

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN EQUIPO DE EXTRUSIÓN DE FILAMENTO EN POLÍMERO PARA IMPRESIÓN POR MDF

DESIGN AND MANUFACTURING OF POLYMER FILAMENT EXTRUDER FOR FDM PRINTING

Sergio López G.¹, Ricardo A. Forero R.²

Grupo de Estudios y Aplicaciones en Ingeniería Mecánica (GEAMEC)
Semillero de Investigación en Optimización de Materiales y Aplicaciones (SIOMA)
Universidad Santo Tomás

¹sergio.lopez@usantotomas.edu.co,

²ricardoforero@usantotomas.edu.co,

RESUMEN

El proceso de impresión 3D y específicamente el Modelado por Deposición Fundida (“MDF”) o “FDM” por sus siglas en inglés (Fused Deposition Modeling) es una tecnología que permite implementar estrategias de personalización en el producto, para satisfacer de la mejor forma las necesidades de los clientes a partir de la extrusión controlada de un filamento fundido que, siguiendo una trayectoria, conforma un producto capa por capa. Esta tecnología se ha masificado gracias a la liberación de su patente y al trabajo colaborativo plasmado en internet, con los que se han logrado construir equipos de bajo costo, permitiendo hacer accesible esta tecnología al común de los usuarios.

Tomando en cuenta lo anterior, el desarrollar diferentes materiales para ser usados en este tipo de impresoras es una necesidad y una oportunidad latente. Por tal razón, el presente proyecto planteó el diseño y la fabricación de una extrusora de laboratorio, con la que se puedan procesar materiales poliméricos reciclados o vírgenes, solos o reforzados; obteniendo bobinas de filamento para ser usados en impresoras 3D por MDF.

Como resultado, se construyó un equipo de extrusión para polímeros con diámetro de husillo de 25 mm, con una relación L/D de 18:1, con una capacidad de producción de 7 kg/h en Polietileno de Baja Densidad (“PEBD”) o “LDPE” (por sus siglas en inglés, Low Density PolyEthylene), con un consumo eléctrico de 1,4 kW/h y con dos dados que permiten conformar un filamento de 1,75 mm y/o 3 mm de diámetro, según la necesidad. Con esta extrusora se espera contribuir en la investigación

y desarrollo de materiales vírgenes, reciclados y compuestos, para aplicaciones obtenidas a través de impresión 3D por MDF, aplicando conceptos bioamigables.

Palabras clave: Diseño, Ingeniería, Extrusora de Plástico, Fabricación, Filamento y Reciclado.

ABSTRACT

The 3D printing process and specifically Fused Deposition Modeling ("FDM"), is a technology that allows implementing customization strategies in the product to best satisfy customer needs, from the controlled extrusion of a molten filament, forms a product layer by layer. This technology has become widespread thanks to the release of its patent and the collaborative work embodied on the Internet, with which it has been possible to build low-cost equipment, making this technology accessible to common users.

Considering the aforementioned, the development of varied materials to be used in this type of printers is a need and a potential opportunity. For this reason, the present project proposed the design and manufacture of a laboratory extruder, with which recycled or virgin polymeric materials can be processed, alone or reinforced; obtaining filament spools to be used in 3D printers by FDM.

As a result of this project, an extrusion equipment for polymers with a screw diameter of 25 mm was built, with an L/D ratio of 18:1, with a production capacity of 5 kg/h in Low Density Polyethylene ("LDPE"), with an electrical consumption of 1.4 kW/h and with two dies that allow forming a filament of 1.75 mm and/or 3 mm in diameter, According to the need. With this extruder it is expected to contribute to the research and development of materials, for applications obtained through 3D printing by FDM, applying bio-friendly concepts.

Keywords: Design, Engineering, Plastic Extruder, Manufacturer, and Recycling.

1. INTRODUCCIÓN

El constante interés de los seres humanos por transformar y adaptar su entorno, hasta el día de hoy sigue siendo la premisa básica del desarrollo industrial y tecnológico. Prueba de ello es la aparición de los polímeros y por supuesto, el plástico, como uno de los materiales con mayores posibilidades de producción, modificación y combinación con otros que a su vez permiten la obtención de nuevos productos, a partir de la realización de diferentes procesos de transformación, dependiendo de los avances y necesidades que la sociedad manifiesta. No en vano, la versatilidad de los polímeros garantiza su uso en numerosas áreas y hace parte fundamental de la vida cotidiana.

Sin embargo, los niveles de contaminación generados por la indebida disposición de este material no tienen ningún precedente histórico. El aumento de las catástrofes ambientales, las cifras de residuos y la falta de métodos para eliminarlos adecuadamente, han sido los factores más influyentes a la hora de nombrar al plástico como uno de los elementos más contaminantes. Ante la falta de soluciones efectivas a esta problemática, gobiernos y entidades se han visto obligados a proponer regulaciones y normativas que se aplican a fabricantes y usuarios, con el fin de reducir la alta tasa de producción y consumo de un material del que todavía se desconoce gran parte de su potencial.

En la actualidad hay diversas iniciativas que demuestran que existe mayor preocupación sobre el cuidado del medio ambiente y del uso apropiado de los polímeros; temas que deben considerarse desde todos los ámbitos que rigen a la sociedad actual. Las numerosas inquietudes obligan a la creación de soluciones propositivas, prácticas y creativas, para que los nuevos ingenieros, así como sus predecesores e incluso los interesados en el trabajo con polímeros adquieran mayor conciencia del manejo de este material, posibilidades en su reutilización y la reducción de los agentes contaminantes que se generan a partir, especialmente, de su “uso único”. Esto supone un reto para la ingeniería y para las ciencias asociadas, ya que, la transformación a la que la humanidad se enfrenta día tras día abre el espectro a nuevas alternativas, necesitando así, considerar aspectos que anteriormente eran ignorados.

Todo lo mencionado anteriormente, obliga a la industria y a las fábricas que dependen de materiales sintéticos a repensar su quehacer a partir de una conciencia sostenible de cara al mundo. Este análisis alentó el desarrollo del proyecto que se describe en las siguientes páginas, en el que se planteó la

fabricación de un equipo de extrusión de filamento termoplástico, con características para ser usado en procesos de impresión 3D por MDF y específicamente en las impresoras de la Universidad Santo Tomás. De manera que el equipo elaborado ayude a que el Programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Santo Tomás, desarrolle nuevos materiales poliméricos, investigue sobre la posibilidad de reutilizar polímeros de “uso único” y desarrolle aplicaciones a partir de su uso en impresión 3D o en otros procesos de transformación de plásticos.

2. METODOLOGÍA

2.1. METODOLOGÍA DE DISEÑO

Se evaluó que la Universidad Santo Tomás necesita un equipo que permita fabricar monofilamento para las tres impresoras MDF con las que se cuenta en el laboratorio de la Sede Principal con el cual, además, se pueda adelantar investigación y desarrollo, trabajando en el aprovechamiento de material plástico considerado obsoleto o desperdicio, aplicable a estrategias de impresión 3D mediante el proceso de Filamento Fundido.

Inicialmente se plantearon los requerimientos de cliente nombrados a continuación:

Tabla 1. Descripción de los requerimientos.

| REQUERIMIENTOS | DESCRIPCIÓN | VALOR |
|----------------------------|---|----------------------------|
| Capacidad de extrusión | Cantidad de material a producir | De 3 a 10 Kg/h |
| Apto para los laboratorios | Disponibilidad de la capacidad instalada de energía eléctrica de los laboratorios de la Universidad | Trifásico a 220V |
| Disposición de espacio | Que ocupe un espacio reducido en los laboratorios de la Universidad | Entre 1 y 3 m ³ |
| Manipulación | Pasos sencillos de manejo | Min. posibles |
| Mantenimiento | Pasos sencillos para limpieza | Min. posibles |
| Operación | Pasos para trabajo y proceso | Min. posibles |
| Seguridad industrial | Protección de partes eléctricas y de calor | Las necesarias |
| Modular | Montaje y armado del equipo | Min. posibles |

Fuente: Autor

Para determinarlos, se hizo una visita a las instalaciones del Laboratorio y se dialogó con los laboratoristas, contrastando con ellos el tamaño considerado como de “laboratorio”. Luego de estas conversaciones, se llegó a la conclusión sobre el tamaño ideal del equipo: éste debe contenerse entre 1 y 3 metros cúbicos, contar con una conexión a 220V y con la menor cantidad de pasos de operación, montaje y ensamble. También se resaltó que se debe garantizar la seguridad de los estudiantes, por lo cual, uno de los elementos importantes a considerar es el de seguridad industrial.

Posteriormente, se buscó el tornillo extrusor, ya que este es el elemento central al momento de determinar la capacidad del equipo, su relación L/D y por ende el volumen que ocuparía. Una posibilidad era utilizar una broca de madera para ser usado como tornillo de extrusión; sin embargo, después de hacer este análisis se concluyó que, si bien es una opción utilizada en proyectos similares, la eficiencia es baja, ya que la profundidad de la hélice es muy alta y la baja conducción térmica afecta la plastificación del polímero. Posteriormente, se consiguió un tornillo de extrusión genérico para polímeros, como lo son los Polietilenos, Polipropilenos, Poliestirenos, entre otros, dejando claro que no es recomendable para el Polivinilcloruro (PVC), para el Polioxido de metilo (POM), ni para los Polimetilmetacrilatos (PMMA), debido a su nivel corrosivo. En la Tabla 3, se observan las características del tornillo seleccionado.

Para encontrar el tornillo más adecuado, se hizo la revisión infográfica necesaria para determinar la capacidad ideal para cumplir con la condición de que fuera una extrusora tipo laboratorio. Para efectos de este proyecto, se optó por la revisión de los equipos de la empresa Eurotech Extrusion Machinery Srl (EUR.EX.MA 2022), cuyos modelos de laboratorio la Mini XTR 20/25/35, y las E-lab 22/30, cuentan con tornillos desde 20 mm de diámetro y una relación L/D de 20:1 con capacidades que oscilan entre 7 y 30 kg/h en Poliestireno (PS).

Luego de ello, se determinaron las condiciones iniciales de diseño, teniendo en cuenta los datos del tornillo extrusor y el producto a obtener, que son monofilamento de 1,75 mm y 3 mm de diámetro, para los equipos de impresión 3D Zortrax y Bigcreator cada una con unas dimensiones de extrusión de 200 mm X 200 mm X 180 mm y de 1,75 mm y 3 mm de diámetro de filamento respectivamente.

Paso seguido se adelantó el proceso de cálculo, dimensionando el barril, determinando las características de calor para la selección de las resistencias eléctricas, se diseñaron las boquillas de

extrusión (o dados), determinado la presión necesaria para la generación homogénea del filamento y a partir de esta se calculó los requerimientos del motor implementado.

Una vez terminado el diseño de detalle, se procedió a la fabricación del equipo, ensamble de piezas y la puesta a punto de la extrusora.

2.2. PROCESO DE EXTRUSIÓN

El proceso de extrusión consta de un tornillo sin fin que fuerza el paso de un material a través de un tubo (barril), calentado mediante unas resistencias eléctricas. A lo largo de su desplazamiento, gracias a la acción del tornillo y por efecto de la temperatura suministrada por las resistencias, el material pasa de un estado sólido a un estado fundido, estado con una viscosidad lo suficientemente baja para permitirle fluir por una boquilla o dado, que le suministrará la geometría inicial que se desea lograr en el producto. Esta puede ser terminada o semielaborada.

El equipo de extrusión se fabricó a partir del tornillo seleccionado y suministrado por la compañía Industrias ACMAPLAST S.A.S., empresa especializada en el área de manufactura y mantenimiento de equipos de extrusión de plásticos con sede en Bogotá D.C., Colombia y de reconocimiento nacional.

El tornillo, cuenta con una geometría genérica de un solo hilo y tres zonas, zona de alimentación profundidad de hélice mayor, zona de plastificación, 25 mm de diámetro, profundidad de hélice variable (de forma cónica) y una profundidad de hélice menor en la zona de compresión o dosificación, las demás características de este tornillo se ampliarán más adelante en este documento.

Otro de los aspectos a considerar para el diseño del equipo es el material de referencia. En este caso, se revisó la ficha técnica (Datasheet) de un material genérico típico con el cual se pudiera extruir un filamento para impresión 3D por MDF, como el ácido poliláctico o PLA. En listado disponible en <https://www.materialdatacenter.com/>, se escogió la referencia Ingeo 4043D Monofilament (PLA 4043D), que puede ser usado de manera general en impresoras 3D. La Tabla 2, contiene diferentes datos importantes de este material.

Tabla 2: Propiedades del PLA 4043D

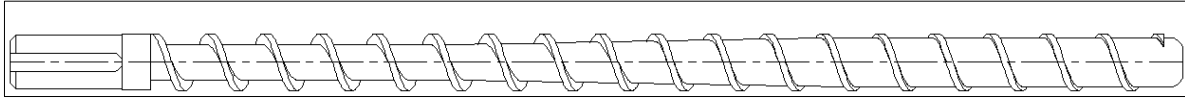
| Ingeo™ 4043D Monofilament PLA | | NatureWorks LLC | |
|--|---|-------------------|-------------|
| Processing/Physical Characteristics | | | |
| ASTM Data | | | |
| Melt Flow Index, MFI | 6 | g/10min | ASTM D 1238 |
| Temperature | 210 | °C | - |
| Load | 2.16 | kg | - |
| Mechanical properties | | | |
| ASTM Data | | | |
| Flexural Modulus | 3.8 | MPa | ASTM D 790 |
| Flexural Strength | 83 | MPa | ASTM D 790 |
| Izod Impact notched, 1/8 in | 16 | J/m | ASTM D 256 |
| Thermal properties | | | |
| ASTM Data | | | |
| Melting Temperature | 153 | °C | ASTM D 3418 |
| Glass Transition Temperature | 57.5 | °C | ASTM E 1356 |
| Other properties | | | |
| ASTM Data | | | |
| Density | 1240 | kg/m ³ | ASTM D 792 |
| Film Properties | | | |
| ASTM Data | | | |
| Tensile Modulus, MD | 3.6 | MPa | ASTM D 882 |
| Tensile Strength at Yield, MD | 60 | MPa | ASTM D 882 |
| Tensile Strength at Break, MD | 53 | MPa | ASTM D 882 |
| Characteristics | | | |
| Processing | Certifications | | |
| Other Extrusion | Contains renewable resources, Food contact, Food approval 10/2011, Food approval FDA 21 CFR | | |
| Delivery form | Applications | | |
| Pellets | Monofilament, Packaging | | |
| Special Characteristics | Regional Availability | | |
| Transparent | North America, Europe, Asia Pacific | | |
| Features | | | |
| Low Odor, Low Warp | | | |

Fuente: (Altair Engineering GmbH, 2022)

2.3. TORNILLO

El tornillo o husillo consiste en un cilindro largo rodeado por un filete tipo helicoidal. Este es, quizás, una de las partes más importantes en el equipo de extrusión, ya que, contribuye al transporte del material, su calentamiento, fusión, mezcla y dosificación. La estabilidad del proceso y la calidad del producto que se obtiene dependen en gran medida del diseño del tornillo (Gomis & Beltrán Rico, 2012).

Figura 1. Dibujo de tornillo extrusora.

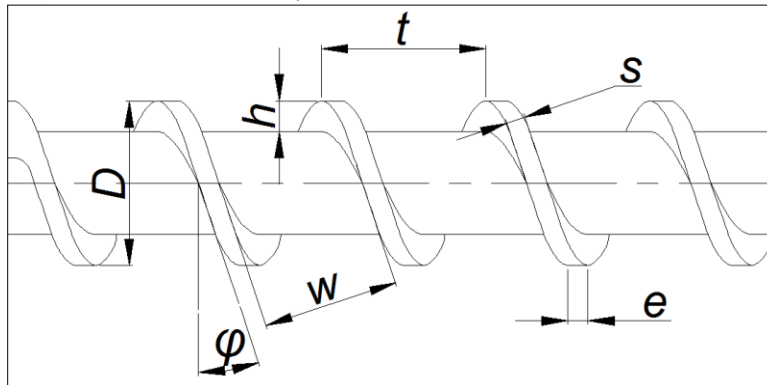


Fuente: Autor

2.3.1. Características del Tornillo

Los tornillos de extrusión pueden lograr características especiales, gracias a su geometría, pero en general tiene una serie de elementos comunes que se muestran en la Figura 2.

Figura 2. Dimensiones y características



Fuente: Autor

Tabla 3. Características del tornillo extrusión

| CARACTERÍSTICA | VALOR |
|---------------------------------|--------------|
| Longitud | 450 mm |
| Filetes | 25 |
| Relación L/D | 18 |
| Diámetro Tornillo | 25 mm |
| Ancho del filete | 3 mm |
| Profundidad de la canal | 0.8 – 2.4 mm |
| Holgura entre cilindro y filete | 0,5 mm |

Fuente: Autor

2.3.2. Relación de L/D

El parámetro que mejor define la capacidad de plastificación de una extrusora es la relación L/D (relación entre la longitud y el diámetro del husillo). Se puede decir que cuanto mayor sea, más tiempo

permanecerá el material dentro del cilindro para fundir el material homogéneamente. Se puede considerar que a partir de un L igual a 20 D es adecuado para grandes producciones. Como se cuenta con el tornillo de extrusión y este tiene medidas predefinidas se calcula la relación L/D para contar con este factor, ya que en varios pasos de diseño esta relación se necesita.

$$L/D = \text{Relación del tornillo} \quad (1)$$

Donde:

L: Longitud del tornillo

D: Diámetro exterior

$$\frac{L}{D} = \frac{450 \text{ mm}}{25 \text{ mm}} = 18$$

Es importante ver que la relación que maneja el tornillo disponible es de 18D, lo cual, es cercano a 20D, equivaliendo a una relación adecuada para producción continua en la extrusora que se está mostrando.

2.3.3. Relación de Compresión

La relación de compresión se da por las alturas del filete de extrusión que arrastra el material en las diferentes etapas de extrusión, a partir de la zona de alimentación, pasando por la zona de compresión y llegando a la zona de plastificado. Este valor es importante pues permitirá generar la presión necesaria para vencer la restricción a la salida, la cual es el dado de extrusión.

La relación de compresión se da como:

$$RC = \frac{h_1}{h_2} \quad (2)$$

Donde:

h_1 : Altura de filete en la zona de alimentación

h_2 : Altura de filete en la zona de plastificado

$$RC = \frac{h_1}{h_2} = \frac{2,4}{0,8} = 3$$

2.3.4. Ángulo de Filete

Este ángulo está definido por el diámetro y el paso del tornillo extrusor. Dependiendo de la configuración del tornillo, este ángulo varía según las necesidades del material a producir. Para este proyecto, contar con esta medida es importante, pues dependiendo el ángulo que se tiene, habrá un mayor o menor empuje de material, haciendo que este permanezca mayor o menor tiempo en el barril. También es importante entender que, si dura poco, el material puede no fundir, pero si dura mucho puede quemarse, así que el tiempo justo es importante para garantizar la fusión del polímero y su homogenización.

$$\varphi = \text{Tan}^{-1} \left(\frac{t}{\pi \cdot D} \right) \quad (3)$$

D : Diámetro= 25mm

t : Paso= 25mm

$$\varphi = \text{Tan}^{-1} \left(\frac{25}{\pi \times 25} \right) = 17.65^\circ$$

2.3.5. Ancho del Filete

Es el espesor del filete helicoidal que recorre todo el tornillo de extrusión, según el diseño de los tornillos esta medida va cambiando en la configuración.

$$e = 0,10 \cdot D \quad (4)$$

Debido a la configuración conservadora del tornillo, este ancho tiende a ser mayor.

$$e = 0,12 \times (25\text{mm}) = 3\text{mm}$$

2.3.6. Ancho de la Canal

Es la medida entre dos filetes, teniendo en cuenta el ángulo de inclinación del filete para su medición más exacta. Este valor va a incidir directamente con el Flujo Volumétrico y la capacidad de plastificación del material.

$$w = (t - e) \cdot \cos\varphi \quad (5)$$
$$w = (25 - 3) \times \cos(17,65^\circ) = 20,96 \text{ mm}$$

2.3.7. Flujo Volumétrico

Es la deducción de los tres tipos de flujo que posee, flujo de arrastre α , flujo de presión β , y flujo de filtración γ . La cual indica en la producción del tornillo con el diseño que posee a una determinada configuración.

$$Q = \left(\frac{\alpha \cdot K}{K + \beta + \gamma} \right) \cdot n \quad (6)$$

Donde Q es el flujo volumétrico,

α : Flujo de arrastre,

β : Flujo de presión,

γ : Flujo de Filtración,

K : Constante total de boquilla,

n : Revoluciones por minuto del tornillo.

2.3.7.1. Flujo de Arrastre

$$\alpha = \frac{\pi \cdot m \cdot D \cdot h_1 \cdot \left(\frac{t}{m} - e \right) \cdot \cos^2\varphi}{2} \quad (7)$$

Donde:

D: Diámetro = 2,5cm

t: Paso = 2,5cm

$\varphi=17,65^\circ$

h_1 : Profundidad canal en la zona de dosificación = 2,4 mm (0,24cm)

m : Número de entradas del tornillo = 1

e : Ancho del filete = 3mm (0,3cm)

$$\alpha = \frac{\pi \times 1 \times 2,5 \times 0,24 \times \left(\frac{2,5}{1} - 0,3\right) \times \cos^2(17,65)}{2} = 1,882 \text{cm}^3$$

2.3.7.2. Flujo de Presión

$$\beta = \frac{m \cdot h_1^3 \cdot \left(\frac{t}{m} - e\right) \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi}{12 \cdot L} \quad (8)$$

L : Longitud del tornillo= 450 mm (45cm)

$$\beta = \frac{1 \times 0,24^3 \times \left(\frac{2,5}{1} - 0,3\right) \times \sin(17,65^\circ) \times \cos(17,65^\circ)}{12 \times 45} = 0,0162 \times 10^{-3} \text{cm}^3$$

2.3.7.3. Flujo de Filtración

$$\gamma = \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot \delta^3 \cdot \tan \varphi}{10 \cdot e \cdot L} \quad (9)$$

δ : Holgura que es la distancia entre el diámetro del tornillo y el diámetro de la camisa:

$$\delta = 0,002 \times D \quad (10)$$

$$\delta = 0,002 \times 2,5 = 0,005 \text{cm}$$

$$\gamma = \frac{\pi^2 \times 2,5^2 \times 0,005^3 \times \tan(17,65^\circ)}{10 \times 0,3 \times 45} = 18,173 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 \quad (11)$$

2.3.7.4. Constante de la Boquilla K

Esta constante K (Coeficiente de forma geométrica) es a partir de diferentes sumas de las secciones de la boquilla, que cuenta con salida, rejilla y reductor. (SAVGORODNY, V. K. (1978). **Transformación de plásticos**).

$$\sum \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3}} \quad (12)$$

Donde $k = 0,30627$

$$\sum K = 0,10209 \text{ mm}^3$$

2.3.7.5. Revoluciones del Tornillo

El cálculo de las revoluciones en las que trabaja el tornillo en el momento de la extrusión del material.

$$\eta = \frac{\dot{\gamma} \cdot h_2 \cdot 1s}{\pi \cdot D} \quad (13)$$

Donde:

$\dot{\gamma}$: velocidad de cortadura en Extrusión, $\dot{\gamma} = \frac{100}{s}$

h_2 es la altura del filete en la zona de plastificado = 0.8 mm

D : Diámetro del tornillo = 25 mm

$$\eta = \frac{\frac{100}{s} \times 0,8 \text{ mm} \times 1s}{\pi \times 25 \text{ mm}} = 1,018 \frac{\text{Rev}}{\text{seg}} \left(\frac{60 \text{ seg}}{\text{min}} \right) = 61,115 \frac{\text{Rev}}{\text{min}}$$

Ya teniendo las revoluciones del tornillo para la producción del PLA, se calcula la potencia necesaria para la extrusión del material deseado, el cual también permitirá determinar los caballos de fuerza (HP) que se requieren.

$$N = \frac{\eta \cdot \pi \cdot D^3}{K^2} \quad (14)$$

Donde K es el factor de proporcionalidad (66,7) (SAVGORODNY, V. K. (1978). **Transformación de plásticos**).

$$N = \frac{61,115 \frac{Rev}{min} \cdot \pi \cdot (25 \text{ mm})^3}{66,7^2} = 647,32 \text{ Watts} = 0,904 \text{ HP}$$

Una vez desarrollados las variables que permiten determinar el Flujo Volumétrico, se retoma la ecuación 6 para el cálculo de la extrusora

$$Q = \left(\frac{\alpha \cdot K}{K + \beta + \gamma} \right) \cdot n \quad (15)$$

Donde

α : Flujo de arrastre = 1,882 cm³

β : Flujo de presión = 0,0162_{x10⁻³}cm³

γ : Flujo de Filtración = 18,176_{x10⁻⁹}cm³

K : Constante Total de Boquilla = 0,10209_{x10⁻³} cm³

n : Revoluciones por minuto del tornillo = 61,115 Rev/min

$$Q = \left(\frac{1,882 \times 0,00010209}{0,00010209 + 0,0000162 + 0,000000018176} \right) \times 61,115$$

$$Q = 99,251 \frac{cm^3}{min}$$

Con el flujo volumétrico del equipo, se calculó la capacidad de producción con material del PLA.

$$\text{Densidad PLA } \rho = 1,24 \frac{g}{cm^3}$$

$$Producción = Q \cdot \rho \quad (16)$$

$$Producción = 99,251 \frac{cm^3}{min} \times 0,00124 \frac{Kg}{cm^3} = 0,0680 \frac{Kg}{min}$$

$$Producción = 7,384 \frac{Kg}{h} PLA$$

Permitiendo cuantificar de manera teórica que el equipo extrusor a partir del tornillo disponible se encuentra que admite una extrusión de 7,3840 Kg/h en PLA.

2.4. CAMISA O BARRIL

La camisa es un cilindro de pared gruesa que alberga en su interior el tornillo. La cara interna de la camisa debe ser rugosa para generar la fuerza de cizalla suficiente que rompa el material y lo cambie de estado con ayuda del calor suministrado por las resistencias. Para soportar la corrosión, el desgaste y la presión interna ejercida por el trabajo de extrusión, este cilindro se fabrica con aceros muy resistentes y en algunos casos especiales se fabrican como elementos bimetálicos, otorgando una mayor resistencia a la abrasión.

2.4.1. Calculo para el diámetro interno del cilindro:

$$\varnothing_{interno} = 2 \cdot \delta + \varnothing_{Tornillo} \quad (17)$$

$$\varnothing_{interno} = 2x(0,5) + 25mm = 26mm$$

2.4.2. Calculo de pared del cilindro

Para el cálculo de pared, es necesario saber las propiedades físicas del material que se utilizó.

Tabla 4. Propiedades físicas del acero AISI / SAE 4340

| AISI Núm. | Tratamiento | Temperatura °C (°F) | Resistencia a la tensión UTS MPa (ksi) | Resistencia a la fluencia YS MPa (ksi) | Elongación % | Reducción de área % | Dureza Brinell HB |
|-----------|-------------|---------------------|--|--|--------------|---------------------|-------------------|
| 4340 | TyR | 540 (1 000) | 1 170 (170) | 1 080 (156) | 13 | 51 | 360 |

Fuente: BUDYNAS, R., SHIGLEY, J., NISBETT, J. AND RÍOS SÁNCHEZ, M. (2008). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. México: McGraw-Hill. Pág. 1022.

El diseño de la pared de la camisa es importante, ya que debe soportar las presiones que ejerce el tornillo al material extruido en la zona de compresión. Esta zona es la más crítica, debido que ahí es donde cambia de estado el material debido al calor proporcionado por las resistencias y la fuerza de compresión que ejerce el tornillo.

Para el cálculo de presión máxima en la zona de compresión, se utilizó la viscosidad del PLA a una temperatura de 210 °C, así como, el esfuerzo de fluencia del acero.

$$P_{max} = \frac{6 \cdot \pi \cdot \emptyset \cdot L \cdot \eta \cdot \mu}{h_2^2 \cdot \text{Tan } \varphi} \quad (18)$$

Donde:

\emptyset : Diámetro del tornillo: 25 mm

L: longitud de la zona de compresión: 110 mm

η : Revoluciones del tornillo: 61,115 RPM = 1,0185 rps

h_2 : Altura de filete en la zona de compresión: 0,8 mm

μ : Viscosidad del PLA a 210°C: 13,05 Pa.s

$$P_{max} = \frac{6 \cdot \pi \cdot (0,025) \cdot (0,110) \cdot (1,0158) \cdot (13,05)}{(0,008)^2 \cdot \text{Tan}(17,65)} = 3382317,191 \text{ Pa}$$

$$P_{max} = 3,382 \text{ MPa}$$

Espesor de pared: de acuerdo con la ecuación sugerida por (Naranjo, Sierra, Sanz, Noriega y Osswald, 2009), para el cálculo del espesor ideal para el barril se desarrolla este elemento.

$$\varepsilon_{pared} = R_{int} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{2 \cdot P_{max}}{\sigma_t - 2 \cdot P_{max}}} \right) \quad (19)$$

Donde:

R_{int} : Radio interno de la camisa: 13mm

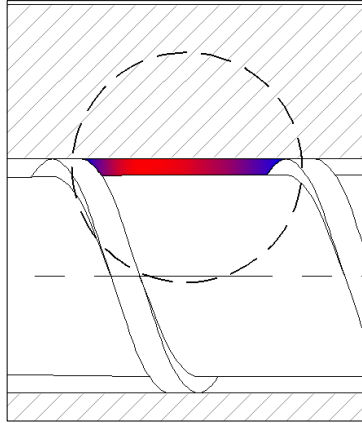
P_{max} : Presión máxima ejercida por el PLA en la zona de compresión: 3,382 MPa

σ_t : Esfuerzo de fluencia del acero SAE 4340: 1080 MPa

$$\varepsilon_{pared} = (0,013) \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{2 \cdot (3,382 \times 10^6)}{1080 \times 10^6 - 2 \cdot (3,382 \times 10^6)}} \right) = 0,01403 \text{ m}$$

$$\varepsilon_{pared} = 14.032 \text{ mm}$$

Figura 3. Vista interna de la zona de compresión.



Fuente: Autor

2.4.3. Esfuerzos en la camisa

Los esfuerzos dentro de la camisa extrusora se calculan como un cilindro sometido a esfuerzos radiales y tangenciales, con magnitudes que van a depender del radio en su interior. Al determinar los esfuerzos radiales y tangenciales se supone que la elongación longitudinal es constante a lo largo del cilindro; es decir, que la sección longitudinal del interior de la camisa va a estar sometida constante a este esfuerzo.

Las ecuaciones de estos esfuerzos para cilindros de pared gruesa son:

$$\sigma_t = \frac{p_i \cdot r_i^2 - p_o \cdot r_o^2 - \frac{r_o^2 \cdot r_i^2 \cdot (p_o - p_i)}{r^2}}{r_o^2 - r_i^2} \quad (20)$$

$$\sigma_r = \frac{p_i \cdot r_i^2 - p_o \cdot r_o^2 + \frac{r_o^2 \cdot r_i^2 \cdot (p_o - p_i)}{r^2}}{r_o^2 - r_i^2} \quad (21)$$

Donde:

σ_t : Esfuerzo tangencial

σ_r : Esfuerzo radial

p_i : Presión interna del cilindro

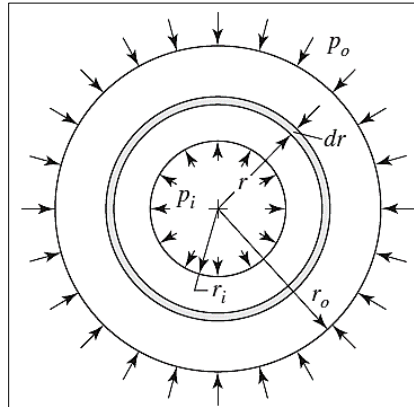
p_o : Presión externa del cilindro

r : Radio interno del cilindro

r_i : Radio interno del cilindro

r_o : Radio exterior del cilindro

Figura 4. Sección de cilindro sometido a presiones internas y externas



Fuente: Budynas, R. G. (2008). DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA DE SHIGLEY. McGraw-Hill Education.

Debido a que la camisa no va a ser sometida a fuerzas exteriores que la puedan deformar, las magnitudes de esfuerzos radiales y tangenciales se anulan siendo p_o igual a 0. Quedando la ecuación de la siguiente forma:

$$\sigma_t = \frac{p_i \cdot r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \cdot \left(1 + \frac{r_o^2}{r^2}\right) \quad (22)$$

$$\sigma_r = \frac{p_i \cdot r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \cdot \left(1 - \frac{r_o^2}{r^2}\right) \quad (23)$$

Esfuerzo longitudinal a lo largo del cilindro:

$$\sigma_l = \frac{p_i \cdot r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad (24)$$

Estas ecuaciones solo aplican para en secciones distintas a los extremos del cilindro, alejadas de cualquier área de concentración de esfuerzos.

Como el cilindro va a estar sometido únicamente por presión interna, la distribución de esfuerzos radiales y tangenciales en el espesor de pared serán máximos en la cara interior, es decir $r=r_i$.

p_i : Presión interna del cilindro= 3,382 Mpa

r_i : Radio interno del cilindro= 25mm

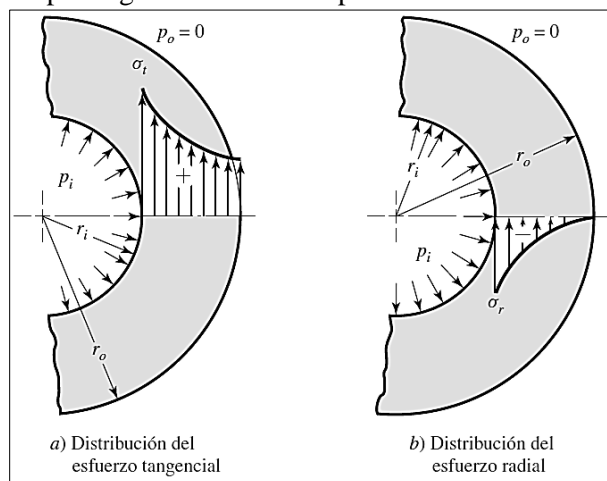
r_o : Radio exterior del cilindro= 58mm

$$\sigma_t = \frac{p_i \cdot r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \cdot \left(1 + \frac{r_o^2}{r^2}\right) = \frac{3,382 \times 10^6 \cdot (0,025\text{m})^2}{(0,058\text{m})^2 - (0,025\text{m})^2} \cdot \left(1 + \frac{(0,058\text{m})^2}{(0,025\text{m})^2}\right) = 4,925 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_r = \frac{p_i \cdot r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \cdot \left(1 - \frac{r_o^2}{r^2}\right) = \frac{3,382 \times 10^6 \cdot (0,025\text{m})^2}{(0,058\text{m})^2 - (0,025\text{m})^2} \cdot \left(1 - \frac{(0,058\text{m})^2}{(0,025\text{m})^2}\right) = -3,382 \text{ MPa}$$

$$\sigma_l = \frac{p_i \cdot r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} = \frac{3,382 \times 10^6 \cdot (0,025\text{m})^2}{(0,058\text{m})^2 - (0,025\text{m})^2} = 771,723 \text{ kPa}$$

Figura 5. Distribución de esfuerzos en un cilindro de pared gruesa sometido a presión interna.



Fuente: Budynas, R. G. (2008). DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA DE SHIGLEY. McGraw-Hill Education.

Ya teniendo los valores de los esfuerzos que se presentan en el cilindro, se comprueba si es seguro para la operación de la máquina. El material usado que es el SAE 4340 para su fabricación posee de esfuerzo de fluencia $S_y=1080$ Mpa y esfuerzo ultimo $S_u=1170$ Mpa.

Para certificar la seguridad de un elemento maquinado en acero el esfuerzo permisible σ_{perm} debe estar entre el 40% y 90% del valor del esfuerzo de fluencia S_y , sujeto al tipo de esfuerzo, garantizando que la seguridad de la pieza metálica no llegue nunca a zona plástica.

Esfuerzo permisible en flexión:

$$0,60 S_y \leq \sigma_{perm} \leq 0,75 S_y$$

$$648 \text{ MPa} \leq \sigma_{perm} \leq 810 \text{ MPa}$$

En el caso más restrictivo, se usa el esfuerzo permisible como 648 MPa y que en ningún caso sea mayor a este.

Como están presentes tres esfuerzos principales para el cálculo del esfuerzo de Von Mises, se determina que los esfuerzos cortantes y de torsión son nulos, quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_t - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_l)^2 + (\sigma_l - \sigma_t)^2}{2}} \quad (25)$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(4,925 - (-3,382))^2 + ((-3,382) - 0,771)^2 + (0,771 - 4,925)^2}{2}}$$

$$\sigma_{VM} = 7,194 \text{ MPa}$$

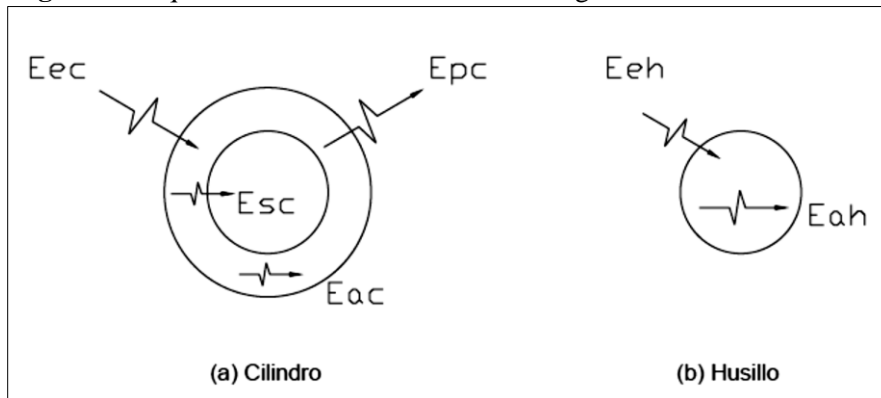
$$FS = \frac{\sigma_{perm}}{\sigma_{VM}} = \frac{648 \text{ MPa}}{7,194 \text{ MPa}} = 90,07$$

Este resultado se debe a que el material PLA no genera mucha resistencia al momento de extruir, los materiales del cilindro y tornillo son aptos para el trabajo. De este modo también se pueden verificar con otros materiales de extrusión.

2.5. TRANSFERENCIA DE CALOR

Es la forma de la energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia en la temperatura. La ciencia que trata de la determinación de las razones de esa transferencia es la transferencia de calor. Se puede determinar su cantidad para cualquier sistema que pase por cualquier proceso, con la sola aplicación del análisis termodinámico. La razón es que la termodinámica se interesa en la cantidad de transferencia de calor a medida que un sistema pasa por un proceso, de un estado de equilibrio a otro, y no indica cuánto tiempo transcurrirá.

Figura 6. Esquema de análisis de balanceo energético.



Fuente: Flores Salazar, L. (2013). *Máquina extrusora para reciclaje de plástico*. Pregrado. Universidad Técnica del Norte.

2.5.1. Balance Energético del Sistema

En este balance, se consideró tanto la camisa y el tornillo extrusor como dos sistemas diferentes, pero que trabajan uno con el otro. Se supusieron situaciones en la que el tornillo no gira, está lleno de material y en la camisa se desprecia el aire que puede tener en su interior.

$$E_{ec} = E_{ac} + E_{sc} + E_{pc} \quad (26)$$

$$E_{eh} = E_{ah} \quad (27)$$

Donde:

E_{ec} : Energía de entrada a la camisa desde las resistencias.

E_{ac} : Energía almacenada en la camisa.

E_{pc} : Energía perdida por la camisa.

E_{sc} : Energía de la camisa a hacia el tornillo.

E_{eh} : Energía entrada al tornillo desde la camisa.

E_{ah} : Energía almacenada en el tornillo.

Se consideró que hay un contacto térmico entre el tornillo y la camisa, estas definiciones se igualan

$$E_{sc} = E_{eh}$$

Energía almacenada por el tornillo

$$E_{ac} = m_c \cdot Cp_c \left(\frac{dT_c}{dt} \right) \quad (28)$$

Donde,

m_c : Masa del cilindro

Cp_c : Calos específico del acero de la camisa $\left(0,11 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg K}} \right)$

$\left(\frac{dT_c}{dt} \right)$: Variación de la temperatura respecto al tiempo

Energía perdida de la camisa

$$E_{pc} = h \cdot A [T_{c(t)} - T_\alpha] \quad (29)$$

Donde,

h : Coeficiente de transferencia de calor.

A : Área de transferencia de calor.

$T_{c(t)}$: Temperatura del cilindro, determinada por el tiempo.

T_α : Temperatura del medio ambiente.

Energía almacenada en el tornillo

$$E_{ah} = m_h \cdot Cp_h \cdot \left(\frac{dT_h}{dt} \right) \quad (30)$$

Donde,

m_h : Masa del tornillo extrusor

Cp_h : Calos específico del acero del tornillo $\left(0,11 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg K}} \right)$

$\left(\frac{dT_h}{dt} \right)$: Variación de la temperatura respecto al tiempo

Para considerar, el tornillo y la camisa tienen la misma temperatura de trabajo. Esto se mide a raíz de la termocupla que se instala lo más cerca posible al diámetro interno de la camisa sin llegar al tornillo o al material a extruir y logra medir la temperatura en el interior de la camisa. Con esta consideración, se combinan las ecuaciones de calor de la camisa y el tornillo, llegando a esta expresión.

$$E_{ec} = E_{ac} + E_{sc} + E_{pc}$$

$$E_{ec} = m_c \cdot Cp_c \left(\frac{dT_c}{dt} \right) + m_h \cdot Cp_h \cdot \left(\frac{dT_h}{dt} \right) + h \cdot A [T_{c(t)} - T_\alpha]$$

$$E_{ec} = (m_c \cdot Cp_c + m_h \cdot Cp_h) \left(\frac{dT}{dt} \right) + h \cdot A [T_{c(t)} - T_\alpha]$$

Reemplazando la siguiente ecuación con esta sustitución

$$Q = E_{ec}$$

$$Q_t = T_{c(t)} - T_\alpha$$

$$\frac{dQ}{dt} = dT_{(t)} = \frac{dT}{dt}$$

$$M = \frac{h \cdot A}{m_c \cdot Cp_c + m_h \cdot Cp_h}$$

$$P = \frac{Q}{m_c \cdot Cp_c + m_h \cdot Cp_h}$$

Lo que reduce la ecuación a:

$$\frac{dQ}{dt} = P - M \cdot Q_{(t)} = 0$$

$$\frac{dQ}{dt} = M \cdot Q_{(t)} = P$$

Resolviendo esta ecuación diferencial tenemos:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{(-MT)} + [1 - e^{(-MT)}] \left(\frac{P}{M} \right)$$

Reemplazando los valores anteriores, y haciendo la consideración de que $T_{c(0)} = T_{ambiente}$, la ecuación queda de la siguiente forma:

$$T_{(t)} = \left[1 - e^{\left(-\frac{h \cdot A}{m_c \cdot Cp_c + m_h \cdot Cp_h} \right)} \right] \left(\frac{Q}{h \cdot A} \right) + T_\alpha$$

A continuación, se evalúa el coeficiente de transferencia de calor por convección, ya que interviene en la ecuación anterior.

2.6. CÁLCULO PARA EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Este coeficiente es el resultado de la suma de los coeficientes de convección y de radiación.

$$h = h_c + h_r \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right] \quad (31)$$

Donde:

h_c : Coeficiente de transferencia de calor por convección.

h_r : Coeficiente de transferencia de calor por radiación.

2.6.1. Determinación del Cálculo del Coeficiente de Transferencia de Calor por Convección

La transferencia de calor por convección es un parámetro que se determina en forma experimental y que cuyo valor depende de todas las variables que influyen sobre la convección de un cuerpo, como la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades de éste y la velocidad masiva del mismo.

Primero se evaluaron las propiedades del aire a una temperatura media del cuerpo que se analizó.

$$T_f = \frac{T_s + T_\alpha}{2} \quad (32)$$

Donde

T_s : Es la temperatura del cuerpo sólido.

T_α : Es la temperatura ambiente.

$$T_f = \frac{(483,15 + 293,15) K}{2} = 388,15 K = 115 \text{ }^\circ\text{C}$$

2.6.2. Número de Grashof

Es posible hacer adimensionales las ecuaciones que rigen la convección natural y las condiciones de frontera dividiendo todas las variables dependientes e independientes entre cantidades constantes apropiadas: longitud característica L_c , que será el diámetro exterior de la camisa, y la viscosidad cinemática del fluido ν .

$$\text{Gr}_L = \frac{g \cdot \beta (T_s - T_\alpha) L_c^3}{\nu^2} \quad (33)$$

Donde

g: fuerza de gravedad: $9,81 \frac{m}{s^2}$

β : Coeficiente de expansión volumétrica $\beta = \frac{1}{T_f}$

Lc: Longitud característica: 0,058 m

Ts: Temperatura de la superficie °C

T α : Temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie °C

ν : Viscosidad cinemática del fluido $24,68 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}$

$$Gr_L = \frac{(9,81) \cdot \left(\frac{1}{338,15}\right) (483,15 - 293,15) (0,058)^3}{(24,68 \times 10^{-6})^2}$$

$$Gr_L = 1,538 \times 10^6$$

Con el número de Grashof se busca el número de Prandtl: que es la convección de calor, las magnitudes relativas de la cantidad de movimiento y la difusión de calor en las capas límite de velocidad y térmica. Este número de Prandtl se obtiene de la tabla propiedades del aire. Se calcula con la temperatura media del cuerpo, de no ser exacto se interpola para tener certeza de su valor.

El producto entre el número de Grashof y el número de Prandtl es el número de Rayleigh que describe la relación entre la flotabilidad y la viscosidad dentro del fluido, así mismo con la cantidad de movimiento la difusividad térmica.

$$Ra_D = Gr_L \cdot Pr \quad (34)$$

Tabla 5. Propiedades del aire a 1 atm a 115 °C.

| Temperatura °C | Conductividad térmica $\frac{W}{m.K}$ | Viscosidad cinemática $\frac{m^2}{s}$ | Número de Prandtl |
|-------------------|--|--|----------------------|
| 115 | 0,03200 | $2,468 \times 10^{-5}$ | 0,7082 |

Fuente: Tabla A-15 Çengel, Y. and Ghajar, A. (2011). *Transferencia de calor y de masa*. México D.F.: McGraw Hill. Pag. 884.

$$Ra_D = (1,538 \times 10^6) \cdot (0,7082)$$

$$Ra_D = 1,0893 \times 10^6$$

Teniendo el número de Rayleigh y de Prandlt se calculó el número de Nusselt, crucial para el estudio, ya que es el número adimensional que mide el aumento de la transferencia de calor a través de un cuerpo como resultado de la convección.

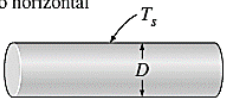
2.6.3. Número de Nusselt

En los estudios sobre convección es práctica común quitar las dimensiones a las ecuaciones que rigen y combinar las variables, las cuales se agrupan en *números adimensionales*, con el fin de reducir el número de variables totales. También es práctica común quitar las dimensiones del coeficiente de transferencia de calor h con el número de Nusselt, que se define como:

$$Nu = \frac{h L_c}{k} \quad (35)$$

Donde k es la conductividad térmica del fluido y L_c es la *longitud característica*. Se concibió como el *coeficiente adimensional de transferencia de calor por Convección*.

Tabla 6. Número Nusselt para convección natural sobre superficies

| TABLA 9-1 | | | |
|--|-------------------------------|---------------------|--|
| Correlaciones empíricas del número promedio de Nusselt para la convección natural sobre superficies | | | |
| Configuración geométrica | Longitud característica L_c | Intervalo de Ra | Nu |
| Cilindro horizontal  | D | $Ra_D \leq 10^{12}$ | $Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 Ra_D^{1/4}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (9-25)$ |

Fuente: Çengel, Y. and Ghajar, A. (2011). *Transferencia de calor y de masa*. México D.F.: McGraw Hill. Pag. 528.

Ecuación para el número de Nusselt para cilindro horizontal:

$$Nu = \left(0,6 + \frac{0,387 Ra_D^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2 \quad (36)$$

$$Nu = \left(0,6 + \frac{0,387 \cdot (1,0893 \times 10^6)^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0,559}{(0,7082)} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2$$

$$Nu = 14,886$$

Este número de Nusselt ayuda a encontrar el coeficiente de convección libre, necesaria para el cálculo de pérdidas de calor en el sistema.

$$Nu = \frac{h_c L_c}{k}; \text{ despejando } h,$$

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L_c} \quad (37)$$

$$h_c = \frac{(14,886) \cdot (0,032)}{(0,058)} = 8,213 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

2.6.4. Coeficiente de Radiación

La transferencia de calor por radiación desde una superficie a la temperatura T_s rodeada por superficies a una temperatura T_α (ambas en la unidad K de temperatura absoluta) se determina a partir de:

$$q = A \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_\alpha^4) \quad (38)$$

Donde:

A: Área de transferencia de calor.

ϵ : Emisividad de la superficie = 0,61

σ : Constante de Stefan-Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K}$

Ts: Temperatura absoluta de la superficie = $210^\circ C = 483,15 K$

T α : Temperatura absoluta ambiente = $20^\circ C = 293 K$

Las pérdidas de calor por radiación, considerando el coeficiente de pérdidas es:

$$q = A \cdot hr \cdot (Ts - T\alpha)$$

Igualando ambas ecuaciones, despejamos el coeficiente de radiación hr .

$$hr = \frac{\epsilon \cdot \sigma \cdot (Ts^4 - T\alpha^4)}{(Ts - T\alpha)} \quad (39)$$
$$hr = \frac{(0,61) \cdot (5,67 \times 10^8) \cdot (483,15^4 - 293^4)}{(483,15 - 293)} = 8,5711 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Se retoma la ecuación 18 del coeficiente de transferencia de calor

$$h = h_c + h_r = 8,213 + 8,5711e10^{16} = 8,5711e10^{16} \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

2.7. PÉRDIDAS DE CALOR

2.7.1. Pérdidas por Conducción

El calor ingresa por el cilindro a través de las bandas de resistencias en el área superficial a lo largo de la camisa, las pérdidas por conducción se encuentran en los extremos donde tiene contacto con otras partes de la máquina, como la tolva, el reductor de velocidad y los soportes.

$$Q_c = hc \cdot \Delta T \cdot S \quad (40)$$

Donde:

hc : Coeficiente de convección.

ΔT : Delta de temperatura.

S : Área en contacto de transferencia de calor.

$$\begin{aligned} S &= \pi \cdot \phi \cdot L = \pi \cdot (0,058) \cdot (0,383) = 0,0697m^2 \\ Qc &= (hc) \cdot (\Delta T) \cdot S \\ Qc &= (8,213) \cdot (483,15 - 293) \cdot (0,0697) = 108.8506 W \end{aligned}$$

2.7.2. Pérdidas por Radiación

Las pérdidas de calor por radiación son pérdidas en forma de ondas electromagnéticas. Habiendo un intercambio de energía electromagnética entre el cilindro y el medio ambiente que se encuentre.

$$Qr = S \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot (Ts^4 - T\alpha^4) \quad (41)$$

Donde:

S : Área de transferencia de calor. $0,0697 m^2$

ϵ : Emisividad del acero en la superficie = $0,865$

σ : Constante de Stefan-Boltzmann = $5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K}$

Ts : Temperatura absoluta de la superficie. $483,15 K$

$T\alpha$: Temperatura absoluta ambiente. $293 K$

$$Qr = (0,0697) \cdot (0,865) \cdot (5,67 \times 10^{-8}) \cdot (483,15^4 - 293^4) = 161,1 W$$

2.7.3. Cantidad de Calor Necesaria para Elevar el Material a la Temperatura de Extrusión

$$Qn = \frac{dm}{dt} \cdot Cp \cdot \Delta T \quad (42)$$

Donde:

Qn : Cantidad de calor necesaria por el polímero.

$\frac{dm}{dt}$: Flujo másico de material de la extrusora. $7,384 \frac{Kg}{h}$ de PLA

Cp : Calor específico del PLA a $210\text{ }^\circ\text{C}$. $2,087 \frac{KJ}{Kg\text{ }^\circ\text{C}}$.

T_s : Temperatura de extrusión del PLA. $210\text{ }^\circ\text{C}$

T_α : Temperatura de entrada del material. $20\text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_n = \left(7,384 \frac{Kg}{h}\right) \cdot (2,087) \cdot (210 - 20) = 2927,978 \frac{KJ}{h} = 813,3 W$$

2.7.4. Cantidad de Energía Calorífica de Todo el Sistema

$$Q_{TOTAL} = Q_n + Q_c + Q_r \quad (43)$$

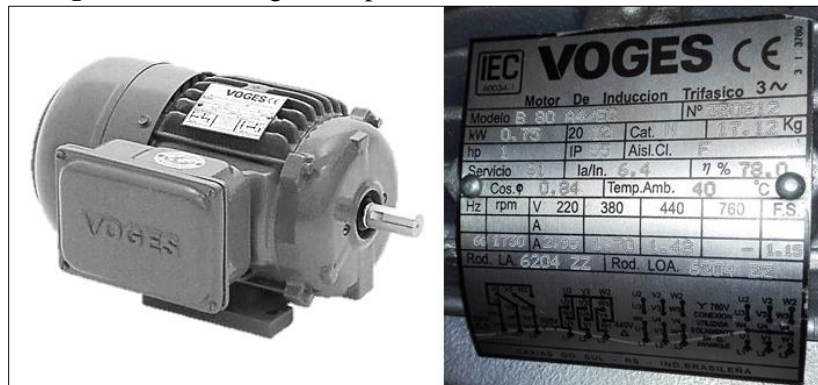
$$Q_{TOTAL} = 813,3 + 161,1 + 108,850 = 1.083,250 W$$

La energía calorífica necesaria para que las resistencias puedan fundir el material plástico en el interior del cilindro de extrusión y así pueda ser extruido es de 1,083 kW

3. SELECCIÓN Y ENSAMBLE

3.1. Motorreductor

Imagen 1: Motor Voges con placa.



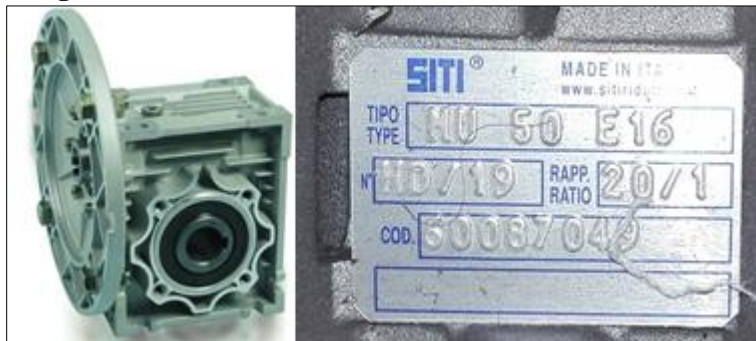
Fuente: Autor.

El motorreductor es el sistema de potencia mecánica que ayuda al movimiento de empuje del tornillo extrusor, cuenta con un motor eléctrico seleccionado de acuerdo con las características de la máquina y un reductor que ayuda a la disminución de las revoluciones entregadas por el motor.

El motor seleccionado es un motor VOGES trifásico, para que opere con la energía eléctrica instalada de la universidad. Este motor cuenta con una potencia de 0.75 kW o 1 HP. Que trabaja a 1730 RPM

El motor va acoplado con un reductor, que como se infiere por su nombre, reduce las revoluciones que llegan al tornillo extrusor. También ayuda a soportar las fuerzas axiales que tiene el tornillo a partir de la presión de salida del material. Este reductor consta de unos engranajes que ayuda a reducir las revoluciones entregadas por el motor. Este dispositivo maneja una relación de 20:1 y ayuda mantiene el torque necesario para el tornillo.

Imagen 2. Reductor SITI 20:1



Fuente: Autor

3.2. Sistema Electrónico y Eléctrico

3.2.1. Variador de frecuencia del motor

El variador de frecuencia funciona conectando las tres líneas de energía de la instalación eléctrica antes de que lleguen al motor. El variador de frecuencia regula la entrada de corriente al motor, permitiendo que solo sea enviada la energía necesaria para que el motor funcione, con un accionamiento a partir de la frecuencia de trabajo.

La selección de este equipo se hizo a partir del consumo del motor, el motor conectado a una red trifásica de 220v, maneja un consumo de 2,95 Amperios. Luego de que se conecta el variador a la

bornera de entrada del motor, el control del variador se conecta a un potenciómetro, que regula el régimen de frecuencia que conduce el motor, en un rango de 0 Hz a 60 Hz.

Imagen 3. Variador de frecuencia y conexión.



Fuente: Autor

3.2.2. Sistema de calentamiento

Teniendo en cuenta que la energía calorífica necesaria para la extrusión de PLA es de 1,084 kW, se fabricaron resistencias tipo abrazadera para la camisa de este equipo de extrusión. Estas resistencias poseen una lámina en su interior que es la que transforma la energía eléctrica en calor. A su vez, esa lámina está recubierta por un aislante térmico para que la energía se concentre y sea transferida hacia el centro del tornillo y camisa de extrusión.

Imagen 4. Resistencia banda 220v



Fuente: Autor

La configuración para conectar las resistencias son dividirlos en 2 grupos: el primer grupo son las resistencias para la zona de alimentación, que son un total de 4 resistencias conectadas en paralelo; con la medida del diámetro exterior de la camisa con un ancho de acuerdo las dimensiones del tornillo determinado para la zona. El segundo grupo de resistencias es utilizado para la zona de compresión o plastificado, ya cuenta con la última resistencia de una medida especial para el cabezal de extrusión ya que cuenta con mayor tamaño al diámetro y por consiguiente mayor potencia que las demás.

Imagen 5. Sistema de resistencias del equipo



Fuente: Autor

3.2.3. Tablero Eléctrico

El tablero eléctrico contiene varios elementos eléctricos para el manejo de la máquina. En su interior está compuesto por contactores, breakers, borneras, transformador y cableado identificado para todo el control interno. Para el control externo y mando del equipo se encuentran Amperímetros, Pirómetros, muletillas de 2 posiciones, potenciómetro y display del variador de frecuencia.

Imagen 6. Tablero eléctrico y de control

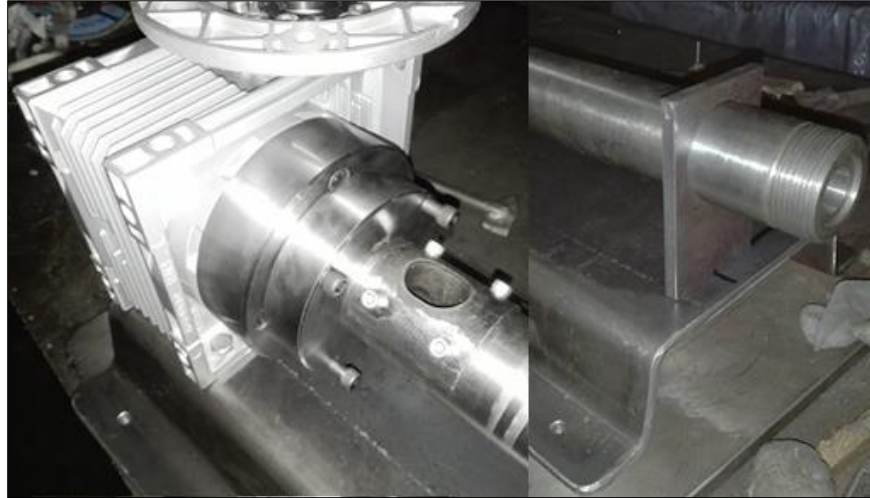


Fuente: Autor

3.3. Ensamblaje

Ya teniendo mecanizadas varias piezas del equipo se inicia el ensamble de la máquina extrusora, proceso que comenzó con la estructura. Ésta se instaló sobre una placa metálica doblada para que le de soporte a la máquina. Esta placa cuenta con los agujeros para atornillar el reductor y la base para la camisa.

Imagen 7. Ensamble de reductor y camisa al soporte de máquina.



Fuente: Autor

Se fabricó una tolva en acero inoxidable, la forma cónica de esta tolva ayuda que la materia prima en forma de gránulos o pellets caiga mejor hacia la alimentación de la máquina, esta tolva está asegurada por unos tornillos y una placa en la camisa.

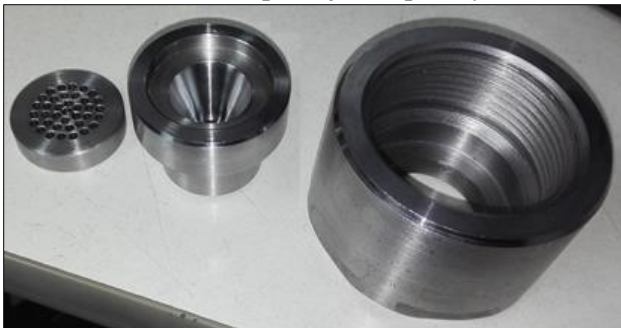
Imagen 8. Tolva y soporte para motor



Fuente: Autor

Las boquillas que son la que dan la preforma del material cuando salen de la máquina. Estas piezas van sujetas una dentro de otra, y a la camisa por una rosca y el cabezal.

Imagen 9. Disco rompe flujo, boquilla y cabezal



Fuente: Autor

Imagen 10. Ensamble de disco, boquilla y cabezal



Fuente: Autor

Imagen 11. Equipo de extrusión ensamblado



Fuente: Autor

3.4. Ensayo y calibración

Se ensayó la máquina extrusora con un polietileno baja densidad. Este material posee un Melt index de mayor grado que el PLA, quiere decir que no es tan fluido en temperaturas altas en el momento de extrusión.

Se manejaron temperaturas de 230° C en la extrusión, y una velocidad de 30 Hz. Como resultado de esta primera configuración, el material plástico a la salida de la boquilla era muy grueso, superaba los diámetros requeridos para extrusión y era bastante maleable, impidiendo la creación de un cordón de filamento.

Imagen 12. Ensayo con polietileno



Fuente: Autor

Para el ensayo de PLA 4043D de monofilamento, se configuro la máquina para la temperatura de extrusión del PLA que son 210 °C, y la misma frecuencia de motor 30 Hz. En esta prueba, el PLA que salía de la máquina extrusora tenía un diámetro de gran tamaño. A pesar de esto, el material se podía trabajar con pocas revoluciones del tornillo, disminuyendo el diámetro de filamento a la salida. Con una nueva frecuencia de 15 Hz de motor, el material a la salida de la extrusora fue de mejor diámetro, cerca de los 3mm que se buscan y de mejor consistencia. Además, el color cambió a uno más cristalino. En cuanto al tiempo de endurecimiento de secado, se encontró que requería un menor lapso después de extruido.

Imagen 13. Ensayo con PLA 4043D



Fuente: Autor

Adicionalmente, como colaboración para otro proyecto de grado, se realizaron ensayos para lograr mezclar material plástico con fibras de guadua. De esta prueba se pudo conocer mejor cómo extruir la fibra, la sensibilidad propia del material con la temperatura (logra quemarse) y su manejo en diversas proporciones para obtener diferentes resultados.

Imagen 14. Ensayo con fibra de guadua.



Fuente: Autor

Este monofilamento de fibra se procesó para obtener gránulos y con ellos, fabricar probetas de ensayos y hacer una caracterización del material. Vásquez, C. L. (2020, 12 mayo). Caracterización Mecánica a Tensión de Un Material Compuesto de Fibra Corta de Guadua (*Angustifolia Kunth*) y Resina Termoplástica (Polietileno de Baja Densidad).

En el consumo eléctrico del equipo, se monitoreo con una pinza amperimétrica, la cual se registró el valor tomándolo en las resistencias y el motor.

Imagen 15. Toma de amperaje en las resistencias



Fuente: Autor

El consumo de energía de la máquina se calculó como:

$$POT = \sqrt{3} \cdot Voltaje \cdot Amp_{prom} \cdot Cos\varphi \quad (44)$$

$$POT = \sqrt{3} \cdot 220v \cdot 4,59 amp \cdot 0,84$$

$$POT = 1469,98 watts = 1,47 kW$$

Este resultado de potencia se divide en la producción de material obtenido en 1 hora de trabajo continuo, en nuestro caso 5 kg/h

$$Eficiencia Energetica = \frac{1,47 kW}{5 \frac{kg}{h}}$$

$$e = 0,29399 \frac{kW.h}{kg} = 0,294 \frac{kW.h}{kg}$$

Esto nos dice que por cada kg de material extruido se tiene un gasto de energía de 0,294 kW.h

4. ESTADÍSTICAS

Desafortunadamente, uno de los mayores enemigos de estas iniciativas para el medio ambiente es la población colombiana. Todavía los gobiernos locales no realizan suficientes esfuerzos que se traduzcan en un cambio de paradigma para los habitantes de zonas urbanas -y por consiguiente, los mayores consumidores- y para los campesinos o residentes de zonas rurales en los que el plástico, en sus diferentes presentaciones, es utilizado a escalas distintas.

De acuerdo con las escasas estadísticas que se conocen sobre reciclaje de plástico en el país -hecho que se afectado por la inmensa cantidad de plástico que se recicla de manera informal-, se tiene un promedio general entre el 12% - 15%. En empaques rígidos se registran tasas de aproximadamente entre 15% y 20% y en PET, tasas que rondan entre el 33% y el 35%, según afirma Daniel Mitchell. **(Pineda, 2019)**. Por su parte, la Procuraduría General de la Nación reporta que se consumen 60 gramos diarios por persona, cantidad que aumenta a 2 kilos al final del mes.

Dentro del territorio colombiano, la clasificación de polímeros usada en la industria corresponde con los estándares internacionales como se evidencia en el proyecto de ley que los describe de la siguiente manera: “Plásticos de un solo uso: Son aquellos fabricados, a partir de Tereftalato de Polietileno (PET), Polietileno de Baja Densidad (LDPE), Polietileno de Alta Densidad (HDPE), Poliestireno (PS), Polipropileno (PP) y Poliestireno Expandido, que son usados por una sola vez y cuya vida útil es muy corta, inclusive de minutos, para luego ser desechados”(Lozada, 2018).

5. COMPROMISOS, VENTAJAS, RECOLECCIÓN Y RECICLAJE

La disposición adecuada de residuos plásticos, de acuerdo con la Guía Ambiental del sector de los plásticos, es un factor que la legislación del país contempla desde 1997. Para lograr dicho objetivo, se crearon diferentes programas que alientan a consumidores y productores a realizar una recolección de residuos que resulte productiva y facilite el desarrollo de procesos de reutilización y reciclaje. Sin

embargo, las medidas no han logrado cumplir totalmente con su cometido ya que “la falta de separación en la fuente y la gran variedad de plástico que existe en el mercado de difícil identificación por parte del productor, representan algunos de los mayores problemas para su selección y posterior tratamiento” (MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL - Guía ambiental, 2004). Para la época de publicación de este manual, la única opción de reciclaje era el reciclaje mecánico, generalmente en cantidades industriales que debía buscarse en cielos abiertos, sistema de recolección de residuos que prevalece hasta nuestros días.

Quince años después de la publicación del documento se presentan avances. Actualmente en Colombia se cuenta con dos técnicas de reutilización de polímeros: reciclaje mecánico y reciclaje químico, previendo que los detritos o sobras lleguen a los rellenos sanitarios -lugares que no se encuentran correctamente adaptados para la separación ideal de los diferentes tipos de residuos producidos en menor, mediana y gran escala- sin haber alcanzado su máximo de vida útil. También se tiene constancia del uso de incineración con recuperación energética, tecnología con menor porcentaje de utilización. Sumado a lo anterior, las empresas productoras de plástico continúan trabajando con estándares de identificación internacional que facilita el proceso de reconocimiento de los materiales.

El reciclaje mecánico ocupa el primer lugar como mecanismo de reutilización, pero no define a un único procedimiento. Dentro de esta opción se agrupan distintos procesos físicos de transformación de los polímeros residuales, conocidos como polímeros postindustriales o posconsumo, claro está, sin que necesariamente se desarrollen de manera jerárquica. Recolección, selección y clasificación, escamado, pulverizado, mezcla y extrusión son algunos de los que integran el método tradicional de reciclaje de plásticos.

La efectividad de este mecanismo requiere de minucioso conocimiento y rápida identificación de polímeros termoestables y polímeros termoplásticos, puesto que no todos los desechos plásticos clasifican para procesos de reutilización que alarguen su vida útil, cumpliendo nuevas funciones.

Tabla 7. Usos de los polímeros reciclados en Colombia

| TIPO DE POLÍMERO REICLADO | APLICACIÓN POSTERIOR |
|----------------------------------|--|
| Polietileno tereftalato (PET) | Fabricación de fibras, fleje, tejas, escobas, aleaciones y compuestos. |
| Polietileno (PE) | Botellas para productos de limpieza, cajas de gaseosa, materas, juguetes, bolsas plásticas, contenedores industriales, tubería para riego conduit, pallets o estibas, entre otros. |
| Policloruro de vinilo (PVC) | Fabricación de tubería conduit de desagüe, suelas de zapatos, zoclo, pisos y recubrimiento de alambre, elementos para señales de tránsito, copas de carros. |
| Polipropileno (PP) | Fabricación de baterías y sistemas de ventilación de autos, sillas, conos textiles, ganchos para ropa, hebillas, utensilios para cocina y procesamiento de alimentos, juguetes, contenedores industriales y otros. |
| Poliestireno (PS) | Fabricación de accesorios de oficina, empaques de comida, utensilios para procesar alimentos, útiles escolares, aislamientos térmicos. Ampliamente utilizado en la industria del calzado para la elaboración de tacones. |

Fuente: Datos tomados del Directorio colombiano de reciclaje de residuos plásticos. Copyright 2019 - 2020, Acoplásticos. Versión de libre acceso. <https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights/how-plastics-waste-recycling-could-transform-the-chemical-industry>.

6. CONCLUSIONES

En conclusión, a lo presentado en este artículo, tras un proceso de evaluación y revisión metódica de los procesos técnicos requeridos, se logró realizar el diseño y fabricación de una máquina extrusora de filamento en polímero para impresión MDF. En este sentido, es pertinente mencionar que se cumplió a cabalidad el objetivo que sustenta el desarrollo de este proyecto, puesto que el equipo no ha presentado fallos en su funcionamiento desde su construcción.

El equipo de extrusión para polímeros con fines de laboratorio cuenta con un diámetro de husillo de 25 mm, una relación L/D de 18:1 y una capacidad de producción de 5 kg/h en PELD, con dos dados que permiten conformar filamentos de 1,75 mm y 3 mm de diámetro. En este sentido, la máquina extrusora es un equipo robusto y pesado en relación con la materia prima que es objeto de su trabajo. Esto confirma que se diseñó una extrusora versátil capaz de satisfacer la necesidad de distintos clientes.

Imagen 16. Equipo de extrusión



Fuente: Autor

Lo anterior indica que el equipo cumple con su cometido de transformación de distintos polímeros, ya que dentro de los materiales con los que la máquina extrusora puede trabajar se cuentan fibras naturales, pigmentos, resinas y otros tipos de material solicitados previamente, ya que es un equipo cuya materia prima será obtenida y transformada sobre pedido. De esta manera, se espera contribuir al apoyo de pequeños proyectos que trabajen en la industria del plástico.

Imagen 17. Vista frontal del equipo



Fuente: Autor

Las dimensiones de la máquina permiten su traslado en caso de ser requerido. Si bien es un equipo concebido desde y para la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Santo Tomás, no cuenta con un espacio designado. Esto permite realizar demostraciones, exposiciones y abrir espacios de investigación a los interesados en trabajar con polímeros. Sin embargo, se recomienda asignar una ubicación dentro de los laboratorios, si la máquina no está en uso, para evitar cualquier daño y mejor uso para los procesos los procesos de extrusión.

7. CONSIDERACIONES FINALES

Diferentes estudios a nivel global confirman que el reciclaje mecánico es un negocio de gran magnitud. Sin embargo, Colombia todavía se encuentra rezagada en la implementación o combinación de tecnologías que ayuden a mitigar los daños ambientales causados por el uso de productos químicos o los remanentes. La elaboración de este equipo puede ser uno de los pasos iniciales en la creación de conciencia ambiental y participación activa de la industria, un rol que los seres humanos del siglo XXI deben asumir para generar cambios profundos en la sociedad.

Aunque los cambios legislativos todavía no se han impuesto en el territorio nacional. La aprobación del proyecto de ley en sus primeras instancias afectó principalmente a los productores de plástico, ya que han debido o se encuentran en el proceso de modificar su proceso de producción, teniendo en cuenta la demanda de material, los costos del mercado y los cambios sociales a los que se ve sujeta la población o los consumidores con estas nuevas normas. Es decir, los productores deben buscar alternativas más amigables con el medio ambiente, incluyendo, por ejemplo, cambios al uso en exceso de bolsas plásticas y botellas PET para fomentar el uso racional.

8. REFERENCIAS

ACOPLÁSTICOS. (2019). Directorio colombiano de reciclaje de residuos plásticos. Recuperado de <https://www.acoplasticos.org/AFshjuraaF47lfjbOSTNKYs4831gepsfiq57DRCFws38164LXIEMFhqner/sGcWB9lkZ/dcr19-20/2/#zoom=z>

ACOPLÁSTICOS PROMUEVE RECICLAJE Y LIMPIEZA. (2019, 5 enero). Recuperado 13 septiembre, 2019, de <https://www.elnuevosiglo.com.co/articulos/01-2019-acoplasticos-promueve-reciclaje-y-limpieza>

ALTAIR ENGINEERING GMBH. (2022). Processing / Physical Characteristics. In *M-Base Engineering + Software GmbH*. Recuperado 24 de enero, 2022, de <https://www.materialdatacenter.com/mb/material/pdf/495258/495258/Ingeo4043DMonofilament>

AMERICAN WATER WORKERS ASSOCIATION. PVC pipe-desing and installation. Segunda edición. Capítulo 1. AWWA Manual. Denver Estados Unidos.

ASHBY, Michael. JONES, David. Materiales para ingeniería 2. Introducción a la microestructura, el procesamiento y el diseño. Editorial Reverté. Departamento de ingeniería de la universidad de Cambridge. Reino Unido.2009. Pg. 250-280.

BELTRÁN Maribel y MACILLA Andrés. Tecnología de polímeros tema 3, bases del proceso de polímeros. San Vicente. Editorial: Universidad de Alicante. España. 2012.

BENAVENTE, R. Polímeros amorfos, semi cristalinos, polímeros cristales líquidos y orientación. Madrid, España. Editorial: instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros. S.F. 2012.

BILLMEYER, Fred. Ciencia de los polímeros. Editorial Reverté. Resselaeer Polytechnic institute, Troy, Nueva York. Pag. 392- 415

BUDYNAS, R., SHIGLEY, J., NISBETT, J. AND RÍOS SÁNCHEZ, M. (2008). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. México: McGraw-Hill.

CIGÜENZA RIAÑO, N. C. R. (2019, 26 marzo). Acoplásticos, preocupado por proyecto que prohíbe plásticos de un solo uso. Recuperado 10 septiembre, 2019, de <https://www.larepublica.co/economia/acoplasticos-preocupado-por-proyecto-que-prohibe-plasticos-de-un-solo-uso-2844084>

ÉLIDA, Hermida. Polímeros Guía didáctica, Capítulo 9. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. República Argentina. Editorial: Ministerio de Educación y Tecnología. 2011.

EUR.EX.MA. (2022). Estrusori - Eurexma. <https://Www.Eurexma.Com/>. Recuperado 24 enero, 2022, de <https://www.eurexma.com/it/pages/699-Estrusori>

GARCÍA SIERRA, S. G. S. (2019, 7 febrero). Las impresoras 3D y su uso para la sociedad - ACN | Agencia Central de Noticias. Recuperado 8 septiembre, 2019, de <http://acn.ucentral.co/index.php/actualidades/2627-las-impresoras-3d-y-su-uso-para-la-sociedad>

GÓMEZ SERRATO, J. G. (2016). DIAGNÓSTICO DEL IMPACTO DEL PLÁSTICO - BOTELLAS SOBRE EL MEDIO AMBIENTE: UN ESTADO DEL ARTE. Recuperado 10 octubre, 2019, de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/10047/Gomez2016.pdf?sequence=1>

GOMIS, A. M., & BELTRAN RICO, M. (2012). Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades. Alicante, España: Publicaciones de la Universidad de Alicante.

GONÇALVES, Cesar. Structural characterization and optical monitoring of the crystallization of high-density polyethylene nano composites with different particles during injection molding. Recuperado de: https://www.researchgate.net/figure/Figura-224-Arranjo-estrutural-de-um-polimero-semicristalino-105_fig1_311921103. 2014

IMPACTO DE LA IMPRESIÓN 3D EN LA FABRICACIÓN GLOBAL (2019, 29 marzo). Recuperado 10 septiembre, 2019, de <https://www.impresoras3d.com/impacto-de-la-impresion-3d-en-la-fabricacion-global/>

LÓPEZ, Ignacio, trabajo de grado, cuantificación de incertidumbres en el estudio conformacional de muestras poliméricas mediante gpc-mals, Editorial: Universidad Rey Juan Carlos. Mostoles, España. 2011.

LOZADA, L. J. (2018). PROYECTO DE LEY _____ de 2018. Recuperado de http://www.andi.com.co/Uploads/PL%20PLASTICOS%20V3_636755635434025819.pdf

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. (2004). Sector Plásticos. Principales procesos básicos de transformación de la industria plástica y Manejo, aprovechamiento y disposición de residuos plásticos post-consumo. (GUÍAS AMBIENTALES). Recuperado de <https://justiciaambientalcolombia.org/wp-content/uploads/2012/09/guias-ambientales-sector-plc3a1sticos.pdf>

MORALES, M. C. (2019, 13 septiembre). "Es una acusación grave": Greenpeace responde a gremio del plástico. Recuperado 18 septiembre, 2019, de <https://www.rcnradio.com/estilo-de-vida/medio-ambiente/es-una-acusacion-grave-greenpeace-responde-gremio-del-plastico>

NARANJO CARVAJAL, A., SIERRA MUÑETÓN, J., SANZ, J., NORIEGA ESCOBAR, M. Y OSSWALD VÍCTOR, T. (2009). Tecnología de los Plásticos - Manual de Bolsillo 1. Cucuta, Colombia: Editorial Guadales Limitada

PINEDA, P. O. (2019, 5 junio). Llegamos tarde, pero estamos abiertos al cambio: Acoplásticos. Recuperado 10 septiembre, 2019, de <https://www.las2orillas.co/llegamos-tarde-pero-estamos-abiertos-al-cambio-acoplásticos/>

PORTAFOLIO. (2019, 26 mayo). 'Los plásticos no son una amenaza que hay que prohibir'. Recuperado 25 septiembre, 2019, de <https://www.portafolio.co/negocios/empresas/los-plasticos-no-son-una-amenaza-que-hay-que-prohibir-529943>

SAVGORODNY, V. K. (1978). Transformación de plásticos. Barcelona, España: Editorial Gustavo Gili S.A.

Vásquez, C. L. (2020, 12 mayo). Caracterización Mecánica a Tensión de Un Material Compuesto de Fibra Corta de Guadua (*Angustifolia Kunth*) y Resina Termoplástica (Polietileno de Baja Densidad). <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/23150>