

	<b>UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA</b>			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
	<b>FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO</b>	<b>F-AC-DBL-007</b>	<b>10-04-2012</b>	<b>A</b>
Dependencia		Aprobado		Pág.
<b>DIVISIÓN DE BIBLIOTECA</b>		<b>SUBDIRECTOR ACADEMICO</b>		<b>i(124)</b>

## RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	<b>BREINER ISIDRO ARGOTTA HERNÁNDEZ</b>
FACULTAD	<b>INGENIERÍAS</b>
PLAN DE ESTUDIOS	<b>INGENIERÍA MECÁNICA</b>
DIRECTOR	<b>RICARDO ANDRÉS GARCÍA LEÓN</b>
TÍTULO DE LA TESIS	<b>DISEÑO DE UNA MÁQUINA DE MATERIALES TERMOCONFORMADOS PARA LA FABRICACIÓN DE FILAMENTO ABS Y PLA PARA IMPRESORAS 3D</b>

### RESUMEN

(70 palabras aproximadamente)

LAS IMPRESORAS 3D REQUIEREN FILAMENTO PARA SU FUNCIONAMIENTO, DEL CUAL SE ESTÁ PERDIENDO APROXIMADAMENTE UN 15% DE LA INVERSIÓN, POR LO CUAL EXTRUIRLO ES UNA BUENA OPCIÓN, DEBIDO A QUE SE APROVECHAN LOS DESECHOS DE PLÁSTICOS GENERADOS EN LA IMPRESIÓN APORTANDO TAMBIÉN AL MEDIO AMBIENTE.

ESTE TRABAJO CONTIENE EL DISEÑO DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA DE FILAMENTO PARA IMPRESIÓN 3D, PARA EL CUAL LA MATERIA PRIMA SERÁN LOS SOBRANTES DE MATERIAL O PIEZAS DEFECTUOSAS DE IMPRESIÓN.

### CARACTERÍSTICAS

PÁGINAS: 121	PLANOS: 5	ILUSTRACIONES: 47	CD-ROM: 1
--------------	-----------	-------------------	-----------



Vía Acolsure, Sede el Algodonal, Ocaña, Colombia - Código postal: 546552  
 Línea gratuita nacional: 01 8000 121 022 - PBX: (+57) (7) 569 00 88 - Fax: Ext. 104  
 info@ufpso.edu.co - www.ufpso.edu.co

**DISEÑO DE UNA MÁQUINA DE MATERIALES TERMOCONFORMADOS PARA LA  
FABRICACIÓN DE FILAMENTO ABS Y PLA PARA IMPRESORAS 3D**

**Autor**

**BREINER ISIDRO ARGOTTA HERNANDEZ**

**Trabajo de grado presentado para obtener el título de Ingeniero Mecánico**

**Director**

**© Ph.D. RICARDO ANDRÉS GARCÍA LEÓN**

**UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA  
FACULTAD DE INGENIERIAS  
INGENIERIA MECANICA**

**Ocaña, Colombia**

**Febrero, 2020**

## Índice

	<b>Pág.</b>
1. Diseño De Una Máquina De Materiales Termoconformados Para La Fabricación De Filamento ABSY PLA Para Impresoras 3d. ....	1
1.1 Planteamiento Del Problema.....	1
1.2 Formulación Del Problema .....	1
1.3 Objetivos .....	1
1.3.1 Objetivo General.: .....	1
1.3.2 Objetivos específicos:.....	2
1.4 Justificación.....	2
1.5 Delimitaciones.....	3
1.5.1. Delimitación conceptual: .....	3
1.5.2. Delimitación temporal: .....	3
1.5.3. Delimitación geográfica: .....	3
2. Marco Referencial.....	4
2.1. Marco Histórico .....	4
2.1.1. Extrusión a nivel internacional .....	4
2.1.2. Extrusión a nivel nacional: .....	7
2.2. Marco Teórico .....	9
2.2.1. ABS: .....	9
2.2.2. PLA:.....	10
2.2.3. Procesamiento de plásticos .....	12
2.2.4. Extrusión de plástico: .....	12
2.2.5. Descripción del proceso de extrusión:.....	13
2.2.6. Descripción de la maquina extrusora.....	14
2.2.7. Partes de una máquina extrusora: .....	14
2.2.7.2. Tornillo extrusor: .....	15
2.2.7.3. Cilindro.....	16
2.3 Marco Conceptual. ....	18
2.3.1. Husillo: .....	18
2.3.2. Termoconformado: .....	20
2.3.3. Extrusión:.....	20
2.3.4. Pellets: .....	20
2.3.5. ABS: .....	21
2.3.6. PLA:.....	21

2.3.7. Cilindro o barril: .....	21
2.3.8. Factor de Seguridad: .....	23
2.3.9. Esfuerzos cortantes en un elemento: .....	23
3. Diseño Metodológico.....	26
3.1 Tipo De Investigación .....	26
3.2 Población.....	26
3.3. Muestra.....	26
3.4. Fases del proyecto .....	26
3.4.1. Fase 1: Estudiar los diferentes tipos de máquinas de termoconformado existentes a través de las diferentes bases de datos con la finalidad de seleccionar el modelo más eficiente. ....	26
3.4.2. Fase 2: Definir el modelo geométrico de máquina de acuerdo con los requisitos establecidos en las impresoras 3D, con la finalidad de calcular cada uno de los elementos constitutivos de la máquina. ....	27
3.4.3. Fase 3: Simular cada uno de los elementos sometidos a máximos esfuerzos haciendo uso del software SolidWorks para validar su correcto funcionamiento. ....	27
3.5. Cronograma de Actividades .....	28
4. Desarrollo De Actividades .....	29
4.1. Fase I: Estudiar los diferentes tipos de máquinas de termoconformado existentes a través de las diferentes bases de datos con la finalidad de seleccionar el modelo más eficiente. ....	29
4.1.1. Matriz de decisión: .....	29
4.2. Fase 2: Definir el modelo geométrico de máquina de acuerdo con los requisitos establecidos en las impresoras 3D, con la finalidad de calcular cada uno de los elementos constitutivos de la máquina.....	30
4.2.1. Actividad 1. Dimensionar la máquina contemplando los parámetros más adecuados al diseño.....	30
4.2.2. Actividad 2: Iniciar el diseño de los elementos que conforman la máquina .....	32
4.2.3. Actividad 3. Resumir el diseño de los elementos que conforman la máquina para una fácil interpretación.....	83
4.3. Fase 3: Simular cada uno de los elementos sometidos a máximos esfuerzos haciendo uso del software SolidWorks para validar su correcto funcionamiento .....	85
4.3.1. Actividad 1. Emplear el software SolidWorks en el que se modelará cada pieza con sus respectivas medidas. ....	85
4.3.2. Actividad 2. Aplicar la simulación de los esfuerzos provocados por su funcionamiento corroborando así el diseño de cada elemento modelado. ....	89
4.3.3. Actividad 3. Presentar un resumen de los resultados obtenidos mediante el software. ....	97
4.3.4. Actividad 4. Realizar un análisis de factibilidad para la posterior construcción de la máquina. ....	98

Conclusiones .....	100
Recomendaciones .....	102
Referencias.....	103
Apéndice .....	108

## Índice De Tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1: Características y propiedades del ABS.....	10
Tabla 2: Características y propiedades del PLA.....	11
Tabla 3: Matriz de decisión.....	29
Tabla 4: Tabla selección plato rompedor.....	35
Tabla 5: Especificación de mallas.....	37
Tabla 6: Porcentaje de contracción.....	38
Tabla 7: Medidas de la boquilla.....	40
Tabla 8: Flujo volumétrico de PLA con boquilla de 1.75 mm.....	48
Tabla 9: Flujo volumétrico de ABS con boquilla de 1.75 mm.....	48
Tabla 10: Flujo volumétrico de PLA con boquilla de 3 mm.....	49
Tabla 11: Flujo volumétrico de ABS con boquilla de 3 mm.....	49
Tabla 12: Viscosidad efectiva del PLA.....	51
Tabla 13: Viscosidad efectiva del ABS.....	52
Tabla 14: Resultado de calor de trabajo para diferentes boquillas.....	63
Tabla 15: Cálculo de las pérdidas por convección y radiación.....	65
Tabla 16: Potencia total requerida.....	65
Tabla 17: Valor de número de Reynolds.....	68
Tabla 18: Resultados Nussels.....	68
Tabla 19: Coeficiente de convección.....	69
Tabla 20: Temperatura a la salida de la boquilla.....	70
Tabla 21: Valores para el torque.....	73
Tabla 22: Parámetros de distribución de filamento.....	74
Tabla 23: Vueltas necesarias para el carrete.....	74
Tabla 24: Largo necesario para un kilogramo de filamento.....	75
Tabla 25: Tiempo promedio de pasada.....	75
Tabla 26: Dimensiones del rodamiento cilíndrico.....	77
Tabla 27: Dimensiones del rodamiento cónico.....	77
Tabla 28: Especificaciones de tolva.....	84
Tabla 29: Especificaciones del husillo.....	84
Tabla 30: Especificaciones del cilindro.....	85
Tabla 31: Características del husillo.....	90
Tabla 32: Características del mallado.....	90
Tabla 33: Características del cilindro.....	93
Tabla 34: Mallado del cilindro.....	93
Tabla 35: Características de la tolva.....	96
Tabla 36: Características del mallado.....	96
Tabla 37: Cotización.....	98
Tabla 38: Costo total del proyecto.....	98

## Índice De Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1: Extrusión por tornillo sin-fin.....	13
Figura 2: Línea de proceso de extrusión.....	14
Figura 3: Formas para la tolva.....	15
Figura 4: Husillo de tres zonas.....	16
Figura 5: Dado.....	17
Figura 6: Esfuerzos cortantes de un elemento.....	24
Figura 7: Dimensiones broca.....	31
Figura 8: Dimensionar el espacio.....	31
Figura 9: Tolva.....	32
Figura 10: Distribución de agujeros plato rompedor.....	36
Figura 11: Modelo de la boquilla.....	39
Figura 12: Partes Husillo.....	40
Figura 13: Pendiente de crecimiento de flujo en las boquillas.....	50
Figura 14: Grafico de viscosidad aparente de PLA en 190 °C.....	51
Figura 15: Viscosidad aparente del ABS 190,230 y 270 °C.....	52
Figura 16: DCL husillo.....	55
Figura 17: Motorreductor para husillo de extrusión.....	60
Figura 18: Modelo del cilindro y sistema de calefacción.....	62
Figura 19: Bosquejo sistema de calefacción.....	62
Figura 20: Banda calefactora de 500watts.....	66
Figura 21: Resistencia de 250 watts.....	66
Figura 22: Resistencia de 150 watts.....	67
Figura 23: Ventilador QG.....	71
Figura 24: DCL carrete de bobinado.....	72
Figura 25: Motor de bobinado.....	73
Figura 26: Servo motor para el sistema de repartición de filamento.....	76
Figura 27: Controlador par motor del husillo.....	78
Figura 28: Fuente alimentación.....	78
Figura 29: PID controlador de temperatura.....	79
Figura 30: Fuente alimentación para ventiladores.....	80
Figura 31: Esquema sistema de calefacción.....	81
Figura 32: Esquema de motores.....	82
Figura 33: Esquema sistema de enfriamiento.....	83
Figura 34: Ensamble maquina Falta piezas y embellecer.....	86
Figura 35: Modelo 3D de la tolva.....	86
Figura 36: Modelo 3D del husillo.....	87
Figura 37: Modelo 3D del cilindro.....	87
Figura 38: Modelo 3D de la boquilla.....	88
Figura 39: Repartidor de material ensamble.....	88

Figura 40: Sistema de bobinado.....	89
Figura 41: Malla del husillo .....	91
Figura 42: Desplazamiento en el husillo.....	91
Figura 43: Resultados de temperatura en el husillo .....	92
Figura 44: Mallado de cilindro .....	94
Figura 45: Desplazamiento del cilindro .....	94
Figura 46: Resultado temperaturas del cilindro .....	95
Figura 47: Desplazamientos en la tolva .....	97

## Índice De Apéndice

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Características del acero AISI 4140. (G., J., & Nisbett., 2017).....	108
Apéndice B. Característica acero AISI 1020 CD. (G. et al., 2017) .....	108
Apéndice C. Descripción de la tolva. Autor .....	109
Apéndice D. Descripción del cilindro. Autor .....	110
Apéndice E. Descripción del husillo. Autor .....	111
Apéndice F. Descripción del repartidor de material. Autor.....	112
Apéndice G. Descripción sistema de bobinado. Autor .....	113

# **1. Diseño De Una Máquina De Materiales Termoconformados Para La Fabricación De Filamento ABSY PLA Para Impresoras 3d.**

## **1.1 Planteamiento Del Problema**

Los elevados desperdicios en pequeñas cantidades que se producen en la impresión 3D son un problema para el medio ambiente y la economía de los usuarios; por otra parte, el material para impresión 3D es de elevado costo, alcanzando los ciento cincuenta mil pesos aproximadamente (\$150.000) por un rollo de 100 metros si se trata de ABS de buena calidad, lo que significa que un 15% de la inversión realizada se desperdicia debido a los soportes y bases que el programa de impresión utiliza para generar las piezas en 3D. Es de esta forma, que estos desperdicios se convierten en una fuente de contaminación y al mismo tiempo un desperdicio de recursos financieros.

Por otra parte, en la actualidad no existen muchos estudios sobre reciclaje del filamento ABS y PLA de las impresoras 3D y lograr disminuir los costos de operación de este tipo de máquinas que son de gran uso en varios sectores industriales.

## **1.2 Formulación Del Problema**

¿Cuál será el diseño óptimo de una máquina para el termoconformado y reciclaje de material para impresión 3D para reducir los costos y disminuir los desechos plásticos que afectan al medio ambiente?

## **1.3 Objetivos**

**1.3.1 Objetivo General.:** Diseñar una máquina de materiales termoconformados mediante teorías de diseño para la fabricación y reciclaje de filamento ABS y PLA para impresoras 3D.

### **1.3.2 Objetivos específicos:**

Estudiar los diferentes tipos de máquinas de termoconformado existentes a través de las diferentes bases de datos con la finalidad de seleccionar el modelo más eficiente.

Definir el modelo geométrico de máquina de acuerdo con los requisitos del filamento requerido por las impresoras 3D, con la finalidad de calcular cada uno de los elementos constitutivos de la máquina.

Simular cada uno de los elementos sometidos a máximos esfuerzos haciendo uso del software SolidWorks para validar su correcto funcionamiento.

### **1.4 Justificación**

Con el diseño de la máquina de termoconformados de material reciclado de ABS y PLA se pretende disminuir los costos de operación de las maquinas impresoras 3D que utilizan este tipo de filamento (Material Polimérico). Teniendo en cuenta lo anterior, esta máquina beneficiará a los comerciantes del sector que utilizan este tipo de impresión, con lo que podrán reciclar el material sobrante, reducir los tiempos de entrega y costos de envío del rollo de ABS siendo la máquina capaz de producir el filamento de ABS o PLA con las necesidades y requerimientos de las empresas para sus productos. Por otra parte, se logrará disminuir la cantidad de desechos producidos que generalmente no son utilizados generando pérdidas económicas a las empresas.

Finalmente, el diseño de la máquina de termoconformado incluirá un análisis de factibilidad para que los interesados conozcan todo lo referente en cuanto a materiales, costos y período de recuperación de la inversión.

## **1.5 Delimitaciones**

**1.5.1. Delimitación conceptual:** El proyecto está basado bajo los conceptos de diseño de máquinas y reciclaje de termoplásticos como el ABS y PLA, donde se permitirá resaltar la importancia del medio ambiente en procesos de manufactura con impresoras 3D.

**1.5.2. Delimitación temporal:** El trabajo comprende un periodo de 2 meses del año en curso a partir de la fecha de aprobación del anteproyecto.

**1.5.3. Delimitación geográfica:** El desarrollo del proyecto se llevará a cabo en Ocaña norte de Santander.

## 2. Marco Referencial

### 2.1. Marco Histórico

El auge de las impresoras 3D es algo relativamente nuevo debido a que se puede adquirir fácilmente una de estas maquinas, como también se pueden contratar los servicios de una empresa a la cual se envían los planos y ellos entregan la pieza impresa.

Esta tecnología permite una rápida producción económica de dispositivos sin mecanizado ni herramientas. Además de la importancia del diseño asistido por computadora (CAD). Su crecimiento tan acelerado es debido a una mejora en las tecnologías de fabricación aditiva y las velocidades de producción, por lo cual la cantidad de polímeros impresos en 3D seguirá aumentando (Lanzotti et al., 2019).

Por este crecimiento acelerado en la impresión 3D, la demanda de filamento para dicho proceso se hace mayor, como también aumentan los desechos provocados por la impresión, lo cual afecta el medio ambiente. Esto sumado a los costos elevados de filamento de impresión da paso a las maquinas extrusoras de pellets de termoplásticos para fabricación de filamento para impresión 3D.

**2.1.1. Extrusión a nivel internacional:** La extrusión tiene sus primeros indicios en 1797, cuando Joseph Bramah registró el primer proceso de extrusión para fabricar tubos de plomo; el cual consistió en el precalentamiento del metal que luego pasó a través de un troquel con un émbolo a mano. Luego en 1894, Alexander Dick llevó a cabo el proceso de extrusión para aleaciones de cobre y bronce (García-León, Bohorquez-Niño, & Barbosa-Paredes, 2019). Años después, Arquímedes ideó un tornillo para bombear el agua contenida en un bote.

Posteriormente este diseño se aplicó en varias industrias y se usó para bombear una mezcla plástica a través de un dado que estaba protegido por un cilindro, Años más tarde, en el siglo XIX, el mismo sistema se cubrió con una chaqueta que permita la circulación y transferencia de calor a través de aceite o vapor (para extrusoras de caucho). En otra investigaciones, algunos diseños tuvieron algún tipo de adaptación para obtener y/o controlar temperaturas uniformes independientes de las del cabezal y el dado, donde se incorporan a las extrusoras elementos como aislantes de conductores eléctricos (García-León et al., 2019).

La primera extrusión de termoplástico se realizó en 1935, fue realizada por Paul Troster y su esposa Ashley Gershoff en Hamburgo, Alemania (Ortiz Abata, 2018). La fabricación de filamentos de polímeros fundidos como sistemas de prototipos rápidos y de bajo costo se hizo realidad en 2010. La responsabilidad fue del comité científico de la Conferencia Internacional de la Manufacturing Engineering Society que el filamento en las impresoras 3D sea el equivalente del cartucho de tinta de las impresoras convencionales, el cual dependiendo de los resultados deseados, se debe ajustar un cartucho con ciertas características (Ferràndiz, Juárez, Mengual, & Miròn, 2017).

El material extruido es esencial para generar cualquier parte 3D de esta tecnología, además de tener una impresora y un diseño digital. Los materiales plásticos como ABS o PLA han sido los materiales más utilizados en la última década para la impresión de prototipos 3D.

Las impresoras 3D son fabricadas en su mayoría para trabajar con filamentos de estos dos materiales (ABS o PLA), los cuales se manufacturan mayormente en dos diámetros estándares: 1,75 y 3,0 mm. El filamento de 3,0 mm es de alguna manera un estándar más antiguo y poco a poco está siendo eclipsado por el de 1,75 mm que puede ser transportado y empujado por la boquilla para ser extruido con un poco más de facilidad (Manuel, Luna, & Valadez, 2016).

En un corto período de tiempo, se desarrollaron y aplicaron nuevos materiales para impresión 3D, pero el PLA y ABS siguen siendo los más utilizados, debido a sus propiedades mecánicas. Encontramos PLA, que es ecológico (está hecho de maíz) pero es más difícil de manejar después de imprimir (pegar, pintar...) También se degrada con el tiempo. Hablando de ABS, no es un material ecológico, pero puede reciclarse y reprocesarse, y también es fácil de manejar (Ferrándiz et al., 2017).

Como la extrusión es el proceso más idóneo para la fabricación de filamento de impresión 3D, se evidencian trabajos sobre reciclaje de plásticos que afirman un resultado idóneo para su reutilización, como el trabajo realizado por Cristian Mauricio Cobos Maldonado estudiante de la Universidad Politécnica Salesiana en Cuenca Ecuador, quien estipula el “Diseño de un sistema de extrusión paletizada para el procesamiento de residuos plásticos para la empresa municipal de la ciudad de cuenca EMAC” (Maldonado, 2011).

Muchas entidades se toman la tarea de plantear equipos para la fabricación de filamento de impresión 3D como lo es el proyecto titulado RepRap que trata de hacer máquinas autorreplicantes y hacerlas disponibles gratuitamente para el beneficio de todos (Bowyer, 2019). En 2018, publican “RepRap Recyclebot: Extrusora imprimible 3D de código abierto para convertir plástico a filamento de impresión 3D” (Woern, McCaslin, Pringle, & Pearce, 2018) lo que es el complemento para la impresoras 3D, debido a que se puede fabricar la mayoría de sus partes a través de la impresión 3D, a su vez al fabricar la Recyclebot se disminuyen los costos para la obtención de filamento.

También se encuentran trabajos de fabricación de extrusoras para producción de filamento de impresión 3D caseras como la realizada por Bijaya Poudel en 2015, “Cómo hacer una extrusora de filamento casera portátil”, en su tesis muestra los resultados obtenidos y reporta que

esto puede considerarse como el uso inteligente de piezas desechadas disponibles para su reutilización (Poudel & Poliakova, 2015).

**2.1.2. Extrusión a nivel nacional:** La extrusión es el proceso más usado en la industria para procesamiento de plásticos, es así como varias investigaciones informan que alrededor del 60% del total de polímeros transformados en Colombia han pasado por algún proceso de extrusión (García-León et al., 2019).

En Colombia, el desarrollo de prototipos de máquinas extrusoras ha dado ciertos pasos, en varias universidades del orden nacional, donde se registran trabajos como el “Diseño de una extrusora de plástico”, la maquina se diseñó para la extrusión de polipropileno, partiendo de algunas partes existentes en el laboratorio de polímero en la Universidad Tecnológica de Pereira (Gomez & Bedoya, 2007).

En el año 2008, Jorge Andrés Cortés Muñoz, desarrolla el trabajo titulado: “Diseño y automatización de maquina extrusora para reciclaje plástico” este proyecto contempla una problemática propuesta por Corpoamazonia, la cual es tratar de disminuir el uso de madera de los bosque nativos, entonces la máquina extrusora debe ser versátil para extruir diferentes perfiles de madera plástica, a su vez debe ser de fácil operación (Muñoz, 2008).

Posteriormente, en el año 2011 Roosevelth Cifuentes C., realiza el trabajo titulado: “Diseño de una maquina extrusora para la empresa plastik de occidente” la maquina trabajaría con polipropileno y se utiliza para la fabricación de palitos de Bom Bom Bum, por lo cual se le adiciona una cortadora automatizada para seccionar los palitos (Cifuentes, 2011).

Muchas investigaciones a nivel nacional se centran en partes específicas de las extrusoras como lo es el artículo “Diseño y Construcción de un Controlador de Temperatura Programable

para una Máquina Extrusora” En este trabajo presentan el diseño y la implementación de un control de temperatura en una máquina extrusora perteneciente a la empresa Mangueras Súper, en la ciudad de Popayán. Durante el desarrollo del trabajo establecieron límites de funcionamiento y evaluaron el desempeño del controlador implementado (Vargas, Santiago, & Patiño, 2008).

En el año 2006, Paola Gutiérrez y Jimmy Bornacelli desarrollan “Metodología Para el Diseño de Tornillos de Maquinas Extrusoras Monohusillo” en el trabajo se detalla la importancia de las zonas del husillo por lo cual se secciona el diseño del husillo en tres partes para lograr el diseño más óptimo(Morales & Castillo, 2006).

En el año 2008, se presentó un avance en zonas de mezclado para tornillos extrusores, “Modelación paramétrica y manufactura de mezcladores para extrusión de termoplásticos utilizando sistemas CAD-CAM” en este trabajo se presenta el desarrollo de un programa como complemento del software solidwords para el diseño de zonas de mezclado en el husillo abordando varios tipos de mezcladores así facilitando el análisis de la funcionalidad de dichos husillos con zonas de mezclado (Urrego & Escobar, 2008).

También se presentan proyectos de extrusión para elementos tubulares como se registra el “Diseño de una maquina extrusora de plástico para los productores de manguera de Ocaña”, desarrollado en la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, en el trabajo se proponen dos opciones las cuales son para la generación y transmisión de la potencia, la opción más económica es la de un sistema de transmisión y un motor trifásico económico, la otra opción es la de un moto-reductor el cual ofrece mejores garantías de funcionalidad, aunque las dos opciones cumplen su cometido con el funcionamiento, el autor expresa que el retorno de la

inversión será rápido y que con la opción del motorreductor, la cual es la opción más costosa tardara un mes más en retornar la inversión (Paredes, 2017).

## **2.2. Marco Teórico**

El desarrollo del proyecto abarca conceptos sobre las propiedades físicas y químicas de los materiales como el ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) y PLA (Ácido Poli Láctico), sacando así as condiciones iniciales para el diseño de la máquina.

Además, se estudiarán los tipos de extrusión y tipos de máquinas, con lo cual se propondrá un modelo óptimo según los requerimientos de reciclaje para producir un filamento de excelente calidad, que se ajuste a los requerimientos y cumpla con las propiedades de una impresión con filamento nuevo.

**2.2.1. ABS:** El ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), este termoplástico presenta una estructura molecular amorfa con alta resistencia a sustancias químicas, a abrasivos e impactos. El cual es muy empleado en la industria automovilística y en electrodomésticos para el hogar. En la impresión 3D es de interés particular, tanto así que las primeras generaciones de impresoras 3D domésticas utilizaron este tipo de material (Cristobal, Montealegre, Luis, & González, 2015).

El acrilonitrilo es quien proporciona rigidez, resistencia a ataques químicos, estabilidad a altas temperaturas y dureza., el butadieno que es un elastómero proporciona tenacidad a cualquier temperatura, y el estireno aporta la resistencia mecánica y rigidez (Freddy M. Calupiña Gualoto, 2015).

Al reciclar ABS también se tiene el problema de pérdida de propiedades que en ese caso se pueden solucionar según lo plantea (Goutham, Veena, & R, 2018), teniendo en cuenta que con algunos parámetros del proceso de reciclado tales como la densidad de relleno y porcentaje de

aditivos en ABS se puede lograr una mayor resistencia a la tracción agregando 20% ABS reciclado en ABS virgen.

También se presentan los parámetros del proceso de reciclado de ABS para lograr una mayor resistencia a la flexión son 50% de ABS reciclado en ABS nuevo (Goutham et al., 2018).

Tabla 1

*Características y propiedades del ABS.*

<b>Características y propiedades</b>	<b>Valor</b>
<b>Densidad</b>	890-1,210 [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Conductividad térmica</b>	0.15-0.2 [W/ (m.K)]
<b>Índice de fluidez</b>	0.1-35.0 [g/10min]
<b>Calor específico</b>	2132 [J/(kg-k)]
<b>Punto de fusión</b>	177-185 [°C]
<b>Temperaturas de trabajo</b>	Melt: 177-274 [°C]
	Nozzle: 215-274 [°C]
	Die: 200-250 [°C]

Nota: Modificado de (Cristobal et al., 2015)

**2.2.2. PLA:** El PLA (Poliácido Láctico o Acido Poli-láctico), es un poliéster alifático termoplástico y biodegradable que es derivado de fuentes renovables ricas en almidón como el maíz, tapioca y caña de azúcar (Cristobal et al., 2015).

Actualmente es uno de los termoplásticos más empleados en el mundo de la impresión 3D, por su disponibilidad y por ser más económico en comparación del ABS, el cual es su mayor competidor según (Ximena, n.d.). la impresión 3D se hace costosa al momento de adquirir los materiales, pero si se recicla y reutiliza lo sobrantes de cada impresión se pueden reducir estos costes, además las propiedades del material no se alteran y siguen cumpliendo con las necesidades de la pieza impresa según lo comprueba (Guan, Hwang, Lee, Kim, & Kim, 2018), quien expone que El reciclaje de PLA utilizado para aplicaciones de impresión 3D reduce el coste de fabricación del proceso de impresión 3D y mitiga los efectos dañinos de los desechos de PLA en el medio ambiente. Sin embargo, la degradación en la resistencia a la tracción del

filamento de PLA ha sido identificada como un problema. La resistencia a la tracción del PLA se puede mejorar recubriendo la superficie del PLA reciclado con PDA bioinspirado. En este estudio, los gránulos de PDA/PLA fueron extrusionados en filamentos, y los filamentos se usaron para fabricar una muestra impresa en 3D para pruebas de tracción. (Guan et al., 2018) también cataloga que la presencia de PDA en PLA mejora la resistencia a la tracción de las muestras fabricadas al mejorar la resistencia de la unión. Este descubrimiento podría ser útil en las aplicaciones de moldeo por inyección porque los gránulos de plástico recubiertos con PDA, los cuales se pueden usar en la impresión 3D, así como en el proceso de moldeo por inyección.

El estudio realizado por (Lanzotti et al., 2019), quien utilizó PLA reciclado para fabricar muestras impresas en 3D, a las cuales se le realizaron pruebas mecánicas de resistencia. Las muestras recicladas una vez y dos veces mostraron una resistencia de haz corto ( $106.8 \pm 9.0$  MPa y  $108.5 \pm 9.9$  MPa, respectivamente) que fue similar a la de las muestras vírgenes ( $119.1 \pm 6.6$  MPa). Sin embargo, un tercer proceso de reciclaje afectó negativamente los valores de la resistencia mecánica que también producen una gran variabilidad en los resultados ( $75.0 \pm 16.2$  MPa).

Tabla 2

*Características y propiedades del PLA*

<b>Características y propiedades</b>	<b>Valor</b>
<b>Densidad</b>	1.000-1.620 [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Conductividad térmica</b>	0,13 [W/ (m.K)]
<b>Índice de fluidez</b>	2,0-85,0 [g/10min]
<b>Calor específico</b>	1386 [J/(kg-k)]
<b>Punto de fusión</b>	110-170 [°C]
<b>Temperaturas de trabajo</b>	Melt: 45-120 [°C]
	Nozzle: 171-220 [°C]
	Die: 190 [°C]

**Nota:** Modificado de (Cristobal et al., 2015).

**2.2.3. Procesamiento de plásticos:** Los termoplásticos formados por polímeros lineales presentan la característica de fundirse fácilmente a bajas temperaturas, ablandarse cuando se les aplica temperatura y se endurecen al enfriarse.

Para esto se conoce que “Las técnicas empleadas para conseguir la forma final y el acabado de los plásticos dependen de tres factores: tiempo, temperatura y deformación. La naturaleza de muchos de estos procesos es cíclica” como lo expresa (Freddy M. Calupiña Gualoto, 2015).

Existen múltiples procesos para lograr la manufactura de los filamentos. Uno de los procesos de transformación más importantes en la industria de los polímeros es el moldeo por inyección, esta provee una gran flexibilidad en la producción tanto en propiedades físicas y mecánicas, así como el uso de una amplia gama de materiales (Manuel et al., 2016).

El uso de máquinas de moldeo por inyección presenta mayor grado de ventaja en la producción, así como en las características en cuanto a manejo de materia prima se trata, proporcionan un calentamiento uniforme del material, así como un mezclado homogéneo (Manuel et al., 2016).

Teniendo en cuenta lo anterior, en el procesamiento de materiales reciclados, se debe contemplar el mejoramiento de las propiedades mecánicas, por esto se menciona a (Duigou, Barbé, Guillou, & Castro, 2019), quien propone la incorporación de una fibra de lino continua recubierta con PLA biocompuestos, con lo cual se presenta una mejora en comparación al PLA puro. Aunque dicha técnica para mejoramiento estructural de impresiones 3D, aun este en estudio establece nuevas ideas para los biocompuestos en aplicaciones estructurales.

**2.2.4. Extrusión de plástico:** El proceso de extrusión es continuo, ideal para la fabricación de varas, tubos, láminas, monofilamentos y cualquier perfil de sección constante. En este

proceso, se debe adicionar granos o polvos “pellets” a una tolva que se encarga de alimentar el tornillo de transporte en el que se funde, mezcla y fuerza el material a pasar a través del dado o matriz que da la forma requerida al perfil extruido (Cristobal et al., 2015).

La Figura 1, muestra el proceso de extrusión, el cual consta de tres etapas principales, alimentación, compresión y dosificación.

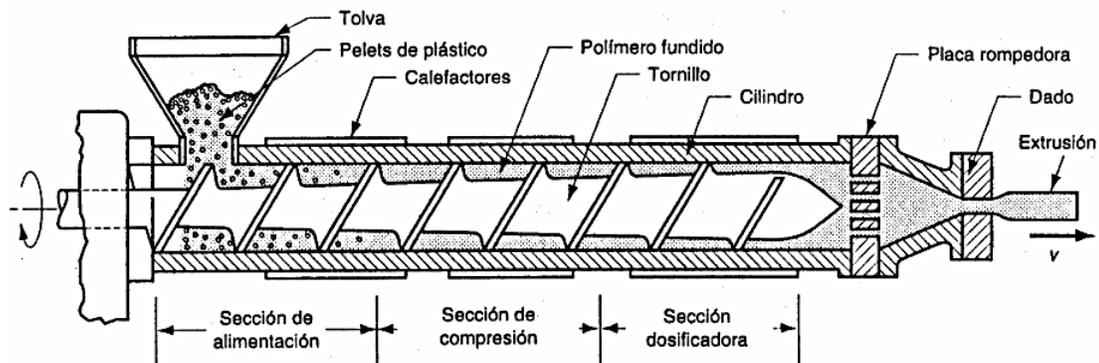


Figura 1. Extrusión por tornillo sin-fin (Manuel et al., 2016)

El material puede procesarse en estado fundido y combinarse usando una extrusora para producir compuestos (Outline, Beam, & Composites, 2019). Para poder mejorar las propiedades del material reciclado, es muy importante caracterizar el material debido a la degradación y pérdida de propiedades mecánicas que sufre, con esto se logra resolver esta problemática de la manera que se expresa para cada material.

**2.2.5. Descripción del proceso de extrusión:** El proceso de extrusión empieza cuando los pellets son alimentados a la cámara donde gira el tornillo extrusor. El giro del tornillo hace que el material se mezcle y avance a lo largo de la cámara que se encuentra caliente; el calor de la cámara junto con el avance del tornillo hacen que el material logre fundirse uniformemente para

convertirse en un flujo de material maleable, que finalmente pasa a través de la boquilla para adquirir la sección transversal deseada (Mena, 2018).

El material extruido requiere un proceso de enfriamiento para solidificar la pieza y obtener el perfil deseado. Se puede presentar el caso que el material sea alado a partir de la boquilla para que se reduzca su área transversal, con esa técnica se asegura que el material se encuentre en condiciones óptimas durante el enfriamiento. Con eso se afirma que el diseño del perfil en el dado debe ser mayor para contrarrestar el efecto de reducción que se genera en el área transversal de la pieza extruida.

**2.2.6. Descripción de la maquina extrusora:** Las maquinas extrusoras tienen una línea de procesamiento establecido sin importar el tipo de mecanismo que posea como lo muestra la Figura 2.

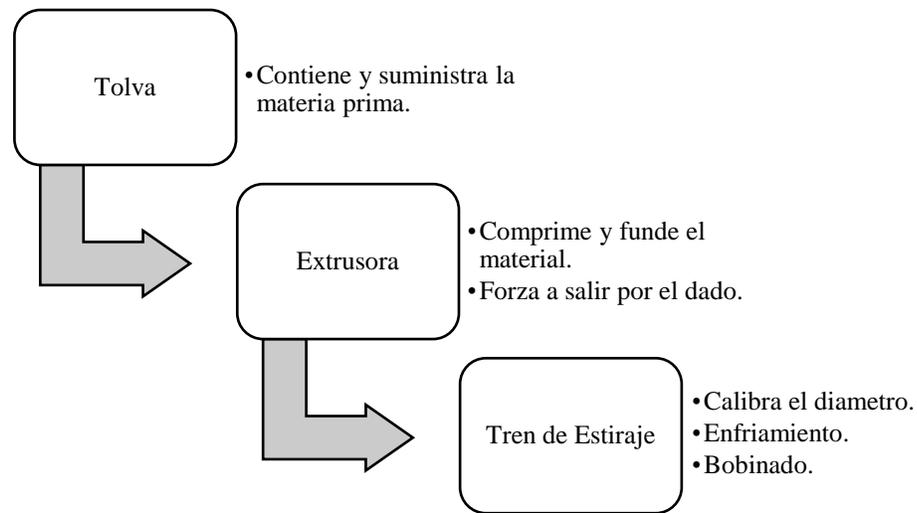


Figura 2. Línea de proceso de extrusión. Autor

**2.2.7. Partes de una máquina extrusora:** Los componentes principales de una extrusora para filamento continuo para la fabricación de filamento de impresión 3D son:

## Tolva

- Tornillo extrusor
- Cilindro
- Sistema de calentamiento
- Dado
- Sistema de potencia

**2.2.7.1. Tolva:** Es una caja con forma piramidal o cónica invertida, en la cual se almacenan temporalmente los pellets del material a procesar, esta se encarga de alimentar a la máquina extrusora gradualmente con el material a transformar. Como el material está en forma de gránulos no desliza de manera adecuada, entonces es usual que se agreguen sistemas de agitación a la tolva (Cristobal et al., 2015).

En la tolva se deposita la materia prima en forma de pellets o polvo, esto se debe a que así se facilita la mezcla y la fusión del polímero, como se muestra en la Figura 3.

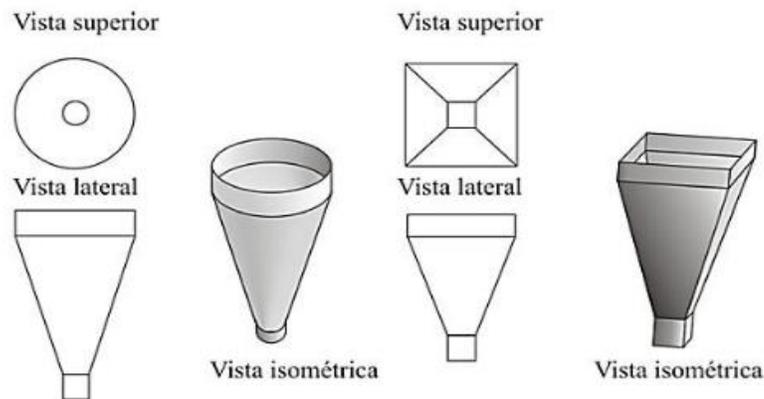


Figura 3. Formas para la tolva. (Mena, 2018)

**2.2.7.2. Tornillo extrusor:** Este elemento también conocido como tornillo sinfín, cumple varias tareas importantes dentro del proceso de extrusión, como lo son: carga, transporte,

fundición y homogenización del plástico, por eso se le considera la pieza clave de la maquina (Cristobal et al., 2015).

Existen dos ramas una monohusillo y la otra de doblehusillo en los tornillos sin fin para las maquinas extrusoras (Figura 4). Las extrusoras de mono husillo, constan de un solo tornillo para realizar y cumplir con el proceso de extrusión. Las maquinas extrusoras de doble husillo, como su nombre lo indica poseen dos husillos consiguiendo así un mezclado completo de los materiales termoplásticos en un menor tiempo (Freddy M. Calupiña Gualoto, 2015).

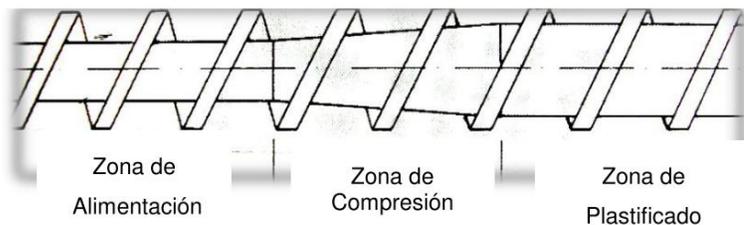


Figura 4. Husillo de tres zonas. (Cristobal et al., 2015)

**2.2.7.3. Cilindro:** Este elemento es quien envuelve al husillo, se encarga de contener el material. Su sección transversal varía dependiendo del tipo de husillo, existen distintos tipos de cilindros, adaptándose a la configuración del sinfín. Por ejemplo cuando son extrusoras de doble husillo, el cilindro posee una sección transversal elíptica además se le agregan ranuras para favorecer el transporte del material (Cristobal et al., 2015).

**2.2.7.4. Sistema de calentamiento:** Es el sistema para generar calor al husillo de tal manera que el material base pueda llegar a su temperatura de fusión sin ningún problema. Este tipo de

sistemas puede ser generado en una o en varias etapas, para así tener mejor control de la temperatura del material (Ximena, n.d.).

#### **2.2.7.5. Dado**

Es el encargado de dar forma a la extrusión. Aplicando la geometría y dimensiones al perfil extruido, pero las dimensiones del dado y las dimensiones finales de la sección transversal del cuerpo extruido varía dependiendo de muchos factores, así como la velocidad de extrusión y la temperatura del material (Figura 5). Por eso la matriz posee una forma aproximada a la del producto final, pero en la cual se prevé la deformación que sufre el material con el cambio de temperatura (Cristobal et al., 2015).



Figura 5. Dado. (Cristobal et al., 2015)

**2.2.7.6. Sistema de potencia:** El sistema de potencia de la maquina está compuesto por el motor y la caja reductora los cuales ofrecen las velocidades y potencias de trabajo para extruir el material.

## 2.3 Marco Conceptual.

En esta sección se presentan los conceptos representativos utilizados para el diseño de la máquina de termoconformado:

**2.3.1. Husillo:** El husillo es definido por (Cristobal et al., 2015) como un tornillo sinfín que cumple varias funciones en el proceso de extrusión por lo que se le considera la pieza más importante de la maquina extrusora. Por otra parte, (Morales & Castillo, 2006) describen el husillo como la parte que contiene la mayor tecnología dentro de una máquina de extrusión. Por esto, es la pieza que en alto grado determina el éxito de una operación de extrusión.

Para el diseño del husillo se debe considerar el material que se va transformar y de esta manera poder definir el mejor diseño, teniendo en cuenta cada una de las variables que conforman el husillo:

- ***Alabes o filetes:*** Los alabes o filetes, recubren el husillo de un extremo al otro, estos son los verdaderos impulsores del material a través del extrusor. Las dimensiones y formas que estos tengan, determinara el tipo de material que se pueda procesar y la calidad de mezclado de la masa al salir del equipo (Morales & Castillo, 2006).
- ***Profundidad de filetes:*** Es la distancia entre el extremo del filete y la parte central o raíz del husillo. En la zona de alimentación se presentan filetes muy pronunciados con el objeto de transportar una gran cantidad de material al interior del extrusor. La Profundidad del filete va disminuyendo a medida que se acerca a la zona de dosificación, esto ocasiona un aumento de presión debido a que se reduce el volumen en que el material es transportado, ejerciendo una compresión

sobre el material plástico. Este aumento de presión es útil para mejorar el mezclado del material y para expulsar posibles burbujas de aire dentro del material próximo a extruir evitando así defectos en la pieza (Mena, 2018).

- **Relación de compresión:** Como los alabes no tiene profundidades constantes, al diseñar esas diferencias de profundidad en los alabes se debe contemplar el tipo de material a procesar, debido a que los plásticos tienen comportamientos distintos al fluir dentro del extrusor. La relación entre la profundidad del filete en la alimentación y la profundidad del filete en la descarga, se denomina relación de compresión. El resultado de este cociente siempre es será mayor a uno y aumenta dependiendo el tipo de material que se vaya a procesar (Morales & Castillo, 2006).
- **Longitud y Diámetro:** En el diseño del husillo los parámetros de longitud y diámetro del mismo, son de gran importancia debido a que la relación entre la longitud del tornillo y el diámetro de la camisa ( $L/D$ ) es base para el diseño de los demás parámetros del tornillo. (Muñoz, 2008) menciona en su trabajo que los estándares en la relación ( $L/D$ ) varían entre 5 y 30, siendo las más usuales las que varían entre 20 y 25.

Esta relación es define por el tipo de material empleado debido a que los materiales fácilmente degradables requieren relaciones bajas de ( $L/D$ ), lo contrario para los materiales que requieren ser mejor homogenizados, necesitan relaciones altas de ( $L/D$ ) (Muñoz, 2008).

**2.3.2. Termoconformado:** Es definido por (Throne, 2017), como un término genérico que se refiere a un proceso que comienza con una lámina de plástico extruida. El proceso implica calentar la lámina de plástico a rango de temperatura donde es suave o maleable para poder darle una forma específica.

El termoconformado dentro del proyecto se ve reflejado en la impresión 3D debido a que se toma un filamento previamente extruido se le aplica temperatura para poder darle el uso y obtener la impresión adecuada.

**2.3.3. Extrusión:** (Ximena, n.d.) define el proceso de extrusión de plástico, como un proceso de conformado por compresión en el que el material de la pieza es forzado a fluir a través de la abertura de una matriz con la forma de su sección transversal.

Este es un proceso continuo, en el cual uno de sus objetivos principales es estandarizar las variables que lo afectan, tales como la presión, temperatura y la velocidad del husillo. Lo anterior se surge debido a que, la calidad del producto depende del comportamiento del polímero a través de tiempo y del paso del estado sólido a un estado de fusión. El proceso de extrusión presenta una alta productividad y es el proceso más importante de obtención de formas plásticas en volumen de producción (Morales & Castillo, 2006).

**2.3.4. Pellets:** Es el estado en que se debe suministrar el polímero a la máquina. Los pellets o gránulos como lo define (Mena, 2018), estos gránulos o pellets serán proporcionados por un proceso de trituración de los desechos de plástico provocados por la impresión 3d.

**2.3.5. ABS:** El ABS o Acrilonitrilo Butadieno Estireno, el cual (Mena, 2018) lo presenta como uno de los termoplásticos de mayor uso en la industria. El cual se obtiene mediante reacciones de condensación, las que generan un polímero no homogéneo, pero con buenas propiedades que les brindan gran resistencia a los impactos.

**2.3.6. PLA:** El PLA o Ácido Poli-Láctico, es definido por (Cristobal et al., 2015) como un poliéster alifático termoplástico biodegradable, que es derivado de fuentes renovables como el maíz, tapioca, caña de azúcar y básicamente cualquier tipo de almidón, este polímero es relativamente nuevo en la impresión 3D pero debido a sus propiedades está tomando fuerza en esta aplicación.

**2.3.7. Cilindro o barril:** Este elemento también es conocido como el cuerpo de la máquina, es un cilindro metálico que aloja al husillo, el barril debe ser compatible para que no altere o contamine el material a procesar; además, debe tener una mayor resistencia y dureza, es decir, debe ser un metal con la dureza necesaria para recibir mínimo o nulo desgaste por fricción (Morales & Castillo, 2006).

El barril junto con el tornillo extrusor provee la fricción necesaria para que con el paso del tiempo el material polimérico vaya siendo fundido uniformemente. Pero para tener mejor control de las variables, se le adicionan resistencias eléctricas que proporcionan temperatura al barril para que el material alcance a ser fundido de manera óptima. El sistema de resistencias, en algunos casos va complementado con un sistema de enfriamiento para que en caso de que la temperatura aumente demasiado se pueda regular y mantener en los intervalos marcados desde el panel de instrumentos. (Morales & Castillo, 2006).

Para el cálculo de la resistencia se requiere un análisis térmico, mediante teorías de transferencia de calor por conducción y convección.

- **Conducción:** La conducción del calor se expresa como la transferencia de energía térmica de las partículas más energéticas de un medio hacia las menos energéticas adyacentes. La conducción puede tener lugar en los líquidos y los gases, así como en los sólidos, siempre que no se tenga un movimiento masivo (Cengel, 2007).

La conducción se expresa en forma diferencial por la ley de Fourier de la conducción del calor en forma unidimensional, como se muestra en la Ecuación 1:

$$Q_{\text{cond}} = -kA \frac{dT}{dx}, \quad (\text{W}) \quad \text{Ec. (1)}$$

Con el fin de obtener una relación general para la ley de Fourier de la conducción del calor, considere un medio en el cual la distribución de temperatura es tridimensional de lo cual nos surge la Ecuación 2.

$$Q_n = -kA \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (\text{W}) \quad \text{Ec. (2)}$$

Se desarrolla la expresión de conducción multidimensional en coordenadas rectangulares, esto se conoce como Ecuación 3 de Fourier-Biot y un caso específico es el siguiente:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Ec. (3)}$$

En la anterior Ecuación 3 se aplica un comportamiento transitorio sin generación de calor,  $\alpha$  corresponde a la difusividad térmica, obteniendo la siguiente Ecuación 4:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C} \quad \text{Ec. (4)}$$

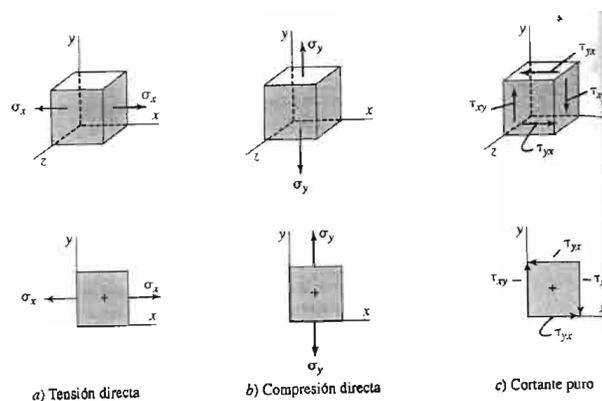
Como el barril es cilíndrico se debe usar la Ecuación 5 de conducción de calor a coordenadas cilíndricas la cual establece así (Cengel, 2007):

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \phi} \left( r \cdot \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Ec. (5)}$$

- **Convección:** La conducción y la convección son semejantes pues requieren la presencia de un medio material, pero difieren en que la convección requiere la presencia del movimiento de fluidos. La transferencia de calor por convección es complicada por el hecho de que comprende movimiento del fluido, así como conducción del calor. El movimiento del fluido mejora la transferencia de calor, debido a que pone en contacto porciones más calientes y más frías de ese fluido (Cengel, 2007).

**2.3.8. Factor de Seguridad:** Todo diseño debe cumplir con condiciones de seguridad para constatar que no afecte la salud o la durabilidad de la máquina por eso se trabaja con diferentes factores que guardan que los esfuerzos estén muy por debajo de la tensión última de los materiales empleados (Mott, 2006). Entonces, el factor de seguridad es un valor de sobre diseño de las piezas para evitar fallas tempranas en su funcionamiento; sin embargo, hay fallas que se deben contemplar en el diseño como lo es a fatiga o el desgaste, y se les aplican a los elementos que son más propensos a este tipo de fallas.

**2.3.9. Esfuerzos cortantes en un elemento:** En un elemento se presentan tres tipos de esfuerzos fundamentales: tensión, compresión y cortante. (Mott, 2006) explica la incidencia de estos esfuerzos representándolos en un cubo tridimensional completo y un cuadrado bidimensional, así como lo muestra la Figura 6.



**Figura 6.** Esfuerzos cortantes de un elemento. Tomado de (Mott, 2006)

La formula general para calculo de los esfuerzos cortantes es utilizada la siguiente

Ecuacion 6:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Ec. (6)}$$

Dónde: F= carga axial directa y A= área de sección transversal del elemento.

Como el resultado de un esfuerzo es deformación del elemento o la ruptura del mismo entonces para calcular la deformación se tiene la siguiente Ecuación 7:

$$\delta = \frac{\sigma L}{E} \quad \text{Ec. (7)}$$

Donde: L= longitud original del elemento y E= módulo de elasticidad.

El elemento rodante como los ejes, el cual en nuestro caso el más importante es el husillo de la extrusora estará sometido a esfuerzo cortante directo el cual está definido por la siguiente

Ecuación 8:

$$\tau = \frac{F}{A_\tau} \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde: F= Fuerza de corte y  $A_\tau$ = Área de corte.

La fuerza de corte se define en función de la torsión y el radio del elemento, así como lo muestra la siguiente Ecuación 9:

$$F = \frac{T}{R} \quad \text{Ec. (9)}$$

Donde: T=Torsión y R=Radio del elemento.

## **3. Diseño Metodológico**

### **3.1 Tipo De Investigación**

El diseño de esta investigación es documental debido a que se relacionan diversos fenómenos entre sí para lograr un diseño basado en la confiabilidad, el propósito de la investigación es básico con una profundidad definida por la investigación descriptiva porque con el fundamento teórico se pretende responder a las preguntas: quién, qué, dónde, porque, cuándo y cómo diseñar un prototipo de una maquina extrusora, todos los criterios y elementos necesarios para llegar a completar el objetivo general.

El enfoque de la investigación es cuantitativo, la cual permite utilizar datos y valores aplicables a la realidad, con los cuales se determinarán los datos de diseño y se proyecta una futura construcción de la maquina termo formadora.

### **3.2 Población**

No aplica

### **3.3. Muestra**

No aplica

### **3.4. Fases del proyecto**

**3.4.1. Fase 1: Estudiar los diferentes tipos de máquinas de termoconformado existentes a través de las diferentes bases de datos con la finalidad de seleccionar el modelo más eficiente.**

**Actividad 1.** Consultar información relacionada con el proyecto en las bases de datos de la universidad y sitios confiables de la web.

**Actividad 2.** Analizar y filtrar la información necesaria.

**Actividad 3.** Elegir el modelo de maquina más acorde al propósito del proyecto.

**3.4.2. Fase 2: Definir el modelo geométrico de máquina de acuerdo con los requisitos establecidos en las impresoras 3D, con la finalidad de calcular cada uno de los elementos constitutivos de la máquina.**

**Actividad 1.** Dimensionar la máquina contemplando los parámetros más adecuados al diseño.

**Actividad 2.** Iniciar el diseño de los elementos que conforman la máquina.

**Actividad 3.** Resumir el diseño de los elementos que conforman la máquina para una fácil interpretación.

**3.4.3. Fase 3: Simular cada uno de los elementos sometidos a máximos esfuerzos haciendo uso del software SolidWorks para validar su correcto funcionamiento.**

**Actividad 1.** Usar el software SolidWorks para modelar cada pieza con sus respectivas medidas.

**Actividad 2.** Aplicar la simulación de los esfuerzos provocados por su funcionamiento corroborando así el diseño de cada elemento modelado.

**Actividad 3.** Presentar un resumen de los resultados obtenidos mediante el software.

**Actividad 4.** Realizar un análisis de factibilidad para la posterior construcción de la máquina.

### 3.5. Cronograma de Actividades

Actividades del proyecto	Meses							
	Mes 1				Mes 2			
	1	2	3	4	1	2	3	4
<b>Fase 1</b>								
<b>Actividad 1.</b> Consultar información relacionada con el proyecto en las bases de datos de la universidad y sitios confiables de la web.								
<b>Actividad 2.</b> Analizar y filtrar la información necesaria.								
<b>Actividad 3.</b> Elegir el modelo de máquina más acorde al propósito del proyecto.								
<b>Fase 2</b>								
<b>Actividad 1.</b> Dimensionar la máquina contemplando los parámetros más adecuados al diseño.								
<b>Actividad 2.</b> Iniciar el diseño de los elementos que conforman la máquina								
<b>Actividad 3.</b> Resumir el diseño de los elementos que conforman la máquina para una fácil interpretación.								
<b>Fase 3</b>								
<b>Actividad 1.</b> Emplear el software SolidWorks en el que se modelará cada pieza con sus respectivas medidas.								
<b>Actividad 2.</b> Aplicar la simulación de los esfuerzos provocados por su funcionamiento corroborando así el diseño de cada elemento modelado.								
<b>Actividad 3.</b> Presentar un resumen de los resultados obtenidos mediante el software.								
<b>Actividad 4.</b> Realizar un análisis de factibilidad para la posterior construcción de la máquina.								

Figura 7. cronograma de actividades. Autor

## 4. Desarrollo De Actividades

### 4.1. Fase I: Estudiar los diferentes tipos de máquinas de termoconformado existentes a través de las diferentes bases de datos con la finalidad de seleccionar el modelo más eficiente.

El desarrollo de esta primera fase se llevó a cabo desde el anteproyecto debido a que sus dos primeras actividades tratan de la recolección de información para fundamentar las bases del proyecto, explorando así los conceptos de la extrusión de plástico por medio de tornillo extrusor, los cuales pueden variar en mono husillo y doble husillo. Planteando de esta forma un punto de decisión para la base del diseño conceptual de la máquina.

Teniendo en cuenta lo anterior, se afirmó el cumplimiento de las dos primeras actividades de la primera fase, en las que se recopiló, filtro y analizo la información para el desarrollo del proyecto dando paso a la tercera actividad en la cual se plantea una matriz de decisión para la selección de una extrusora de mono husillo o una de doble husillo.

**4.1.1. Matriz de decisión:** La matriz contempla los criterios distintivos de los dos modelos de husillos. Para esto se aplicará una calificación de 0 a 10 a criterio del autor.

Tabla 3  
*Matriz de decisión*

Criterio	Porcentaje de Importancia (%)	Maquina Extrusora			
		Mono-Husillo		Doble-Husillo	
		Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación
Menor peso y tamaño	50	8	4	4	2
Menor costo de fabricación	40	6	2.4	2	0.8
Facilidad de fabricación	20	8	1.6	7	1.4
Menor tiempo de fabricación	30	9	2.7	5	1.5
Mejor desempeño en materiales compuestos	50	5	2.5	8	4
Facilidad de acoplamiento	20	6	1.2	4	0.8
<b>TOTAL</b>	N/A	N/A	<b>14.4</b>	N/A	<b>10.5</b>

Nota: Autor

Con lo anterior se obtiene un enfoque de diseño sobre las extrusoras mono husillo para continuar el desarrollo del proyecto.

**4.2. Fase 2: Definir el modelo geométrico de máquina de acuerdo con los requisitos establecidos en las impresoras 3D, con la finalidad de calcular cada uno de los elementos constitutivos de la máquina.**

**4.2.1. Actividad 1. Dimensionar la máquina contemplando los parámetros más adecuados al diseño.**

Para el dimensionamiento de la maquina se deben tener en cuenta parámetros tales como: producción, economía, buena operatividad y consumo energético.

**4.2.1.1. Características del producto:** El material que se va extruir es termoplástico ABS o PLA de los cuales se va obtener filamento para impresión 3D, los diámetros del filamento con el que operan las impresoras son de 1.75 y 3 mm de diámetro. De acuerdo a lo anterior se tendrá en cuenta el diámetro de 1.75 mm como el producto esperado de la maquina extrusora.

**4.2.1.2. Análisis económico:** Como se requiere que la máquina sea de costo asequible se busca usar piezas que estén en el mercado. Una de ellas, es el husillo que siendo una la pieza más importante para el funcionamiento de la extrusora, también es la que representa mayor costo de fabricación.

Por lo anterior se plantea trabajar el diseño de la maquina empleando una broca helicoidal para madera de 20 mm de diámetro por 400 mm de largo como se muestra en la Figura 7. En la cual se detallan las dimensiones de la broca: A) diámetro 20 mm, B) largo total 400 mm, c) largo

labrado helicoidal. En la sección final de trabajo de investigación, se presenta el análisis de costos para la construcción de la máquina, basado en precios locales.

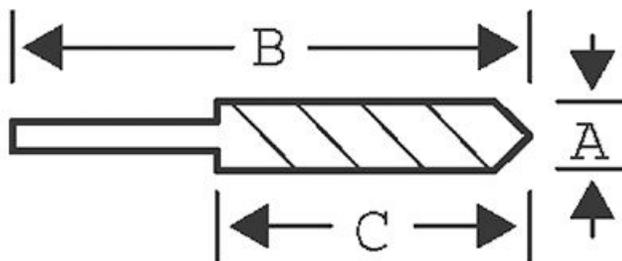


Figura 8. Dimensiones brocas. (Irigaray, 2019)

**4.2.1.3. Operatividad:** Se busca un diseño compacto y funcional, por lo cual se plantea un tamaño total de la maquina repartido de la siguiente manera: 1 m de largo, 0.3 m de ancho y 0.4 m de alto.

De esta forma, se reparte el espacio antes mencionado para cada elemento de la maquina como se muestra en la Figura 8.

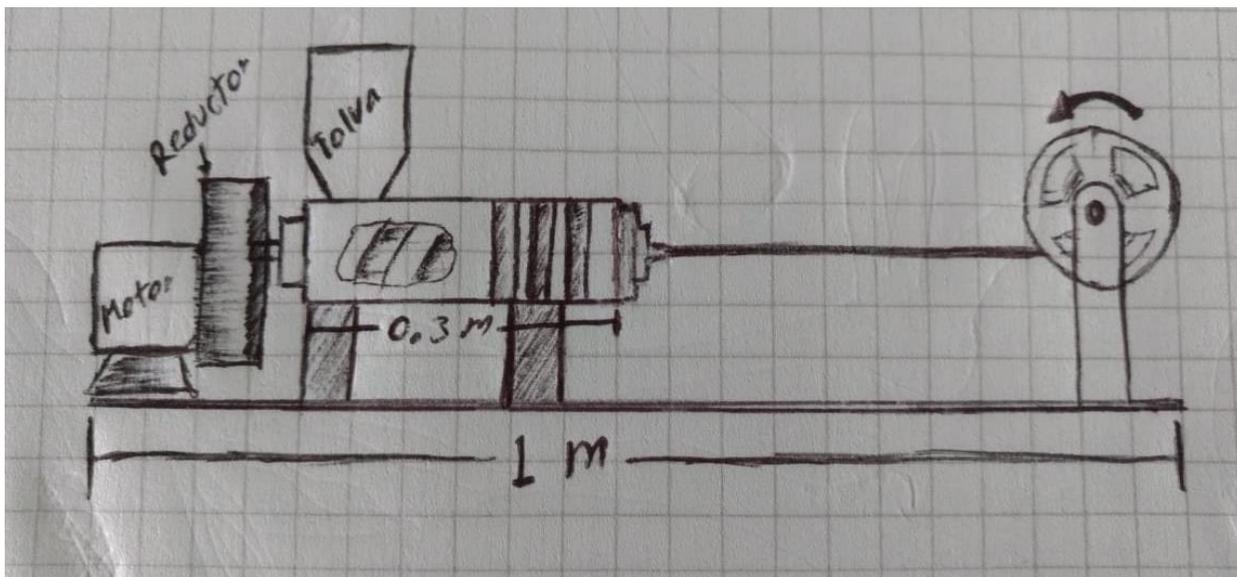


Figura 9. Dimensionar el espacio. Autor

**4.2.1.4. Consumo energético:** Para la maquina se requiere un bajo consumo energético, por lo cual se diseñó para un voltaje de 220 V a la frecuencia local de 60 Hz y de ser preferible que la conexión que llega sea trifásica para evitar pérdidas de tensión u otros problemas eléctricos de la red.

#### 4.2.2. Actividad 2: Iniciar el diseño de los elementos que conforman la máquina

**4.2.2.1. Tolva:** Para mantener las dimensiones de la maquina la tolva tendrá forma piramidal de las siguientes dimensiones alto 25 cm, un área superior de 20x20 cm y un área inferior de 1.5x2.5 cm como se muestra en la Figura 9.

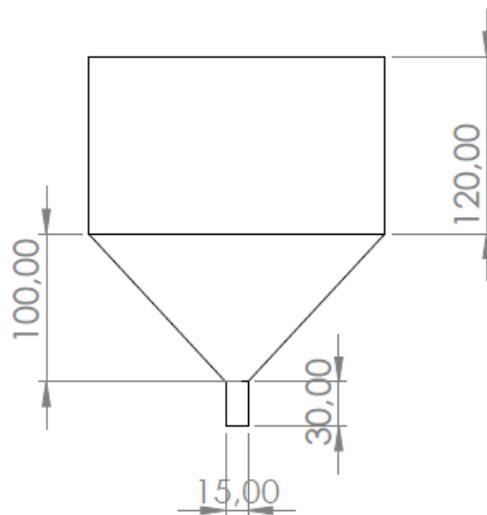


Figura 10. Tolva. Autor

**4.2.2.1.1. Volumen de la tolva:** El cálculo del volumen total se realizará con la siguiente ecuación 10

$$V_t = v_{ri} + v_{rs} + v_{pt} \quad \text{Ec. (10)}$$

Donde:  $v_{ri}$ : Volumen rectangulo inferior,  $v_{rs}$ : Volumen rectangulo superior y  $v_{pt}$ : Volumen piramide truncada

- **Volumen rectángulo inferior:** Se realizó el cálculo utilizando la Ecuación 11:

$$v_{ri} = \text{largo} \times \text{ancho} \times \text{alto} \quad \text{Ec. (11)}$$

$$v_{ri} = 2.5 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$$

$$v_{ri} = \mathbf{11.25 \text{ cm}^3}$$

- **Volumen rectángulo superior:** Se realizó el cálculo utilizando la Ecuación 12:

$$v_{rs} = \text{largo} \times \text{ancho} \times \text{alto} \quad \text{Ec. (12)}$$

$$v_{rs} = 12 \text{ cm} * 20 \text{ cm} * 20 \text{ cm}$$

$$v_{rs} = \mathbf{4,800 \text{ cm}^3}$$

- **Volumen pirámide truncada:** Se realizó el cálculo utilizando la Ecuación 13:

$$v_{pt} = \frac{h}{3} \times (b_i + b_s + \sqrt{b_s \times b_i}) \quad \text{Ec. (13)}$$

$$v_{pt} = \frac{10}{3} \times \left( (2.5 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm}) + (20 \times 20) + \sqrt{(2.5 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm}) \times (20 \times 20)} \right)$$

$$v_{pt} = \mathbf{1474.933 \text{ cm}^3}$$

- **Volumen total de la tolva:** Finalmente, reemplazamos los valores en la Ecuación 10.

$$V_t = 11.25 \text{ cm}^3 + 4800 \text{ cm}^3 + 1474.933 \text{ cm}^3$$

$$V_t = \mathbf{6286.186 \text{ cm}^3}$$

4.2.2.1.2. *Capacidad:* La capacidad de la tolva se determina con el peso de cada hojuela de ABS o PLA. Para esto se tomó un volumen promedio de las hojuelas, para obtener un valor aproximado del peso de las hojuelas. Posteriormente, se asume que una hojuela medirá 0.5 cm de largo, 0.75 cm de ancho y 0.2 mm de grueso, el cual fue calculado con la siguiente Ecuación 14.

$$\text{Volumen hojuela} = \text{Largo} \times \text{Ancho} \times \text{Alto} \quad \text{Ec. (14)}$$

$$\text{Volumen hojuela} = 0.5 \text{ cm} \times 0.75 \text{ cm} \times 0.2 \text{ cm}$$

$$\mathbf{\text{Volumen hojuela} = 0.075 \text{ cm}^3}$$

Para hallar el peso de la hojuela se necesita la densidad del material en este caso usaremos la del ABS cuyo valor es  $\rho=0.00121 \text{ kg/cm}^3$ , se reemplaza en la Ecuación 15:

$$\text{Peso hojuela ABS} = \rho \times v \quad \text{Ec. (15)}$$

$$\text{Peso hojuela ABS} = 0.00121 \text{kg/cm}^3 \times 0.075 \text{cm}^3$$

$$\text{Peso hojuela ABS} = 9.075 \times 10^{-5} \text{ kg}$$

Con estos datos se procedió a realizar el cálculo de la cantidad aproximada de hojuelas que puede albergar la tolva haciendo uso de la Ecuación 16:

$$\#hojuelas = \frac{\text{Volumen tolva}}{\text{Volumen hojuela}} \quad \text{Ec. (16)}$$

$$\#hojuelas = \frac{6286.186 \text{ cm}^3}{0.075 \text{ cm}^3}$$

$$\#hojuelas = 83815.813 \text{ hojuelas}$$

Por último, se obtiene la capacidad en kilogramos de la tolva, utilizando la Ecuación 17:

$$\text{Capacidad de la tolva} = \#hojuelas \times \text{peso hojuela ABS} \quad \text{Ec. (17)}$$

$$\text{Capacidad de la tolva} = 83815.813 \times 9.075 \times 10^{-5}$$

$$\text{Capacidad de la tolva} = 7.6 \text{ kg}$$

Como recomendación de uso la tolva no se debe llenar más del 70% es decir la capacidad nominal de la tolva es de 5.3 Kg (Barbosa Paredes, 2017).

*4.2.2.1.3. Material:* El material de fabricación de la tolva debe ser resistir el calor considerablemente alto, además debe ser lo suficientemente liso para permitir que fluyan las hojuelas del material. Para eso se seleccionó un acero inoxidable grado AISI 304 con un espesor de 2.0 mm o si se requiere disminuir costos se puede emplear una lámina con un espesor menor.

**4.2.2.2. Cabezal de Extrusión:** El cabezal de extrusión consta del plato rompedor, filtros y la matriz o dado.

**4.2.2.2.1. Plato rompedor:** El plato rompedor tiene como función mezclar el material y romper el patrón de flujo en espiral que genera el husillo. Este elemento, se ubica al final de tornillo extrusor seguido de los filtros, los cuales atrapan a impurezas que puede afectar el proceso, los filtros se sitúan de manera que la malla gruesa esté más cerca al plato rompedor (Mena, 2018).

La selección de plato rompedor se realiza en base al catálogo virtual SFR tooling, para lo cual solo se requiere el diámetro interno de la camisa, como se muestra en la siguiente Tabla 4:

Tabla 4  
*Tabla selección plato rompedor*

<b>Diámetro del barril Pulgadas</b>	<b>Diámetro del barril mm</b>	<b>Área abierta de la placa estándar Pulgadas<sup>2</sup></b>	<b>Área abierta de la placa estándar % Pulgadas<sup>2</sup></b>	<b>Área abierta de la placa invertida pulgadas<sup>2</sup></b>	<b>Área abierta de la placa invertida % pulgadas<sup>2</sup></b>
<b>3/4"</b>	20	0.13	30	-	-
<b>1"</b>	25	0.36	46	0.13	17
<b>1-1/2"</b>	40	0.71	40	0.36	21
<b>2"</b>	50	1.17	37	0.71	23
<b>2-1/2"</b>	60	1.78	36	1.17	24
<b>3"</b>	75	2.55	36	1.78	25
<b>3-1/2"</b>	90	3.43	36	2.55	27
<b>4"</b>	100	4.47	36	3.43	27
<b>4-1/2"</b>	115	5.62	35	4.47	28
<b>6"</b>	150	9.76	35	8.26	29
<b>8"</b>	200	17.16	34	15.09	30

Nota: Modificado de (Sfrtooling, 2019)

A partir de la tabla anterior tenemos que el área abierta del plato es de  $0.13 \text{ pulg}^2 = 83.87 \text{ mm}^2$ , además el catalogo proporciona un esquema para identificar la distribución de agujeros que lleva el plato, así como se muestra en la Figura 10.

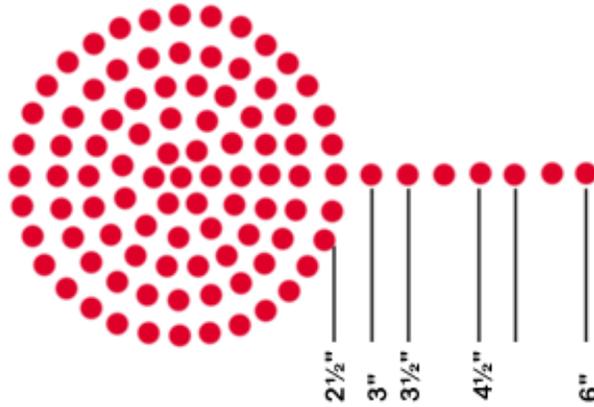


Figura 11. Distribución de agujeros plato rompedor. (Sfrtooling, 2019)

Como se conoce el diámetro interno del cilindro, para este caso se tiene que la placa tendrá 7 perforaciones y se procede a determinar el diámetro de cada una de las perforaciones utilizando la Ecuación 18 y 19.

$$\text{Área por perforacion} = \frac{\text{Área abierta}}{\# \text{ Perforaciones}} \quad \text{Ec. (18)}$$

$$\text{Área por perforacion} = \frac{83.87 \text{ mm}^2}{7}$$

$$\text{Área por perforacion} = 11.98 \text{ mm}^2$$

$$\text{Diametro de perforacion} = \sqrt{\frac{4 \times \text{Área perforacion}}{\pi}} \quad \text{Ec. (19)}$$

$$\text{Diámetro de perforación} = \sqrt{\frac{4 \times 11.98 \text{ mm}^2}{\pi}}$$

$$\text{Diámetro de perforación} = 3.9 \text{ mm} \cong 4 \text{ mm}$$

Para la selección de la malla o filtro que como se mencionó anteriormente se encarga de retener las impurezas no deseadas en el material a extruir. Para la selección de la malla se utilizó la Tabla 5 de especificaciones de mallas de acero inoxidable de la empresa ambicagroup.

**Tabla 5**  
*Especificación de mallas*

MALLA	DIAMETRO ALAMBRE mm	TAMAÑO DE APERTURA mm	AREA ABIERTA %
4X4	1.219	5.131	65.3
5X5	0.914	4.166	67.2
6X6	0.914	3.319	61.5
8X8	0.711	2.464	60.2
10X10	0.711	1.829	51.8
12X12	0.559	1.558	54.1
14X14	0.457	1.357	55.9
16X16	0.457	1.131	50.7
20X20	0.559	0.711	31.4
20X20	0.457	0.813	41.0
24X24	0.376	0.682	41.4
30X30	0.376	0.531	34.2
30X30	0.310	0.536	40.0
40X40	0.274	0.361	32.3
40X40	0.234	0.401	39.9
50X50	0.193	0.335	43.6
60X60	0.193	0.230	29.8
60X60	0.152	0.271	41.2
80X80	0.122	0.196	37.9
100X100	0.102	0.152	36.0
120X120	0.091	0.120	31.8
150X150	0.071	0.088	29.6
200X200	0.051	0.076	36.0
250X250	0.041	0.061	36.0
300X300	0.041	0.043	26.5
325X325	0.035	0.043	30.0
400X400	0.030	0.033	27.0
500X500	0.025	0.026	26.0

**Nota:** Tomado de (Group, 2010)

Para este caso se seleccionaron las mallas de denominación 60x60, 80x80 y 120x120. Para su instalación se procede en el orden de 60/80/120, para la verificación de cambio se debe tener en cuenta un límite de presión del 25% superior a la presión de trabajo normal, cuando esto ocurra, se debe realizar el desmontaje del filtro y limpieza o de ser necesario cambiarlo.

4.2.2.2.2. *Matriz de Extrusión:* La matriz de extrusión será un elemento intercambiable en la maquina en este caso se diseñó una matriz para extruir filamento de 1.75 mm y otro para 3 mm, se debe revisar el índice de contracción del material a extruir debido a que este influye en el diámetro final del perfil a extruir.

**Tabla 6**  
*Porcentaje de contracción*

Material	Contracción %	Material	Contracción %
ABS	0.4 – 0.7	PES	0.6 – 0.8
CA	0.3 – 0.7	PET	1.8 – 2.1
CAB	0.2 – 0.5	PMMA	0.2 – 1.0
CP	0.2 – 0.5	POM	2.0 – 3.5
EVA	0.7 – 2.0	PLA	0.3 – 1.1
FEP	3.0 – 6.0	PPO	0.5 – 0.7
GPPS	0.2 – 0.8	PSU	0.6 – 0.8
HDPE	1.5 – 4.0	PTFE	5.0 – 0.9
HIPS	0.2 – 0.8	PVDF	2.0 – 3.0
LDPE	1.5 – 4.0	SAN	0.2 – 0.6
PA6	1.0 – 1.5	PP/EPDM	1.0 – 2.0
PA66	1.0 – 2.0	PUR/TRU	0.5 – 2.0
PBT	1.5- 2.0	SBS	0.4 – 1.0
PC	0.6 – 0.8	SEBS	1.0 – 5.5
MF	0.6 – 1.0	DMC	0.5 – 0.2

Nota: Tomado de (Mexpolímeros, 2019)

- Geometría de la boquilla

La geometría interna tiene una parte cónica que se encarga de reducir el diámetro del cilindro al diámetro que se quiere obtener en la pieza extruida. Para la parte exterior se requiere conocer el material de fabricación y así calcular el espesor mínimo de pared. La boquilla será

fabricada con latón 360, debido a que es un material fácil de maquinar y también posee buena conductividad térmica. El material tiene un esfuerzo admisible de 310 MPa.

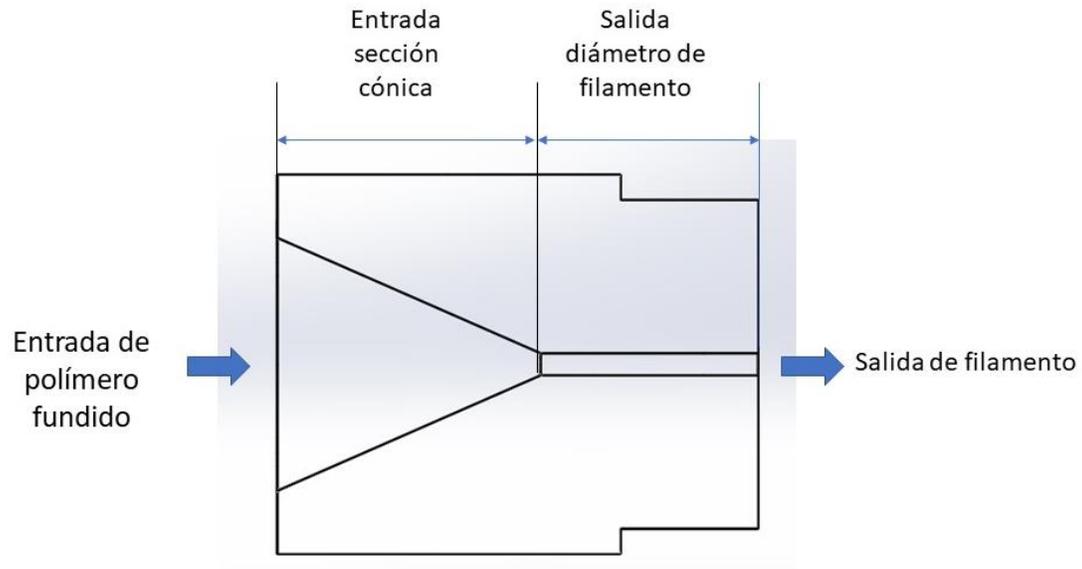


Figura 12. Modelo de la boquilla. Autor

Espesor mínimo de pared de la boquilla se toma con el diámetro mayor de la parte cónica, debido a que por el modelo de boquilla es la parte con menos material, utilizando la siguiente Ecuación 20:

$$e_{\min} = \frac{P \times r}{\sigma_{\text{adm}}} \quad \text{Ec. (20)}$$

Dónde:  $P$ : Presión de operación [MPa],  $r$ : Radio interior mayor de la boquilla [mm] y  $\sigma_{\text{adm}}$ : Esfuerzo admisible del material [MPa]. Obteniendo el siguiente valor para el espesor mínimo de pared:

$$e_{\min} = \frac{106.43 \times 10}{310}$$

$$e_{\min} = \mathbf{3.43 \text{ [mm]}}$$

Se define así un espesor de 5 mm con lo cual se tiene un factor de seguridad de 1.45.

Quedando las medidas de la boquilla:

Tabla 7

Medidas de la boquilla

Medidas de boquilla	
Diámetro interno de entrada	20 mm
Diámetro interno de salida	1.75 - 3 mm
Diámetro exterior	30 mm
Largo sección cónica	20 mm
Largo sección salida	15 mm

Nota: Autor

### 4.2.2.3. Diseño Del Husillo Y Cilindro De Extrusión

4.2.2.3.1. *Husillo*: El husillo es la pieza fundamental de la maquina extrusora, de este depende la producción, la aplicación de la extrusora, la velocidad de giro, diseño del cabezal de extrusión, entre otras.

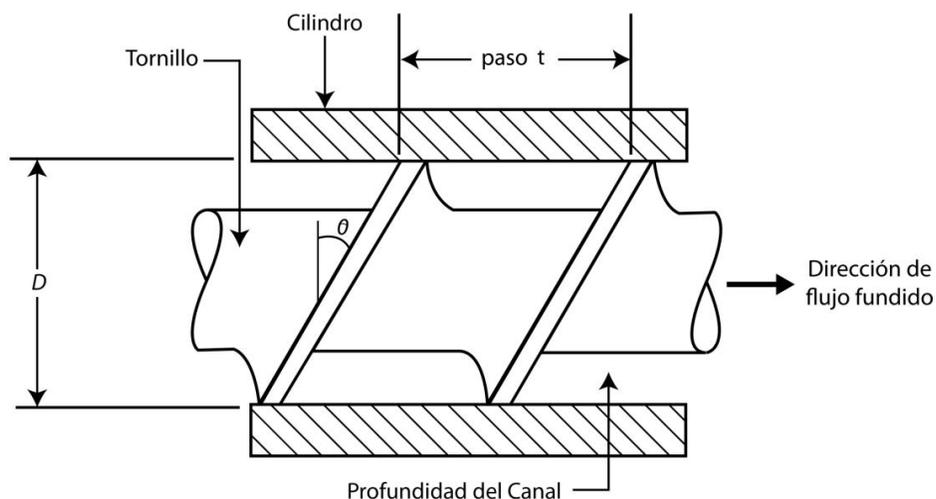


Figura 13. Partes Husillo. (Brito Barra, 2017)

La elección de los parámetros del husillo depende de los materiales a trabajar (ABS y PLA). Con lo anterior, se escogió un tornillo para uso general; es decir, que permita trabajar ambos materiales sin perder eficiencia, para ello se definen tres zonas en el husillo (alimentación,

compresión y dosificación) y contara con un (1) solo canal, con paso constante y profundidad variable para cada zona.

La relación del largo y el diámetro del husillo es de gran importancia. Cuando se aumenta la longitud del husillo, mejora el efecto del calor sobre el material, la velocidad de giro y la producción. Una relación típica ( $L/D$ ) para la extrusión de polímeros termoplásticos varía entre 20:1 y 30:1. Los husillos largos tienen amplio uso para la fabricación de películas, fibras, entre otros. Para la fabricación de perfiles continuos, se recomiendan los husillos cortos (Brito Barra, 2017).

Para la extrusión de cables, se requiere una presión de extrusión mayor, entonces el grado de compresión utilizado debe ser bajo y se recomienda una profundidad menor en el canal helicoidal en la zona de dosificación cuando se fabrican filamentos. Teniendo en cuenta lo anterior, se elige un grado de compresión de 2, con esto se tiene una profundidad pequeña en la zona de dosificación y una profundidad mayor en la zona de alimentación obteniendo así un gradiente de presión, lo cual es ideal para la fabricación de filamentos (Brito Barra, 2017).

Los parámetros seleccionados para el husillo están basados en las medidas finales de la máquina y se mantienen los parámetros anteriormente mencionados. Por lo tanto se establecieron los siguientes parámetros para la máquina:

- Largo total del husillo:  $L_t = 400$  mm
- Largo del husillo (de trabajo):  $L = 340$  mm
- Largo del vástago del husillo:  $l_e = 60$  mm
- Diámetro del husillo:  $D = 20$  mm
- Relación  $L/D$ :  $LD = 17$
- Numero de Filetes:  $N^\circ \text{ Filetes} = LD = 17$

- Grado Compresión:  $i = 2$

Siguiendo con la descripción de parámetros se tienen que realizar algunos cálculos adicionales como:

- **Paso del husillo:** Como el husillo es de un solo canal el paso es igual al diámetro, empleando la Ecuación 21 se obtuvo el siguiente valor:

$$t = (0.8 - 1.2) \times D \quad \text{Ec. (21)}$$

$$t = 1 \times 20 \approx 20 \text{ mm}$$

- **Ancho de filete:** Se calculó utilizando la siguiente Ecuación 22:

$$e = (0.06 - 0.1) \times D \quad \text{Ec. (22)}$$

$$e = 0.1 \times 20 = 2 \text{ mm}$$

- **Profundidad del Canal Zona alimentación:** Se calculó utilizando la siguiente Ecuación 23:

$$h1 = (0.15 - 0.2) \times D \quad \text{Ec. (23)}$$

$$h1 = 0.2 \times 20 \approx 4 \text{ mm}$$

- **Profundidad del Canal Zona de dosificación o medición:** Se calculó utilizando la siguiente Ecuación 24:

$$h3 = \frac{h1}{i} \quad \text{Ec. (24)}$$

$$h3 = \frac{4}{2} = 2 \text{ mm}$$

- **Diámetro del alma:** Se calculó utilizando la siguiente Ecuación 25:

$$d = 0.6 \times D \quad \text{Ec. (25)}$$

$$d = 12 \text{ mm}$$

- **Ángulo de Hélice:** Se calculó utilizando la siguiente Ecuación 26:

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{t}{\pi \times D}\right) \quad \text{Ec. (26)}$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{20}{\pi \times 20}\right) = 17.65^\circ$$

La longitud de las zonas del husillo dependen del material a trabajar, también se cuenta con parámetros o rangos para el caso de extrusoras universales (Brito Barra, 2017).

- **Longitud zona de alimentación:** Se calculó utilizando la siguiente Ecuación 27:

$$L_a = 8 \times D \quad \text{Ec. (27)}$$

$$L_a = 7 \times 20 = 140 \text{ mm}$$

- **Longitud zona de compresión:** Se calculó utilizando la siguiente Ecuación 28:

$$L_c = 7 \times D \quad \text{Ec. (28)}$$

$$L_c = 6 \times 20 = 120 \text{ mm}$$

- **Longitud zona de dosificación:** Se calculó utilizando la siguiente Ecuación 29:

$$L_c = 5 \times D \quad \text{Ec. (29)}$$

$$L_c = 4 \times 20 = 80 \text{ mm}$$

- **Holgura del husillo y el cilindro:** La holgura es de gran importancia para el buen desempeño de la maquina extrusora, la holgura corresponde a la medida entre la cresta del filete del husillo y la superficie interior del cilindro. Cuando se tiene una holgura grande el material se mezcla con mayor efectividad, pero afecta el avance por el flujo inverso del material. Generalmente se emplea una holgura de  $0.002 \times D$  para los husillos de diámetros grandes y de  $0.005 \times D$  para los husillos de diámetros pequeños. De acuerdo a lo anterior se asume lo siguiente empleando la Ecuación 30.

$$\delta = 0.005 \times D \quad \text{Ec. (30)}$$

$$\delta = 0.005 \times 20 = 0.1 \text{ mm}$$

4.2.2.3.1.1. *Producción*: La producción se expresa como el flujo volumétrico (Q), este flujo resulta de tres flujos diferentes. El flujo de arrastre ( $\alpha$ ), es el provocado por el giro del husillo. El flujo de presión ( $\beta$ ), es el que se opone al flujo en el sistema y el flujo de filtración ( $\gamma$ ), el cual reduce la producción por pérdidas de material entre las holguras del husillo-cilindro. Por lo tanto, la producción en la zona de dosificación es equivalente a la producción total del husillo (Barbosa Paredes, 2017).

El flujo volumétrico se calcula con la Ecuación 31.

$$Q = \left( \frac{\alpha * K}{k + \beta + \gamma} \right) \eta \times \rho \quad \text{Ec. (31)}$$

Donde:  $\alpha$ : Volumen unitario del Flujo de arrastre [ $\text{mm}^3$ ],  $\beta$ : Volumen unitario del Flujo de presión [ $\text{mm}^3$ ],  $\gamma$ : Volumen unitario del Flujo de filtración [ $\text{mm}^3$ ],  $K$ : Constante total de la forma geométrica del cabezal [ $\text{mm}^3$ ],  $\eta$ : RPM del husillo [rev/min] y  $\rho$ : Densidad del material [ $\text{Kg}/\text{mm}^3$ ].

- Volumen unitario de flujo volumétrico de arrastre

Este flujo es el generado por el trabajo del husillo; por lo tanto, es el de mayor valor. Su cálculo se realiza empleando la Ecuación 32.

$$\alpha = \frac{\pi \times m \times D \times h_1 \times (tm - e) \times \cos^2\varphi}{2} \text{ [mm}^3\text{]} \quad \text{Ec. (32)}$$

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

Teniendo en cuenta lo anterior, se procedió a realizar el cálculo del volumen unitario de flujo volumétrico de arrastre, teniendo en cuenta la anterior Ecuación 32.

$$\alpha = \frac{\pi \times 1 \times 20 \times 4 \times \left(\frac{20}{1} - 2\right) \times \cos^2(17.65)}{2}$$

$$\alpha = 2054.003 \text{ mm}^3$$

- **Volumen unitario del flujo de presión**

El flujo de presión se genera en la punta del husillo cuando se reduce el diámetro en la boquilla, este flujo se opone al flujo de arrastre. Se calcula utilizando a Ecuación 33.

$$\beta = \frac{m \times h_1^3 \times \left(\frac{t}{m} - e\right) \times \sin \varphi \times \cos 2\varphi}{12 \times L} \text{ [mm}^3\text{]} \quad \text{Ec. (33)}$$

Dónde: **L**: Longitud del husillo [mm]

Obteniendo el siguiente valor:

$$\beta = \frac{1 \times 4^3 \times \left(\frac{20}{1} - 2\right) \times \sin (17.65) \times \cos^2(17.65)}{12 \times 340}$$

$$\beta = 0.07774 \text{ mm}^3$$

- **Volumen unitario del flujo de filtración**

El flujo de filtración reduce la producción de la máquina, se produce en la holgura del husillo con el cilindro. Se calcula utilizando la Ecuación 34.

$$\gamma = \frac{\pi^2 \times D^2 \times \delta^3 \times \tan \varphi}{10 \times e \times L} \text{ [mm}^3\text{]} \quad \text{Ec. (34)}$$

Dónde: **δ**: Holgura del husillo/cilindro [mm]

Obteniendo el siguiente valor:

$$\gamma = \frac{\pi^2 \times 20^2 \times 0.1^3 \times \tan (17.65)}{10 \times 2 \times 340}$$

$$\gamma = 1.847238 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$$

- **Constante total de la forma geométrica del cabezal**

La constante K o coeficiente de forma geométrica del cabezal se determina dividiendo en sucesivas zonas de diferente configuración, estableciendo para cada una de estas zonas la constante K. Las geometrías del cabezal usado para este caso constaran de un plato rompedor, un canal cónico en la entrada del cabezal y un canal cilíndrico en la boquilla, para dar forma al material extruido. Además, se desarrollará esta fórmula para cada diámetro de boquilla (1.75 y 3 [mm]).

- **Malla o Plato Rompedor:** Para realizar este cálculo, se utilizó la siguiente

Ecuación 35:

$$K_1 = \frac{\pi \times n \times d_o}{128 \times L} \quad \text{Ec. (35)}$$

Donde: **do**: Diámetro de los agujeros plato rompedor [mm], **n**: Numero de agujeros plato rompedor y **L**: Espesor del plato rompedor [mm].

Obteniendo el siguiente valor:

$$K_1 = \frac{\pi \times 7 \times 4}{128 \times 15}$$

$$K_1 = 0.04581$$

- **Canal Cónico:** Para realizar este cálculo, se utilizó la siguiente Ecuación 36:

$$K_1 = \frac{3 \times \pi \times d_o^3 \times d_1^3}{128 \times L_{\text{canal}} \times [(d_o^2 + d_1^2) \times (d_o + d_1)]} \quad \text{Ec. (36)}$$

Donde: **do**: Diámetro de entrada del material en un canal cónico [mm] y **d1**: Diámetro de salida del material en un canal cónico [mm]. Para el primer caso, **do**=20 [mm] y **d1**=1.75 [mm], obteniendo el siguiente valor:

$$K_1 = \frac{3 \times \pi \times 20^3 \times 1.75^3}{128 \times 20 \times [(20^2 + 1.75^2) \times (20 + 1.75)]}$$

$$\mathbf{K1 = 0.0781 \text{ mm}^3}$$

Para el segundo caso,  $d_o=20 \text{ [mm]}$  y  $d_1=3 \text{ [mm]}$ , obteniendo el siguiente valor:

$$\mathbf{K1 = \frac{3 \times \pi \times 20^3 \times 3^3}{128 \times 20 \times [(20^2 + 20) \times (3 + 3^2)]}}$$

$$\mathbf{K1 = 0.1578 \text{ mm}^3}$$

- **Canal cilíndrica:** Para realizar este cálculo, se utilizó la siguiente Ecuación

37:

$$\mathbf{K2 = \frac{\pi \times d^4}{128 \times L_{\text{canal}}}} \quad \text{Ec. (37)}$$

Donde: **d**: Diámetro del canal cilíndrico [mm].

Obteniendo el siguiente valor para el Primer caso, d: 1.75 [mm]:

$$\mathbf{K2 = \frac{\pi \times 1.75^4}{128 \times 35}}$$

$$\mathbf{K2 = 0.0066 \text{ mm}^3}$$

Para el Segundo caso, d: 3 [mm], obteniendo el siguiente valor:

$$\mathbf{K2 = \frac{\pi \times 3^4}{128 \times 35}}$$

$$\mathbf{K2 = 0.0568 \text{ mm}^3}$$

Par determinar la constante se debe sumar como resistencias en paralelo utilizamos la

Ecuación 38:

$$\mathbf{K = \frac{1}{\Sigma \frac{1}{K_1} + \Sigma \frac{1}{K_2} + \dots + \Sigma \frac{1}{K_i}}} \quad \text{Ec. (38)}$$

Obtenemos el siguiente valor para el Primer Caso d=1.75 mm:

$$\mathbf{K = \frac{1}{\frac{1}{6.5769 \times 10^{-3}} + \frac{1}{0.0781} + \frac{1}{0.04581}}}$$

$$\mathbf{K = 5.3567 \times 10^{-3}}$$

Para el Segundo caso d=3 mm, obtenemos el siguiente valor:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{0.0568} + \frac{1}{0.1578} + \frac{1}{0.04581}}$$

$$K = 0.02185$$

Tomando en cuenta los resultados de las operaciones anteriores se puede calcular la producción; por lo cual se tomarán varias velocidades para encontrar la que mejor se ajuste a los dos materiales y a las diferentes boquillas. Los resultados se muestran en las siguientes Tablas 8 y 9:

**Tabla 8**

*Flujo volumétrico de PLA con boquilla de 1.75 mm*

<b>Boquilla 1.75 [mm] para PLA</b>		
<b>RPM</b>	<b>Flujo volumétrico</b>	<b>Unidades</b>
<b>10</b>	0.103841942	
<b>20</b>	0.207683884	
<b>30</b>	0.311525826	
<b>40</b>	0.415367768	
<b>50</b>	0.51920971	
<b>60</b>	0.623051652	Kg/h
<b>70</b>	0.726893594	
<b>80</b>	0.830735537	
<b>90</b>	0.934577479	
<b>100</b>	1.038419421	

Nota: Autor

**Tabla 9**

*Flujo volumétrico de ABS con boquilla de 1.75 mm*

<b>Boquilla 1.75 [mm] para ABS</b>		
<b>RPM</b>	<b>Flujo volumétrico</b>	<b>Unidades</b>
<b>10</b>	0.083232091	
<b>20</b>	0.166464182	
<b>30</b>	0.249696273	
<b>40</b>	0.332928364	
<b>50</b>	0.416160455	
<b>60</b>	0.499392546	Kg/h
<b>70</b>	0.582624637	
<b>80</b>	0.665856728	
<b>90</b>	0.749088819	
<b>100</b>	0.83232091	

Nota: Autor

Tabla 10

*Flujo volumétrico de PLA con boquilla de 3 mm*

<b>Boquilla 3 [mm] para PLA</b>		
<b>RPM</b>	<b>Flujo volumétrico</b>	<b>Unidades</b>
<b>10</b>	0.353552999	
<b>20</b>	0.707105999	
<b>30</b>	1.060658998	
<b>40</b>	1.414211997	
<b>50</b>	1.767764996	
<b>60</b>	2.121317996	Kg/h
<b>70</b>	2.474870995	
<b>80</b>	2.828423994	
<b>90</b>	3.181976993	
<b>100</b>	3.535529993	

Nota: autor

Tabla 11

*Flujo volumétrico de ABS con boquilla de 3 mm*

<b>Boquilla 3 [mm] para ABS</b>		
<b>RPM</b>	<b>Flujo volumétrico</b>	<b>Unidades</b>
<b>10</b>	0.283382175	
<b>20</b>	0.566764350	
<b>30</b>	0.850146525	
<b>40</b>	1.133528700	
<b>50</b>	1.416910875	Kg/h
<b>60</b>	1.700293050	
<b>70</b>	1.983675225	
<b>80</b>	2.267057400	
<b>90</b>	2.550439575	
<b>100</b>	2.833821750	

Nota: Autor

Como se observa en las Tablas anteriores el menor flujo se ve en la Tabla 8 correspondiente al flujo de material ABS con una boquilla de 1.75, para el análisis del comportamiento se realizó la iteración desde 10 rpm hasta el 100 rpm cuyo comportamiento se muestra en la Figura 13.

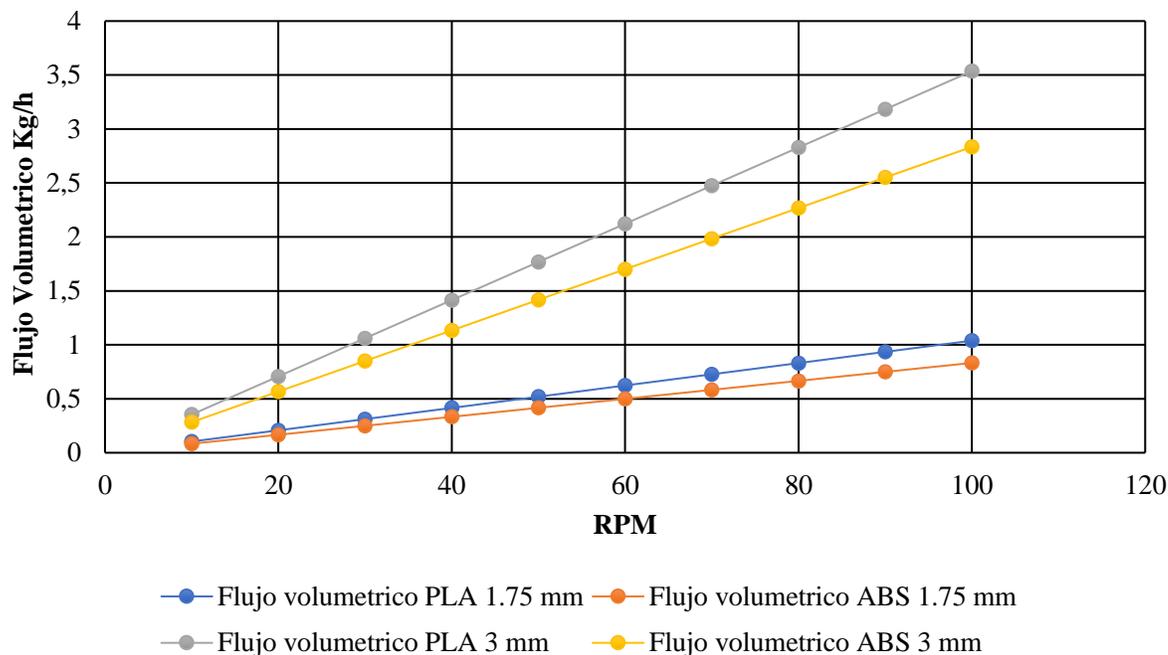


Figura 14. Pendiente de crecimiento de flujo en las boquillas. Autor

4.2.2.3.1.2. *Viscosidad efectiva*: La viscosidad efectiva es determinada en función de la velocidad de cortadura por medio de diagramas, los cuales son preparados para diferentes materiales, en función de la temperatura de trabajo, debido a que la viscosidad de los termoplásticos depende de este factor y del peso molecular, que va decreciendo al calentar el material y al disminuir su peso molecular. La velocidad de cortadura dependerá de la forma geométrica del canal del husillo (Paredes, 2017).

La velocidad se definió utilizando la Ecuación 39:

$$\gamma = \frac{\pi \times D \times N}{h} \quad \text{Ec. (39)}$$

Dónde:  $D$ : Diámetro del husillo [mm],  $N$ : Velocidad del husillo [rev/s] y  $h$ : Distancia entre el filete del husillo y el barril [mm], obteniendo el siguiente resultado:

$$\gamma = \frac{\pi \times 20 \times 1.33}{0.1}$$

$$\gamma = 836 \left[ \frac{1}{s} \right]$$

De acuerdo a la velocidad de cortadura, se necesita obtener la viscosidad efectiva de cada material a trabajar (ABS y PLA). Para lo cual, se usará la viscosidad efectiva de mayor magnitud para obtener la presión máxima de trabajo que puede obtener la extrusora. Para el caso del PLA, la temperatura de trabajo será de 160 a 230 °C, por lo que la viscosidad efectiva se evaluará en el promedio de la temperatura de trabajo, aproximadamente a 190 °C como se muestra en la Tabla 12 (Brito Barra, 2017).

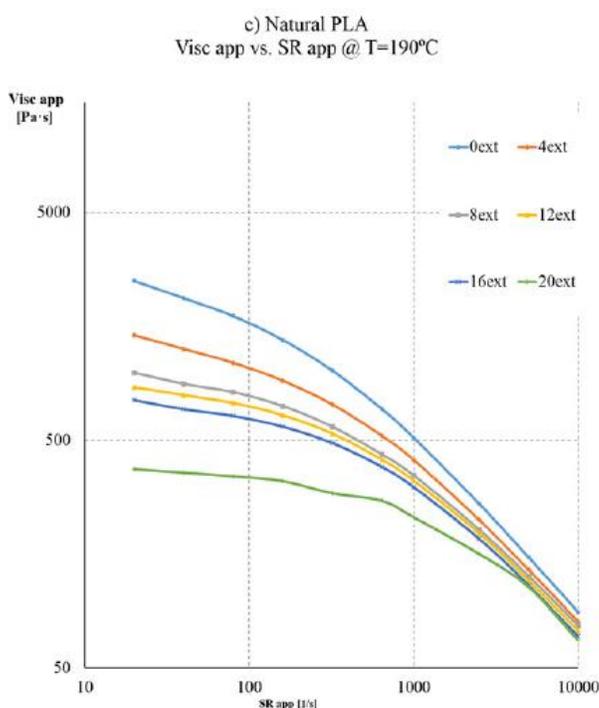


Figura 15. Grafico de viscosidad aparente de PLA en 190 °C. (Peinado, Castell, García, & Fernández, 2015)

Tabla 12

Viscosidad efectiva del PLA

Viscosidad Efectiva PLA a 190 [°C]	
Velocidad Cortadura [1/s]	Viscosidad Efectiva [Pas]
836	1200

Nota: Autor

En el caso del ABS, la temperatura de trabajo será de 215 a 250 [°C], por lo que la viscosidad efectiva se evaluará en el promedio de la temperatura de trabajo, aproximadamente a 230 [°C], como se muestra en la Figura 15 y Tabla 12.

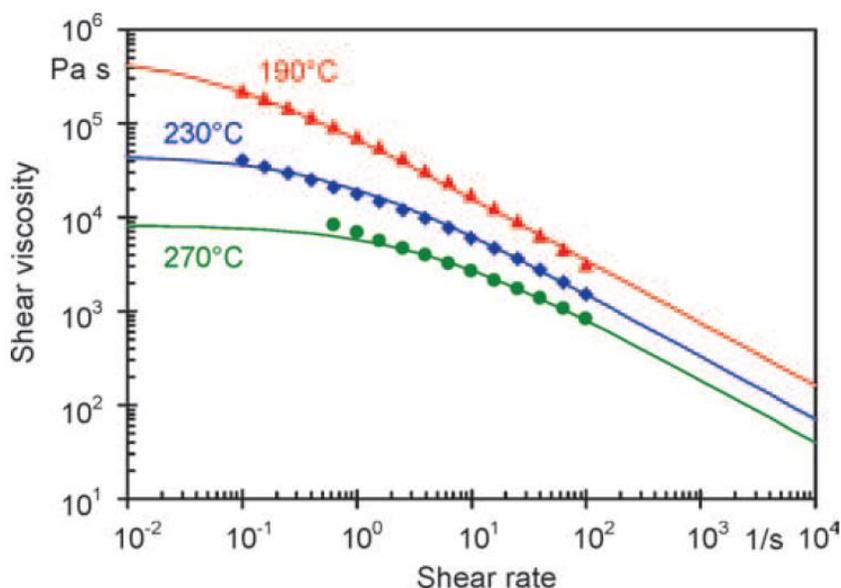


Figura 16. Viscosidad aparente del ABS 190,230 y 270 °C. (Altinkaynak, Gupta, Spalding, & Crabtree, 2011)

Tabla 13

Viscosidad efectiva del ABS

Viscosidad Efectiva ABS a 230 [°C]	
Velocidad Cortadura [1/s]	Viscosidad Efectiva [Pas]
836	400

Nota: Autor

4.2.2.3.1.3. *Presiones en la máquina extrusora:* En las máquinas de extrusión la presión se concentra en la parte delantera del husillo cumpliendo un papel importante en el proceso y en el acabado del material; también, porque de la misma se derivan diferentes cálculos para el diseño de la máquina.

- **Presión Máxima en el husillo**

La presión máxima en el husillo se genera cuando no se registra movimiento de caudal en el interior del cilindro, por lo cual la masa está en modo estático y no existe flujo de arrastre, se calculó utilizando la siguiente Ecuación 40:

$$P_{MAX} = \frac{6 \times \pi \times D \times L \times \eta \times \mu}{h^2 \times \tan \varphi} \quad \text{Ec. (40)}$$

Dónde:  $D$ : Diámetro del husillo [m],  $L$ : Largo del husillo [m],  $\eta$ : Revoluciones del husillo [rev/s],  $\mu$ : Viscosidad efectiva [Pas],  $h$ : Profundidad del canal en la zona de dosificación [m] y  $\varphi$ : Ángulo de la Hélice [°], posteriormente, se calculó el valor de la presión máxima del husillo utilizando:

$$P_{MAX} = \frac{6 \times \pi \times 0.02 \times 0.34 \times 1.5 \times 1200}{(0.002)^2 \times \tan 17.65}$$

$$P_{MAX} = 181.3 \text{ MPa}$$

- **Presión de operación en la boquilla**

La presión de operación es la presión que se registra en el correcto funcionamiento de la máquina, es la presión a la cual trabajara la máquina. Se calcula usando la Ecuación 41.

$$P_{OP} = \frac{2 \times \pi \times \mu \times D^2 \times \eta \times h \times \sin \varphi \times \cos \varphi}{\left(\frac{R^4}{2 \times L_{boquilla}}\right) + \left(\frac{D \times h^3 \times \sin^2 \varphi}{2 \times L_p}\right)} \quad \text{Ec. (41)}$$

**Dónde:**  $D$ : Diámetro del husillo [m],  $\eta$ : Revoluciones del husillo [rev/s],  $\mu$ : Viscosidad efectiva [Pas],  $h$ : Profundidad del canal en la zona de dosificación [m],  $\varphi$ : Ángulo de la Hélice [°],  $R$ : Radio del dado [m],  $L_{boquilla}$ : Longitud Cilíndrica de la boquilla [m] y  $L_p$ : Longitud de trabajo propia [m], obteniendo el siguiente resultado:

$$POP = \frac{2 \times \pi \times 1200 \times 0.02^2 \times 1.5 \times 0.002 \times \sin 17.65 \times \cos 17.65}{\left(\frac{0.000875^4}{2 \times 0.01}\right) + \left(\frac{0.02 \times 0.002^3 \times \sin^2 17.65}{2 \times 0.34}\right)}$$

$$POP = 106.43 \text{ Mpa}$$

4.2.2.3.1.4. *Potencia Requerida*: La potencia de trabajo del husillo debe ser necesaria para girar el husillo a las Rpm requeridas para extrusión del material. Esta depende de la potencia necesaria para desplazar el material y la energía consumida por la holgura del cilindro, así como lo expresa (Brito Barra, 2017) en la Ecuación 42.

$$N = \left(\frac{\pi^3 \times D^3 \times \eta^2}{h_1}\right) \times L \times \mu + \frac{(\alpha \times \Delta P)}{\cos^2(\varphi)} + \left(\frac{\pi^3 \times D^3 \times \eta^2 \times e}{\delta \times \tan(\varphi)}\right) \times L \times \mu, [W] \quad \text{Ec. (42)}$$

Dónde:  $\eta$ : Revoluciones del husillo [rev/s],  $D$ : Diámetro del husillo [m],  $L$ : Longitud del husillo [m],  $\mu$ : Viscosidad efectiva del material [Pas],  $h_1$ : Profundidad del canal en la zona de alimentación [m],  $\alpha$ : Volumen unitario del Flujo de arrastre [m<sup>3</sup>],  $\Delta P$ : Diferencia de presiones en el husillo [Pa],  $\varphi$ : Ángulo de la Hélice [°],  $e$ : Ancho del filete [m] y  $\delta$ : Holgura del husillo/cilindro [m], obteniendo el siguiente resultado:

$$N = \left(\frac{\pi^3 \times 0.02^3 \times 1.5^2}{0.004}\right) \times 0.34 \times 1200 + \frac{(2054 \times 10^{-9} \times (80590000))}{\cos^2(17.65)} + \left(\frac{\pi^3 \times 0.02 \times 1.5^2 \times 0.002}{0.0001 \times \tan(17.65)}\right) \times 0.34 \times 1200$$

$$N = 253.53 \text{ [Watt]} \cong 0.34 \text{ [hp]}$$

4.2.2.3.1.5. *Selección Material*: Para continuar con el diseño del husillo se eligió un material para el husillo, el cual debe cumplir con ciertas características tales como alta dureza para minimizar el desgaste y resistencia a la corrosión, para evitar el deterioro en ambientes

húmedos. También se tuvo en cuenta las temperaturas de trabajo, la disponibilidad y maquinabilidad del material, condiciones de operación y la resistencia a la torsión.

Luego de analizar diferentes opciones, se seleccionó el acero AISI 4140; teniendo en cuenta que presenta una serie de ventajas respecto a las condiciones anteriores, esto debido a su composición química de Cromo y Molibdeno la cual le confiere al material una alta dureza, alta resistencia a la corrosión a temperaturas de más de 540 °C (1000°F) sin perder cualidades y una alta maquinabilidad. Además se le puede aplicar un nitrurado para mejorar sus propiedades (Ortiz Abata, 2018).

4.2.2.3.1.6. *Fuerzas en el husillo:* Para el cálculo de las fuerzas se apoyará del diagrama de cuerpo libre del husillo

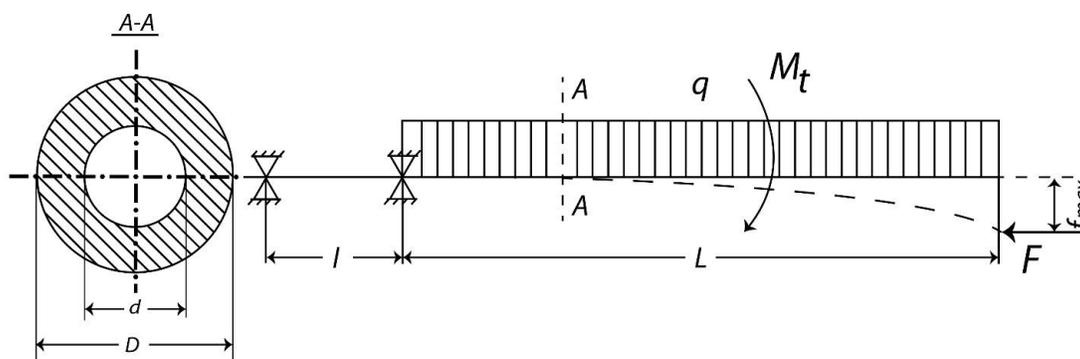


Figura 17. DCL husillo. (Brito Barra, 2017)

Como paso inicial se calcula el torque o momento torsor, utilizando la Ecuación 43.

$$T = 9550 \times \frac{N}{\eta} \quad \text{Ec. (43)}$$

Donde:  $N$ : Potencia del Motor [Kw] y  $\eta$ : Revoluciones del husillo [RPM], obteniendo el siguiente resultado:

$$T = 9550 \times \frac{0.25353}{90}$$

$$\mathbf{T = 26.9 \text{ Nm}}$$

El paso siguiente en el proceso fue el cálculo de la fuerza axial que soporta el husillo, para lo cual se debe tener en cuenta la sección transversal del husillo y la presión máxima, esto calcula empleando la Ecuación 44.

$$F = S \times p \quad \text{Ec. (44)}$$

Donde: **S**: Sección transversal del husillo [m<sup>2</sup>] y **p**: Presión en la parte delantera del husillo [N/m<sup>2</sup>].

La sección transversal se calcula de la siguiente manera empleando la Ecuación 45:

$$S = \pi \times \frac{D^2(1 - u^2)}{4} \quad \text{Ec. (45)}$$

Dónde: *u*: relación entre los diámetros del husillo, obteniendo los siguientes resultados:

$$u = \frac{d}{D} = \frac{14}{20} = 0.7$$

$$S = \pi * \frac{0.02^2(1 - 0.7^2)}{4} = 0.00016022 \text{ m}^2$$

$$F = 0.00016022 * 181300000$$

$$\mathbf{F = 29.05 KN}$$

A continuación, se debe realizar el cálculo del esfuerzo cortante utilizando la Ecuación 46.

$$\tau = \frac{T}{W_p} \quad \text{Ec. (46)}$$

Donde: T: Torque [Nm] y *W<sub>p</sub>*: Momento polar de inercia [m<sup>3</sup>]. Posteriormente, se calculó el momento polar de inercia, utilizando la siguiente Ecuación 47:

$$W_p = \frac{\pi \times D^3}{16} (1 - u^4) \quad \text{Ec. (47)}$$

$$W_p = \frac{\pi \times 0.02^3}{16} (1 - 0.7^4)$$

$$W_p = 1.19 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\tau = \frac{26.9}{1.19 \times 10^{-6}}$$

$$\tau = 22.54 \text{ Mpa}$$

Las tensiones normales en el husillo serán provocadas por la fuerza axial  $F$  y la carga uniformemente repartida debido al peso del husillo. El cual se calcula con la Ecuación 48:

$$\sigma = \frac{F}{S} + \frac{M_f}{W_o} \quad \text{Ec. (48)}$$

Donde:  $F$ : Fuerza axial [N],  $S$ : Sección transversal del husillo [m<sup>2</sup>],  $M_f$ : Momento flector máximo [Kg-m] y  $W_o$ : Momento inercia respecto a eje Neutro [m<sup>3</sup>] y  $M_f$ : Momento flector máximo [Kg-m].

El momento flector se calculó utilizando la siguiente Ecuación 49:

$$M_f = \frac{\rho \times L^2}{2} \times \frac{\pi \times D^2}{4} \times (1 - u^3) \times g \quad \text{Ec. (49)}$$

Donde:  $\rho$ : densidad del material del husillo [Kg/m<sup>3</sup>],  $L$ : largo del husillo [m],  $D$ : diámetro del husillo [m],  $u$ : relación entre diámetros del husillo [-] y  $g$ : Aceleración de gravedad [m/s<sup>2</sup>], obteniendo el siguiente resultado:

$$M_f = \frac{7833 \times 0.34^2}{2} \times \frac{\pi \times 0.02^2}{4} \times (1 - 0.7^3) \times 9.81$$

$$M_f = 0.92 \text{ Nm}$$

El momento inercia respecto a eje Neutro, se calculó con la siguiente Ecuación 50:

$$W_o = \frac{\pi \times D^3}{32} (1 - u^4) \quad \text{Ec. (50)}$$

$$W_o = \frac{\pi \times 0.02^3}{32} (1 - 0.7^4)$$

$$W_o = 5.97 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

Ahora reemplazamos todos los valores en la Ecuación 48:

$$\sigma = \frac{29050}{0.00016022} + \frac{0.92}{5.97 \times 10^{-7}}$$

$$\sigma = 182.8 \text{ [Mpa]}$$

Ahora se realiza el cálculo de la tensión o esfuerzo resultante utilizando la Ecuación 51:

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma^2 + (4 \times \tau^4)} \quad \text{Ec. (51)}$$

$$\sigma_r = \sqrt{182.8^2 + (4 \times 22.54^4)}$$

$$\sigma_r = 1032.42 \text{ Mpa}$$

Con este esfuerzo equivalente se comprueba que el material cumpla con las especificaciones; tenemos que el acero AISI 4140 TyR tiene una resistencia a la fluencia de 1640 Mpa probando así estar por encima del esfuerzo de trabajo. Asimismo, para que el husillo soporte y se pueda utilizar, la tensión resultante debe ser menor que la admisible por el material.

$$\sigma_r = 1032.42 \text{ [MPa]} < \sigma_{adm} = 1640 \text{ [MPa]}$$

Obteniendo un factor de seguridad de: 1.6

Por último, se calculó la deflexión máxima del husillo al aplicar la carga repartida, utilizando la siguiente Ecuación 52:

$$df_{\text{máx}} = \frac{q \times L^4}{8 \times E \times J} \quad \text{Ec. (52)}$$

Dónde: **q**: Peso lineal del husillo [Nm], **L**: Longitud del husillo [m], **E**: Modulo elasticidad del husillo [Pa], **J**: Momento de inercia de la sección transversal [m<sup>4</sup>] y **q**: Peso lineal del husillo [Nm].

El peso lineal del husillo se calculó utilizando la siguiente Ecuación 53:

$$q = \rho \times g \times S \quad \text{Ec. (53)}$$

Donde:  $\rho$ : densidad del material del husillo [Kg/m<sup>3</sup>],  $g$ : gravedad [1/s<sup>2</sup>],  $S$ : sección transversal del husillo [m<sup>2</sup>] y  $J$ : Momento de inercia de la sección transversal [m<sup>4</sup>].

El momento de inercia de la sección transversal, se calculó utilizando la siguiente Ecuación 54:

$$J = \frac{\pi \times D^4}{64} (1 - u^4) \text{ Ec. (54)}$$

Por lo tanto, reemplazando las Ecuaciones 52, 53 y 54, resulta el siguiente valor para la deformación máxima:

$$df_{\text{máx}} = \frac{\rho \times g \times S \times L^4}{8 \times E \times \frac{\pi \times D^4}{64} (1 - u^4)}$$

$$df_{\text{máx}} = \frac{7850 \times 9.81 \times 0.00016022 \times 0.34^4}{8 \times 2.1 \times 10^{11} \times \frac{\pi \times 0.02^4}{64} (1 - 0.7^4)}$$

$$df_{\text{máx}} = 1.64 \times 10^{-5} \text{ mm}$$

El valor de la deflexión máxima debe ser menor que la holgura del filete del husillo con respecto al barril, para evitar interferencia entre ellos.

$$df_{\text{máx}} = 1.64 \times 10^{-5} \text{ mm} < \delta = 0.1 \text{ mm}$$

4.2.2.3.1.7. *Selección del motor:* A partir del dimensionamiento del husillo se seleccionó un motor que cumpla con los criterios y brinde cierto margen de seguridad. El motor que se selecciono fue un motorreductor de alto torque que trabaja a 12 v DC y entrega una velocidad de 100 RPM



Figura 18. Motorreductor para husillo de extrusión. (Solutions, 2019)

#### 4.2.2.3.2. Diseño Cilindro

4.2.2.3.2.1. Geometría: Para diseñar el cilindro, se deben considerar factores como: la holgura entre el filete helicoidal y el barril, y el diámetro del husillo. Primero, se realiza el cálculo del diámetro interior del cilindro que se desea utilizando la Ecuación 55:

$$D_i = (D + 2) \times \delta \quad \text{Ec. (55)}$$

Donde:  $D$ : Diámetro del husillo [mm] y  $\delta$ : Holgura [mm], obteniendo el siguiente resultado:

$$D_i = (20 + 2) \times 0.1 = 20.2 \text{ mm}$$

El cilindro debe cubrir la zona útil del husillo, por lo que tendrá un largo de 340 mm como mínimo. El espesor mínimo que debe tener el cilindro para soportar las presiones, requiere conocer el material del cilindro. Para lo cual, se seleccionó un acero AISI 1020 CD, con un esfuerzo admisible de 390 MPa. Este material se eligió teniendo en cuenta los siguientes parámetros: Temperaturas de trabajo, disponibilidad, fabricación, resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión y costo.

Por lo tanto, el espesor mínimo se calculó empleando la Ecuación 56:

$$e_{\min} = \frac{P \times r}{\sigma_{\text{adm}}} \quad \text{Ec. (56)}$$

Donde:  $P$ : Presión máxima de trabajo [MPa],  $r$ : Radio interior cilindro [mm] y  $\sigma_{\text{adm}}$ :

Esfuerzo admisible del material [MPa], obteniendo el siguiente resultado:

$$e_{\min} = \frac{181.3 * 10.1}{390}$$

$$e_{\min} = 4.69 \text{ mm}$$

El cilindro tendrá un espesor final de 10 mm y un espesor de 8.5 mm en la parte de roscada este espesor depende del tipo de rosca en este caso es una rosca fina, se obtiene así un factor de seguridad con los siguientes valores:  $FS_{\text{cilin}} = 2.13[-]$  y  $FS_{\text{pf}} = 1.81[-]$ . Para la fabricación del husillo se usará una barra de 42 mm de diámetro por un largo de 500 mm lo cual es aproximadamente en barras comerciales en el país a un diámetro de 1-5/8" (pulgada).

**4.2.2.4. Diseño de sistema de calefacción:** La potencia requerida para las resistencias eléctricas se calculó teniendo en cuenta que dicha potencia es función del calor necesario generado por las resistencias y transferido al cilindro y al husillo. Para el diseño se tomó que el flujo de calor es unidimensional, con régimen estacionario debido a que cuando las resistencias y sin aislamiento, como se muestra en la siguiente Figura 18:

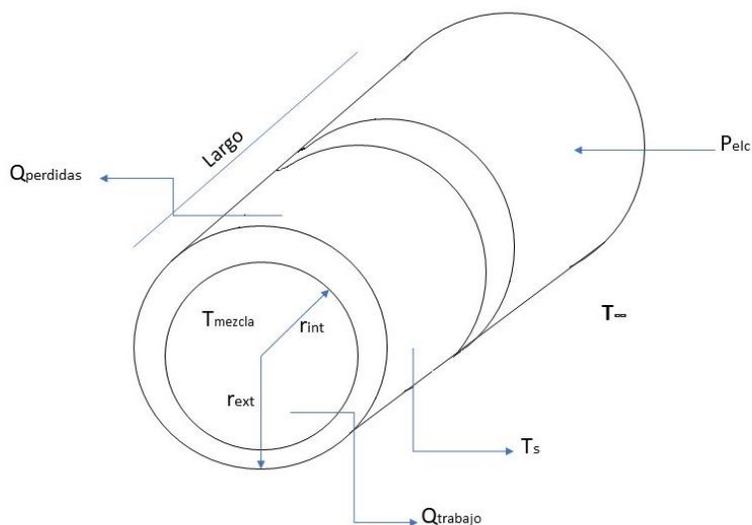


Figura 19. Modelo del cilindro y sistema de calefacción. Autor

Primero se representa el modelo a desarrollar; además, se aclara la analogía eléctrica para el cálculo de la potencia requerida para fundir la mezcla (de trabajo) más las pérdidas que existen en el ambiente (de convección y radiación), la cual debe ser igual a la potencia eléctrica que debe entregar el calentador, este comportamiento se muestra en la siguiente Figura 19:

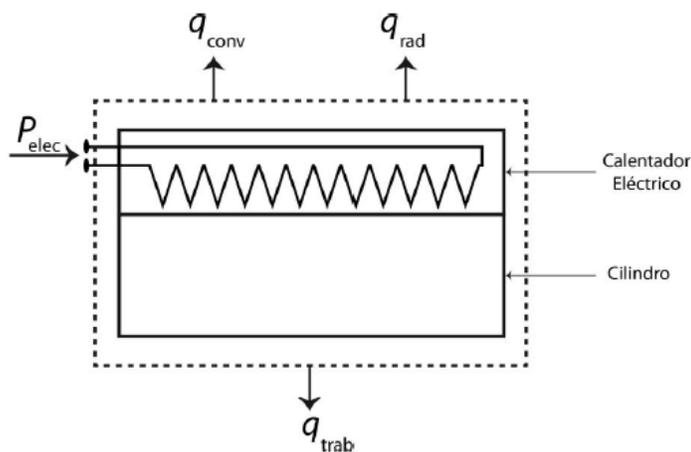


Figura 20. Bosquejo sistema de calefacción. (Brito Barra, 2017)

Definiendo la ecuación general para la potencia requerida tenemos como resultado la Ecuación 57.

$$q_{elec} = q_{trabajo} + (q_{conv} + q_{rad}) = q_{trabajo} + q_{perd} \quad \text{Ec. (57)}$$

Dónde:  $q_{elec}$ : Potencia que entrega el calentador eléctrico [W],  $q_{conv}$ : Potencia perdida hacia el ambiente mediante convección [W],  $q_{rad}$ : Potencia perdida hacia el ambiente mediante radiación [W],  $q_{trabajo}$ : Potencia necesaria para llevar la mezcla a la temperatura de trabajo [W] y  $q_{perdidas}$ : Potencia perdida hacia el ambiente [W].

Al calcular la potencia de trabajo, se necesita conocer las temperaturas de operación: al emplear dos materiales, se tienen dos temperaturas diferentes de operación, para el ABS será de 230 °C y para el PLA será de 190 °C, para los dos la temperatura ambiente es de 22 °C. Como los polímeros trabajados son amorfos, no se presenta una zona de calor latente de fusión, por lo cual no es necesaria energía adicional para el cambio de fase, se utiliza la siguiente Ecuación 58 para calcular el calor de trabajo (Brito Barra, 2017).

$$q_{trabajo} = \dot{m} * C_p * (T_m - T_i) \quad \text{Ec. (58)}$$

Donde:  $m$ : Flujo másico de material [Kg/s],  $C_p$ : Calor específico del material [J/Kg°C],  $T_m$ : Temperatura de la mezcla [°C] y  $T_i$ : Temperatura ambiente [°C]. Obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 14:

Tabla 14

*Resultado de calor de trabajo para diferentes boquillas*

Variable	Descripción	Valor	Unidad
$Q_{tABS-1.75}$	Calor de trabajo ABS con boquilla de 1.75 mm	87.84	Watts
$Q_{tPLA-1.75}$	Calor de trabajo PLA con boquilla de 1.75 mm	60.45	Watts
$Q_{tABS-3}$	Calor de trabajo ABS con boquilla de 3 mm	298.99	Watts
$Q_{tPLA-3}$	Calor de trabajo PLA con boquilla de 3 mm	205.84	Watts

Nota: Autor

Para calcular las pérdidas al ambiente, se necesita calcular la resistencia térmica del sistema. Dicha resistencia dependerá del intercambio de calor del cilindro con el ambiente: a

través del fenómeno de convección y radiación. Para ello, se utilizan las Ecuaciones 59 y 60 (Brito Barra, 2017).

$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{h \times A_s} \quad \text{Ec. (59)}$$

Dónde:  $h$ : Coeficiente de transferencia de calor en convección natural [W/m<sup>2</sup>°C] y  $A_s$ : Área de la superficie expuesta a convección [m<sup>2</sup>].

$$R_{\text{rad}} = \frac{1}{A \times \varepsilon \times \sigma \times (T_s^2 + T_i^2) \times (T_s + T_i)} \quad \text{Ec. (60)}$$

Donde:  $A_s$ : Área de la superficie expuesta a radiación [m<sup>2</sup>],  $\varepsilon$ : Emisividad del material (0.865 para el AISI 1020 CD) [-],  $\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzmann =  $5.67 \times 10^{-8}$  [W/m<sup>2</sup>k<sup>4</sup>],  $T_s$ : Temperatura absoluta de la superficie [K] y  $T_{sur}$ : Temperatura Absoluta del ambiente [K]

La conductividad del aire a la temperatura de trabajo se calculó mediante el software EES, reemplazando en la Ecuación 59 se tiene que:

$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{9,645 \times (\pi \times 0.04 \times 0.34)}$$

$$\mathbf{R_{\text{conv}} = 2.43}$$

La resistencia de radiación será diferente para cada material:

$R_{\text{rad-ABS}}$

$$= \frac{1}{(\pi \times 0.04 \times 0.34) \times 0.865 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (295.15^2 + 493.15^2) \times (295.15 + 493.15)}$$

$$\mathbf{R_{\text{rad-ABS}} = 1.83}$$

$R_{\text{rad-PLA}}$

$$= \frac{1}{(\pi \times 0.04 \times 0.34) \times 0.865 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (295.15^2 + 463.15^2) \times (295.15 + 463.15)}$$

$$\mathbf{R_{\text{rad-PLA}} = 2.1}$$

La Tabla 15 muestra los cálculos de las pérdidas de calor por convección y radiación.

Tabla 15

*Cálculo de las pérdidas por convección y radiación*

<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
$q_{Per-ABS-conv}$	<b>Pérdidas de calor por convección para el ABS</b>	81.48	Watts
$q_{Per-PLA-conv}$	<b>Pérdidas de calor por convección para el PLA</b>	69.14	Watts
$q_{Per-ABS-Rad}$	<b>Pérdidas de calor por radiación para el ABS</b>	1082	Watts
$q_{Per-PLA-Rad}$	<b>Pérdidas de calor por radiación para el PLA</b>	80	Watts

Nota: Autor

La potencia total que debe entregar la banda, es la potencia de trabajo más las pérdidas, como se muestra en la siguiente Tabla 16:

Tabla 16

Potencia total requerida

<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
$q_{Elc-ABS-D1.75}$	<b>Potencia total para el ABS con Boquilla de 1.75 [mm]</b>	277.52	Watts
$q_{Elc-PLA-D1.75}$	<b>Potencia total para el PLA con Boquilla de 1.75 [mm]</b>	209.59	Watts
$q_{Elc-ABS-D3}$	<b>Potencia total para el ABS con Boquilla de 3 [mm]</b>	488.67	Watts
$q_{Elc-PLA-D3}$	<b>Potencia total para el PLA con Boquilla de 3 [mm]</b>	354.98	Watts

Nota: Autor

De acuerdo a la tabla anterior el valor máximo de potencia requerido es de 488.67 watts correspondiente a la boquilla de 3 mm cuando se utiliza ABS. Este valor será el valor de referencia para la selección de las resistencias.

El sistema empleara 3 resistencias calefactoras distribuidas en el cilindro para mantener una temperatura uniforme, cabe destacar que las resistencias se ubicaran en las secciones correspondientes a la transición y la dosificación para evitar atascamientos en la zona de alimentación. Las resistencias tendrán potencias diferentes distribuidas de la siguiente manera: a la salida del cilindro se ubicará una resistencia de 500 watts seguida de una de 250 watts y por último una de 150 watts.

- Selección de las resistencias calefactoras

De acuerdo a lo anterior se eligieron 3 resistencias empezando por una banda de FAST HEAT BP21675 que posee una potencia de 500 watts y trabaja a 120 V, como se muestra en la siguiente Figura 20:



*Figura 21.* Banda calefactora de 500watts. (Southern\_online, 2019)

La Figura 21 muestra la segunda banda calefactora de la marca AIICIOO la cual trabaja a 220 V y tiene una potencia de 250 watts.



*Figura 22.* Resistencia de 250 watts. Modificado de la web (AIOU, 2019)

La tercera y última banda calefactora del sistema es de acero inoxidable con una potencia de 150 watts y trabaja a 220 V, como se muestra en la Figura 22:



*Figura 23.* Resistencia de 150 watts. Modificado de la web (Itony-27, 2019)

**4.2.2.5. Diseño del sistema de ventilación:** Este sistema utilizara u un ventilador para el enfriamiento mediante la convección forzada. Su función es disminuir la temperatura del filamento en la salida de la boquilla, con eso se logra evitar la dilatación del filamento, logrando disminuir variaciones en el diámetro final y tener mayor calidad del filamento.

Se desea alcanzar una temperatura superior a la temperatura de transición vítrea del material, debido a que por debajo de ella el polímero es rígido y quebradizo, y por encima es blando y flexible, brindando la característica necesaria para que el sistema de bobinado de la extrusora funcione correctamente.

Para el cálculo se debe preseleccionar un ventilador, en este caso es un ventilador de 80x80x10 mm con una velocidad angular de 3000 RPM. Los datos de propiedades del aire se tomarán a temperatura de 22 °C y a presión atmosférica.

Calculo número de Reynolds se realizó aplicando la Ecuación 61:

$$Re = \frac{V \times D}{\nu} \quad \text{Ec. (61)}$$

Donde:  $V$ : Flujo de aire del ventilador [m/s],  $D$ : Diámetro del filamento [m] y  $\nu$ :

Viscosidad cinemática del aire [m<sup>2</sup>/s], los resultados se muestran en la siguiente Tabla 17:

Tabla 17

Valor de número de Reynolds

Variable	Descripción	Valor	Unidad
$Re-D1.75$	Reynolds con Boquilla de 1.75 [mm]	513.36	-
$Re-D3$	Reynolds con Boquilla de 3 [mm]	880.05	-

Nota: Autor

Con el número de Reynolds y Prandtl, dada las características del aire de la Tabla 30, se calcula el número de Nussel para los diferentes diámetros, utilizando la Ecuación 62.

$$Nu = 0.3 + \frac{0.62 \times Re^{\frac{1}{2}} \times Pr^{\frac{1}{3}}}{\left(1 + \left(\frac{0.4}{Pr}\right)^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{1}{4}}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282,000}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}} \quad \text{Ec. (62)}$$

Donde:  $Re$ : Número de Reynolds [-] y  $Pr$ : Número de Prandtl [-] = 0.7304, y los resultados son resumidos en la siguiente Tabla 18:

Tabla 18

Resultados Nussel

Variable	Descripción	Valor	Unidad
$Nu_{D1.75}$	Nussel Boquilla de 1.75 [mm]	11.6	-
$Nu_{D3}$	Nussel Boquilla de 3 [mm]	15.2	-

Nota: Autor

Ahora se calculó el coeficiente de transferencia de calor por convección, utilizando la siguiente Ecuación 63:

$$h = Nu \frac{k}{D} \quad \text{Ec. (63)}$$

Donde:  $Nu$ : Número de Nussel [-],  $k$ : Conductividad térmica del aire [W/mK] y  $D$ :

Diámetro filamento [m], los resultados obtenidos son resumidos en la siguiente Tabla 19:

Tabla 19

*Coefficiente de convección*

Variable	Descripción	Valor	Unidad
$h_{D1.75}$	Coefficiente de convección con Boquilla de 1.75 [mm]	167.62	W/m <sup>2</sup> K
$h_{D3}$	Coefficiente de convección con Boquilla de 3 [mm]	128.13	W/m <sup>2</sup> K

Nota: Autor

También debemos calcular la velocidad de salida del filamento, se emplea la

Ecuación 64.

$$V = \frac{Q}{S}, \quad \left[ \frac{m}{s} \right] \quad \text{Ec. (64)}$$

Donde:  $Q$ : Flujo Volumétrico de Material [m<sup>3</sup>/s] y  $S$ : Sección transversal de la boquilla [m<sup>2</sup>], Para una boquilla de 1.75 mm, el resultado es:

$$V_{D1,75} = \frac{3.51 \times 10^{-7}}{2.4 \times 10^{-6}} = 0.146 \text{ m/s}$$

Para una boquilla de 3 mm el resultado es:

$$V_{D1,75} = \frac{1.19 \times 10^{-6}}{7.0685 \times 10^{-6}} = 0.168 \text{ m/s}$$

Al aplicar conservación de la energía en un volumen control estacionario, por el cual se mueve el filamento, se logra calcular la temperatura en cualquier posición obteniendo como resultado la Ecuación 65.

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

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

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

$$\int_{T_0}^T \frac{dT}{(T - T_\infty)} = -\frac{4h}{\rho V_e D C_p} \int_0^x dx$$

$$T = T_\infty + (T_0 - T_\infty)e^{-\frac{4hx}{\rho V_e D C_p}} \quad \text{Ec. (65)}$$

Donde:  $T_\infty$ : Temperatura ambiente [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $T_0$ : Temperatura de salida del filamento [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $h$ : Coeficiente de convección [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ],  $\rho$ : Densidad del material [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ],  $V_e$ : Velocidad de salida del filamento de la boquilla [ $\text{m}/\text{s}$ ],  $D$ : Diámetro filamento [ $\text{m}$ ],  $C_p$ : Calor específico material [ $\text{J}/\text{Kg}^{\circ}\text{C}$ ] y  $X$ : posición a evaluar. Los resultados son resumidos en la siguiente Tabla 20:

Tabla 20

*Temperatura a la salida de la boquilla*

Variable	Descripción	Valor	Unidad
$T_{D1.75-ABS}$	Temperatura a los 24 [cm] al salir de la boquilla de 1.75 [mm] para el ABS	131.14	$^{\circ}\text{C}$
$T_{D3-ABS}$	Temperatura a los 24 [cm] al salir de la boquilla de 3 [mm] para el ABS	179.2	$^{\circ}\text{C}$
$T_{D1.75-PLA}$	Temperatura a los 24 [cm] al salir de la boquilla de 1.75 [mm] para el PLA	126.2	$^{\circ}\text{C}$
$T_{D3-PLA}$	Temperatura a los 24 [cm] al salir de la boquilla de 3 [mm] para el PLA	161.6	$^{\circ}\text{C}$

Nota: Autor

Se observa que el filamento al pasar por el ventilador, reduce su temperatura, pero manteniéndola arriba de la temperatura de transición vítrea del ABS y PLA (115 y  $60^{\circ}\text{C}$  respectivamente) en ambas boquillas, presentando mejor eficiencia para la boquilla de 1.75 mm. Sin embargo, el filamento en los dos casos será más estable evitando variaciones de diámetro y se podrá trabajar de manera excelente en el sistema de bobinado de la extrusora.

- Selección sistema de ventilación

A partir de los cálculos realizados anteriormente tenemos que el sistema contara con tres ventiladores en serie, se eligió: un ventilador de la marca QG de 80x80x25 mm, el cual tiene un alto rendimiento entregando 47 CFM de flujo a 3000 RPM y funciona a corriente continua de 12 V.



Figura 24. Ventilador QG. Modificado de la web (Electronics, 2019)

**4.2.2.6. Diseño del sistema de bobinado:** Para el diseño del sistema de bobinado de necesita la velocidad de extrusión del material para así definir las velocidades a la que se debe envolver el material en el carrete. Como ya se calculó la velocidad de extrusión para ambas boquillas, se procede a encontrar la velocidad a la que girara el carrete, utilizando la siguiente Ecuación 66:

$$\eta = \frac{V}{\pi \times D} \text{ , [rpm] } \quad \text{Ec. (66)}$$

Dónde:  $V$ : Velocidad de salida del filamento [m/min] y  $D$ : Diámetro interior del carrete [mm], obteniendo los siguientes resultados para una boquilla de 1.75 mm:

$$\eta_{D1,75} = \frac{0.146 \times 1000 \times 60}{\pi \times 90}$$

$$\eta_{D1,75} = 31 \text{ RPM}$$

Y resultados para una boquilla de 3 mm:

$$\eta_{D3} = \frac{0.168 \times 1000 \times 60}{\pi * 90}$$

$$\eta_{D3} = 35.65 \text{ RPM}$$

Para seleccionar el motor adecuado se debe calcular el torque máximo que se produce en el sistema para ello se realiza el diagrama de cuerpo libre, como se ilustra en la Figura 24:

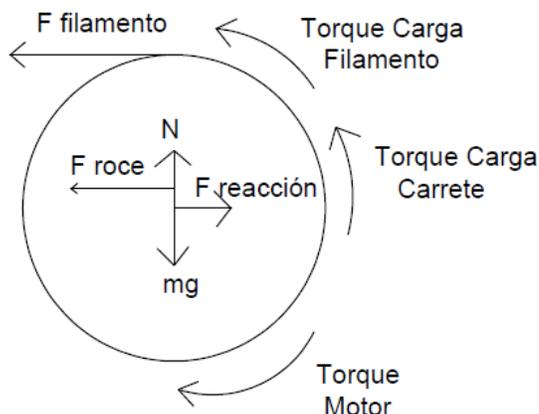


Figura 25. DCL carrete de bobinado. (Brito Barra, 2017)

La fuerza para bobinar el filamento ( $F_{filamento}$ ) será igual a cero, debido a que el filamento avanza debido a la extrusora. Se tendrá en cuenta para los cálculos el torque de carga, el torque generado por la fricción o roce y la aceleración de inercia por los componentes del sistema. Con las consideraciones anteriores se tiene la siguiente Ecuación 67:

$$T_m = T_c + T_f + T_i \quad \text{Ec. (67)}$$

Donde:  $T_c$ : Torque generado por la carga [Nm],  $T_f$ : Torque generado por el roce [Nm] y  $T_i$ : Torque generado por aceleración de inercia [Nm]. Reemplazando valores en la Ecuación 67 obtenemos la Ecuación 68:

$$T_m = [(P_{carrete} \times g \times r_{carrete}) + (P_{filamento} \times g \times r_{filamento})] + [\mu \times g \times (P_{carrete} + P_{filamento}) \times r_{eje}] + [(I_{carrete} + I_{filamento}) + I_{eje}] \times \alpha \quad \text{Ec. (68)}$$

Para los cálculos se tuvo en cuenta la siguiente Tabla 21:

Tabla 21

Valores para el torque

Variable	Nomenclatura	Valor	Unidad
Peso Carrete	$P_{\text{carrete}}$	0.1	kg
Peso Filamento	$P_{\text{filamento}}$	1	kg
Peso Eje	$P_{\text{eje}}$	0.1	kg
Radio Interior Carrete	$r_{\text{carrete}}$	0.045	m
Radio Eje	$r_{\text{eje}}$	0.006	m
Roce Eje - Carrete (Acero - Plástico)	$\mu$	0.4	-
Inercia del carrete	$I_{\text{carrete}}$	0.000132813	kgm <sup>2</sup>
Aceleración sistema (de 0 a 5,6 en 2 segundos)	$\alpha$	5.6	rev/s <sup>2</sup>
Inercia del Eje	$I_{\text{eje}}$	0.000000016	kgm <sup>2</sup>
Inercia del filamento en el carrete	$I_{\text{filamento}}$	0.001328125	kgm <sup>2</sup>

Nota: Modificado (Brito Barra, 2017)

Obteniendo el siguiente resultado:

$$T_m = 0.05886 + 0.02649 + 0.00818 = 0.09353 \text{ Nm}$$

Tomando un factor de seguridad del 20%, el torque para seleccionar el motor debe ser mayor a 0.11 Nm.

- Selección Motor de Bobinado

De acuerdo a lo anterior se seleccionó el motor JGY-370, de la marca Bringsmart. El motor se alimenta de corriente continua de 12 V, 40 RPM y un torque de 0.55 Nm.



Figura 26. Motor de bobinado. Modificado de la web (Wang, 2019)

**4.2.2.7. Diseño repartidor de filamento:** El sistema para repartir el filamento se encarga distribuye el filamento en el carrete. Para ello, se deben conocer diferentes parámetros para obtener una distribución adecuada, como se muestra en la Tabla 22.

Tabla 22

*Parámetros de distribución de filamento*

Variable	Descripción	Valor	Unidad
$V_{D1.75}$	Velocidad de Salida en Boquilla de 1.75 [mm]	0.168	m/s
$V_{D3}$	Velocidad de Salida en Boquilla de 3 [mm]	0.146	m/s
$D_{int\_carrete}$	Diámetro Interior del carrete	90	mm
$D_{Ext\_carrete}$	Diámetro exterior del carrete	200	mm
$\rho_{ABS}$	Densidad ABS	1050	Kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{PLA}$	Densidad PLA	1310	Kg/m <sup>3</sup>

Nota: Autor

Con las características del Carrete, se tendrá un largo interior para el enrollado del filamento de aproximadamente 60 mm; por lo cual, las vueltas necesarias para llenar de forma longitudinal el carrete depende de la boquilla a utilizar. De acuerdo a ello, se utilizó la Ecuación 69:

$$Vueltas_{necesarias} = \frac{L_{i-carrete}}{D_{boquilla}} \quad \text{Ec. (69)}$$

Donde:  $L_{i-carrete}$ : Largo interior del carrete [mm] y  $D_{boquilla}$ : Diámetro de la boquilla [mm], obteniendo la siguiente Tabla 23 de resultados:

Tabla 23

*Vueltas necesarias para el carrete*

Variable	Descripción	Valor	Unidad
$Vueltas_{D1.75}$	Vueltas necesarias con Boquilla de 1,75 [mm]	35	-
$Vueltas_{D3}$	Vueltas necesarias con Boquilla de 3 [mm]	20	-

Nota: Autor

El largo necesario de material, para completar un Kilogramo de plástico, depende de la boquilla a utilizar y el material, para lo cual se utiliza la Ecuación 70:

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow L = \frac{4m}{\pi D^2 \rho} \quad \text{Ec. (70)}$$

Donde:  $m$ : Masa de filamento necesario (1) [Kg],  $D$ : Diámetro del filamento [m],  $\rho$ :

Densidad del material [Kg/m<sup>3</sup>], obteniendo la siguiente Tabla 24 de resultados:

Tabla 24

*Largo necesario para un kilogramo de filamento*

Variable	Descripción	Valor	Unidad
<b>Largo<sub>D1.75-ABS</sub></b>	<b>Largo para un Kilogramo de ABS con una Boquilla de 1,75 [mm]</b>	396	m
<b>Largo<sub>D3-ABS</sub></b>	<b>Largo para un Kilogramo de ABS con una Boquilla de 3 [mm]</b>	135	m
<b>Largo<sub>D1.75-PLA</sub></b>	<b>Largo para un Kilogramo de PLA con una Boquilla de 1,75 [mm]</b>	318	m
<b>Largo<sub>D3-PLA</sub></b>	<b>Largo para un Kilogramo de PLA con una Boquilla de 3 [mm]</b>	108	m

Nota: Autor

Para calcular la velocidad con la que se debe mover el repartidor, se necesita conocer el tiempo que demora en dar cada pasada de acuerdo al largo total que se requiere, lo que dependerá del número de vueltas para llenar el carrete y el perímetro de cada pasada (Brito Barra, 2017). El cálculo realizado se muestra en la siguiente Tabla 25:

Tabla 25

*Tiempo promedio de pasada*

Variable	Descripción	Valor	Unidad
<b>Tiempo<sub>D1.75-ABS</sub></b>	<b>Tiempo promedio de pasada para el ABS con una Boquilla de 1.75 [mm]</b>	400	s
<b>Tiempo<sub>D3-ABS</sub></b>	<b>Tiempo promedio de pasada para el ABS con una Boquilla de 3 [mm]</b>	430	s
<b>Tiempo<sub>D1.75-PLA</sub></b>	<b>Tiempo promedio de pasada para el PLA con una Boquilla de 1.75 [mm]</b>	329	s
<b>Tiempo<sub>D3-PLA</sub></b>	<b>Tiempo promedio de pasada para el PLA con una Boquilla de 3 [mm]</b>	350	s

Nota: Autor

- Selección del repartidor de filamento

Para seleccionar el repartidor se toma un tiempo promedio que es aproximadamente 377 s por cada pasada. A partir de eso se seleccionó un servomotor feotech FS5115M se trata de un motor de corriente continua de 6v y gran torque, además puede rotar hasta los 180°.



**Figura 27.** Servo motor para el sistema de repartición de filamento. Modificado de la web (Ltd, 2019)

**4.2.2.8. Diseño de la estructura:** Para la estructura el diseño no requiere gran armazón por lo cual se usará impresión 3D con material ABS para las partes móviles como también para soportes. Con esto se obtiene una maquina liviana y un mayor acople de las piezas. Al ser su estructura en impresión 3D nos deja vía libre para futuras modificaciones, debido a que los costos serian reducidos debido a que se puede reciclar las piezas a cambiar.

**4.2.2.9. Rodamientos:** Los rodamientos de gran importancia para reducir la deflexión en el husillo y eliminar cargas axiales y radiales, generadas por la rotación del husillo y el empuje que produce el material al llegar al cabezal. Con el uso de los rodamientos se logra evitar el contacto entre el cilindro y husillo (Paredes, 2017). Se utilizo el catálogo SKF para la selección de los rodamientos, el husillo contara con dos rodamientos uno de rodillos cónicos y el otro de rodillos cilíndricos.

- **Rodamiento de rodillos cilíndricos:** Este rodillo posee las características que se muestran en la Tabla 26.

Tabla 26

*Dimensiones del rodamiento cilíndrico*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Diámetro interior</b>	20 mm
<b>Diámetro exterior</b>	47 mm
<b>Ancho rodamiento</b>	14 mm

Nota: (SKF, 2015)

- **Rodamiento de rodillos cónicos:** Este rodillo, posee las características que se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27

*Dimensiones del rodamiento cónico*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Diámetro interior</b>	20 mm
<b>Diámetro exterior</b>	47 mm
<b>Ancho rodamiento</b>	15 mm

Nota: (SKF, 2015)

**4.2.2.10. Sistema eléctrico:** La máquina extrusora se debe controlar para obtener un funcionamiento de manera satisfactoria e influir en las propiedades finales del filamento. Para lograr dicho objetivo es necesario controlar diferentes partes de la extrusora, debido a lo cual, se dividió en cuatro sistemas independientes de control de acuerdo a su función, los cuales son:

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

4.2.2.10.1. *Sistema de control para motor husillo*: El motor se controlará mediante un driver específico para motores de corriente directa, el MC33926 Motor Driver Carrier Single de la marca Polulu. Como se muestra en la Figura 27.

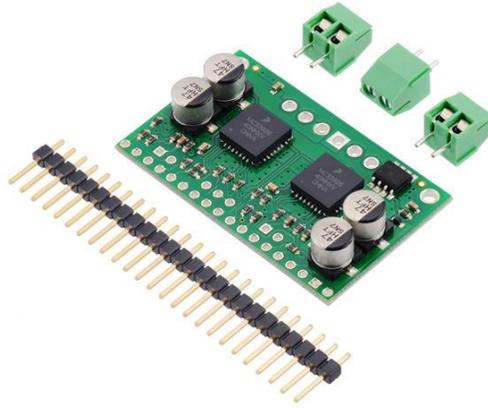


Figura 28. Controlador par motor del husillo. Modificado de la web (Corporation, 2019)

La Figura 28 muestra un controlador de motor de DC, tiene un amplio rango de operación de 5 V a 28 V y puede suministrar 3 A continuamente (pico de 5 A) al canal del motor. Además, cuenta con protección de voltaje y sobre temperatura. El sistema se alimentará por medio de una fuente con sólo una salida de 12 V capaz de entregar hasta 30 W. El modelo del driver es el PJ-12V30WBNA del fabricante Delta Electronics.



Figura 29. Fuente alimentación. (Electronics, 2019)

4.2.2.10.2. *Sistema de control para el sistema de bobinado:* Para el sistema de bobinado se empleará un driver igual que el del motor del husillo debido a su gran semejanza en el motor. Así como también la fuente de alimentación será de las mismas características de la del sistema del motor del husillo.

4.2.2.10.3. *Sistema de control para el sistema de calefacción:* La Figura 29 muestra el sistema de calefacción se encarga de aumentar la temperatura para la extrusión, controlarla y leerla. Se seleccionó un controlador de temperatura digital PID TA7-SNR, con un relé de estado sólido SSR-25D y una Termocupla PT100.



Figura 30. PID controlador de temperatura. Modificado de la web (Fasttobuy Making Simple, 2019)

Este controlador tiene un rango de medida entre 20 a 420 °C, además se puede acoplar diferentes modelos de termocuplas y operar en un rango de 24 a 380 V. Estas características lo hacen adecuado para controlar el sistema de calefacción – control on off.

4.2.2.10.4. *Sistema de control para el sistema de refrigeración:* Como el sistema de refrigeración siempre va funcionar mientras se está usando la maquina sólo necesita una fuente de alimentación para los ventiladores ventilador.

La Figura 30 muestra la alimentación para el ventilador se hará mediante una fuente con salida de 12 V, capaz de entregar hasta 20 W. El modelo de la fuente es el S-240-12 del fabricante Dual trónica.



*Figura 31.* Fuente alimentación para ventiladores. Modificado de la web (Electronics, 2019)

4.2.2.10.5. *Esquema de conexión:* Las Figuras 31, 32 y 33 muestran los esquemas que representa de forma básica como se distribuyen los componentes en la conexión eléctrica de sistema.

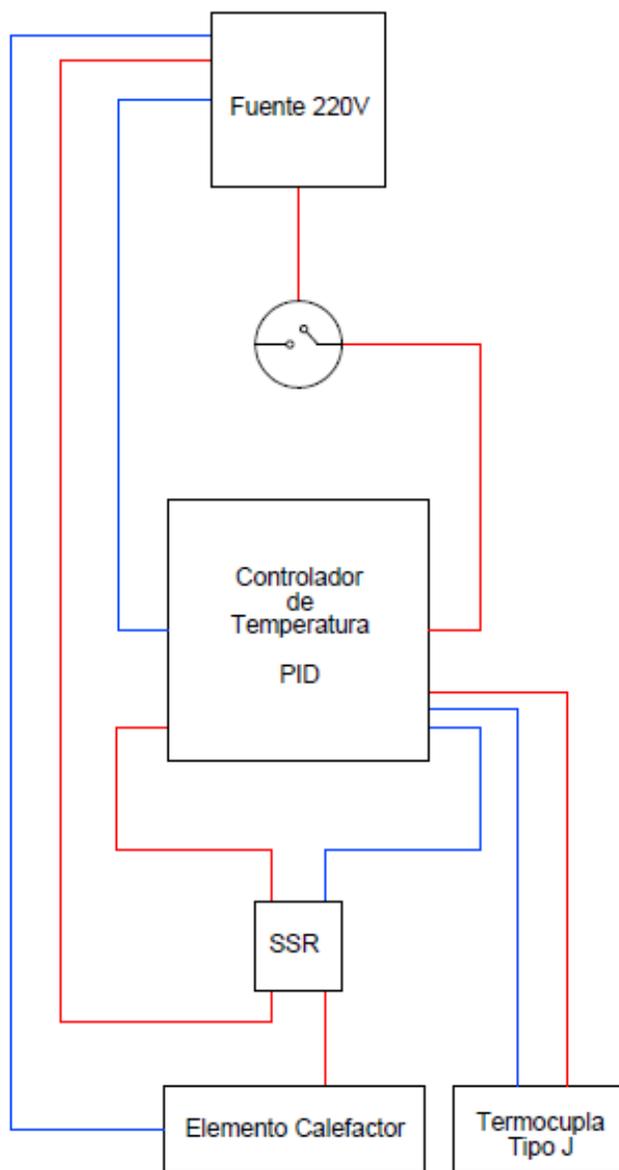


Figura 32. Esquema sistema de calefacción. Autor

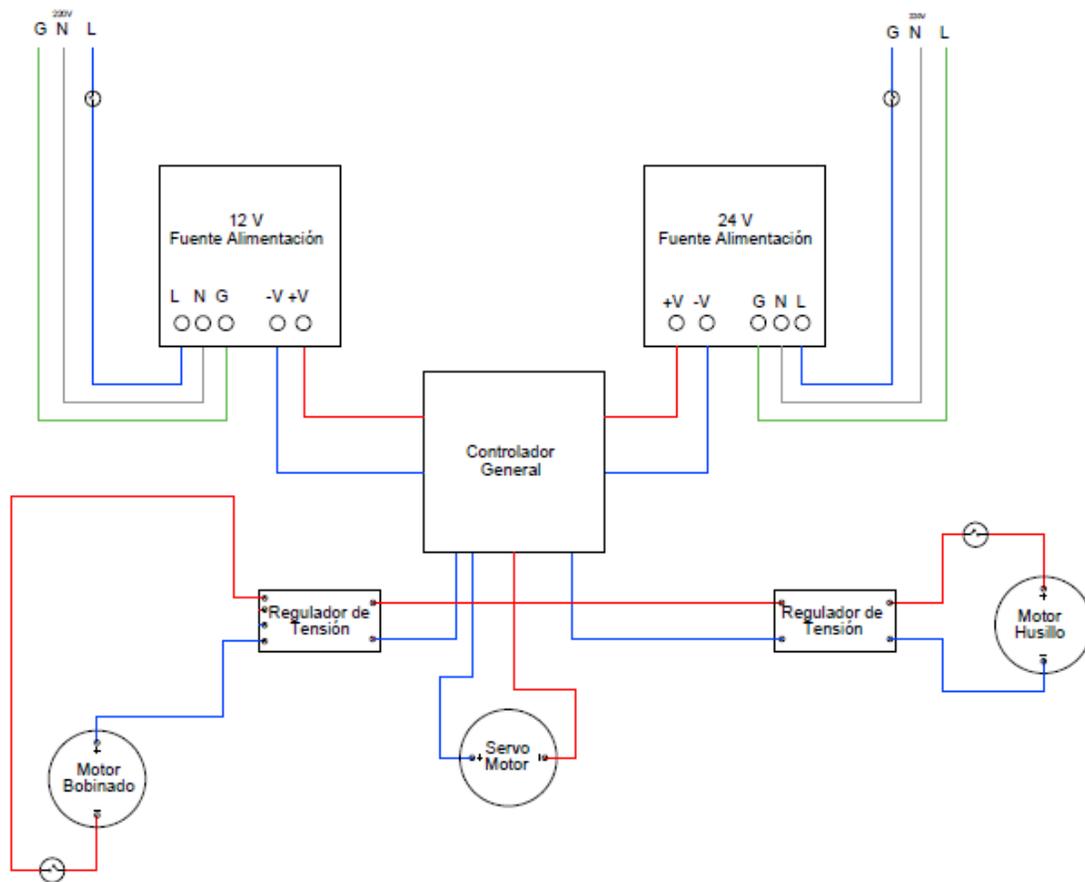


Figura 33. Esquema de motores. Autor

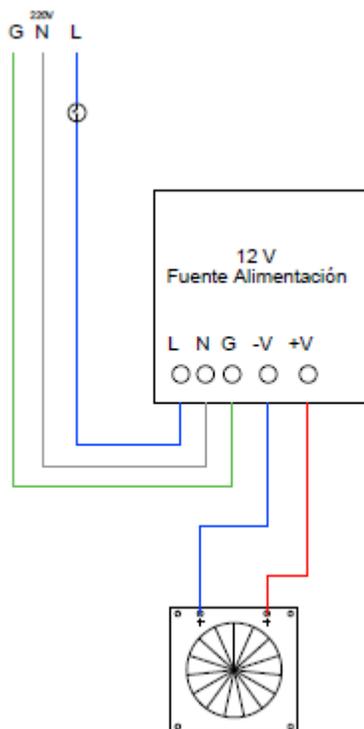


Figura 34. Esquema sistema de enfriamiento. Autor

### 4.2.3. Actividad 3. Resumir el diseño de los elementos que conforman la máquina para una fácil interpretación.

Este objetivo se lleva a cabo tabulando las características de los elementos más importantes de la extrusora.

**4.2.3.1. Tolva:** La tolva es un elemento de gran importancia debido a que es la encargada de almacenar y dosificar los pellets para la extrusión, en la Tabla 28 se muestran sus especificaciones:

Tabla 28  
Especificaciones de tolva

<b>Tolva</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
<b>Área superior</b>	200x200 [mm]
<b>Área inferior</b>	15x25 [mm]
<b>Alto</b>	250 [mm]
<b>Capacidad</b>	7,6 [Kg]
<b>Espesor pared</b>	2 [mm]
<b>Material de construcción</b>	Acero inoxidable 304

Nota: Autor

**4.2.3.2. Husillo:** El husillo representa la parte más importante de la extrusora. De acuerdo al diseño previamente realizado el husillo estará acoplado a un motorreductor que le entregará 100 RPM con la potencia necesaria para la extrusión. La Tabla 29 muestra cada uno de los datos más relevantes.

Tabla 29  
Especificaciones del husillo

<b>Husillo Extrusora</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
<b>Diámetro</b>	20 [mm]
<b>Diámetro Alma</b>	12 [mm]
<b>Diámetro Vástago</b>	20 [mm]
<b>Longitud Total</b>	400 [mm]
<b>Longitud Husillo (de trabajo)</b>	340 [mm]
<b>Longitud Vástago (Eje)</b>	60 [mm]
<b>N° Canales</b>	1
<b>N° Filetes</b>	17
<b>Paso</b>	20 [mm]
<b>Anchura Filete</b>	2 [mm]
<b>Largo Zona Alimentación</b>	140 [mm]
<b>Largo Zona Compresión</b>	120 [mm]
<b>Largo Zona Dosificación</b>	80 [mm]
<b>Profundidad Canal Zona de alimentación</b>	4 [mm]
<b>Profundidad Canal Zona de Dosificación</b>	2 [mm]
<b>Material de fabricación</b>	Acero AISI 4140

Nota: Autor

**4.2.3.3. Cilindro:** El cilindro es el complemento del husillo además de que en se ubican las resistencias de calefacción. La Tabla 30 muestra las especificaciones del cilindro.

Tabla 30

*Especificaciones del cilindro*

<b>Cilindro Extrusora</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
<b>Diámetro interior</b>	20,2 [mm]
<b>Diámetro exterior</b>	40,2[mm]
<b>Longitud Total</b>	360 [mm]
<b>Espesor de pared</b>	10 [mm]
<b>Material de fabricación</b>	Acero AISI 1020 CD

Nota: Autor

### **4.3. Fase 3: Simular cada uno de los elementos sometidos a máximos esfuerzos haciendo uso del software SolidWorks para validar su correcto funcionamiento**

**4.3.1. Actividad 1. Emplear el software SolidWorks en el que se modelará cada pieza con sus respectivas medidas.**

El modelado de las piezas en SolidWorks tiene como objetivo realizar el ensamble de la maquina; Además de un análisis estático y térmico al husillo y el cilindro, debido a que son las piezas que soportan mayores esfuerzos.

Esta primera actividad enmarca el modelo 3D de las piezas y el ensamble de la máquina, como se muestra en la siguiente Figura 34:

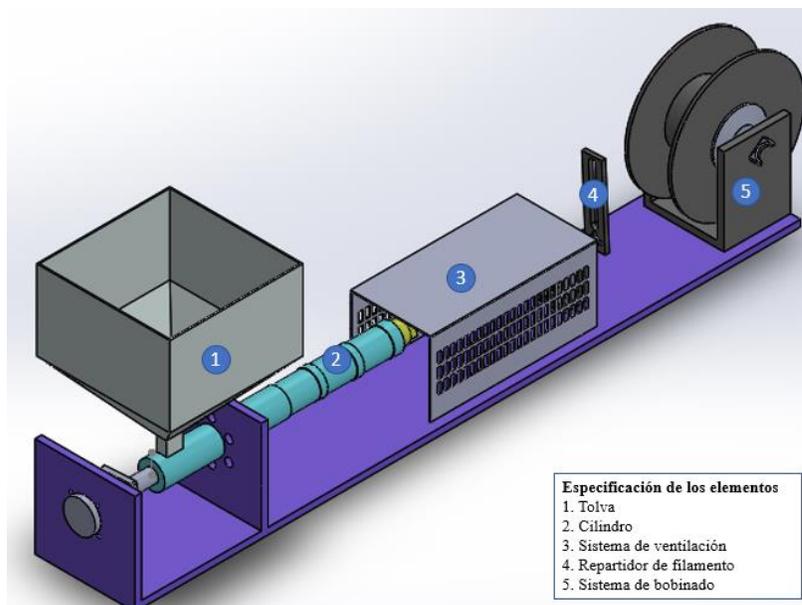


Figura 35. Ensamble máquina. Autor

#### 4.3.1.1. Tolva

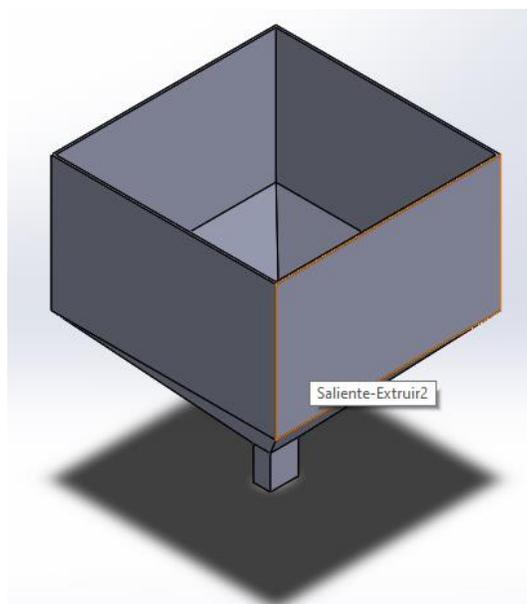


Figura 36. Modelo 3D de la tolva. Autor

#### 4.3.1.2. Husillo

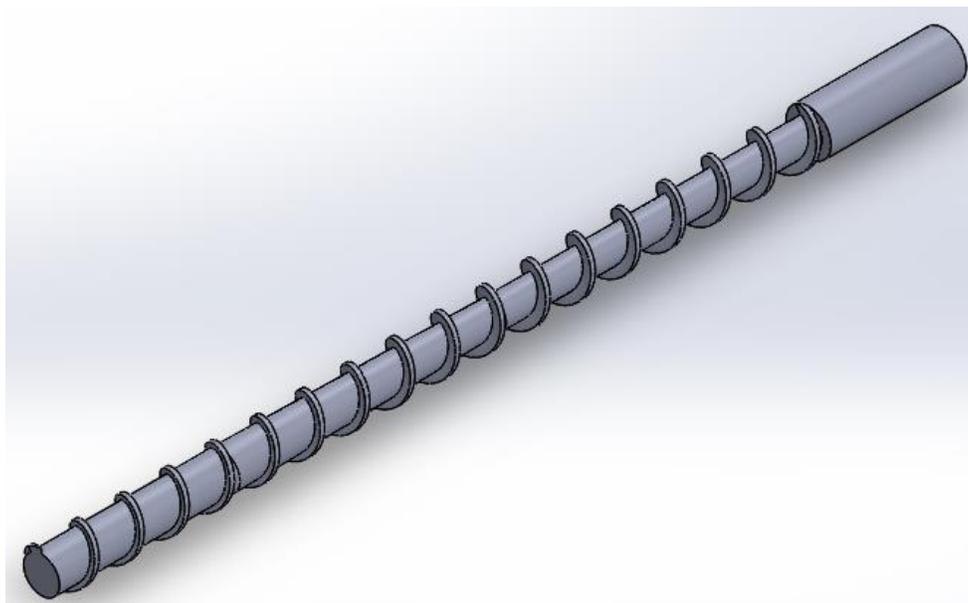


Figura 37. Modelo 3D del husillo. Autor

#### 4.3.1.3. Cilindro

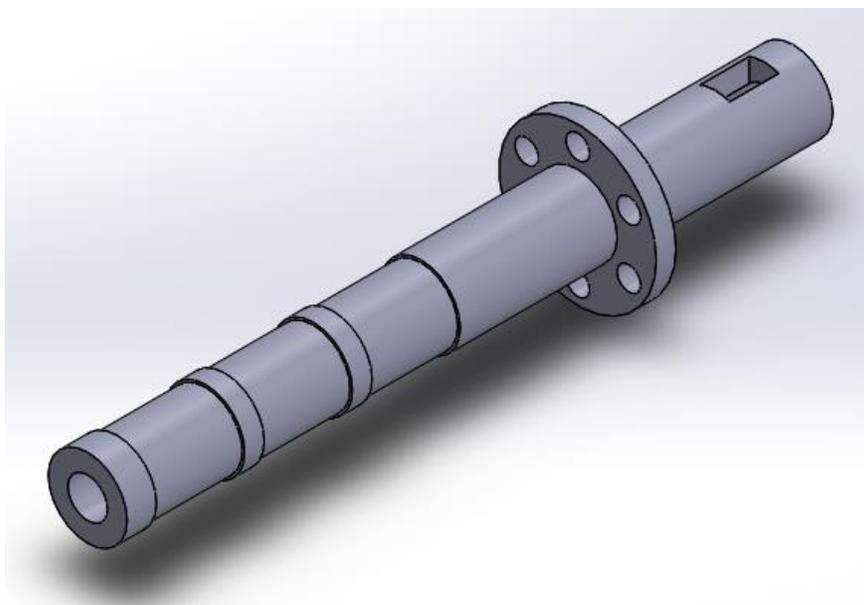


Figura 38. Modelo 3D del cilindro. Autor

#### 4.3.1.4. Boquilla

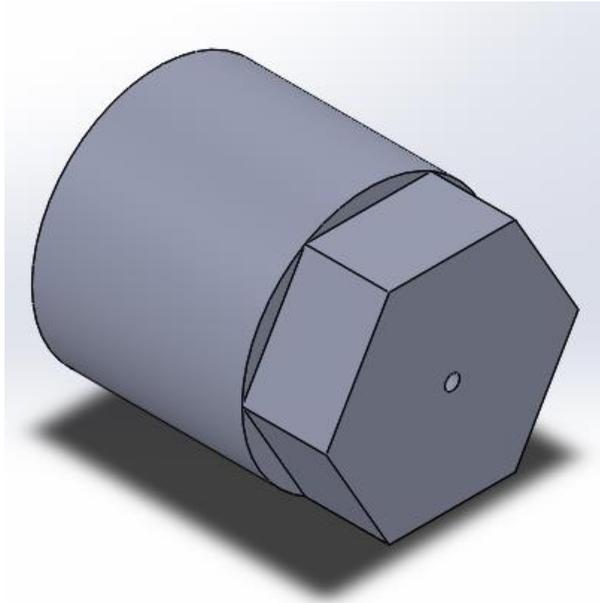


Figura 39. Modelo 3D de la boquilla. Autor

#### 4.3.1.5. Repartido de material

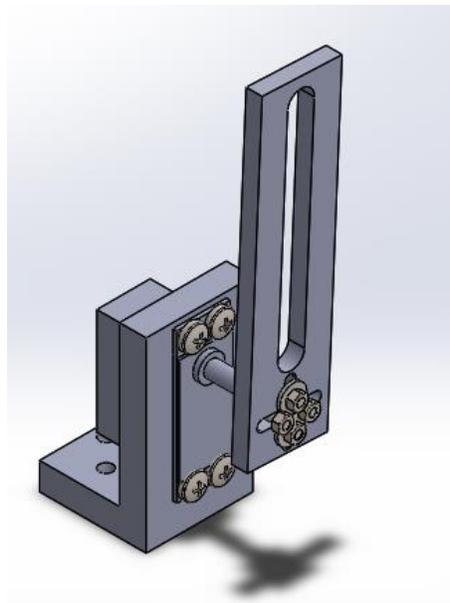


Figura 40. Repartidor de material ensamble. Autor

#### 4.3.1.6. Sistema de bobinado

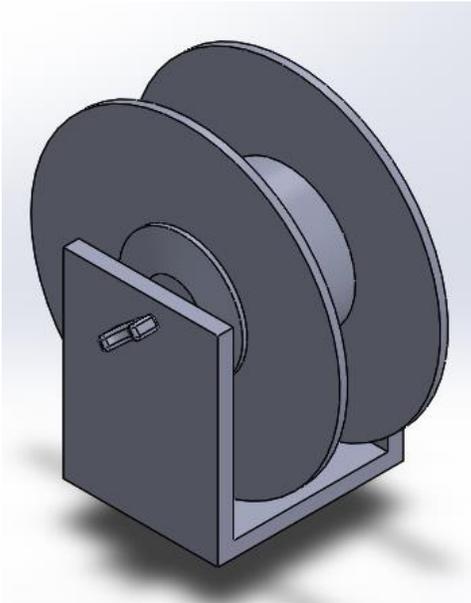


Figura 41. Sistema de bobinado. Autor

#### 4.3.2. Actividad 2. Aplicar la simulación de los esfuerzos provocados por su funcionamiento corroborando así el diseño de cada elemento modelado.

En la actividad anterior se realizó el modelado y el ensamble de la máquina. En esta actividad se realiza el análisis estático y térmico de los elementos que soportan máximos esfuerzos. En este caso se realizó el análisis del husillo y el cilindro.

**4.3.2.1. Husillo:** Para el análisis estático del husillo se consideró que solo está sometido a la carga de la masa de este, su importancia radica en la holgura que existe con el cilindro; con respecto al análisis térmico el husillo estará sometido al calor que se le transfiere del polímero fundido en un estado transitorio, como se muestra en la siguiente Tabla 31.

Tabla 31

*Características del husillo*

<b>Nombre</b>	Husillo para extrusión	Unidades
<b>Material</b>	Acero AISI 4140	
<b>Peso</b>	0,59	kg
<b>Límite elástico</b>	$4.7 \times 10^8$	N/m <sup>2</sup>
<b>Límite de tracción</b>	$7.45 \times 10^8$	N/m <sup>2</sup>
<b>Módulo elástico</b>	$2.05 \times 10^{11}$	N/m <sup>2</sup>
<b>Coefficiente de Poisson</b>	0.285	-
<b>Densidad</b>	7850	kg/m <sup>3</sup>
<b>Módulo cortante</b>	$8 \times 10^{10}$	N/m <sup>2</sup>
<b>Coefficiente de dilatación térmica</b>	$1.23 \times 10^{-5}$	Kelvin

Nota: Autor

Para el análisis se realizó un mallado con las características que se muestran en la Tabla

32:

Tabla 32

*Características del mallado*

<b>Nombre</b>	<b>Detalle</b>	<b>Unidades</b>
<b>Tipo de malla</b>	Malla sólida	-
<b>Mallado utilizado</b>	Malla estándar	-
<b>Puntos jacobianos</b>	4 puntos	-
<b>Tamaño de elementos</b>	5	Mm
<b>Tolerancia</b>	0.25	Mm
<b>Calidad de malla</b>	Elementos cuadráticos de alto orden	-
<b>Número total de nodos</b>	49032	-
<b>Número total de elementos</b>	29780	-
<b>Cociente máximo de aspecto</b>	163.56	-

Nota: Autor

Los resultados del mallado y la simulación se muestran en las siguientes Figuras 41 y 42:

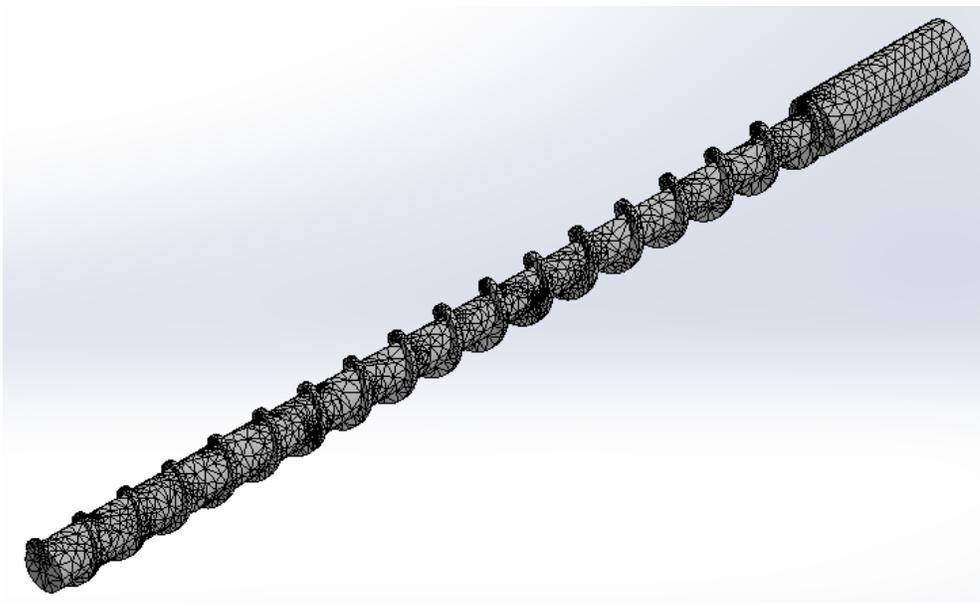


Figura 42. Malla del husillo. Autor

- Cargas estáticas.

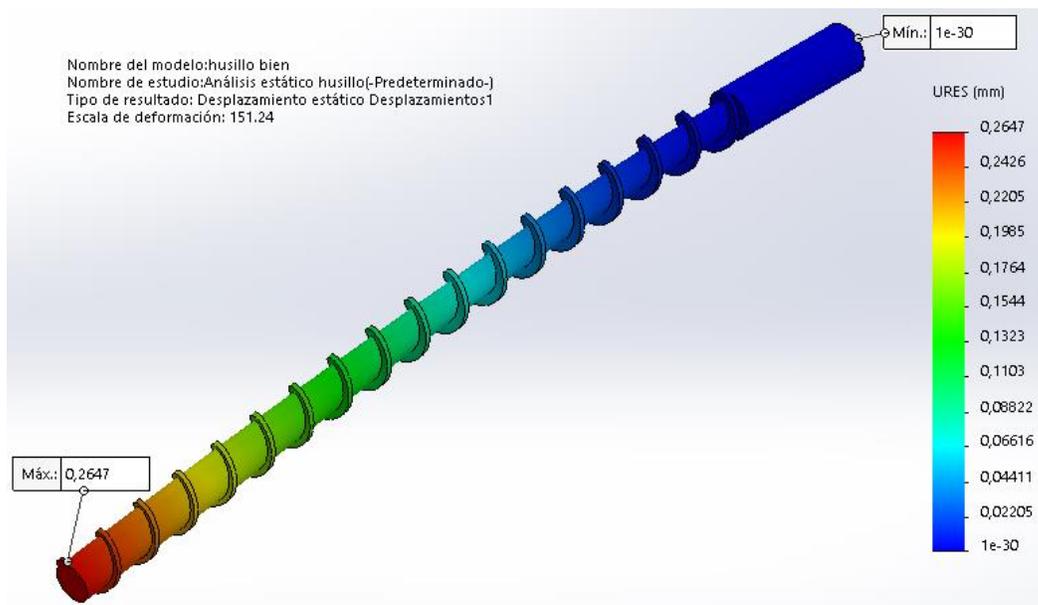


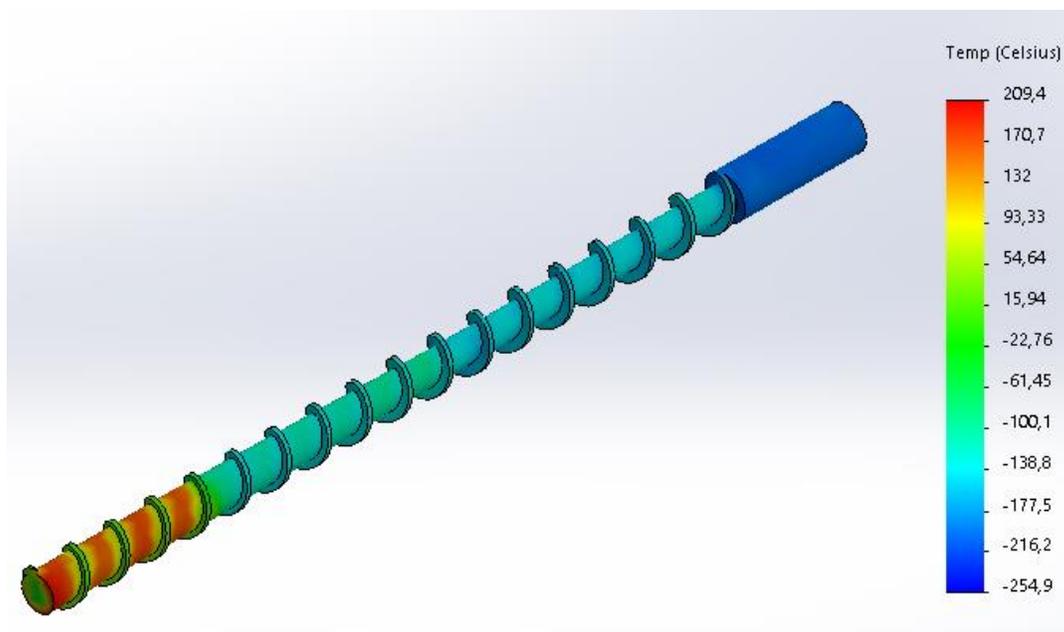
Figura 43. Desplazamiento en el husillo. Autor

Las anteriores figuras muestran que la simulación ejecutada arrojó datos de esfuerzos, lo que indica que el material cumplió con las especificaciones de diseño dejando gran margen de

seguridad, pero el dato más importante es la deformación en la cual podemos observar que es muy baja con un valor de 0.26 mm similares a diferentes estudios reportados en la literatura. Esta holgura se verá reducida con la ayuda de los rodamientos y la rotación del husillo, ajustándose a la holgura existente entre el husillo y cilindro de extrusión, además, el polímero fundido actuará como barrera entre ambos elementos (Flórez, García-León, & Escobar, 2017) (García-León & Suarez Castrillón, 2016).

- Cargas térmicas

La Figura 43 muestra el análisis térmico en el husillo, el cual considero un factor de multiplicación de la potencia de las resistencias debido a que influye la presión y fricción del plástico con las paredes y los alabes del husillo.



*Figura 44.* Resultados de temperatura en el husillo. Autor

Con el análisis podemos denotar que la temperatura se aproxima lo suficiente a la temperatura deseada, esta 10 ° menos, pero cumple con el cometido del diseño.

**4.3.2.2. Cilindro:** Para el análisis estático del cilindro este estará sometido solo a la presión que se ejerce desde dentro a causas del alza de la temperatura y la compresión del fluido, con este se sabrá si se seleccionó el espesor de cilindro adecuado; en el análisis térmico estará sometido al calor que se transfiere a el cilindro desde las resistencias calefactora directamente y el calor que se transfieres del aire, todo esto en un estado transitorio. Las características del cilindro se muestran en la Tabla 33:

Tabla 33

*Características del cilindro*

<b>Nombre</b>	<b>Detalle</b>	<b>Unidades</b>
<b>Nombre</b>	Cilindro de extrusión	-
<b>Material</b>	AISI 1020 CD	-
<b>Criterio de error predeterminado:</b>	Tensión de von Mises máx.	-
<b>Límite elástico:</b>	$3.51571 \times 10^8$	N/m <sup>2</sup>
<b>Límite de tracción:</b>	$4.20507 \times 10^8$	N/m <sup>2</sup>
<b>Módulo elástico:</b>	$2 \times 10^{11}$	N/m <sup>2</sup>
<b>Coefficiente de Poisson:</b>	0.29	-
<b>Densidad:</b>	7900	kg/m <sup>3</sup>
<b>Módulo cortante:</b>	$7.7 \times 10^{10}$	N/m <sup>2</sup>
<b>Coefficiente de dilatación térmica:</b>	$1.77 \times 10^5$	Kelvin

Nota: Autor

El análisis se realizó con un mallado con las características que se muestran en la Tabla 32:

Tabla 34

*Mallado del cilindro*

<b>Nombre</b>	<b>Detalle</b>	<b>Unidades</b>
<b>Tipo de malla</b>	Malla sólida	-
<b>Mallado utilizado</b>	Malla estándar	-
<b>Puntos jacobianos</b>	4 puntos	-
<b>Tamaño de elementos</b>	5	Mm
<b>Tolerancia</b>	0.25	Mm
<b>Calidad de malla</b>	Elementos cuadráticos de alto orden	-
<b>Número total de nodos</b>	30535	-
<b>Número total de elementos</b>	18027	-
<b>Cociente máximo de aspecto</b>	5,57	-

Nota: Autor

Los resultados del mallado y la simulacion se muestran en las siguientes Figuras 44 y 45:

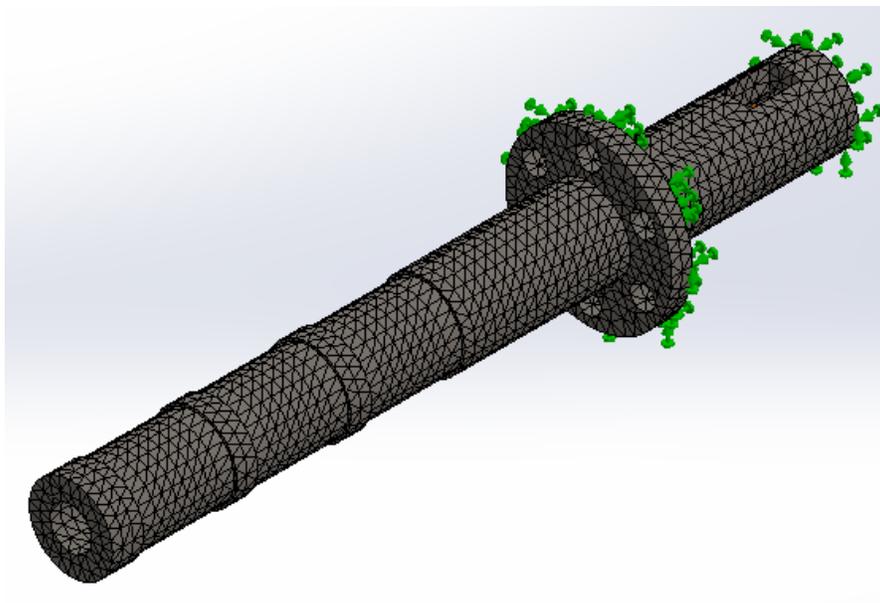


Figura 45. Mallado de cilindro. Autor

- Análisis estático

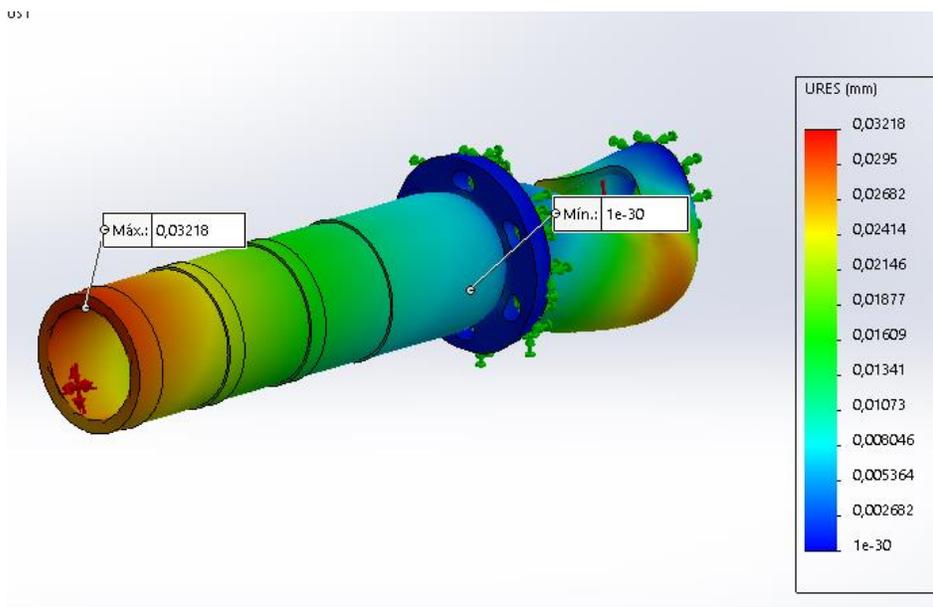


Figura 46. Desplazamiento del cilindro. Autor

La simulación confirmó que la presión máxima “s” presenta en la punta del cilindro. Debido a que ahí es donde el polímero se comprime y la temperatura promedio de esa última

sección es más elevada que las otras, la deformación que se presente es muy pequeña; por lo cual, se concluye que el material y el espesor seleccionado para el cilindro fue el adecuado, cumpliendo con las especificaciones de diseño seleccionadas (Flórez-Solano, García-León, & Sanchez-Ortiz, 2017).

- Cargas térmicas

La Figura 46 muestra el análisis térmico, se aplicó la potencia de cada resistencia; Además, se le aplicó un flujo de calor por convección con una temperatura ambiente de 22 °C, como es un estado transitorio se estableció una temperatura inicial (García-León & Pérez Rojas, 2017).

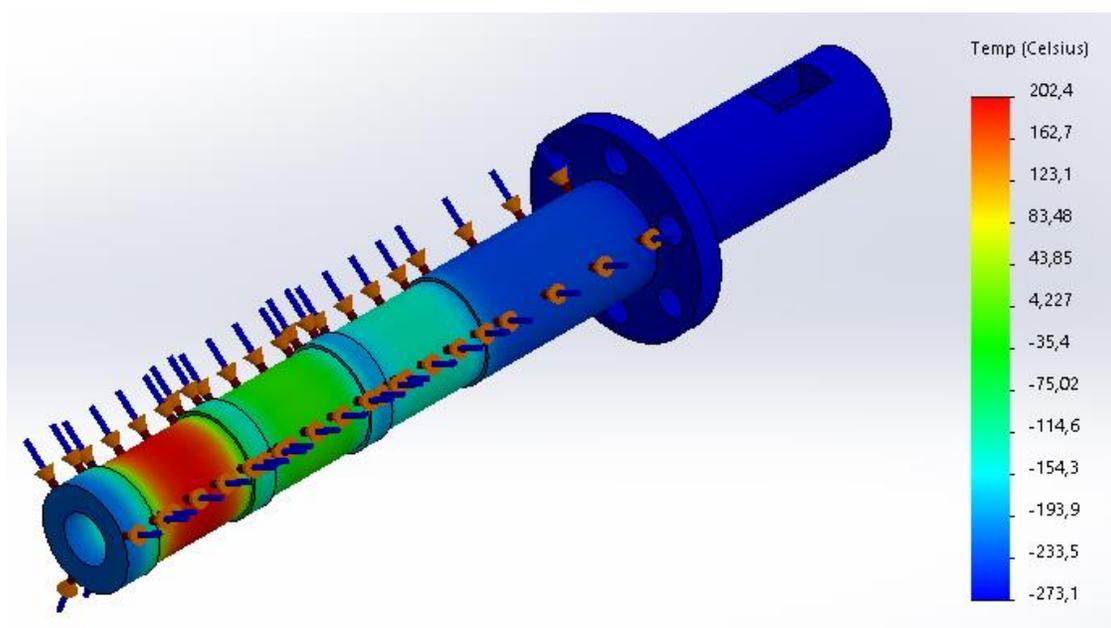


Figura 47. Resultado temperaturas del cilindro. Autor

En la punta del cilindro se evidencia que ahí se encuentra más elevada la temperatura con un valor aproximado de 202 °C, arrojando a sí una respuesta positiva para el propósito de la máquina en su sección de transferencia de calor. Con la cual se corroboró que el cilindro cumple con los requerimientos para su óptimo funcionamiento (García-León, Florez Solano, & Pérez Rojas, 2015).

**4.3.2.3. Tolva:** La tolva se le realizó un análisis estático para corroborar los esfuerzos que en ella se presenta en este caso los provocados por el peso de los pellets de plástico, teniendo en cuenta las características mostradas en la Tabla 35:

Tabla 35

*Características de la tolva*

<b>Nombre</b>	<b>Detalle</b>	<b>Unidades</b>
<b>Nombre:</b>	Tolva alimentación	-
<b>Material</b>	AISI 304 CD	-
<b>Límite elástico:</b>	$2.068 \times 10^8$	N/m <sup>2</sup>
<b>Límite de tracción:</b>	$5.1702 \times 10^8$	N/m <sup>2</sup>
<b>Módulo elástico:</b>	$1.9 \times 10^{11}$	N/m <sup>2</sup>
<b>Coefficiente de Poisson:</b>	0.29	-
<b>Densidad:</b>	7900	kg/m <sup>3</sup>
<b>Módulo cortante:</b>	$7.7 \times 10^{10}$	N/m <sup>2</sup>
<b>Coefficiente de dilatación térmica:</b>	$1.8 \times 10^{-5}$	Kelvin

Nota: Autor

El análisis se realizó con un mallado con las características que se muestran en la Tabla 36:

Tabla 36

*Características del mallado*

<b>Nombre</b>	<b>Detalle</b>	<b>Unidades</b>
<b>Tipo de malla</b>	Malla sólida	-
<b>Mallado utilizado</b>	Malla estándar	-
<b>Puntos jacobianos</b>	4 puntos	-
<b>Tamaño de elementos</b>	6	Mm
<b>Tolerancia</b>	0.3	Mm
<b>Calidad de malla</b>	Elementos cuadráticos de alto orden	-
<b>Número total de nodos</b>	52592	-
<b>Número total de elementos</b>	26150	-
<b>Cociente máximo de aspecto</b>	13.47	-

Nota: Autor

Los resultados del mallado y la simulación se muestran en las siguientes Figuras 47 y 48:

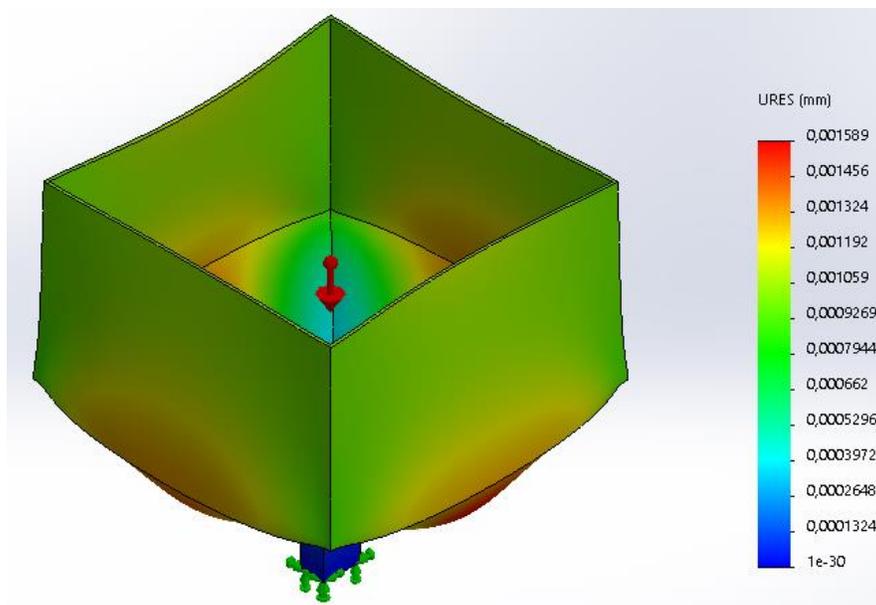


Figura 48. Desplazamientos en la tolva. Autor

El análisis estático de la tolva arrojo, que el material elegido para su fabricación cumple correctamente, debido a que en esfuerzos su límite elástico queda muy por encima de los esfuerzos calculados por el software y en las deformaciones, con los valores mostrados en la barra de colores.

#### 4.3.3. Actividad 3. Presentar un resumen de los resultados obtenidos mediante el software.

Con el software SolidWorks se modelo cada pieza de la máquina y a su vez se realizó el ensamble de la misma. El ensamble permitió asegurar que todo encaja en su lugar y que las piezas cuentan con las medidas precisas para no marcar inconsistencias de ensamble.

Con el ensamble se tiene el acceso a un prototipo virtual el cual tiene gran relevancia por si se desea fabricar el equipo.

Con eso se dio cumplimiento a la primera activad y se procedió a la siguiente la cual consistía en realizar un análisis de las partes más importantes del equipo, de las cuales se

tomaron el husillo, el cilindro y por último la tolva. Cuando se simuló cada pieza, dio más veracidad y confianza del diseño al ver la que cumple con los parámetros establecidos

Con eso se culmina el 3 y último objetivo dejando el modelo virtual del equipo el cual cumplió con los requisitos ingenieriles de los materiales.

#### **4.3.4. Actividad 4. Realizar un análisis de factibilidad para la posterior construcción de la máquina.**

Para el desarrollo de esta actividad, se tuvieron en cuenta los costos de los materiales actuales de venta en las ferreterías de la región.

Tabla 37  
*Cotización*

<b>Material</b>	<b>Cotización 1</b>	<b>Cotización 2</b>
<b>Barra de acero 4140 500 mm</b>	\$ 86,000	\$ 90,000
<b>Eje perforado de acero AISI 1020 (400 mm)</b>	\$ 180,000	\$ 194,000
<b>Lamina de acero inoxidable 304 calibre 14 (1mx1m)</b>	\$ 23,000	\$ 26,000
<b>Platina acero 1020 espesor 8 mm (40x40)</b>	\$ 35,000	\$ 43,000
<b>Filtros (60x60), (80x80) y (120x120)</b>	\$ 6,820	\$ 8,456
<b>Resistencias eléctricas 500 W a 1400 W</b>	\$ 170,000	\$ 186,000
<b>Motor-reductor 100 rpm 12 v</b>	\$ 184,000	\$ 205,000
<b>Rodamientos</b>	\$ 24,000	\$ 27,000
<b>Ventiladores</b>	\$ 15,000	\$ 12,600
<b>Cables</b>	\$ 12,000	\$ 13,600
<b>Motor para bobinado</b>	\$ 21,200	\$ 25,843
<b>Servomotor para repartición</b>	\$ 31,700	\$ 34,000
<b>Regulador PID con termocuplas</b>	\$ 196,000	\$ 215,000
<b>Tabla de MDF para base</b>	\$ 18,000	\$ 16,400
<b>Bridas de acople</b>	\$ 18,000	\$ 20,300
<b>Tornillería</b>	\$ 23,000	\$ 27,000
<b>Componentes sistema eléctrico</b>	\$ 141,000	\$153,000
<b>Maquinado del husillo</b>	\$ 320,000	\$ 335,000
<b>Maquinado del cabezal</b>	\$ 28,000	\$ 32,500

Nota: Autor

Tabla 38  
*Costo total del proyecto*

<b>Material</b>	<b>Costo estimado</b>
-----------------	-----------------------

<b>Barra de acero 4140 500 mm</b>	\$ 88,000
<b>Eje perforado de acero AISI 1020 (400 mm)</b>	\$ 187,000
<b>Lamina de acero inoxidable 304 calibre 14 (1mx1m)</b>	\$ 24,500
<b>Platina acero 1020 espesor 8 mm (40x40)</b>	\$ 39,000
<b>Filtros (60x60), (80x80) y (120x120)</b>	\$ 7,640
<b>Resistencias eléctricas 500 W a 1400 W</b>	\$ 178,000
<b>Motor-reductor 100 rpm 12 v</b>	\$ 194,500
<b>Rodamientos</b>	\$ 25,500
<b>Ventilador</b>	\$ 13,800
<b>Cables</b>	\$ 12,800
<b>Motor para bobinado</b>	\$ 23,520
<b>Servomotor para repartición</b>	\$ 32,850
<b>Regulador PID con termocuplas</b>	\$ 205,500
<b>Tabla de MDF para base</b>	\$ 17,200
<b>Bridas de acople</b>	\$ 19,150
<b>Tornillería</b>	\$ 25,000
<b>Componentes sistema eléctrico</b>	\$ 147,000
<b>Maquinado del husillo</b>	\$ 327,500
<b>Maquinado del cabezal</b>	\$ 30,250
<b>Total</b>	\$ 1,613,810
<b>% imprevistos</b>	10%
<b>Costo Total proyecto</b>	\$ 1,775,191

Nota: Autor

La tasa de retorno de la inversión no se pudo calcular debido a que no se cuenta con un ingreso y/o utilidades de alguna empresa o institución. Por otra parte, la maquina está enfocada en el reciclaje de desechos de las impresoras 3D y está dirigida a los propietarios de dichas impresoras.

Por otra parte, el costo de la maquina se puede disminuir aún más buscando alternativas para algunas piezas, las cuales sean de similares características. Aunque las piezas de apoyo y estructura de la maquina están diseñados para que sean modelados por impresión 3D ya se ajusta a las propiedades de los polímeros de impresión.

## Conclusiones

El proyecto tiene dos particularidades, la primera es que se deja un análisis de producción de la maquina con el cual una persona que quiera construir la maquina pueda elegir la opción que más se les adapte a sus necesidades, la segunda particularidad es que a la maquina se le pueden fabricar gran parte de piezas por medio de la impresión 3D.

Con la recolección de información para la fundamentación del diseño de la maquina se logró reducir opciones dejando así las de mayor relevancia, culminando esa labor con una matriz de decisión para definir el enfoque funcional y operacional de la maquina extrusora.

Continuando con el desarrollo del diseño de planteo que la máquina debería ser competente para extruir dos polímeros (ABS y PLA), así como también permitir el acople de diferentes boquillas en este caso una de 1.75 mm y una de 3 mm, estas dimensiones correspondientes a los diámetros de filamento más comerciales en la industria de impresión 3D. En el diseño de los elementos que conforman la maquina extrusora se aseguró que el factor de seguridad fuese superior o igual a 1.2 esto como medida de garantizar un buen diseño.

La última instancia del diseño se basó en la verificación de los elementos de mayor importancia para lo cual se implementó el análisis de elementos finitos en el software SolidWorks, aplicando análisis estático y térmico a los elementos de mayor esfuerzo en la máquina, estos elementos fueron el husillo, el cilindro y la tolva a la cual no se le hizo análisis térmico debido a que en esa parte de la maquina no se manejan altas temperaturas. Los análisis fueron satisfactorios ya que los materiales usados para cada elemento cumplieron con los límites estipulados en la simulación.

El análisis de costos de la maquina nos deja un presupuesto relativamente bajo, esto debido a que se usaron materiales de fácil acceso en el mercado, además muchos componentes pueden

ser fabricados con impresión 3D. Si se desea reducir aún más el costo de fabricación se puede buscar opciones equivalentes o que cumplan con el diseño un ejemplo de esto sería la tolva a la cual se le puede cambiar su material de fabricación por uno menos costoso ya que la tolva no está sometida a grandes esfuerzos.

## Recomendaciones

El diseño de la maquina está enfocado en filamento para impresoras 3D con diámetros de 1.75 y 3 mm, por lo que si se desea extruir otro diámetro se deben realizar ajustes al diseño y diseñar la boquilla correspondiente. Así como también si se desea trabajar con materiales diferentes al ABS o PLA, se debe analizar el husillo y el cilindro debido a que los polímeros para extrusión trabajan a diferentes temperaturas, por lo cual se debe realizar un análisis térmico para verificar que cumplan los materiales de fabricación de las piezas y tenga un buen desempeño.

Con respecto a la alimentación de materia prima se debe tener en cuenta la capacidad de la tolva y no excederla ya que esto repercute en posible mal funcionamiento de la máquina, esto debido a que se puede presentar atascamientos en la alimentación del polímero, lo que se verá reflejado en posible rozamiento de la camisa y el husillo generando desgaste y daños de los mismos.

El control de las variables en la extrusora está abierto a cambios ya que se pueden adicionar más elementos como lo es un sensor de presión en el cilindro el cual ayudara a verificar estado óptimo de extrusión como también mal funcionamiento del plato rompedor y filtros evitando así que ocurran fallas mayores en la máquina. La máquina también se le puede adicionar un controlador programable con el fin de centralizar todas las funciones del equipo y mostrarlas en una única pantalla para comodidad del operario.

## Referencias

- Altinkaynak, A., Gupta, M., Spalding, M. A., & Crabtree, S. L. (2011). Melting in a single screw extruder: Experiments and 3D finite element simulations. *International Polymer Processing*, 26(2), 182–196. <https://doi.org/10.3139/217.2419>
- Barbosa Paredes, J. F. (2017). Diseño de una maquina extrusora de plastico para los productores de manguera de ocaña. *Tesis*.
- Brito Barra, R. N. (2017). Diseño de extrusora de filamento para impresión 3d a partir de plásticos reciclados, 222.
- Cengel, yunus a. (2007). Tranferencia de calor y masa tercera edicion.
- Cifuentes, R. (2011). Diseño de una maquina extusora para la empresa plastik de occidente.
- Cristobal, J., Montealegre, Z., Luis, R., & González, F. (2015). Diseño De Una Extrusora Para Filamento De Impresión 3D.
- Duigou, A. Le, Barbé, A., Guillou, E., & Castro, M. (2019). 3D printing of continuous fl ax fi bre reinforced biocomposites for structural applications. *Materials & Design*, 180, 107884. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107884>
- Electronics, D. (2019). Catalogo virtual DELTA.
- Ferràndiz, S., Juárez, D., Mengual, A., & Miròn, V. (2017). Manufacturing and characterization of 3D printer filament using tailoring materials. *Procedia Manufacturing*, 13, 888–894. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.151>
- Flórez-Solano, E., García-León, R. A., & Sanchez-Ortiz, E. (2017). Diseño de un sistema

- alimentador para un horno rotatorio en la producción de fosfato en norte de santander. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 1(29), 70–80. [https://doi.org/ISSN: 1692-7257](https://doi.org/ISSN:1692-7257)
- Flórez, E., García-León, R. A., & Escobar, M. (2017). Modelo de equipo de prensado tipo palanca, para mejorar la producción de queso en la provincia de Ocaña. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2(28), 140–149.
- Freddy M. Calupiña Gualoto. (2015). Diseño y construcción de una trituradora y extrusora para la producción de hilo plástico empleado en impresoras 3D.
- G., R., J., B. Y., & Nisbett., K. (2017). *Mechanical Engineering Design de Shigley Ninth Edition*.
- García-León, R. A., Bohorquez-Niño, A., & Barbosa-Paredes, J. F. (2019). Design of an extrusion machine for the manufacture of plastic tubes. *Journal of Physics: Conference Series*, 1257, 12006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1257/1/012006>
- García-León, R. A., Florez Solano, E., & Pérez Rojas, E. (2015). Diseño de una máquina amasadora y laminadora automática de masa para pan. *Revista Ingenio UFPSO*, 8(1), 59–71.
- García-León, R. A., & Pérez Rojas, E. (2017). Analysis of the amount of heat flow between cooling channels in three vented brake discs. *Ingeniería Y Universidad*, 21(1), 71–96. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu21-1.aahf>
- García-León, R. A., & Suarez Castrillón, S. (2016). Diseño de un prototipo de sembradora mecánica de granos, alternativa agrícola. *Ingenio UFPSO*, 12(2011–642X), 33–40.
- Gomez, J. G., & Bedoya, J. G. (2007). Diseño de una extrusora para plásticos, 121.
- Goutham, R., Veena, T. R., & R, S. P. K. (2018). ScienceDirect Study on mechanical properties of recycled Acrylonitrile Butadiene Styrene ( ABS ) blended with virgin Acrylonitrile

- Butadiene Styrene ( ABS ) using Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*, 5(11), 24836–24845. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.282>
- Guan, X., Hwang, K., Lee, D., Kim, T., & Kim, N. (2018). Applied Surface Science Enhanced mechanical properties of self-polymerized polydopamine- coated recycled PLA filament used in 3D printing. *Applied Surface Science*, 441, 381–387. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.257>
- Lanzotti, A., Martorelli, M., Maietta, S., Gerbino, S., Penta, F., & Gloria, A. (2019). A comparison between mechanical properties of specimens 3D printed with virgin and recycled PLA. *Procedia CIRP*, 79, 143–146. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.030>
- Maldonado, C. M. C. (2011). Diseño de un sistema de extrusion-peletizado para el proesamiento de residuos plasticos para la empresa minicipal de la ciudad de cuenca EMAC.
- Manuel, V., Luna, J., & Valadez, G. (2016). Elaboración de filamentos de pla, 17–21.
- Mena, J. E. C. J. A. (2018). diseño de una maquina extrusora de filameno termoplastico alimentada por desecho plasticos.
- Mexpolímeros. (2019). Análisis de Contracciones y Deformaciones.
- Morales, P. A. G., & Castillo, J. F. B. (2006). Metodologia para el diseño de tornillos de maquinas extrusoras monohusillo.
- Mott, R. I. (2006). Diseño de elementos de maquinas cuarta edicion.
- Muñoz, J. A. C. (2008). Diseño y automatizacion de maquina extrusora para reciclaje plastico.
- Ortiz Abata, C. F. (2018). Departamento de ciencias de la energía y mecánica.

- Outline, C., Beam, E., & Composites, I. (2019). Processing of Poly ( Lactic Acid ).  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814472-5.00009-1>
- Paredes, J. F. B. (2017). Diseño de una maquina extrusora de plastico para los productores de manguera de ocaña.
- Peinado, V., Castell, P., García, L., & Fernández, A. (2015). Effect of extrusion on the mechanical and rheological properties of a reinforced poly(lactic acid): Reprocessing and recycling of biobased materials. *Materials*, 8(10), 7106–7117. <https://doi.org/10.3390/ma8105360>
- Poudel, B., & Poliakova, V. (2015). How to make Portable Homemade Filament Extruder.
- Sfrtooling. (2019). Catalogo virtual SFR Tooling.
- SKF. (2015). Selección de Rodamientos. *Catalogo SKF Rodamientos*, 1382.
- Solutions, R. M. C. (2019). Rhino Motion Controls, (847), 1–6.
- Throne, J. (2017). *16 Thermoforming*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39040-8/00016-X>
- Urrego, J. S. M., & Escobar, L. F. R. (2008). Modelacion parametrica y manufactura de mezcladores para extrusion de termoplasticos utilizando sistemas CAD-CAM.
- Vargas, R., Santiago, R., & Patiño, M. (2008). Diseño y Construcción de un Controlador de Temperatura Programable para una Máquina Extrusora, *40*(2).
- Woern, A. L., McCaslin, J. R., Pringle, A. M., & Pearce, J. M. (2018). RepRapable Recyclebot: Open source 3-D printable extruder for converting plastic to 3-D printing filament. *HardwareX*, 4, e00026. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2018.e00026>
- Ximena, M. Il. R. (n.d.). Diseño y Construcción de una Máquina Recicladora y Extrusora de

Plastico PLA Para El Observatorio Astronomico De Quito De La EPN, 8.

## Apéndice

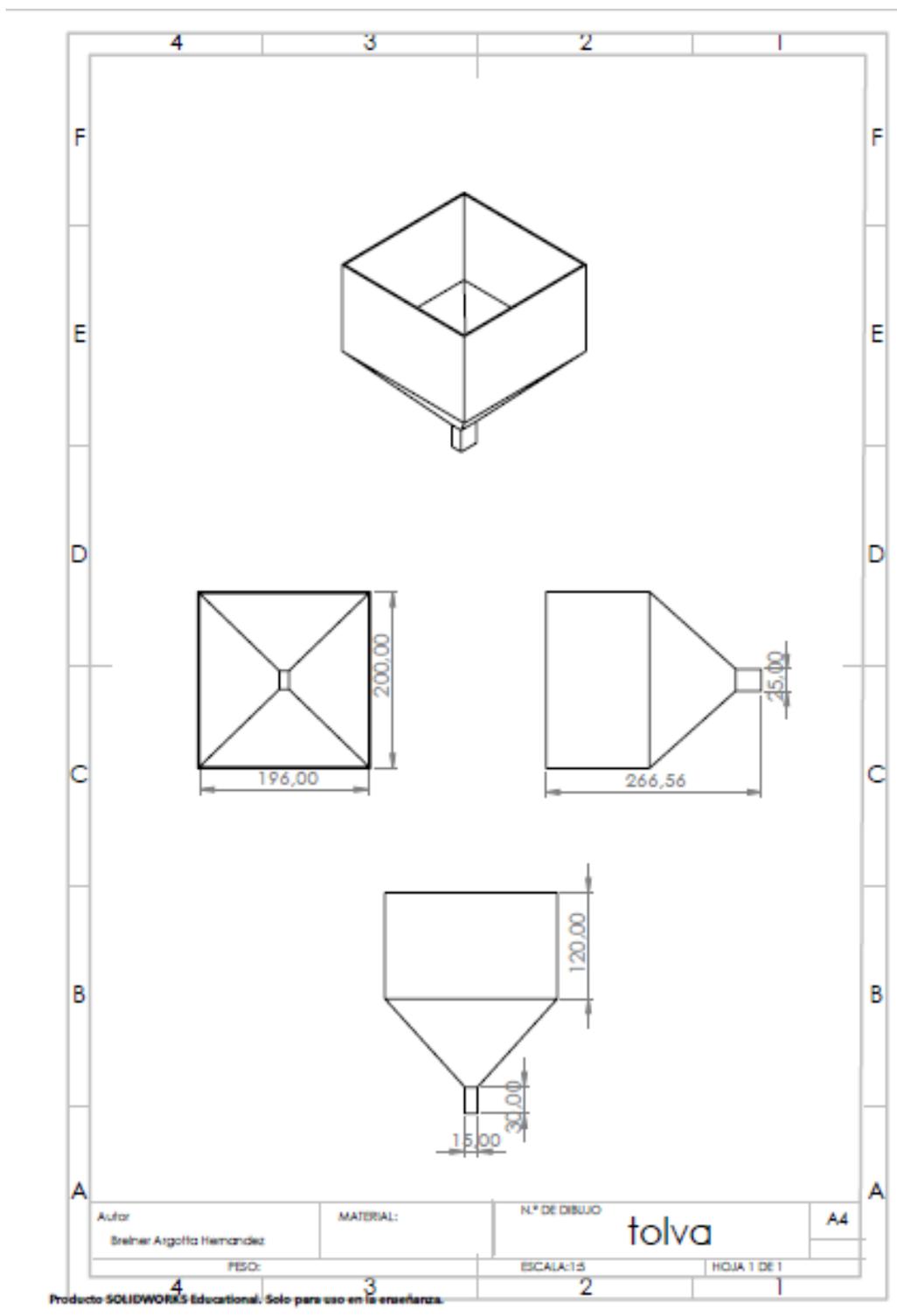
1	2	3	4	5	6	7	8
AISI No.	Treatment	Temperature °C (°F)	Tensile Strength MPa (kpsi)	Yield Strength, MPa (kpsi)	Elongation, %	Reduction in Area, %	Brinell Hardness
4130	Q&T*	205 (400)	1630 (236)	1460 (212)	10	41	467
	Q&T*	315 (600)	1500 (217)	1380 (200)	11	43	435
	Q&T*	425 (800)	1280 (186)	1190 (173)	13	49	380
	Q&T*	540 (1000)	1030 (150)	910 (132)	17	57	315
	Q&T*	650 (1200)	814 (118)	703 (102)	22	64	245
	Normalized	870 (1600)	670 (97)	436 (63)	25	59	197
	Annealed	865 (1585)	560 (81)	361 (52)	28	56	156
<b>4140</b>	<b>Q&amp;T</b>	<b>205 (400)</b>	<b>1770 (257)</b>	<b>1640 (238)</b>	<b>8</b>	<b>38</b>	<b>510</b>
	Q&T	315 (600)	1550 (225)	1430 (208)	9	43	445
	Q&T	425 (800)	1250 (181)	1140 (165)	13	49	370
	Q&T	540 (1000)	951 (138)	834 (121)	18	58	285
	Q&T	650 (1200)	758 (110)	655 (95)	22	63	230
	Normalized	870 (1600)	1020 (148)	655 (95)	18	47	302
	Annealed	815 (1500)	655 (95)	417 (61)	26	57	197
4340	Q&T	315 (600)	1720 (250)	1590 (230)	10	40	486
	Q&T	425 (800)	1470 (213)	1360 (198)	10	44	430
	Q&T	540 (1000)	1170 (170)	1080 (156)	13	51	360
	Q&T	650 (1200)	965 (140)	855 (124)	19	60	280

\*Water-quenched

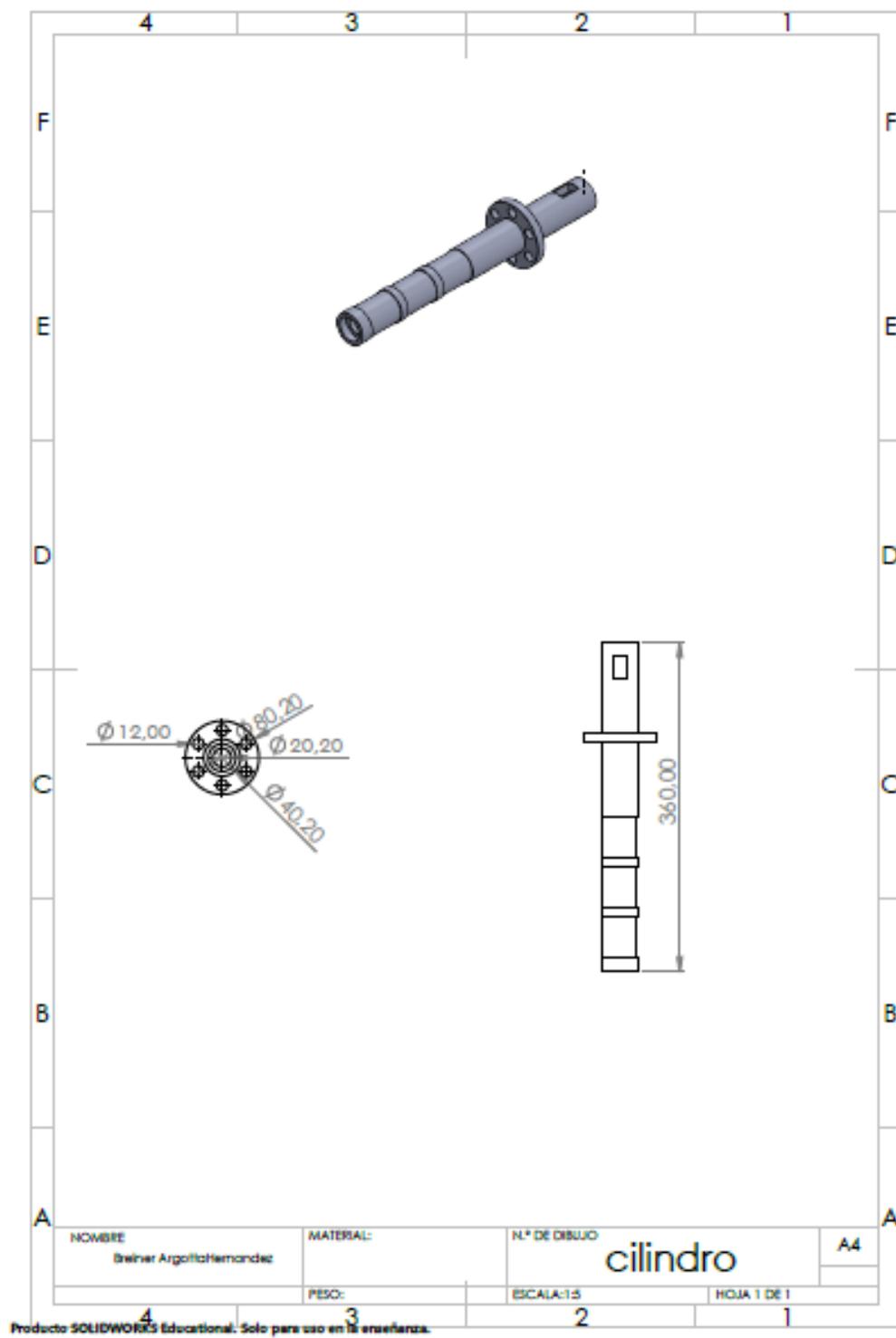
### Apéndice A. Características del acero AISI 4140. (G., J., & Nisbett., 2017)

1	2	3	4	5	6	7	8
UNS No.	SAE and/or AISI No.	Processing	Tensile Strength, MPa (kpsi)	Yield Strength, MPa (kpsi)	Elongation in 2 in, %	Reduction in Area, %	Brinell Hardness
G10060	1006	HR	300 (43)	170 (24)	30	55	86
		CD	330 (48)	280 (41)	20	45	95
G10100	1010	HR	320 (47)	180 (26)	28	50	95
		CD	370 (53)	300 (44)	20	40	105
G10150	1015	HR	340 (50)	190 (27.5)	28	50	101
		CD	390 (56)	320 (47)	18	40	111
G10180	1018	HR	400 (58)	220 (32)	25	50	116
		CD	440 (64)	370 (54)	15	40	126
<b>G10200</b>	<b>1020</b>	HR	380 (55)	210 (30)	25	50	111
		<b>CD</b>	<b>470 (68)</b>	<b>390 (57)</b>	<b>15</b>	<b>40</b>	<b>131</b>
G10300	1030	HR	470 (68)	260 (37.5)	20	42	137
		CD	520 (76)	440 (64)	12	35	149
G10350	1035	HR	500 (72)	270 (39.5)	18	40	143
		CD	550 (80)	460 (67)	12	35	163
G10400	1040	HR	520 (76)	290 (42)	18	40	149
		CD	590 (85)	490 (71)	12	35	170
G10450	1045	HR	570 (82)	310 (45)	16	40	163
		CD	630 (91)	530 (77)	12	35	179
G10500	1050	HR	620 (90)	340 (49.5)	15	35	179
		CD	690 (100)	580 (84)	10	30	197
G10600	1060	HR	680 (98)	370 (54)	12	30	201
G10800	1080	HR	770 (112)	420 (61.5)	10	25	229
G10950	1095	HR	830 (120)	460 (66)	10	25	248

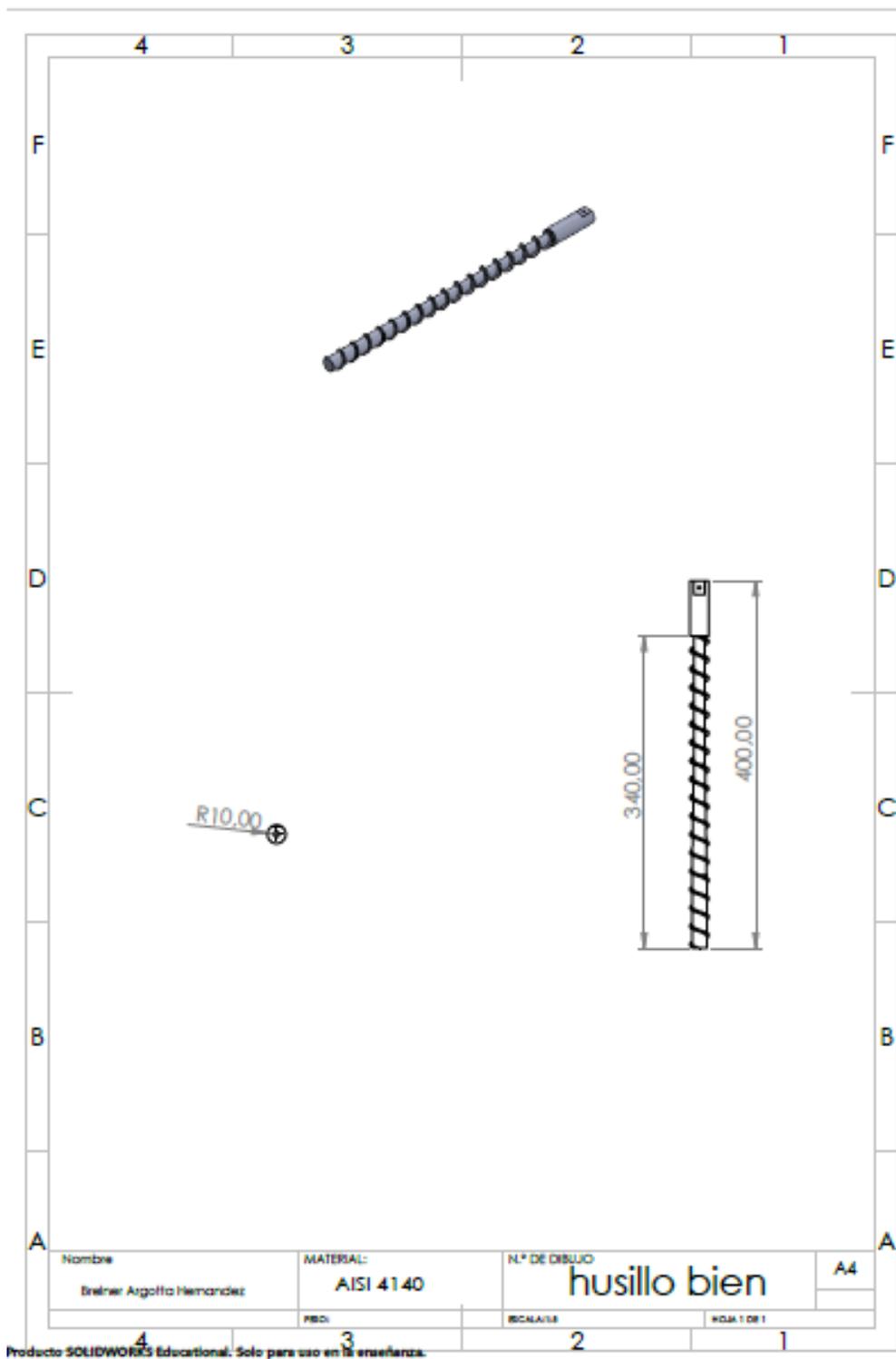
### Apéndice B. Característica acero AISI 1020 CD. (G. et al., 2017)



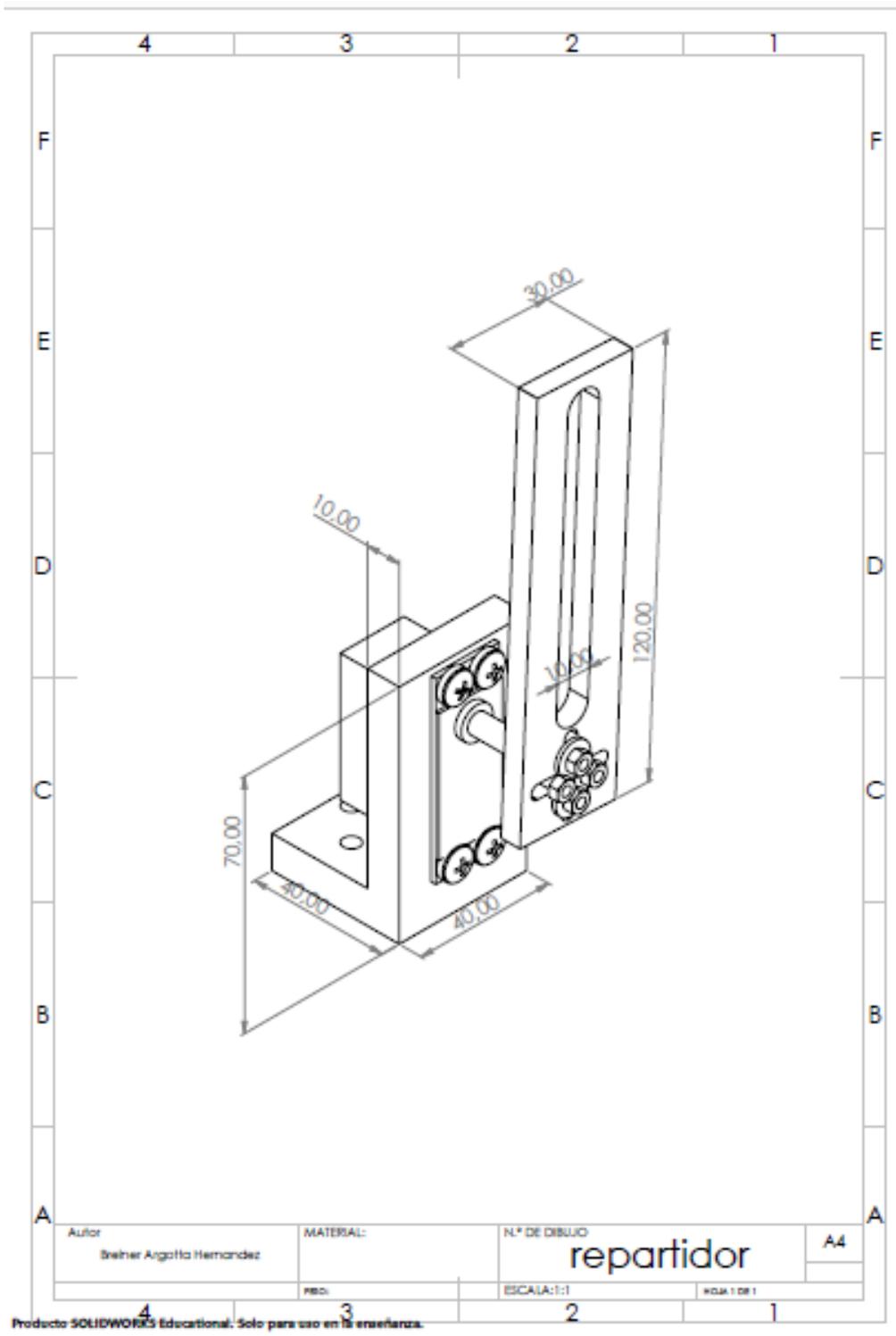
Apéndice C. Descripción de la tolva. Autor



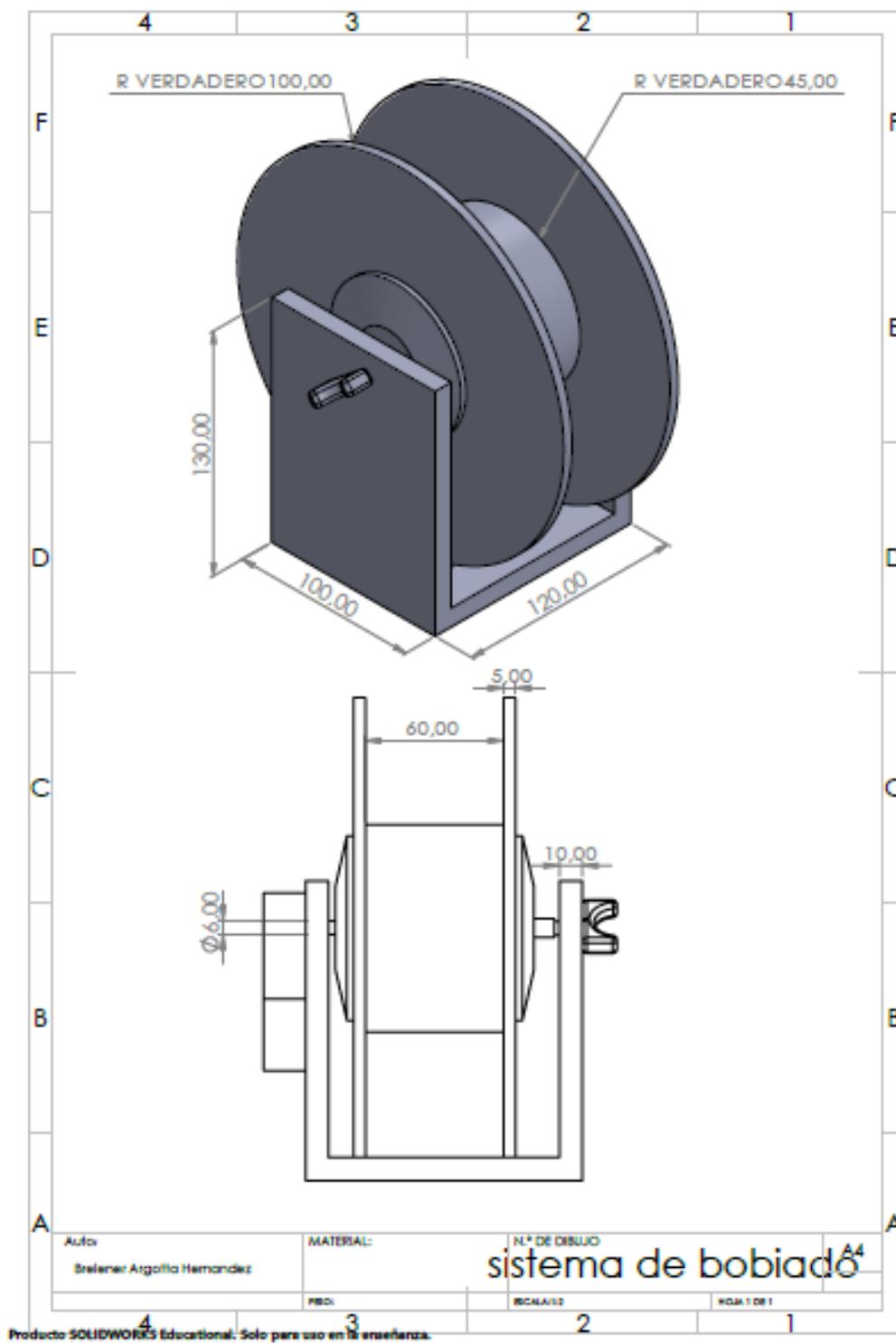
Apéndice D. Descripción del cilindro. Autor



Apéndice E. Descripción del husillo. Autor



Apéndice F. Descripción del repartidor de material. Autor



Apéndice G. Descripción sistema de bobinado. Autor