero Inoxidable (316L).** El acero inoxidable es una aleación de acero que posee buenas propiedades como: durabilidad, resistente a temperaturas de hasta 831 ° C, ligeros en peso, lo cual se traducen a un material difícil de romper (jnablog, 2014).

Las piezas impresas de acero inoxidable 316L se usa en las aplicaciones en las que la resistencia a la corrosión es una característica fundamental (3DNatives, 2016; Übel, 2020). Las aplicaciones de este tipo de piezas están presentes en la industria mecánica, automotriz, aeroespacial, biomédica, aplicaciones militares, joyería y otras partes que requieren propiedades físicas mejoradas. De hecho, se trata de áreas que deben fabricar piezas metálicas suficientemente resistentes a condiciones climáticas extremas y situaciones de conflicto armado (Contreras, 2017; jnablog, 2014).

Investigadores del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore (LLNL), realizaron un estudio con la impresión 3D de acero inoxidable 316L determinando que, bajo ciertas condiciones, dichas piezas impresas son tres veces más resistente y con una reducción del 75%

del peso que la pieza de acero fabricada con métodos tradicionales (Mundo Digital, 2019; Contreras, 2017).

**Polvo de Aluminio.** Este material tiene una excelente proporción de ligereza y solidez. Además de ser resistente a la corrosión, puede también ser soldado. En comparación a los aceros, es menos robusto a la fatiga y a las altas temperaturas, es principalmente utilizado en las áreas donde la noción de peso es esencial: piezas mecánicas de automóviles de carrera, industria naval, industria aeroespacial como las alas y el fuselaje de aviones comerciales y de uso militar; industria petrolera, bicicletas, entre otros.

Difícilmente se encuentra en estado puro, se le conoce en forma de aleación con otros metales que mejoran sus propiedades físicas y mecánicas, como el silicio y el magnesio. Un ejemplo clásico es el aluminio AlSi10Mg, propuesto por el constructor alemán EOS en polvo, que permite fabricar piezas sólidas y complejas (3DNatives, 2016).

**Polvo de tungsteno.** El tungsteno posee propiedades extraordinarias a comparación de los otros metales ya que es extremadamente resistente al desgaste, posee una dureza similar al diamante y su coeficiente de dilatación es bajo, además no se oxida fácilmente, es extremadamente resistente a la corrosión y se considera ser amigable con el medio ambiente (Redacción, 2018).

Este tipo de material se puede encontrar en aplicaciones como: biomédica, desarrollo de motores a reacción, blindaje de radiación (150 KVA), blindajes para vehículos (terrestres y aéreos), exploración espacial, energía nuclear, dental, artistas o diseño de moda, puntas de proyectiles que son destinados a atacar tanques y aviones, puntas de bolígrafos, tubos fluorescentes, elementos de joyería y herramientas de corte con calentamiento interno por agua caliente, para perforación en la antártica. Gracias a la densidad del tungsteno y a su baja toxicidad, las piezas fabricadas con este material pueden sustituir a las fabricadas con plomo.

En la Tabla 5 se muestra un resumen de las características de los polvos metálicos antes mencionados.

**Tabla 5**

*Propiedades de los polvos metálicos.*

Propiedad/Material	Titanio	Acero Inoxidable 316L	Aluminio 6061	Tungsteno
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	4.42e3	7.87e3	2.67e3	1.93e3
Punto de fusión (°C)	1668	1398	660	3422
Temperatura de sinterización(°C)	1200-1300	1100-1250	580-630	1400
Tiempo de sinterización (min)	60	15-240	30	60-90
Limite Elástico (MPa)	1.02e3-1.08e3	170-310	46.3-54	1.35e3-1.68e3
Elongación a la ruptura (%)	8-10	30-50	22-32	10-25
Coefficiente de expansión térmica (µstrain/°C)	8.7-9.1	15-18	22.8-24	4.2-4.4
Resistencia a la distorsión térmica (MW/m)	0.788-0.831	0.772-1.06	8.92-9.89	39-41.2
Resistencia a la tracción (MPa)	346 -489	480 – 620	206 – 240	751 – 1440
Conductividad térmica (W/m°C)	7.1-7.3	13-17	210-230	170-175
Fracción de Reciclable	21.8-24.1	35.5-39.3	40.5-44.7	34.1-37.7
Costo en polvo (50g)	\$495.01	\$337.40	\$210	\$361.82

Nota: Obtenido de (Esteban et al., 2008; GE Aditive, 2015; F. Gómez et al., 1998; Salvador et al., 2008).

### ***Aplicaciones generales de polvos metálicos en impresión 3D.***

Varios sectores industriales han integrado en su línea de producción impresoras 3D ya que la fabricación de piezas mediante AM a permitido obtener formas y aplicaciones que antes eran impensables además por la capacidad de producir diseños complejos que no requieren soldaduras ni maquinado adicional (Formizable, 2019; Übel, 2020).

La fabricación mediante FDM es un proceso que ha revolucionado la industria, por ejemplo.



**Industria Aeroespacial.** Las piezas dentro de la industria aeroespacial son complejas ya que se requiere utilizar menos material para aligerar peso, aumentar resistencia y, en consecuencia, consumir menos combustible en comparación con las piezas fabricadas tradicionalmente. El interés de esta industria es mejorar su concepto de “Buy-to-Fly” la cual relaciona el pesos de materia prima y el peso de la pieza final producida, por ejemplo: para producir una pieza que pesa 1 kg se necesita materia prima de 10 kg (Formizable, 2019; HXX, 2016).

**Industria Automotriz.** La industria Automotriz ya utiliza la impresión 3D para fabricar prototipos sin embargo en los últimos años ha incorporado la impresión 3D no solo para fabricar prototipos, sino también para piezas reales, tal es el caso de BMW, Audi, FCA (Sandrine Tranchard, 2015).

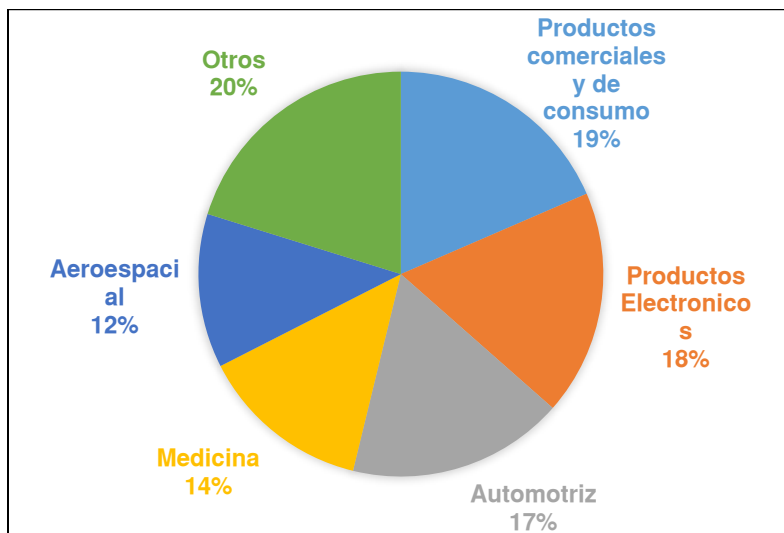
**Medicina.** Los más comunes son los implantes médicos y dentales, que ya se consideran la mejor opción disponible para los pacientes. Esto se debe a que los accesorios se pueden adaptar fácilmente a las necesidades individuales (Sandrine Tranchard, 2015).

**Joyería.** La segunda sección es joyería. En este caso, la mayoría de los fabricantes están cambiando de la impresión 3D de resina y la fundición a la cera perdida a la impresión 3D directa de metal.

La producción mediante AM está en constante crecimiento ya que se incorpora a varias industrias En la Figura 27 se muestra las principales industrias que actualmente han incorporado la AM en su línea de producción.

**Figura 27**

*Industrias que utilizan Impresión de metales.*



*Nota: Obtenido de (Sandrine Tranchard, 2015).*

Dentro de los productos electrónicos, el uso de filamentos con carga metálica está presente en la impresión de circuitos o sensores, el metal utilizado es níquel y aleaciones de estaño (Tan & Low, 2018).

Antes de que la impresión 3D en metal pueda despegar, habrá que superar algunos obstáculos. Principalmente es el alto costo, que no se puede reducir a través de moldes. Además, la baja velocidad de producción es problemática para la impresión 3D en metal (Locker, 2019).

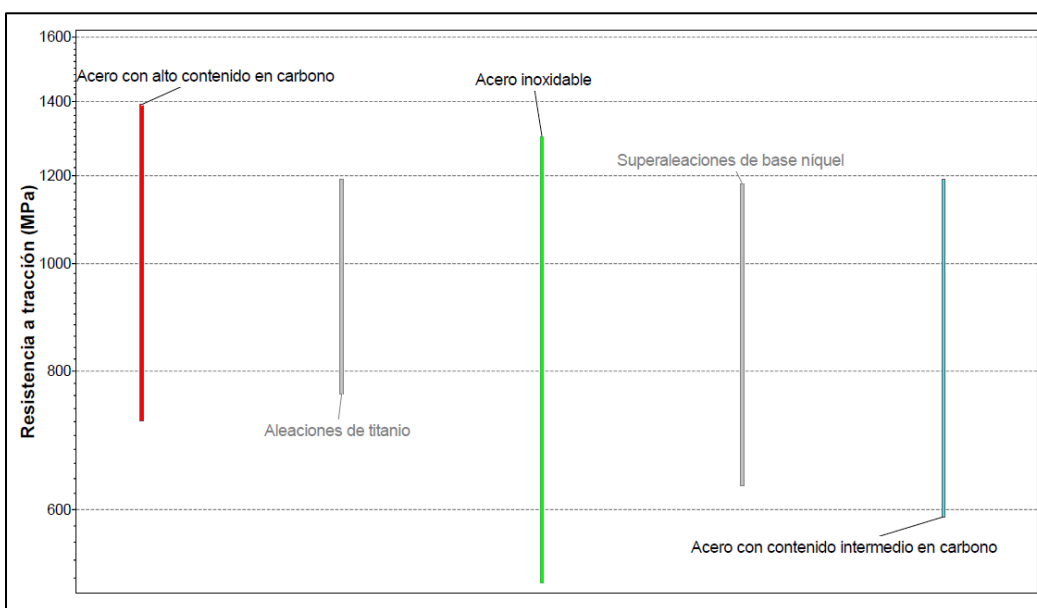
Para la impresión con filamentos metálicos será necesario que la boquilla de la impresora 3D esté adaptada para este tipo de filamentos muy abrasivos, ya que desgastan el interior de la boquilla. Normalmente la boquilla es de bronce, la cual sufre desgaste y pierde la precisión necesaria para imprimir correctamente con el tiempo. Conviene utilizar boquillas de acero endurecido para imprimir este tipo de filamentos (Formizable, 2019).

### **Propiedades relevantes de las cargas metálicas.**

Las principales características de las cargas metálicas se comparan con el soporte del software CesEduPack. El acero con alto contenido en carbono presenta una mayor resistencia a la tracción, según se muestra en la Figura 28, seguido de cerca del acero inoxidable presentando además un mayor rango de valores y por último el acero con contenido intermedio de carbono.

**Figura 28**

*Resistencia a la tracción en materiales.*

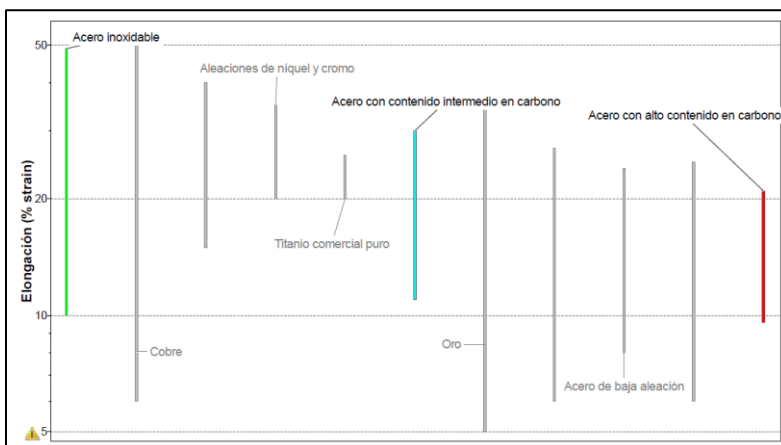


*Nota: Obtenido de cesedupack, 2019. Los materiales que resaltan son: aceros de alto y medio contenido en carbono y acero inoxidable.*

En la Figura 29, se compara el porcentaje de elongación entre los tres diferentes tipos de aceros, siendo el acero inoxidable el que presenta mayor porcentaje, seguido del acero con contenido intermedio de carbono y el acero con alto contenido de carbono.

**Figura 29**

*Elongación de materiales.*

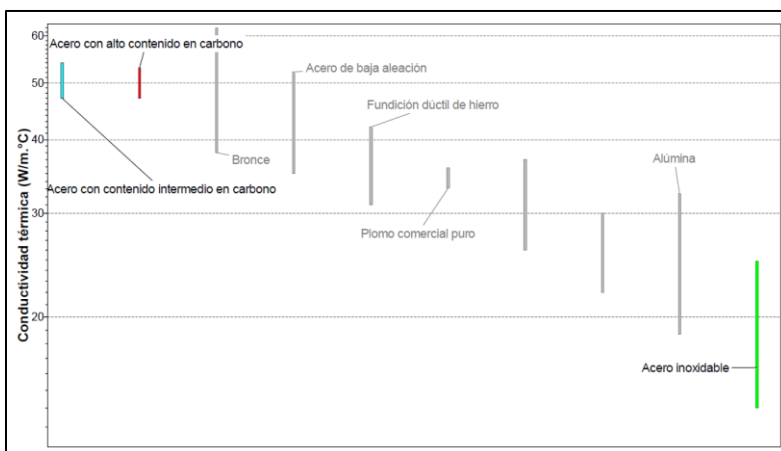


*Nota: Obtenido de cesedupack, 2019. Los materiales que resaltan son: acero inoxidable y aceros con contenido alto y medio en carbono.*

En la Figura 30, presentamos una característica térmica de los aceros, la conductividad térmica y podemos observar que el material, entre los tres aceros mencionados previamente, que presenta mejor conductividad térmica es el acero con contenido medio en carbono y muy de cerca el acero con alto contenido en carbono, mientras que el acero inoxidable tiene baja conductividad térmica comparado con los aceros de carbono.

**Figura 30**

*Conductividad térmica de materiales.*



*Nota: Obtenido de cesedupack, 2019. Los materiales que resaltan son: acero inoxidable, aceros de alto y medio contenido de carbono.*

### **Bases poliméricas con refuerzos de carga metálica utilizados en filamentos.**

Los principales materiales que se utilizan para el conformado de los termoplásticos son ABS (acrilonitrilo-butadieno-estireno), PLA (Ácido Poliláctico), PEEK (Poliéster-éter-cetona), PA (Poliamida de nylon), PETG (Glicol-Polyethylene Terephthalate), entre muchos otros. Estos termoplásticos son el material base del filamento con carga metálica, por lo que requieren ciertas propiedades para ser seleccionados dependiendo el proceso de AM a utilizarse. Hwang, Reyes, Moon, Rumpf, & Kim (2015), sugiere la utilización de ABS para obtener un filamento con carga metálica, caracterizando en su trabajo a nivel de su resistencia mecánica, flexibilidad, durabilidad, dilatación y contracción. Las propiedades de los termoplásticos y del polvo afectan las propiedades de la base polimérica, por lo que también conviene analizar algunas propiedades térmicas del material como viscosidad, conductividad térmica y temperatura vítrea (Hwang, Kim, et al., 2015).

La carga metálica en los filamentos se presenta en forma de partículas polvo, los más utilizados son: aluminio, acero, cobre, titanio, y sus aleaciones etc., los cuales presentan un tamaño de grano promedio entre 5 a 15  $\mu\text{m}$  y una distribución de tamaño de grano D50, sin embargo, para filamentos con carga metálica de acero se recomienda un tamaño de grano alrededor de los 12 a 16  $\mu\text{m}$ , 0.5 a 50  $\mu\text{m}$  para filamentos con aluminio y menor a 8  $\mu\text{m}$  para filamentos con titanio y tungsteno (Agarwala, Weeren, Bandyopadhyay, Safari, et al., 1996; Agarwala, Weeren, Bandyopadhyay, Whalen, et al., 1996; Giberti et al., 2016; Gonzalez-Gutierrez et al., 2017; Nestle et al., 2016). Las partículas de carga metálica son fabricados mediante diferentes métodos: aire atomizado, gas atomizado, interacción de sales químicas, manufactura electrolítica, etc. (Delmonte, 2012).

Los principales parámetros que se analizan en estos procesos de fabricación de filamentos son: tamaño de grano, distribución del tamaño de grano, forma del grano y su composición química. Estos parámetros son de interés al considerar las propiedades mecánicas y térmicas de las partes impresas (Masood & Song, 2004<sup>a</sup>; Sa'ude, Ibrahim, & Saidin, 2013). Para la fabricación de un filamento con carga metálica Masood et al., (2004), utilizo una distribución de tamaño de grano entre los 50-80  $\mu\text{m}$  para grano grueso y una distribución de tamaño de grano de 30  $\mu\text{m}$  para grano fino. Mientras que Sa'ude, Ibrahim, & Ibrahim, (2013), utilizó una distribución de tamaño de grano entre 30-40  $\mu\text{m}$ , con una temperatura de fusión de 1539°C y una gravedad específica de 7.86 g/cm<sup>3</sup>.

A nivel comercial existen filamentos con refuerzos de acero de alto y medio contenido de carbono como como el D2 Tool Steel™, H13 Tool Steel™ y el A2 Tool Steel™ (Markforged, USA). En acero inoxidable tenemos el Ultrafuse™ 316-L (BASF, Germany) el 17-4PH™ (Markforged, USA), y el colorFabb SteelFill™ (colorFabb, USA).

### **Calentamiento por calefacción eléctrica.**

Para realizar el proceso de extrusión de un polímero, este necesita ser fundido y moldeado a presión y flujo constante. Para que la maquina extrusora realice este proceso, debe ser calentada hasta una temperatura aproximada del punto de fusión del polímero, por lo cual, se necesita un sistema que nos permita calentar y controlar la temperatura a la cual se encuentra la maquina (Sánchez V., 2019).

La calefacción eléctrica, también conocido como calentamiento óhmico o de Joule, basa su funcionamiento en la transformación de energía eléctrica en calor mediante la circulación de electrones a través de un material conductor y por efectos de resistencia del material se produce calor. Este tipo de calefacción posee un costo bajo y de fácil instalación (Pozo B., 2016).

**Calor.**

El calor es energía térmica, la cual se transmite entre dos cuerpos en contacto desde el cuerpo caliente hacia el cuerpo frío hasta que los dos se encuentren en un equilibrio térmico. La unidad es Julios (Entrena González, 2013).

**Temperatura.**

La temperatura es una magnitud que nos permite cuantificar la variación de calor percibida por las personas, las unidades en las que viene expresada son °C, °F o K (Entrena González, 2013).

**Transferencia de calor.**

La transferencia de calor se presenta cuando existen dos cuerpos en contacto con diferencia de temperatura hasta que se establezca un equilibrio térmico. La transferencia de calor siempre sucederá desde el cuerpo de mayor temperatura hacia el de menor temperatura. Existen tres mecanismos de transferencia de calor los cuales se distinguen por la manera en la que sucede el efecto térmico (Entrena González, 2013; Çengel et al., 2014).

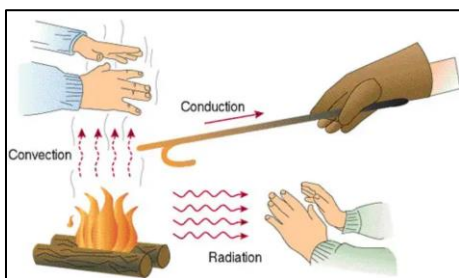
**Conducción.** Transferencia de calor entre sólidos, líquidos o gases en contacto directo (Çengel et al., 2014).

**Convección.** Transferencia de calor entre un fluido (gas o líquido), que se encuentra en movimiento natural, y un sólido (Entrena González, 2013; Çengel et al., 2014).

**Convección forzada.** El fluido es forzado a moverse a través o sobre la superficie por medios externos para que exista transferencia de calor (Çengel et al., 2014).

**Radiación.** Energía emitida, propagada y transferida por un cuerpo en formas de onda electromagnéticas. Por lo cual, los cuerpos no deben estar en contacto directo. (Entrena González, 2013; Çengel et al., 2014)

En la Figura 31, se ejemplifica los diferentes mecanismos de transferencia de calor.

**Figura 31***Mecanismos de transferencia de calor**Nota: Obtenido de (Çengel et al., 2014)****Método de calentamiento.***

Dependiendo de la aplicación de los calentadores eléctricos se tiene dos métodos de calentamiento que son directo, se da cuando la corriente eléctrica está en contacto directo con el cuerpo a calentar, o indirecto, se da cuando la pieza por la cual circula la corriente eléctrica no está en contacto directo con el cuerpo a calentar (Pozo B., 2016).

***Calentador eléctrico.***

Existe una gran variedad de calentadores eléctricos entre las cuales podemos encontrar: resistencias metálicas, no metálicas, tubos radiantes eléctricos, resistencias blindadas (Pozo B., 2016), como se puede observar en la Figura 32.

**Figura 32***Forma de niquelinas en el mercado**Nota: Obtenido de (Resistencias Eléctricas Quito, 2021)*



## Medición de temperatura.

Con la aplicación de calefacción es necesario la medición de temperatura a la cual se encuentra el sistema para posteriormente recurrir a controlarla. Por lo cual, existen diferentes sensores que nos permiten medir la temperatura.

### **Termorresistencia RTD.**

Los sensores RTD (Resistance Temperature Detector) son sensores de temperatura que funcionan a partir de la variación de resistencia de metales puros al estar en contacto a diferentes temperaturas. De acuerdo a (Aragónés et al., 2003) “Tienen elementos sensitivos basados en conductores metálicos, que cambian su resistencia eléctrica en función de la temperatura. Este cambio en resistencia se puede medir con un circuito eléctrico, que consiste de un elemento sensitivo, una fuente de tensión auxiliar y un instrumento de medida.” De acuerdo al material con el cual están fabricados, este tipo de sensores tienen un rango de medición entre -200 a 850 grados centígrados, como se puede observar en la Tabla 6.

**Tabla 6**

*Rango de temperatura de las termorresistencias*

<b>Material</b>	<b>Rango de Temperatura</b>	<b>Variación coef (%°C a 25°C)</b>
<i>Platino</i>	<i>-200 a 850</i>	<i>0.39</i>
<i>Níquel</i>	<i>-80 a 320</i>	<i>0.67</i>
<i>Cobre</i>	<i>-200 a 260</i>	<i>0.38</i>
<i>Níquel – Acero</i>	<i>-200 a 260</i>	<i>0.46</i>

*Nota: Los datos son obtenidos de (Aragónés et al., 2003)*

### **Termistores.**

Los termistores son sensores más económicos que los RTD. Se caracterizan por dar una respuesta no lineal a pesar de ser muy sensible, por lo cual, son muy utilizados para aplicaciones de control. En el mercado este tipo de sensores se encuentran con el nombre de NTC (Negative Temperature Coeficiente) Y PTC (Positive Temperature Coeficiente). El rango de medición es de

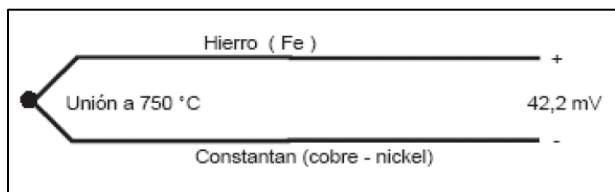
150 a 450 grados centígrados y pueden disminuir hasta 6% la resistividad por cada grado centígrado (Aragonés et al., 2003).

### **Termocupla.**

Las termocuplas son sensores de temperatura formadas por dos metales diferentes unidos en uno de sus extremos, como se observa en la Figura 33. El sensor entrega un voltaje, en el orden de los mili voltios, proporcional a la temperatura percibida por la unión, por lo cual, se necesita un circuito de acondicionamiento para la lectura de temperatura. El rango de medición va desde  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $2800\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Existen dos clases de termocuplas más utilizadas: Tipo k, posee un rango de medición de  $-200$  a  $370$  grados centígrados, y tipo J, posee un rango de medición entre  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $760$  grados centígrados (Pozo B., 2016; Aragonés et al., 2003).

**Figura 33**

### *Termocupla*



*Nota: Obtenido de (Aragonés et al., 2003)*

### **Sistema de Control.**

Un sistema de control es un conjunto de elementos o componentes interconectados encargados de administrar, ordenar, dirigir o regular el funcionamiento de otro sistema, gobernando ciertas variables del mismo, con el fin de alcanzar una respuesta deseada en beneficio de la sociedad. Para lo cual, es necesario comprender y modelar previamente la dinámica del proceso a controlar (Dorf et al., 2008; Kuo et al., 1996).

### **Sistema de Control en Lazo Abierto.**

El sistema de control de lazo abierto es aquel que carece de una señal de retroalimentación de la señal de salida (Dorf et al., 2008; Kuo et al., 1996).

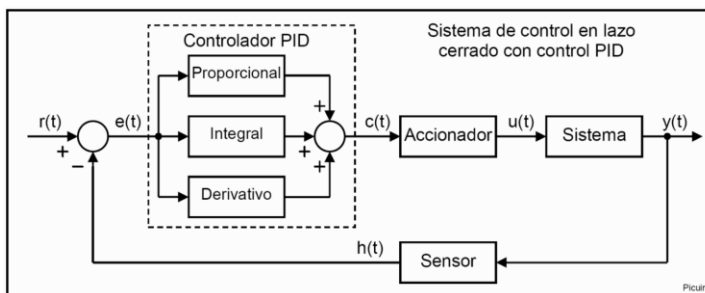
### **Sistema de Control en Lazo Cerrado.**

Sistema de control que posee una retroalimentación, es decir, utiliza la señal de salida y la compara con la deseada para corregir la acción del actuador (Dorf et al., 2008; Kuo et al., 1996).

**Controlador PID.** Es un circuito que permite controlar la señal de salida de un sistema de control de lazo cerrado para lograr la respuesta deseada. El controlador PID está compuesto por tres elementos que emiten una señal, como se muestra en la Figura 34, los cuales son: Proporcional, Integral y Derivada (*Controlador PID - Control Automático - Picuino, 2021*).

**Figura 34**

*Sistema de Control en lazo cerrado con control PID.*



*Nota: Obtenido de (Controlador PID - Control Automático - Picuino, 2021)*

### **Control ON/OFF.**

Este tipo de controlador es uno de los más sencillos, como su nombre indica tiene dos estados, prendido o apagado, con el objetivo de que la respuesta del sistema sea constante. Si la respuesta del sistema es inferior al valor configurado la salida del controlador estará encendida y si la respuesta del sistema es superior al configurado la salida del controlador estará apagada.





**Estudio del Arte.**

Durante el levantamiento de información para el desarrollo del proyecto se evidenció que no existen máquinas EDT pequeñas (husillo menor a un metro de largo) para elaborar filamento polimérico con alta carga metálica. Las máquinas, de doble husillo, encontradas en el mercado se caracterizan por ser de carácter industrial y de tamaño mayores a 5 metros de largo para producción de alimentos o tubería. Las máquinas extrusoras de menor tamaño se caracterizan por ser de mono husillo como se presenta en la Tabla 7. El costo de las máquinas indicado es obtenido de páginas de empresas ubicadas en Estados Unidos.

Las extrusoras mostradas fueron encontradas bajo la condición de ser extrusoras de baja producción y de uso para laboratorio.

Tabla 7

Especificaciones de extrusoras comerciales.

Especificación	Extrusora uno	Extrusora dos	Extrusora tres	Extrusora cuatro
Modelo	EX6 (FB00655)	Filabot EX2 (FB00061)	Wellzoom B2	Robotdig SJ20
Precio	\$10000	\$3000	\$700	\$900
Husillo	Mono husillo	Mono husillo	Mono husillo	Mono husillo
Potencia	1550 W	500W	200W	1200W
Salida de Producto	4.5 Kg/h	1 kg/h	0.5 kg/h	0.1 - 0.5 kg/h
Tamaño de filamento	1.75 – 2.85 mm	1.75 – 2.85 mm	1.75 – 2.85 mm	1.75-2.85
Material de entrada	Pellets	Pellets y polvo	Pellets	Pellets
Materiales para extruir	PLA, ABS, PC, PP, PS, ULTEM, PEEK, NYLON, HDPE, PETG, y WAX	ABS, PLA, PC, HIPS, PETG y WAX.	ABS, PLA, madera, nylon, plástico, PVA, PS	PE, PP, PVC, ABS, ABS/PP, PE/PP
Control de temperatura	4 controladores PID	1 control PID	2 controles PID	1 control PID
Velocidad del tornillo	0-100rpm	0-35 rpm		0-0.20rpm
Relación L/D	24:1	12:1		10:1
Peso de la extrusora	23 kg	0.57m x 0.37m x 0.33m	0.51m x 0.14m x 0.25m	0.60X0.20X0.35m
Dimensiones	0.75m x 0.23m x 0.21m			
Imagen de la extrusora				

Nota: Datos obtenidos de (Filabot EX6 Filament Extruder, 2020) (Filabot EX2 Filament Extruder, 2020)(Desktop Sj20, 2020). (Wellzoom B2., 2020).

### Capítulo III: Materiales y Métodos

En este capítulo se muestra la metodología para la construcción del extrusor de doble tornillo. Además, se mencionan los criterios para la selección de materiales para el filamento y para la maquina extrusora.

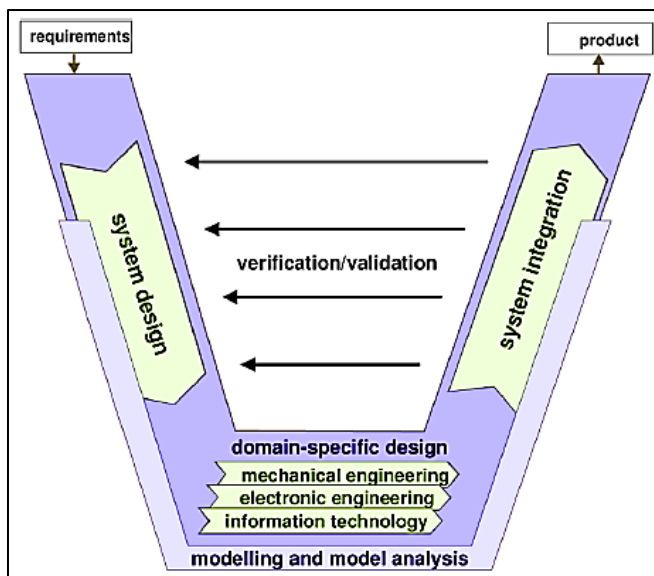
#### Metodología.

Los actuales equipos poseen la integración sinérgica de ingenierías como mecánica, electrónica e informática; lo cual se entiende como un equipo mecatrónico.

Existen varias metodologías de diseño de equipos, sin embargo, la norma a la cual más se adecua el equipo a diseñar es la norma VDI 2206 “Diseño de metodología para sistemas mecatrónicos”, la cual plantea un modelo de “V” que muestra las directrices para diseño de sistemas mecatrónico, como se muestra en la Figura 35.

**Figura 35**

*Modelo en forma de V, norma VDI 2206.*



*Nota: Obtenido de (Colomer R., 2013).*

**Requisitos.**

Los requisitos son el punto de partida para el diseño de un producto. El producto se describe y especifica en características, las que se traducen en forma de requisitos que representan al mismo tiempo una medida para la posterior evaluación del producto.

**Diseño del sistema.**

En esta etapa se plantea soluciones conceptuales que describan las principales características físicas y lógicas del producto final. Para este propósito, la función general de un sistema se divide en subfunciones. Los funcionamientos principales y elementos del producto final se asignan a estas subfunciones las cuales se evalúa en relación al funcionamiento total del producto.

**Ámbito específico del diseño.**

En base al diseño inicial se plantea soluciones y/o diseños por separado en base a las ingenierías inmersa en el producto final. Los cálculos detallados e interpretaciones elaboradas son necesarias para garantizar el desempeño del producto, en particular en el caso de funciones críticas.

**Modelización y análisis del modelo.**

El diseño planteado se acompaña de un modelado, de investigación de las propiedades del sistema y de herramientas de simulación asistidas por computador.

**Integración del sistema.**

En esta etapa se procede a la integración de cada sistema diseñado individualmente para formar un sistema total y analizar su interrelación.

**Verificación/Validación.**

El producto obtenido se somete a comprobación continua con base a las soluciones específicas y requisitos planteados inicialmente. Debe asegurarse que las propiedades reales del producto obtenido coincidan con las propiedades deseadas.

**Producto.**

El producto es el resultado del cumplimiento de cada paso planteado. En este caso, se entiende por producto no exclusivamente el producto manufacturado acabado, sino a un producto comprobado, por ejemplo: muestras de laboratorio, muestra funcionamiento, el producto piloto, etc.

**Diseño Conceptual.**

Los requerimientos han sido obtenidos de personas que han tenido experiencia con un proceso de extrusión.

**Requerimientos.**

Los requerimientos reunidos por el usuario son:

- Capacidad de fundir plástico
- Capacidad de mezclar plástico con polvo metálico
- Capaz de extruir el material mezclado
- Trabajar con PLA y polvo metálico
- El filamento extruido debe ser útil en una impresora 3D
- Diámetro del filamento extruido de 1.75 mm
- Filamento continuo sin aire interior
- Calor aplicado en todo el barril de la extrusora
- Diseño Modular
- Bajo costo de mantenimiento
- Fácil mantenimiento
- Larga vida útil
- Resistencia a la temperatura hasta 400°C
- De manejo sencillo y control robusto
- Aislamiento térmico en el proceso de operación
- Permitir el remplazo de piezas



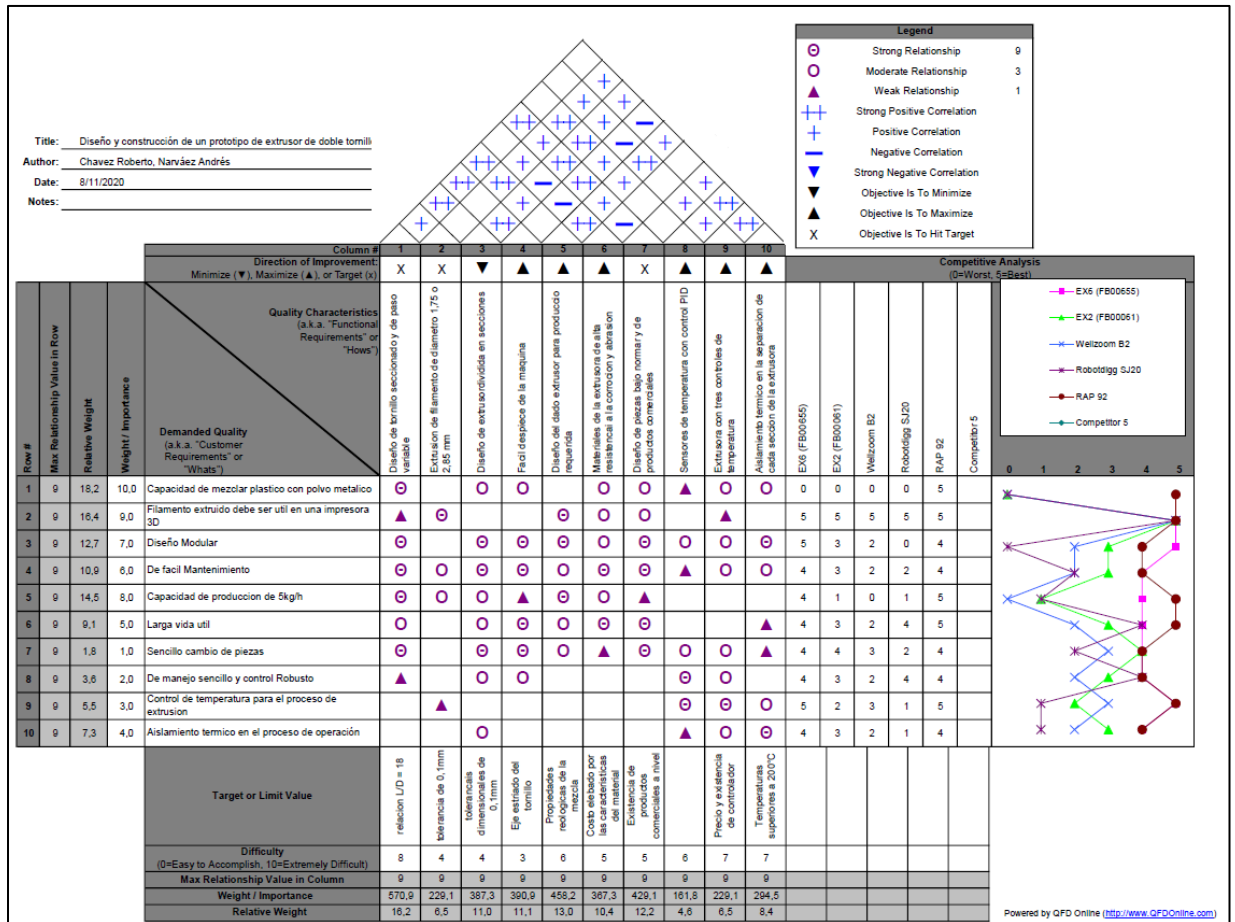
- Control de temperatura para el proceso de extrusión
- Capacidad de  $2 \frac{kg}{h}$  de producción

**Función de calidad (QFD).**

En la Figura 36 se muestra la casa de la calidad con los requerimientos recogidos

**Figura 36**

*QFD de la maquina EDT.*



*Nota: La casa de la calidad debe ser llenada con cuidado y de acuerdo a los requerimientos adquiridos.*

De acuerdo a lo obtenido en la casa de la calidad (QFD), para cumplir con los requerimientos del EDT y obtener un filamento útil se debe poner mayor énfasis en el diseño seccionado del tornillo.

### Selección de materiales para filamento.

Una pieza totalmente metálica es imposible realizarla mediante una máquina de impresión 3D mediante proceso FDM debido a la mayor temperatura de fusión y viscosidad (Sa'ude, Ibrahim, & Saidin, 2013). Los materiales necesarios para la fabricación de un filamento con alta carga metálica son: polvo metálico, matriz polimérica y aditivos como: lubricantes o estabilizantes, para facilitar el procesado del plástico, plastificantes o diluyentes para disminuir costos de fabricación y mejorar las propiedades de la matriz polimérica (Beltrán & Marcilla, 2013). Estos son los materiales necesarios para realizar la mezcla y homogenización de estos dos materiales para formar un filamento compacto.

### Selección de polvo metal.

En la Tabla 8 se muestra las consideraciones y ponderaciones para la selección del polvo metálico.

**Tabla 8**

*Matriz de selección para polvo metálico.*

Consideraciones	Ponderación	Condición	Puntaje	Titanio	Acero inoxidable 316L	Aluminio 6061	Tungsteno
Disponibilidad en el mercado	25	Permanente	10	250	250	0	250
		Estacional	5	0	0	125	0
Trabajos existentes en filamentos metálicos	15	Existentes	10	150	150	0	150
		No Existentes	5	0	0	75	0
Capacidad De Reciclado	5	Buena	10	0	0	50	0
		Regular	5	0	25	0	25
		Mala	0	0	0	0	0
Resistencia a la tracción	10	Alta	10	0	0	0	100
		Media	5	50	50	0	0
		Baja	0	0	0	0	0
Coeficiente de expansión térmica	10	Buena	10	0	0	100	0
		Regular	5	0	50	0	0
		Mala	0	0	0	0	0

Consideraciones	Ponderación	Condición	Puntaje	Titanio	Acero inoxidable 316L	Aluminio 6061	Tungsteno
Costo	10	Bajo	10	0	100	100	0
		Alto	5	50	0	0	50
Temperatura de sinterizado	10	Baja	10	0	0	100	0
		Media	5	50	50		
		Alta	0	0	0	0	0
Aplicación en industria aeronáutica	15	Alta	10	150	150	150	0
		Baja	5	0	0	0	75
Total	100			700	825	700	650

*Nota: El valor más alto en el total es el seleccionado.*

De acuerdo con el puntaje obtenido, el polvo metálico que mejores características presenta para la fabricación de un filamento metálico es el acero inoxidable.

De acuerdo con Hwang & Kim, (2015), el polvo metálico a mezclar con el polímero debe poseer una distribución de tamaño de grano inferiores a 24  $\mu m$  y 43  $\mu m$ .

Al aumentar el tamaño de distribución del tamaño de grano en un filamento con alta carga metálica disminuye la viscosidad aparente de corte de la materia prima, el módulo secante y el alargamiento en la rotura de los filamentos. Los filamentos que presentan una distribución de grano más pequeña (aproximadamente 5.5  $\mu m$ ) presentan facilidad de impresión, mientras que los filamentos con una distribución de grano grueso (aproximadamente 15  $\mu m$ ) presentan problemas para su impresión (Kukla et al., 2017).

### ***Selección de matriz polimérica.***

En la Tabla 9, se muestra las consideraciones tomadas y ponderaciones para la selección de la matriz polimérica para el filamento a fabricar.

**Tabla 9***Matriz de selección para matriz polimérica.*

<b>Consideraciones</b>	<b>Ponderación</b>	<b>Condición</b>	<b>Puntaje</b>	<b>ABS</b>	<b>PLA</b>	<b>PP</b>	<b>PETG</b>
Disponibilidad en el mercado	25	Permanente	10	250	0	250	0
		Estacional	5	0	125	0	125
Trabajos previos existentes en filamentos metálicos	15	Existentes	10	150	150	0	0
		No Existentes	5	0	0	75	75
Capacidad de Reciclado	5	Alto	10	0	0	0	50
		Medio	5	25	0	25	0
		Bajo	0	0	0	0	0
Biodegradable	5	Sí	10	0	50	0	0
		No	5	25	0	25	25
Temperatura de fusión	10	Baja	10	0	100	0	0
		Media	5	50	0	50	50
		Alta	0	0	0	0	0
Índice de fluidez	20	Buena	10	0	200	0	200
		Regular	5	0	0	100	0
		Mala	0	0	0	0	0
Glass Temperature	10	Alta	10	100	0	0	100
		Media	5	0	50	0	0
		Baja	0	0	0	0	0
Costo	10	Bajo	10	0	100	100	0
		Alto	5	50	0	0	50
<b>Total</b>	<b>100</b>			<b>650</b>	<b>775</b>	<b>625</b>	<b>675</b>

*Nota: El valor más alto en el total es el seleccionado.*

De acuerdo con la matriz de selección para la matriz polimérica, el polímero que reúne las mejores características es el PLA

## Selección de materiales para maquina extrusora.

### **Material del barril.**

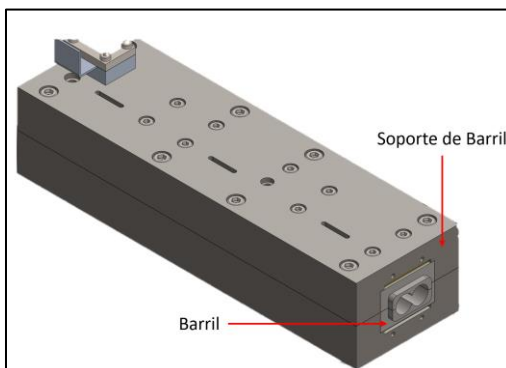
En un diseño inicial se planteó realizar una extrusora cuyo barril sea de un solo material, cuya dureza sea mayor a la del acero inoxidable (material a extruir) para evitar el desgaste interno del barril. De acuerdo con varios diseños observados y para abaratar costos de producción, se ha decidido realizar el barril de la extrusora de dos materiales como se muestra en la Figura 37.

Otros factores que influyen en el diseño del EDT son los materiales que existen en el mercado local, que por la pandemia de COVID-19, son los de uso general que siempre están oferta en el mercado además de las geometrías básicas que se presentan en estado de suministro (ejes, planchas, placas, etc.).

Se denomina, barril interno al componente que va a estar en contacto con el material a extruir y soporte de barril al que se puede ver a simple vista.

### **Figura 37**

*Barril y soporte de barril de la maquina EDT.*



El material escogido para el barril interno es acero AISI P20 o M201, el cual es un acero para moldes de plástico templado, revenido y resistente a la corrosión. La dureza del acero

M201 está entre 290 – 330 HB, el cual es superior a la del acero inoxidable 316L, la cual está en un rango entre 79 – 275 HB (Bohman, 2020). Se escogió un material de dureza superior a la del acero inoxidable para evitar que la abrasión dentro del barril, al momento de mezclar y extruir, desgaste y dañe las paredes del barril interior.

Para el soporte de barril se escogió un acero AISI 1045, el cual es un acero al carbono que posee gran resistencia al desgaste, tiene una gran soldabilidad y maquinabilidad, cuya dureza es de 163 HB (Bohman, 2020).

#### ***Material del Tornillo.***

El material escogido para los tornillos es acero AISI P20 o M201, el cual es un acero para moldes de plástico templado, revenido y resistente a la corrosión. La dureza del acero M201 está entre 290 – 330 HB, el cual es superior a la del acero inoxidable 316L, la cual está en un rango entre 79 – 275 HB (Bohman, 2020). Se escogió un material de dureza superior a la del acero inoxidable para evitar la abrasión, al momento de mezclar y extruir.

#### ***Material de la boquilla.***

Para seleccionar el material de la boquilla se debe considerar que la pieza va a estar sometida a una temperatura de 200°C, también está sometida a corrosión. Por lo tanto, el acero Bohler M303 cumple con los requerimientos térmicos y mecánicos necesarios, por su dureza al templado, resistencia a la corrosión al ser utilizado como acero para moldes.

#### ***Material del dado Extrusor.***

El dado extrusor es una pieza fundamental dentro de la maquina ya que será la pieza que nos permita obtener el diámetro de 1.75mm, va a estar sometido a una temperatura de 200°C y a corrosión por el paso del filamento con alta carga metálica. Por lo cual, el acero Bohler

M238 cumple con las características mecánicas y térmicas, además de su dureza en estado de suministro.

***Material aislante.***

Para tener un mejor control de temperatura en cada sección se colocará entre cada sección de barril un lamina de material aislante fibrocerámico que soporte temperaturas mayores a los 500 °C y de espesor máximo de 6 milímetros. El material que cumple con estos requerimientos es la tela fibrocerámica “Tetraglas 3000” la cual posee una conductividad térmica aproximada de 0.044 W/mk (*Catalogo-de-Aislamiento-Termico-AGV.pdf*, s. f.)

#### Capítulo IV: Diseño Mecánico – Térmico

En este capítulo se desarrollan los cálculos y simulaciones de: caja de transmisión de potencia, forma de los tornillos extrusores, potencia de motor necesaria, presión de los tornillos generada, dimensiones de barril y dado extrusor.

Los polímeros a pesar de ser muy diferentes en sus estructuras y composiciones químicas tienen ciertas propiedades comunes entre ellos: densidad, viscosidad, conductividad térmica y eléctrica y resistencia térmica. De ellas la que vamos a analizar es la viscosidad ya que los polímeros al estar en estado sólido o en estado de fusión presentan marcados comportamientos viscoelásticos (Beltrán & Marcilla, 2013; Mariano, 2011a). El cálculo de la viscosidad del polímero permite obtener los valores de presión, velocidades, flujos con los que se diseñará el EDT.

#### Viscosidad Efectiva.

La viscosidad efectiva viene dada en función de la velocidad de cortadura. La velocidad de cortadura se calcula mediante la ecuación (1).

$$\gamma = \frac{\pi * D_B * N}{h} \quad (1)$$

Donde:

$D_B$ : Diámetro interno del Barril ( $mm$ )

$N$ : Velocidad del husillo ( $\frac{rev}{s}$ )

$h$ : Distancia entre el filete del husillo y el barril

Reemplazando los valores se obtiene:

$$\gamma = \frac{\pi * 21.9 * \frac{120}{60}}{0.1}$$

$$\gamma = 1376 \frac{1}{s}$$

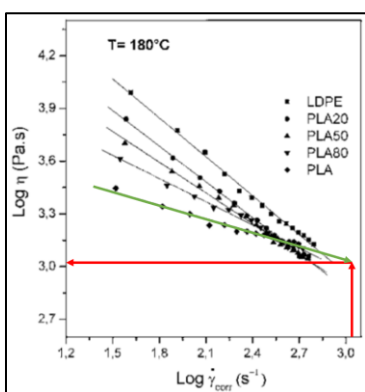


Con el valor de la velocidad de cortadura obtenido, se toma el valor correspondiente de la viscosidad efectiva.

De acuerdo a la Figura 38, se puede observar que el valor de  $\log(3.099)$  correspondiente es de 1258 Pa.s; este valor es correspondiente a la viscosidad efectiva del PLA a 180 °C.

### Figura 38

*Viscosidad de la masa fundida vs la velocidad de cizallamiento para LDPE / PLA.*



*Nota: Obtenido de(Djellali et al., 2015).*

Al no tener información conocida de cómo afecta la carga metálica a la viscosidad efectiva del polímero se ha impuesto un factor de seguridad de 1.71 que modifique la viscosidad efectiva de la mezcla.

$$\eta_{mix} = 1258 * 1.71$$

$$\eta_{mix} = 2152.8 \text{ Pa.s}$$

### Potencia Requerida.

El tamaño del motor requerido para accionar un tornillo se puede estimar a partir de la “regla empírica” basada en la experiencia de que se pueden extruir aproximadamente 4.5 kilogramos / hora de polímero por caballo de fuerza (HP) en una máquina de un solo tornillo. (Goff & Whelan, 2016)

### **Barril.**

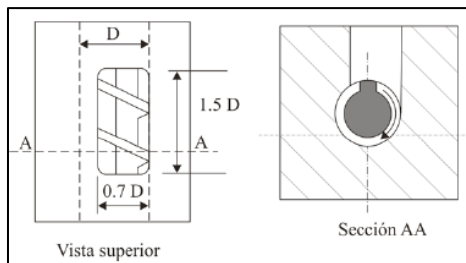
Un diseño de barril seccionado facilita el control de temperatura para cada etapa del proceso de extrusión. De no hacerlo seccionado se requerirá de un sistema de enfriamiento en ciertas etapas de dicho proceso (Goff & Whelan, 2016).

### **Garganta de alimentación.**

La garganta de alimentación es una cavidad que forma parte del barril por la cual el material entra a este. La garganta de alimentación está unida a la salida de la tolva. El largo de la garganta de alimentación debe ser 1.5 veces el diámetro del cilindro y 0.7 veces el mismo, como se puede observar en la Figura 39.

**Figura 39**

### **Garganta de alimentación.**



*Nota: Obtenido de (Beltrán & Marcilla, 2013).*

### **Tolva.**

El tamaño de la tolva está determinado por la producción que esta va a tener, en nuestro caso se debe considerar que la maquina es para uso de laboratorio por lo cual no necesitamos una tolva de grandes dimensiones, sin embargo, esta debe tener la capacidad de llenar el barril de la máquina.

Para obtener el volumen total ( $V_T$ ) de la tolva se dividió en tres secciones; la primera sección es un tetraedro con las siguientes dimensiones (148 x 148 x 155 mm), la segunda

sección es un cono truncado con las dimensiones ( 148.148 x 35.18 x 80 mm) y finalmente la última sección es un tetraedro con dimensiones (35 x 18 x 40 mm).

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3$$

$$V_1 = 148 * 148 * 115$$

$$V_1 = 2518960 \text{ mm}^3$$

$$V_2 = \frac{h}{3} (AB_M + AB_m + \sqrt{AB_M AB_m})$$

$$V_2 = \frac{80}{3} (148.148 + 35.18 + \sqrt{148.148 * 35.18})$$

$$V_2 = 699997 \text{ mm}^3$$

$$V_3 = 35 * 18 * 40$$

$$V_3 = 25200 \text{ mm}^3$$

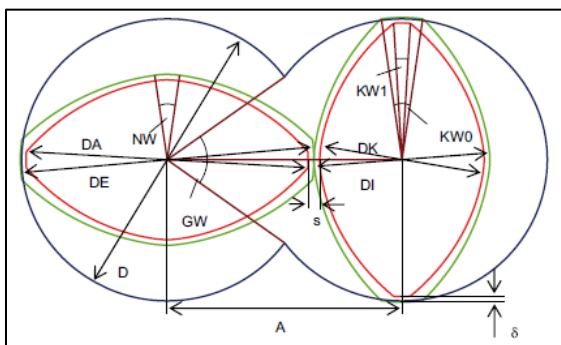
$$V_T = 3244127 \text{ mm}^3 = 3244 \text{ cm}^3 = 3.24 \text{ litros}$$

### Tornillo Extrusor.

En la Figura 40, se muestra las variables geométricas para el diseño de un tornillo doble extrusor, de color verde se encuentran el perfil completo del tornillo, en color rojo se muestra el contorno real, y de color azul se encuentra el perfil interno del barril (Kohlgrüber & Bierdel, 2008).

### Figura 40

*Variables geométricas de un perfil de tornillo extrusor.*



*Nota: Obtenido de (Kohlgrüber & Bierdel, 2008).*

El cálculo de las variables geométricas mostradas en la Figura 40, se las realiza mediante

las ecuaciones mostradas en la Tabla 10.

**Tabla 10**

*Variables geométricas de tornillo extrusor*

Variable	Símbolo	Ecuación
Número De Hilos	$Z$	Dato
Distancia Entre Centros	$A$	$A = R_e + R_i + Ze$ (2)
Diámetro Del Barril	$D$	Dato
Paso	$T$	Dato
Holgura Entre Tornillo Y Barril	$\delta$	Dato
Holgura Entre Tornillos	$S$	Dato
Radio De Barril	$R_G$	$R_G = \frac{D}{2}$ (3)
Ángulo De Barril	$G_W$	$G_W = 2 \text{ Acos} \left( \frac{A}{D} \right)$ (4)
Diámetro Externo Del Tornillo (Actual)	$D_A$	$D_A = D_G - 2S$ (5)
Radio Externo Del Tornillo (Actual)	$R_A$	$R_A = \frac{D_A}{2}$ (6)
Diámetro Interno (Producción)	$D_K$	$D_K = 2A - D_A - 2S$ (7)
Radio Interno (Actual)	$R_K$	$R_K = \frac{D_K}{2}$ (8)
Diámetro Externo Del Tornillo	$D_E$	$D_E = D_A + S$ (9)
Radio Externo Del Tornillo	$R_E$	$R_E = \frac{D_E}{2}$ (10)
Diámetro Interno Del Tornillo	$D_I$	$D_I = 2A - D_E$ (11)
Radio Interno Del Tornillo	$R_I$	$R_I = \frac{D_I}{2}$ (12)
Ángulo De Filo	$F_{W0}$	$F_{W0} = 2 \text{ Acos} \left( \frac{A}{D_E} \right)$ (13)
Ángulo De Punta	$K_{W0}$	$K_{W0} = \frac{180}{Z} - F_{W0}$ (14)
Ángulo De Raíz	$N_W$	$F_{W0} = K_{W0}$ (15)
Ángulo De Punta (Actual)	$K_{W1}$	
Ángulo De Punta (Actual)	$F_{W1}$	$F_{W1} = \frac{180}{Z} - \frac{N_W + K_{W1}}{2}$ (16)
Ancho De Punta	$K_{B0}$	$K_{B0} = \frac{K_{W0}}{2\pi} T$ (17)
Ancho De Punta (Actual)	$K_{B1}$	$K_{B1} = \frac{K_{W1}}{2\pi} T$ (18)

*Nota: Obtenido de (Kohlgrüber & Bierdel, 2008)*

Los datos de entrada para el cálculo de las variables geométricas, se presentan en la

Tabla 11.

**Tabla 11**

*Datos de entrada para el cálculo de variables geométricas del tornillo extrusor.*

Datos	Símbolo	Cálculo	Unidad
Diámetro Barril	D	21,900	mm
Longitud Barril	L	440,000	mm
Radio Barril	R	10,950	mm
Número Hélices	n	2,000	hilos
Holgura Barril-Tornillo	$\Delta$	0,100	mm
Distancia Entre Centros	Cl	20,030	mm
Holgura Tornillo-Tornillo	S	0,500	mm
Pasos Segmentos	B1	10,000	mm
	B2	20,000	mm
	B3	40,000	mm

Con los datos de entrada y las fórmulas presentadas, en la Tabla 12 se muestran los valores de las variables geométricas calculadas.

**Tabla 12**

*Variables geométricas obtenidas.*

Variable	Símbolo	Valor	Unidad
Diámetro Externo Tornillo	$D_e$	21,700	mm
Radio Externo Tornillo	$R_e$	10,850	mm
Diámetro Interno Tornillo	$D_i$	17,360	mm
Radio Interno Tornillo	$R_i$	8,680	mm
Zona Interpenetración	$\Psi$	0,395	rad
	$\Psi$	22,625	°
Ancho Del Hilo	A	0,781	rad
	$\alpha$	44,750	°
Relación Cl/Re	$C_L/R_e$	1,846	
Relación De/Di	$D_e/D_i$	1,250	
Profundidad Máxima Canal	H	2,170	mm
Sección Libre Barril	$S_b$	730,304	mm <sup>2</sup>
Sección Tornillo	$S_s$	307,409	mm <sup>2</sup>
Sección Libre Material	$S_f$	115,487	mm <sup>2</sup>
Ángulo De Hélice	$\varphi_1$	0,144	rad
	$\varphi_1$	8,270	°
	$\varphi_2$	0,283	rad
	$\varphi_2$	16,209	°
	$\varphi_3$	0,527	rad
	$\varphi_3$	30,173	°

Variable	Símbolo	Valor	Unidad
Grosor De Hélice	$e_1$	1,219	mm
	$e_2$	2,365	mm
	$e_3$	4,259	mm
Canales Independientes	$m$	3,000	Canales
	$W_1$	3,729	mm
Ancho De Canal	$W_2$	7,237	mm
	$W_3$	13,031	mm
	$L_{c1}$	60,230	mm
Longitud Canal-C	$L_{c2}$	62,071	mm
	$L_{c3}$	68,945	mm
	Relación CI/D	$C_L/D$	0,915
Ancho de Ranura Lateral	$\varepsilon_1$	0,966	mm
	$\varepsilon_2$	2,004	mm
	$\varepsilon_3$	4,479	mm

#### Calculo relación L/D.

Según Giles et al.,(2005b) la relación  $\frac{L}{D}$ , viene dada por la siguiente expresión

$$\text{Relacion } \frac{L}{D}$$

$$18 < \frac{L}{D} < 30$$

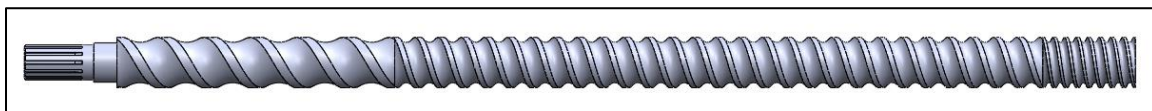
$L$ : Longitud de trabajo de la Broca

$D$ : Diámetro de la broca

La longitud de trabajo del tornillo es la que se encuentra dentro del barril sin tomar en cuenta la distancia del tornillo bajo la tolva, por lo cual, es necesario restar la dicha distancia de la longitud total. La relación  $\frac{L}{D}$  estándar recomendada para diseño para tornillos, según Giles et al., 2005b es de:

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

Con este valor se puede diseñar el tornillo extrusor como se lo observa, en la Figura 41.

**Figura 41***Tornillo extrusor*

La nomenclatura de los parámetros de diseño del tornillo se encuentra en la Figura 14.

***Volumen uno.***

El volumen uno hace referencia al volumen de un lado del interior del barril por cada longitud de paso, el cual se calcula mediante la ecuación (19)

$$V_1 = \left\{ \left( \pi - \frac{\alpha}{2} \right) R^2 + \left( R - \frac{H}{2} \right) \sqrt{RH - \frac{H^2}{4}} \right\} B \quad (19)$$

$$\alpha = 2 \tan^{-1} \left[ \frac{\sqrt{RH - \frac{H^2}{4}}}{R - \frac{H}{2}} \right] \quad (20)$$

Donde:

$\alpha$ : Ángulo de sobreposición

$R$ : Radio externo del tornillo

$H$ : Profundidad de canal

En la Tabla 13, se encuentra los valores calculados de volumen uno para cada paso del tornillo.

**Tabla 13**

*Valores de  $V_1$  para cada paso del tornillo.*

<b>Dato</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Cálculo</b>	<b>Unidad</b>
Pasos Segmentos	$B_1$	10,000	<i>mm</i>
	$B_2$	20,000	<i>mm</i>
	$B_3$	40,000	<i>mm</i>
Volumen 1	$V_{11}$	3762,187	$mm^3$
	$V_{12}$	7524,374	$mm^3$
	$V_{13}$	15048,747	$mm^3$

**Volumen dos.**

Es el volumen del diámetro interno del tornillo por cada longitud de paso, el cual se calcula mediante la ecuación (21).

$$V_2 = \pi(R - H)^2 * B \quad (21)$$

Donde:

$B$ : Paso de segmento

En la Tabla 14, se encuentra los valores calculados de volumen dos para cada paso del tornillo.

**Tabla 14**

*Valores de  $V_2$  para cada paso del tornillo*

<b>Dato</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Cálculo</b>	<b>Unidad</b>
Pasos Segmentos	$B_1$	10,000	$mm$
	$B_2$	20,000	$mm$
	$B_3$	40,000	$mm$
Volumen 2	$V_{21}$	2421,804	$mm^3$
	$V_{22}$	4843,607	$mm^3$
	$V_{23}$	9687,214	$mm^3$

**Volumen tres.**

El volumen tres es el volumen de la hélice por cada longitud de paso, viene expresada mediante la ecuación (22)

$$V_3 = 2\pi \left\{ \left( RH - \frac{H^2}{2} \right) e + \left( EH^2 - \frac{2}{3} H^3 \right) \tan \varphi \right\} \quad (22)$$

En la Tabla 15, se encuentra los valores calculados de volumen tres para cada paso del tornillo.



**Tabla 15**

Valores de  $V_3$  para cada paso del tornillo

Dato	Símbolo	Cálculo	Unidad
Pasos Segmentos	$B_1$	10,000	mm
	$B_2$	20,000	mm
	$B_3$	40,000	mm
Volumen 3	$V_{31}$	204,814	mm <sup>3</sup>
	$V_{32}$	399,902	mm <sup>3</sup>
	$V_{33}$	736,360	mm <sup>3</sup>

**Volumen total.**

El volumen total es el volumen que ocupa el material dentro del barril por cada número hélices, el cual viene expresado mediante la ecuación (23).

$$V_t = \frac{V_1 - V_2 - nV_3}{n} \quad (23)$$

Donde:

$V_1$ : Volumen 1

$V_2$ : Volumen 2

$V_3$ : Volumen 3

$n$ : Número de hélices

En la Tabla 16, se muestra el volumen total que se encuentra en cada paso del tornillo extrusor.

**Tabla 16**

Valores de volumen total para cada paso del tornillo

Dato	Símbolo	Cálculo	Unidad
Pasos Segmentos	$B_1$	10,000	mm
	$B_2$	20,000	mm
	$B_3$	40,000	mm
Volumen Total	$V_{t1}$	465,378	mm <sup>3</sup>
	$V_{t2}$	940,481	mm <sup>3</sup>
	$V_{t3}$	1944,407	mm <sup>3</sup>

**Caudal Teórico.**

El caudal teórico es el caudal calculado y que debería producir la extrusora sin presencia del dado por cada longitud de paso, esta expresado por:

$$Q_{th} = 2nNV_t\rho \quad (24)$$

En la Tabla 17, se muestra el caudal teórico en cada paso del tornillo extrusor

**Tabla 17**

*Valores de caudal teórico para cada paso del tornillo.*

Dato	Símbolo	Cálculo	Unidad
Pasos Segmentos	$B_1$	10,000	mm
	$B_2$	20,000	mm
	$B_3$	40,000	mm
Caudal Teórico	$Q_{th1}$	135,364	kg/hr
	$Q_{th2}$	273,556	kg/hr
	$Q_{th3}$	565,566	kg/hr
Velocidad	$N_1$	120,000	rpm
	$N_2$	100,000	rpm
	$N_3$	80,000	rpm

**Cambio de presión de presión axial.**

Existen dos fuentes que pueden hacer variar la presión en un tornillo del extrusor, se calcula mediante la ecuación (25)

$$\Delta_p = 6\eta \frac{2RN}{H^2} \left( \frac{B}{n} - e \right) \quad (25)$$

Donde:

$\eta$ : Viscosidad Efectiva [Pas]

$D_B$ : Radio del Barril [mm]

$N$ : Velocidad del tornillo  $\left[ \frac{rev}{s} \right]$

$H$ : Profundidad del canal [mm]

$B$ : Paso del tornillo [mm]

$n$ : Número de hélices

$e$ : Ancho de hélice [mm]

En la Tabla 18 se muestra el cambio de presión por movimiento de pared cilíndrica de cada sección de tornillo.

**Tabla 18**

Valores de cambio de presión para cada paso del tornillo.

Dato	Símbolo	Cálculo	Unidad
Pasos Segmentos	$B_1$	10,000	mm
	$B_2$	20,000	mm
	$B_3$	40,000	mm
Cambio de presión por movimiento de pared cilíndrica	$\Delta_{p1}$	766426,888	Pa
	$\Delta_{p2}$	1547509,459	Pa
	$\Delta_{p3}$	3190630,639	Pa

**Flujo de fuga de calentamiento.**

Es el flujo que se da entre dos tornillos entre lazados y se calcula mediante la ecuación (26). Existen cuatro flujos de fuga de calentamiento, dos por cada tornillo. Por esta razón la ecuación es multiplicada por cuatro.

$$Q_c = \frac{4(B - e * n)}{3n} \left\{ N\pi(2R - H)s - \frac{\Delta_p * s^3}{6\pi\eta\sqrt{(2R - H)\frac{s}{2}}} \right\} \quad (26)$$

s: Holgura entre tornillos

En la Tabla 19 se muestra el flujo de fuga de calentamiento de cada sección de tornillo.

**Tabla 19**

Valores de flujo de fuga de calentamiento para cada paso del tornillo

Dato	Símbolo	Cálculo	Unidad
Pasos segmentos	$B_1$	10,000	mm
	$B_2$	20,000	mm
	$B_3$	40,000	mm
Calender Leakage Flow N1	$Q_{c11}$	1,751	kg/hr
	$Q_{c12}$	3,416	kg/hr
	$Q_{c13}$	6,527	kg/hr
Calender Leakage Flow N2	$Q_{c21}$	1.449	kg/hr
	$Q_{c22}$	2.807	kg/hr
	$Q_{c23}$	5.272	kg/hr
Calender Leakage Flow N3	$Q_{c31}$	1.148	kg/hr
	$Q_{c32}$	2.199	kg/hr
	$Q_{c33}$	4.018	kg/hr

### Flujo de fuga de espacio tetraédrico.

Existe otra abertura entre las hélices de los tornillos y la pared internas del tornillo, este flujo se calcula mediante la ecuación (27).

$$Q_t = \frac{\Delta_p * R^3}{\eta} * 0.0054 * \left(\frac{H}{R}\right)^{1.8} * \left[\varphi + 2\left(\frac{\varepsilon + s \tan \varphi}{H}\right)^2\right] \quad (27)$$

En la Tabla 20 se muestra el cálculo de flujo de fuga de espacio tetraédrico producido por cada paso del tornillo.

**Tabla 20**

*Valores de Flujo de fuga de espacio tetraédrico para cada paso del tornillo.*

Dato	Símbolo	Cálculo	Unidad
	$B_1$	10,000	mm
Pasos segmentos	$B_2$	20,000	mm
	$B_3$	40,000	mm
	$Q_{t1}$	0,889	kg/hr
Tetrahedral gap leakage flow	$Q_{t2}$	6,691	kg/hr
	$Q_{t3}$	62,631	kg/hr

### Flujo de fuga de espacio de vuelo.

La abertura entre las hélices de los tornillos y la pared interna del barril en la cual se produce un flujo el cual se determina mediante la ecuación (28).  $\Delta_p$  será igual a cero cuando no este conectado un dado de extrusión al barril.

$$Q_f = (2\pi - 2\psi)R \left\{ \frac{2\pi RN\delta}{2} + \frac{\delta^3}{6\eta e} \left[ 3\eta \frac{2\pi RN}{H^2} * \left(\frac{B}{n} - e\right) + \Delta_p \right] \right\} \quad (28)$$

En la Tabla 21 se muestra el cálculo de flujo de fuga de espacio de vuelo producido por cada paso del tornillo.

**Tabla 21**

Valores de Flujo de fuga de espacio de vuelo para cada paso del tornillo.

Dato	Símbolo	Cálculo	Unidad
Pasos segmentos	$B_1$	10,000	mm
	$B_2$	20,000	mm
	$B_3$	40,000	mm
Flight gap leakage Flow N1	$Q_{f11}$	2,411	kg/hr
	$Q_{f12}$	2,411	kg/hr
	$Q_{f13}$	2,414	kg/hr
Flight gap leakage Flow N2	$Q_{f21}$	2,009	kg/hr
	$Q_{f22}$	2,009	kg/hr
	$Q_{f23}$	2,011	kg/hr
Flight gap leakage Flow N3	$Q_{f21}$	1,607	kg/hr
	$Q_{f22}$	1,608	kg/hr
	$Q_{f23}$	1,609	kg/hr

**Flujo de fuga de espacio lateral.**

Este flujo es producido por el material que se fuga en los vértices de las hélices.

$$Q_s = \pi N(2R - H)(H - s)(\varepsilon + s \tan \varphi) \quad (29)$$

En la Tabla 22 se presenta el flujo de fuga de espacio lateral producido por cada paso del tornillo.

**Tabla 22**

Valores de Flujo de fuga de espacio lateral para cada paso del tornillo.

Dato	Símbolo	Cálculo	Unidad
Pasos Segmentos	$B_1$	10,000	mm
	$B_2$	20,000	mm
	$B_3$	40,000	mm
Side Gap Leakage Flow N1	$Q_{s11}$	1,244	kg/hr
	$Q_{s12}$	2,575	kg/hr
	$Q_{s13}$	5,714	kg/hr
Side Gap Leakage Flow N2	$Q_{s21}$	1,037	kg/hr
	$Q_{s22}$	2,145	kg/hr
	$Q_{s23}$	4,762	kg/hr
Side Gap Leakage Flow N3	$Q_{s31}$	0,829	kg/hr
	$Q_{s32}$	1,716	kg/hr
	$Q_{s33}$	3,809	kg/hr

**Caudal total.**

El caudal total es la resta del caudal teórico de todos los caudales de fuga. EL cual es calculado mediante la ecuación (30).

$$Q_{total} = Q_{th} - Q_t - 2Q_f - 4Q_c - 4Q_s \quad (30)$$

En la Tabla 23, se muestra el cálculo del caudal total producido por cada paso de tornillo.

**Tabla 23**

*Valores del caudal total para cada paso del tornillo.*

<b>Dato</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Cálculo</b>	<b>Unidad</b>
Pasos Segmentos	$B_1$	10,000	mm
	$B_2$	20,000	mm
	$B_3$	40,000	mm
Caudal Total N1	$Q_{tot11}$	117,675	kg/hr
	$Q_{tot12}$	238,082	kg/hr
	$Q_{tot13}$	449,144	kg/hr
Caudal Total N2	$Q_{tot21}$	120,514	kg/hr
	$Q_{tot22}$	243,036	kg/hr
	$Q_{tot23}$	458,776	kg/hr
Caudal Total N3	$Q_{tot33}$	123,352	kg/hr
	$Q_{tot32}$	247,990	kg/hr
	$Q_{tot33}$	468,409	kg/hr

Si al final del barril no existiera una placa rompedora y un dado de extrusión la producción de la maquina extrusora seria la máxima,  $Q_{max}$ . Dicho caudal es el producido por la sección de tornillo con el paso mas pequeño, cuyo valor es:

$$Q_{tot1} = Q_{max} = 117,675 \frac{kg}{h}$$

**Presión Máxima en el tornillo extrusor.**

La presión máxima es la que ejerce el tornillo en la parte delantera del extrusor, llamada zona de dosificación. Dicha presión se produce por el paso de tornillo más pequeño cuyo valor es:

$$\Delta p_1 = P_{MAX} = 766426.88 \text{ Pa} \\ \approx 0.76 \text{ MPa}$$

### **Presión de operación en la boquilla.**

Para que el material fundido salga por el dado extrusor, el cual se encuentra en el extremo del extrusor, se necesita de una presión de operación la cual se calcula mediante la ecuación (31)

$$Q = \frac{\pi * D_B^4 * P_{op}}{128 * \eta * L_D} \quad (31)$$

Donde:

$Q$ : Caudal Volumétrico de salida  $\left[\frac{mm^3}{s}\right]$

$L_D$ : Longitud del dado  $[mm]$

$\eta$ : Viscosidad efectiva  $[Pa \cdot s]$

Remplazando valores se obtiene:

$$P_{op} = \frac{128 * Q * \eta * L_D}{\pi * D_B^4}$$

$$P_{op} = 16.24 \text{ MPa}$$

Donde  $P_{op}$  es la presión en el dado.

### **Fuerzas del tornillo.**

Para el cálculo de las fuerzas presentes en el tornillo se debe determinar la masa y volumen total del tornillo. Los datos necesarios se obtienen del software CAD utilizado para modelar la extrusora, los datos obtenidos se presentan en la Tabla 24.

**Tabla 24**

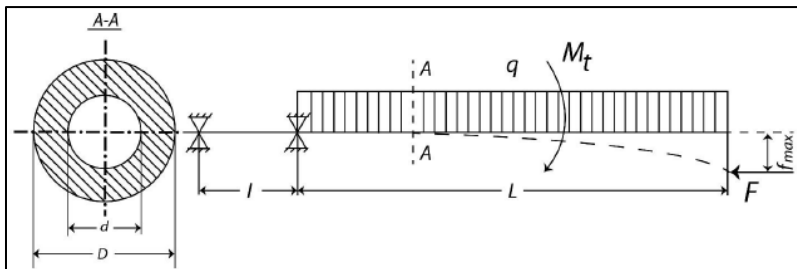
*Volumen y masa total del tornillo extrusor*

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Masa Total	1091.46	gramos
Volumen Total	139930.61	$mm^3$

En la Figura 42, se muestran un diagrama de las tensiones que se producen en el tornillo. Sobre el cual actúa una fuerza axial, el momento de giro y una carga uniformemente repartida debido al peso del husillo.

**Figura 42**

*Diagrama de fuerzas en un tornillo.*



*Nota: Obtenido de (Chávez, 2018).*

El momento torsor  $M_t$  producido por el motor en el tornillo se calcula mediante la ecuación (32)

$$M_t = 9550 \frac{kW}{N} \quad (32)$$

Donde:

$kW$ : Potencia del motor [ $kW$ ]

$N$ : Revoluciones del tornillo [ $RPM$ ]

Remplazando valores se obtiene

$$M_t = 9550 \frac{0.88}{120}$$

$$M_t = 70.033 [Nm]$$

Para el cálculo de la fuerza axial presente en el tornillo, se debe tomar en cuenta la superficie de la sección transversal del tornillo y la presión máxima presente en la parte delantera del tornillo, el cálculo de la fuerza axial esta expresado por la ecuación (33).

$$F = S_t * p \quad (33)$$

Donde

$S_t$ : Sección transversal del husillo [ $m^2$ ]

$p$ : Presión en la parte delantera del tornillo [ $Pa$ ]



La sección transversal del tornillo se calcula mediante la ecuación (34)

$$S_t = \pi * \frac{D_e^2(1 - u^2)}{4} \quad (34)$$

Donde:

$u$ : relación entre los diámetros del tornillo

$d$ : diámetro del alma del tornillo

$$u = \frac{d}{D_B}$$

$$d = 0.01736$$

Por lo tanto

$$S_t = \pi * \frac{0.0217^2 \left( 1 - \left( \frac{0.01736}{0.0217} \right)^2 \right)}{4}$$

$$S_t = 0.000074[m^2]$$

Reemplazando los valores para el cálculo de la fuerza axial se tiene

$$F = 0.000074 * 766426.88$$

$$F = 56.69[N]$$

El esfuerzo de corte sobre el tornillo, es otra fuerza que se debe tomar en cuenta, dicho esfuerzo se calcula mediante la ecuación (35)

$$\tau = \frac{M_t}{W_p} \quad (35)$$

Donde:

$W_p$ : Momento polar de inercia [ $m^3$ ]

El momento polar de inercia se calcula mediante la ecuación (36)

$$W_p = \frac{\pi * D_e^3}{16} (1 - u^4) \quad (36)$$

$$W_p = 1.1846E^{-6}[m^3]$$

Reemplazando los valores se obtiene.

$$\tau = 59[MPa]$$

Las tensiones presentes en el tornillo son provocadas por la fuerza axial y el peso del tornillo. La ecuación (37) nos permite el cálculo de esta tensión.

$$\sigma = \frac{F}{S_t} + \frac{M_f}{W_o} \quad (37)$$

Donde:

$M_f$ : Momento flector máximo [Kgm]

$W_o$ : Momento de inercia respecto al eje neutro [ $m^3$ ]

El momento flector máximo se calcula mediante la ecuación (38).

$$M_f = \frac{\rho * L^2}{2} * \frac{\pi * D_e^2}{4} * (1 - u^2) * g \quad (38)$$

Donde:

$\rho$ : densidad del material del tornillo [ $\frac{Kg}{m^3}$ ]

$L$ : Longitud de trabajo del tornillo [m]

$g$ : Aceleración de la gravedad [ $\frac{m}{s^2}$ ]

Reemplazando los valores, tomando en cuenta que el material escogido para el tornillo es el AISI H13 cuya densidad es de  $7700 \frac{Kg}{m^3}$ , el momento flector es:

$$M_f = \frac{7700 * 0.44^2}{2} * \frac{\pi * 0.0217^2}{4} * (1 - 0.62^2) * 9.81$$

$$M_f = 1.66[Nm]$$

El momento de inercia con respecto al eje neutro se calcula mediante la ecuación (39)

$$W_o = \frac{\pi * D_e^3}{32} * (1 - u^4) \quad (39)$$

$$W_o = \frac{\pi * 0.0217^3}{32} * (1 - 0.62^4) = 5.9228E^{-7}[m^3]$$

Reemplazando los valores, la tensión es.

$$\sigma = \frac{56.69}{0.000074} + \frac{1.66}{5.92E^{-7}}$$

$$\sigma = 3568819.994 \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

Con estos valores se procede a calcular la tensión máxima, la cual se calcula con la ecuación (40)

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \quad (40)$$

$$\sigma_r = \sqrt{3568819.994^2 + 4(59121751.29)^2}$$

$$\sigma_r = 118.24 \text{ MPa}$$

Con el valor de tensión máxima se procede a comprobar si el tornillo soportara la tensión. Para que el tornillo resista las tensiones, el valor de  $\sigma_r$  debe ser menor a la tensión admisible del material del tornillo.

$$\sigma_r < \sigma_{adm}$$

$$118.24 \text{ MPa} < 844 \text{ MPa}$$

El ultimo calculo necesario es el cálculo de la flecha máxima del husillo al aplicar la carga repartida, lo cual se realiza mediante la ecuación (41)

$$f_{max} = \frac{q * L^4}{8EJ} \quad (41)$$

Donde:

$f_{max}$ : flecha máxima [m]

$q$ : Peso del tornillo por metro lineal [Nm]

$L$ : Longitud de trabajo del tornillo [m]

$E$ : Modulo de elasticidad del tornillo [Pa]

$J$ : Momento de Inercia de la sección transversal [m<sup>4</sup>]

El peso del tornillo por metro lineal se calcula mediante la ecuación (42)

$$q = \rho * g * S_t \quad (42)$$

El momento de inercia de la sección transversal se calcula mediante la ecuación (43)

$$J = \frac{\pi * D_e^4}{64} (1 - u^4) \quad (43)$$

Remplazando las ecuaciones (42) y (43) en la ecuación (41), se obtiene

$$f_{max} = \frac{\rho * g * S_t * L^4}{8E * \frac{\pi * D_e^4}{64} (1 - u^4)}$$

$$f_{max} = \frac{7700 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right] * 9.81 \left[ \frac{m}{s^2} \right] * 0.000074[m^2] * (0.44[m])^4}{8(200 * 10^9) * \frac{\pi * (0.0217[m])^4}{64} (1 - 0.62^4)}$$

$$2.03E^{-5} < 0.1$$

Se comprueba que la flecha máxima es menor a la holgura entre el barril y el tornillo, por lo cual no existirá interferencia entre estos dos elementos.

### Placa Rompedora.

La placa rompedora se forma por una serie de huecos uniformes de aproximadamente 3mm, maquinados a través del espesor del disco que esta correctamente alineado con la dirección del flujo, los agujeros deben permitir el flujo del material y deberían ofrecer una restricción mínimo de flujo, la placa rompedora debe encajar al final del barril y se la una también para soportar mallas metálicas que sirven para el filtrado del material (Goff & Whelan, 2016). En la Figura 43, se muestra las variables geométricas para la construcción del plato rompedor

### Figura 43

*Variables geométricas del plato rompedor.*



*Nota: Obtenido de (Ramos, 2013)*

Para calcular el espesor de la placa rompedora, se toma en cuenta la presión de operación que existe en el dado, la fuerza aplicada en la placa rompedora se calcula mediante la ecuación (44)

$$Fuerza = P_{op} * \frac{\pi * \phi^2}{4} \quad (44)$$

$$Fuerza = 16,24 * 10^6 Pa * \frac{\pi * 0,0219^2}{4}$$

$$Fuerza = 6117.4 N$$

Mediante la definición de esfuerzo cortante se tiene la ecuación (45)

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (45)$$

Donde:

$$A = \pi \phi * e$$

Despejando reemplazando el Área en la ecuación (45), se obtiene:

$$e = \frac{F}{\pi \phi * \tau}$$

El esfuerzo cortante permisible del AISI P20 es 862 MPa. Reemplazando los valores, se obtiene

$$e = \frac{6117.4}{\pi * 0.0219 * 0.5 * 862 * 10^6}$$

$$e \cong 2mm$$

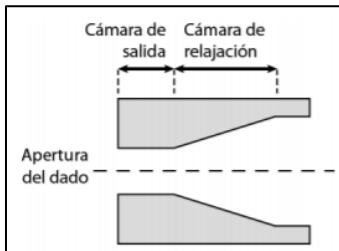
El espesor de la placa rompedora es de 2mm de espesor.

#### **Dado Extrusor.**

El dado debe proveer una razón constante de material a través de su agujero de salida “Entre más viscoso sea el plástico fundido menor será el ángulo de entrada del dado necesario para obtener un flujo suave y constante” (Ramos, 2013). En la Figura 44, se muestra las secciones del dado.

**Figura 44**

*Secciones del dado.*

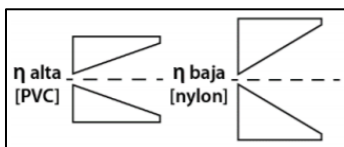


*Nota: Obtenido de (Mariano, 2011b).*

En la Figura 45 se muestra los ángulos de entrada para el PVC y nylon. La viscosidad entre el polipropileno y el nylon se encuentran en el mismo margen.

**Figura 45**

*Ángulos para el PVC y el nylon.*



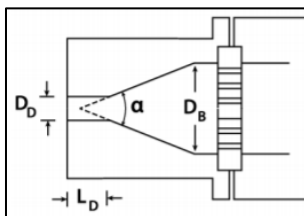
*Nota: Obtenido de (Ramos, 2013)*

Las variables a determinar para la construcción del dado extrusor se muestran en la

Figura 46.

**Figura 46**

*VARIABLES PARA EL DISEÑO DE UN DADO.*



*Nota: Obtenido de (Ramos, 2013)*

Donde:

$D_d$ : Diámetro del orificio del dado

$D_b$ : Diámetro del Barril

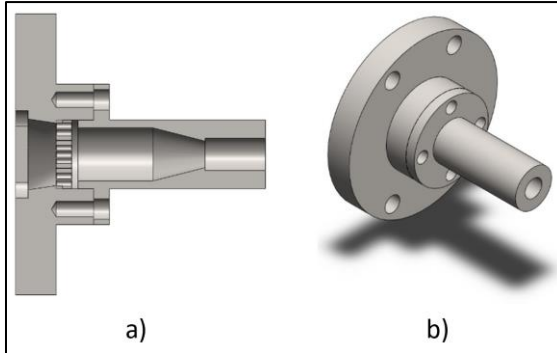
$\alpha$ : Ángulo de entrada del dado

$L_D$ : Longitud del dado o boquilla

Tomando en cuenta las variables mostradas en la Figura 47, se toma da el valor de  $\alpha = 30^\circ$  y  $L_D = 20 \text{ mm}$ . Por lo cual la cámara de relajación tiene una distancia de  $b = 33.6 \text{ mm}$ . En la Figura 47 se muestra el dado extrusor para la extrusora.

**Figura 47**

*Dado Extrusor.*



*Nota: a) Corte de la boquilla b) Vista en perspectiva de la boquilla.*

#### **Transmisión de potencia.**

Para la transmisión de potencia se debe considerar que la extrusora es de doble tornillo, los cuales poseen un mismo sentido de rotación.

#### **Diseño de Engranés.**

Para la construcción de una transmisión mediante engrandes rectos se realizó una estimación del módulo basado en la fuerza del diente. El cálculo respectivo se lo realiza mediante la ecuación (46)

$$m = \left\{ \frac{60 \times 10^6}{\pi} \left[ \frac{kW(C_s)(f_s)}{Z_g(n_g)(C_v) \left(\frac{b}{m_e}\right) \left(\frac{S_{ut}}{3}\right) (Y)} \right] \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (46)$$

Los datos de entrada para la estimación del modulo se muestran en la Tabla 25.

**Tabla 25**

Datos de entrada para estimación de modulo.

Variable de entrada	Símbolo	Valor	Unidad
Potencia del motor	$kW$	1.0	$hp$
Ancho de cara	$b$	15	$mm$
Módulo estimado	$m_e$	2	
Velocidad angular del engrane	$n_g$	120	$rpm$
Factor de servicio	$C_s$	1.1	
Factor de seguridad	$f_s$	1.5	
Diametro externo del piñon	$d_e$	25	$mm$

El factor de fora de lewis ( $Y$ ) se calcula mediante la ecuacion (47)

$$Y = \frac{t^2}{6hm} \quad (47)$$

Donde:

$t$ : Ancho del diente

$h$ : Alto de diente

El factor de velocidad  $C_v$  se calcula mediante la ecuacion (48) y (49).

$$C_v = \frac{3}{3 + v} \quad (48)$$

$$v = \frac{\pi(d)n}{60 \times 10^3} \quad (49)$$

Donde:

$v$ : Velocidad lineal

$d$ : Diametro de paso del engrane

Los valores de: ancho de diente, alto de diente y ancho de cara, se han modificado para

obtener un modulo pequeño y cumplir con los requerimeintos iniciales, los dotos obtenidos se

muestran en la Tabla 26.

**Tabla 26**

Cálculo del Módulo real.

Variable	Símbolo	Valor	Unidad
Factor de forma de lewis	$Y$	0,228	
Esfuerzo permisible flector ( $\sigma \cdot y$ )	$\Sigma_B$	526,667 120,324	$MPa$ $MPa$
Velocidad lineal	$V$	0,226	$m/s$
Factor de velocidad	$C_v$	0,930	



Variable	Símbolo	Valor	Unidad
Factor de servicio	$C_s$	1,100	
Factor de seguridad	$F_s$	1,500	
Modulo calculado	$M$	1.6	mm

De acuerdo a los calculos realizados el modulo deberia ser 1.6. Ya que dicho modulo no existe se aproxima al modulo mas cercano el cual es 2.

Con los Valores obtenidos, se procede a realizar los calculos necesarios para los engranes mediante las siguientes formulas constructivas mostradas en la Tabla 27.

**Tabla 27**

*Formulas constructivas para engranes.*

Variable	Ecuación
Diametro primitivo	$D_p = Z * m$ (50)
Diametro exterior	$D_e = D_p + 2m$ (51)
Altura del diente	$h = (2.167 \text{ ó } 2.25)m$ (52)
Diametro interior	$D_i = D_e - 2h$ (53)
Paso	$P = \pi * m$ (54)
Espesor de diente	$e = \frac{\pi * m}{2}$ (55)
Ancho de cara (ancho del engrane)	$b = (6 \text{ a } 10) * m$ (56)
Distancia entre centros	$D_c = \frac{D_p + d_p}{2}$ (57)

Los datos de entrada para obtener los datos constructivos de los engranes se muestran en la Tabla 28.

**Tabla 28**

*Datos de entrada para el diseño del Engrane y Piñón.*

Variable de entrada	Valor	Unidad
Potencia del motor	1,00	hp
Modulo estimado	2,00	mm
Velocidad angular de entrada (engrane)	120,00	rpm
Velocidad angular de salida (piñon)	120,00	rpm
Relacion (i)	1,00	

Los valores calculados para la contruccion de piñon y engrane se muestran el la Tabla 29.

**Tabla 29**

Valores calculados para el diseño del engrane y piñón.

Variable	Unidad	Valor	Unidad
Número de dientes piñón	$Z_p$	18,00	
Número de dientes engrane	$Z_G$	27,00	
Diámetro primitivo piñón	$D_{pp}$	36,00	mm
Diámetro primitivo engrane	$D_{pe}$	54,00	mm
Diámetro exterior piñón	$D_{ep}$	40,00	mm
Diámetro exterior engrane	$D_{ee}$	58,00	mm
Ángulo de presión		20,00	°
Adendum		1,60	mm
Dedendum		2,00	mm
Holgura		0,40	mm
Profundidad de trabajo		3,20	mm
Altura del diente	$H$	3,60	mm
Ancho del diente	$T$	3,14	mm
Ancho de cara	$B$	30,00	mm
Distancia entre centros (piñón - engrane)		45,00	mm
Número de dientes piñón	$Z_p$	10	
Número de dientes Engrane	$Z_G$	15	
Diámetro primitivo Piñón	$D_{pp}$	20,00	mm
Diámetro primitivo Engrane	$D_{pe}$	30,00	mm
Diámetro exterior Piñón	$D_{ep}$	24,00	mm
Diámetro exterior Engrane	$D_{ee}$	34,00	mm

**Resistencia del Diente de Engrane.** Para calcular la resistencia del diente se utilizaron

las fórmulas mostradas en la Tabla 30.

**Tabla 30**

Fórmulas para cálculo de resistencia de diente.

Variable	Ecuación
Inercia	$I = \left(\frac{1}{12}\right)bt^3$ (58)
Punto medio del diente	$y = \frac{t}{2}$ (59)
Esfuerzo flector permisible	$\sigma_b = \frac{P_t * h * y}{I}$ (60)
Fuerza tangencial	$P_t = \frac{2 * M_t}{dp}$ (61)
Fuerza radial	$P_r = P_t * Tan(20)$ (62)

Variable	Ecuación	
Fuerza resultante	$P_n = \frac{P_t}{\cos(20)}$	(63)
Fuerza tangencial maxima	$P_{tmax} = P_t * C_s$	(64)
Torque transmitido	$M_t = \frac{60 * 10^6 * (kW)}{2\pi n}$	(65)
Resistencia del diente	$S_b = mb\sigma_b Y$	(66)
Carga efectiva	$P_{eff} = \frac{C_s * P_t}{C_v}$	(67)

Para el calculo del de la resistencia del diente se utilizan los datos del piñón ya que es el elemento mas critico dentro de la transmision de potencia, obteniendo como resultado los datos mostrados en la Tabla 31.

**Tabla 31**

*Resultados obtenidos para el cálculo de la resistencia del diente.*

Variable	Símbolo	Valor	Unidad
Potencia del motor	$kW$	1,000	$kW$
Torque transmitido	$M_T$	59340,921	$Nmm$
Fuerza Tangencial	$P_T$	5934,092	$N$
Fuerza Radial	$P_R$	2159,833	$N$
Fuerza resultante	$P_N$	6314,929	$N$
Fuerza tangencial Maxima	$P_{max}$	6527,501	$N$
Factor de servicio	$C_s$	1,100	
Velocidad Lineal	$V$	0,126	$m/s$
Factor de Velocidad	$C_v$	0,960	
Carga Efectiva	$P_{ef}$	6800,925	$N$
Inercia	$I$	77,516	$mm^4$
Mitad del diente	$Y$	1,571	$mm$
Esfuerzo Flector	$\Sigma_B$	432,897	$MPa$
Factor de formar de Lewis	$Y$	0,228	
Resistencia de viga del diente	$S_B$	6945,310	$N$
Esfuerzo Flector Permisible	$\Sigma_{BP}$	506,667	$MPa$

Al comparar la resistencia de viga del diente y la carga permisible, se observa que:

$$S_b \geq P_{eff}$$

$$6945.31 \geq 6800.92$$

Se comprueba que el diente puede transmitir 1 Hp de potencia.

**Diseño de Eje.**

Con la fuerza tangencial y radial mostradas en la Tabla 31, se procede a calcular el diametro de los ejes mediante la ecuacion (68)

$$d = \left\{ \frac{16f_s}{\pi} \left[ \frac{2(k_f M_a)}{S_e} + \frac{[2(k_{fs} T_m)^2]^{\frac{1}{2}}}{S_{ut}} \right] \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (68)$$

Para el calculo del momento maximo ( $M_a$ ) se realizo un estudio estatico del tipo viga con dos apoyos.

Los datos de entrada para el calculo del eje tanto para el engrane como el piñon se muestran en la Tabla 32. Se debe tomar en cuenta el el torque para los dos elementos es el mismo, mientras que el momento es diferente.

**Tabla 32**

*Datos de Entrada para el cálculo del eje para engrane y piñón.*

<b>Variable de entrada</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Fuerza tangencial maxima del Engane	3296.72	<i>N</i>
Fuerza tangencial maxima del Piñon	5934.09	<i>N</i>
Longitud del Eje	170	<i>mm</i>
Distancia al primer engrane	25	<i>mm</i>
Distancia al segundo engrane	105	<i>mm</i>
Distancia al tercer engrane	145	
Torque maximo	59341	<i>Nmm</i>
Sut del acero	1345	<i>MPa</i>
Factores de Marin	Ka=0.668 kb=0.899 kc=kd=1 ke=0.814	
Se'	672.5	<i>MPa</i>
Factor de seguridad fs	1.5	

Con los datos mencionados se procede a realizar el calculo del eje para el engrane y piñon obteniedo los valores mostrados en la Tabla 33.

**Tabla 33**

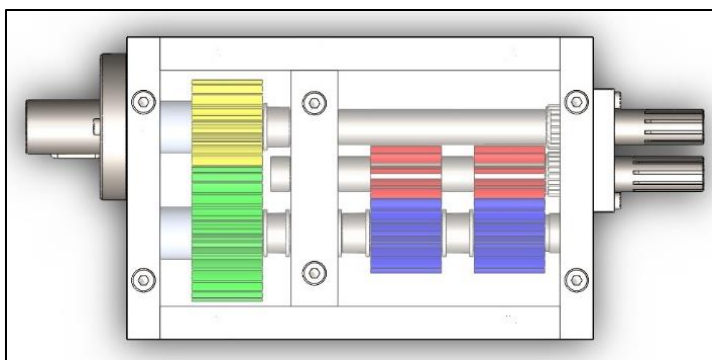
*Diámetro de ejes para Engrane y Piñón.*

Variable	Símbolo	Valor	Unidad
Diámetro para el engrane	$D$	18	$mm$
Diámetro para el piñón	$D_p$	17	$mm$

Con los datos presentados, la caja de transmisión de potencia, desde el moto reductor hacia los tornillos extrusores se presenta en la Figura 48.

**Figura 48**

*Caja de transmisión de potencia Moto reductor – tornillos extrusores.*



### **Gradiente de temperatura.**

Para garantizar la mezcla y extrusión del PLA con el polvo metálico el barril debe poseer varias temperaturas entre la zona de alimentación, mezcla, dosificación y el dado extrusor. En la Tabla 34, se muestra las temperaturas a las que se deben encontrar cada zona.

**Tabla 34**

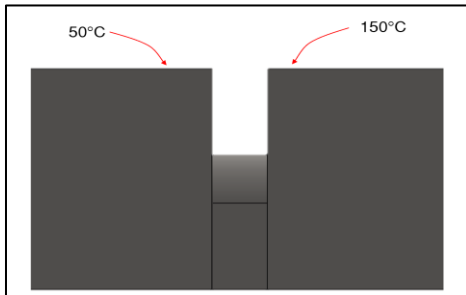
*Temperatura de las zonas de la maquina EDT*

Zona	Temperatura (°C)
Alimentación	50
Mezcla	150-170
Dosificación	140-160
Dado extrusor	155-175

El mayor gradiente de temperatura se encuentra entre las zonas de alimentación y mezcla como se muestra en la Figura 49.

**Figura 49**

*Temperaturas de la sección de Alimentación y mezcla.*



Por lo cual la transferencia de calor entre estas dos secciones considerando el material aislante entre estas viene expresado mediante la ecuación (69).

$$Q_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (69)$$

Donde:

K: Conductividad Térmica del Aislante (0.044 W/mk)

A: Área perpendicular a la dirección de transferencia de calor.

$T_1$ : Temperatura de la pared uno

$T_2$ : Temperatura de la pared dos

L: Separación entre las dos paredes

$$Q_{cond} = 0.044 \left[ \frac{W}{mK} \right] * 0.000921[m^2] \frac{50[^\circ C] - 150[^\circ C]}{0.01[m]}$$

$$Q_{cond} = 0.41[W]$$

### **Diámetro del perfil extruido.**

Considerando que el instituto mexicano del plástico menciona que el porcentaje de contracción al momento de extruir es de 1.75%, el diámetro de la boquilla para extruir es:

$$D_d = D \text{ del filamento} * 1.0175 \quad (70)$$

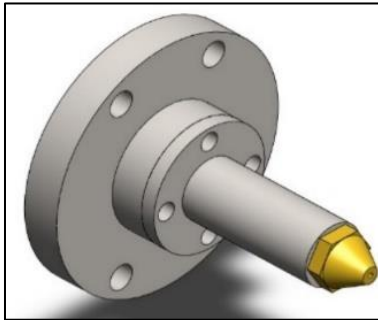
$$D_d = 1.75 * 1.0175$$

$$D_d = 1.78 \text{ mm}$$

El dado extrusor se muestra en la Figura 50, con un diámetro de extrusión de acuerdo al calculado

**Figura 50**

*Boquilla y dado extrusor.*



**Base de la maquina extrusora.**

La base en donde se va colocar la maquina extrusora, la cual conlleva: motor, caja de transmisión y extrusora, debe ser lo suficientemente robusta para soportar el peso de la máquina. La base se ha realizado de tubo estructural de dos pulgadas por tres milímetros de grosor, como se muestra en la Figura 51. Las dimensiones de la base son: Largo 1220 *mm*, Ancho 450 *mm* y Altura 900 *mm*.

**Figura 51**

*Base de maquina extrusora.*



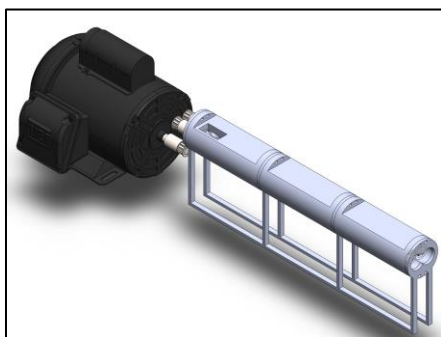
### Diseño conceptual.

Para llegar al diseño final de la maquina extrusora se plantearon algunos diseños que han ido cambiando en el desarrollo del presente trabajo ya sea por la facilidad de adquisición de material como la factibilidad del proceso de fabricación de ciertas piezas

La primera propuesta de diseño, mostrada en la Figura 52, nació de la revisión bibliográfica de extrusoras de tornillo simple, la cual planteaba un diseño de extrusora cuyo barril era de forma circular.

#### Figura 52

*Primera propuesta de diseño de la extrusora.*



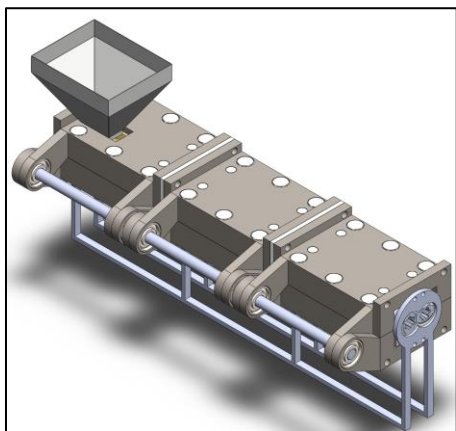
La complicación que presento dicho diseño fue la facilidad de adquisición del material para la fabricación del barril de extrusión. Otro punto que se consideró es la distribución de calor que esta presentaría al ser de forma circular, la cual no sería de manera uniforme en toda la superficie de la extrusora ya que existe más material en ciertas partes en comparación a otras.

La segunda propuesta de diseño, mostrada en la Figura 53, muestra un diseño de barril rectangular seccionado en tres partes lo que permite un mejor control de temperatura y dividido en la mitad para la apertura del barril lo cual facilitaba su limpieza. Los barriles presentaban bisagras q ayudaban en el cierre y apertura del barril



**Figura 53**

*Segunda propuesta de diseño de extrusora.*

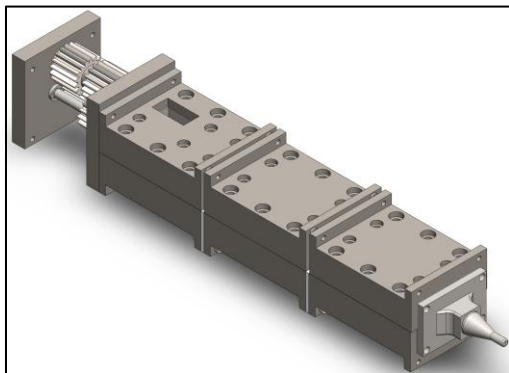


La complicación que presentó el diseño fue la fabricación o adaptación de las bisagras además del tamaño que la maquina presentaba

Las siguientes tres propuestas, presentaban un diseño igual de barril como se muestra en la Figura 54. Estos diseños se caracterizaban por tener tres secciones de barril de forma rectangular, cada sección de barril se forma de dos partes. La parte interna, denominada barril, y la parte exterior denominada soporte de barril. Entre estas dos partes existe una separación la cual nos permite colocar resistencias eléctricas para el calentamiento de la máquina.

**Figura 54**

*Tercera propuesta de diseño de extrusora.*



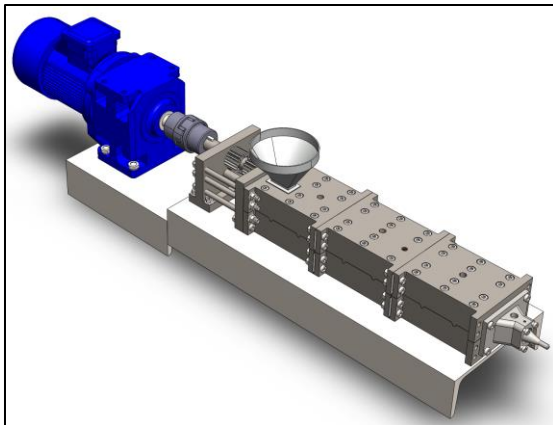
La diferencia que presentaron los diseños fue en la transmisión de potencia desde el motor hacia los tornillos extrusores. El motor posee un eje cuyo movimiento debe ser transmitido hacia dos tornillos extrusores. La complicación que existía en el diseño de esta transmisión de potencia es que la distancia entre centros de los tornillos extrusores es de 20mm.

Otras complicaciones que presentaban estos diseños era que entre cada sección se colocaría aislante, el cual obstruiría el flujo normal del material dentro del barril. La alineación - entre cada sección de todo el barril se complicaría

La penúltima propuesta presentada se muestra en la Figura 55, la cual reunía los requerimientos y observaciones dadas. Con un diámetro de tornillo de 33mm lo cual nos llevaba a un tamaño de barril de 624mm.

#### **Figura 55**

*Penúltima propuesta de diseño de la extrusora.*



La complicación que presentaba este diseño fue que la transmisión de potencia estaba unida a la máquina extrusora, el tamaño y peso de la misma era muy grande y por lo tanto la fabricación se complicaría ya que la bancada del centro de mecanizado en donde se fabricaría dicha extrusora es pequeña

El ultimo diseño presentado es el mostrado en la Figura 56, la cual presenta un diseño modular y el barril es de un solo cuerpo lo cual permite que el material fluya continuamente. El diámetro de tornillo es de 21.7mm lo cual nos da una longitud de barril de 440mm.

### Figura 56

*Diseño de conceptual de la extrusora para filamento Polímero – Metal.*



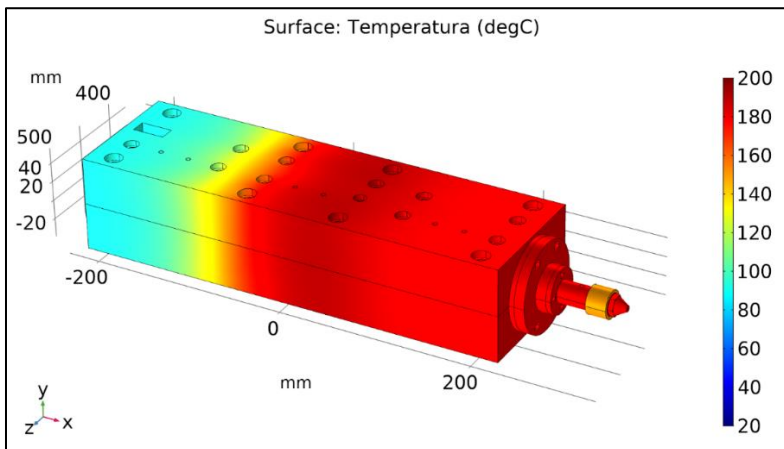
### Simulación térmica.

En la simulación térmica debemos considerar que el proceso de extrusión está dividido en 4 secciones de calentamiento y cada sección está separada por una tela de fibrocerámica la cual actúa como aislante térmico. De izquierda a derecha la primera sección será calentada a 80°C, la segunda a 200°C, tercera sección a 180°C y el dado extrusor estará a 200°C.

La simulación realizada se muestra en la Figura 57.

**Figura 57**

*Simulación térmica de la EDT.*



### **Simulación mecánica.**

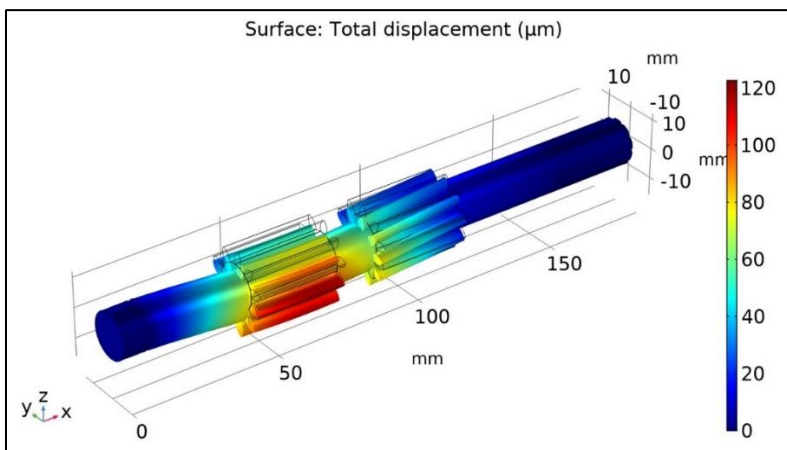
Se ha seleccionado los elementos mecánicos a partir de los cuales se hicieron los cálculos ya que son los que reciben mayor carga y sufren mayor deformación.

El piñón de 10 dientes, mostrado en la Figura 58 y Figura 59

, sometido en simulación a una fuerza tangencial de  $6527\text{ N}$  y fuerza radial de  $2160\text{ N}$ , muestra una deformación de aproximadamente  $100\ \mu\text{m}$  y un esfuerzo de Von Mises de  $1\text{ MPa}$ .

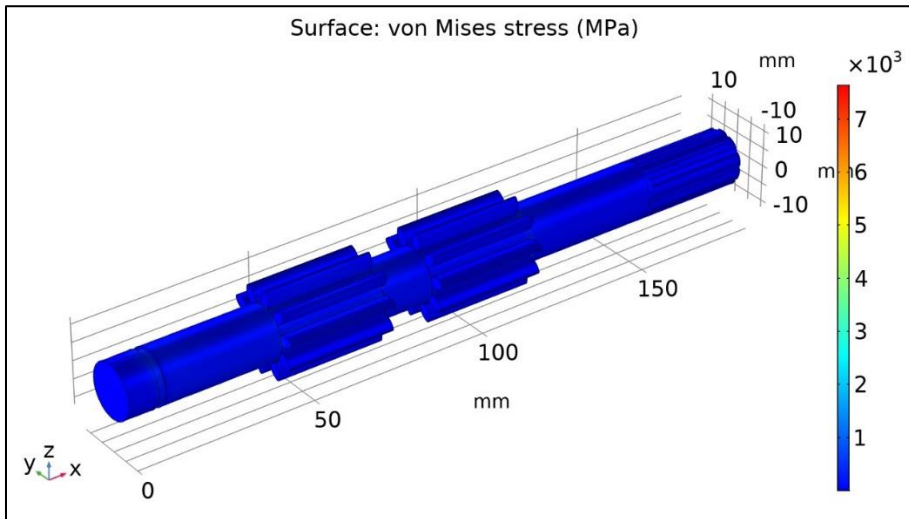
**Figura 58**

*Deformaciones presentes en el Piñón.*



**Figura 59**

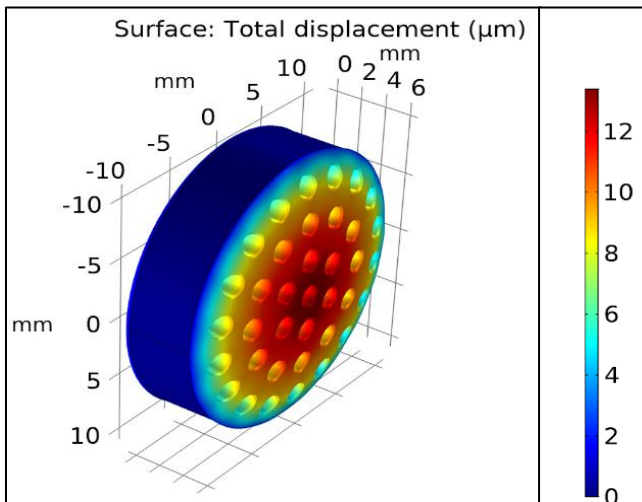
*Esfuerzos presentes en el piñón.*



La placa rompedora sometida a una fuerza de  $6117.4\text{ N}$ , mostrada en la Figura 60 y Figura 61, muestra una deformación de  $12\ \mu\text{m}$  y un esfuerzo de Von Mises de  $1.5\text{ MPa}$

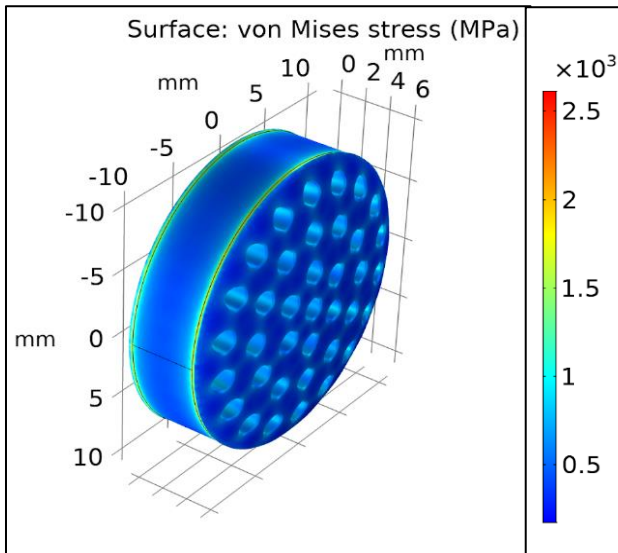
**Figura 60**

*Desplazamiento presente en el plato rompedor.*



**Figura 61**

*Esfuerzos presentes el plato rompedor.*

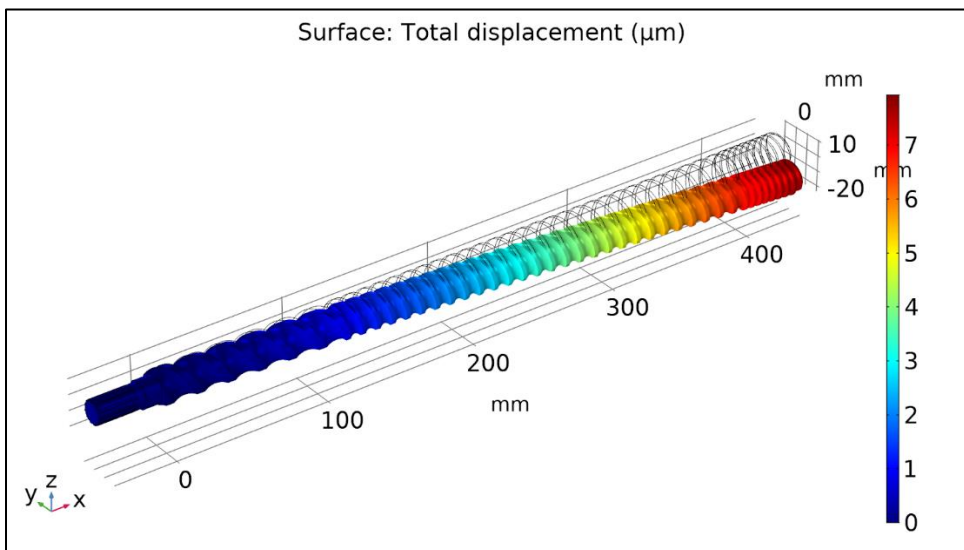


El tornillo extrusor está sometido a una fuerza de 6117.4 N, mostrada en la Figura 62 y

Figura 63, muestra una deformación de 70  $\mu\text{m}$  y un esfuerzo de Von Mises de 8 MPa

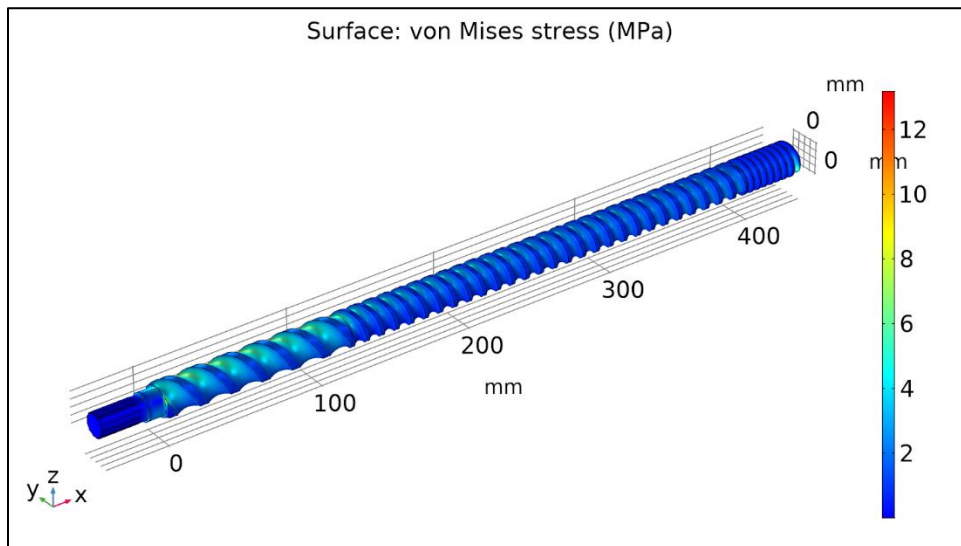
**Figura 62**

*Desplazamiento presente en el tornillo extrusor.*



**Figura 63**

*Esfuerzo presente en el tornillo extrusor.*



## **Capítulo V: Sistema electrónico y construcción**

En el Capítulo cinco se presenta la conexión eléctrica y construcción del extrusor de doble tornillo.

### **Sistema Eléctrico.**

El equipo va a estar ubicado dentro de un laboratorio. El laboratorio cuenta con una red eléctrica monofásica de 110V y una red trifásica de 220V.

El movimiento de los tornillos extrusores esta dado por un moto reductor trifásico de 1Hp de potencia con una velocidad nominal de 1700 rpm y una reducción de 1:20, el cual debe ser accionado mediante un variador de frecuencia.

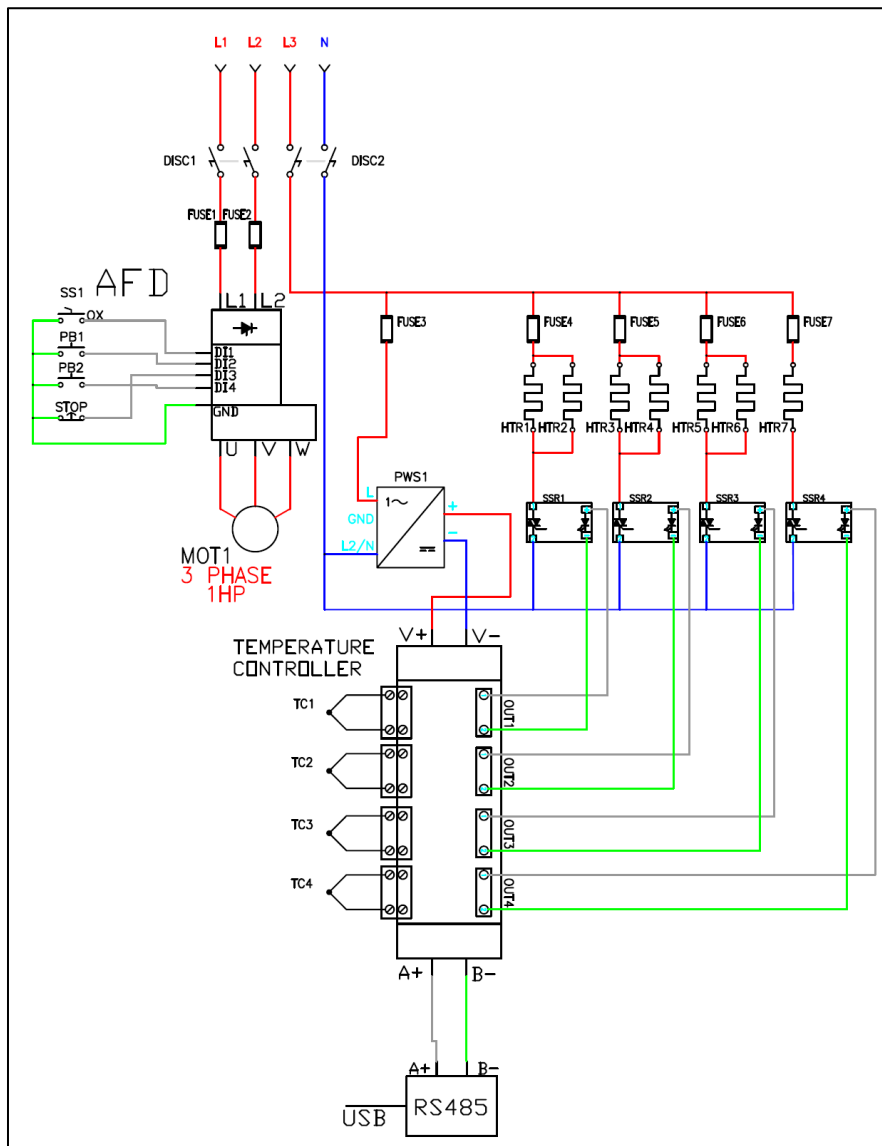
Para que la Maquina sea capaz de extruir un filamento de PLA con alta carga metálica es necesario que la mezcla de dichos materiales fluya dentro del barril, para lograr lo mencionado, se debe calentar el barril a una temperatura aproximada de 170°C. El calentamiento del barril se lo va a realizar mediante resistencias eléctricas planas las cuales trabajan a una tensión de 110V.

La conexión de los dos sistemas eléctricos se facilita con una conexión trifásica a 220V como se muestra en la Figura 64.



Figura 64

Sistema eléctrico de la extrusora.



El motor adquirido es un motor trifásico de marca WEG de 1 Hp de potencia el cual es accionado por un variador de frecuencia bifásico de la misma marca, el cual se muestra en la Figura 65.

**Figura 65**

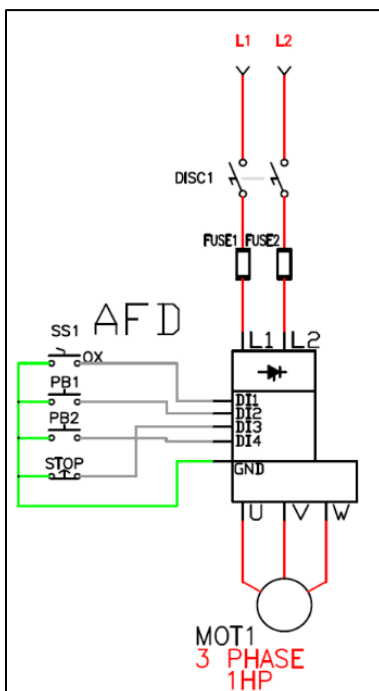
*Variador de frecuencia WEG CFW100.*



La conexión del motor con el variador de frecuencia mencionados se muestra en la Figura 66. El variador de frecuencia denominado AFD recibe tensión de la red trifásica mediante un interruptor y fusibles de 10 amperios denominados Disc1, Fuse1 y Fuse 2 respectivamente.

**Figura 66**

*Conexión eléctrica para la moto reductor.*

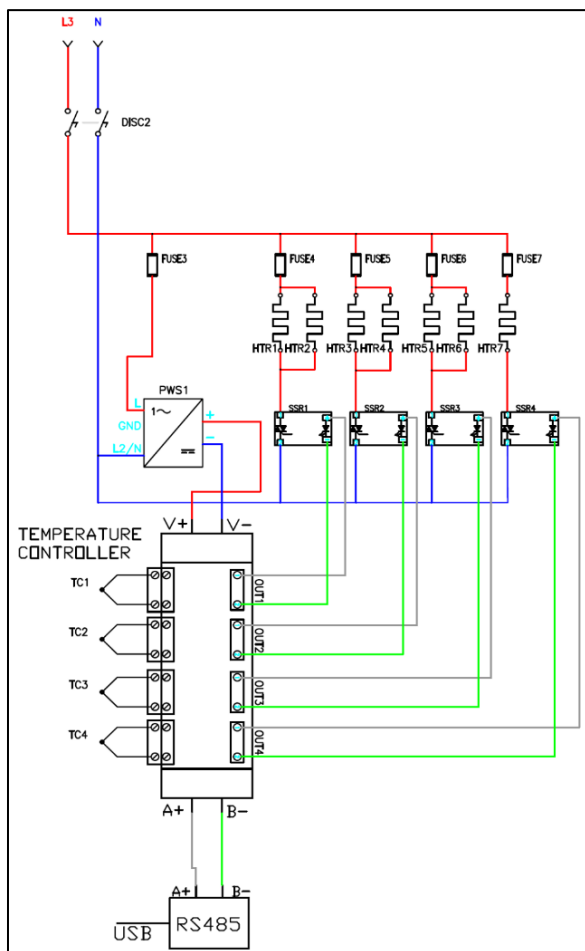


El variador de frecuencia posee cuatro entradas digitales las cuales se programan para que nos permita: poner en movimiento el motor (SS1), subir la frecuencia de rotación del motor (PB1), bajar la frecuencia de giro del motor (PB2) y una parada de emergencia (Stop).

Para el sistema de calefacción se utiliza resistencias eléctricas (niquelinas), denominadas HTR, las cuales son accionadas por un controlador de temperatura que recibirá la señal de sensores de temperatura (TC); dichos dispositivos están comunicados mediante relé de estado sólido, como se puede observar en la Figura 67. El controlador de temperatura debe ser alimentado por una fuente de 24V denominada PWS1.

**Figura 67**

*Sistema de Calefacción.*



### Sistema de control.

Para obtener un filamento de PLA con alta carga metálica necesitamos que la mezcla de los dos materiales fluya dentro del barril, por lo cual, la mezcla debe alcanzar una temperatura de 170°C aproximadamente. Para que este proceso suceda, se adquirieron resistencias eléctricas las cuales mediante conducción calentaran el barril y nos permitirá alcanzar la temperatura mencionada para que fluya la mezcla a extruir dentro del barril.

El rango de temperatura en el que se debe encontrar el barril para calentar la mezcla de PLA y polvo de acero debe ser controlado, para lo cual se utilizó un módulo de adquisición de datos (DAQ), la cual se presenta en la Figura 68. Este módulo tiene la opción de realizar un control de temperatura ON/OFF o PID con una comunicación de salida RS485.

### Figura 68

*Tarjeta de adquisición de datos Autonics TM4-N2SB 4.*



*Nota: Obtenido de (Autonics TM4-N2SB 4-Channel Basic Module PID Temperature Controller (24VDC) with RS485 Comm. Output and SSR Control Output | TEquipment, 2013)*

El módulo TM4-N2SB 4 de la marca Autonics posee cuatro canales aislados que nos permite conectar sensores que entregaran la temperatura del barril y de acuerdo a los parámetros establecidos, el módulo accionara las resistencias eléctricas.

El módulo de temperatura debe ser configurado desde un ordenador para su uso, por lo cual se necesitó un convertidor USB a RS232, el cual se muestra en la Figura 69.

**Figura 69**

*Convertidor USB a RS232 Aislado.*



*Nota: Obtenido de (Embajadores, 2018)*

El convertidor seleccionado posee una rápida comunicación, estabilidad, confiabilidad y seguridad lo cual lo hace ideal para aplicaciones industriales.

### **Construcción.**

A partir del CAD aprobado se realizó el mecanizado de los componentes de la maquina extrusora. Para realizar el mecanizado de las piezas del EDT se dispone de las siguientes maquinas mostradas en la Tabla 35.

**Tabla 35**

*Maquinas disponibles para mecanizado de piezas del EDT.*

<b>Maquina</b>	<b>Controlador</b>	<b>Especificaciones</b>
Torno Cnc Vtc1640-T400	Centroid T400	Diámetro De Volteo 420mm Volteo Sobre Carro: 210 Mm Distancia Entre Puntos 1000 mm. Ancho De La Bancada: 360 mm
Fadal Vmc 3016	Fanuc 18i- MB	Dimensión Eje X: 762 Mm Dimensión Eje Y: 406 Mm Dimensión Eje Z: 508mm Tamaño De La Mesa: 406*990mm Velocidad Máxima Del Usillo 10000 Rpm

*Nota: Datos obtenidos de las maquinas*

El material adquirido para el mecanizado de cada pieza se muestra en la Tabla 36.

**Tabla 36**




*Material adquirido para el mecanizado de la maquina EDT.*

<b>Pieza</b>	<b>Material</b>	<b>Dimensiones en Bruto</b>
Soporte de barril	ASTM A36	450mmx145mmx60mm
Barril	BOHLER M201	460mmx80mmx25mm
Tornillo	AISI H13	D25mmx500mm
Boquilla	BOHLER M303	D25mmx50mm
Acople de boquilla	BOHLER M238	D60mmx70mm
Acople de dado	BOHLER M238	D95mmx40mm
Caja de transmisión de potencia	ASTM A36	
Engranés	AISI 4340	
Ejes de transmisión	SAE 1045	
Plato rompedor	AISI O1 – DF2	D22mmX10mm
Tolva	Acero Inoxidable 304	
Acople de tolva	Aluminio	40mmx60mmx20mm
Compuerta	Aluminio	

Mediante software se realizó el CAM para obtener el Código G respectivo a cada pieza, obteniendo las piezas mostradas en la Tabla 37. Los planos referentes a cada pieza de la maquina EDT se encuentran en la sección Anexos del presente trabajo.

**Tabla 37**

*Piezas mecanizadas del EDT.*

<b>Pieza</b>	<b>Dimensión final (mm)</b>	<b>Figura</b>
Soporte de barril	LxWxH: 438x132x48	
Barril	LxWxH: 444x70x23	
Tornillos	Ø:21.7, L:440	

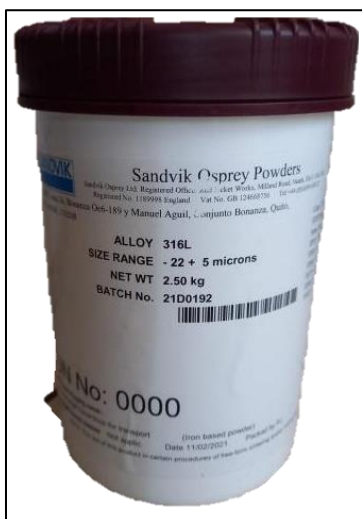
Pieza	Dimensión final (mm)	Figura
Boquilla	$\varnothing$ : 20.78, L:40.32	
Acople de boquilla	$\varnothing$ : 45, L:60	
Acople de dado	$\varnothing$ : 90, L:25	
Caja de transmisión de potencia	LxWxH:198x128x80	

### Materia Prima.

El filamento a extruir está formado por PLA y polvo metálico a diferentes concentraciones. De acuerdo a la elección de materiales realizada en el capítulo 3, se adquirió el polvo metálico de acero inoxidable 316 L de la marca Sandvik con una distribución de grano de 22 micras, el cual se muestra en la Figura 70.

**Figura 70**

*Polvo Metálico Inoxidable 316L.*



El PLA adquirido, el cual se muestra en la Figura 71, se encuentra en forma de pellets.

De acuerdo a su fabricante, la temperatura de extrusión se encuentra entre 170 – 190°C.

**Figura 71**

*Pellet de PLA.*



Para introducir el material en la maquina EDT, previamente se mezcla los dos materiales en diferentes proporciones, de acuerdo al diseño de experimentos. La mezcla de estos dos materiales se muestra en la Figura 72. El material obtenido debe ser lo más pequeño posible para que sea fácil de ser transportado por los tornillos de la maquina EDT.



**Figura 72**

*Mezcla de PLA y Polvo metálico.*



## Capítulo VI: Pruebas y resultados

En el presente capítulo se presentan los resultados de las pruebas realizadas al EDT y al filamento obtenido por el mismo.

### Pruebas Mecánicas.

#### *Extrusora.*

**Eficiencia de la máquina.** La eficiencia de la maquina EDT se determina mediante la razón entre el material de salida y el material de entrada, para lo cual se pesó el material respectivamente. Dando como resultado una eficiencia del 69%, como se muestra en la Tabla 38.

**Tabla 38**

*Eficiencia de la maquina EDT.*

	Entrada (gramos)	Salida (Gramos)
Peso	130	90
Eficiencia	0.69	

#### ***Velocidad de rotación de los tornillos.***

La medición de la velocidad del motor y de los tornillos extrusores de lo realizo con un tacómetro digital de la marca Neiko cuya lectura es de 2,5 a 99,999 rpm, tiene una precisión de +/-0,05% y es capaz de medir a una distancia de dos 508 mm.

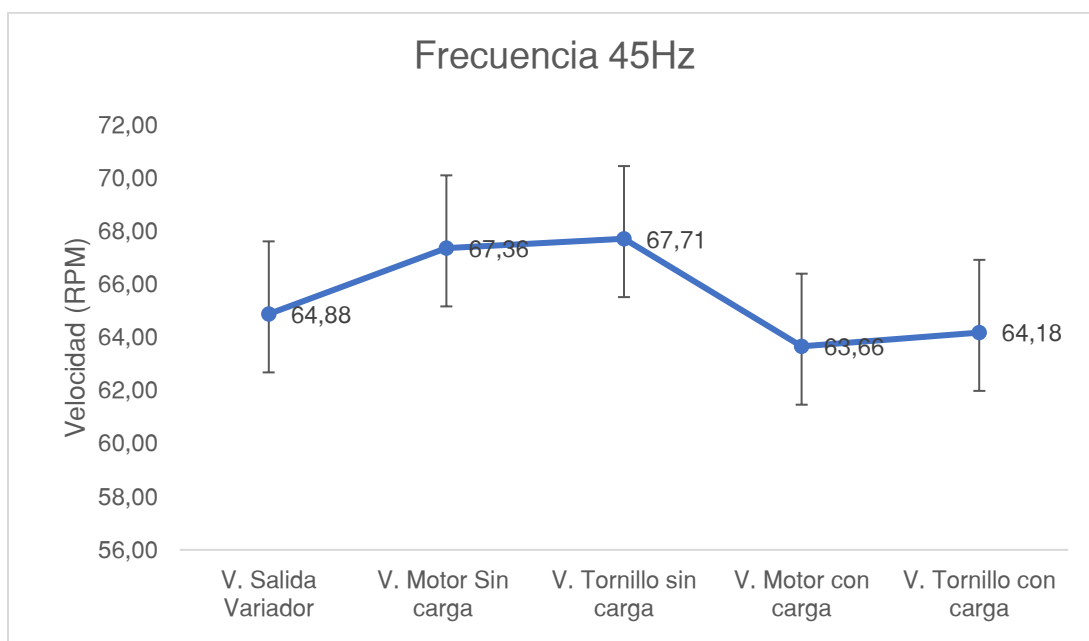
Las medidas fueron tomadas a tres velocidades: 65, 86 y 108 rpm, en el motor y en los tornillos extrusores a una distancia aproximada de 50mm.

Para la velocidad de 65rpm, se colocó el variador de frecuencia a 45Hz y se tomaron 5 medidas en el eje del motor y 5 medidas en los tornillos extrusores, con y sin carga, dando como resultado que la velocidad del motor es de 67.36 rpm y la velocidad de los tornillos es de 67.71 rpm. Se introdujo carga en la extrusora dándonos una velocidad del motor de

63.66 rpm y la velocidad de los tornillos obtenida es de 64.18 rpm como se puede observar en la Figura 73.

**Figura 73**

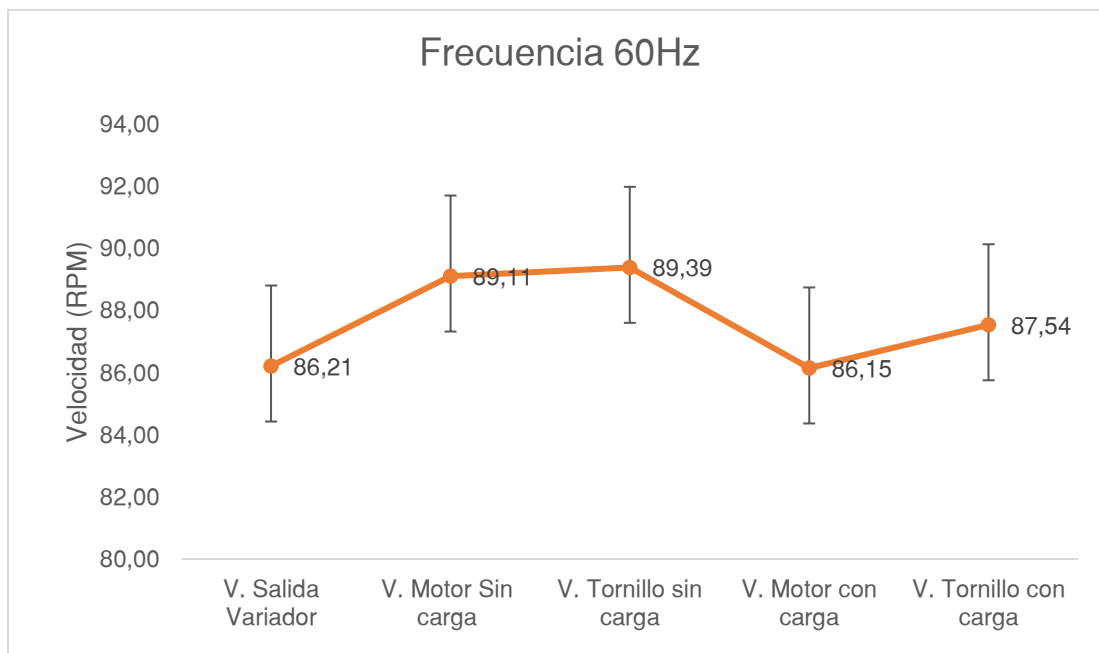
*Velocidad del motor y tornillos extrusores con y sin carga a 45 Hz.*



Para la velocidad de 85rpm, se colocó el variador de frecuencia a 60Hz y se tomaron 5 medidas en el eje del motor y 5 medidas en los tornillos extrusores, con y sin carga, dando como resultado que la velocidad del motor es de 89.11 rpm y la velocidad de los tornillos es de 89.39 rpm. Se introdujo carga en la extrusora dándonos una velocidad del motor de 86.15 rpm y la velocidad de los tornillos obtenida es de 87.54 rpm como se puede observar en la Figura 74.

**Figura 74**

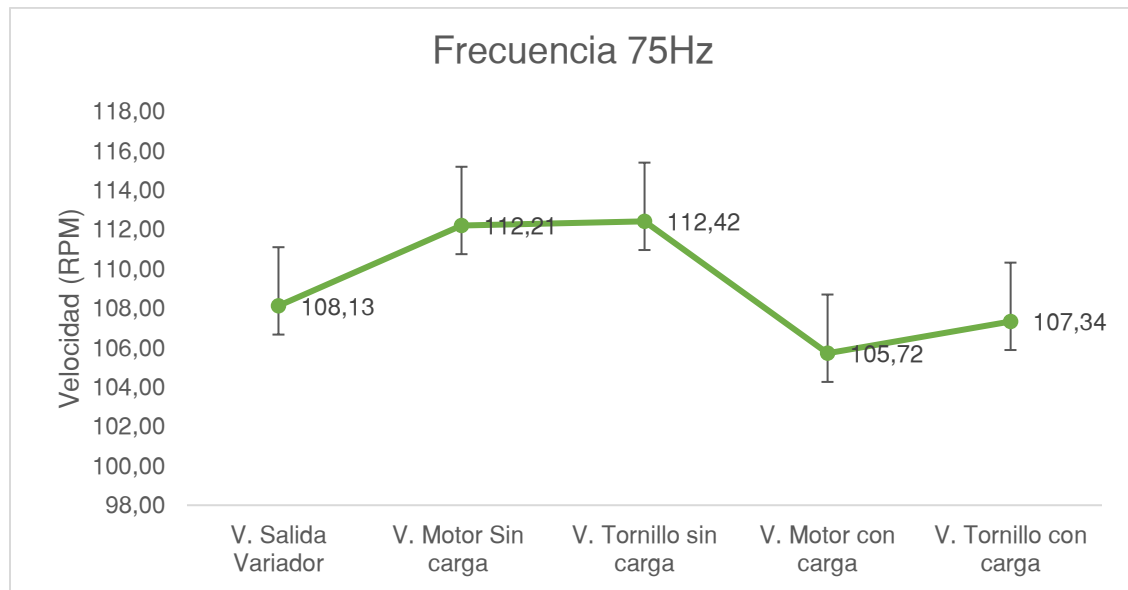
Velocidad del motor y tornillos extrusores con y sin carga a 60 Hz.



Para la velocidad de 108rpm, se colocó el variador de frecuencia a 75Hz y se tomaron 5 medidas en el eje del motor y 5 medidas en los tornillos extrusores, con y sin carga, dando como resultado que la velocidad del motor es de 112.21 rpm y la velocidad de los tornillos es de 112.42 rpm. Se introdujo carga en la extrusora dándonos una velocidad del motor de 105.72 rpm y la velocidad de los tornillos obtenida es de 107.34 rpm como se puede observar en la Figura 75.

**Figura 75**

*Velocidad del motor y tornillos extrusores con y sin carga a 75 Hz*



Como se puede observar en las figuras de las velocidades obtenidas, la diferencia entre la velocidad del variador de frecuencia y la velocidad del motor obtenida son distantes, correspondiente al 2% de error.

Se puede evidenciar que existe una disminución del 5% en la velocidad, tanto del motor como de los tornillos extensores al momento de introducir carga al EDT.

#### ***Velocidad de salida de material.***

Para obtener la velocidad de salida del material de la maquina EDT, se colocó el variador de frecuencia a 108 rpm (75Hz) a la mayor temperatura (T3). Se alimenta la maquina extrusora a una velocidad constante y se mide el material extruido durante un periodo de 10 segundos. Se tomaron 5 muestras obtenido una velocidad de salida de material de  $8.5 \frac{cm}{s}$ , lo cual nos da una producción máxima de  $2.1 \frac{kg}{h}$ .

### Diseño de experimentos (DOE).

Para el diseño del experimento, se consideró las variables con mayor importancia en todo el sistema siendo: el porcentaje de CPM en la mezcla, los rangos de temperatura del extrusor y la velocidad de rotación de los tornillos. Estas variables o también conocidos como factores van a tener 3 niveles a considerar que serán presentados en la Tabla 39.

**Tabla 39**

*Factores y Niveles del Experimento.*

	% CPM en la mezcla	Rango de temperaturas	Velocidad de rotación de los tornillos
<b>Nivel 1</b>	0% AISI 316L	T1 (rango temp. Bajo)	65 RPM
<b>Nivel 2</b>	60% AISI 316L	T2 (rango temp. Medio)	86 RPM
<b>Nivel 3</b>	80% AISI 316L	T3 (rango temp. Alto)	108 RPM

Los rangos de temperatura T1, T2 y T3 mencionados se muestran en la Tabla 41

**Tabla 40**

*Temperaturas en la Maquina EDT para la extrusión de filamento.*

Zona de la extrusora	Alimentación	Mezcla	Dosificación	Dado extrusor
Rango 1 (T1)	110°C	150°C	140°C	155°C
Rango 2 (T2)	120°C	160°C	150°C	165°C
Rango 3 (T3)	130°C	170°C	160°C	175°C

Una vez obtenidos los factores y niveles se procede a diseñar el experimento mediante la metodología Taguchi L9 (3<sup>3</sup>) con tres factores y 9 como se puede observar en la Tabla 41.

**Tabla 41**

*Diseño del experimento.*

Corrida	Temperatura [°C]	% de CPM	Velocidad [Hz]
1	T1	0	45
2	T1	60	60
3	T1	80	75
4	T2	0	60
5	T2	60	75

Corrida	Temperatura [°C]	% de CPM	Velocidad [Hz]
6	T2	80	45
7	T3	0	75
8	T3	60	45
9	T3	80	60

Los resultados que fueron analizados para demostrar el funcionamiento del EDT y de la calidad del filamento obtenido son los siguientes: diámetros obtenidos, resistencia a la tracción del filamento y dispersión de PM en el filamento.

En la Figura 76, se muestra un ejemplo del filamento obtenido, los parámetros del filamento mostrado son: 80% CPM, rango de temperatura T1, frecuencia 75Hz.

### Figura 76

*Filamento obtenido por la EDT*



### ***Diámetro Obtenido.***

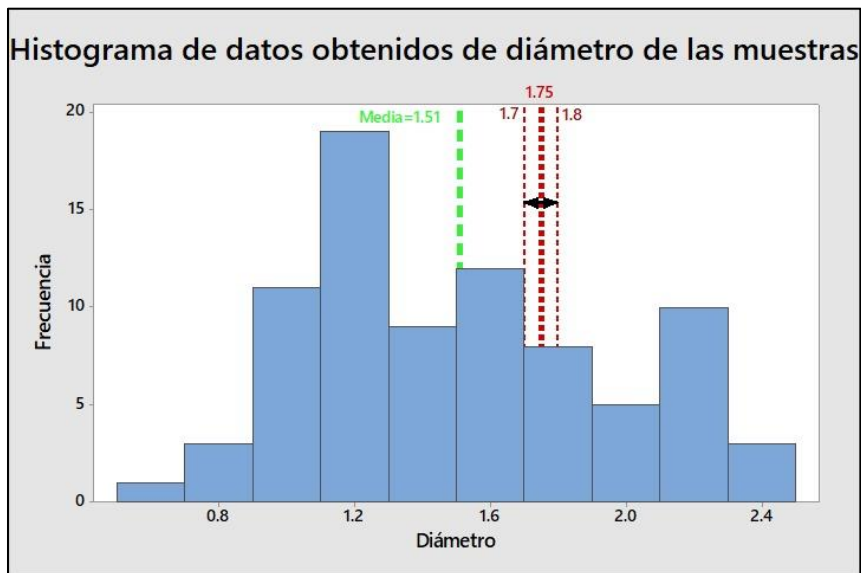
Para obtener los diámetros del filamento se realizó un total de 9 medidas en una longitud de filamento de 200 mm para cada combinación obtenida en el DOE. El instrumento que se utilizó para realizar las mediciones es un calibrador digital con una precisión de  $\pm 0.01$  mm y un rango de medición de 0 – 150mm.

La boquilla de extrusión está diseñada para obtener un filamento de diámetro 1.75mm. Sin embargo, el resultado estadístico de los datos obtenidos pone en evidencia que no existe

una distribución normal de los diámetros medidos obteniendo una media de 1.51mm con una desviación estándar de 0.45, un diámetro mínimo de 0.64mm y un diámetro máximo de 2.46mm, siendo la el valor deseado la medida del diámetro comercial  $1.75 \pm 0.05$  mm como se muestra en la Figura 77.

**Figura 77**

*Histograma del diámetro de las muestras obtenidas*

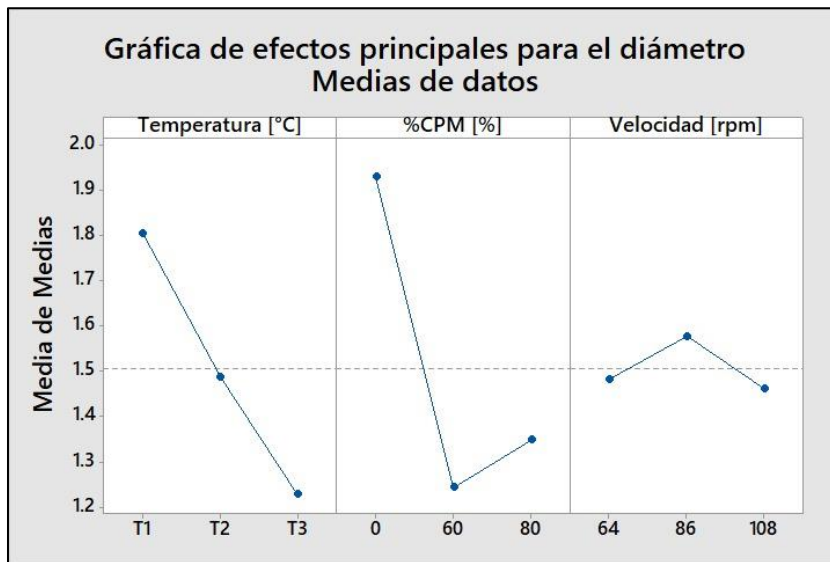


A demás, podemos observar en la Figura 78 que el parámetro que tiene una mayor influencia en el diámetro es el porcentaje de carga de polvo metálico seguido de la temperatura y el parámetro de velocidad de rotación de los tornillos no es de mayor relevancia para efectos de obtener el diámetro deseado.



**Figura 78**

*Parámetros que afectan al diámetro del filamento*



Para obtener un diámetro de filamento cercano a la media el análisis de Taguchi nos arroja que la mejor combinación de parámetros sería: Temperatura 80%CPM, T2 y 64 rpm ya que las otras combinaciones presentan valores muy distantes al deseado.

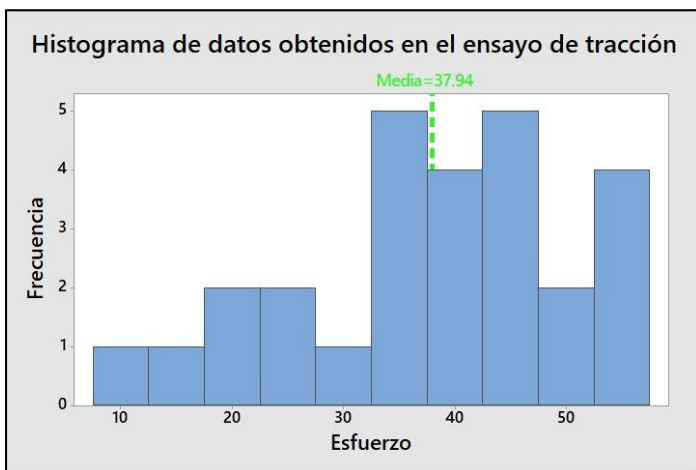
### ***Ensayo de tracción.***

Los ensayos de tracción fueron realizados en una máquina de ensayos universales destructivos para probetas pequeñas (dimensión y resistencia) que puede aplicar una fuerza máxima de 200 lb, a un total de 27 muestras (3 repeticiones de cada corrida). La distancia para la calibración de la máquina entre el soporte fijo y móvil fue de 100 mm y los diámetros de las muestras varió de acuerdo a la corrida utilizada.

En la Figura 79 se observa, que los datos obtenidos en el ensayo de tracción no pertenecen a una distribución normal, la media de los datos es 37.94 con una desviación estándar de 12.32. Con un valor de esfuerzo mínimo de 12.10 MPa y un máximo de 54.52 MPa. Para obtener el mayor valor de esfuerzo es necesario que la muestra tenga un 0%CPM.

**Figura 79**

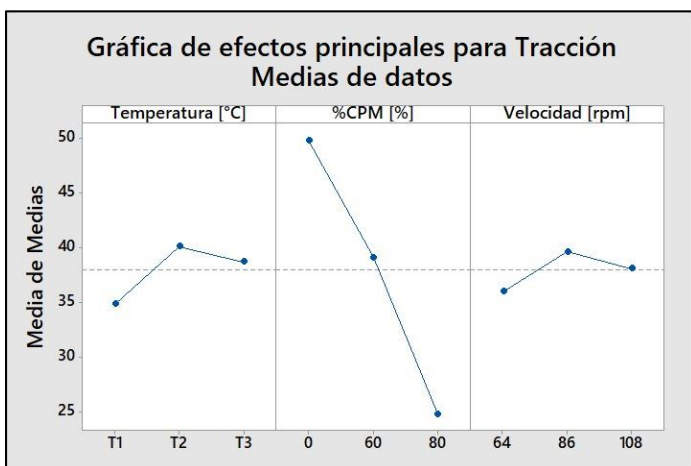
Histograma de datos del ensayo de tracción



En la Figura 80 se puede observar, que el parámetro que afecta más la resistencia del filamento es el porcentaje de concentración de polvo metálico, y que los parámetros de temperatura y velocidad no tienen mucho efecto en la resistencia de la muestra cuando se realiza un ensayo de tracción. Para este caso si se desearía obtener la mayor resistencia a la tracción, la combinación óptima de parámetros sería: 0%CPM, T2 y 86 rpm.

**Figura 80**

Parámetros que afectan la resistencia del filamento.



### ***Análisis Morfológico y de dispersión de PM en el filamento.***

El análisis morfológico y de dispersión se realizó a tres muestras de cada corrida obtenida mediante el DOE anteriormente expuesto y a tres probetas del filamento comercial obtenido. Las muestras se colocaron en resina transparente, como se muestra en la Figura 81, las cuales fueron observadas en un microscopio.

**Figura 81**

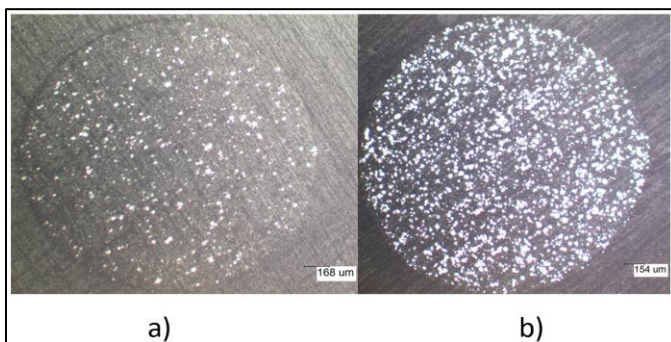
*Probetas con tres muestras del filamento de cada corrida.*



Las imágenes observadas en el microscopio se capturaron con lente de aumento de 100x y 200x, como se muestra en la Figura 82. Se obtuvieron 27 imágenes en total (tres por cada probeta)

**Figura 82**

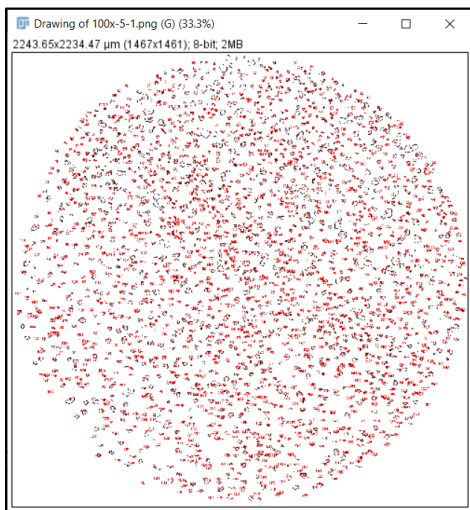
*Imágenes obtenidas en el microscopio 100x.*



El análisis de las imágenes obtenidas se realizó en el software "ImageJ" que es de acceso libre, en el cual se analizó el área ocupada por el "PLA" y el polvo metálico, mediante la herramienta de análisis de partículas como se muestra en la Figura 83. Posteriormente se obtuvo el área ocupada por todas las partículas detectadas y del filamento total y le obtuvo una relación  $A_p/A_d$  (área partículas/ área diámetro). Estas relaciones se obtuvieron para cada combinación y se las comparo con 3 muestras obtenidas de igual manera del filamento comercial BASF Ultrafuse 316L, obteniendo los resultados presentados en la Figura 84

### Figura 83

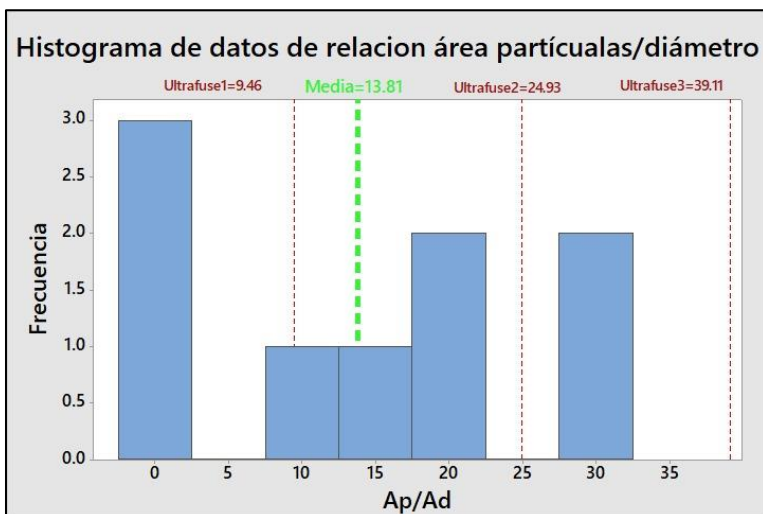
*Análisis de imagen en "ImageJ".*



Los datos presentados no se encuentran en una distribución normal obteniendo una media de 13.81 con una desviación estándar de 12.46 con un valor mínimo de 0 y máximo de 32.44%  $A_p/A_d$  para el 80%CPM. El valor de la media se encuentra dentro del rango de valores ( $A_p/A_d$ ) obtenidos en los ensayos realizados al filamento comercial y el valor de 32.44% se encuentra muy próximo al valor máximo del filamento Ultrafuse que es de 39.11, como se muestra en la Figura 84.

**Figura 84**

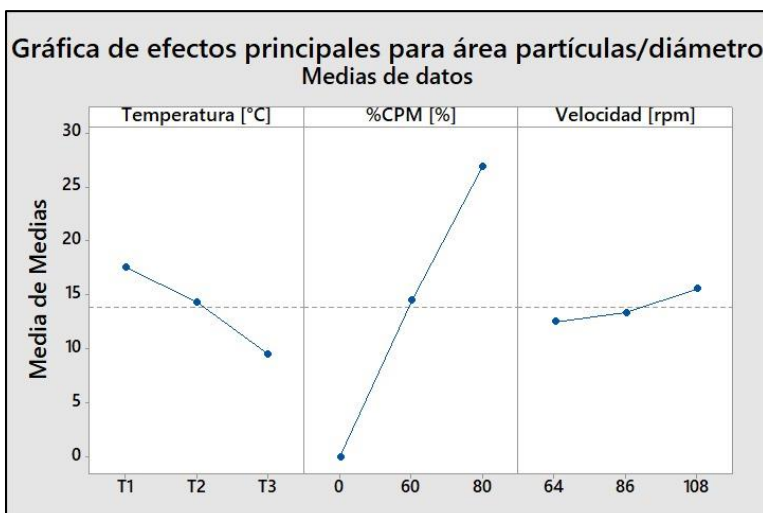
*Histograma de ensayo morfológico*



En la Figura 85, podemos evidenciar que los parámetros de temperatura y velocidad no son de significancia para la relación Ap/Ad y que el parámetro que tiene más relevancia es el %CPM. La combinación que presenta una mejor relación es 80%CPM, T1 y 108rpm.

**Figura 85**

*Efectos principales para el ensayo morfológico*



## Capítulo VII: Conclusiones y recomendaciones

### Conclusiones.

Se diseñó y construyó un prototipo de EDT con dimensiones de 1268 x 450 x 1366 mm. Con capacidad de producción de 2.1 kg/h, capaz de llegar a una temperaturas de hasta 210 °C, que produce un filamento de diámetro polimérico entre 0.6 y 2.5 mm, con velocidad de extrusión de 8.48 cm/s y velocidad de husillo de 64 a 108 rpm.

Mediante la ayuda de tablas de selección de materiales y considerando los factores de mayor importancia para la selección de la materia prima; se produjo un filamento compuesto con base polimérica PLA y carga metálica de polvo de acero inoxidable 316L.

Basados en los esfuerzos obtenidos mediante cálculos mecánicos, térmicos y eliminando posibles concentradores de esfuerzos que podrían llevar al mal funcionamiento o desgaste de las piezas, se seleccionaron los materiales para cada parte del EDT, demostrando que los resultados son apropiados para su correcto funcionamiento.

El prototipo fue montado de acuerdo a los planos realizados en el diseño respetando dimensiones, tolerancias y ajustes. El equipo fue probado y calibrado de acuerdo a los parámetros establecidos por el DOE. Obteniendo que los parámetros más relevantes para un diámetro cercano a la media son: % CPM y el rango de temperaturas. La combinación de parámetros que permitirían obtener un diámetro cercano al estándar de 1.75mm son: 80% CPM, T2 y 86 rpm.

La resistencia a la tracción se ve afectada principalmente por el % CPM, por lo cual la relación entre el esfuerzo de tracción y el % CPM es inversamente proporcional. Para obtener un filamento con mayor resistencia a la tracción los parámetros que se deben utilizar son: 0% CPM, T2 y 86 rpm.

La distribución de la carga metálica en la base polimérica del filamento con respecto al área del filamento obtenido tiene una media de 13,81% que, con relación a las tres muestras del filamento comercial Ultrafuse 316L, que tienen 9,46%, 24,93% y 39,11%, respectivamente. Se evidencia que la carga metálica presenta una menor distribución que la versión comercial, pero se encuentra dentro del rango. Esto es debido a que los tornillos no tienen secciones de mezcla.

El presente proyecto de titulación ha sido parte del proyecto de investigación que consta dentro del listado de proyectos del portafolio de investigación de la UFA-ESPE. Este proyecto fue ganador del concurso de proyectos de ciencia aplicada ESPE – 2020 cuyo título es “Fabricación de filamento polimérico con alta carga metálica para la impresión de partes metálicas para la industria aeronáutica”, cuyo código es PIJ-05.

### **Recomendaciones y Trabajos futuros.**

El prototipo de EDT tiene la capacidad de producir filamentos no únicamente compuestos en acero inoxidable y PLA. Tiene la capacidad de fabricar una variedad de filamentos con diferentes bases poliméricas y cargas metálicas dependiendo su aplicación deseada. Para mejorar el funcionamiento del prototipo se podría utilizar materiales de mejores características mecánicas, térmicas y reológicas.

Realizar pruebas de calorimetría y reológicas para obtener valores reales tanto de viscosidad e índices de fluidez del material compuesto utilizado ya que la mayoría de los cálculos son basados en valores aproximados.

Rediseño de los tornillos utilizados, mejorando sus características de distribución y dispersión, implementado segmentos y discos de mezcla intercambiables. Diseños que se vienen utilizando en este tipo de extrusión actualmente.

Para obtener un mejor control del prototipo de EDT, se recomendaría el uso de PLC, que permita la implementación de más sensores y actuadores necesarios para la operación de un extrusor. También la implementación de un HMI que permita el control del EDT y la presentación de los datos.

Para la dosificación automática y mezcla de los materiales, se recomienda utilizar subsistemas de apoyo que permitan mejorar las características finales del filamento.

Implementar un sistema de enfriamiento tanto para el EDT como para el filamento extruido que permitan mejorar la calidad del filamento y el control del EDT. De la misma se recomienda un sistema de bobinado para obtener un filamento que pueda ser utilizado por sistemas de impresión 3D por FDM.



El presente trabajo de titulación será la base para la escritura y presentación de un artículo científico que se ha iniciado con su escritura y se publicará próximamente en una revista científica indexado a la base de datos scopus, misma que está en proceso de definición.

### Bibliografía.

- 3DNatives. (2016, julio 14). Metales de la impresión 3D. *3Dnatives*.  
<https://www.3dnatives.com/es/descubriendo-los-metales-de-la-impresion-3d/>
- Abel, J., Scheithauer, U., Janics, T., Hampel, S., Cano, S., Müller-Köhn, A., Günther, A., Kukla, C., & Moritz, T. (2019). Fused Filament Fabrication (FFF) of Metal-Ceramic Components. *Journal of Visualized Experiments*, 143, 57693. <https://doi.org/10.3791/57693>
- Agarwala, M., Weeren, R. van, Bandyopadhyay, A., Safari, A., Danforth, S., & Priedeman, W. (1996). *Filament feed materials for fused deposition processing of ceramics and metals*. 1996 International Solid Freeform Fabrication Symposium.
- Agarwala, M., Weeren, R. van, Bandyopadhyay, A., Whalen, P., Safari, A., & Danforth, S. (1996). *Fused deposition of ceramics and metals: An overview*. 1996 International Solid Freeform Fabrication Symposium.
- Agassant, jean-francois, Avenas, P., Carreau, P., Vergnes, B., & Vincent, M. (2017). *Twin-Screw Extrusion and Applications: Principles and Modeling* (pp. 433-519). Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. <https://doi.org/10.3139/9781569906064.006>
- All3dp. (2017). *Guía del comprador 2019: Impresoras 3D metal | All3DP*.  
<https://all3dp.com/es/1/impresion-3d-metal-impresora-3d-metal/#section-metales-para-impresion-3d>
- Aragonés, J., Gómez, C., & Zaragozaí, B. (2003). *Sensores de Temperatura*.  
<https://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/1/349/1259/6572/6629/78932.pdf>
- Autonics TM4-N2SB 4-Channel Basic Module PID Temperature Controller (24VDC) with RS485 Comm. Output and SSR Control Output | TEquipment*. (2013).  
<https://www.tequipment.net/Autonics/TM4-N2SB/Panel-Meters/>

Beltrán, M., & Marcilla, A. (2013). *Tecnología de Polimeros*.

Beltrán Rico, M., & Marcilla Gomis, A. (2012). *Tecnología de polímeros: Procesado y propiedades*. Publicaciones de la Universidad de Alicante.

<http://www.digitaliapublishing.com/a/21226>

*Best Filaments for 3D Printing*. (2019). Metal Filament | 3D Printing | The Virtual Foundry, LLC.

<https://www.thevirtualfoundry.com/featured-filament>

Bohman, I. (2020). *Catalogo 2020*.

[https://drive.google.com/file/d/1iVOEY9NCKlotloMQciZyRL\\_bA5oQWCIQ/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1iVOEY9NCKlotloMQciZyRL_bA5oQWCIQ/view?usp=sharing)

Brenken, B., Barocio, E., Favaloro, A., Kunc, V., & Pipes, R. B. (2018). Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers: A review. *Additive Manufacturing*, 21, 1-16.

<https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.01.002>

Burkhardt, C., Freigassner, P., Weber, O., Imgrund, P., & Hampel, S. (2016). *Fused filament fabrication (FFF) of 316L Green Parts for the MIM process*. 1-7.

c3media. (2010). *Extrusores y Barriles—Soluciones en tornillos y barriles*.

<http://www.extrubarriles.com/index.htm>

*Catalogo-de-Aislamiento-Termico-AGV.pdf*. (s. f.). Recuperado 12 de enero de 2021, de

<http://www.agvibo.com/contenido/wp-content/uploads/2016/05/Catalogo-de-Aislamiento-Termico-AGV.pdf>

Çengel, Y. A., Boles, M. A., & Apraiz Buesa, I. (2014). *Termodinámica*. Mc Graw Hill Education.

Chávez, J. (2018). *Diagrama de fuerzas en un tornillo*. Universidad Tecnológica de la Mixteca.

Christiyan, J. (2016). Fabrication Of Basic Screw Extruder To Manufacture 3d Printers Filament. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 5.

- Chua, C. K., & Leong, K. F. (2016). *Guía del comprador 2019: Impresoras 3D metal*. All3DP.  
<https://all3dp.com/es/1/impresion-3d-metal-impresora-3d-metal/>
- Colomer R., V. (2013). *Propuesta metodológica en el ámbito de la mecatónica: Vehículo de competición de alta eficiencia*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Contreras, L. (2017, noviembre 19). *La impresión 3D de acero inoxidable logra triplicar su fuerza*. 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-acero-inoxidable-201120172/>
- Controlador PID - Control Automático—Picuino*. (2021).  
<https://www.picuino.com/es/arduprog/control-pid.html>
- Delmonte, J. (2012). *Metal/Polymer Composites*. Verlag nicht ermittelbar.
- Desktop Sj20*. (2020). [https://www.alibaba.com/product-detail/Desktop-SJ20-single-screw-3D-printer\\_62187429800.html?spm=a2700.md\\_es\\_ES.pronpeci14.2.3ebd745aD4CJWD](https://www.alibaba.com/product-detail/Desktop-SJ20-single-screw-3D-printer_62187429800.html?spm=a2700.md_es_ES.pronpeci14.2.3ebd745aD4CJWD)
- Djellali, S., Sadoun, T., Haddaoui, N., & Bergeret, A. (2015). Viscosity and viscoelasticity measurements of low density polyethylene/poly(lactic acid) blends. *Polymer Bulletin*, 72(5), 1177-1195. <https://doi.org/10.1007/s00289-015-1331-6>
- Dorf, R. C., Bishop, R. H., & Dormido Bencomo, S. (2008). *Sistemas de control moderno*. Pearson Educacion.
- Druetta, N., & Fazi, F. (2018). *EXTRUSORA DE MONOFILAMENTO PARA IMPRESIÓN 3D*. Universidad Nacional de Cordova.  
<https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/8912/PI-Druetta%20y%20Fazi.pdf?sequence=1>
- Embajadores, E. (2018). *Convertidor USB a RS232/RS485/TTL - Aislado—103990383*. Electrónica Embajadores.  
<https://www.electronicaembajadores.com/es/Productos/Detalle/PC70350/pc-multimedia/interfaces/convertidor-usb-a-rs232-rs485-ttl-aislado-103990383>

- Entrena González, F. J. (2013). *Eficiencia energética en las instalaciones de calefacción y ACS en los edificios (UF0565)*. IC Editorial.  
<http://public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=4507786>
- Esteban, P., Bolzoni, L., Ruiz-Navas, E., & Gordo, E. (2008, julio 14). *Sinterización y caracterización de aleaciones de Ti de bajo coste*.
- Filabot EX6 Filament Extruder*. (2020). <https://www.filabot.com/collections/ex6-extruder/products/filabot-ex6-filament-extruder>
- Filament2Print. (2015). *Dudas habituales sobre temperatura y velocidad de impresión de PLA y ABS*. [https://filament2print.com/es/blog/9\\_dudas-temperatura-velocidad-impresion-3D.html](https://filament2print.com/es/blog/9_dudas-temperatura-velocidad-impresion-3D.html)
- Filamet tungsteno | Filament2Print*. (2019). <https://filament2print.com/es/metalicos/1033-filamet-tungsteno.html>
- Formizable. (2019, febrero 1). Super Guía de materiales de impresión 3D · 2019. *Formizable*.  
<https://formizable.com/super-guia-de-materiales-de-impresion-3d-2019/>
- Gardan, J. (2016). Additive manufacturing technologies: State of the art and trends. *International Journal of Production Research*, 54(10), 3118-3132.  
<https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1115909>
- GE Additive. (2015). *About Arcam | GE Additive*. <https://www.ge.com/additive/who-we-are/about-arcam>
- Giberti, H., Strano, M., & Annoni, M. (2016). An innovative machine for Fused Deposition Modeling of metals and advanced ceramics. *MATEC Web of Conferences*, 43, 03003.  
<https://doi.org/10.1051/mateconf/20164303003>
- Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies*. Springer US.  
<https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9>

- Gibson, M. A., Mykulowycz, N. M., Shim, J., Fontana, R., Schmitt, P., Roberts, A., Ketkaew, J., Shao, L., Chen, W., Bordeenithikasem, P., Myerberg, J. S., Fulop, R., Verminski, M. D., Sachs, E. M., Chiang, Y.-M., Schuh, C. A., John Hart, A., & Schroers, J. (2018). 3D printing metals like thermoplastics: Fused filament fabrication of metallic glasses. *Materials Today*, 21(7), 697-702. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2018.07.001>
- Giles, H. F., Wagner, J. R., & Mount, E. M. (2005a). *Extrusion: The definitive processing guide and handbook*. William Andrew Pub.
- Giles, H. F., Wagner, J. R., & Mount, E. M. (2005b). *Extrusion: The definitive processing guide and handbook*. William Andrew Pub.
- Goff, J., & Whelan, T. (2016). *The Dynisco Extrusion Processors Handbook, 2nd edition*. Dynisco.
- Goger, A. (2013). *Modelling of counter rotating twin screw extrusion* [McMaster University]. <https://macsphere.mcmaster.ca/bitstream/11375/13375/1/fulltext.pdf>
- Gómez, F., Caballero, J. M., & Herrera, E. J. (1998). Algunas observaciones sobre la sinterización del acero austenítico 316L en atmósfera de argón. *Revista de Metalurgia*, 34(Extra), 267-270. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.1998.v34.iExtra.751>
- Gómez, J. J. G., & Gutiérrez, J. (2007). *Diseño de una extrusora para plásticos*. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Tecnología Mecánica.
- Gómez, J. J., & Gutiérrez, J. E. (2007). *Diseño de una extrusora para plásticos*. Universidad tecnológica de pereira.
- Gómez, S. (2016). *Impresión 3D*. Marcombo.
- Gonzalez-Gutierrez, J., Arbeiter, F., Schlauf, T., Kukla, C., & Holzer, C. (2019). Tensile properties of sintered 17-4PH stainless steel fabricated by material extrusion additive manufacturing. *Materials Letters*, 248, 165-168. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.04.024>

- Gonzalez-Gutierrez, J., Godec, D., Kukla, C., Schlauf, T., Burkhardt, C., & Holzer, C. (2017). *Shaping, debinding and sintering of steel components via fused filament fabrication*. 8-10.
- Gutiérrez Morales, P. A., & Bornacelli Castillo, J. F. (2006). *Metodología para el diseño de tornillos de máquinas extrusoras monhusillo*.
- Gutiérrez Paredes, C. A., & Vargas Ayala, L. E. (2017). *Diseño y fabricación de una máquina extrusora para crear el filamento de la impresora 3D a partir de material plástico*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Harris, M., Potgieter, J., Archer, R., & Arif, K. M. (2019). Effect of Material and Process Specific Factors on the Strength of Printed Parts in Fused Filament Fabrication: A Review of Recent Developments. *Materials*, 12(10), 1664. <https://doi.org/10.3390/ma12101664>
- Hwang, S., Kim, N. S., Reyes, E. I., Moon, K., & Rumpf, R. C. (2015). *Thermo-mechanical Characterization of Metal/Polymer Composite Filaments and Printing Parameter Study for Fused Deposition Modeling in the 3D Printing Process*.
- Hwang, S., Reyes, E. I., Moon, K., Rumpf, R. C., & Kim, N. S. (2015). Thermo-mechanical Characterization of Metal/Polymer Composite Filaments and Printing Parameter Study for Fused Deposition Modeling in the 3D Printing Process. *Journal of Electronic Materials*, 44(3), 771-777. <https://doi.org/10.1007/s11664-014-3425-6>
- HXX. (2016). *Materiales de impresión 3D (IV): Metales en polvo | HXX*. BLOG DE HXX. <http://hxx.es/2016/01/12/materiales-de-impresion-3d-iv-metales-en-polvo/>
- jnablog. (2014). *Conoce las Impresiones 3D con Acero Inoxidable | Jn Aceros*. <https://jnaceros.com.pe/blog/impresiones-3d-acero-inoxidable/>
- Kohlgrüber, K., & Bierdel, M. (Eds.). (2008). *Co-rotating twin-screw extruder: Fundamentals, technology, and applications*. Hanser.

- Kukla, C., Duretek, I., Schuschnigg, S., Gonzalez-Gutierrez, J., & Holzer, C. (2016). Properties for PIM Feedstocks Used in Fused Filament Fabrication. *World PM2016-AM-Deposition Technologies*.
- Kukla, C., Gonzalez-Gutierrez, J., Duretek, I., Schuschnigg, S., & Holzer, C. (2017). *Effect of particle size on the properties of highly-filled polymers for fused filament fabrication*. 190006. <https://doi.org/10.1063/1.5016795>
- Kuo, B. C., Aranda Pérez, G., & Rodríguez Ramírez, F. J. (1996). *Sistemas de control automático*. Prentice Hall Hispanoamericana.
- Li, Y., Huang, B., & Qu, X. (1999). Viscosity and melt rheology of metal injection moulding feedstocks. *Powder Metallurgy*, 42(1), 86-90.  
<https://doi.org/10.1179/pom.1999.42.1.86>
- Liu, H., Ricart, B., Stanton, C., Smith-Goettler, B., Verdi, L., O'Connor, T., Lee, S., & Yoon, S. (2019). Design space determination and process optimization in at-scale continuous twin screw wet granulation. *Computers & Chemical Engineering*, 125, 271-286.  
<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.03.026>
- Locker, A. (2019). *Impresoras 3D metal: Todo sobre la impresión 3D de metal*. All3DP.  
<https://all3dp.com/es/1/impresion-3d-metal-impresora-3d-metal/>
- Mariano. (2011a). *Tecnología de los plásticos. Extrusión de materiales plásticos*.  
<https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/03/extrusion-de-materiales-plasticos.html>
- Mariano. (2011b, marzo 15). EXTRUSIÓN DE MATERIALES PLÁSTICOS | Tecnología de los Plásticos. *EXTRUSIÓN DE MATERIALES PLÁSTICOS | Tecnología de los Plásticos*.  
<https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/03/extrusion-de-materiales-plasticos.html>



Mariano. (2011c, octubre 31). Aditivos y rellenos para polímeros | Tecnología de los Plásticos.

*Aditivos y rellenos para polímeros | Tecnología de los Plásticos.*

<https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/02/aditivos-y-rellenos-para-polimeros.html>

Masood, S. H., & Song, W. Q. (2004a). Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using Fused deposition modelling. *Materials & Design*, 25(7), 587-594.

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.02.009>

Masood, S. H., & Song, W. Q. (2004b). Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using Fused deposition modelling. *Materials & Design*, 25(7), 587-594.

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.02.009>

Merhar, J. (1990). Overview of metal injection moulding. *Metal Powder Report*, 45(5), 339-342.

[https://doi.org/10.1016/S0026-0657\(10\)80242-5](https://doi.org/10.1016/S0026-0657(10)80242-5)

Mundo Digital. (2019). *Impresión en 3D industrial con acero inoxidable y reducción de peso |*

*Mundo Digital.* <https://www.mundodigital.net/impresion-en-3d-industrial-con-acero-inoxidable-y-reduccion-de-peso/>, <https://www.mundodigital.net/impresion-en-3d-industrial-con-acero-inoxidable-y-reduccion-de-peso/>

Nestle, N., Hermant, M.-C., & Schmidt, K. (2016). *Mixture for use in a fused filament fabrication process.*

Poudel, B. (2015). *How to make Portable Homemade Filament Extruder.* Arcada-Nylands svenska yrkeshögskola.

Pozo B., L. G. (2016). *Implementación de un sistema de control de perfil de calentamiento y agitación para un tostador por resistencias eléctricas con capacidad de 25 libras de café de Quinoa* [Tesis]. Universidad Técnica del Norte.

- RA, R. (2004). Screw design for co-rotating twin-screw extruders. *Plastics, Additives and Compounding*, 6(2), 38-41. [https://doi.org/10.1016/S1464-391X\(04\)00145-X](https://doi.org/10.1016/S1464-391X(04)00145-X)
- Ramos, L. (2013). *Extrusion de plásticos básicos*. Limusa.
- Redacción. (2018). Tungsteno | Qué es, propiedades físicas y químicas, historia, usos, características. *Rocas y Minerales*. <https://www.rocasyminales.net/tungsteno/>
- Resistencias Electricas Quito. (2021). *Resistencias electricas Quito*.  
<https://www.resistenciaselectricasquito.com>
- Riecker, S. (2016). *FUSED DEPOSITION MODELING –OPPORTUNITIES FOR CHEAP METAL AM*.
- Rodríguez C., X. (2018). *PROYECTO DE DISEÑO D E PIEZAS MODELADAS CON UNA IMPRESORA 3D PARA LA REALIZACIÓN DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE LA ASIGNATURA DE RESISTENCIA DE MATERIALES Y TEORÍA DE ESTRUCTURAS*. Universitat politecnica de catalunya.  
[https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/126329/xavier.rodriguez.campillo\\_130960.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/126329/xavier.rodriguez.campillo_130960.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Rohringer, S. (2020, febrero 26). *Los 25 mejores filamentos para impresoras 3D de 2020 | All3DP*. <https://all3dp.com/es/1/filamento-3d-filamento-impresora-3d/>
- Salvador, M. D., Bonache, V., Amigó, V., & Busquets, D. (2008). Study of the sintering behavior of fine, ultrafine and nanocrystalline WC-Co mixtures obtained by high energy milling. *Revista de Metalurgia*, 44(5), 418-431. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.0757>
- Sánchez V., M. E. (2019). *Extrusor de polímeros, ¿qué es y cómo funciona?*  
<https://www.anahuac.mx/mexico/noticias/Extrusor-de-polimeros-que-es-y-como-funciona>

Sandrine Tranchard. (2015). *Manufacturing our 3D future*. ISO.

<https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/news/2015/05/Ref1956.html>

Sa'ude, N., Ibrahim, M., & Ibrahim, M. H. I. (2013). Mechanical Properties of Highly Filled Iron-ABS Composites in Injection Molding for FDM Wire Filament. *Materials Science Forum*, 773-774, 448-453. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.773-774.448>

Sa'ude, N., Ibrahim, M., & Saidin, W. (2013). Effect of Powder Loading and Binder Materials on Mechanical Properties in Iron-ABS Injection Molding Process. *Applied Mechanics and Materials*, 315, 582-586. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.315.582>

Stasiek, J. (2000). Engineering design of counter-rotating twin-screw extruders. *Journal of Engineering Design*, 11(2), 133-148. <https://doi.org/10.1080/09544820050034231>

Tan, J. C., & Low, H. Y. (2018). Embedded electrical tracks in 3D printed objects by fused filament fabrication of highly conductive composites. *Additive Manufacturing*, 23, 294-302. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.009>

Tang, H., Wrobel, L. C., & Fan, Z. (2003). Fluid flow aspects of twin-screw extruder process: Numerical simulations of TSE rheomixing. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 11(5), 771-790. <https://doi.org/10.1088/0965-0393/11/5/305>

Todd, I., & Sidambe, A. T. (2013). Developments in metal injection moulding (MIM). En *Advances in Powder Metallurgy* (pp. 109-146). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857098900.1.109>

Übel, M. von. (2020, enero 31). *Material de impresión 3D: La guía definitiva*. All3DP. <https://all3dp.com/es/1/impresion-3d-material-impresora-3d-guia/>

*Ultrafuse 316L | BASF Polymer and 316L stainless steel composite filament.* (2019).

[https://www.basf.com/global/en/who-we-are/organization/locations/europe/german-companies/basf-3d-printing-solutions-gmbh/metal-solutions/Ultrafuse\\_316L.html](https://www.basf.com/global/en/who-we-are/organization/locations/europe/german-companies/basf-3d-printing-solutions-gmbh/metal-solutions/Ultrafuse_316L.html)

Vayre, B., Vignat, F., & Villeneuve, F. (2012). Metallic additive manufacturing: State-of-the-art review and prospects. *Mechanics & Industry*, 13(2), 89-96.

<https://doi.org/10.1051/meca/2012003>

White, J. L. (1991). *Twin screw extrusion: Technology and principles*. Hanser Publishers ;

Distributed in the U.S.A. and Canada by Oxford University Press.

Wohlers, T. (2018). *WOHLERS REPORT: 3d printing and additive manufacturing state of the industry*. WOHLERS Associates.

**Anexos.**

Debido a que el presente trabajo de titulación es parte del proyecto PIJ-05, los documentos e información extra de este trabajo se encuentran en la carpeta de anexos, que reposa en el Drive del director del trabajo de titulación.