# Diseño de una máquina de termoconformados para la fabricación de filamento ABS Y PLA

## Design of a thermoforming machine for the manufacture of ABS and PLA filament

Ricardo Andrés García-León[1]
Breiner Argotta-Hernandez[2]
Wilder Quintero-Quintero[3]

[1] Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, (Colombia). Correo electrónico: ragarcial@ufpso.edu.co
orcid: https//orcid.org/0000-0002-2734-1425

[2] Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, (Colombia). Correo electrónico: bargottai@ufpso.edu.co
orcid: https//orcid.org/0000-0003-1403-6533

[3] Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, (Colombia). Correo electrónico: wquinteroq@ufpso.edu.co
orcid: https//orcid.org/0000-0003-3260-6923

Recibido: 31-05-2020 Aceptado: 28-10-2020

**Cómo citar:** García-León, Ricardo Andrés; Argotta-Hernandez, Breiner; Quintero-Quintero, Wilder (2020). Diseño de una máquina de termoconformados para la fabricación de filamento ABS Y PLA. *Informador Técnico, 85*(1), 34-51.
https://doi.org/10.23850/22565035.2865

## Resumen

Durante el proceso de impresión 3D, alrededor del 15 % del material utilizado es desperdiciado, debido a los soportes y bases para generar los prototipos, atribuyendo un problema para el ambiente y la economía de los usuarios. Actualmente, no existe una máquina de bajo costo con la que se pueda reciclar el filamento de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y ácido poliláctico o poliácido láctico (PLA) de las impresoras 3D, y así lograr disminuir los costos de operación de este tipo de máquinas que son de gran uso en sectores industriales para la fabricación de prototipos. Para el diseño de la máquina de termoconformados de material reciclado de ABS y PLA, se utilizaron teorías de diseño mecánico, transferencia de calor y análisis numérico para calcular y analizar los elementos más importantes. Teniendo en cuenta lo anterior, las industrias que utilizan este tipo de polímeros podrán reciclar y fabricar el material de impresión, optimizando, además, el proceso productivo, reduciendo los tiempos de entrega y los costos de impresión mediante el uso de esta máquina. Finalmente, se podrán incrementar las propiedades mecánicas y térmicas de nuevos materiales a través de la adición de otros similares.

***Palabras clave*:** ABS; PLA; termoconformado; temperatura; reciclaje; plástico.

## Abstract

During the 3D printing process, around 15 % of the material used is wasted due to the supports and bases to generate the prototypes, attributing a problem for the environment and the economy of the users. Currently, do not exist a machine of low cost with can recycle the ABS and PLA filament of 3D printers and, in this way, reduce the operating costs of this type of machine, which is widely used in different industrial sectors for the manufacture of prototypes. Theories of mechanical design, heat transfer, and numerical analysis were used to calculate and analyze the most important elements to design the thermoforming machine made of recycled ABS and PLA material. Taking this into account, the machine will reduce printing costs, benefiting industries that use this type of material, with which they will be able to recycle and manufacture the printing material,

reducing delivery times and costs, thus optimizing the production process. Finally, the mechanical and thermal properties of new materials will be increased through the addition of similar ones.

***Keywords:*** ABS; PLA; thermoformed; temperature; recycling; plastic.

# 1. Introducción

La extrusión es el proceso más utilizado en la industria para el procesamiento de plásticos, teniendo en cuenta que alrededor del 60 % del total de polímeros transformados en Colombia han pasado por algún proceso de extrusión (García-León; Bohorquez-Niño; Barbosa-Paredes, 2019). Asimismo, el desarrollo de prototipos de máquinas extrusoras ha dado ciertos pasos para la optimización de recursos y procesos (Cifuente, 2001; Gómez y Gutiérrez, 2007; Morales y Castillo, 2006; Muñoz, 2008; Paredes, 2017; Urrego y Escobar, 2008; Vargas, Santiago y Patiño, 2008). 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 *et al.*, 2019). En 1935 Paul Troster construyó la primera extrusora de termoplástico en Alemania (Ortiz, Acuña, 2018). Pero hasta el 2010, la fabricación de filamentos de polímeros fundidos fue utilizada para obtener sistemas de prototipos rápidos y de bajo costo. Por lo tanto, la extrusión es el proceso idóneo para la fabricación de filamento de impresión 3D (Fajardo; Cobos, 2011; Woern; McCaslin; Pringle; Pearce, 2018; Poudel, 2015).

La tecnología de impresión 3D permite una rápida y económica producción de dispositivos sin mecanizado ni herramientas, haciendo uso del diseño asistido por computadora (CAD) (Cruz; Boudaoud; Camargo; Pearce, 2020). El crecimiento de esta tecnología se ha acelerado 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) y, consecuentemente, aumentarán los desechos generados por la impresión, lo que afectará al ambiente y los costos de fabricación. Las impresoras 3D son fabricadas, en su mayoría, para trabajar con filamentos de material acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) o poliácido láctico o ácido poliláctico (PLA) debido a sus propiedades mecánicas y físicas, los cuales se manufacturan principalmente en dos diámetros estándares: 1,75 y 3,0 mm, que pueden ser transportados y empujados por la boquilla para ser extruidos con facilidad (Luna; Valadez, 2016).

Por otra parte, el ABS es un termoplástico que presenta una estructura molecular amorfa con alta resistencia a sustancias químicas, abrasivos e impactos, siendo muy utilizado en la industria automovilística y en electrodomésticos para el hogar, aunque no es un material ecológico, puede reciclarse y reprocesarse, además, es fácil de moldear (Miròn; Ferràndiz; Juàrez; Mengual, 2017; Salim; Termiti; Saad, 2019). El PLA es un poliéster alifático termoplástico y biodegradable que es derivado de fuentes renovables ricas en almidón, como el maíz, la tapioca y la caña de azúcar, siendo un material amigable con el ambiente (Montealegre; González, 2015; Salim *et al.*, 2019).

Actualmente, varios trabajos han enfocado sus estudios en el reciclaje de termoplásticos como ABS y PLA; también, la adición de otro tipo de elementos o componentes para mejorar sus propiedades mecánicas, físicas y estructurales (Cisneros-López *et al.*, 2020; Cruz *et al.*, 2020). Rigoussen; Raquez; Dubois; Verge (2019) reforzaron las propiedades mecánicas del PLA y el ABS utilizando el cardanol como compatibilizador, haciendo uso del proceso de extrusión. Los resultados demuestran que los materiales tuvieron buena compatibilidad y lograron mejorar la resistencia al impacto en un 172 %. Lanzotti *et al.* (2019) realizaron experimentos sobre el PLA virgen y reciclado para comprobar la diferencia de las propiedades mecánicas a través de tres diferentes procesos de reciclaje. Por su parte, Goutham, Veena y Prasad (2018) caracterizaron y optimizaron parámetros, como la densidad de relleno y el material de construcción del ABS, mezclado con material reciclado. Realizaron pruebas de flexión y flexión en tres puntos para determinar las propiedades mecánicas de la muestra obtenida por impresión 3D.

En el presente trabajo de investigación se muestran los principales cálculos de diseño mecánico y transferencia de calor, para establecer un prototipo de máquina de termoconformado para el reciclaje de material ABS y PLA de bajo costo, derivado de residuos generados durante el proceso de impresión 3D, con lo que se logrará una optimización de los desperdicios producidos por este material y de los recursos financieros de las empresas que utilizan esta clase de sistemas para generar prototipos. Además, se podrán realizar pruebas de diseño de experimentos con mezclas, para optimizar las propiedades mecánicas y estructurales de este tipo de materiales.

## 2. Materiales y métodos

El diseño de esta investigación es documental, porque que se relacionan diversos fenómenos físicos para lograr un diseño basado en los requisitos del cliente, utilizando fundamentos teóricos y un enfoque de investigación cuantitativo, de esta forma, se tendrán en cuenta datos y valores aplicables a la realidad para una futura construcción de la máquina de termoconformado. Además, se tuvo en cuenta la metodología del proceso de diseño mecánico para establecer las especificaciones y requisitos de los posibles clientes, y, de esta manera, lograr la idoneidad y la confiabilidad de la máquina para la extrusión de plástico basados en las teorías, simulaciones y referencias similares (Ullman, 2003). La Figura 1 muestra la metodología aplicada en el análisis de diseño numérico de la máquina de termoconformado.

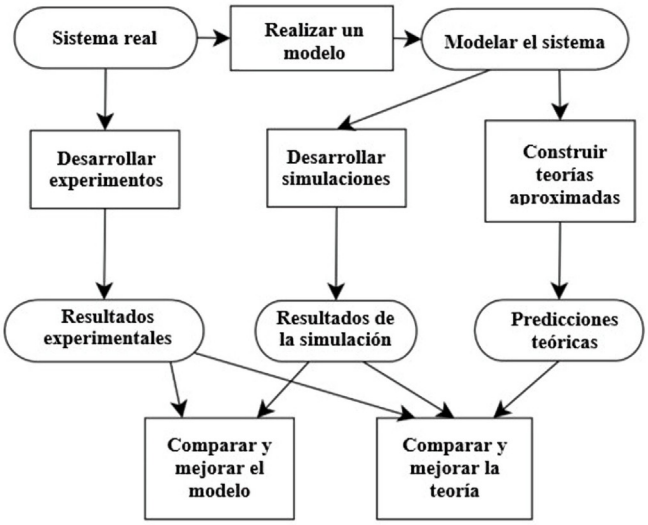



*Figura 1.* Metodología aplicada
Fuente: elaboración propia.

El proceso de extrusión inicia 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 hace 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. El material extruido requiere un proceso de enfriamiento para solidificar la pieza y obtener el perfil deseado al final del proceso de termoconformado (Mena, 2018). Para realizar el análisis numérico en los elementos que soportan la mayor cantidad de esfuerzos, se utilizó *SolidWorks Flow Simulation*, debido a que resuelve las ecuaciones de NavierStokes, que son formulaciones de las leyes de conservación de la masa, la cantidad de movimiento y la energía (Sobachkin; Dumnov; 2014; Thuresson, 2014).

La Figura 2 muestra las etapas del proceso de extrusión:

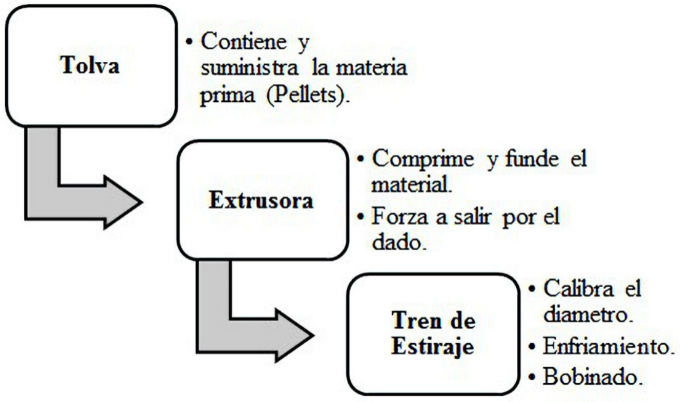



*Figura 2*. Etapas del proceso de extrusión
Fuente: elaboración propia.

Los componentes principales de una extrusora para la fabricación de filamento de impresión 3D son: tolva, tornillo extrusor, cilindro, sistema de calentamiento, dado y sistema de potencia (Montealegre; González, 2015). Para estos cálculos, se utilizarán teorías de diseño de máquinas teniendo en cuenta el libro *Shigley* (Budynas; Nisbett, 2017). Por otra parte, para el cálculo de la resistencia se requiere un análisis térmico, se utilizaron teorías de transferencia de calor haciendo uso del libro (Cengel, 2007).

# 3. Análisis y discusión

Para dar inicio con el proceso de diseño, se llevó a cabo la matriz de decisión de los dos modelos de husillos para seleccionar un diseño ganador acorde a los requisitos del mercado, las necesidades, especificaciones de los clientes y los investigadores, para lo cual se aplicó una calificación de 0 a 10 como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1.**
*Matriz de decisión*

| Criterio | Porcentaje de importancia (%) | Máquina 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 |
| **TOTAL** | - | - | 14.4 | - | 10.5 |

Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta lo anterior, la Figura 3 muestra el diseño ganador de la máquina de termoconformado con cada uno de los elementos que lo conforman.

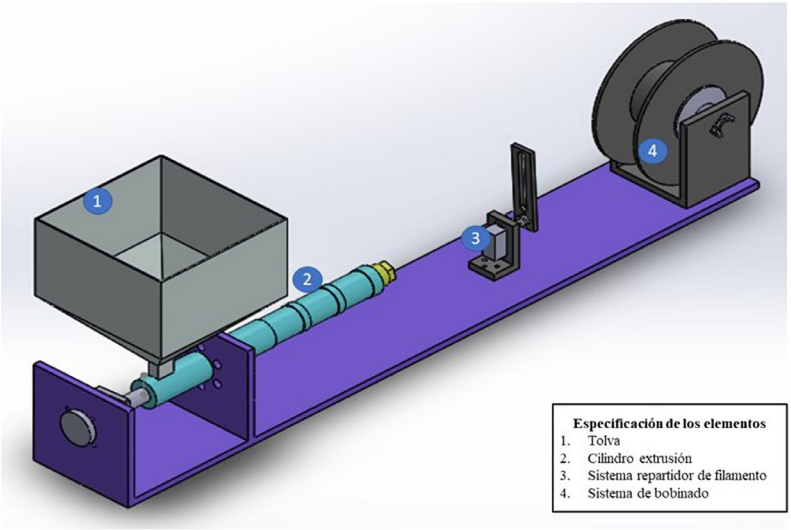



*Figura 3.* Diseño conceptual ganador de la máquina extrusora
Fuente: elaboración propia.

## 3.1. Diseño de elementos

Teniendo en cuenta el diseño ganador, se procedió a calcular cada uno de los elementos que conforman la máquina como se detalla a continuación:

### 3.1.1. Tolva

Para mantener las dimensiones de la máquina, la tolva tiene forma piramidal con las siguientes dimensiones: alto 25 cm, un área superior de 20×20 cm y un área inferior de 1.5×2.5 cm como se muestra en la Figura 4, la cual podrá soportar un volumen total de 6286.19 $cm^3$. Adicionalmente, la capacidad de la tolva se determinó con el peso de cada hojuela de ABS o PLA. El material de la tolva es un acero inoxidable grado AISI 304, con un espesor de 2.0 mm para garantizar la resistencia al calor y la deformación durante el proceso de termoconformado.

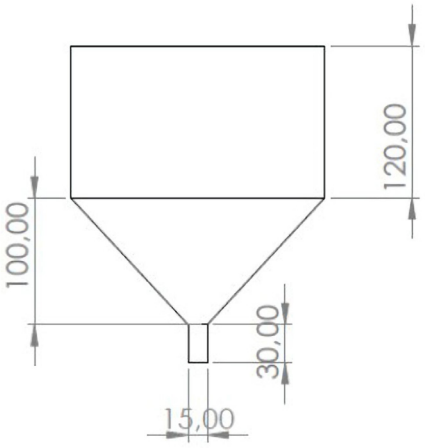



*Figura 4.* Diseño de la tolva
Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, se tuvo en cuenta el volumen promedio de las hojuelas de 0.075 $cm^3$ y, de esta forma, 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 espesor, obteniendo que la capacidad de la tolva es de 7,6 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 (Paredes, 2017) (Argotta-Hernandez, 2019).

## 3.1.2. Cabezal de extrusión

El cabezal de extrusión consta del plato rompedor, filtros y la matriz o dado. El plato rompedor tiene como función mezclar el material y romper el patrón de flujo en espiral que genera el husillo. En este elemento, se ubican los filtros al final del tornillo extrusor, los cuales atrapan las impurezas que pueden 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 realizó teniendo en cuenta el catálogo virtual SFR *tooling*, para lo cual, solo se requirió el diámetro interno de la camisa del cabezal. De esta forma, se determinó que el área abierta del plato es de 0,13 $pulg^2$ = 83,87 $mm^2$. Para la selección de la malla se utilizaron las especificaciones de mallas de acero inoxidable de la empresa AmbicaGroup, donde se seleccionaron las mallas de denominación 60×60, 80×80 y 120×120. A este respecto, la matriz de extrusión es un elemento intercambiable en la máquina. En este caso, se diseñó una matriz para extruir filamento de 1,75 mm y otro para 3 mm, además, se debe revisar el índice de contracción del material, ya que este influye en el diámetro final del perfil a extruir (Mexpolimeros, 2019).

## 3.1.3. Husillo

Es la pieza fundamental de la máquina extrusora, de este depende la producción, aplicación de la extrusora, velocidad de giro y diseño del cabezal de extrusión (Brito, 2017).

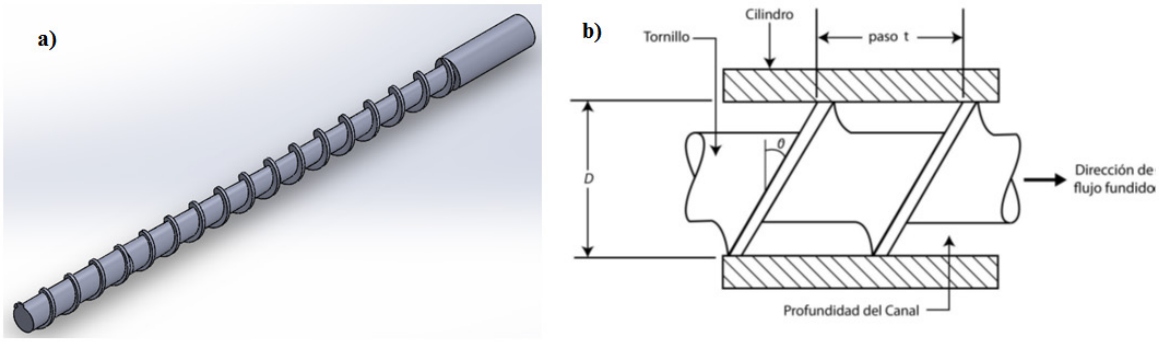



*Figura 5.* a) Diseño geométrico del husillo y b) Partes del husillo
Fuente: elaboración propia.

La elección de los parámetros del husillo depende de los materiales a trabajar (ABS y/o PLA). De esta manera, se seleccionó un tornillo para uso general como se muestra en la Figura 5a, es decir, que permita trabajar ambos materiales sin perder eficiencia. Para ello, se definen tres zonas en el husillo (alimentación, compresión y dosificación), y se contará con un (1) solo canal, con paso constante y profundidad variable para cada zona.

La relación del largo (L) y el diámetro (D) del husillo es de gran importancia, porque cuando 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, 2017). Para la extrusión de cables o filamentos, se requiere una presión de extrusión mayor, entonces el grado de compresión utilizado debe ser bajo, asimismo, 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 (Brito, 2017).

Los parámetros seleccionados para el husillo están basados en las medidas finales de la máquina y se mantienen los parámetros anteriormente mencionados acorde con la Figura 5b. Por lo tanto, se establecieron los siguientes parámetros para la máquina: largo total del husillo (Lt) = 400 mm; largo del husillo (L) = 340 mm; largo del vástago del husillo (le) = 60 mm; diámetro del husillo (D) = 20 mm; relación L/D = 17; número de filetes = 17 y el grado de compresión (i) = 2. Teniendo en cuenta teorías de diseño, se llevaron a cabo los siguientes cálculos adicionales: paso del husillo (t) = 20 mm; ancho del filete (e) = 2 mm; profundidad del canal en la zona de alimentación (h1) = 4 mm; profundidad del canal en la zona de dosificación (h3) = 2 mm; el diámetro del alma (d) = 12 mm; ángulo de la hélice (φ) = 17,6°; longitud de la zona de alimentación (La) = 140 mm; longitud de la zona de compresión (Lc) = 120 mm y la longitud de la zona de dosificación (Ld) = 80 mm.

### 3.1.4. Boquilla

La Figura 6 muestra la geometría interna de la boquilla, la cual tiene una sección cónica que se encarga de reducir el diámetro del cilindro al diámetro a obtener. Para la parte exterior, se requiere conocer el material de fabricación, de manera que, se pueda calcular el espesor mínimo de pared. La boquilla será fabricada con latón 360, debido a que es un material fácil de maquinar y con buena conductividad térmica, con esfuerzo admisible de 310 MPa.

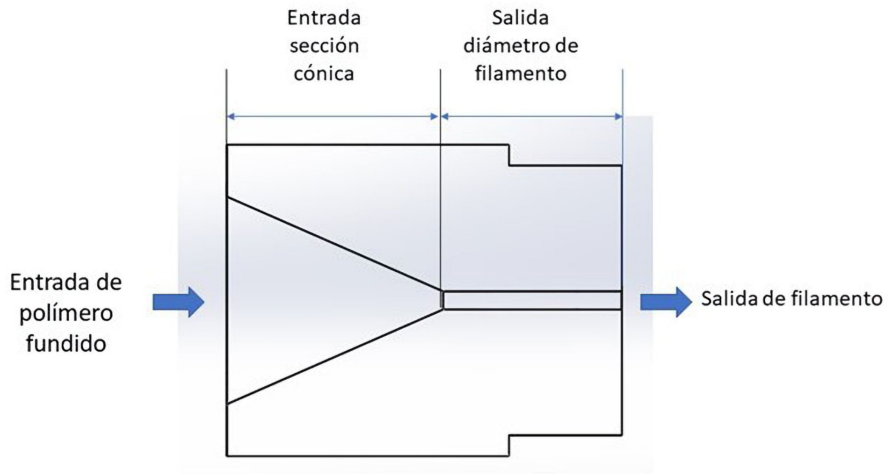



*Figura 6.* Geometría de la boquilla
Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se definió mediante teorías de diseño un espesor de 5 mm, con lo cual se tiene un factor de seguridad de 1,45, estableciendo las siguientes medidas de diseño: diámetro interno de entrada = 20 mm, diámetro interno de salida = 2 mm, diámetro exterior = 30 mm, largo de la sección cónica 20 mm y el largo de la sección de salida = 15 mm.

La Figura 7 muestra el cálculo de la producción, por lo cual, se registraron varias velocidades para encontrar la que mejor se ajuste a los dos materiales y a las diferentes boquillas.

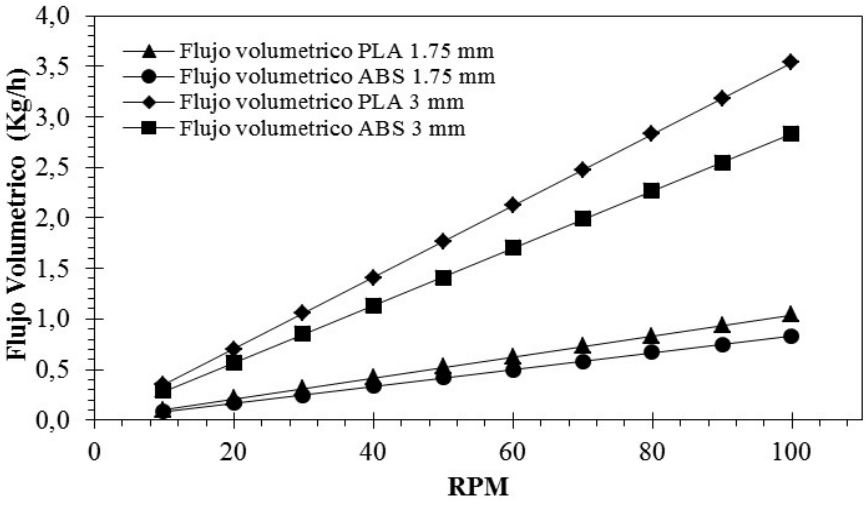



*Figura 7.* Pendiente de crecimiento del flujo de las boquillas
Fuente: elaboración propia.

La viscosidad efectiva es determinada en función de la velocidad de cortadura por medio de diagramas de diseño para diferentes materiales en función de la temperatura de trabajo. La velocidad de cortadura dependerá de la forma geométrica del canal del husillo (Paredes, 2017), para lo cual se obtuvo un valor de $\gamma$=836 [1/s]. De acuerdo con la velocidad de cortadura, es necesario obtener la viscosidad efectiva de cada material a trabajar (ABS o PLA). De esta manera, se usó la viscosidad efectiva de mayor magnitud para obtener la presión máxima de trabajo que puede presentarse en 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. Para el 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, de acuerdo con (Altinkaynak; Gupta; Spalding; Crabtree, 2011), bajo las siguientes condiciones: velocidad de cortadura igual a 836 [1/s] y viscosidad efectiva de 400 MPa.

Por otra parte, la presión máxima en el husillo se genera cuando no se registra movimiento de caudal en el interior del cilindro, obteniendo un valor de 181,3 MPa. Asimismo, la presión en la boquilla es de 106,43 MPa. La potencia de trabajo del husillo debe ser necesaria para girar el husillo a las revoluciones por minuto (rpm) requeridas para extrusión del material, la cual depende de la potencia necesaria para desplazar el material y la energía consumida por la holgura del cilindro, según los resultados obtenidos por (Brito, 2017), obteniendo un valor de 253.53 W = 0,34 HP. A partir del dimensionamiento del husillo, se seleccionó un motor que cumple con los criterios y brinde cierto margen de seguridad. El motor seleccionado fue un motorreductor de alto torque que trabaja a 12 V Direct Current. (DC) y entrega una velocidad de 100 rpm. Para este elemento, se seleccionó el acero AISI 4140 como material, por su composición química de cromo y molibdeno que le confiere al material alta dureza y resistencia a la corrosión a temperaturas de más de 540 ºC, sin perder sus propiedades mecánicas.

## *3.1.5. Cilindro*

Para el diseño del cilindro se consideró la holgura entre el filete helicoidal y el barril, y el diámetro del husillo. Primero se realizó el cálculo del diámetro interior del cilindro deseado. Este cilindro debe cubrir la zona útil del husillo, por lo que tendrá un largo mínimo de 340 mm como se muestra en la Figura 8. El espesor mínimo

que debe tener el cilindro para soportar las presiones requiere conocer el material del cilindro, por lo tanto, 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. 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 que se obtiene así, mediante un factor de seguridad con los siguientes valores: $F_{Scilin}$ = 2,13 y $F_{Spf}$ = 1,81. Para la fabricación del husillo, se usará una barra de 42 mm de diámetro por un largo de 500 mm, lo que equivale aproximadamente en barras comerciales en el país a un diámetro de 1-5/8".

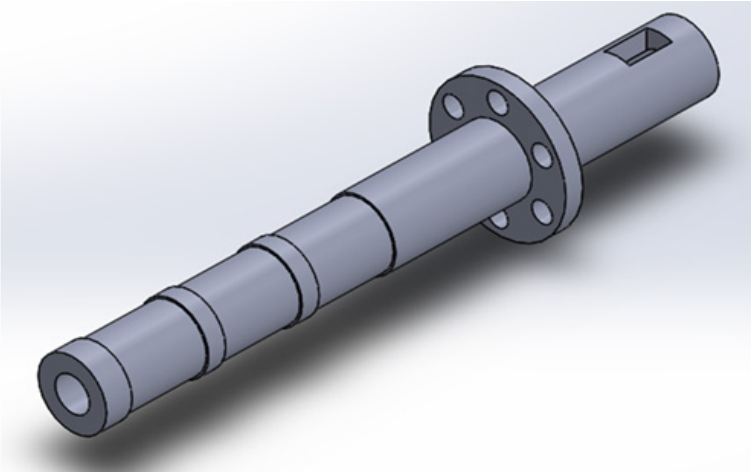


*Figura 8.* Diseño conceptual del cilindro
Fuente: elaboración propia.

## 3.1.6. Sistema de calefacción

La potencia requerida para las resistencias eléctricas se calculó teniendo en cuenta que la potencia es función del calor necesario generado por las resistencias, transferido al cilindro y al husillo. Para el diseño se tomó que el flujo de calor es unidimensional, con régimen estacionario, como se muestra en la Figura 9:

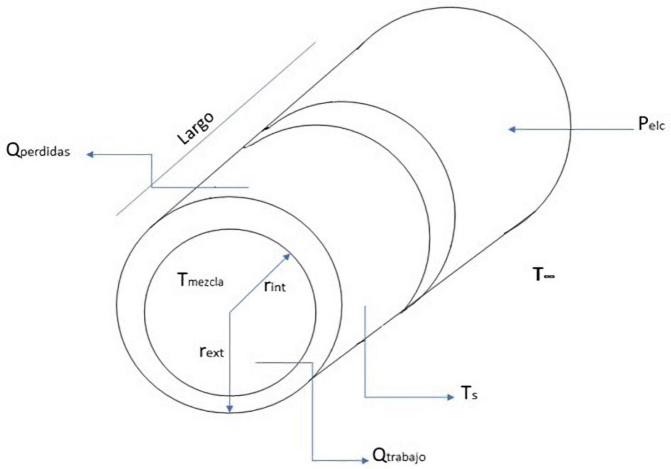



*Figura 9.* Modelo del cilindro y sistema de calefacción
Fuente: elaboración propia.

La Figura 10 muestra el bosquejo del sistema de calefacción, 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 (conducción, convección y radiación), la cual debe ser igual a la potencia eléctrica que debe entregar el calentador.

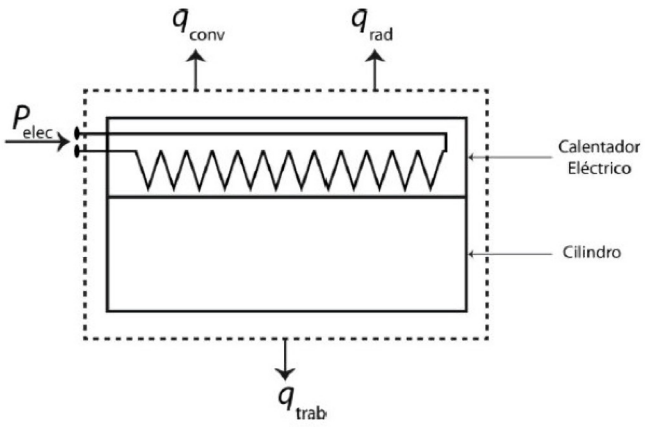



*Figura 10.* Bosquejo del sistema de calefacción
Fuente: elaboración propia.

Definiendo la ecuación general para la potencia requerida tenemos como resultado la Ecuación 1:

$$q_{elec} = q_{trabajo} + (q_{conv} + q_{rad}) = q_{trabajo} + q_{perd} \quad (1)$$

Dónde: $q_{elec}$ es la potencia que entrega el calentador eléctrico [W], $q_{conv}$ es la potencia perdida hacia el ambiente mediante convección [W], $q_{rad}$ es la potencia perdida hacia el ambiente mediante radiación [W], $q_{trabajo}$ es la potencia necesaria para llevar la mezcla a la temperatura de trabajo [W], y $q_{perd}$ es la potencia perdida hacia el ambiente [W]. Al calcular la potencia de trabajo, se necesita conocer las temperaturas de operación, y como se pretenden emplear dos materiales, se tienen dos temperaturas diferentes de operación, para el ABS será de 230 °C y para el PLA de 190 °C. Para ambos la temperatura ambiente es de 22 °C. Dado que los polímeros son amorfos (Brito, 2017), 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 Ecuación 2 para calcular el calor de trabajo:

$$q_{trabajo} = \dot{m} * C_p * (T_m - T_i) \quad (2)$$

Dónde: ṁ es el flujo másico de material [kg/s], $C_p$ es el calor específico del material [J/kg°C], $T_m$ es la temperatura de la mezcla [°C] y  es la temperatura ambiente [°C], obteniendo los resultados que se evidencian en la Tabla 2:

**Tabla 2.**
*Resultado de calor de trabajo para diferentes boquillas*

| Variable | Descripción | Valor | Unidad |
|---|---|---|---|
| **qtABS - 1.75** | Calor de trabajo ABS con boquilla de 1,75 mm | 87,84 | W |
| **qtPLA - 1.75** | Calor de trabajo PLA con boquilla de 1,75 mm | 60,45 | W |
| **qtABS - 3** | Calor de trabajo ABS con boquilla de 3 mm | 298,99 | W |
| **qtPLA - 3** | Calor de trabajo PLA con boquilla de 3 mm | 205,84 | W |

Fuente: elaboración propia.

Para calcular las pérdidas al ambiente, se necesita calcular la resistencia térmica del sistema (Brito, 2017). 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 3 y 4.

$$R_{conv} = \frac{1}{h \times A_s} \quad (3)$$

$$R_{rad} = \frac{1}{A_s \times \varepsilon \times \sigma \times (T_s^2 + T_i^2) \times (T_s + T_i)} \quad (4)$$

Dónde: h es el coeficiente de transferencia de calor en convección natural [W/m$^2$ °C], $A_s$ es el área de la superficie expuesta a convección [m$^2$], $\varepsilon$ es la emisividad del material (0,865 para el AISI 1020 CD) [-], $\sigma$ es la constante de Stefan-Boltzmann = 5,6710$^{-8}$ [W/m$^2$k$^4$], $T_s$ es la temperatura absoluta de la superficie [K] y $T_i$ es la temperatura absoluta del ambiente [K].

Reemplazando en las ecuaciones, se tiene que: $R_{conv}$ = 2.43 - $R_{rad\text{-}ABS}$ = 1.83 - $R_{rad\text{-}PLA}$ = 2.1

La Tabla 3 muestra los cálculos de las pérdidas de calor por convección y radiación.

**Tabla 3.**
*Cálculo de las pérdidas por convección y radiación*

| Variable | Descripción | Valor | Unidad |
|---|---|---|---|
| **qPer - ABS - conv** | Pérdidas de calor por convección para el ABS | 81,48 | W |
| **qPer - PLA - conv** | Pérdidas de calor por convección para el PLA | 69,14 | W |
| **qPer - ABS - Rad** | Pérdidas de calor por radiación para el ABS | 1082 | W |
| **qPer - PLA - Rad** | Pérdidas de calor por radiación para el PLA | 80 | W |

Fuente: elaboración propia.

La potencia total que debe entregar la banda es la potencia de trabajo más las pérdidas y los datos son resumidos en la Tabla 4:

**Tabla 4.**
*Potencia total requerida*

| Variable | Descripción | Valor | Unidad |
|---|---|---|---|
| **qElc-ABS-D1.75** | Potencia total para el ABS con boquilla de 1,75 [mm] | 277,52 | W |
| **qElc-PLA-D1.7** | Potencia total para el PLA con boquilla de 1,75 [mm] | 209,59 | W |
| **qElc-ABS-D3** | Potencia total para el ABS con boquilla de 3 [mm] | 488,67 | W |
| **qElc-PLA-D3** | Potencia total para el PLA con boquilla de 3 [mm] | 354,98 | W |

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la tabla anterior, el valor máximo de potencia requerido es de 488,67 W correspondiente a la boquilla de 3 mm cuando se utiliza ABS. Este valor será el de referencia para la selección de las resistencias. Para este sistema, se emplearán tres resistencias calefactoras distribuidas en el cilindro para mantener una temperatura uniforme, cabe destacar que las resistencias se ubicarán en las secciones correspondientes a la transición y 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 W seguida de una de 250 W y, por último, una de 150 W.

## 3.1.7. Sistema de ventilación

Este sistema utilizará 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. En esta etapa 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 de este sistema se debe preseleccionar un ventilador, en este caso, un ventilador de 80×80×10 mm con una velocidad angular de 3000 rpm, haciendo uso de la Ecuación 5.

$$T = T_\infty + (T_0 + T_\infty)e^{-\frac{4hx}{\rho V_e D C_p}} \qquad (5)$$

Donde: $T_\infty$ es la temperatura ambiente [22 °C], $T_0$ es la temperatura de salida del filamento [°C], h es el coeficiente de convección [W/m$^2$K], $\rho$ es la densidad del material [kg/m$^3$], $V_e$ es la velocidad de salida del filamento de la boquilla [m/s], $D$ es el diámetro filamento [m], $C_p$ es el calor específico material [J/kg°C], y x es la posición a evaluar. Los resultados son resumidos en la Tabla 5:

**Tabla 5.**

*Temperatura a la salida de la boquilla*

| Variable | Descripción | Valor | Unidad |
|---|---|---|---|
| $T_{D1.75\text{-}ABS}$ | Temperatura a los 24 [cm] al salir de la boquilla de 1,75 [mm] para el ABS | 131,1 | °C |
| $T_{D3\text{-}ABS}$ | Temperatura a los 24 [cm] al salir de la boquilla de 3 [mm] para el ABS | 179,2 | °C |
| $T_{D1.75\text{-}PLA}$ | Temperatura a los 24 [cm] al salir de la boquilla de 1.75 [mm] para el PLA | 126,2 | °C |
| $T_{D3\text{-}PLA}$ | Temperatura a los 24 [cm] al salir de la boquilla de 3 [mm] para el PLA | 161,6 | °C |

Fuente: elaboración propia.

De los resultados se observa que, el filamento al pasar por el ventilador reduce su temperatura, pero la mantiene arriba de la temperatura de transición vítrea del ABS y PLA (115 °C y 60 °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 en óptimas condiciones en el sistema de bobinado de la extrusora. A partir de los cálculos realizados anteriormente, se tiene que el sistema contará con tres ventiladores en serie. Se eligió: un ventilador de la marca QG de 80×80×25 mm, el cual tiene un alto rendimiento entregando 47 CFM de flujo a 3000 rpm y funcionando a corriente continua de 12 V.

## 3.1.8. Selección del repartidor de filamento

Para seleccionar el repartidor se tomó un tiempo promedio de 377 s por cada pasada. A partir de este resultado, se seleccionó un servomotor *feetech* FS5115M. Se trata de un motor de corriente continua de 6 V y gran torque con rotación de 180°.

# 3.2. Análisis numérico de los principales elementos de la máquina

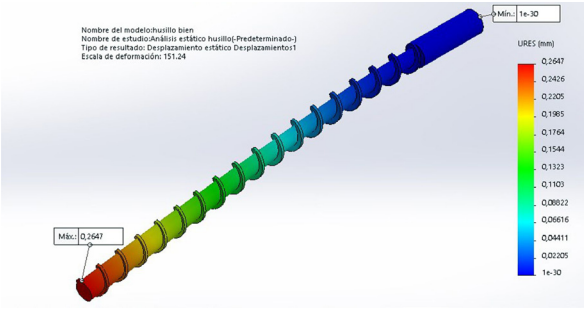
## 3.2.1. Husillo

Para el análisis estático del husillo se consideró su peso, 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 Tabla 6.

**Tabla 6.**

*Características del husillo para el análisis numérico*

| Nombre | Husillo para extrusión | Unidades |
|---|---|---|
| Material | AISI 4140 | |
| Peso | 0.59 | kg |
| Límite elástico | $4.7\times10^{-8}$ | $N/m^2$ |
| Límite de tracción | $7.45\times10^{8}$ | $N/m^2$ |
| Módulo elástico | $2.05\times10^{11}$ | $N/m^2$ |
| Coeficiente de Poisson | 0.285 | - |
| Densidad | 7850 | $kg/m^3$ |
| Módulo cortante | $8\times10^{10}$ | $N/m^2$ |
| Coeficiente de dilatación térmica | $1.23\times10^{-5}$ | K |
| Tipo de malla | Malla sólida | - |
| Número de nodos | 49032 | - |




**Resultados del análisis estático del husillo**

Fuente: elaboración propia.

La Tabla 6 evidencia que la deformación 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 el cilindro de extrusión. Además, el polímero fundido actuará como barrera entre ambos elementos (Flórez; García-León; Escobar, 2017; García-León; Suárez-Castrillón, 2016).

La Figura 11 muestra el análisis térmico en el husillo, considerando el factor de multiplicación de la potencia de las resistencias, debido a que influye la presión y fricción del plástico con las paredes y los álabes del husillo; donde se puede evidenciar que la temperatura se aproxima lo suficiente a la temperatura deseada en la punta del husillo, la cual corresponde a 10 grados Celsius por debajo que la temperatura determinada en las condiciones de diseño.

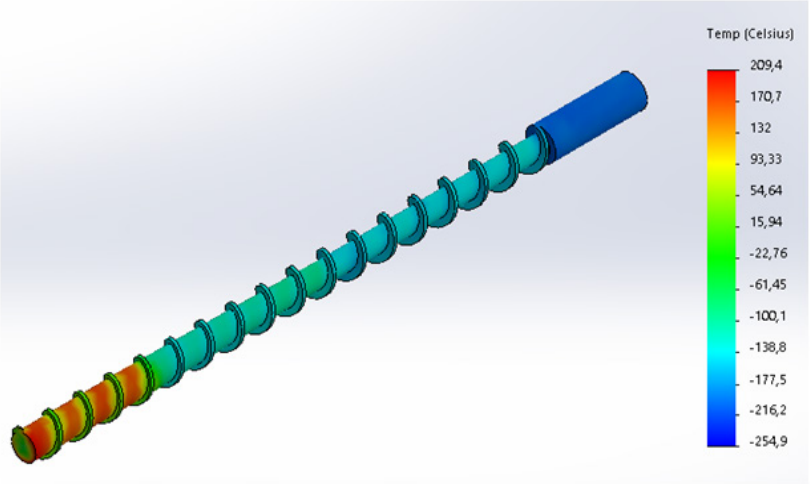


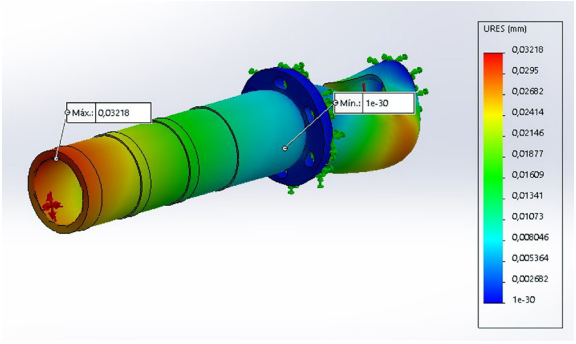

*Figura 11*. Resultados del análisis térmico del husillo
Fuente: elaboración propia.

## *3.2.2. Cilindro*

Para el análisis estático del cilindro se sometió solo a la presión que se ejerce desde las diferencias de temperatura y la compresión del fluido en un estado transitorio. Las características del cilindro se muestran en la Tabla 7:

**Tabla 7.**
*Características del cilindro de extrusión*

| Nombre | Detalle | Unidades |
|---|---|---|
| **Material** | AISI 1020 CD | - |
| **Criterio de error predeterminado** | Tensión de von Mises máx. | - |
| **Límite elástico** | $3.51\times10^{8}$ | $N/m^2$ |
| **Límite de tracción** | $4.21\times10^{8}$ | $N/m^2$ |
| **Módulo elástico** | $2\times10^{11}$ | $N/m^2$ |
| **Coeficiente de Poisson** | 0.29 | - |
| **Densidad** | 7900 | $kg/m^3$ |
| **Módulo cortante** | $7.7\times10^{10}$ | $N/m^2$ |
| **Coeficiente de dilatación térmica** | $1.77\times10^{5}$ | xxxK |
| **Tipo de malla** | Malla sólida | - |
| **Número de nodos** | 30535 | - |




**Resultados del análisis estático del husillo**

Fuente: elaboración propia.

La Tabla 7 muestra que la deformación es muy baja, con un valor de 0,003 mm similares a diferentes estudios reportados en la literatura. El análisis numérico confirmó que la presión máxima "s" presenta en la punta del cilindro (Flórez *et al.*, 2017). Debido a que en esa sección es donde el polímero se comprime y la temperatura promedio de esa última sección es más elevada que las otras, la deformación que se pueda presentar 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 (Flórez-Solano; García-León; Sánchez-Ortiz, 2017).

La Figura 12 muestra el análisis térmico en el cilindro. En este análisis térmico se puede observar el calor que se transfiere al cilindro desde las resistencias calefactoras directamente y el calor que se transfiere del aire, fue aplicado un flujo de calor por convección con una temperatura ambiente de 22 °C; como es un estado transitorio, se estableció como temperatura inicial (García-León; Pérez, 2017).

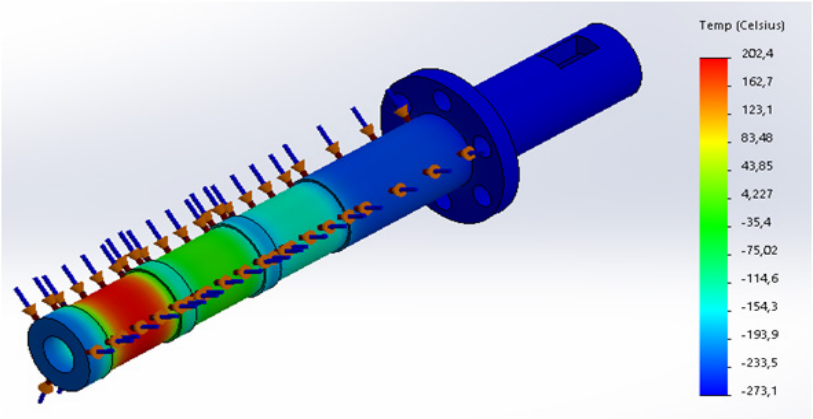



*Figura 12.* Resultados del análisis térmico del cilindro
Fuente: elaboración propia.

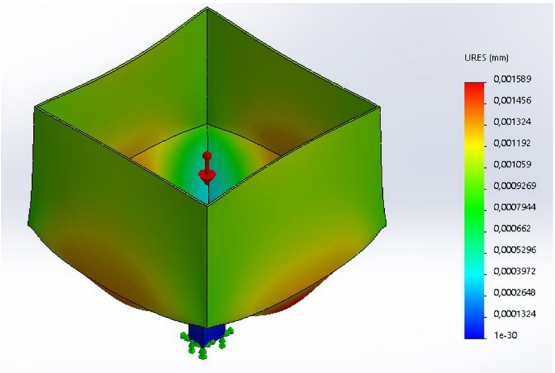
En la punta del cilindro se evidencia la mayor temperatura con un valor aproximado de 202 °C, obteniendo una respuesta positiva sobre el comportamiento de transferencia de calor para el diseño seleccionado (García-León; Flórez-Solano; Pérez-Rojas, 2015).

### 3.2.3. Tolva

A la tolva se le realizó un análisis estático para corroborar los esfuerzos que se pueden generar, en este caso, los provocados por el peso de los pellets de plástico, teniendo en cuenta las características de la Tabla 8:

**Tabla 8.**
*Características de la tolva de alimentación*

| Nombre | Detalle | Unidades |
|---|---|---|
| Material | AISI 304 CD | - |
| Criterio de error predeterminado | Tensión de von Mises máx. | - |
| Límite elástico | $2.07\times10^{8}$ | $N/m^2$ |
| Límite de tracción | $5.17\times10^{8}$ | $N/m^2$ |
| Módulo elástico | $1.9\times10^{11}$ | $N/m^2$ |
| Coeficiente de Poisson | 0.29 | - |
| Densidad | 7900 | $kg/m^3$ |
| Módulo cortante | $7.7\times10^{10}$ | $N/m^2$ |
| Coeficiente de dilatación térmica | $1.8\times10^{-5}$ | Kelvin |
| Tipo de malla | Malla sólida | - |
| Número de nodos | 52592 | - |




**Resultados del análisis estático de la tolva**

Fuente: elaboración propia.

El análisis estático de la tolva mostró que el material elegido para su fabricación cumple correctamente con las especificaciones de diseño, debido a que, en esfuerzos, su límite elástico está por encima de los esfuerzos calculados por el software y en las deformaciones, con un valor mínimo de 0,00012 mm, como se muestra en la Tabla 8.

# 4. Conclusiones

Se realizó un diseño que planteó dos tipos de material a extruir (ABS y PLA), además de permitir el acople de diferentes boquillas, en este caso, una de 1,75 mm y una de 3 mm, dimensiones correspondientes a los diámetros de filamento más comerciales en la industria de impresión 3D. En el diseño de los elementos que conforman la máquina extrusora, se aseguró que el factor de seguridad fuese superior o igual a 1,2, con el propósito de garantizar un óptimo diseño.

Para la instalación del cabezal de extrusión, se debe tener en cuenta 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.

Con el software SolidWorks se modeló cada pieza de la máquina y, a su vez, se realizó el ensamble de la misma. El ensamble permitió asegurar un correcto diseño y las medidas precisas y necesarias para su posterior construcción. Además, se implementó el análisis de elementos finitos, aplicando análisis estático y térmico a los elementos de mayor esfuerzo en la máquina. Estos elementos fueron el husillo, el cilindro y la tolva, y, de esta manera, se corroboró un correcto diseño de los elementos y materiales seleccionados.

# 5. Referencias

Altinkaynak, A.; Gupta, M.; Spalding, M.; Crabtree, S. (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

Argotta-Hernandez, Breiner (2019). *Diseño de una máquina de materiales termoconformados para la fabricación de filamento ABS y PLA para impresoras 3D* (tesis de pregrado). Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Colombia.

Brito, Nicolás (2017). *Diseño de extrusora de filamento para impresión 3D a partir de plásticos reciclados* (tesis de pregrado). Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.

Budynas; Richard; Nisbett, Keith (2017). *Mechanical Engineering Design de Shigley* (9a Edition). EE.UU.: McGraw-Hill.

Cengel, Yunus (2007). *Transferencia de calor y masa* (3ª Edición). México: McGraw-Hill.

Cifuente, Roosevelth (2011). *Diseño de una máquina extrusora para la empresa Plastik de Occidente* (tesis de pregrado). Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Cisneros-López, Erick; Pal, Akhilesh; Rodriguez, Arturo; Wu, Feng; Misra, Manju; Mielewski, Deborah; Kiziltas, Alper; Mohanty, Amar (2020). Recycled poly (lactic acid)–based 3D printed sustainable biocomposites: a comparative study with injection molding. *Materials Today Sustainability*, 7–8, 100027. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2019.100027

Cruz, Fabio; Boudaoud, Hakim; Camargo, Mauricio; Pearce, Joshua (2020). Plastic recycling in additive manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121602. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121602

Miròn, V.; Ferràndiz, Santiago; Juàrez, David; Mengual, Ana. (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, Eder; García-León, Ricardo; Sánchez-Ortiz, Edgar (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/10.24054/16927257.v29.n29.2017.2489

Flórez, Eder; García-León, Ricardo; Escobar, Marlon (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. https://doi.org/10.24054/16927257.v28.n28.2016.2477

García-León, Ricardo; Bohórquez-Niño, A.; Barbosa-Paredes, J. (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, Ricardo; Flórez-Solano, Eder; Pérez-Rojas, Eduar (2015). Diseño de una máquina amasadora y laminadora automática de masa para pan. *Revista Ingenio UFPSO*, 8(1), 59–71.

García-León, Ricardo; Pérez, Eduar (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, Ricardo; Suárez-Castrillón, Sir (2016). Diseño de un prototipo de sembradora mecánica de granos, alternativa agrícola. *Ingenio UFPSO*, 12(2011–642X), 33–40.

Gómez, Jimmy; Gutiérrez, Jorge (2007). *Diseño de una extrusora para plásticos* (tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de Pereira, Risaralda, Colombia.

Goutham, R.; Veena, T.; Prasad, K. (2018). 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

Lanzotti, Antonio; Martorelli, Massimo; Maietta, Saverio; Gerbino, Salvatore; Penta, Francesco; Gloria, Antonio (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

Luna, Manuel; Valadez, Brenda (2016). Elaboración de filamentos de PLA, In: Memorias del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals en Tecnologías Estratégicas Colima (pp. 17–21). Villa de Álvarez, Colima, México.

Fajardo, Jorge; Cobos, Cristian (2011). *Diseño de un sistema de extrusión-peletizado para el procesamiento de residuos plásticos para la empresa municipal de la ciudad de Cuenca EMAC*. Recuperado de: https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/11164/1/Diseno%20de%20un%20sistema%20de%20extrusion%20peletizado%20para%20el%20procesamiento%20de%20los%20residuos%20plasticos%20para%20la%20Empresa%20Municipal%20de%20Aseo%20de%20Cuenca%20EMAC.pdf

Mena, Adrián (2018). *Diseño de una máquina extrusora de filamento termoplástico alimentada por desechos plásticos* (tesis de pregrado). Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

Montealegre, Cristóbal; González, Luis (2015). *Diseño de una extrusora para filamento de impresión 3D* (tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile.

Morales, Paola; Castillo, Jimmy (2006). *Metodología para el diseño de tornillos de máquinas extrusoras monohusillo*. Colombia: Universidad Autónoma de Colombia.

Muñoz, J. (2008). *Diseño y automatización de máquina extrusora para reciclaje plástico* (tesis de pregrado). Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, Colombia.

Ortiz, Cristian, Acuña, Fausto (2018). *Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica* (tesis de pregrado). Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Ecuador.

Paredes, Jhon (2017). *Diseño de una máquina extrusora de plástico para los productores de manguera de Ocaña*. (tesis de pregrado). Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Colombia.

Poudel, Bijaya (2015). *How to make Portable Homemade Filament Extruder* (tesis de pregrado). Arcada.

Rigoussen, Alan; Raquez, Jean-Marie; Dubois, Philippe; Verge, Pierre (2019). A dual approach to compatibilize PLA/ABS immiscible blends with epoxidized cardanol derivatives. *European Polymer Journal*, 114, 118–126. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.02.017

Mexpolimeros (2019). *Producción, importación, distribución y comercialización de polímeros termoplásticos y elastómeros.* Recuperado de: https://www.mexpolimeros.com/contracci%C3%B3n.html

Salim, Mohd; Termiti, Zarif; Saad, Adzni (2019). Mechanical Properties on ABS/PLA Materials for Geospatial Imaging Printed Product using 3D Printer Technology. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11357-8

Sobachkin, A.; Dumnov, G. (2014). *Base numérica de CFD integrada en CAD. Informe Técnico.* https://www.solidworks.es/sw/docs/Flow_Basis_of_CAD_Embedded_CFD_Whitepaper_ESP.pdf

Thuresson, Adrian (2014). CFD and Design Analysis of Brake Disc (tesis de maestría). University of Technology, Gothenburg, Sweden.

Ullman, D. (2003). *The Mechanical Design Process*. México: McGraw Hill.

Urrego, Juan; Escobar, Luis (2008). Modelación paramétrica y manufactura de mezcladores para extrusión de termoplásticos utilizando sistemas CAD-CAM (tesis de pregrado). Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.

Vargas, Rubiel; Santiago, Roció; Patiño, M. (2008). Diseño y Construcción de un Controlador de Temperatura Programable para una Máquina Extrusora. *Revista Colombiana de Física*, 40(2), 385-387.

Woern, Aubrey; McCaslin, Joseph; Pringle, Adam; Pearce, Joshua (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