

DISEÑO DE UNA MAQUINA RECICLADORA DE PLÁSTICO PET DOMÉSTICA
PARA SU USO EN IMPRESIÓN 3D

MANUEL FERNANDO GALVIS APARICIO
AARON DE JESUS MEZA ESPINOSA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2021

DISEÑO DE UNA MAQUINA RECICLADORA DE PLÁSTICO PET DOMÉSTICA
PARA SU USO EN IMPRESIÓN 3D

MANUEL FERNANDO GALVIS APARICIO
AARON DE JESUS MEZA ESPINOSA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

Director:

Ing. PEDRO JOSE DIAZ GUERRERO
Master métodos numéricos aplicados al cálculo

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2021

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
2. JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA	16
3. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN	18
4. OBJETIVOS.....	20
4.1. OBJETIVO GENERAL	20
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
5. MARCO TEÓRICO	21
5.1. IMPRESIÓN 3D	21
5.1.1. Modelado por Deposición Fundida (FDM).....	22
5.1.2. Estereolitografía (SLA).....	23
5.1.3. Sinterizado Láser Selectivo (SLS).....	24
5.2. EXTRUSIÓN	25
5.2.1. Tipos de extrusión.....	25
5.2.2. Extrusora	27
5.3. POLÍMEROS	30
5.3.1. Polimerización	32
5.3.2. Estructuras de los polímeros.....	33
5.3.3. Temperatura de transición vítrea	36
5.3.4. Degradación de los polímeros	37
6. METODOLOGÍA DEL DISEÑO.....	38
6.1. INVESTIGACIÓN PRELIMINAR	39
6.2. ESPECIFICACIONES DE DESEMPEÑO.....	39
6.3. SUBSISTEMAS.....	40
7. DESARROLLO DEL DISEÑO	41
7.1. INVESTIGACIÓN PRELIMINAR	41
7.2. ESPECIFICACIONES DE DESEMPEÑO.....	44
7.3. SUBSISTEMAS.....	45
7.3.1. Sistema de Extrusión	45

7.3.2. Sistema de Tiro de Hilo.....	68
7.3.3. Sistema de Distribución de Filamento	72
7.3.4. Sistema de Hilado.....	74
7.3.5. Sistema de Electrónica	78
8. MODELO DE FUSIÓN	87
8.1. MODELO DE PEARSON	87
8.2. ENFRIAMIENTO DEL FILAMENTO	92
8.3. PERDIDA DE CALOR EN EL CILINDRO	95
8.4. ELEMENTO DE CALENTAMIENTO	97
9. ANALISIS TÉCNICO-ECÓNOMICO.....	101
9.1. ANALISIS TÉCNICO	101
9.1.1. Insumos Manufacturados.....	101
9.1.2. Insumos Estandarizados.....	102
9.1.3. Insumos Electrónicos.....	102
9.1.4. Insumos Impresos en 3D	103
9.2. ANALISIS ECONÓMICO.....	105
9.2.1. Valor Actual Neto.....	107
9.2.2. Periodo de Recuperación de la Inversión.....	108
10. CONCLUSIONES	109
BIBLIOGRAFÍA.....	111
ANEXOS	117

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Factor A.	58
Tabla 2. Capacidad y velocidad de transportadores en espiral.	59
Tabla 3. Relación G-H.	60
Tabla 4. Datos geométricos del husillo.	87
Tabla 5. Datos del proceso de extrusión.	88
Tabla 6. Datos térmicos y físicos del material a fundir.	88
Tabla 7. Datos del tornillo.	89
Tabla 8. Velocidades en las interfases.	89
Tabla 9. Contantes adimensionales del proceso.	89
Tabla 10. Datos de salida del calor suministrado.	89
Tabla 11. Proceso de fusión en la zona de transporte.	90
Tabla 12. Proceso de fusión en la zona de transición.	90
Tabla 13. Insumos Manufacturados.	101
Tabla 14. Insumos Estandarizados.	102
Tabla 15. Insumos Electrónicos.	103
Tabla 16. Insumos Impresos en 3D.	104
Tabla 17. Balance Total.	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Contaminación de plástico.	14
Figura 2. Contaminación por plástico en la playa este de la isla Henderson.	16
Figura 3. Máquinas de Precious Plastic.	18
Figura 4. Deposición de Filamento Fundido (FDM).	22
Figura 5. Estereolitografía (SLA).	23
Figura 6. Sinterizado Laser Selectivo (SLS).	24
Figura 7. Extrusión.	25
Figura 8. Extrusión indirecta.	26
Figura 9. Esquema de extrusora.	27
Figura 10. Zonas de una extrusora y perfil de presión desarrollado.	28
Figura 11. Geometría del husillo.	29
Figura 12. Monómero de etileno.	32
Figura 13. Cadena de Polietileno.	32
Figura 14. Estructura ramificada en los polímeros.	34
Figura 15. Estructura a) entrecruzada, y b) en red, en los polímeros.	34
Figura 16. Estructura lineal en los polímeros.	35
Figura 17. Diagrama de la Metodología de Diseño.	38
Figura 18. Geometría del husillo.	46
Figura 19. Geometría transversal del cabezal.	51
Figura 20. Zona de transición.	54
Figura 21. Tolva.	66
Figura 22. Modelo CAD del rodillo.	70
Figura 23. Momento de inercia del rodillo.	71
Figura 24. Modelo CAD del carrete.	77
Figura 25. Modelo CAD del carrete.	78
Figura 26. Arduino MEGA 2560.	79

Figura 27. Pantalla LCD y modulo I2C.....	79
Figura 28. Conexión pantalla LCD y modulo I2C.	80
Figura 29. Motor paso a paso bifásico 1,2 Nm.....	81
Figura 30. Controlador de motores paso a paso.	81
Figura 31. Fuente conmutada MS-500-24.	82
Figura 32. Conexión de motor paso a paso.	82
Figura 33. Motorreductor 49 RPM 12V.	83
Figura 34. Modulo L298N de control de motores.	84
Figura 35. Conexión motor corriente directa.	84
Figura 36. Motorreductor de 350 RPM 12V.....	85
Figura 37. Volumen de control en análisis de enfriamiento del filamento.	92
Figura 38. Calentador de banda en acero inoxidable.....	97
Figura 39. Semiconductor triac BTA16.	98
Figura 40. Optoacoplador MOC3010.	98
Figura 41. Termocupla tipo K.....	99
Figura 42. Modulo MAX6675.	99
Figura 43. Conexión del sistema de calentamiento.....	100
Figura 44. Carrete OVERTURE de filamento PLA en 1,75mm.	106

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. PROPIEDADES DEL PET RECICLADO.....	117
ANEXO B. PROPIEDADES ACERO AISI 4140.....	120
ANEXO C. PROPIEDADES ACERO AISI SAE 304.....	121
ANEXO D. SISTEMA DE EXTRUSIÓN.	122
ANEXO E. SISTEMA DE TIRO DE HILO.....	135
ANEXO F. SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE FILAMENTO.....	142
ANEXO G. SELECCIÓN DE CORREA EN SISTEMA DE HLADO.	151
ANEXO H. SISTEMA DE HILADO.....	154
ANEXO I. SISTEMA DE RECICLAJE DE PLASTICO PET.....	169
ANEXO J. MODELO DE FUSIÓN.....	180
ANEXO K. ENFRIAMIENTO DEL FILAMENTO.....	186
ANEXO L. CALOR PERDIDO EN EL CILINDRO.....	191
ANEXO M. RENTABILIDAD EXIGIDA Y RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN MES A MES.....	195

RESUMEN

TITULO: DISEÑO DE UNA MAQUINA RECICLADORA DE PLÁSTICO PET DOMÉSTICA PARA SU USO EN IMPRESIÓN 3D. *

AUTORES: MANUEL FERNANDO GALVIS APARICO
AARON DE JESUS MEZA ESPINOSA**

PALABRAS CLAVES: IMPRESIÓN 3D, EXTRUSORA, PLASTICO, RECICLAJE, DISEÑO, MODELO MATEMATICO, PET.

DESCRIPCIÓN:

El continuo crecimiento de la industria del plástico acarrea la responsabilidad de disponer de los residuos generados, los consumibles de un solo uso representan una parte importante en el problema de la contaminación. Los países a nivel mundial, acompañados de ONGs ambientales, han implementado políticas ambientales y campañas de recolección en sus territorios. Para los hogares, principal foco de producción de residuos, se realizó el diseño de una maquina recicladora que busca darles un nuevo destino a los residuos plásticos, centrándose en el PET, como hilo de impresión 3D por el método de deposición de filamento fundido. Utilizando relaciones matemáticas, se llevó a cabo el diseño de una extrusora monohusillo de tamaño reducido, que se puede colocar sobre una mesa sencilla, con independencia de funcionamiento de una hora, que desarrolla un perfil de calentamiento plano y cuenta con un sistema de jalado y bobinado de hilo con un diámetro de 1,75 mm, extensamente utilizado en impresión 3D. Mediante un modelo matemático del proceso de fundición que ocurre dentro de la extrusora, se confirmó teóricamente que la geometría del husillo, la temperatura de calentamiento y velocidad del proceso son óptimas para su funcionamiento y producción. La clasificación del PET como termoplástico sugiere la idea del reformado para su reciclaje, pero el proceso de calentamiento repetido afecta la composición y ordenamiento químico del polímero, estudios científicos compararon las propiedades del material virgen y el reutilizado encontrando que existe un cambio perceptible pero que no afecta mayormente al material. Pese al desarrollo matemático utilizado en el diseño y modelado, en la aproximación y descripción que da la teoría a un suceso real siempre se dejan ir variables para así poder aproximarse a la solución.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: M.Sc Pedro Jose Diaz Guerrero, Mechanical Engineer.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN OF A HOUSEHOLD PET PLASTIC'S RECYCLING MACHINE FOR IT'S USE IN 3D PRINTING.*

AUTHORS: MANUEL FERNANDO GALVIS APARICO

AARON DE JESUS MEZA ESPINOSA**

KEYWORDS: 3D PRINTING, EXTRUDER, PLASTIC, RECYCLING, DESIGN, MATHEMATICAL MODEL, PET.

DESCRIPTION:

The continuous growth of the plastics industry carries the responsibility of disposing the generated waste, single-use consumables represent an important part in the contamination problem. Countries worldwide, accompanied by environmental NGOs, have implemented environmental policies and collections campaigns within their territories. For households, the main source of waste production, the design of a recycling machine was carried out that looks to give a new use to plastic waste, focusing on PET, as a 3D printing filament by the fused filament deposition method. Using mathematical relationships, the design of a reduced-size single-screw extruder was carried out, which can be placed on a simple table, regardless of an hour's operation, which develops a flat heating profile and has a puller and filament winding with a diameter of 1.75 mm, widely used in 3D printing. Using a mathematical model of the casting process that occurs within the extruder, it was theoretically confirmed that the screw geometry, heating temperature and process speed are optimal for its operation and production. The classification of PET as thermoplastic suggests the idea of reforming for recycling, but the repeated heating process affects the composition and chemical order of the polymer, scientific studies compared the properties of virgin and reused material, finding that there is a noticeable change but that it is not mostly affects the material. Despite the mathematical development used in design and modeling, in the approach and description that mathematics gives to a real event, variables are always let go in order to approach the solution.

* Degree work

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: M.Sc Pedro Jose Diaz Guerrero, Mechanical Engineer.

INTRODUCCIÓN

Desde su creación, la industria del plástico ha tenido gran acogida a nivel mundial por sus propiedades mecánicas, químicas, su fácil manufactura y su precio. En el planeta se generan gran cantidad de productos con este material, o lo involucran en su estructura, como envases de alimentos, bebidas, herramientas, juguetes, prendas de vestir, dispositivos electrónicos, etc. Gran parte de estos productos están diseñados para ser usados una única vez y por ello se los conoce como plásticos de un solo uso, como son las bolsas de compras y las películas utilizadas para sellar (ATALAY & PARKER, 2017)¹. Los desechos generados ascienden a millones de toneladas por año que terminan en vertederos, basureros o en el mar.

La ONU del medio ambiente² reporta que 13 millones de toneladas de plástico van a parar al mar cada año; que solo un 9% de los 9 mil millones de toneladas de plástico producidas en el mundo han sido recicladas; y que, si seguimos con la misma tendencia, para el año 2050 existirán cerca de 12 mil millones de toneladas de plástico desechados en el mundo.

Actualmente se conoce que los principales productores de este tipo de desechos son América, Asia y la Unión Europea³, y que el 60% del plástico que termina en los océanos proviene de solo 6 países del sudeste asiático⁴.

¹ ATALAY, Elizabeth; PARKER, Laura y SCHULTZ, Heidi. Los plásticos explicados de la A a la Z. [En línea]. NATIONAL GEOGRAPHIC. 2017. (Recuperado en 26 de enero 2019). Disponible en: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2018/05/los-plasticos-explicados-de-la-la-z>.

² HEINRICHS, Shawn. O nos divorciamos del plástico, o nos olvidamos del planeta. [En línea]. ONU Medio Ambiente. 2018. (Recuperado en 26 de enero 2019). Disponible en: <https://news.un.org/es/story/2018/06/1435111>

³ Ibid.

⁴ ONU Medio Ambiente. Sweden and UN Environment announce \$6 million project to beat plastic pollution in Southeast Asia. [En línea]. ONU Medio Ambiente. 2018. (Recuperado en

En respuesta a esta grave situación ambiental, los diferentes países han tomado acciones para mitigar o solucionar la contaminación plástica: En países como Gran Bretaña, India e Indonesia se realizan jornadas de limpieza regulares de las playas del país, formando una conciencia a nivel popular de la escala del problema⁵. En China, en el año 2017, se prohibió la exportación de desechos extranjeros al país como primera medida para combatir su crisis ambiental⁶. En los países Latinoamericanos se ataca el problema desde la raíz a través de fuertes políticas de control en la distribución de bolsas plásticas: en el 2017 en Colombia se aplicó un impuesto a las bolsas plásticas; en ese mismo año, Panamá vetó las bolsas de polietileno; mientras que en el año 2018 en Chile se prohibieron las bolsas de un solo uso y biodegradables⁷.

Siguiendo la línea de ataque al problema, se necesita de una alternativa de disposición de plásticos que le dé un nuevo uso a los desechos ya existentes, que sea de forma rápida y pueda ser llevada más allá del ambiente industrial, hasta las casas de familia.

Por eso, en este proyecto se desarrolla el diseño de una máquina recicladora basada en extrusión que haga la re-disposición de los desechos plásticos

26 de enero 2019). Disponible en: <https://www.unenvironment.org/news-and-stories/press-release/sweden-and-un-environment-announce-6-million-project-beat-plastic>.

⁵ ONU Medio Ambiente. Picking up litter: Pointless exercise or powerful tool in the battle to beat plastic pollution? [En línea]. Greenpeace. 2018. (Recuperado en 26 de enero de 2019). Disponible en: <https://www.unenvironment.org/news-and-stories/story/picking-litter-pointless-exercise-or-powerful-tool-battle-beat-plastic>.

⁶ FREYTAS-TAMURA, Kimiko. Los plásticos se acumulan en todo el mundo desde que China se ha negado a recibir más desechos. [En línea]. The New York Times ES. 2018. (Recuperado en 26 de enero de 2019). Disponible en: <https://www.nytimes.com/es/2018/01/16/contaminacion-plasticos-china-basura/>.

⁷ SOLHEIM, Erik. América Latina y el Caribe, a la vanguardia en la lucha contra los plásticos. [En línea]. ONU Medio Ambiente. 2018. (Recuperado en 26 de enero de 2019). Disponible en: <https://www.unenvironment.org/es/news-and-stories/editorial/america-latina-y-el-caribe-la-vanguardia-en-la-lucha-contra-los>.

domésticos para su uso en el campo de continuo crecimiento que es la impresión 3D.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la sociedad moderna, con el aumento continuo de la población, los bienes de consumo deben aumentar su producción de manera proporcional a la demanda, muchos de estos bienes son empacados o transportados en envases constituidos por alguna forma de polímero plástico que luego de llegar a su receptor son desechados en la basura para posteriormente ser, o reciclados o dispuestos en vertederos para que cumplan con su proceso de degradación natural.

Alrededor del mundo la disposición de estos desechos para el reciclaje es menor de lo necesario, lo que ha producido una huella de desecho plástico considerable en nuestros ambientes terrestres y marinos. Un ejemplo vivo de esto es la “Isla de Basura” del océano Pacífico donde se encuentran millones de partículas de polímero no más grandes que un grano de arroz flotando a la deriva en el mar, amenazando a la vida marina. El problema ambiental es una realidad muy peligrosa que debe ser atacada rápidamente.

Figura 1. Contaminación de plástico.



Fuente: NATIONAL GEOGRAPHIC. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2018/03/de-que-esta-hecha-la-isla-de-basura-del-pacifico>.

El camino a la solución del problema no sólo se encuentra en la voluntad de emprender una carrera en el reciclaje, sino también ampliar el enfoque que tienen los procesos actuales de reutilización del plástico, que son de alta complejidad y costo para la industria.

Teniendo en cuenta el gran uso del PET en la industria alimenticia, el hecho de que reciclarlo lo hace inadecuado para este mismo propósito y que además tarda más de 100 años en descomponerse, hace evidente que darle un nuevo propósito a este polímero es un primer paso en la solución.

Por esta razón, aprovechando su cualidad de termoplástico, se presenta la propuesta de diseño y construcción de un sistema mecánico que genere filamento a partir del reciclaje del PET para su posterior uso en la impresión 3D por deposición de material fundido.

2. JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA

Se ha vuelto común en muchas partes del mundo encontrar desechos en las fuentes hídricas. En los países del primer mundo, máximos productores plásticos, se pueden encontrar basura flotando en sus lagos y mares. En los países asiáticos, principales en la recepción de basura del resto del mundo, se tienen cuerpos de agua completamente cubiertos de desechos. Esta situación no sólo empeora las condiciones de salubridad pública, también afectan a la vida acuática que puebla los cuerpos de agua, y, por consiguiente, a nosotros mismos.

Figura 2. Contaminación por plástico en la playa este de la isla Henderson.



Fuente: NATIONAL GEOGRAPHIC ESPAÑA.
https://www.nationalgeographic.com.es/naturaleza/actualidad/millones-plasticos-los-confines-tierra_11511/4.

El Periodista Ramsés Vargas, en su publicación de opinión para la revista Semana⁸, nos dice que los ríos Magdalena y Amazonas descargan anualmente 16.700 y 38.700 toneladas de plástico al mar, respectivamente. Este derrame de desechos contribuye al aumento de las llamadas “islas de plástico” que son concentraciones de desechos que se agrupan flotando cerca de la superficie del mar, y cubren grandes extensiones. La mayor de todas, localizada en el océano Pacífico con una superficie de 3,4 millones de kilómetros cuadrados, un área mayor al doble de Colombia, representa uno de los mayores problemas ecológicos de nuestros tiempos.

Estas aglomeraciones entran a la cadena alimenticia de los organismos acuáticos cuando se desmoronan por acción de los rayos del sol, convirtiéndose en micro plásticos que son ingeridos por los peces. Siguiendo la cadena alimenticia hasta su parte alta donde se encuentran los humanos.

⁸ VARGAS LAMADRID, Ramsés. La bolsa o la vida. [En línea]. (Recuperado en 26 de enero de 2019). Semana. 2017. Disponible en: <https://www.semana.com/opinion/articulo/consecuencias-ambientales-del-uso-de-plastico-en-colombia/531338>.

3. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN

En el mercado internacional se encuentran opciones de máquinas domesticas para el reciclaje de plásticos. Elementos de triturado y moldeo por diferentes métodos se comercializan en internet, o también existe la opción del grupo Precious Plastics donde es posible descargar gratuitamente planos he información técnica para construir estas máquinas en casa.

Figura 3. Máquinas de Precious Plastic.



Fuente: Precious Plastic. <https://preciousplastic.com/en/machines.html>.

Aprovechando la versatilidad de la impresión 3-D por deposición de filamento fundido, y su continua necesidad por insumo plástico para su uso, múltiples maquinas recicladoras han sido creadas y sacadas al mercado para suplir esta necesidad de recursos y al mismo tiempo contribuir a la solución del problema medio ambiental en diferentes partes del mundo. Estas máquinas, extrusoras de plástico, toman el desecho triturado y mediante el proceso anteriormente nombrado crean filamento continuo que alimenta a las impresoras.

No obstante, estos dispositivos comerciales tienen un precio elevado para el consumidor promedio; en la mayoría de los casos un sistema de hilado o de refrigeración del filamento se venden por separado; no son versátiles a la hora de trabajar con los diferentes plásticos; y para su manipulación se necesitaban conocimientos técnicos.

En este proyecto se busca desarrollar una maquina recicladora domestica asequible por el consumidor, que integre un sistema de hilado en su estructura, pueda manejar diferentes materiales plásticos, y que su manipulación sea simple para el consumidor promedio.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar un sistema mecánico doméstico para la reutilización de residuos plásticos PET como material en la impresión 3D por deposición de filamento fundido.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- **Caracterizar química y mecánicamente el PET reciclado mediante procesos existentes que se ajusten a la generación de un material apto para la impresión 3D.**
- **Definir los parámetros operacionales viables en el contexto doméstico para el diseño.**
- **Realizar el diseño en detalle del sistema de reciclaje de PET.**
- **Proyectar el comportamiento del proceso de fundición del PET que confirme teóricamente la viabilidad del diseño realizado.**
- **Realizar un análisis técnico-económico del sistema que permita evaluar la rentabilidad del proyecto.**

5. MARCO TEÓRICO

5.1. IMPRESIÓN 3D

La fabricación aditiva, mejor conocida como Impresión 3D, es el proceso de manufactura en el cual se crea un modelo físico de una pieza o conjunto de piezas, generadas de manera digital, mediante el mecanismo de adición de material. Este proceso parte de un modelo CAD que es transportado al programa de impresión, el cual corta la pieza en múltiples secciones paralelas que serán construidas por un mecanismo de extrusión con movimiento cartesiano, depositando capa por capa de material de abajo hacia arriba.

Algunas de las ventajas de este proceso de manufactura sobre los procesos convencionales son⁹:

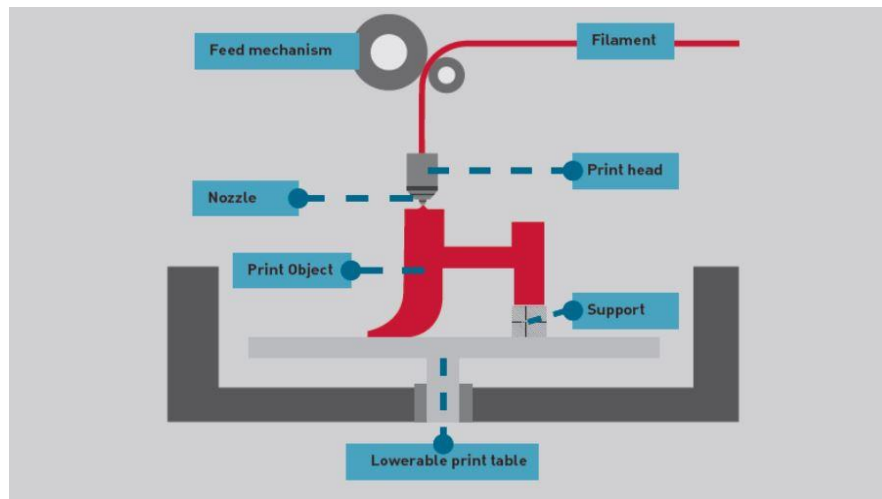
- Menos pasos entre el modelo CAD y la producción de la pieza.
- Poca mano de obra debido al alto nivel de automatización.
- Mayor número de formas geométricas pueden fabricarse.
- Fabricación de alta velocidad para piezas pequeñas y complejas.
- Generalmente menos desperdicio de material.

La adición de material puede darse de diversas formas y con múltiples materias primas, de entre todos los procesos los más usados son: el Modelado por Deposición Fundida (FDM); Estereolitografía (SLA); y el Sinterizado Láser Selectivo (SLS).

⁹ E3D+VET ERASMUD + 3D PRINTING VET CENTRES. GUÍA TÉCNICA DE IMPRESIÓN 3D. [En línea]. (Recuperado en 8 diciembre 2019) Disponible en <https://www.e3dplusvet.eu/wp-content/docs/O1A1-ES.pdf>. p. 8.

5.1.1. Modelado por Deposición Fundida (FDM) Consisten en la deposición de material fundido en forma de hilo sobre una plataforma de enfriamiento. El material es alimentado en forma de hilo a una boquilla de calentamiento que lo derrite y lo posiciona sobre la superficie, dibujando la primera capa del sólido a imprimir. La plataforma realiza el movimiento descendente para que de forma continua se creen capas de material y se genere el sólido.

Figura 4. Deposición de Filamento Fundido (FDM).

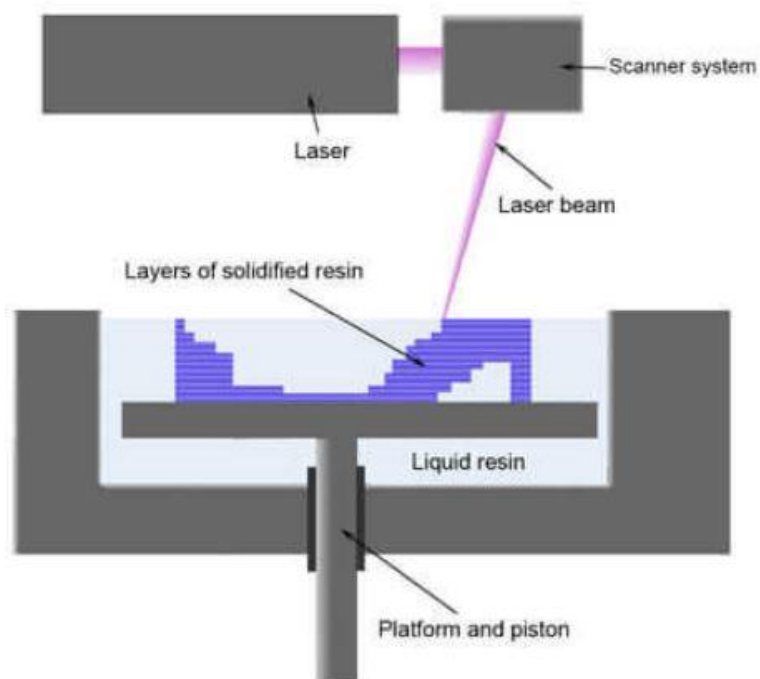


Fuente: E3D+VET ERASMUD + 3D PRINTING VET CENTRES. GUÍA TÉCNICA DE IMPRESIÓN 3D. [En línea]. (Recuperado en 8 diciembre 2019) Disponible en <https://www.e3dplusvet.eu/wp-content/docs/O1A1-ES.pdf>. p. 11.

Dependiendo de la geometría a generar, será necesario imprimir estructuras de soporte para las secciones en voladizo, pero este deber es comúnmente cumplido por el software de impresión que las agrega convenientemente. Estas estructuras son removidas manualmente después de la impresión.

5.1.2. Estereolitografía (SLA) El proceso involucra un láser que endurece capas de resina líquida dentro de un tanque. Allí se encuentra una plataforma situada a pocas micras de la superficie del líquido, un láser controlado por computadora recorre su superficie endureciendo el material y formando la primera capa de la pieza, a continuación, la plataforma desciende de tal manera que la nueva superficie endurecida quede a la misma distancia inicial con la resina. El endurecimiento continuo de las capas y el movimiento descendente de la plataforma crea el modelo.

Figura 5. Estereolitografía (SLA).

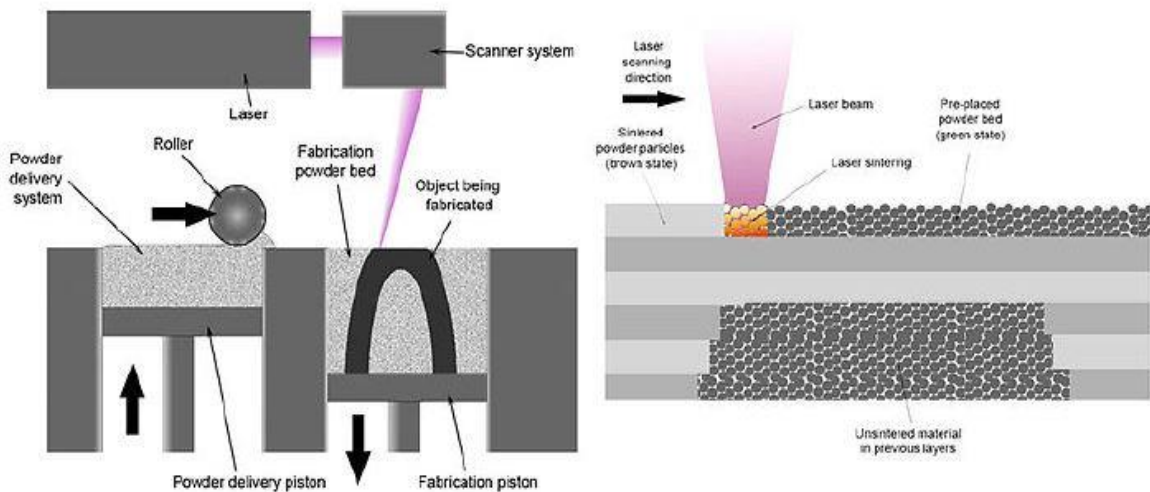


Fuente: E3D+VET ERASMUD + 3D PRINTING VET CENTRES. GUÍA TÉCNICA DE IMPRESIÓN 3D. [En línea]. (Recuperado en 8 diciembre 2019) Disponible en <https://www.e3dplusvet.eu/wp-content/docs/O1A1-ES.pdf>. p. 17.

Este método, al igual que el primero, necesita de estructuras de soporte que serán removidas post-impresión manualmente.

5.1.3. Sinterizado Láser Selectivo (SLS) Al igual que en el proceso anterior involucra un láser que adiona las capas del material, pero se diferencia en que el material de trabajo es suministrado en forma de polvo. Sobre una plataforma pasa un rodillo que deposita sobre su superficie una fina capa de polvo, el material es luego sinterizado (derretido para fusionar los granos) por un láser controlado por computadora. La sucesiva deposición y sinterizado del polvo crea la pieza.

Figura 6. Sinterizado Laser Selectivo (SLS).



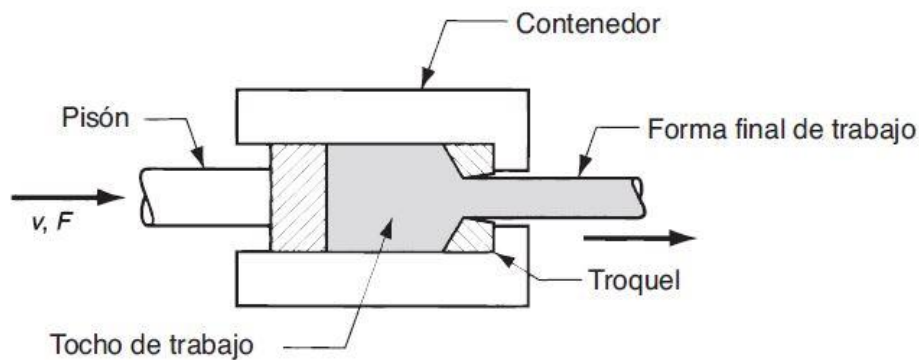
Fuente: E3D+VET ERASMUD + 3D PRINTING VET CENTRES. GUÍA TÉCNICA DE IMPRESIÓN 3D. [En línea]. (Recuperado en 8 diciembre 2019) Disponible en <https://www.e3dplusvet.eu/wp-content/docs/O1A1-ES.pdf>. p. 14.

La diferencia fundamental que constituye una ventaja de este mecanismo de Impresión 3D sobre los dos anteriormente descritos es que no requiere de estructuras de soporte para las impresiones, ahorrando material de impresión.

5.2. EXTRUSIÓN

La extrusión es el proceso de moldeo en el cual se presiona un material de trabajo contra una superficie agujerada llamada troquel, haciendo que este lo atraviese y dando forma a su sección transversal. Se utiliza para producir piezas de sección constante y con longitudes variables, como tuberías, mangueras, filamentos, pellets, películas, entre otros.

Figura 7. Extrusión.



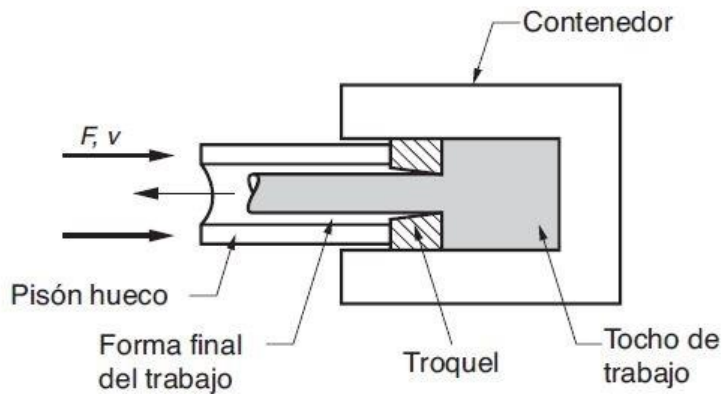
Fuente: GROOVER, Mikell. Fundamentos de manufactura moderna. México: McGraw-Hill Interamericana, 2007. p. 417.

5.2.1. Tipos de extrusión

- **Configuración física**
 - **Extrusión directa:** Esta configuración de extrusión se caracteriza por el hecho de que el material moldeado sale de la máquina en la misma dirección en que es presionado. La Figura 7. muestra un esquema de este proceso. El pistón ejerce una presión sobre el material de trabajo, llamado tocho, llevándolo contra el fondo del contenedor donde se encuentra el troquel que le da la forma al material a su salida.

- **Extrusión indirecta:** Consiste en lo inverso a la configuración anterior, pues el material moldeado sale de la maquina en dirección contraria a la que es presionado. Igualmente, el troquel que le da forma al material ya no se encuentra en el fondo del cilindro contenedor, sino, en el embolo que ejerce la presión.

Figura 8. Extrusión indirecta.



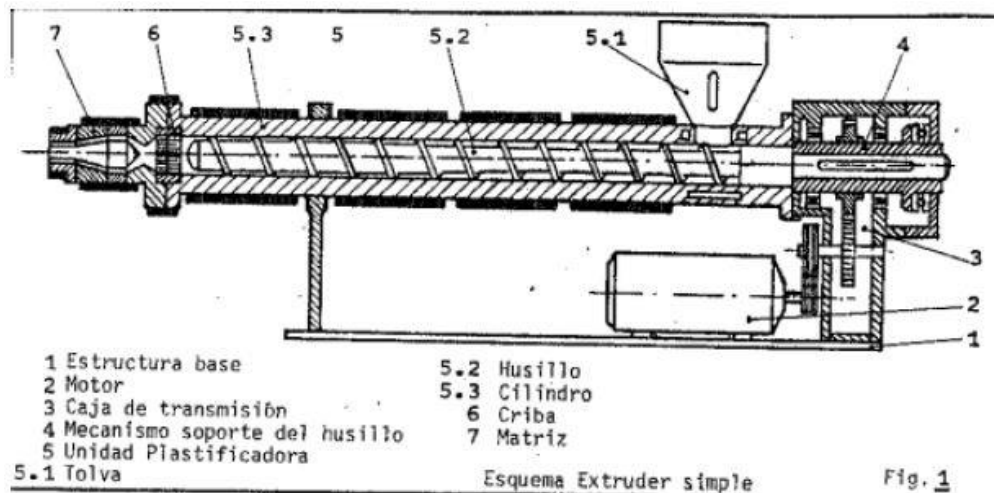
• Fuente: GROOVER, Mikell. Fundamentos de manufactura moderna. México: McGraw-Hill Interamericana, 2007. p. 418.

- **Temperatura de trabajo**

- **Extrusión en frío:** Como su nombre lo indica, se caracteriza por que la temperatura del material al momento de ser moldeado es la ambiental. Es empleada en metales, produciendo piezas de gran tamaño y de formas simples, debido a la alta resistencia a la deformación que poseen los metales a tan baja temperatura.
- **Extrusión en caliente:** Se realiza a temperaturas altas, cuando el material adquiere fluidez y es más fácil de moldear. A diferencia del anterior proceso, produce piezas más pequeñas y con formas más complicadas.

5.2.2. Extrusora Las extrusoras son maquinas especialmente diseñadas para realizar la acción de extrusión. Cuentan con componentes mecánicos y la estructura necesaria para presionar el material a través del agujero y generar el producto de sección contante. Existe diferentes tipos de extrusoras que realizan este trabajo: extrusoras de pistón, de disco o de husillo. Todas son utilizadas en el campo industrial, pero la que posee mayor universalidad es la extrusora de husillo por su continuidad de proceso y volumen de producción.

Figura 9. Esquema de extrusora.



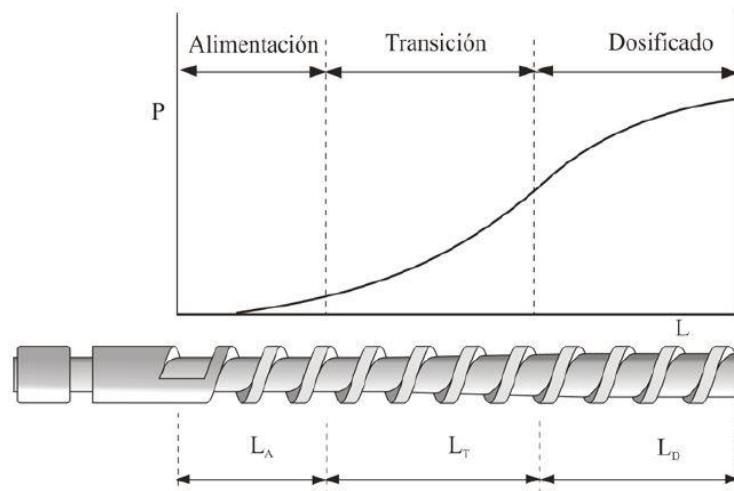
Fuente: CIFUENTES, Roosevelt. Diseño de una maquina extrusora para la empresa Plastik de Occidente. Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero de Materiales. Santiago de Cali: Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, 2011. p. 5.

Las extrusoras de husillo reciben esta categoría por poseer un husillo o tornillo que es el elemento principal dentro de su funcionamiento. Excluyendo el material de trabajo, la forma, tamaño, dimensiones y el rpm del husillo determinan todos los parámetros de funcionamiento de la máquina.

Las extrusoras de husillo pueden tener varios de estos elementos, así como cilindros/etapas que los contienen. La diferencia en resultado que se da con varios

husillos es que su número afecta la homogeneidad de mezcla que se logra en el material fundido en escala proporcional. Pero dentro de todos estos, igualmente, el producto pasa por tres etapas: alimentación; transición; y dosificación. Cada etapa que escala el material en su paso por la extrusora es caracterizada por una configuración geométrica en el husillo y una evolución gradual de la presión.

Figura 10. Zonas de una extrusora y perfil de presión desarrollado.



Fuente: BELTRAN, Maribel y MARCILLA, Antonio. Tecnología de polímeros: Procesado y propiedades. [En línea]. (Recuperado en 7 de enero 2019), Disponible en: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf p. 106.

Alimentación: Es la zona continua a la entrada del material. Su función es la de compactar el material y transportarlo a la siguiente sección del husillo.

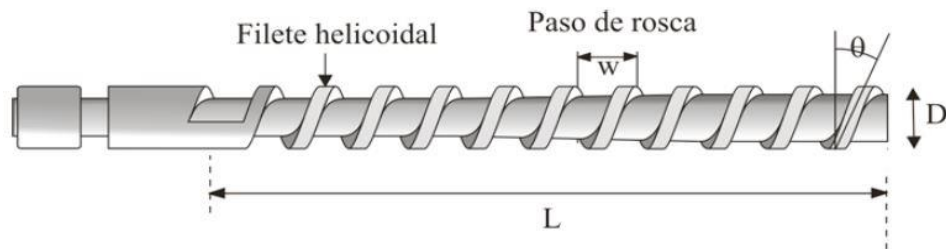
Transición: Es la zona donde el material se funde y es comprimido, generando la presión necesaria para que salga de manera continua por el orificio del troquel.

Dosificación: Es la última sección del husillo, consiste en la parte que mezcla el material fundido para lograr su mayor homogeneidad y lo impulsa fuera del tambor a través del troquel.

- **Componentes de la extrusora**

- **Motor:** Es el recurso de potencia y movimiento en la operación de extrusión. Impulsa el movimiento del tornillo en su rotación y suministra la potencia que se consume al mover el material en las zonas de alimentación, fundición y bombeado. Por lo general se utilizan motores eléctricos para esta tarea por su rango de voltajes de funcionamiento, su variación en velocidad y fácil control.
- **Caja de transmisión:** Es un elemento de acople intermedio entre el husillo y el motor. Ejerce la función de reducir las revoluciones de giro del motor, aumentando el torque de entrada al husillo.
- **Soporte del husillo:** Se encarga de fijar el husillo en su posición. Absorbe las cargas generadas por el proceso que son transmitidas a través del husillo.
- **Tolva:** Almacena el material que será procesado. Posee una forma tal que se obtenga un flujo de material al interior del tambor de manera constante, y se diseñan con el volumen necesario para asegurar el funcionamiento por largos periodos de tiempo.
- **Husillo:** Tornillo largo con geometría variable que realiza las funciones de transportar, mezclar y comprimir el material en su paso por la extrusora. Los parámetros más importantes en su diseño son la razón entre su longitud y diámetro, el ángulo del filete y la distancia entre filetes.

Figura 11. Geometría del husillo.



Fuente: BELTRAN, Maribel y MARCILLA, Antonio. Tecnología de polímeros: Procesado y propiedades. [En línea]. (Recuperado en 7 de enero 2019), Disponible en: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf p. 108.

- **Cilindro:** Contiene en su interior al husillo y alberga los elementos de calefacción. El cilindro se construye de aceros muy resistentes para evitar el desgaste mecánico, y soportar la presión interna generada por el cilindro. Los elementos de calefacción generalmente tienen forma de anillos que cubren el cilindro en diferentes secciones dándole varias zonas de calentamiento.
- **Plato rompedor:** Es un plano agujereado que cumple la función de filtrar el material fundido reteniendo las partículas sólidas que puedan dañar el producto. Promueve un mejor mezclado y homogeneidad del material fundido.
- **Cabezal:** Es la parte final de la extrusora y la que le da la geometría transversal al producto. Tienen una preforma del área transversal final y están diseñadas de tal manera que un flujo constante y estable pueda salir.

5.3. POLÍMEROS

Los Polímeros son materiales compuestos, constituidos por cadenas largas de moléculas que se repiten y forman moléculas de mayor tamaño. La palabra proviene de los vocablos griegos *poly*, que significa “muchos”, y *meros* que significa “partes”¹⁰.

Los primeros polímeros fabricados fueron sintetizados a base de productos de origen animal y vegetal. En 1962, el químico inglés Alenzander Parkes presentó uno de los primeros termoplásticos, el nitrato de celulosa, sintetizado de la madera y el algodón. Posteriormente se desarrolló el acetato de celulosa que se utilizó en películas fotográficas, papel celofán, y fibras textiles. En 1906, el químico estadounidense L. H. Baekeland, inventó la bakelita, un plástico termofijo considerado el primer polímero sintético. Continuando, la tecnología del plástico llegó a la edad moderna en 1920 cuando se empezaron a extraer los subproductos del petróleo y se utilizaron para fabricar polímero. Se crearon polímeros como el

¹⁰ GROOVER, Mikell. Fundamentos de manufactura moderna. 3ª ed. Mexico: McGraw-Hill, 2007. p.144-173. ISBN-13: 978-0-471-74485-6. p. 144.

etileno, poliestireno, polietileno, nylon, poliuretanos, siliconas, etc¹¹, que aún son utilizados hoy en día.

Desde sus inicios, las características de los polímeros resultaron atractivas a la industria. Groover¹² lista las siguientes:

- ✓ Son fáciles de moldear en formas complicadas, con un bajo consumo de energía, y de llevarlos muy cerca de su forma final en el producto.
- ✓ Sus propiedades son atractivas en aplicaciones donde la resistencia no es tan importante (baja densidad, resistencia a la corrosión, baja conductividad térmica y eléctrica).
- ✓ Algunos polímeros son translucidos dando la posibilidad de reemplazar al vidrio en sus aplicaciones.
- ✓ La producción de un mismo volumen de material polimérico y metálico tiene un costo más bajo en el caso del polímero.

Los polímeros se dividen en termoplásticos, termofijos, y cauchos. Esta clasificación obedece a características comunes de las estructuras atómicas que tienen algunos de estos materiales y que nos permiten darles estas categorías, pero, eso no elimina la posibilidad de la existencia de polímeros con propiedades comunes a dos clasificaciones.

Los enlaces entre moléculas, los enlaces entre cadenas, y la aleatoriedad con que se han mezclado, dotan de características físicas y químicas al material. La creación de estos arreglos se inicia desde el mecanismo de síntesis de las cadenas, conocido como Polimerización.

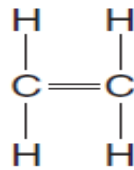
¹¹ *Ibíd.*, p. 145.

KALPAKJIAN, Serope y SCHMID, Steven. *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. 5ª ed. México: PEARSON, 2008. p.191-215. ISBN: 978-970-26-1026-7. p. 162-163.

¹² GROOVER, *Op. cit.*, p. 146.

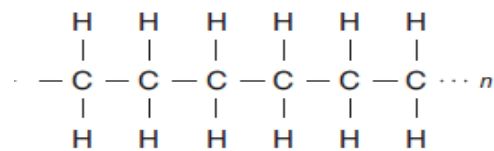
5.3.1. Polimerización La polimerización es la formación de los enlaces cruzados entre los diferentes monómeros que forman las macromoléculas. Los monómeros son las moléculas constructivas elementales que forman los polímeros, y por lo general son moléculas orgánicas ya que se basan en carbono. Las macromoléculas son moléculas con una forma parecida a una cadena larga que se crean con la polimerización de los monómeros. La estructura central de estas cadenas está constituida por enlaces covalentes, y a su vez las uniones entre macromoléculas son de tipo Van de Waals:

Figura 12. Monómero de etileno.



Fuente: KALPAKJIAN, Serope y SCHMID, Steven. *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. 5a ed. Mexico: PEARSON, 2008. p. 194.

Figura 13. Cadena de Polietileno.



Fuente: GROOVER, Mikell. *Fundamentos de manufactura moderna*. 3ª ed. Mexico: McGraw-Hill, 2007. p. 147.

El proceso químico de la polimerización puede ocurrir por dos métodos:

- **Polimerización por adición:** En este proceso (también, conocido como polimerización por crecimiento de cadena) se utiliza un iniciador para abrir los

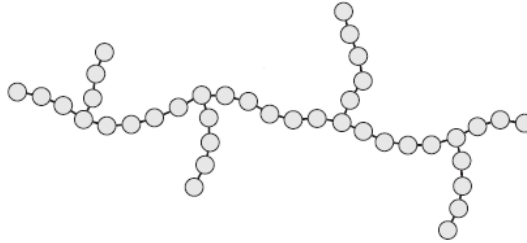
dobles enlaces covalentes en los monómeros y así se unan a otra molécula abierta. Esto genera una reacción en cadena que agrega monómeros a lado y lado de las macromoléculas en forma rápida, creando estructuras largas. Inicialmente, el proceso es rápido, como se dijo, pero después se ralentiza en vista que las macromoléculas formadas son muy largas y los monómeros tiene que viajar grandes distancias para llegar al final de la cadena. En condiciones industriales este proceso puede tardar horas por la cantidad de material a polimerizar.

- **Polimerización por etapas:** En este proceso se hacen reaccionar dos monómeros diferentes para iniciar la formación de las cadenas. Los monómeros reaccionan entre sí y forman nuevas moléculas que se unen a otros monómeros sintetizados, lo que va formando la estructura de cadena. Este mecanismo puede o no tener un subproducto, y este puede o no ser agua, pero por lo común es así, entonces a este proceso se le llama también Polimerización por condensación.

5.3.2. Estructuras de los polímeros En el momento de la polimerización los monómeros se unen entre sí para formar macromoléculas, como se dijo, pero no siempre estas macromoléculas tienen forma de cadenas simples.

- **Polímeros ramificados:** son cadenas largas de monómeros que durante su polimerización aceptaron que ramas laterales se sujetaran a la cadena principal. Estas ramas laterales se pueden enredar o unir por enlaces débiles de Van der Waals con otras cadenas principales o ramas, lo que dificulta su movimiento relativo y producen mejoras en la resistencia a la deformación y agrietamiento del material, disminuyendo su densidad.

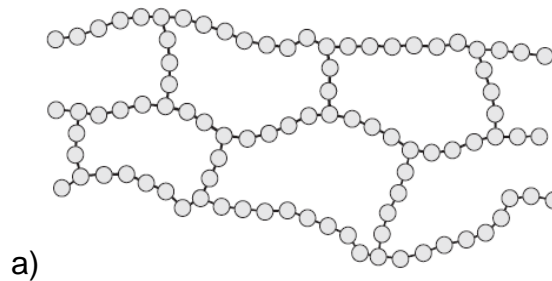
Figura 14. Estructura ramificada en los polímeros.

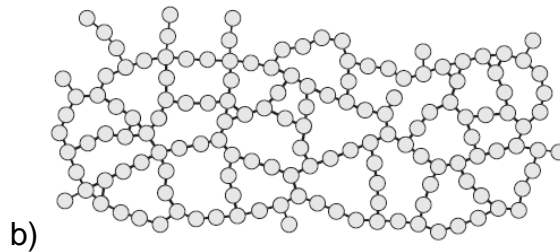


Fuente: GROOVER, Mikell. Fundamentos de manufactura moderna. 3a ed. Mexico: McGraw-Hill, 2007. p. 151.

- **Polímeros entrecruzados:** Cuando las ramificaciones de las cadenas lineales se unen a más de una cadena principal sucede que se forma una estructura entrecruzada. Estas ramificaciones pueden ser de poca ocurrencia y el enlace solo se le conoce como Enlace Cruzado. En el caso de que la ocurrencia de entrecruzamiento sea grande se considera que la masa total del polímero se constituye como una molécula gigante y se dice que su estructura tiene un Enlace de Red.

Figura 15. Estructura a) entrecruzada, y b) en red, en los polímeros.

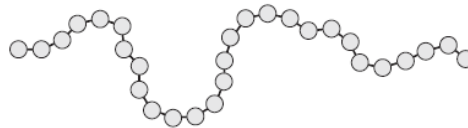




Fuente: GROOVER, Mikell. Fundamentos de manufactura moderna. 3a ed. Mexico: McGraw-Hill, 2007. p. 151.

- **Polímeros lineales:** Son las cadenas de polímeros continuas, sin ramificaciones. Estas cadenas no necesariamente tienen forma recta, pero sí son secuenciales: se repiten los arreglos de monómeros interconectados, cientos de veces a lo largo de su extensión.

Figura 16. Estructura lineal en los polímeros.



Fuente: GROOVER, Mikell. Fundamentos de manufactura moderna. 3a ed. Mexico: McGraw-Hill, 2007. p. 151.

Los termoplásticos por lo general poseen estructuras lineales y ramificadas que les dan propiedades mecánicas de acuerdo con el grado de entrelazamiento que exista entre las cadenas. Aplicar calor en su estructura facilita el movimiento de las moléculas y que estas puedan ser formadas fácilmente múltiples veces, facilitando su reciclado.

Los Termofijos tienen estructuras de red, lo que los dota de mayor dureza y estabilidad química, pero poca elasticidad, al igual que los hace imposibles de

reciclar ya que su estructura está fuertemente fijada y aplicar calor los descompone molecularmente.

Los hules o elastómeros tienen comúnmente estructuras entrecruzadas, por lo que tienen mayor dureza que los termoplásticos, pero sin la rigidez y fragilidad de los termofijos.

5.3.3. Temperatura de transición vítrea Los polímeros, por su naturaleza de estructuras amorfas, no tienen un punto de fusión definido. El número y la naturaleza exacta de las uniones entre los monómeros que conforman el material es difícil de determinar ya que estos se crearon de manera aleatoria, por lo tanto, la energía que es necesaria de agregar para producir la fusión cambia de una pieza formada a otra. Esto hace que los polímeros tengan intervalos grandes de temperatura donde se puede producir la fusión.

Pero, existe intervalos pequeños de temperatura donde los polímeros sufren cambios en sus propiedades mecánicas. Pasan de ser duros y frágiles a blandos y gomosos. Esta temperatura se la conoce como Temperatura de transición Vítrea. El termino de "Vítrea" le fue asignado porque este comportamiento es semejante al que tienen los vidrios, que son también sólidos amorfos.

5.3.4. Degradación de los polímeros “Degradación es cualquier cambio indeseable en las propiedades, que ocurre después de que el material ha sido puesto en servicio.”¹³ El proceso de degradación varía en el fenómeno que lo produce, ya sea térmico, mecánico, químico o biológico, y en la ejecución de esta, por ejemplo, deformación, corrosión, abrasión, cambios químicos, presencia de moho o bacterias. En lo concerniente al interés de este trabajo se dará un breve acercamiento a la degradación de origen térmico.

Los polímeros se caracterizan por tener gran plasticidad antes de ser formados debido a la relativa libertad con la que pueden moverse sus cadenas poliméricas. Después de adquirir su primera forma, los categorizados como termoplásticos pueden ser calentados y vueltos a formar, este proceso puede ser repetido varias veces hasta que su degradación térmica afecte de manera considerable las propiedades del material.

La degradación térmica se diferencia de otros factores de degradación en que el calor transmitido influencia la solidez de los enlaces formados entre las cadenas moleculares. La vibración debilita las uniones llegando a romperlas, formando fragmentos pequeños de cadena o monómeros. La reacción inicia al final de la cadena y se va extendiendo en su longitud hasta llegar a seccionarla completamente.

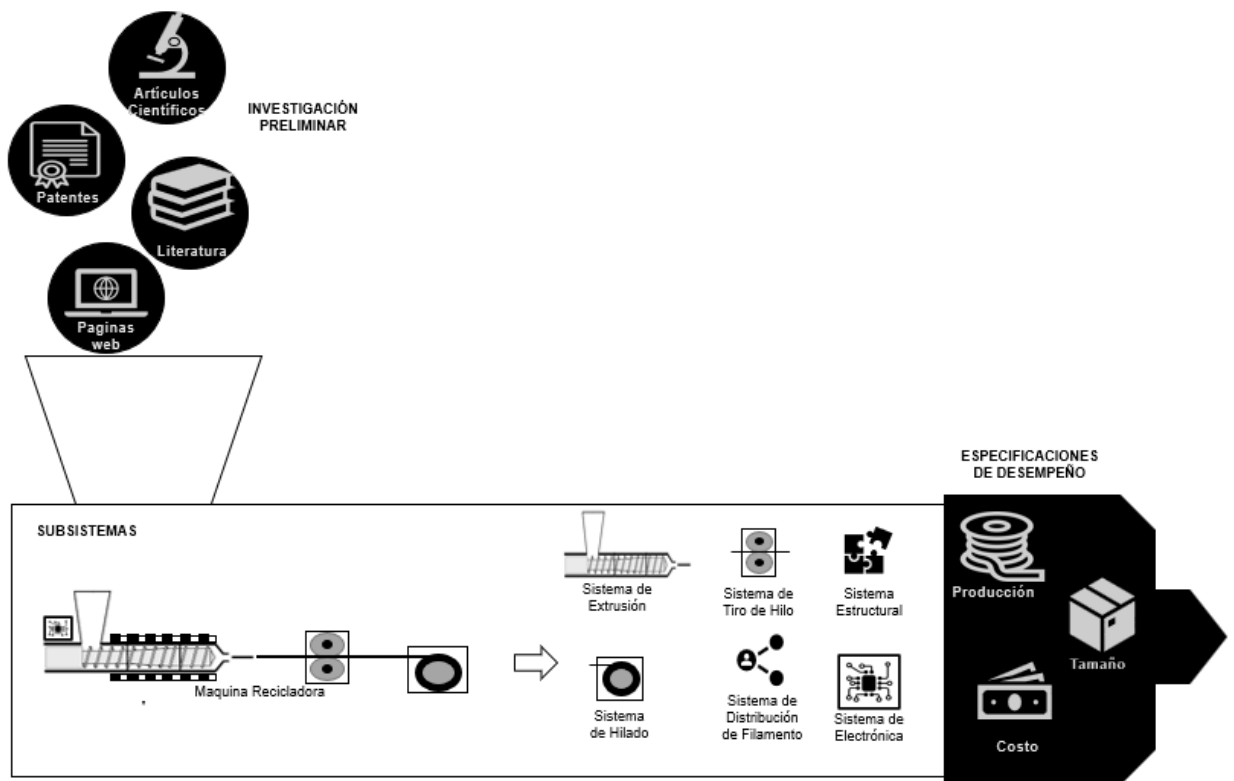
Paralelo al rompimiento de las cadenas, puede ocurrir que la acción del calor de origen a la reestructuración de las moléculas, formando estructuras más débiles y vapores venenosos.

¹³ POSADA BUSTAMANTE, Beatriz. LA DEGRADACION DE LOS PLASTICOS. Medellín: Revista Universidad Eafit, 2012. Vol. 30 No. 94. p. 68.

6. METODOLOGÍA DEL DISEÑO

A continuación, será descrita la metodología de diseño propuesta para la formulación, descripción y definición de la solución al problema planteado. La metodología será planteada como una sucesión de pasos, pero se recuerda el carácter iterativo del proceso.

Figura 17. Diagrama de la Metodología de Diseño.



6.1. INVESTIGACIÓN PRELIMINAR

Calificada por Norton¹⁴ como la fase más importante del proceso, consiste en la investigación profunda de los aspectos científicos relacionados con la solución planteada. En esta fase se reúne la información necesaria para comprender los fenómenos físicos, químicos, la matemática, posibilidades de proceso, etc, involucrados en la consecución del sistema de reciclaje. Como fuentes de información se tienen: los artículos científicos producto de investigaciones rigurosas en el campo de los plásticos y las variables involucradas en el proceso de extrusión; la literatura técnica que recopila información de procesos de reciclaje de plásticos, el proceso de extrusión, cálculos dinámicos, de resistencia y rigidez; las patentes registradas que son soluciones a problemas ya planteados y pueden tener relación al problema del diseño de un sistema de reciclaje de plástico PET; y las páginas web que forman un flujo de información suelta a los temas de extrusión, reciclaje y PET.

6.2. ESPECIFICACIONES DE DESEMPEÑO

Continuando, se deben definir las especificaciones de desempeño que debe cumplir el producto, y estas no se deben confundir con las especificaciones de diseño, “La diferencia es que las especificaciones de desempeño definen lo que el sistema debe hacer, mientras que las especificaciones de diseño definen cómo debe hacerse”¹⁵. Estas especificaciones deben definir los límites según los cuales se diseña el sistema de reciclaje, como el volumen de producción de filamento por hora, dimensiones del sistema de reciclaje ensamblado, el costo incurrido en la producción del sistema, el recuso de energía que tendrán, cuidados en la seguridad, tiempo de independencia de funcionamiento, y otros.

¹⁴ NORTON, Robert L. DISEÑO DE MAQUINARIA Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos. México: McGraw-Hill Interamericana, 2009. p. 8.

¹⁵ *Ibíd.*, p. 9.

6.3. SUBSISTEMAS

El paso siguiente en el proceso consiste en el análisis de la solución. Dividir el producto en cada una de sus piezas y después agruparlas en subconjuntos que llamaremos “subsistemas”, los cuales serán tratados uno por uno. Los subsistemas que serán tratados son los siguientes:

- **Sistema de Extrusión:** Se encarga de la contención del material en espera de ser fundido y de transportarlo dentro del cilindro hacia la boquilla de extrusión. Lo conforma el husillo, el cilindro que lo contiene, la boquilla y la torva que almacena las escamas de PET.
- **Sistema de Tiro de Hilo:** Se encarga de jalar el filamento que sale de la boquilla de extrusión a una razón constante, con el objetivo de calibrar el diámetro del filamento al valor de 1.75 milímetros.
- **Sistema de Distribución de Filamento:** Reparte el filamento en el eje del carrete de forma homogénea.
- **Sistema de Hilado:** Se encarga de girar el carrete a medida que se llena.
- **Sistema Estructural:** Reúne todos los subsistemas en una sola configuración.
- **Sistema de Electrónica:** Se encarga de ejercer el control de los comportamientos que realizan los subsistemas. Es conformado por los componentes electrónicos que suministran movimiento, calor, y medición de variables, junto a sus controladores.

En cada subsistema se realiza el desarrollo de la matemática concerniente al diseño de cada una de las partes que lo conforman. Todo aquello que sea susceptible de ser diseñado lo será. En caso de que la pieza de interés tenga un estándar que sea vendido en el comercio, la pieza será seleccionada según lo estipulado por el fabricante para su compra. El fruto de esta etapa serán los dibujos de ensamble y detallados de las piezas del producto final, que contendrán sus dimensiones y especificaciones necesarias para la manufactura.

7. DESARROLLO DEL DISEÑO

7.1. INVESTIGACIÓN PRELIMINAR

“Open source 3-D printable extruder for converting plastic to 3-D printing filament”¹⁶ Este artículo presenta de manera detallada el diseño, construcción y operación de una extrusora de filamento para impresión 3D, utilizando como materia prima tanto pellets de venta comercial como residuos plásticos reciclados.

La máquina descrita es de hardware/software libre y además aprovecha la tecnología de replicación mediante impresión 3D para generar varias de las partes necesarias para su construcción, lo que quiere decir que cualquier persona que pueda obtener elementos de venta comercial y elementos de impresión 3D, se encuentra en capacidad de construir un RepRapable Recyclybot que podría generar 0.4 kg/h de filamento usando 0.24 kWh/kg.

La relevancia de este artículo para el proyecto es bastante clara ya que ofrece una guía completa en el diseño y construcción de una extrusora con especificaciones similares a la máquina objeto de este proyecto.

“Metodología para el diseño de tornillos de máquinas extrusoras monohusillo”¹⁷ Este proyecto de investigación tiene como objetivo desarrollar, de manera clara y precisa, una metodología que permita calcular los perfiles de fusión, presión y temperatura necesarios para el diseño eficiente de un tornillo para extrusoras monohusillo de modo que la industria nacional de los polímeros cuente

¹⁶ WOERN, Aubrey y et. al. RepRapable Recyclebot: Open source 3-D printable extruder for converting plastic to 3-D printing filament. [En línea]. ELSEVIER. 2018. (Recuperado en 20 de enero de 2019). Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468067218300208>.

¹⁷ GUTIÉRREZ, Paola y BORNACELLI, Jimmy. Metodología para el diseño de tornillos de máquinas extrusoras monohusillo. Cali: Universidad Autónoma de Occidente, 2008. p. 88-104.

con una herramienta que le permita predecir y resolver diversos problemas de operación que se puedan presentar con este tipo de máquinas.

Comenzando con la contextualización sobre el proceso de extrusión, los tipos de extrusoras y los elementos básicos que este proceso implica, en este proyecto se enfocan en las extrusoras de tornillo, las más adecuadas para la extrusión de polímeros. Continúan con los modelamientos matemáticos necesario para el diseño de la máquina y finaliza presentando una metodología de cálculo de tornillos extrusores.

Es claro que, para el presente trabajo, este proyecto es una guía muy útil a la hora de diseñar una extrusora para el aprovechamiento de los residuos plásticos ya que ofrece un modelo de cálculo que facilita el diseño del tornillo extrusor, parte esencial para el desarrollo del proyecto.

“Proyecto de máquina extrusora, para creación de hilos de Poli Etilén Tereftalato”¹⁸ Como su nombre lo indica, el objetivo principal de este proyecto es la creación de un prototipo de extrusora de hilo PET en base a la cual, a largo plazo, se pueda construir una maquina comercial de bajo costo. Como fruto se obtuvo una máquina extrusora capaz de producir 2.4kg/h de filamento PET de 0.5mm de grosor. El aporte fundamental de este trabajo, que lo diferencia de los anteriores, es el enfoque específico que hacen sobre la creación de hilo con PET, mismo material que se trabajará en el proyecto actual.

“Diseño de una extrusora para filamento de impresión 3D”¹⁹ El objetivo principal de proyecto, al igual que los anteriores, es el diseño de una extrusora de plásticos

¹⁸ SUÁREZ, José. Proyecto de máquina extrusora, para creación de hilos de Poli Etilén Tereftalato. Mexico: 2015. Trabajo de grado para optar al titulo de Ingeniero en Robotica Industrial. Instituto Politécnico Nacional,. p. 76-150.

¹⁹ GARCÍA, Carlos Alberto. Diseño de una maquina extrusora para filamento de impresión 3D. Santiago de Chile: 2015. Memoria para optar al titulo de Ingeniero Civil Mecánico. Universidad de Chile. p. 22-25.

de tipo laboratorio. Su característica particular es que se inicia el proceso ya teniendo el husillo, el elemento más importante de la máquina, el resto del proceso consta de la selección y cálculos menores de los componentes periféricos, además del diseño de un sistema de calentamiento. El análisis del proceso desde el punto de vista térmico es lo que impera en el desarrollo del diseño, por lo que aplican el método de elementos finitos para modelar la situación.

El aporte de este proyecto es el de un procedimiento alternativo en el diseño del proceso de fundición que ocurre al interior de la extrusora.

“Diseño de extrusora de filamento para impresión 3D a partir de plásticos reciclados”²⁰ Continuando con los diseños de extrusora, este proyecto inicia el diseño desde cero, calculando y seleccionando cada parte de la maquinaria. Además, realiza una comparación del equipo creado con sus referentes en el mercado.

El aporte realizado es el de una metodología de diseño del husillo basado en fórmulas matemáticas de relativa facilidad, además de representar un ejemplo muy completo del diseño a realizar.

“Characterization and quality assessment of recycled post-consumption PET”²¹ Este estudio es una comparación entre el PET reciclado o post-consumo y el PET virgen. La mezcla del material reciclado se estudia para determinar si, al ser recalentado, fundido y nuevamente conformado se perjudica alguna de las propiedades del material.

El resultado del estudio confirma que existe un desgaste en las propiedades reológicas del PET, y una mínima afectación de sus propiedades mecánicas, lo que

²⁰ PARRA, Rodrigo Nicolas. Diseño de extrusora de filamento para impresión 3D a partir de plásticos reciclados. Santiago de Chile: 2017. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico. Universidad Técnica Federico Santa María. p. 72-131.

²¹ MASMOUDI, Fatma, et al. Characterization and quality assessment of recycled post-consumption poly(ethylene terephthalate) (PET). Germany: Springer-Verlag, 2018. Environmental Science and Pollution Research (2018) 25:23307–23314.

da el visto bueno a la intención de reutilizar el material en otras aplicaciones diferentes a contener alimentos.

El aporte que realiza el estudio es la confirmación en la viabilidad de reutilizar PET. También brinda las propiedades del material reciclado, en base a las caracterizaciones realizadas con estrictos procesos de laboratorio.

“Comparing recycled and virgin poly (ethylene terephthalate) melt-spun fibres”²² Este estudio retoma la caracterización del PET reciclado, y lo compara con el PET virgen. La diferencia con el anterior trabajo está en que el análisis de las cualidades se realiza sobre el material en forma de fibra. Estudios reológicos, moleculares y mecánicos fueron realizados sobre muestras de fibras creadas con material reciclado y virgen, concluyendo que ambos muestran propiedades muy similares y un comportamiento similar al ser procesados.

Este estudio contribuye con más propiedades del material a trabajar, pero, registradas sobre el proceso que lo transforma en fibras, el cual es de interés para el presente proyecto. Además, da el visto bueno a la intención de convertir el PET reciclado en fibras.

7.2. ESPECIFICACIONES DE DESEMPEÑO

Según el informe Situación actual de los plásticos en Colombia y su impacto en el medio ambiente²³ la generación promedio de residuos sólidos en los hogares

²² QIN, Yijing, et al. Comparing recycled and virgin poly (ethylene terephthalate) melt-spun fibres. Germany: Elsevier, 2018.

²³ Clínica Jurídica de Medio Ambiente y Salud Pública, y Greenpeace Colombia. SITUACIÓN ACTUAL DE LOS PLÁSTICOS EN COLOMBIA Y SU IMPACTO EN EL MEDIO AMBIENTE. [En línea]. (Recuperado en 24 julio 2020). Colombia: Universidad de los Andes, 2019. p. 7. Disponible en: http://greenpeace.co/pdf/2019/gp_informe_plasticos_colombia_02.pdf

colombianos es de 4,3 Kg/día, de estos, más de la mitad son plásticos que pueden ser reciclados, reutilizados o reducidos.

La proporción de plástico PET que se desecha en los hogares colombianos no se puede determinar exactamente ya que el polímero se encuentra en una variedad de productos, no solo las botellas, pero el tope máximo de 2 kg/día se considera una aproximación aceptable.

Se planea usar el producto en los hogares por lo que el tamaño y consumo de energía son importantes. La tecnología en los hogares tiene tamaño reducido para que se puedan colocar sobre mobiliarios de oficina y funcionan con corriente residencial.

En base a lo anterior, las especificaciones de desempeño que se seguirán son:

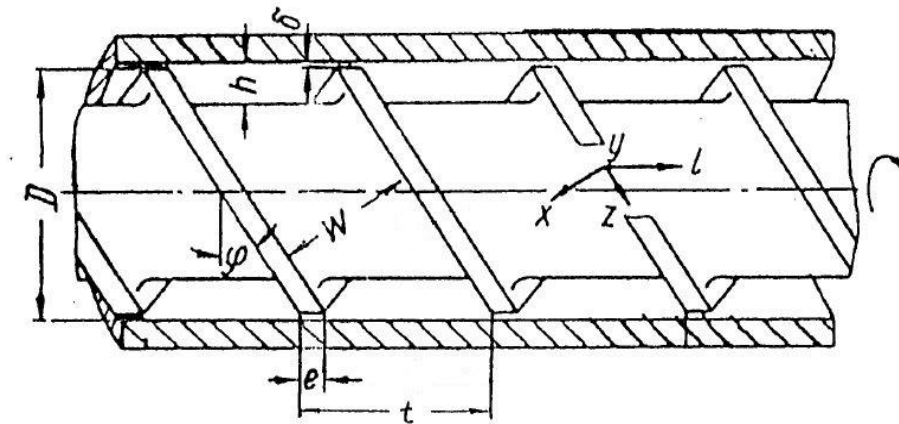
- El tamaño debe ser reducido como para usarse sobre un mueble de computador.
- La salida del dispositivo debe ser de 1 Kg de filamento por hora.
- En su parte más externa no debe existir peligro por el calor producido.
- Debe contar con el menor número de partes.
- El filamento producido debe tener un diámetro de 1,75 mm.
- Debe tener independencia de trabajo por una hora.
- Debe tener piezas impresas en 3D.

7.3. SUBSISTEMAS

7.3.1. Sistema de Extrusión

- **Husillo** El husillo se reconoce como la pieza central del producto, por ello se inicia el proceso de diseño definiendo su geometría a partir de la Figura 17.

Figura 18. Geometría del husillo.



Fuente: SAVGORODNY, V. K. Transformación de plásticos. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, S. A. 1973. p. 4.

Donde:

- D: Diámetro más externo del husillo.
- L: Longitud total del husillo.
- h: Profundidad del canal del husillo.
- δ : Holgadura radial entre el husillo y el cilindro.
- φ : Ángulo de la hélice.
- W: Ancho del canal de husillo.
- e: Espesor de la aleta en la hélice.
- t: Paso del canal helicoidal.

La geometría del husillo puede ser constante en su longitud en el caso que se piense usar para una única utilidad de las tres etapas nombradas anteriormente, pero en nuestro caso exige realizar cambios dimensionales pertinentes para el desarrollo conjunto de las mismas. De ahora en adelante se diferenciarán las etapas de alimentación, transición, y dosificación utilizando los subíndices "1" "2" y "3" en las

dimensiones, respectivamente, y dejando sin subíndice a aquellas dimensiones que son constantes a lo largo del husillo.

Continuando con lo anterior, se toma por constantes las dimensiones: D , δ , φ , e , y t . Este conjunto forma las dimensiones más complicadas de modificar a lo largo del husillo en el momento de su manufactura, por ello se las escoge como constantes, buscando simplicidad.

Iniciamos el proceso definiendo la longitud total del husillo, su diámetro y un nuevo parámetro derivado llamado “grado de compresión”:

$$L = 320 \text{ [mm]} \quad D = 18.8 \text{ [mm]} \quad i = \frac{h_1}{h_3} = 2.43 \quad \frac{L}{D} = 17$$

Donde:

i = grado de compresión.

Con estas medidas iniciales definidas, acudimos a las ecuaciones empíricas recomendadas por Savgorodny²⁴ para definir las siguientes dimensiones en función de “ D ” y “ L ”:

$$\begin{aligned} t &= (0,8 - 1,2) * D & t &= 1 * D = 20 \text{ [mm]} \\ e &= (0,06 - 0,1) * D & e &= 0,16 * D = 3 \text{ [mm]} \\ h_1 &= (0,12 - 0,16) * D & h_1 &= 0,18 * D = 3,4 \text{ [mm]} \\ h_3 &= \frac{h_1}{i} & h_3 &= \frac{h_1}{i} = 1.4 \text{ [mm]} \\ L_3 &= (0,4 - 0,6) * L & L_3 &= 0,1875 * L = 60 \text{ [mm]} \\ \delta &= (0,002 - 0,003) * D & \delta &= 0,005 * D = 0,1 \text{ [mm]} \end{aligned}$$

²⁴ SAVGORODNY, V. K. Transformación de plásticos. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, S. A. 1973. p. 23.

Las ecuaciones empíricas expresan relaciones directamente proporcionales, con unos rangos en los cuales se puede escoger las constantes de proporcionalidad, se atiende a estas relaciones, pero no se sigue al pie de la letra los rangos en la constante pues estas se determinaron para husillos de mayor tamaño al que se desea diseñar.

Continuando, definimos:

$$D_{i,1} = D - 2 * h_1 = 12[mm]$$

$$D_{i,3} = D - 2 * h_3 = 16[mm]$$

$$L_1 = 0,4 * L = 180[mm]$$

$$L_2 = L - (L_1 + L_3) = 80[mm]$$

$$\varphi = 17,7[^\circ]$$

Donde:

D_i : Diámetro interno del husillo.

El valor correspondiente al ángulo de la hélice es constante y extensamente recomendado en la producción de husillos.

No se define un valor de diámetro interno en la zona de transición ($D_{i,2}$), pues en esta se genera un aumento de presión sobre el material semi-fundido a través de la disminución en la profundidad del canal. Por lo cual, el diámetro interno en esta sección varia linealmente desde el valor de $D_{i,1}$ a $D_{i,3}$.

Con la geometría definida es posible realizar el cálculo del flujo volumétrico, la presión desarrolla, potencia y un análisis de resistencia en el husillo para asegurar su funcionamiento, pero antes, definimos algunas propiedades reológicas del PET reciclado.

- **Reología del PET reciclado** Las propiedades reológicas del PET virgen se conservan antes de ser usado y después de ser desechado, ya que las botellas no pasan por ningún tipo de calentamiento excesivo que pueda cambiar su organización molecular. La contraparte reciclada, en cambio, pasa por un calentamiento que ablanda o funde su masa para ser reformado posteriormente.

Como fue descrito en el apartado “Degradación de los polímeros” este proceso conlleva a una pérdida de las propiedades en el material.

Existen muchas caracterizaciones del PET reciclado siguiendo estándares reglamentados en pruebas de laboratorio y que se presentan en artículos científicos, en lo concerniente al proyecto actual nos guiaremos de los resultados obtenidos por Yijin Qin, Muchao Qu, Joachim Kaschta y Dirk W. Schubert²⁵ que se encuentran sintetizados en el Anexo A.

- **Flujo volumétrico** Con la geometría definida es posible pasar a calcular el flujo del husillo, teniendo en cuenta los siguientes valores iniciales:

$$n = 30 [RPM]$$

$$m = 1$$

Donde:

n: revoluciones por minutos del husillo.

m: número de canales en el husillo.

El flujo que ocurre en el husillo cambia según la zona donde se encuentre el material: durante la alimentación ocurre un flujo directo, que es producido con el giro del husillo y el empuje frontal que ejerce su aleta sobre el material; en la zona de transición, donde se origina la compresión del material, existe un flujo inverso que se produce por el aumento de la presión, y es contrario al flujo de arrastre; en la zona de dosificación aparece el último flujo, el de fugas, producido por la presión de impacto entre el material que avanza y el cabezal de extrusión, se encuentra entre la holgadura del husillo y el cilindro.

²⁵ QIN, Yijing, et al. Comparing recycled and virgin poly (ethylene terephthalate) melt-spun fibres. Germany: Elsevier, 2018.

Savgorodny²⁶ calcula el caudal volumétrico resultado de los tres flujos anteriores usando la siguiente ecuación:

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

Donde:

Q: Flujo del cabezal en el husillo [mm³/min].

K: Resistencia del cabezal [mm³].

α : Constante del flujo directo [mm³].

β : Constante del flujo inverso [mm³].

γ : Constante del flujo de fugas [mm³].

Cada uno de estos parámetros son definidos como sigue:

▪ **Resistencia del cabezal:** En el cabezal de extrusión se define la forma que tendrá el perfil del material. La transición del flujo del canal del husillo al flujo en la boquilla se da paulatinamente a través de su paso por sucesivas zonas de diferente configuración, y la constante resultante del cabezal se define como:

$$K = \frac{1}{\sum \frac{1}{k_1} + \sum \frac{1}{k_2} + \dots + \sum \frac{1}{k_i}}$$

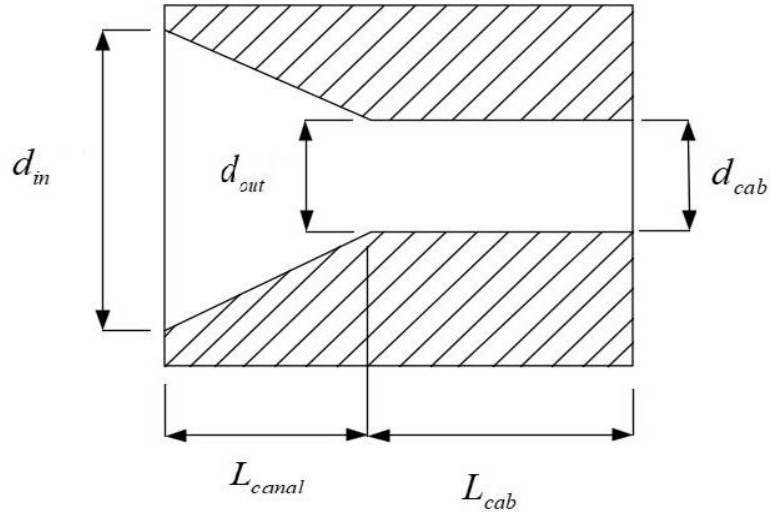
Donde:

k_i : coeficiente de la forma geométrica "i".

La forma transversal que del cabezal es la que se muestra en la Figura 18.

²⁶ SAVGORODNY, V. K. Transformación de plásticos. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, S. A. 1973. p. 13.

Figura 19. Geometría transversal del cabezal.



La constante para un canal cónico con diámetro menor a la salida y un canal cilíndrico son:

$$k_1 = \frac{\pi * d_{cab}^4}{128 * L_{cab}} = 0,04604 \quad [mm^3]$$

$$k_2 = \frac{3 * \pi * d_{in}^3 * d_{out}^3}{128 * L_{canal} * (d_{in}^2 + d_{in} * d_{out} + d_{out}^2)} = 0.5631 \quad [mm^3]$$

Donde:

k_1 : coeficiente de un canal cilíndrico.

k_2 : coeficiente de un canal cónico.

d_{cab} : diámetro del canal cilíndrico = 1,75 [mm]

L_{cab} : longitud del canal cilíndrico = 5 [mm]

d_{in} : diámetro de entrada al canal cónico = 16 [mm]

d_{out} : diámetro de salida del canal cónico = 1,75 [mm]

L_{canal} : longitud del canal cónico = 10 [mm]

Entonces, el valor de la constante de resistencia del cabezal es:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}} = 0,04256 [mm^3]$$

▪ **Constante de flujo directo:** Se define con la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{\pi * m * D * h_3 * \left[\frac{t}{m} - e \right] * \cos^2(\varphi)}{2} = 638,2 [mm^3]$$

▪ **Constante de flujo inverso:** Se define con la siguiente ecuación:

$$\beta = \frac{m * h_3^3 * \left(\frac{t}{m} - e \right) * \sin(\varphi) * \cos(\varphi)}{12 * L_3} = 0,01878 [mm^3]$$

▪ **Constante de flujo de fugas:** Se define con la siguiente ecuación:

$$\gamma = \frac{\pi^2 * D^2 * \delta^3 * \tan(\varphi)}{10 * e * L_3} = 0,0006185 [mm^3]$$

Con todo lo anterior definido encontramos que el flujo volumétrico de salida por el cabezal es:

$$Q_{cab} = 13151 [mm^3 / \text{min}] = 0,000013151 [m^3 / \text{min}]$$

Entonces, el flujo masico que sale de la extrusora es:

$$\dot{m}_{cab} = Q_{cab} * \rho_{PET} = 1,002 [Kg / h]$$

Dentro de la zona de alimentación y transición también existen flujos, pero difieren del flujo de salida por el cabezal en la no existencia del flujo de fugas. Savgorodny²⁷ calcula un flujo volumétrico neto, que pasa por las tres zonas del husillo, donde varían las condiciones de profundidad del canal y la longitud de la zona, y que no tiene en cuenta el flujo de fugas usando la siguiente ecuación:

$$Q_{net} = \frac{A_{ext} * \frac{1}{\tan(\varphi)} * \left[\frac{L_1}{h_1^2} + \frac{L_2}{h_1 * h_3} + \frac{L_3}{h_3^2} \right]}{\frac{\psi}{K} + \left[\frac{1}{\sin(\varphi)} \right]^2 * \left[\frac{L_1}{h_1^3} + \frac{L_2 * (h_1 + h_3)}{2 * h_1^2 * h_3^2} + \frac{L_3}{h_3^3} \right]}$$

Donde:

$$A_{ext} = \frac{\pi^2 * D^2 * n}{2} = 52333 \text{ [mm}^2 \text{ / min]}$$

$$\psi = \frac{\pi * D}{12} = 4,922 \text{ [mm]}$$

Entonces, tenemos:

$$Q_{net} = 20934 \text{ [mm}^3 \text{ / min]} = 0,000020934 \text{ [m}^3 \text{ / min]}$$

Y, el flujo masico:

$$\dot{m}_{net} = Q_{net} * \rho_{PET} = 1,595 \text{ [Kg / h]}$$

- **Presión** La descripción precisa de la variación en la presión que sufre el material en su paso por el husillo excede el alcance de un proyecto de grado como el presente, pero es posible calcular de forma analítica el cambio en la

²⁷ Ibíd., p. 9.

presión que se da en cada zona del husillo. Savgorodny²⁸ usa la siguiente ecuación:

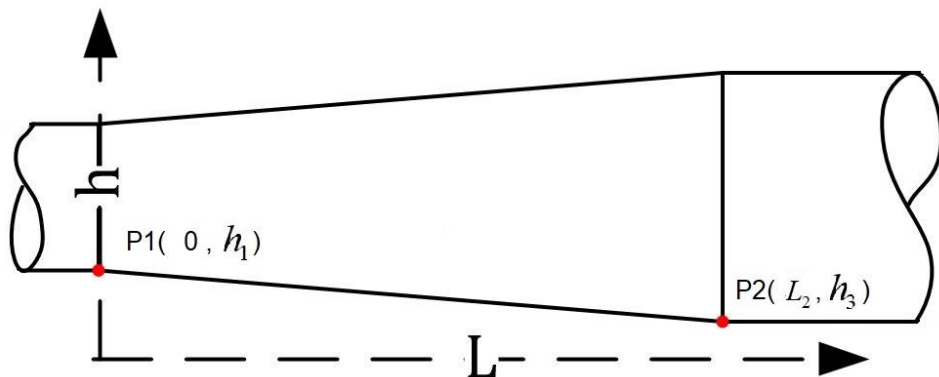
$$\Delta P = \int_0^L \left\{ \frac{A_{ext} * \mu * h(l) * \sin(\varphi(l)) * \cos(\varphi(l)) - Q * \mu}{\psi * [h(l)]^3 * [\sin(\varphi(l))]^2} \right\} dl$$

Los valores del ángulo del filete y la profundidad del canal pueden ser funciones de la longitud del husillo, pero, como fue dicho anteriormente, el valor del ángulo es constante mientras que la profundidad del canal solo varía en la zona de transición.

La variación en la presión puede ser calculada en dos zonas del husillo:

- **Zona de transición:** En esta zona sucede el mayor cambio en la presión, y el valor de la profundidad del canal es función de la longitud. Por ello, planteamos una ecuación que relacione la longitud L_3 con h_3 .

Figura 20. Zona de transición.



²⁸ Ibíd., p 8.

$$m_{P1P2} = \frac{h_3 - h_1}{L_2}$$

$$(y - y_0) = m(x - x_0)$$

$$(h - h_1) = m(l - 0)$$

$$h(l) = h_1 + \frac{h_3 - h_1}{L} * l$$

Con esto procedemos a construir la integral:

$$\Delta P_{comp} = \int_0^{L_2} \left\{ \frac{A_{ext} * \mu_{@270^\circ C} * \left(h_1 + \left[\frac{h_3 - h_1}{L_2} \right] * l \right) * \sin(\varphi) * \cos(\varphi) - Q_{net} * \mu_{@270^\circ C}}{\psi * \left(h_1 + \left[\frac{h_3 - h_1}{L_2} \right] * l \right)^3 * [\sin(\varphi)]^2} \right\} dl$$

Resolviendo:

$$\Delta P_{comp} = 566723 [Pa]$$

▪ **Zona de dosificación:** En esta zona todos los parámetros son constantes por lo que:

$$\Delta P_{ext} = \frac{A_{ext} * \mu_{@270^\circ C} * h_3 * \sin(\varphi) * \cos(\varphi) - Q_{cab} * \mu_{@270^\circ C}}{\psi * h_3^3 * [\sin(\varphi)]^2} L_3 = 46543 [Pa]$$

En la zona de transporte existe en cambio de presión muy pequeño en comparación con las demás zonas, por tanto, no se realiza su cálculo.

○ **Potencia** En las tres zonas del husillo se consumen potencia de manera independiente, por ello, la potencia total se define como:

$$Pot_{tot} = Pot_{alim} + Pot_{comp} + Pot_{ext}$$

Donde:

Pot_{alim} : Potencia en la zona de transporte.

Pot_{comp} : Potencia en la zona de transición.

Pot_{ext} : Potencia en la zona de dosificación.

Savgorodny²⁹ calcula la potencia que consume un husillo usando la siguiente ecuación:

$$dN = dN_1 + dN_2$$

Donde:

$$dN_1 = \frac{\pi^3 * D^3 * n^2 * \mu}{h} dl + \frac{Q_f}{\cos^2 \varphi} dP$$

$$dN_2 = \frac{\pi^2 * D^2 * n^2 * e * \mu}{\delta * \tan \varphi} dl$$

$Q_f = \alpha * n$: caudal de flujo directo.

▪ **Potencia de dosificación:** En esta zona la geometría es constante, por ello la potencia se calcula como:

$$N = \int \frac{\pi^3 * D^3 * n^2 * \mu}{h} dl + \int \frac{Q_f}{\cos^2 \varphi} dP + \int \frac{\pi^2 * D^2 * n^2 * e * \mu}{\delta * \tan \varphi} dl$$

Sacando las constantes de la integral y resolviendo:

$$N = \frac{\pi^3 * D^3 * n^2 * \mu_{@270^\circ C}}{h_3} L_3 + \frac{Q_{f,ext}}{\cos^2 \varphi} \Delta P_{ext} + \frac{\pi^2 * D^2 * n^2 * e * \mu_{@270^\circ C}}{\delta * \tan \varphi} L_3$$

$$N = 1,442 [w]$$

²⁹ Ibíd., p. 14.

▪ **Potencia de transición:** En la transición ocurre un cambio de profundidad en el canal que se debe tener en cuenta al momento de calcular las integrales en la potencia. Utilizando la relación $h(l)$ y conociendo las relaciones $Q_f(l)$ y $dP(l)$, calculamos la potencia en esta zona.

$$Q_f(l) = \frac{\pi * m * D * \left(h_1 + \frac{h_3 - h_1}{L_2} * l \right) * \left(\frac{t}{m} - e \right) * \cos^2 \varphi}{2}$$

$$dP(l) = \frac{A_{ext} * \mu_{@270^\circ C} * \left(h_1 + \left[\frac{h_3 - h_1}{L_2} \right] * l \right) * \sin(\varphi) * \cos(\varphi) - Q_{net} * \mu_{@270^\circ C}}{\psi * \left(h_1 + \left[\frac{h_3 - h_1}{L_2} \right] * l \right)^3 * [\sin(\varphi)]^2} dl$$

$$N = 2,02 \text{ [W]}$$

▪ **Potencia de transporte:** Este cálculo se realiza como con cualquier otro tornillo de transporte. Marks³⁰ calcula el tamaño de motor en un transportador de tornillo usando la siguiente ecuación:

$$MotorHP = \frac{HG}{E}$$

Donde:

$$H = (ALN + CWLF) \times 10^{-6} : \text{Caballos de fuerza de transporte}$$

G: Tolerancia

³⁰ MARKS, Lionel Simeon. Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers. New York: McGraw-Hill, 1996. p. 939-940. ISBN 0-07-004997-1.

- E: Eficiencia.
- A: Factor de tamaño.
- L: Longitud del transportador.
- N: RPM del transportador.
- C: Flujo de material.
- W: densidad del material.
- F: Factor del material.

El factor A se extrae de la Tabla 1.

Tabla 1. Factor A.

Diam of conveyer, in	6	9	10	12	14	16	18	20	24
mm	152	229	254	305	356	406	457	508	610
Factor <i>A</i>	54	96	114	171	255	336	414	510	690

Fuente: MARKS, Lionel Simeon. Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers. New York: McGraw-Hill, 1996. p. 940. ISBN 0-07-004997-1.

Como el diámetro de nuestro husillo se sale de la escala mostrada por ser muy pequeño, se realiza una regresión lineal y se calcula una función $A(D)$ para encontrar nuestro valor. Usando la herramienta EES se calcula la función:

$$A(D) = 5,485 - 0,2555 * D + 0,003245 * D^2 - 0,0000016 * D^3$$

$$A(18,8[\text{mm}]) = 1,818$$

Para el flujo de material dentro de la zona de transporte no tenemos en cuenta el flujo de perdidas ni el flujo inverso pues estos se originan por un cambio de presión, y así asumimos que el flujo que es el directo.

$$C = Q_f = \alpha * n = 19145 \left[\text{mm}^3 / \text{min} \right]$$

El factor F se extrae de la Tabla 2.

Con esto se encuentra el valor de H :

$$H = 0,00003226 [HP]$$

Tabla 2. Capacidad y velocidad de transportadores en espiral.

Group	Max percent of cross section occupied by the material	Max density of material, lb/ft ³ (kg/m ³)	Max r/min for diameters	
			6 in (152 mm)	20 in (508 mm)
1	45	50 (800)	170	110
2	38	50 (800)	120	75
3	31	75 (1,200)	90	60
4	25	100 (1,600)	70	50
5	12½		30	25

Group 1 includes light materials such as barley, beans, brewers grains (dry), coal (pulv.), corn meal, cottonseed meal, flaxseed, flour, malt, oats, rice, wheat. The value of the factor F is 0.5.

Group 2 includes fines and granular materials. The values of F are alum (pulv.), 0.6; coal (slack or fines), 0.9; coffee beans, 0.4; sawdust, 0.7; soda ash (light), 0.7; soybeans, 0.5; fly ash, 0.4.

Group 3 includes materials with small lumps mixed with fines. Values of F are alum, 1.4; ashes (dry), 4.0; borax, 0.7; brewers grains (wet), 0.6; cottonseed, 0.9; salt, course or fine, 1.2; soda ash (heavy), 0.7.

Group 4 includes semiabrasive materials, fines, granular and small lumps. Values of F are acid phosphate (dry), 1.4; bauxite (dry), 1.8; cement (dry), 1.4; clay, 2.0; fuller's earth, 2.0; lead salts, 1.0; limestone screenings, 2.0; sugar (raw), 1.0; white lead, 1.0; sulfur (lumpy), 0.8; zinc oxide, 1.0.

Group 5 includes abrasive lumpy materials which must be kept from contact with hanger bearings. Values of F are wet ashes, 5.0; flue dirt, 4.0; quartz (pulv.), 2.5; silica sand, 2.0; sewage sludge (wet and sandy), 6.0.

Fuente: MARKS, Lionel Simeon. Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers. New York: McGraw-Hill, 1996. p. 939. ISBN 0-07-004997-1.

En el Cuadro 2 se clasifica el tamaño, peso y textura del material particulado a transportar en 5 grupos. Asumimos que el PET particulado es de contextura y peso similar al de los cereales, entonces $F=0.5$.

Asumimos una eficiencia del 90%

$$E=0,9$$

Por último, el factor G se extrae de la Tabla 3.

Tabla 3. Relación G-H.

H	1	1-2	2-4	4-5	5
G	2	1.5	1.25	1.1	1.0

Fuente: MARKS, Lionel Simeon. Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers. New York: McGraw-Hill, 1996. p. 939. ISBN 0-07-004997-1.

Nuevamente el valor de H está por fuera de la escala, por ello recurrimos nuevamente a una regresión lineal en EES para encontrar la función $G(H)$.

$$G(H) = 4,306 - 3,857 * H + 1,787 * H^2 - 0,3564 * H^3 + 0,025414651 * H^4$$

$$G(0,00003226 [HP]) = 4,306$$

Entonces:

$$MotorHP = 0,1151 [W]$$

Con lo anterior calculamos la potencia total del husillo:

$$Pot_{tot} = 3,577 [W]$$

- **Análisis de resistencia** Las cargas en el husillo se originan por tres efectos principales: la reacción axial que se debe al empuje del material hacia adelante; el torque del motor para hacer girar el husillo; y el peso del tornillo que origina un momento flector.

Se escoge como punto crítico de análisis la base del husillo, en la zona de transporte, que es el punto más cercano al apoyo y es donde se originan los esfuerzos más grandes. Además, por su disponibilidad en el mercado, se selecciona como material del husillo el acero AISI 4140 el cual se adjuntan sus propiedades en el Anexo B.

Savgorodny³¹ realiza el análisis usando las siguientes ecuaciones:

▪ **Torsión:**

$$M_g = 9550 * \frac{N}{n} = 1,14 \text{ [Nm]}$$

$$W_p = \frac{\pi * D^3}{16} (1 - u^4) = 1,088 \times 10^{-6} \text{ [m}^3\text{]} \quad \tau = \frac{M_g}{W_p} = 1,046 \times 10^6 \text{ [Pa]}$$

$$u = \frac{d}{D} = 0,64$$

Donde:

N : Potencia total [KW]

M_g : Momento torsor.

W_p : Momento polar de inercia.

d : Diámetro raíz en el punto crítico.

▪ **Pandeo:** La situación crítica de fuerza axial sobre el husillo se origina cuando en el cabezal la salida se obstruye, eso provoca que todo el flujo de avance se convierta en flujo inverso. Esto produce una presión máxima que se calcula:

$$Q = \alpha * n - \beta * \frac{\Delta P_{\max}}{\mu} = 0$$

$$\Delta P_{\max} = \frac{6 * \pi * D * \mu * n * L}{h^2 * \tan \varphi} = 18,12 \times 10^6 \text{ [Pa]}$$

$$F = \frac{\pi * D^2}{4} (1 - u^2) = 1,646 \times 10^{-4}$$

$$\text{[m}^2\text{]}$$

$$P = F * \Delta P_{\max} = 2982 \text{ [N]} = 304 \text{ [Kg]}$$

³¹ SAVGORODNY. Op. cit., p. 24-25.

Donde:

F : Superficie transversal del husillo.

P : Fuerza axial sobre el husillo.

En el cálculo de pandeo se necesita conocer la esbeltez de la columna, la cual debe ser menor a 120.

$$\lambda = \frac{a * L}{R_i} = 114,8 < 120$$

Donde:

a : Coeficiente del apoyo empotrado = 2

R_i : Radio de inercia de la sección $\frac{D}{4} \sqrt{1+u^2} = 0,005576 [m]$

▪ **Flexión:** Se calcula el momento de flexión máximo.

$$M_f = \frac{\gamma * L^2}{2} * \frac{\pi * D^2}{4} (1-u^3) = 0,8101 [Nm]$$

Donde:

γ : Densidad del material del husillo

Con estas cantidades calculadas podemos pasar a evaluar esfuerzos máximos y el factor de seguridad "N":

$$\sigma_{norm} = \frac{P}{F} + \frac{M_f}{W_o} = 1,961 \times 10^7 [Pa]$$

$$\sigma_{comb} = \sqrt{\sigma_{norm}^2 + 4 * \tau^2} = 1,972 \times 10^7 [Pa]$$

$$N = \frac{S_y}{\sigma_{comb}} = 49$$

Donde:

$$W_o : \text{Momento de inercia del \u00e1rea} = \frac{\pi * D^3}{32} (1 - u^4) = 5,442 \times 10^{-7} [m^3]$$

El factor de seguridad resulta en un valor bastante satisfactorio, lo que comprueba que las dimensiones usadas aseguran un buen funcionamiento del husillo.

El pandeo es la condici\u00f3n de deformaci\u00f3n del husillo y debe ser menor a la holgadura radial entre el husillo y el cilindro que lo contiene.

$$f_{\max} = \frac{q * L^4}{8 * E * J} = 0,00009546 [m] < \delta$$

Donde:

E : M\u00f3dulo de elasticidad del material del husillo

$$J : \text{Momento polar de inercia} = \frac{\pi * D^4}{64} (1 - u^4) = 8,488 \times 10^{-10} [m^4]$$

$$q = \gamma * F = 12,67 [N / m]$$

- **Cilindro** El recipiente cil\u00edndrico que contiene al husillo es un recipiente sometido a presi\u00f3n, y existen dos corrientes para analizar este tipo de elementos: recipientes de pared gruesa; y recipientes de pared delgada. Hibbeler³² realiza la distinci\u00f3n entre ambos mediante la relaci\u00f3n entre el radio interior y el grosor, y esta debe ser mayor a 10 para el caso de pared delgada.

³² HIBBELER, Russel C. MEC\u00c1NICA DE MATERIALES. M\u00e9xico: PEARSON, 2011. p. 405. ISBN 978-607-32-0559-7.

Como material para el cilindro se escoge el acero inoxidable AISI 304 por su disponibilidad en el mercado y se utiliza una barra de perfil circular con una pulgada de diámetro. Las propiedades se muestran en el Anexo C.

En nuestro caso tenemos que la relación de diámetro-grosor es:

$$\frac{r}{t} = \frac{D + 2 * \delta}{D_{ext.cil} - (D + 2 * \delta)} = 5,93 < 10$$

Donde:

$D_{ext.cil}$: Diámetro externo del cilindro hueco.

r : Diámetro interno del cilindro hueco.

t : Espesor del cilindro hueco.

Con esto comprobamos que nuestra geometría corresponde a la de un recipiente de pared gruesa.

El problema de determinar los esfuerzos combinados en elementos de pared gruesa se conoce como Problema de Lamé³³, el cual fue solucionado por un científico de igual nombre. La ecuación solución es:

$$\sigma_r = \frac{p_a * a^2 - p_b * b^2}{b^2 - a^2} + \frac{a^2 * b^2}{r^2} * \frac{p_a - p_b}{b^2 - a^2}$$

Donde:

a: Radio interno del cilindro.

b: Radio externo del cilindro.

³³ CAPITULO IX TUBOS DE PAREDES GRUESAS Y DISCOS QUE GIRAN A GRAN VELOCIDAD [Anónimo]. [En línea]. (Recuperado en 16 octubre 2019). Disponible en: [http://gecousb.com.ve/guias/GECO/Dise%C3%B1o%20de%20M%C3%A1quinas%201%200\(MC-4131\)/Material%20Te%C3%B3rico%20\(MC-4131\)/MC-4131%20Teoria%20De%20Cilindros%20De%20Pared%20Gruesa.pdf](http://gecousb.com.ve/guias/GECO/Dise%C3%B1o%20de%20M%C3%A1quinas%201%200(MC-4131)/Material%20Te%C3%B3rico%20(MC-4131)/MC-4131%20Teoria%20De%20Cilindros%20De%20Pared%20Gruesa.pdf). p. 297.

r: Posición dentro del espesor de la pared cilíndrica donde se quiere evaluar el esfuerzo

$p_{a,b}$: presión en la cara ya sea externa o interna del cilindro (“b” y “a”)

Los subíndices “r” y “t” corresponden a esfuerzos radiales y tangenciales, y estos se calculan usando los signos negativo y positivo de la ecuación correspondientemente.

En los cálculos se evalúa la condición crítica de presión que es cuando la boquilla se bloquea, y calculamos los esfuerzos en el radio interior del cilindro y en el radio exterior.

$r = a$	$r = b$
$\sigma_{r,a} = 18,12 \times 10^6 [Pa]$	$\sigma_{r,b} = 101325 [Pa]$
$\sigma_{t,a} = 6,37 \times 10^7 [Pa]$	$\sigma_{t,b} = 4,568 \times 10^7 [Pa]$

Como vemos la condición mayor de esfuerzo se encuentra en el radio interno cilindro. Evaluamos el factor de seguridad para el esfuerzo radial y tangencial en este punto.

$N_r = \frac{S_y}{\sigma_r} = 11,87 > 3$	$N_t = \frac{S_y}{\sigma_t} = 3,37 > 3$
--	---

El valor mínimo de 3,37 en el factor de seguridad tangencial es aceptable pues a criterio del diseñador un factor superior a 3 es satisfactorio.

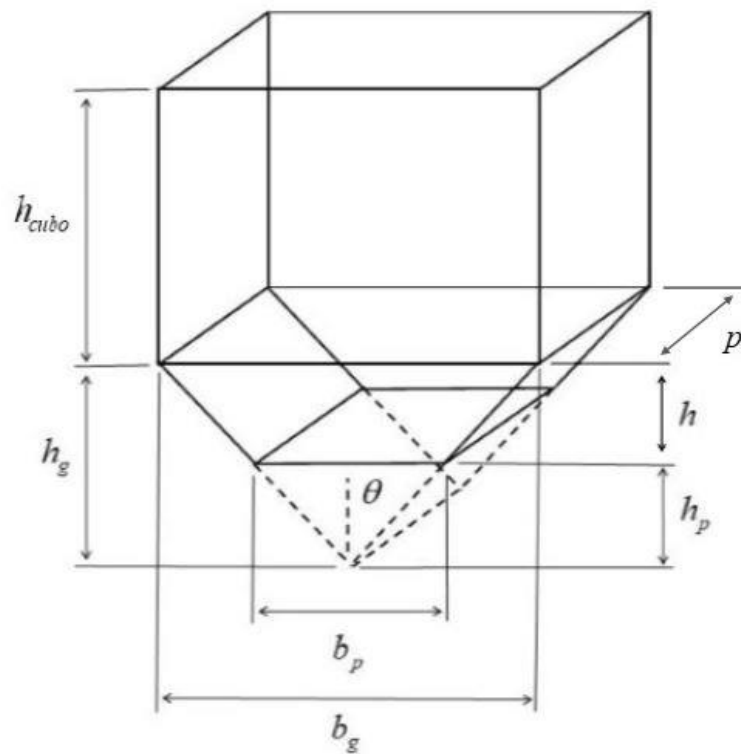
- **Tolva** Como fue mencionado en las especificaciones de desempeño la maquina debe ser capaz de funcionar independientemente por una hora, para ello se diseña una tolva con un volumen mínimo que sea capaz de contener tal cantidad de material.

En el flujo masico de material calculado una hora de funcionamiento corresponde a ≈ 1 kg de material, y con la densidad aparente que posee el material particulado (la densidad del material considerando el aire atrapado entre granos) se calcula el volumen.

$$V_{tolva} = \frac{M}{\rho_{ap.PET}} = 4.8 \times 10^{-3} \text{ [m}^3\text{]}$$

La tolva para diseñar tiene la forma mostrada en la Figura 21.

Figura 21. Tolva.



Donde:

b_g : Base de triangulo grande.

b_p : Base de triángulo pequeño.

h : Diferencia de alturas entre triángulos grande y pequeño.

h_g : Altura del triángulo grande.

h_p : Altura del triángulo pequeño.

h_{cubo} : Altura de la caja.

θ : Angulo generatriz del triángulo.

p : Profundidad de la tolva

Con las relaciones

$$\tan \theta = \frac{b_g}{2 * h_g} \qquad \frac{b_g}{h_g} = \frac{b_p}{h_p} \qquad h = h_g - h_p$$

Y los valores iniciales

$$b_p = 0,02 [m] \qquad h = 0,1 [m] \qquad \theta = 45^\circ \qquad p = 0,08 [m]$$

Se calcula las dimensiones:

$$b_g = 0,22 [m] \qquad h_g = 0,11 [m] \qquad h_p = 0,01 [m]$$

Y finalmente se encuentra la dimensión “h_cubo” igualando volúmenes y solucionando:

$$V_{caja} = b_g * p * h_{cubo}$$

$$V_{pir.p} = \frac{b_p * h_p * p}{2}$$

$$V_{pir.g} = \frac{b_g * h_g * p}{2}$$

$$V_{pir.truncada} = V_{pir.g} - V_{pir.p}$$

$$V_{tolva} = V_{pir.truncada} + V_{caja}$$

$$h = 0,22 [m]$$

Con ello se calculan las dimensiones mínimas que la tolva debe tener para asegurar su funcionamiento continuo.

En el Anexo D. se encuentran los planos del sistema de extrusión.

7.3.2. Sistema de Tiro de Hilo Consiste en un par de rodillos que por fricción entre ellos jalan el hilo a determinada velocidad para lograr un calibre específico. La velocidad a la cual deben girar los rodillos depende del diámetro de este, el calibre del filamento y la cantidad de material extruido.

El rodillo utilizado es un rodillo de caucho industrial con un diámetro de 1,5 [in] con 2[in] de largo y un agujero del eje con 5/8[in] de diámetro.

El calibre que se quiere obtener es de 1,75 mm ya que es el más usado en la impresión 3D.

Como se mencionaron, los datos para iniciar el cálculo de la velocidad son:

$$Q_{cab} = 13151 [mm^3 / min] \approx 219,2 [mm^3 / s]$$

$$D_{fil} = 1,75 [mm]$$

$$D_{rodillo} = 1,5 [in] = 38,1 [mm]$$

Donde:

$D_{rodillo}$: Diámetro del rodillo motor.

D_{fil} : Diámetro del filamento.

Q_{cab} : Flujo volumétrico de salida de la extrusora.

El flujo volumétrico de salida de la extrusora es el resultado del producto entre un área transversal y una velocidad de salida, esta velocidad de salida debe ser tangencial al rodillo motor que gira a ciertas revoluciones por minuto.

$$A_{t.fil} = \frac{\pi}{4} * D_{fil}^2 = 2,405 [mm^2]$$

$$Q = A_{t.fil} * v_{t.fil} \Rightarrow v_{t.fil} = Q / A_{t.fil} = 91,13 [mm / s]$$

$$v_{t.fil} = \omega * \frac{D_{rodillo}}{2} \Rightarrow \omega = \frac{2 * v_{t.fil}}{D_{rodillo}} = 4,784 [\text{rad} / \text{s}]$$

$$RPM = \omega * \frac{60}{2 * \pi} = 45,68$$

Donde:

$A_{t.fil}$: Área transversal del filamento.

$v_{t.fil}$: Velocidad tangencial del filamento.

ω : velocidad angular del rodillo motor.

El rodillo motor es impulsado por un motor paso a paso, el cual se dimensiona usando el principio de trabajo y energía en cuerpos rígidos expuestos por Beer, Johnston y Cornwell³⁴. El principio establece la siguiente ecuación:

$$E_2 = E_1 + W_{12}$$

Donde:

E_1 : Energía en el estado inicial 1.

E_2 : Energía en el estado final 2.

W_{12} : Trabajo de entrada entre los estados 1 y 2.

En el estado inicial el sistema se encuentra en reposo por lo que $E_1 = 0$, en el estado final el sistema se encuentra girando a la velocidad calculada anteriormente por lo cual tiene energía rotacional:

$$E_2 = \frac{1}{2} * I_{inercia} * \omega^2$$

³⁴ BEER, Ferdinand; JOHNSTON, E. Russell Jr y CORNWELL, Phillip. MECÁNICA VECTORIAL PARA INGENIEROS DINÁMICA. México: McGraw-Hill, 2010. p. 1086-1090. ISBN-13: 978-607-15-0261-2.

El trabajo de entrada entre los estados inicial y final es el torque proveniente del motor que hace girar el sistema media vuelta ($\Delta\theta = \pi$) antes de alcanzar la velocidad angular deseada:

$$W_{12} = T_{in} * \Delta\theta$$

Donde:

$I_{inercia}$: Momento de inercia del rodillo motor.

T_{in} : Torque que llega al rodillo.

El valor del momento de inercia de un objeto depende de la distribución de su masa con respecto al eje que se seleccione de giro. Para tener facilidad y precisión en la obtención de este dato se utiliza el software CAD Solidworks el cual posee una herramienta de cálculo de propiedades físicas que entrega este valor.

Primero, se construye un modelo CAD del rodillo (Figura 22.) y después se utiliza la herramienta “Propiedades físicas” dispuesta en la pestaña de “Calcular” para obtener el momento de inercia en el eje de giro del rodillo (Figura 23.).

Figura 22. Modelo CAD del rodillo.

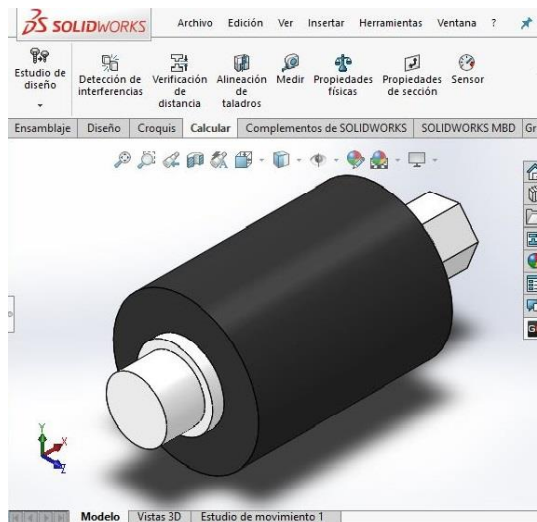
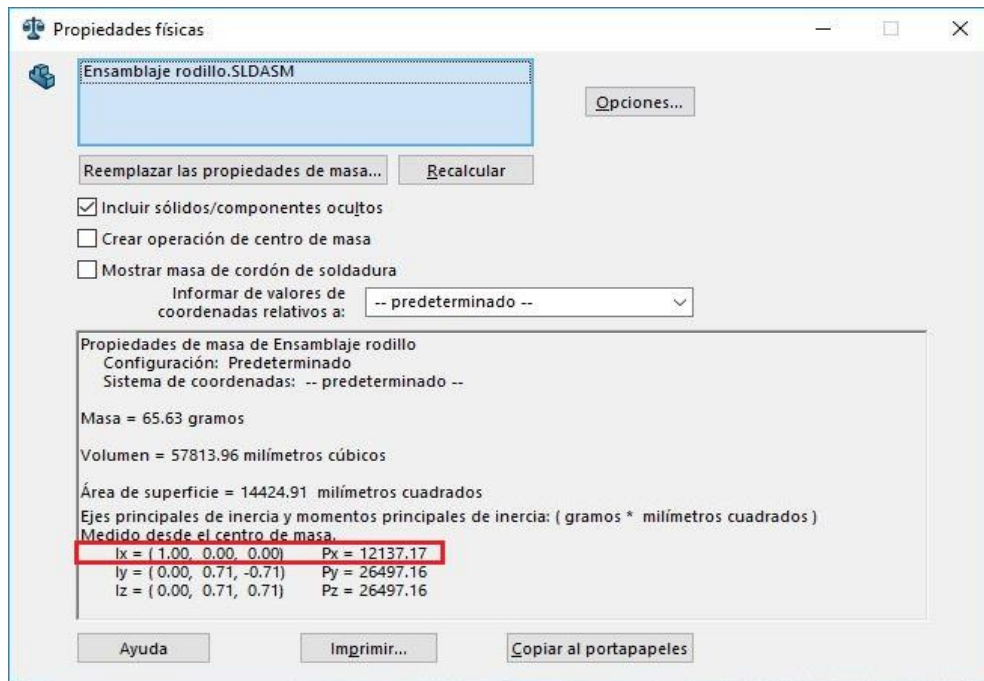


Figura 23. Momento de inercia del rodillo.



El torque que llega al rodillo es el resultado del torque de salida del motor disminuido en las perdidas que se encuentre la transmisión, en la cual sólo tendremos en cuenta la fricción con el apoyo debido a la simplicidad de la transmisión.

$$T_{in} = T_{motor} - T_f$$

El coeficiente de fricción entre las superficies en el apoyo se supone máximo ($\mu = 1$),

$$T_f = \mu * m_{rodillo} * g * d_{apoyo}$$

Donde:

T_f : Torque por fricción

$m_{rodillo} \approx 0,14[kg]$: Masa del rodillo

g : Aceleración de la gravedad.

$d_{apoyo} = 5/8[in] \approx 16[mm]$: Diámetro del apoyo

Reemplazando las ecuaciones y resolviendo, tenemos:

$$\frac{1}{2} * I_{inercia} * \omega^2 = (T_{motor} - T_f) * \Delta\theta \Rightarrow T_{motor} = 0,01047 [N * m] = 0,1067 [kg * cm]$$

El plano del modelo CAD del sistema de jalado se encuentra en el Anexo E.

7.3.3. Sistema de Distribución de Filamento Este sistema es el encargado de distribuir de forma homogénea el filamento a medida que se enrolla en el carrete. Para lograr dicho proceso la mejor opción es usar un mecanismo que transforme el movimiento circular en uno lineal alternativo, ya que de este modo es posible crear una relación entre el giro del carrete y la velocidad lineal a la que se mueve el elemento que guía y distribuye el filamento sobre la superficie de bobinado.

Entre los diversos mecanismos existentes que cumplen con dicha transformación de movimiento, se optó por utilizar el de Sin fin - Medialuna, el mismo que se encuentra en los carretes de pesca. Este dispositivo está compuesto por dos partes principales, primero, un sin fin con dos hélices que inician en el mismo punto y tienen el mismo paso, pero sentido contrario, de modo que se cruzan a lo largo del tornillo. Segundo, un seguidor con forma de medialuna que se adapta a la geometría de la rosca de tal manera que avance paralelo al eje del sin fin, siguiendo una de las hélices, a medida que esta gira, y al momento de llegar al final del tornillo cambia su sentido de traslación, devolviéndose por la otra hélice.

Para el diseño de este sistema se tuvo en cuenta dos factores importantes: La distancia lineal que debería recorrer el seguidor y el método de manufactura por el cual sería fabricado. El primero sería igual al ancho interno del carrete, por lo tanto, el seguidor se desplazaría 61mm. Con el segundo factor se determina la geometría y demás dimensiones del mecanismo, sabiendo que dicho método de manufactura sería la impresión 3D por filamento fundido.

Teniendo en cuenta lo anterior, el sin fin tendría las siguientes características:

- Rosca de perfil circular de 2,25mm de radio. (Circular para poder imprimirlo sin necesidad de usar soportes y generar un mejor acabado superficial sin necesidad de un proceso posterior. El radio de 2,25mm sería el mínimo para que la Medialuna se adapte a la rosca sin riesgo de salirse).
- Diámetro externo de 20mm. (Dimensión adecuada para realizar posteriormente una medialuna lo suficientemente grande y resistente que se pueda imprimir sin problemas).
- 5 revoluciones hasta los 61mm y por tanto paso de 12,20mm. (Este número de revoluciones sería el máximo para que con el perfil de la rosca se genere una geometría adecuada para que la Medialuna avance sin problemas).

Para la Medialuna se optó por realizarla en tres partes separadas: La Camisa, la Guía y el Seguro. Esta decisión debido a que es necesario un buen acabado superficial para que la pieza funcione correctamente. La Camisa se adapta al diámetro exterior del sin fin, de modo que mantiene en su lugar a la Guía a medida que esta gira, y el Seguro permite mantener acopladas las dos partes anteriores.

Finalmente se termina el sistema con un Seguidor, que se acopla a la Medialuna avanzando con ella y guiando el filamento a la hora del bobinado, y con la estructura que soporta todo el mecanismo.

Los planos del Sistema de Distribución se encuentran en el Anexo F.

7.3.4. Sistema de Hilado Este sistema es el encargado de acomodar el filamento en un carrete de modo que queda listo para su uso en impresión 3D. Para lograr dicha función es necesario hacer girar el carrete con una relación fija con el sistema de distribución de filamento, de tal manera que el hilo sea acomodado sin amontonarse sobre el mismo. Dicha relación se haya por el número de revoluciones que necesita el carrete para llenar su ancho con filamento (32) y el número de giros que debe dar el sinfín para que el seguidor recorra este trayecto (5).

Ahora bien, conociendo la distancia entre centros de los ejes de giro en los sistemas y la relación entre velocidades, se escoge un sistema de transmisión por correas para realizar el trabajo

$$R = 32/5$$

$$a = 175 \text{ [mm]}$$

Donde:

R: Relación de velocidades

a: Distancia entre centros

Escogemos las correas dentadas tipo 2GT-6mm, comúnmente usadas en electrónica para la transmisión de potencia. Con la geometría de la polea motriz, diseñada en software CAD para ser impresa en 3D, calculamos la geometría de la polea conducida. Norton³⁵ usa las siguientes ecuaciones para el cálculo de ruedas dentadas:

$$p = 2 \text{ [mm]}$$

$$i = 0.63 \text{ [mm]}$$

$$z_1 = 20 \text{ [mm]}$$

$$z_2 = z_1 * R = 128 \text{ [mm]}$$

$$D_{p1} = z_1 * \frac{p}{\pi} = 12 \text{ [mm]}$$

$$D_{p2} = z_2 * \frac{p}{\pi} = 81.49 \text{ [mm]}$$

³⁵ NORTON, Robert L. DISEÑO DE MAQUINARIA Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos. México: McGraw-Hill Interamericana, 2009. p. 420-421.

$$D_{e1} = D_{p1} - i = 12.1 \text{ [mm]}$$

$$D_{e2} = D_{p2} - i = 80.86 \text{ [mm]}$$

Donde:

p : Paso de los dientes de la correa.

i : Altura del diente de la correa.

z : Numero de dientes.

D_p : Diámetro primitivo de la polea.

D_e : Diámetro externo de la polea.

$1,2$: Subíndices de la polea motriz y la polea conducida, respectivamente.

Con la polea conducida definida pasamos a calcular la longitud de la correa. Marks³⁶ usa la siguiente ecuación para calcular la longitud de correas L_p :

$$L_p = 1.57(D_{p1} + D_{p2}) + \frac{D_{p2} - D_{p1}}{4a} + 2a = 504.8 \text{ [mm]}$$

El valor calculado se utiliza para seleccionar una correa, como puede ser visto en el Anexo G.

Con la correa seleccionada, calculamos un nuevo valor de distancia entre centros a_{GT2} para conocer la longitud sobrante de correa que se tendrá. Marks³⁷ realiza el cálculo de distancia entre centros de poleas usando las siguientes ecuaciones:

$$K = 4L_{pGT2} - 6.28(D_{p1} - D_{p2}) = 1488 \text{ [mm]}$$

$$a_{GT2} = \frac{K + \sqrt{K^2 - 32(D_{p1} - D_{p2})^2}}{16} = 182.8 \text{ [mm]}$$

³⁶ MARKS, Lionel Simeon. Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers. New York: McGraw-Hill, 1996. p. 569.

³⁷ Ibid., p. 569.

Sabiendo lo anterior, sólo faltaría mover el sistema teniendo en cuenta que las revoluciones por minuto a las cuales debe girar el carrete no pueden generar una velocidad tangencial en el filamento mayor a la que produce el hilador, pues podría realizar la acción de jalado desde éste.

En tanto que el carrete gira a revoluciones constantes, el filamento se enrolla y amontona en este, produciendo un cambio de la distancia del filamento al eje de giro que también cambia su velocidad tangencial. Para determinar las revoluciones máximas a las cuales es seguro girar el carrete, se escoge la distancia máxima al eje de giro en la cual está el filamento cuando se enrolla en el carrete.

El volumen de material extruido se amontona en forma de cilindro hueco alrededor del carrete, calcularemos su diámetro más externo:

$$V_{fil} = Q * 60 [min] = 789060 [mm^3]$$

$$V_{cil} = h_{cil} * \pi * (r_{out.cil}^2 - r_{in.cil}^2)$$

$$V_{cil} = V_{fil} \Rightarrow r_{out.cil} = 73.39 [mm]$$

Donde:

V_{fil} : Volumen de filamento extruido en una hora.

V_{cil} : Volumen de un cilindro hueco.

$r_{out.cil}$: Radio exterior del cilindro.

Ahora se calcula la velocidad angular máxima del carrete:

$$\omega_{max} = \frac{v_{t.fil}}{r_{out.cil}} = 1,242 [rad / s] = 11,86 [RPM]$$

A esta velocidad angular debe ser acelerado el carrete.

Conociendo que la masa total a acelerar es de aproximadamente 1260 gramos, y se tiene que hacer en espacio de medio giro, utilizamos el principio de trabajo y

energía señalado anteriormente para calcular el torque de motor necesario para cumplir esta tarea.

Recordamos el uso de la herramienta CAD Solidworks para determinar el valor de la inercia de rotación de la masa. Primero se realiza un modelo 3D aproximado (Figura 24.) y después se utiliza la herramienta de “Propiedades físicas” (Figura 25.).

Figura 24. Modelo CAD del carrete.

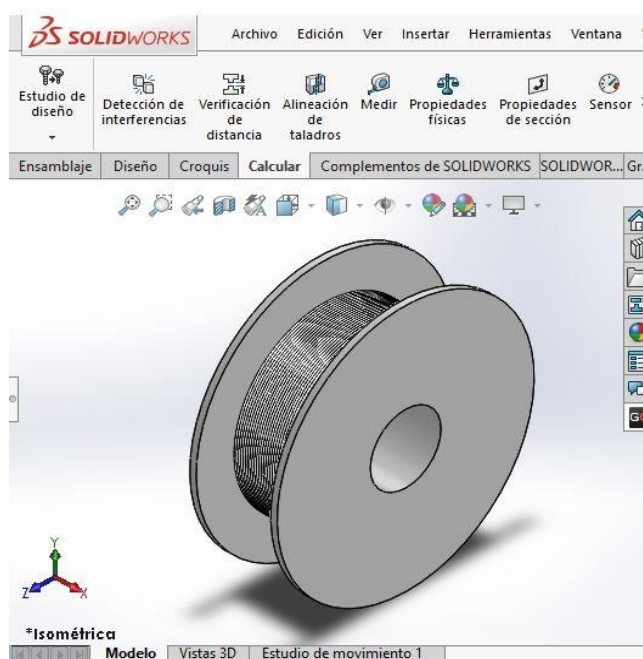
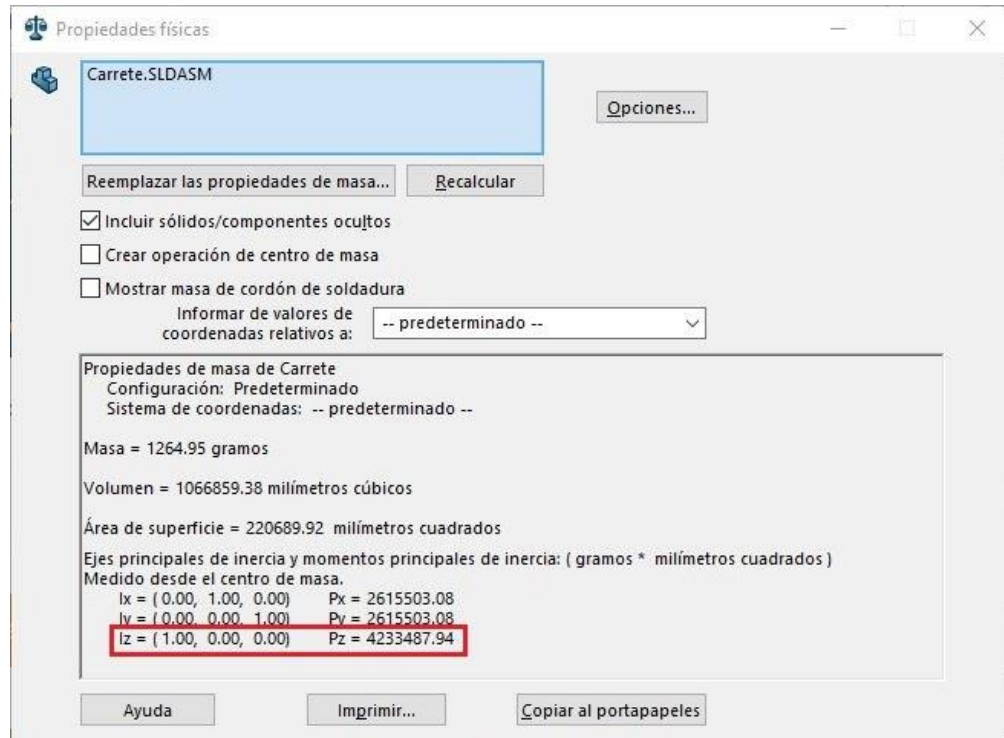


Figura 25. Modelo CAD del carrete.



$$\frac{1}{2} * I_{inercia} * \omega_{max}^2 = (T_{motor} - T_f) * \Delta\theta \Rightarrow T_{motor} = 0,3423[N * m] = 3,489[kg * cm]$$

Los planos del sistema de hilado se encuentran en el Anexo I.

Junto al sistema de Bobinado se encuentra el mecanismo que reparte el hilo de manera homogénea dentro del carrete, los planos de dicho sistema se encuentran en el Anexo H.

7.3.5. Sistema de Electrónica La parte central de este sistema es el microcontrolador Arduino MEGA 2560 (Figura 26.), que dispone de 54 pines digitales y 16 entradas análogas.

Figura 26. Arduino MEGA 2560.



Fuente: <https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3>.

Como elemento de salida de datos se utiliza una pantalla LCD junto a un módulo I2C (Figura 27.) para la comunicación con Arduino.

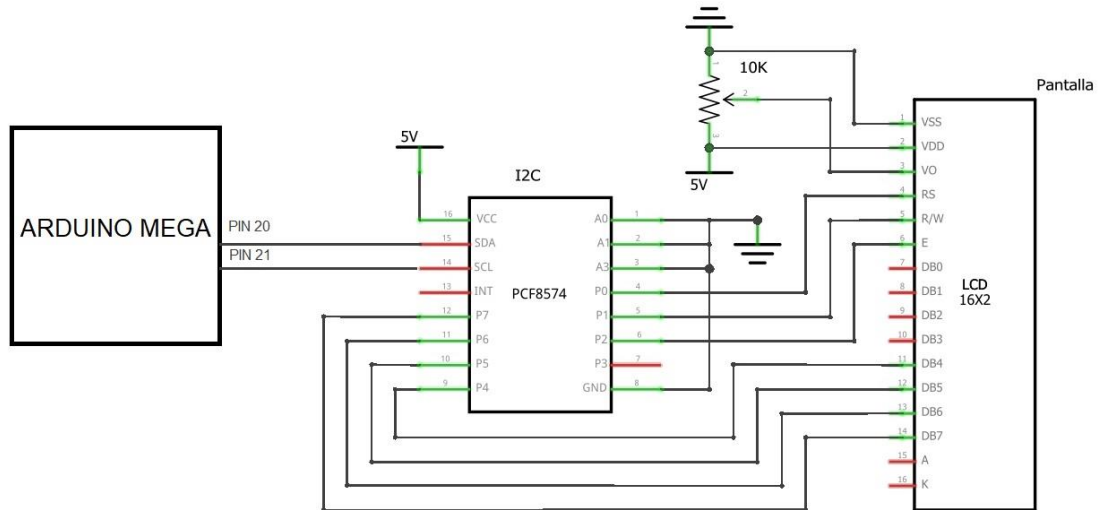
Figura 27. Pantalla LCD y modulo I2C.



Fuente: <http://www.innovatronics.com.co/tienda/cb/modulos-perifericos/14-modulo-i2c-.html>

La conexión de la pantalla LCD y su módulo de comunicación con el microcontrolador se realiza como muestra la figura siguiente.

Figura 28. Conexión pantalla LCD y modulo I2C.



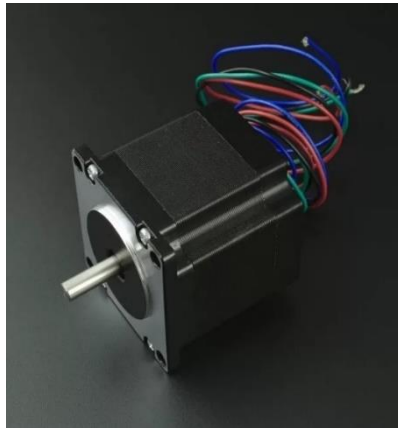
Los elementos de este subsistema forman parte de algunos de los anteriores, por lo que serán agrupados en cada subsistema al que pertenecen y seleccionados según unos datos de entrada.

- **Sistema de Extrusión** Para este sistema es necesario seleccionar un motor que proporcione el torque y los rpm que exige el proceso, estos datos son:

$$M_g = 1,14[N * m] = 11,61[Kg * cm] \quad n = 30[rpm]$$

Por el bajo número de rpm que se necesita y para tener la opción de modificar este valor a preferencia se usará un Stepper motor. El motor seleccionado es un modelo bifásico con torque de 1,2 [N*m], del distribuidor Vistrónica (Figura 28.), posee un voltaje nominal de 24V y una corriente de 2,5A por fase.

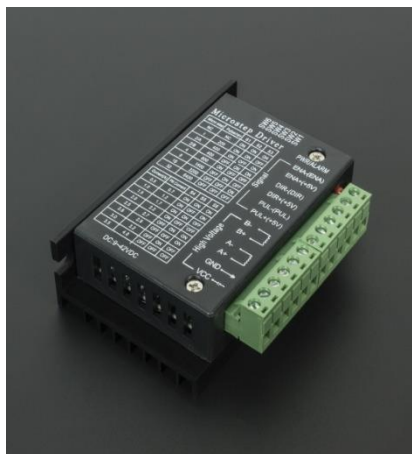
Figura 29. Motor paso a paso bifásico 1,2 Nm.



Fuente: <https://www.vistronica.com/robotica/motores/motor-paso-a-paso-12-2-kgcm-detail.html>

Junto al motor anterior, se utiliza el controlador de motores paso a paso TB6600 (Figura 29.) que soporta una corriente máxima de 4 A por fase y una fuente MS-500-24 (Figura 30.) que provee 24 V y 0-20,8 A en su salida, ambos del distribuidor Vistrónica.

Figura 30. Controlador de motores paso a paso.



Fuente: <https://www.vistronica.com/impresora-3d-y-cnc/driver-micromotopero-motor-paso-a-paso-tb6600-4a-9-40dc-detail.html>

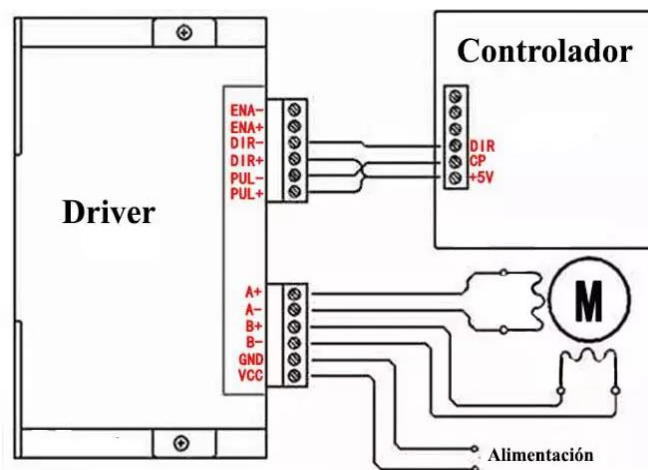
Figura 31. Fuente conmutada MS-500-24.



Fuente: <https://www.vistronica.com/fuente-de-voltaje/fuente-conmutada/fuente-conmutada-s-500-24-de-24v-20a-480w--detail.html>

El diagrama eléctrico de conexión de estos elementos se muestra en la figura siguiente.

Figura 32. Conexión de motor paso a paso.



Fuente: <https://www.vistronica.com/impresora-3d-y-cnc/driver-microstepper-motor-paso-a-paso-tb6600-4a-9-40dc-detail.html>

- **Sistema de Tiro de Hilo:** En el subsistema de tiro de hilo fue calculado el siguiente torque y RPM para satisfacer el funcionamiento:

$$T_{TiroHilo} \approx 0.1 [kg * cm] \qquad RPM_{TiroHilo} \approx 46 [RPM]$$

Para este sistema se escoge un motorreductor de 49 RPM 12V que produce un torque de 2,3 Kg*cm (la figura siguiente). Este motorreductor posee mayor torque al deseado, pero tiene la relación necesaria para producir una salida muy cercana a los 46 RPM calculados.

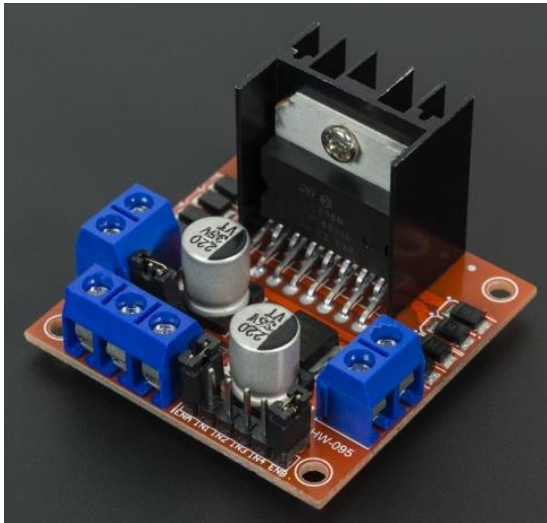
Figura 33. Motorreductor 49 RPM 12V.



Fuente: <https://www.vistronica.com/robotica/motores/motorreductor-12v-41-rpm-detail.html>.

Para realizar el control de motorreductor de corriente directa anterior se usa un módulo L298N como el mostrado en la siguiente figura.

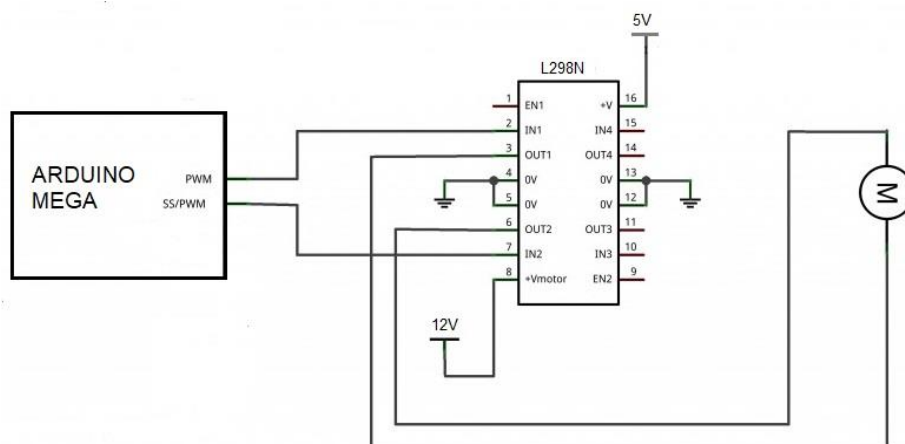
Figura 34. Modulo L298N de control de motores.



Fuente: <https://www.vistronica.com/robotica/modulo-l298n-para-control-de-motores-detail.html>.

La configuración en la conexión del anterior modulo con el motor y el Arduino se muestra en la siguiente figura.

Figura 35. Conexión motor corriente directa.



- **Sistema de Hilado** En el subsistema de hilado fue calculado el siguiente torque y revoluciones por minuto para satisfacer el funcionamiento:

$$T_{Hilado} \approx 3.5[kg * cm]$$

$$RPM_{Hilado} = 12[RPM]$$

Como fue dicho, al amontonarse el hilo en el carrete se cambia su distancia al eje de giro lo que produce un cambio en su velocidad tangencial, las RPM calculadas fueron para la condición de máxima velocidad en que puede girar el carrete sin superar la velocidad en que jala el hilo el sistema encargado de esta tarea.

El motor escogido para este sistema es un motorreductor de 350RPM 12V que produce un torque de 2 Kg*cm. Este motor tiene un torque nominal inferior al necesario, pero tiene un torque de parada del eje de 8 Kg*cm, lo que significa que a medida que se llene el carrete y el torque para superar la inercia aumente el motorreductor disminuirá su velocidad.

Figura 36. Motorreductor de 350 RPM 12V.



Fuente: <https://www.vistronica.com/robotica/motores/motorreductores/motorreductor-33gb-520-12v-350-rpm-2kg-cm-detail.html>.

Como controlador del motor seleccionado se usa el módulo L298N, nombrado anteriormente, y la conexión de los elementos se realiza como fue descrita en la figura.

El plano del sistema de reciclaje de plástico PET se encuentra en el Anexo I.

8. MODELO DE FUSIÓN

Comprobar que las dimensiones del husillo y su velocidad de rotación aseguran una permanencia y distribución suficiente del calor que fundirá el material no es tarea fácil, el modelamiento matemático de este suceso incluye ecuaciones diferenciales complejas y su solución requiere algunas consideraciones. Gutiérrez y Bornacelli³⁸ realizan el desarrollo de un modelo matemático fiable del proceso de fusión que ocurre dentro de un tornillo extrusor mono husillo el cual es mostrado a grandes rasgos en el Anexo J.

8.1. MODELO DE PEARSON

El modelo predice la razón entre el ancho del canal que es ocupado por material sólido (X) y el ancho total de canal (W) para las zonas de transporte y transición. Utilizando la herramienta ofimática Excel fue posible construir tablas de cálculo que ponen en práctica las ecuaciones descritas. Primeramente, se introducen valores de las dimensiones del husillo, como puede verse en la Tabla 4.

Tabla 4. Datos geométricos del husillo.

Ítem	Símbolo	Valor	Unidad
Diámetro externo del tornillo	D	0.0188	[m]
Paso diametral	S	0.02	[m]
Altura del filete en la alimentación	H_A	0.003401	[m]
Altura del filete en la dosificación	H_D	0.0014	[m]
Espesor del filete	e	0.003	[m]
No. de espiras en la zona de transporte	L_1/D	4	Adim
No. de espiras en la zona de transición	L_2/D	4	Adim
No. de espiras en la zona de dosificación	L_3/D	3	Adim

³⁸ GUTIÉRREZ, Paola y BORNACELLI, Jimmy. Metodología para el diseño de tornillos de máquinas extrusoras monohusillo. Cali: Universidad Autónoma de Occidente, 2008. p. 88-104.

Lo siguiente, ingresamos datos relativos al proceso de extrusión como vemos en la Tabla 5.

Tabla 5. Datos del proceso de extrusión.

Item	Simbolo	Valor	Unidad
RPS tornillo	rpm	0.5	rev/s
Flujo Másico arrojado	M_k	0.000301944	Kg/s
Temperatura del barril	T_b	270	°C
Temperatura del material solido	T_s	27	°C

Continuamos con datos térmicos y físicos del material a fundir, Tabla 6.

Tabla 6. Datos térmicos y físicos del material a fundir.

Item	Simbolo	Valor	Unidad
Densidad del sólido	ρ_s	250	Kg/m ³
Densidad del fundido	ρ_m	1270	Kg/m ³
Temperatura de fusión	T_m	250	°C
Conductividad térmica del material	K	0.24	W/m*°K
Calor específico del sólido	Cp_s	1000	J/kg*°K
Calor específico del fundido	Cp_m	1000	J/kg*°K
Viscosidad	η	200	Pa*s
Calor latente de fusión	λ	36000	J/kg

Ya con los datos de entrada del proceso, se procede a calcular resultados usando las ecuaciones descritas. Se muestran en las tablas siguientes.

Tabla 7. Datos del tornillo.

Item	Símbolo	Valor	Unidad
Angulo de hélice	ϕ_B	0.326507747	Rad
Ancho de canal	W	0.015943364	m
Conicidad interna zona transición	ϕ_i	0.025007286	Rad

Tabla 8. Velocidades en las interfaces.

Item	Símbolo	Valor	Unidad
Velocidad relativa del barril	V_b	0.029530971	m/s
Velocidad relativa del barril en x	V_bX	0.009471682	m/s
Velocidad relativa del barril en z	V_bZ	0.027970797	m/s
Velocidad del sólido	VsZ	0.022274111	m/s
Velocidad resultante	Vj	0.011052828	m/s

Tabla 9. Contantes adimensionales del proceso.

Item	Símbolo	Valor	Unidad
Numero de Brighman	Br	0.005090208	Adim
Temperatura media adimensional	Θ	0.667090851	Adim
Grupo dimensional de fusión	ϕ	0.010308983	
Constante de fusión	Ψ	0.001851294	

Tabla 10. Datos de salida del calor suministrado.

Item	Símbolo	Valor	Unidad
Calor suministrado para fundición	Q	13341.81701	J/kg
Flujo de calor para fundición	Q_dot	4.028486933	Watt

Como vemos en a Tabla 10, el calor a suministrar para generar la fundición en el modelado realizado es de ≈ 4 Watt.

Tabla 11. Proceso de fusión en la zona de transporte.

Espira inicio	Espira Final	X1	Vel. Fusión	Z2-Z1	ψ	X/W
3	4	0.01594	0.00184	0.06235	0.01466	0.74925
4	5	0.01195	0.00159	0.06235	0.01694	0.53464

Como vemos en la Tabla 11, se inicia el modelado del proceso de fusión en la zona de transporte. Con dos vueltas al tornillo, pasando de la espira 3 a la 5, ya el ancho del canal que es ocupado por el material solido es casi del 50%.

Tabla 12. Proceso de fusión en la zona de transición.

Espira inicio	Espira Final	H1	X1	Estrechamiento	Vel. de fusión	H2	ψ	X/W
5	6	0.0034	0.0085	0.0085	0.0049	0.0029	0.0201	0.4218
6	7	0.0029	0.0067	0.0085	0.0044	0.0024	0.0226	0.2953
7	8	0.0024	0.0047	0.0085	0.0037	0.0019	0.0270	0.1583
8	9	0.0019	0.0025	0.0085	0.0027	0.0014	0.0369	0.0324

Continuando en la Tabla 12, al salir de la última espira de la zona de transición el ancho del canal que es ocupado por material solido corresponde al 3%, punto en el que se puede aproximar que todo el material solido se ha derretido y puede pasar a la zona de dosificación.

Con el modelo matemático presentado fue posible comprobar, teóricamente, que las dimensiones dispuestas para el husillo garantizan que el material se funda por completo.

Paralelo a la transmisión de calor al interior del cilindro ocurren pérdidas de calor al ambiente que son necesarias y otras que son inevitables. En el sistema que se describe hasta el momento, ocurre la perdida inevitable de calor del cilindro al ambiente que es energía desperdiciada, y la perdida de calor del filamento al momento de salir del cabezal la cual es necesaria pues el filamento debe disminuir

su temperatura por debajo de su punto de fusión aproximado de 250°C (523°k) (como puede ser visto en el Anexo A.) para que pueda ser dispuesto posteriormente por el sistema de hilado.

Los mecanismos de transferencia de calor que ocurren en estos casos son la convección y la radiación, de ellos tendremos en cuenta la convección debido a la presencia de ventiladores que la promueven.

Para el cálculo de esas pérdidas es necesario tener el coeficiente de transferencia de calor por convección h el cual no es una propiedad que pueda simplemente ser buscada en una tabla ingenieril, el fenómeno de la convección es complicado por la gran cantidad de factores que pueden intervenir en él y la variedad de situaciones diferentes en que ocurre, por ello no existen ecuaciones matemáticas teóricas con las cuales modelar exactamente este suceso, y se recurre a la experimentación para determinar este valor.

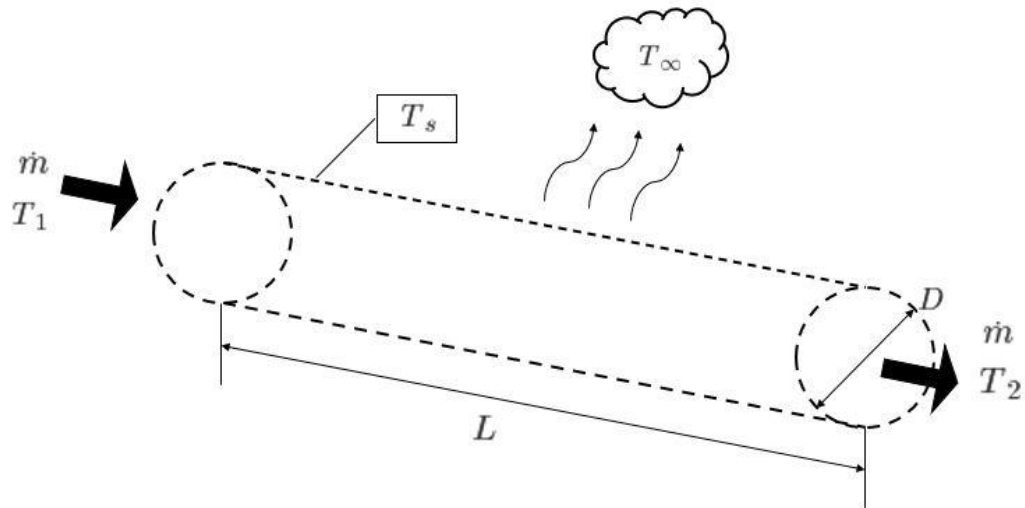
En aras de prescindir de la experimentación y lograr un cálculo directo del coeficiente se han realizado múltiples experimentos en laboratorios donde superficies comunes son sometidas a diversos factores ambientales para después desarrollar una relación matemática que modele este suceso. Utilizando coeficientes adimensionales como el Numero de Nusselt, el Numero de Prandtl, el Numero de Rayleigh, entre otros, se ha construido ecuaciones que dan buenas aproximaciones al coeficiente de transferencia de calor por convección.

Una vez el filamento abandona el cabezal se ve expuesto a la transferencia de calor con el ambiente que lo rodea por los mecanismos de convección natural y radiación, por la presencia de los ventiladores que incrementan el flujo de aire la convección pasa a ser forzada y se toma este mecanismo como dominante despreciando la transferencia de calor por radiación.

8.2. ENFRIAMIENTO DEL FILAMENTO

Se define un volumen de control con forma cilíndrica de diámetro D igual al calibre del filamento y longitud aproximada a la longitud L de enfriamiento que proveen los ventiladores, como se puede ver en la Figura 22. A través de este volumen pasa un flujo masico \dot{m} proveniente de la extrusora que ingresa con temperatura $T_1=270^\circ\text{C}$ y por convección entre el ambiente a temperatura $T_\infty=27^\circ\text{C}$ y la superficie, que asumimos a temperatura homogénea T_s igual a la temperatura de salida de la extrusora, sale del volumen de control con una temperatura T_2 . Esta temperatura de salida es la que deseamos encontrar.

Figura 37. Volumen de control en análisis de enfriamiento del filamento.



El calor perdido por convección \dot{Q}_{lost} se calcula con ecuación siguiente³⁹:

³⁹ CENGEL, Yunus y GHAJAR, Afshin. Transferencia de calor y masa FUNDAMENTOS Y APLICACIONES. Mexico: Mc Graw Hill Educación, 2011. p. 26. ISBN: 978-0-07-339812-9.

$$\dot{Q}_{lost} = A * h * (T_s - T_{\infty})$$

Donde:

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección.

A : Área superficial expuesta a la transferencia de calor = πDL

T_s : Temperatura de la superficie expuesta a transferencia de calor.

T_{∞} : Temperatura del aire alrededor de la superficie A.

La razón de transferencia de calor en un sistema abierto producto del cambio en su temperatura \dot{Q}_{sist} es⁴⁰:

$$\dot{Q}_{sist} = \dot{m} C_p (T_2 - T_1)$$

Donde:

C_p : Calor específico del PET reciclado = 1000 [J/(kg*k)]

Cengel propone el uso de varias relaciones empíricas para calcular el Numero de Nusselt en el caso de cilindros circulares y no circulares en su Tabla 7-1⁴¹, para ingresar a ella es necesario el número de Reynolds que se calcula de la siguiente manera⁴²:

$$Re = \frac{V L_c}{\nu_{Tavg}}$$

Donde:

V : velocidad del aire = 1.5 [m/s]

L_c : Longitud característica = D

⁴⁰ Ibid., p. 13.

⁴¹ Ibid., p. 436.

⁴² Ibid., p. 385

$$\nu_{T_{avg}} = \frac{\mu_{T_{avg}}}{\rho_{T_{avg}}}; \text{Viscosidad cinemática del aire a } T_{avg}.$$

$$\mu_{T_{avg}}: \text{Viscosidad dinámica del aire a } T_{avg}.$$

$$\rho_{T_{avg}}: \text{Densidad del aire a } T_{avg}.$$

$$T_{avg} = \frac{T_{\infty} - T_s}{2}$$

Utilizando la herramienta EES obtenemos la propiedad de aire a temperatura media y encontramos:

$$Re = 39.21$$

Lo que nos dice que la ecuación a utilizar es la siguiente:

$$Nuss = 0.911 Re^{0.385} * Pr^{\frac{1}{3}}$$

Donde:

$$Pr = \frac{\nu_{T_{avg}}}{\alpha_{T_{avg}}}; \text{Numero de Prandtl.}$$

$$\alpha_{T_{avg}}: \text{Difusividad térmica del aire a } T_{avg}.$$

$$Nuss = \frac{hL_c}{k_{T_{avg}}}; \text{Numero de Nuselt.}$$

$$k_{T_{avg}}: \text{Coeficiente de calor por conducción del aire.}$$

Suponiendo condiciones estacionarias, el aire atmosférico como gas ideal y que la presión atmosférica es de una atmosfera se utiliza la herramienta EES para obtener las propiedades del aire a la temperatura promedio y solucionar el sistema de ecuaciones formado, como es mostrado en el Anexo K, encontrando los siguientes resultados.

$$\dot{Q}_{sist} = \dot{Q}_{lost} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} h &= 98.11 \text{ [W/(m}^2\text{*K)]} \\ \dot{Q}_{lost} &= 11,8 \text{ [W]} \\ T_2 &= 500,5 \text{ [}^\circ\text{K]} = 227.5 \text{ [}^\circ\text{C]} < 250 \text{ [}^\circ\text{C]} \end{aligned}$$

Como vemos, la temperatura teórica de salida del filamento de la zona de enfriamiento es inferior a la temperatura de fusión, aproximadamente 22 °C inferior, lo que juzgamos como un margen aceptable.

8.3. PERDIDA DE CALOR EN EL CILINDRO

En el caso de la pérdida de calor que tiene el cilindro que contiene al husillo, Incropera⁴³ propone el uso de la siguiente expresión para el cálculo del Numero de Nusselt en el caso de un cilindro largo horizontal con convección natural:

$$Nu_D = \left\{ 0,60 + \frac{0,387 * Ra_D^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2$$

Esta ecuación tiene la limitante de que debe ser aplicada en un rango del Numero de Rayleigh $Ra_D \leq 10^{12}$.

En los coeficientes adimensionales tenemos que:

$$Nu_D = \frac{h * 2 * b}{k_{@T_{avg}}}: \text{Numero de Nusselt.}$$

⁴³ INCROPERA, Frank, et. al. FUNDAMENTALS OF HEAT and MASS TRANSFER. Estados Unidos de America: John Wiley & Sons, 2011. p. 613. ISBN 13 978-0470-50197-9.

$$Ra_D = \frac{g * \beta * (T_s - T_\infty) * (2 * b)^3}{\nu_{@T_{avg}} * \alpha_{@T_{avg}}} : \text{Numero de Rayleigh.}$$

Donde:

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección.

b : Radio externo del cilindro.

$k_{@T_{avg}}$: Coeficiente de transferencia de calor del aire a T_{avg} .

g : Aceleración de la gravedad.

β : Coeficiente de expansión térmica.

Con estas ecuaciones es posible calcular el calor perdido Q_l .

$$Q_l = A * h * (T_s - T_\infty)$$

Donde:

$$A = 2 * \pi * b * L$$

L : Longitud del cilindro.

Suponiendo condiciones estacionarias, el aire atmosférico como gas ideal y que la presión atmosférica es de una atmosfera se utiliza la herramienta EES para obtener las propiedades del aire a la temperatura promedio y solucionar el sistema de ecuaciones formado, como es mostrado en el Anexo L.

Del conjunto de ecuaciones se obtiene el siguiente resultado:

$$h \approx 10 \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ K} \right] \quad Q_l \approx 62 [W]$$

Esto nos dice que existe una gran cantidad de calor perdido al ambiente, por lo cual se justifica el uso de un aislamiento en la parte externa del cilindro para ahorrar potencia consumida en el sistema de calentamiento.

8.4. ELEMENTO DE CALENTAMIENTO

Se necesitan de elementos calentadores que eleven la temperatura del cilindro hasta los 270 °C y proporcionen los 4 Watts que necesita el proceso de fundición. Se escoge el calentador de banda de acero inoxidable (Figura 31.) con una potencia y temperatura máxima de 150 W y 400 °C respectivamente, del distribuidor Mercado Libre.

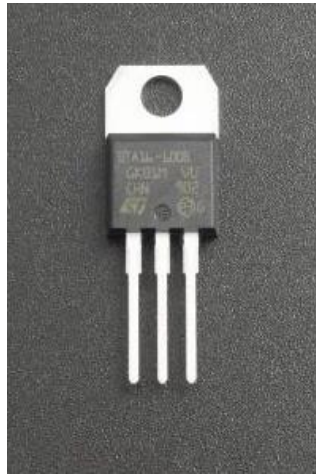
Figura 38. Calentador de banda en acero inoxidable.



Fuente: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-545450849-calentador-de-banda-acero-inoxidable-maquinaria-de-plastico-_JM#reco_item_pos=0&reco_backend=machinalis-v2p&reco_backend_type=low_level&reco_client=vip-v2p&reco_id=ff0095bc-40fd-4687-9280-3e9304fbfabd.

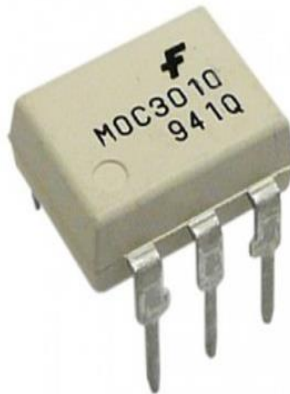
Para realizar el control del flujo de corriente a la banda de calentamiento y aislar el circuito de Arduino de la corriente alterna residencial, se utilizan el triac BTA16 (Figura 32.) y el optoacoplador MOC3010 (Figura 33.) del distribuidor Vistrónica.

Figura 39. Semiconductor triac BTA16.



Fuente: <https://www.vistronica.com/componentes-activos/triacbta16-600b-detail.html>

Figura 40. Optoacoplador MOC3010.



Fuente: <https://www.bigtronica.com/poblado/semiconductores/circuitos-integrados/optoacopladores/1435-optoacoplador-moc3010.html>

Este sistema necesita una señal de retroalimentación para ejercer la acción de control sobre la temperatura, para ello usamos una termocupla tipo K (Figura 34.) que puede medir a una temperatura máxima de 400°C y un módulo MAX6675 (Figura 35.) que permite la lectura de una termocupla en un Arduino.

Figura 41. Termocupla tipo K.



Fuente: <https://www.vistronica.com/sensores/temperatura/termocupla-tipo-k-con-sonda-de-rosca-m6-detail.html>

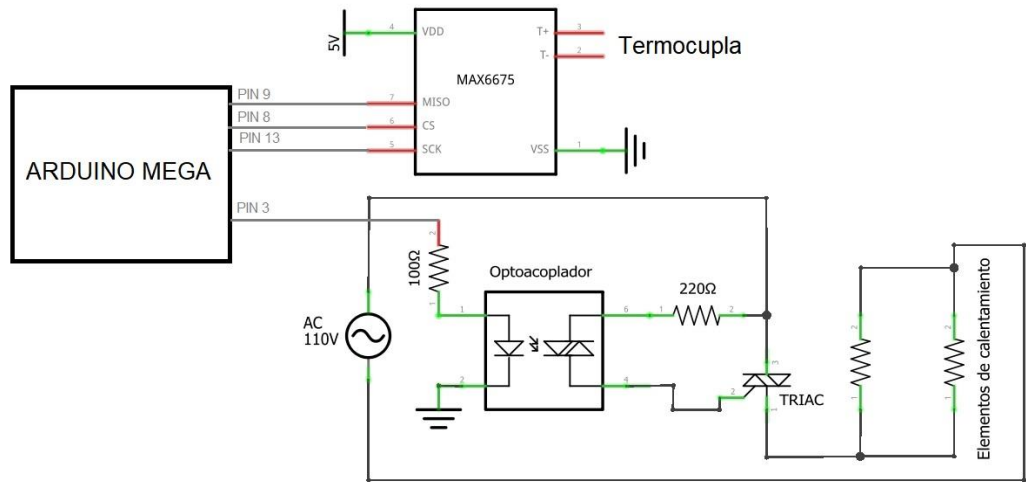
Figura 42. Modulo MAX6675.



Fuente: <https://www.vistronica.com/sensores/temperatura/modulo-para-termocupla-max6675-detail.html>

LA conexión de los elementos antes mencionados se realiza como se muestra en la siguiente figura.

Figura 43. Conexión del sistema de calentamiento.



9. ANALISIS TÉCNICO-ECÓNOMICO

El análisis que se realizará a continuación consiste en dos partes: un análisis técnico que realizará una recopilación de todos insumos mecánicos, electrónicos y de más que se requieren para la consecución de la maquina recicladora anteriormente diseñada; y un análisis económico que permitirá evaluar si el proyecto de construcción es rentable según los criterios de Valor Actual Neto (VAN) y el Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI).

9.1. ANALISIS TÉCNICO

Los insumos necesarios para llevar a cabo la maquina se listan a continuación:

9.1.1. Insumos Manufacturados Son los insumos que requieren ser trabajados en metalmecánicas para que sean transformados de recursos en bruto a piezas funcionales. Estas piezas se listan en la Tabla 13.

Tabla 13. Insumos Manufacturados.

Ítem	Cantidad
Tornillo	1
Boquilla	1
Subtolva	1
Carcasa	1
Tolva	1
Camisa	1

9.1.2. Insumos Estandarizados Estos Insumos son aquellos que no necesitan de diseño ya que pueden conseguirse comercialmente según un estándar. Los componentes se listan en la Tabla 14.

Tabla 14. Insumos Estandarizados.

Insumo	Referencia	Cantidad
Rodamiento de bolas radial	ISO 15 RBB-1020-12,DE,NC,12-68	2
Rodamiento de bolas radial	ISO 15 RBB-1015-12,DE,NC,12-68	2
Rodamiento de bolas radial	ISO 15 RBB-1817-20,DE,NC,20-68	4
Tuerca hexagonal	ISO-4035-M3-N	100
Tuerca hexagonal	ISO-4034-M5-N	29
Tornillos Bristol	ISO 4762 M5X16-16N	27
Tornillos Bristol	ISO 4762 M5X30-22N	2
Tornillos Bristol	ISO 4762 M3X30-18N	2
Tornillos Bristol	ISO 4762 M3X20-20N	21
Tornillos Bristol	ISO 4720 M3X25-25N	2
Tornillos Bristol	ISO 7380-M3X10-10N	78
Correa	2 GT bucle cerrado - 6mm de ancho - 520 mm longitud	1

9.1.3. Insumos Electrónicos Son insumos que también se compran en el mercado y son o están formados de componentes electrónicos. Las piezas electrónicas se listan en la Tabla 15.

Tabla 15. Insumos Electrónicos.

Insumo	Cantidad
Arduino Meza 2560 compatible CH340	1
Fuente Conmutada 12V 5A	1
LCD 20x4 Backlight Azul	1
Motoreductor 33GB-520 12V 350RPM 2 kg.Cm	1
Motorreductor 12V 49 RPM	1
Puente H Dual L9110S 800mA	2
Termocupla tipo K con sonda de 30MM	2
Ventilador 30x30x10MM 12V	3
Resistencias	20
Triac 16a-600V	1
Potenciometro 10K	3
Moc3010	2
Modulo Conversor L2c	1
Módulo de Acondicionamiento Max6675	2
Cable Poder	1
Clavija Polo T	1
Cable Duplex B	2
Cabel Vehiculo	2
Anillo Calefactor 35mm	1
Anillo calefactor 25mm	1
Kit Motor	1

9.1.4. Insumos Impresos en 3D Son los insumos que requieren ser creados usando una impresora 3D.

Tabla 16. Insumos Impresos en 3D.

Insumo	Cantidad
Soporte Rodamiento	1
Acople Motor Extrusora	1
Soporte Motor Extrusora A	1
Soporte Motor Extrusora B	1
Rodillo	2
SopRod1	6
SopRod2	2
Soporte Rodillos	1
Seguro Motor	1
Soporte Gua Filamento 1	4
Medialuna Guia	1
Medialuna Camisa	1
Medialuna Seguro	1
Sinfín	1
Seguidor	1
Rueda	1
Soporte A	1
Soporte B	1
Eje Soporte Carrete	1
Cono Soporte Carrete Interior	1
Cono Soporte Carrete Exterior	1
Polea Motriz	1
Recubrimiento Cono	2
Polea Conducida	1
Acople Sistema D a Sistema C	1
Soporte Rodamiento Motriz	1
Soporte Rodamiento Conducido	1
Soporte Motor Hilado Parte 1	1
Soporte Motor Hilado Parte 2	1
Rueda de fricción	1
Recubrimiento Rueda de Fricción	1
Soporte Interno	4
Soporte de Base	2
Soporte Potenciómetro	1
Perilla	2

Recopilando la información anterior, presentamos la inversión inicial aproximada que se debe hacer al proyecto en la Tabla 17.

Tabla 17. Balance Total.

Insumo	Costo [COP]
Insumos Electrónicos	1'200,000.00
Insumos Impresos en 3D	540,000.00
Insumos Manufacturados	1'500,000.00
Insumos Estandarizados	60,000.00
Total:	3'300,000.00

Como podemos ver en la tabla anterior, la inversión inicial total para la maquina es aproximadamente 3'300,000.00 COP.

9.2. ANALISIS ECONÓMICO

Ya definido un valor de inversión inicial en la producción de la máquina, el siguiente paso es demostrar si el proyecto es rentable o no siguiendo los criterios de Valor Actual Neto (VAN) y Periodo de Recuperación de la inversión (PRI).

Antes de iniciar los cálculos definimos que el proyecto debe recuperar la inversión en un tiempo menor o igual a 5 años, y debe rendir una rentabilidad del 1% mensual para que sea aceptado.

Las ganancias que presenta el proyecto son los ahorros que se hacen en la inversión de nuevos carretes de hilo para impresión 3D. En un contexto de poco uso, se puede gastar aproximadamente un carrete de hilo de 1kg al mes. El insumo tiene diferentes precios en el mercado dependiendo de la marca que lo produce y el material del que se fabrica, para nuestro caso supondremos un carrete de la

marca OVERTURE del material PLA que tiene un precio de 23 USD (≈80,000 COP⁴⁴) en la plataforma de ventas en línea, Amazon, como vemos en la Figura 42.

Figura 44. Carrete OVERTURE de filamento PLA en 1,75mm.

amazon Enviar a Colombia Todos

Todo Ofertas del Día Servicio al Cliente Tarjetas de Regalo Vender Listas

Industrial y Científico > Impresión 3D > Materiales de Impresión 3D > Materiales de Impresión 3D de Filamento

RELIABLE FILAMENT FOR YOUR 3D PRINT

Consistent Color
Less Stringing
Less Warping
ISO 9001 2015 Quality Control

Overture - Filamento PLA de impresión 3D para la mayoría de FDM en 1.75 milímetros, en bobina de 1 kilogramo de 200 x 200 milímetros y de precisión dimensional de +/- 0.05 mm

Marca: OVERTURE
★★★★★ 5,664 calificaciones | 40 preguntas respondidas
Amazon's Choice para "overture pla 1.75"

Precio: **US\$ 22.99** (US\$ 1.15 / 10 Productos) + Sin depósito de derechos de importación y US\$ 19.05 de envío a Colombia (Envío GRATIS a Colombia cuando gastes más de US\$ 35.00 en artículos aptos) Detalles

Color: Negro 1 paquete

Marca: OVERTURE
Material: PLA
Color: Negro 1 paquete
Peso del artículo: 2.2 Libras

Pasa el mouse encima de la imagen para aplicar zoom

Fuente: https://www.amazon.com/-/es/Overture-Filamento-impresi%C3%B3n-mil%C3%ADmetros-dimENSIONAL/dp/B07PGY2JP1/ref=pd_lpo_328_t_0/130-5038149-266040?_encoding=UTF8&pd_rd_i=B07PGY2JP1&pd_rd_r=6beba59a-8ca8-4fac-a85b-7cc4184d00e9&pd_rd_w=kXogD&pd_rd_wg=rHDQd&pf

⁴⁴ Banco de la Republica Colombia. [Sitio web]. Bogota. Tasa Representativa del Mercado [Consulta: 16 de febrero 2021]. Disponible en: <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/trm>.

9.2.1. Valor Actual Neto Para calcular el VAN debemos tener el valor actual de todos los flujos futuros de caja. Podemos hacer lo anterior usando la ecuación siguiente⁴⁵:

$$VA = F \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$$

Donde:

VA: Valor actual.

F: Valor de los flujos futuros = 80000 COP.

i: Rentabilidad mensual = 1% = 0.01.

n: Numero de periodos que serán evaluados = 5 años X 12 meses = 60

Resolviendo, tenemos que:

$$VA = 3'596,403[COP]$$

A continuación, se procede a calcular el VAN como la diferencia entre la inversión inicial y el VA de los flujos de dinero futuros⁴⁶.

$$VAN = 3'596,403 - 3'300,000 = 296,403[COP]$$

El cálculo anterior nos muestra la ganancia que tendríamos después de recuperar la inversión, pero calculado para el momento inicial, si queremos calcularlo para el final de los 60 meses equivalentes a los 5 años usamos la ecuación siguiente:

$$VF = VA(1+i)^n$$

Donde:

VF: Valor final.

VA = 296,403 [COP]

⁴⁵ SAPAG, Nassir. PROYECTOS DE INVERSIÓN Formulación y Evaluación. Chile: PEARSON, 2011. p. 296. ISBN: 978-956-343-107-0.

⁴⁶ Ibit., p. 300.

Resolviendo:

$$VF = 538,474[COP]$$

Este valor calculado es igual al que se obtendría si se calcula el saldo de la inversión mes a mes, como podemos comparar con el Anexo M.

9.2.2. Periodo de Recuperación de la Inversión Se basa en determinar la cantidad de periodos en que se recupera la inversión, lo cual se traduce en tiempo. Como fue visto anteriormente, la inversión reporta una ganancia positiva al final de los 60 meses lo que nos dice que el proyecto cumple en recuperar lo invertido antes de terminados los periodos.

Como se muestra en el Anexo L. donde se calcula mes a mes la recuperación y el saldo de la inversión, se solventa la deuda a mediados del 5 año (4,5 años), 6 meses antes de finalizar el tiempo máximo declarado para juzgar el proyecto como rentable, dicho esto, se juzga al proyecto como rentable y que cumple las expectativas de la inversión.

10. CONCLUSIONES

- Se investigó en artículos científicos las características químicas y mecánicas del PET reciclado. A pesar que la información encontrada puede tener pequeñas variaciones de un estudio a otro, ya que la síntesis de los materiales poliméricos es un proceso aleatorio que depende de diversas variables, los datos obtenidos fueron una buena aproximación para las necesidades del presente proyecto.
- Se definieron las especificaciones de desempeño viables para un contexto doméstico, lo que dio como resultado un sistema de reciclaje de PET con una producción aproximada de 1 Kg por hora de filamento, un volumen de tolva igual a $4,8 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ que le da un tiempo de independencia de 1 hora, una boquilla que extruye hilo de 1,75 milímetros de diámetro y una protección de aislamiento sobre su cilindro de extrusión.
- Se realizó el diseño en detalle de la máquina recicladora de PET, apoyados en diversos cálculos respectivos a cada sistema y siguiendo la metodología básica de diseño, generando así los planos para cada una de las piezas manufacturables y el listado de elementos necesarios para completar la construcción de dicha máquina.
- Se proyectó el comportamiento del proceso de fundición del PET, encontrando que el modelo matemático implementado, para extrusoras monohusillo, representa una buena aproximación al desempeño que tendría la máquina construida, pero, teniendo en cuenta las suposiciones que se usaron en la solución de las ecuaciones matemáticas, los resultados sólo se pueden tomar como teóricos o de funcionamiento ideal.

- Se efectuó el análisis técnico reportando una inversión inicial en el proyecto que sólo cubre lo necesario para la manufactura de las piezas que conforman el sistema de reciclaje, dejando por fuera los costos que se generan con el ensamblado, calibración y puesta a punto del mismo. Esta omisión en los costos podría afectar el subsecuente análisis económico en el logro del objetivo de recuperar la inversión en un periodo menor o igual a 5 años.

BIBLIOGRAFÍA

ATALAY, Elizabeth; PARKER, Laura y SCHULTZ, Heidi. Los plásticos explicados de la A a la Z. [En línea]. NATIONAL GEOGRAPHIC. 2017. (Recuperado en 26 de enero 2019). Disponible en: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2018/05/los-plasticos-explicados-de-la-la-z>.

BEER, Ferdinand; JOHNSTON, E. Russell Jr y CORNWELL, Phillip. MECÁNICA VECTORIAL PARA INGENIEROS DINÁMICA. México: McGraw-Hill, 2010. p. 1086-1090. ISBN-13: 978-607-15-0261-2.

BELTRAN, Maribel y MARCILLA, Antonio. Tecnología de polímeros: Procesado y propiedades. [En línea]. (Recuperado en 7 de enero 2019), Disponible en: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf

CAPITULO IX TUBOS DE PAREDES GRUESAS Y DISCOS QUE GIRAN A GRAN VELOCIDAD [Anónimo]. [En línea]. (Recuperado en 16 octubre 2019). Disponible en:

[http://gecousb.com.ve/guias/GECO/Dise%C3%B1o%20de%20M%C3%A1quinas%201%20\(MC-4131\)/Material%20Te%C3%B3rico%20\(MC-4131\)/MC-4131%20Teoria%20De%20Cilindros%20De%20Pared%20Gruesa.pdf](http://gecousb.com.ve/guias/GECO/Dise%C3%B1o%20de%20M%C3%A1quinas%201%20(MC-4131)/Material%20Te%C3%B3rico%20(MC-4131)/MC-4131%20Teoria%20De%20Cilindros%20De%20Pared%20Gruesa.pdf). p. 292-297.

CENGEL, Yunus y GHAJAR, Afshin. Transferencia de calor y masa FUNDAMENTOS Y APLICACIONES. Mexico: Mc Graw Hill Educación, 2011. p. 13, 26, 436, 385. ISBN: 978-0-07-339812-9.

CIFUENTES, Roosevelt. Diseño de una maquina extrusora para la empresa Plastik de Occidente. Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero de Materiales. Santiago de Cali: Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, 2011. p. 5.

Clínica Jurídica de Medio Ambiente y Salud Pública, y Greenpeace Colombia. SITUACIÓN ACTUAL DE LOS PLÁSTICOS EN COLOMBIA Y SU IMPACTO EN EL MEDIO AMBIENTE. [En línea]. (Recuperado en 24 julio 2020). Colombia: Universidad de los Andes, 2019. p. 7. Disponible en: http://greenpeace.co/pdf/2019/gp_informe_plasticos_colombia_02.pdf

E3D+VET ERASMUD + 3D PRINTING VET CENTRES. GUÍA TÉCNICA DE IMPRESIÓN 3D. [En línea]. (Recuperado en 8 diciembre 2019) Disponible en <https://www.e3dplusvet.eu/wp-content/docs/O1A1-ES.pdf>. p. 6-8, 11, 13-14, 16-17.

FREYTAS-TAMURA, Kimiko. Los plásticos se acumulan en todo el mundo desde que China se ha negado a recibir más desechos. [En línea]. The New York Times ES. 2018. (Recuperado en 26 de enero de 2019). Disponible en: <https://www.nytimes.com/es/2018/01/16/contaminacion-plasticos-china-basura/>.

GARCÍA, Carlos Alberto. Diseño de una maquina extrusora para filamento de impresión 3D. Santiago de Chile: 2015. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico. Universidad de Chile. p. 22-25.

GROOVER, Mikell. Fundamentos de manufactura moderna. México: McGraw-Hill Interamericana, 2007. p. 144-173, 416-419. ISBN-13: 978-0-471-74485-6.

GUTIÉRREZ, Paola y BORNACELLI, Jimmy. Metodología para el diseño de tornillos de máquinas extrusoras monohusillo. Cali: Universidad Autónoma de Occidente, 2008. p. 47-72.

HEINRICHS, Shawn. O nos divorciamos del plástico, o nos olvidamos del planeta. [En línea]. ONU Medio Ambiente. 2018. (Recuperado en 26 de enero 2019). Disponible en: <https://news.un.org/es/story/2018/06/1435111>

HIBBELER, Russel C. MECÁNICA DE MATERIALES. México: PEARSON, 2011. p. 405. ISBN 978-607-32-0559-7.

INCROPERA, Frank, et. al. FUNDAMENTALS OF HEAT and MASS TRANSFER. Estados Unidos de America: John Wiley & Sons, 2011. p. 613. ISBN 13 978-0470-50197-9.

KALPAKJIAN, Serope y SCHMID, Steven. Manufactura, Ingeniería y Tecnología. 5ª ed. Mexico: PEARSON, 2008. p.191-215. ISBN: 978-970-26-1026-7.

MARKS, Lionel Simeon. Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers. New York: McGraw-Hill, 1996. p. 939-940. ISBN 0-07-004997-1.

MASMOUDI, Fatma, et al. Characterization and quality assessment of recycled post-consumption poly(ethylene terephthalate) (PET). Germany: Springer-Verlag, 2018. Environmental Science and Pollution Research (2018) 25:23307–23314.

MATWEB MATERIAL PROPERTY DATA. AISI 4140 Steel, oil quenched, 540°C temper, 25 mm round. [En línea]. (Recuperado en 2 abril 2020). Disponible en: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=95d75368d1634a2eaf2ab8723510b218>

MATWEB MATERIAL PROPERTY DATA. AISI Type 304 Stainless Steel. [En línea]. (Recuperado en 3 abril 2020). Disponible en: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=bd20a4281ae3430d97cfbebf6904ec50&ckck=1>

NORTON, Robert L. DISEÑO DE MAQUINARIA Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos. México: McGraw-Hill Interamericana, 2009. p. 7-14 y 420-421. ISBN: 978-970-10-6884-7.

ONU Medio Ambiente. Picking up litter: Pointless exercise or powerful tool in the battle to beat plastic pollution? [En línea]. Greenpeace. 2018. (Recuperado en 26 de enero de 2019). Disponible en: <https://www.unenvironment.org/news-and-stories/story/picking-litter-pointless-exercise-or-powerful-tool-battle-beat-plastic>.

POSADA BUSTAMANTE, Beatriz. LA DEGRADACION DE LOS PLASTICOS. Medellín: Revista Universidad Eafit, 2012. Vol. 30 No. 94. p. 68-75.

QIN, Yijing, et al. Comparing recycled and virgin poly (ethylene terephthalate) melt-spun fibres. Germany: Elsevier, 2018.

SAPAG, Nassir. PROYECTOS DE INVERSIÓN Formulación y Evaluación. Chile: PEARSON, 2011. p. 123-134, 287-302, 307. ISBN: 978-956-343-107-0.

SAVGORODNY, V. K. Transformación de plásticos. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, S. A. 1973. p. 1-26.

SHIGLEY, Joseph Edward; BUDYNAS, Richard G. y NISBETT, J. Keith. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. México: McGraw-Hill Interamericana, 2008. p. 3-20. ISBN-10: 970-10-6404-6

SOLHEIM, Erik. América Latina y el Caribe, a la vanguardia en la lucha contra los plásticos. [En línea]. ONU Medio Ambiente. 2018. (Recuperado en 26 de enero de 2019). Disponible en: <https://www.unenvironment.org/es/news-and-stories/editorial/america-latina-y-el-caribe-la-vanguardia-en-la-lucha-contra-los>.

SUÁREZ, José. Proyecto de máquina extrusora, para creación de hilos de Poli Etilén Tereftalato. Mexico: 2015. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero en Robotica Industrial. Instituto Politécnico Nacional,. p. 76-150.

VARGAS LAMADRID, Ramsés. La bolsa o la vida. [En línea]. (Recuperado en 26 de enero de 2019). Semana. 2017. Disponible en: <https://www.semana.com/opinion/articulo/consecuencias-ambientales-del-uso-de-plastico-en-colombia/531338>.

WOERN, Aubrey y et. al. RepRapable Recyclebot: Open source 3-D printable extruder for converting plastic to 3-D printing filament. [En línea]. ELSEVIER. 2018. (Recuperado en 20 de enero de 2019). Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468067218300208>.

ANEXOS

ANEXO A. PROPIEDADES DEL PET RECICLADO.

Las propiedades del PET reciclado que se utilizan en los cálculos se obtuvieron del artículo científico “Comparing recycled and virgin poly (ethylene terephthalate) melt-spun fibres” de los autores Yijing Qin, Muchao Qu, Joachim Kaschta y Dirk W. Schuberta. En él, cinco muestras de PET son evaluadas (dos recicladas y tres vírgenes) como se puede ver en la Figura A1.

Figura A1. Muestras de PET estudiadas.



Fuente: QIN, Yijing, et al. Comparing recycled and virgin poly (ethylene terephthalate) melt-spun fibres. Germany: Elsevier, 2018. p. 365.

Propiedades como la rugosidad de la superficie, reología y propiedades mecánicas fueron medidas usando un escáner microscópico de electrones, un reómetro ARES y una máquina de pruebas a tensión para fibras plásticas, respectivamente.

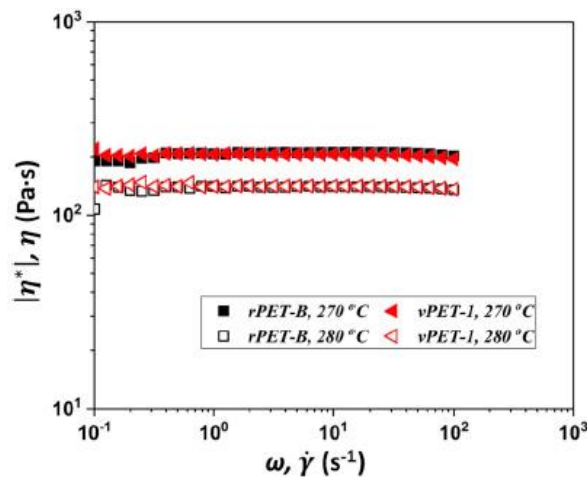
Entre los resultados obtenidos se destacan: las propiedades caloríficas de las muestras, que se pueden ver en la Tabla A1; una gráfica de Viscosidad vs Frecuencia Angular, que se puede ver en la Figura A2; y una gráfica de Tenacidad vs Presión de Salida vs Muestra Estudiada, como podemos ver en la Figura A3.

Tabla A1. Propiedades caloríficas.

PET fibres	T_g (°C)	$T_c, onset$ (°C)	T_c (°C)	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	ΔH_c (J/g)	X_c (%)	SR (%)
rPET-B (270 °C, 1.0 bar)	74.6	120.1	131.6	247.0	35.5	23.3	9.0	10.0 ± 4.3
rPET-B (270 °C, 3.0 bar)	74.2	95.1	120.8	246.4	36.7	21.2	11.4	51.6 ± 9.3
vPET-I (280 °C, 1.0 bar)	81.1	120.7	128.7	254.4	41.4	15.4	19.1	11.5 ± 2.3
vPET-I (280 °C, 3.0 bar)	80.1	94.4	116.9	254.9	43.6	20.2	17.2	39.3 ± 5.5

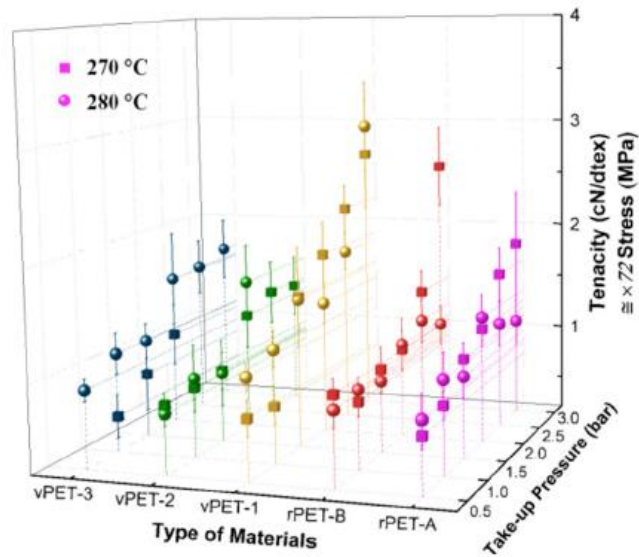
Fuente: QIN, Yijing, et al. Comparing recycled and virgin poly (ethylene terephthalate) melt-spun fibres. Germany: Elsevier, 2018. p. 366.

Figura A2. Variación de la viscosidad en función de la frecuencia angular.



Fuente: QIN, Yijing, et al. Comparing recycled and virgin poly (ethylene terephthalate) melt-spun fibres. Germany: Elsevier, 2018. p. 370.

Figura A3. Tenacidad de las muestras de PET.



Fuente: QIN, Yijing, et al. Comparing recycled and virgin poly (ethylene terephthalate) melt-spun fibres. Germany: Elsevier, 2018. p. 368.



Entre las propiedades consignadas en este artículo, en lo concerniente al proyecto se utilizan las propiedades listadas en el Cuadro A1.

Cuadro A1. Propiedades del PET reciclado.

Propiedad	Valor
Densidad aparente del PET particulado ($\rho_{ap.PET}$)	250 [Kg / m^3]
Densidad del PET fundido (ρ_{PET})	1380 [Kg / m^3]
Temperatura de fusión (T_m)	≈ 250 [$^{\circ}C$]
Viscosidad del PET fundido @ 270°C ($\mu_{@270^{\circ}C}$)	200 [$Pa \cdot s$]
Calor latente de fusión (λ)	36 [J / g]
Conductividad térmica (K)	0,24 [$W / (m \cdot ^{\circ}K)$]
Calor específico (C_p)	1000 [$J / (kg \cdot ^{\circ}K)$]

ANEXO B. PROPIEDADES ACERO AISI 4140.

Tabla B1. Propiedades del AISI 4140.

Physical Properties	Metric	English
Density	7.85 g/cc	0.284 lb/in ³
Mechanical Properties	Metric	English
Hardness, Brinell	320	320
Hardness, Knoop	347	347
Hardness, Rockwell B	99	99
Hardness, Rockwell C	35	35
Hardness, Vickers	338	338
Tensile Strength, Ultimate	1140 MPa	165000 psi
Tensile Strength, Yield	965 MPa	140000 psi
Elongation at Break	18 %	18 %
Reduction of Area	56 %	56 %
Modulus of Elasticity	205 GPa	29700 ksi
Bulk Modulus	160 GPa	23200 ksi
Poissons Ratio	0.29	0.29
Machinability	65 %	65 %
Shear Modulus	80.0 GPa	11600 ksi
Izod Impact	61.0 J	45.0 ft-lb
Thermal Properties	Metric	English
CTE, linear 	12.2 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{C}$	6.78 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot\text{F}$
	@Temperature 0.000 - 100 °C	@Temperature 32.0 - 212 °F
	13.7 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{C}$	7.61 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot\text{F}$
	@Temperature 20.0 - 400 °C	@Temperature 68.0 - 752 °F
	14.6 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{C}$	8.11 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot\text{F}$
	@Temperature 20.0 - 600 °C	@Temperature 68.0 - 1110 °F
Specific Heat Capacity 	0.473 J/g·°C	0.113 BTU/lb·°F
	@Temperature 150 - 200 °C	@Temperature 302 - 392 °F
	0.519 J/g·°C	0.124 BTU/lb·°F
	@Temperature 350 - 400 °C	@Temperature 662 - 752 °F
	0.561 J/g·°C	0.134 BTU/lb·°F
	@Temperature 550 - 600 °C	@Temperature 1020 - 1110 °F
Thermal Conductivity	42.6 W/m-K	296 BTU-in/hr-ft ² ·°F

Fuente: MatWeb MATERIAL PROPERTY DATA. AISI 4140 Steel, oil quenched, 540°C temper, 25 mm round. [En línea]. (Recuperado en 2 abril 2020). Disponible en <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=95d75368d1634a2eaf2ab8723510b218>

ANEXO C. PROPIEDADES ACERO AISI SAE 304.

Tabla C1. Propiedades del AISI SAE 304.

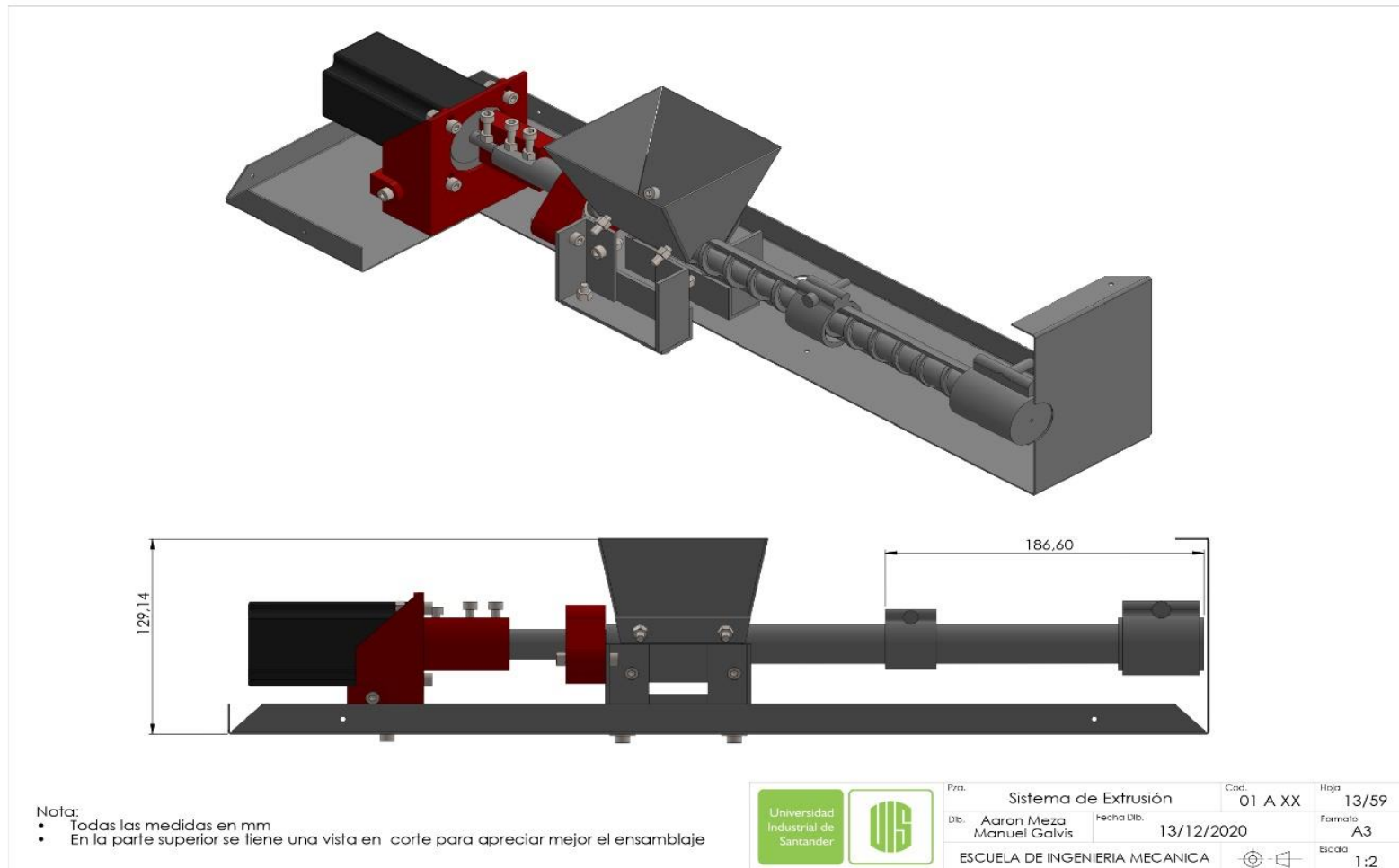
Physical Properties	Metric	English
Density	8.00 g/cc	0.289 lb/in ³
Mechanical Properties	Metric	English
Hardness, Brinell	123	123
Hardness, Knoop	138	138
Hardness, Rockwell B	70	70
Hardness, Vickers	129	129
Tensile Strength, Ultimate	505 MPa	73200 psi
Tensile Strength, Yield	215 MPa	31200 psi
Elongation at Break	70 %	70 %
Modulus of Elasticity	193 - 200 GPa	28000 - 29000 ksi
Poissons Ratio	0.29	0.29
Shear Modulus	86.0 GPa	12500 ksi
Charpy Impact	325 J	240 ft-lb
Thermal Properties	Metric	English
CTE, linear 	17.3 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$ @Temperature 0.000 - 100 °C	9.61 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot\text{°F}$ @Temperature 32.0 - 212 °F
	17.8 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$ @Temperature 0.000 - 315 °C	9.89 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot\text{°F}$ @Temperature 32.0 - 599 °F
	18.7 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$ @Temperature 0.000 - 650 °C	10.4 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot\text{°F}$ @Temperature 32.0 - 1200 °F
Specific Heat Capacity	0.500 J/g·°C	0.120 BTU/lb·°F
Thermal Conductivity	16.2 W/m-K	112 BTU-in/hr-ft ² ·°F
Melting Point	1400 - 1455 °C	2550 - 2651 °F
Solidus	1400 °C	2550 °F
Liquidus	1455 °C	2651 °F

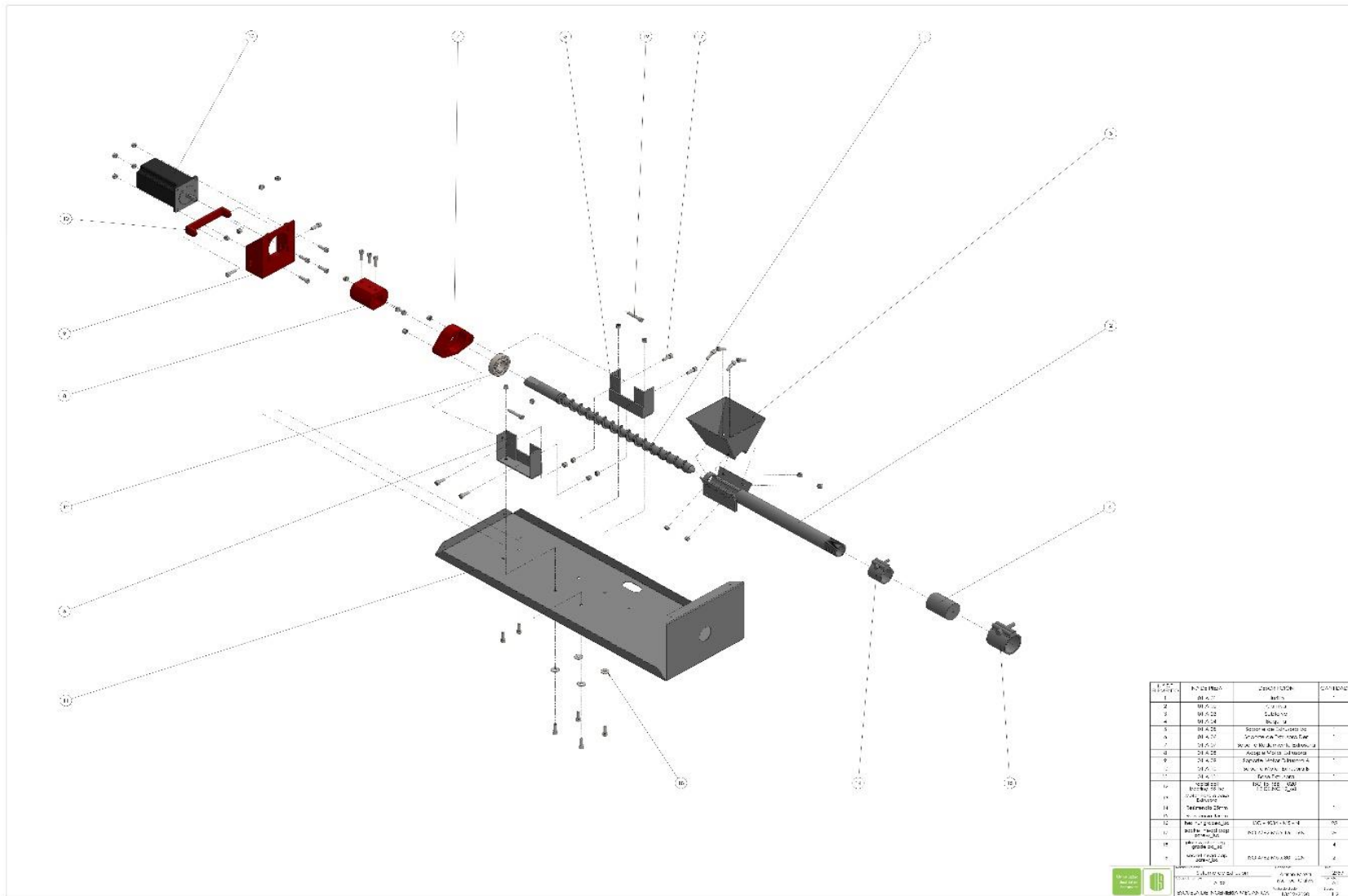
Fuente: MatWeb MATERIAL PROPERTY DATA. AISI Type 304 Stainless Steel. [En línea].

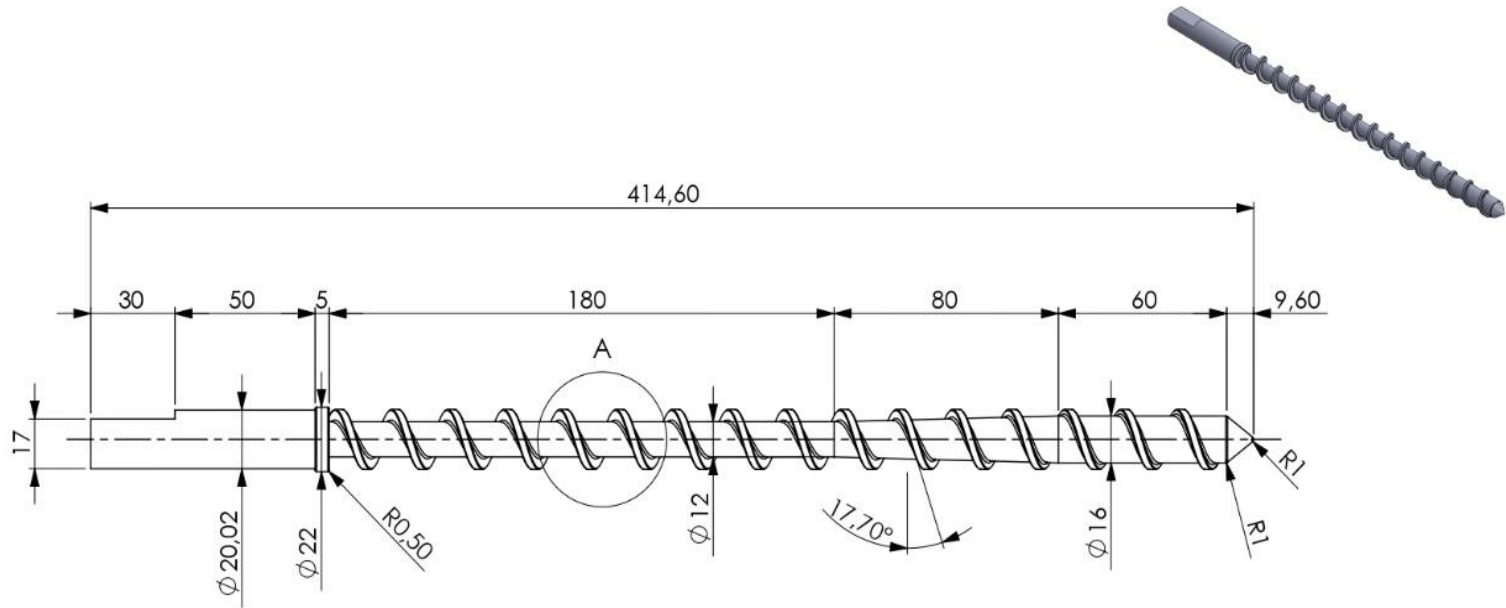
(Recuperado en 3 abril 2020). Disponible en:

<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=bd20a4281ae3430d97cfbebf6904ec50&ckck=1>.

ANEXO D. SISTEMA DE EXTRUSIÓN.

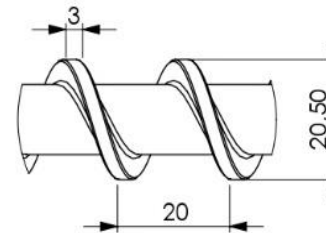






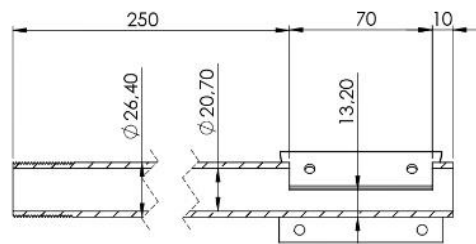
NOTA:

- Todas las medidas están en milímetros.
- El diámetro exterior y el paso de la hélice son constantes y del valor indicado en el detalle A.

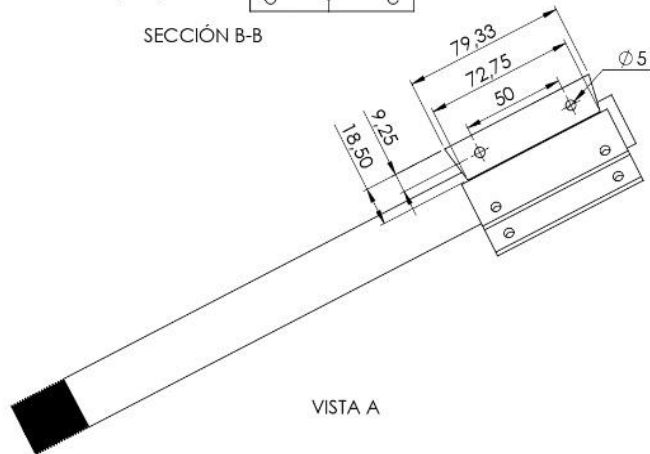


DETALLE A
ESCALA 1 : 1

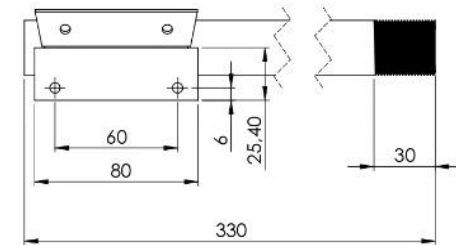
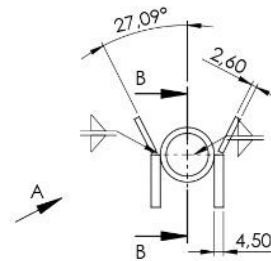
 	Pza. Husillo		Cod Pza. 01 A 01	Hoja. 01/59
	Dib. Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib. 09/12/2020	Material. AISI 4140	Formato. A4
	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			Escala. 1:2



SECCIÓN B-B





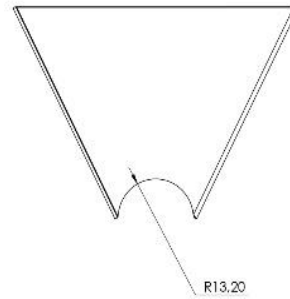
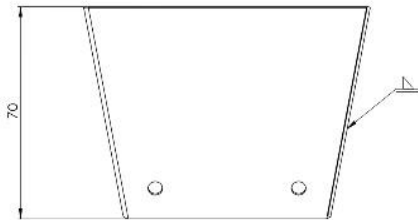
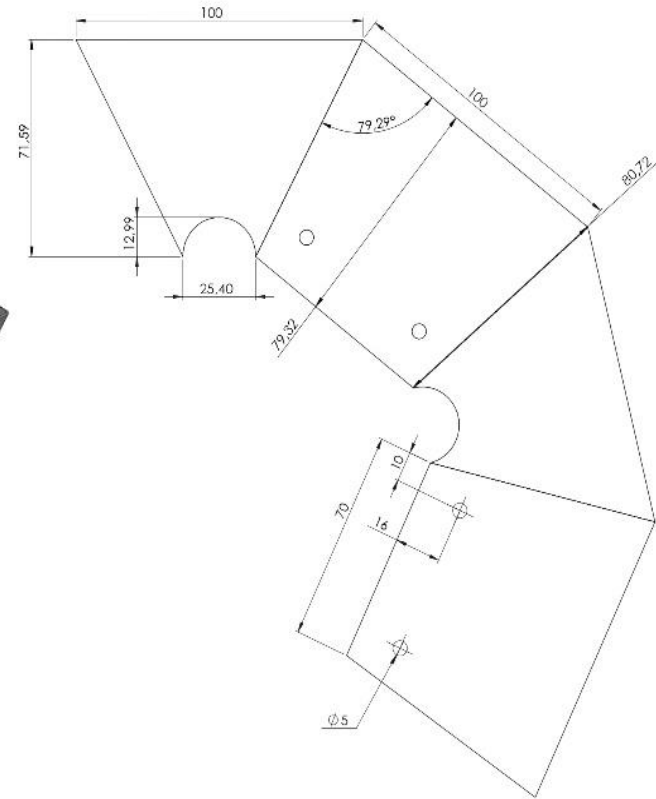
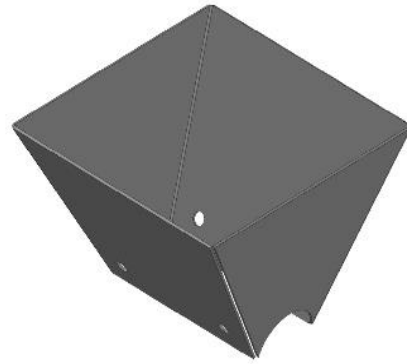
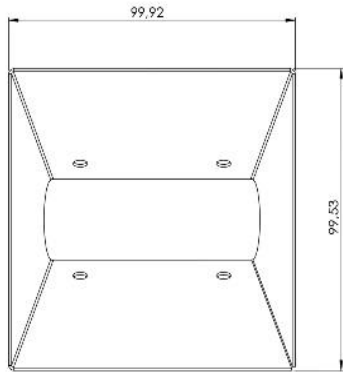
VISTA A



NOTA:

- Todas las medidas están en milímetros.
- Para realizar esta pieza tomar como base un Nipple de 26.4mm de diámetro exterior y 20.7mm de diámetro interno, una solera de acero de 1" de ancho por 3/16" de espesor y una solera de acero de 3/4" de ancho por 0.109" de espesor.
- Utilizar rosca NPT para el roscado de la punta de la camisa

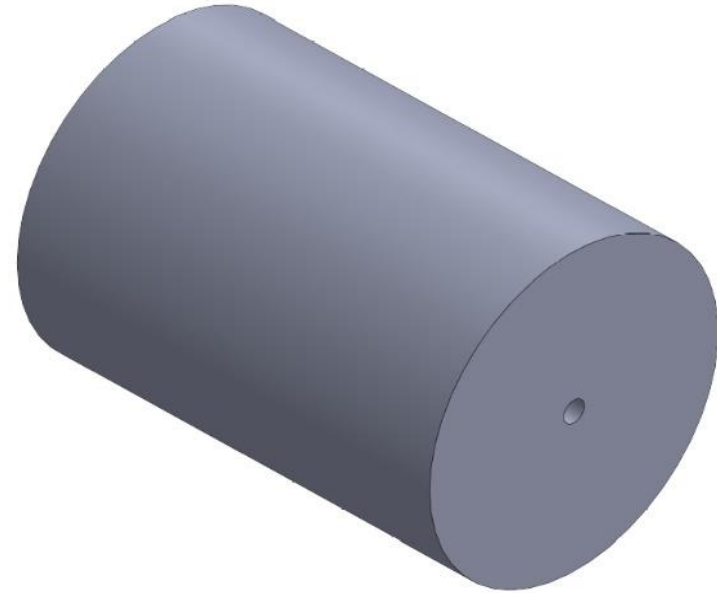
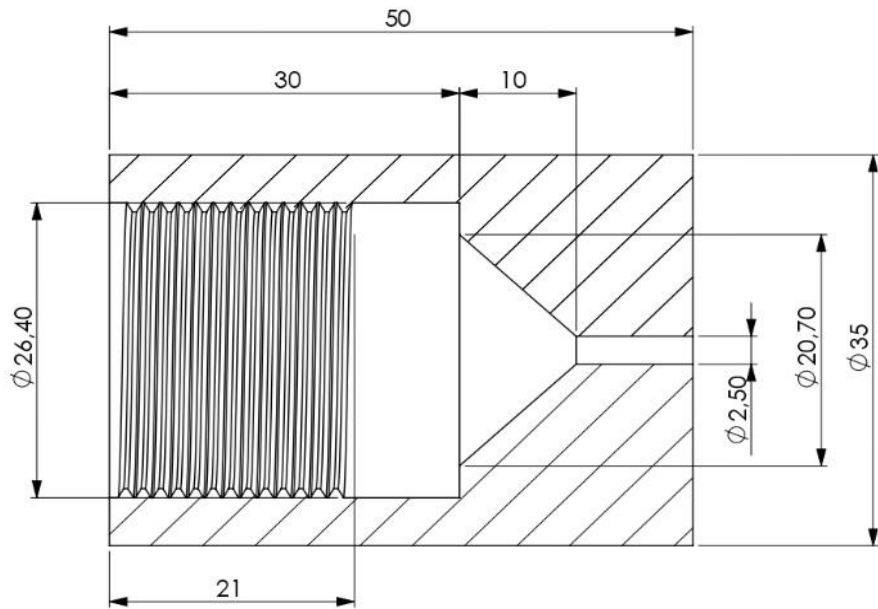
	Pza. Camisa		Cod. 01 A 02	Hoja 02/59
	Dib. Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib. 09/12/2020	Material AI SI 304	Formato A3
	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			Escala 1:2



Nota:

- Todas las medidas en mm.
- La pieza se hace de una lámina calibre 18
- La parte izquierda muestra el desarrollo de la pieza y en la derecha la pieza doblada.

		Tpo. Subfolva Da. Aaron Mesa Manuel Galvis	Fecha Dib. 09/12/2020	Cod. 01 A 03 Material AISI 304	Hoja 03/59 Formato A2 Escala 1:1
		ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			

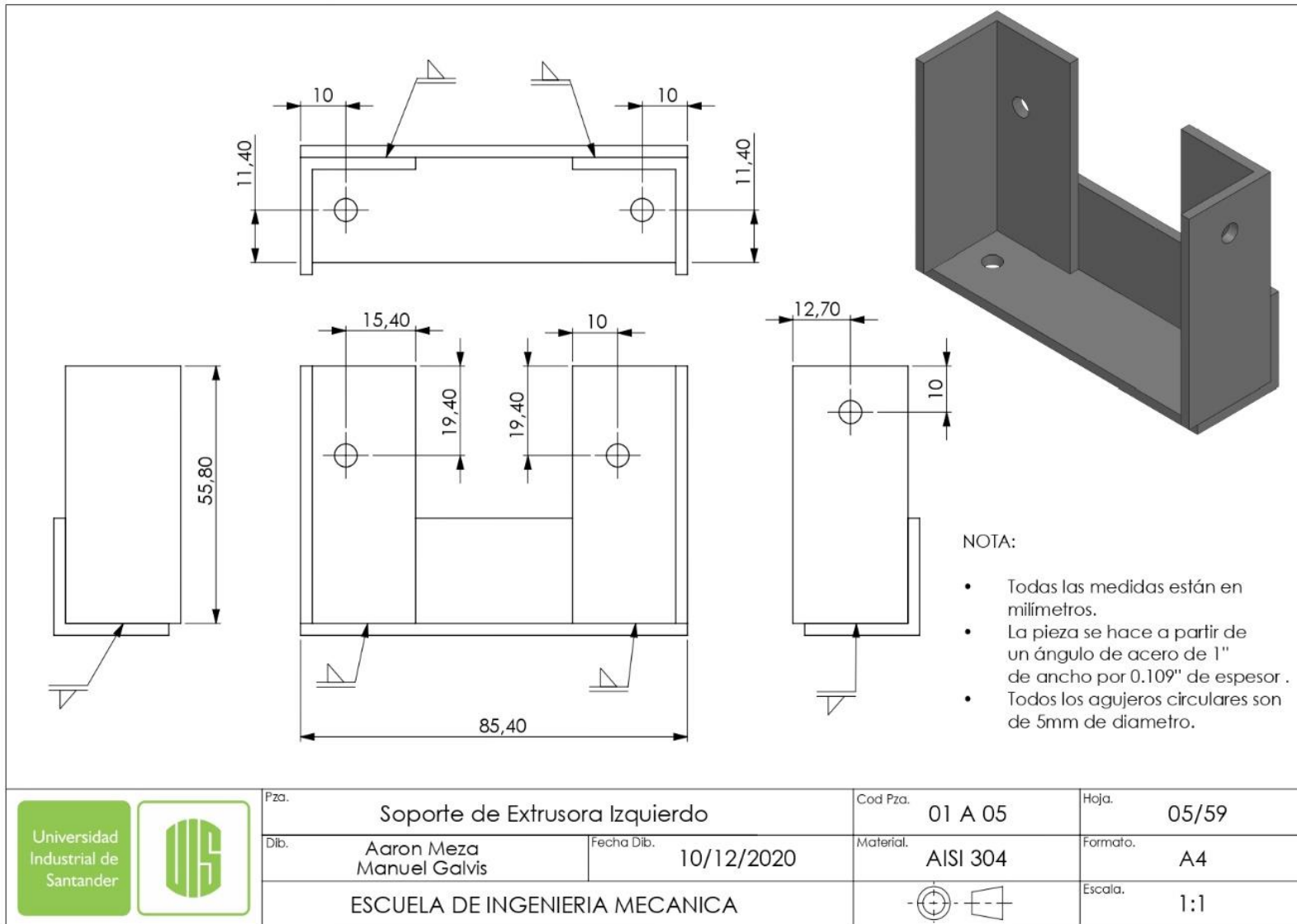


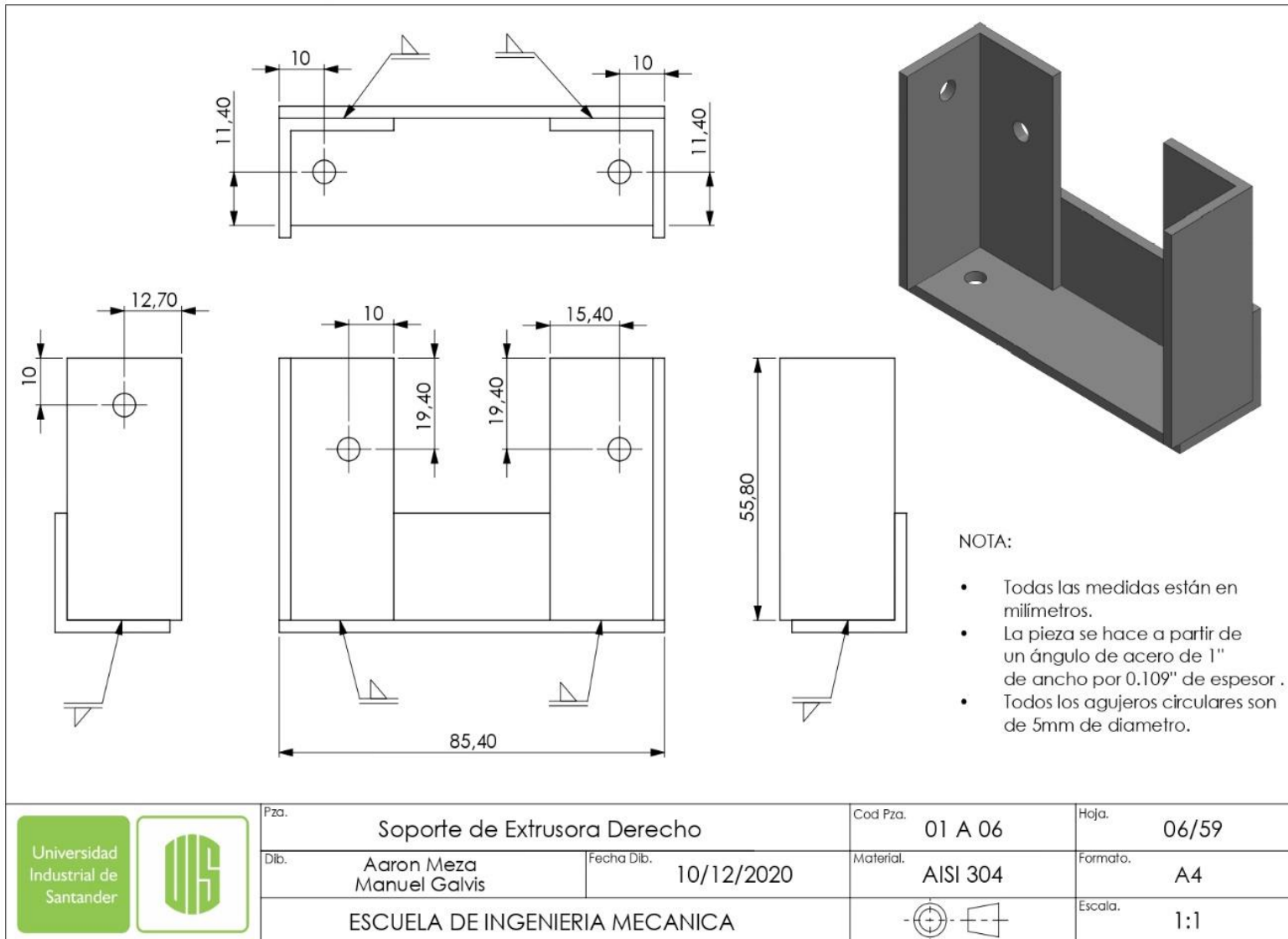
NOTA:

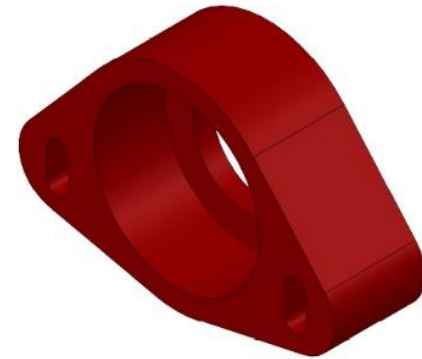
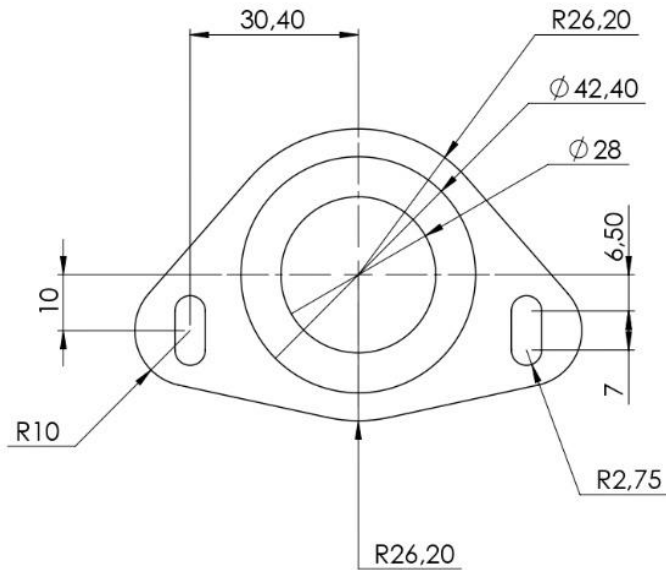
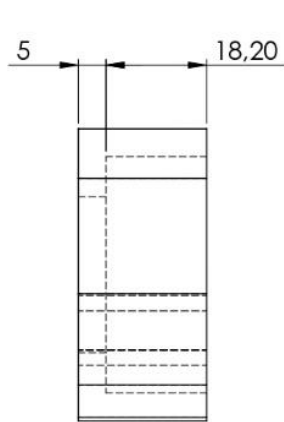
- Todas las medidas están en milímetros.
- Utilizar rosca NPT acorde con la pieza Camisa



Pza.	Boquilla		Cod Pza.	01 A 04	Hoja.	04/59	
Dib.	Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib.	09/12/2020	Material.	PLA	Formato.	A4
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA						Escala.	2:1







Nota:

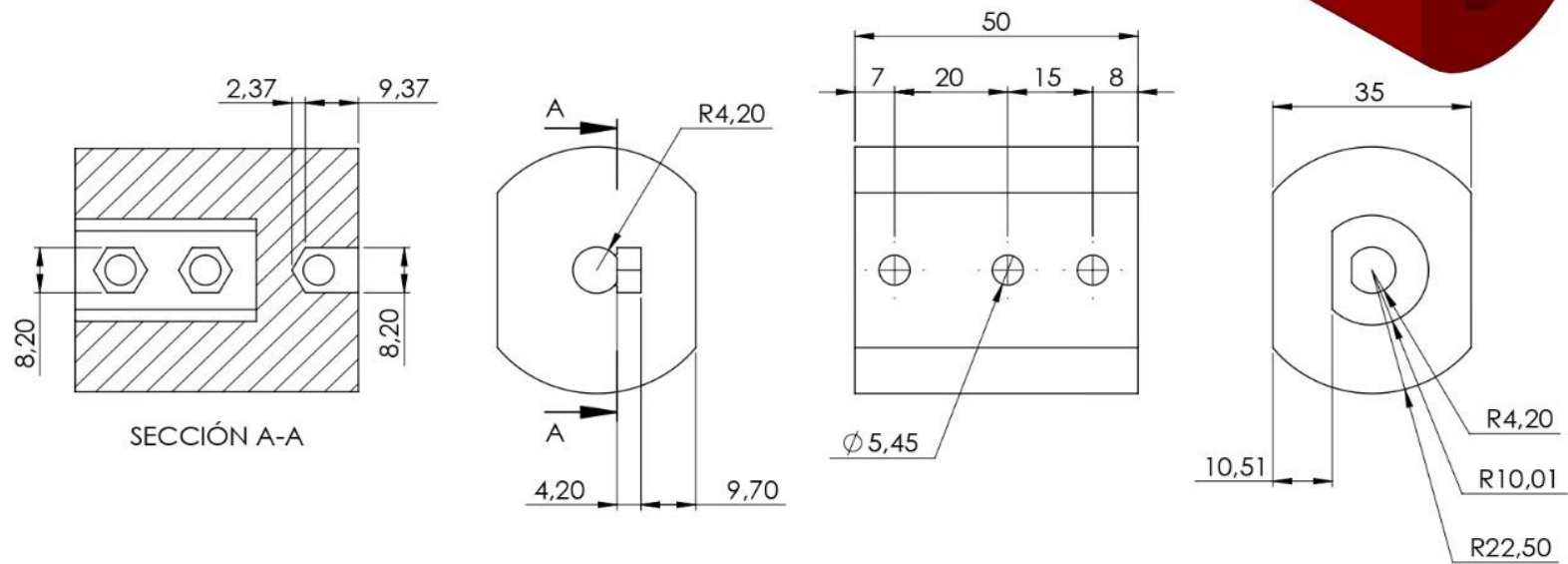
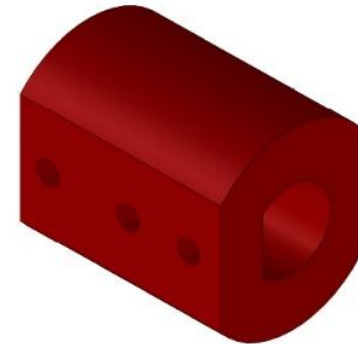
- Todas las medidas en mm
- Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM



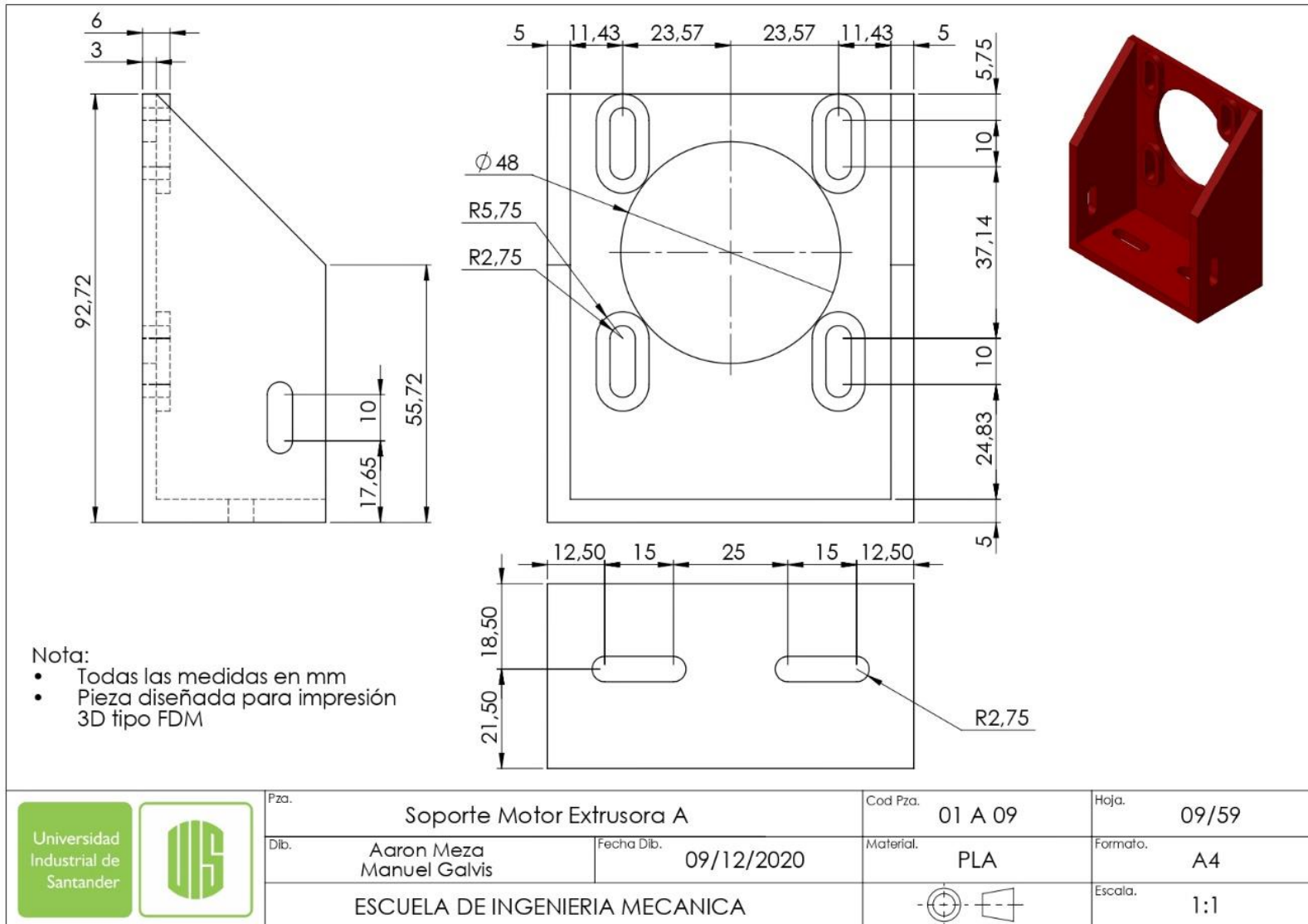
Pza.	Soporte Rodamiento Extrusora		Cod Pza.	01 A 07	Hoja.	07/59	
Dib.	Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib.	09/12/2020	Material.	PLA	Formato.	A4
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA						Escala.	1:1

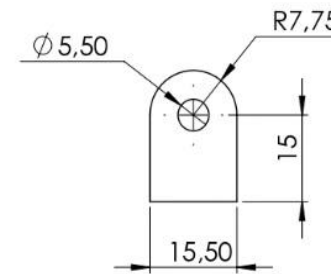
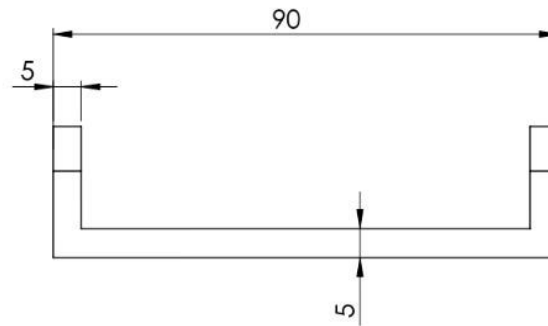
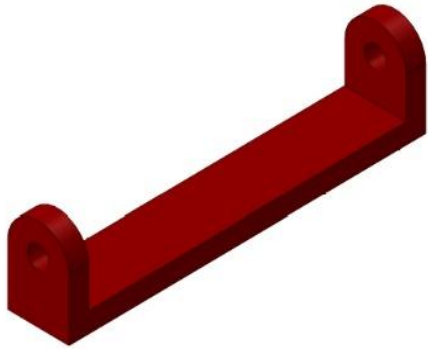
Nota:

- Todas las medidas en mm
- Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM





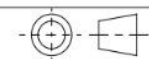
	Pza. Acople Motor Extrusora		Cod Pza. 01 A 08	Hoja. 08/59
	Dib. Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib. 09/12/2020	Material. PLA	Formato. A4
	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			Escala. 1:1

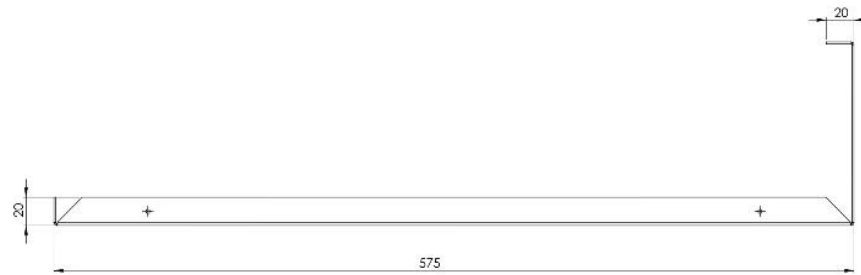
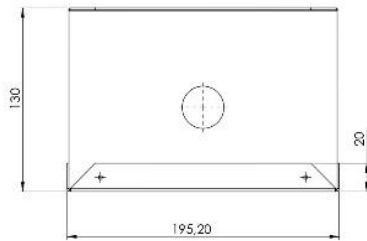
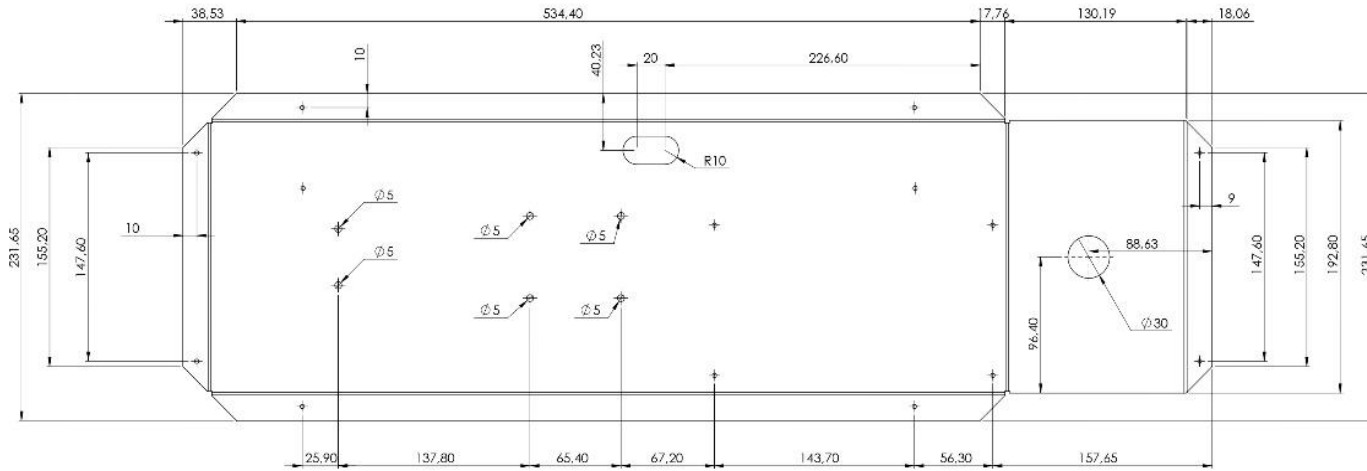




Nota:



- Todas las medidas en mm
- Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM

 	Pza. Soporte Motor Extrusora B		Cod Pza. 01 A 10	Hoja. 10/59
	Dib. Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib. 09/12/2020	Material. PLA	Formato. A4
	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			Escala. 1:1

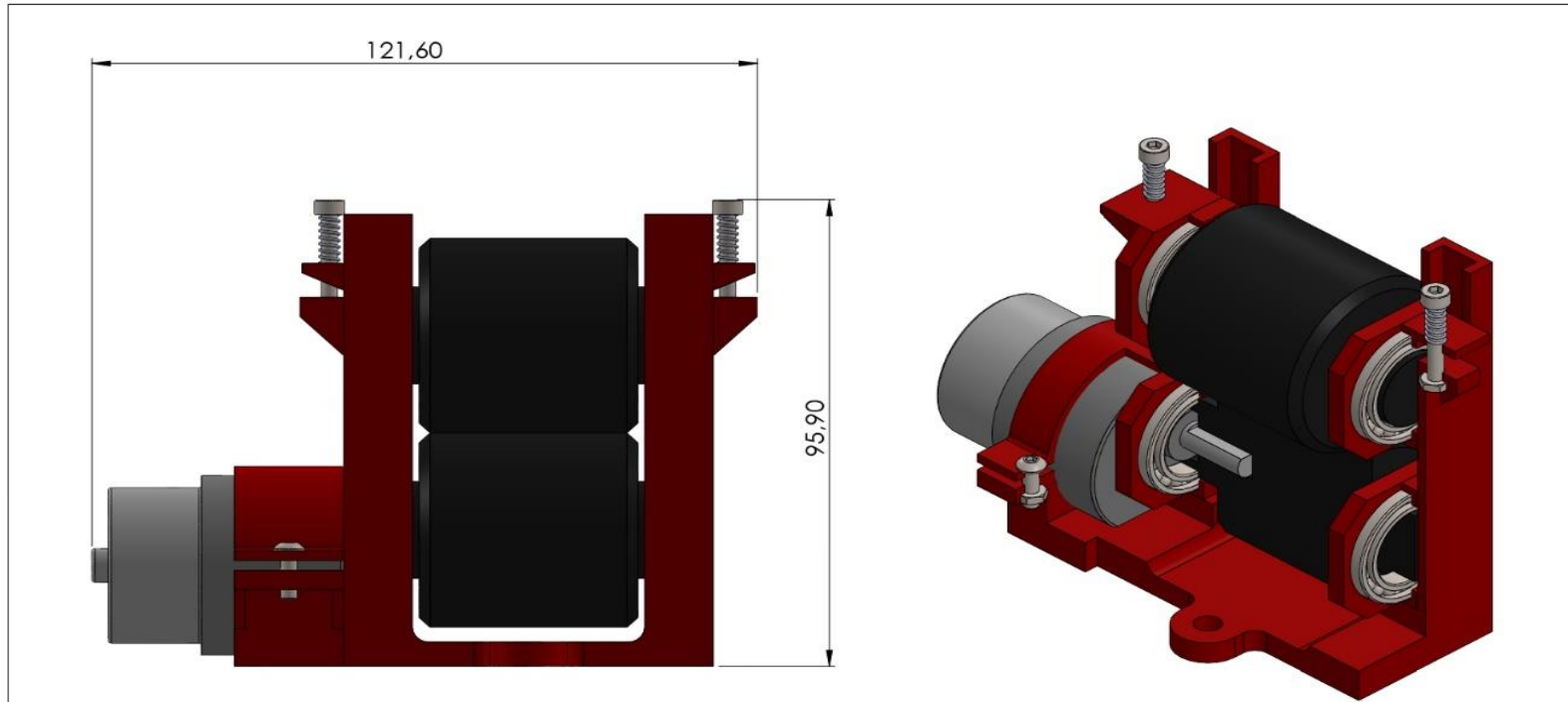


Nota:

- Todas las medidas en mm.
- Todos los agujeros circulares sin medida tienen un diámetro de 3mm.
- La pieza se hace de una lámina calibre 18.
- En la parte superior se muestra el desarrollo de la pieza y en la inferior la pieza doblada.

		Título Base Extrusora		Cod. 01 A 11	Hoja 11/59
		Dib. Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib. 09/12/2020	Material AISI 304	Formato A2
ESCUOLA DE INGENIERIA MECANICA					

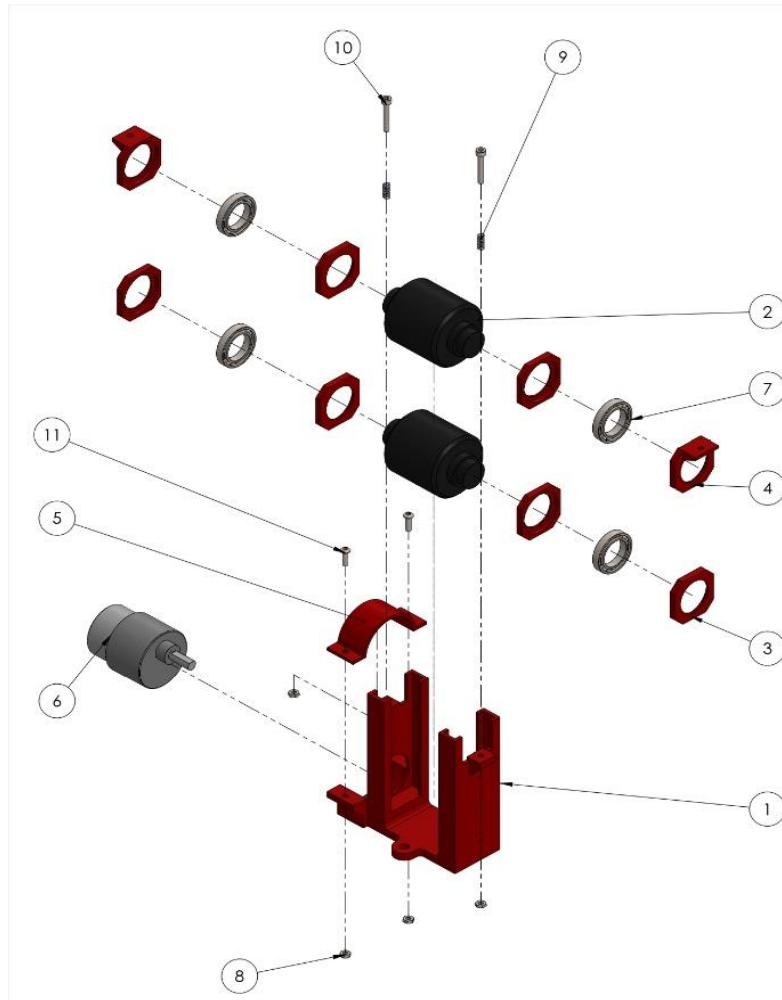
ANEXO E. SISTEMA DE TIRO DE HILO.



Nota:

- Todas las medidas en mm
- A la derecha se tiene una vista en corte para apreciar mejor el ensamblaje

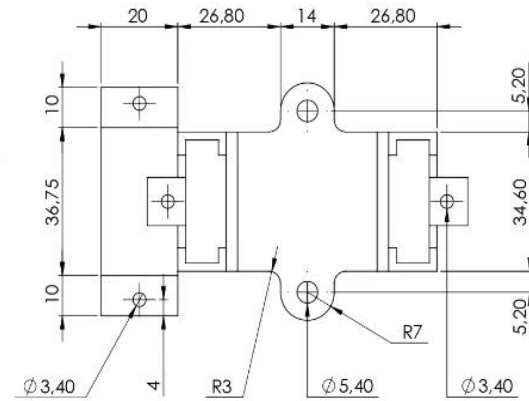
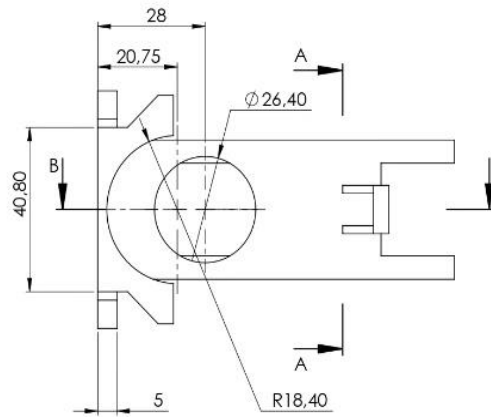
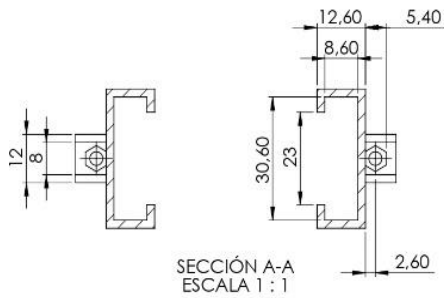
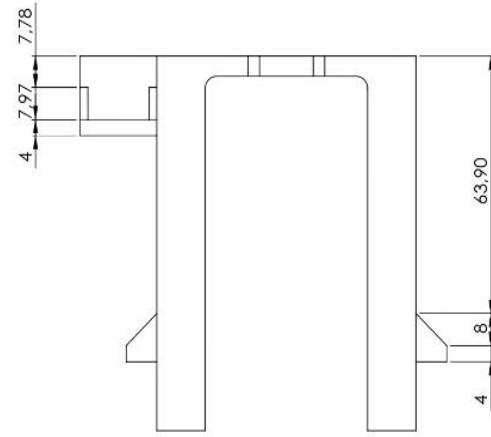
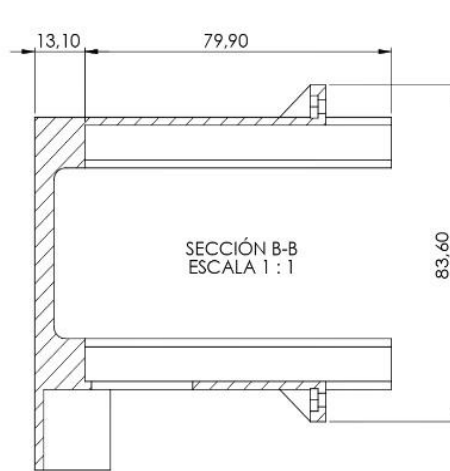
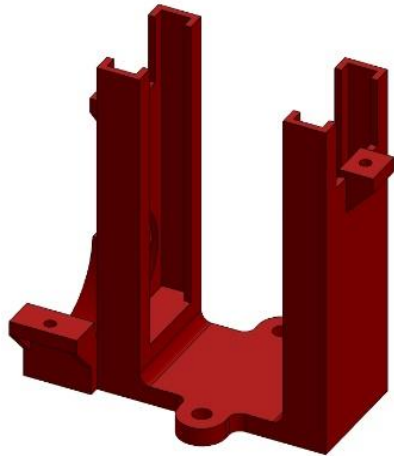
		Pza. Ensamblaje Tiro del hilo		Cod Pza. 01 B XX	Hoja. 23/59
		Dib. Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib. 13/12/2020		Formato. A4
		ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			Escala. 1:1



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	01 B 04	Soporte Rodillos	1
2	01 B 01	Rodillo	2
3	01 B 02	Soporte Rodamiento A	6
4	01 B 03	Soporte Rodamiento B	2
5	01 B 05	Seguro Motor	1
6	Motoreductor 49rpm 12V		1
7	radial ball bearing_68_iso	ISO 15 RBB - 1817 - 20,DE,NC,20_68	4
8	hex thin nut chamfered gradeab_iso	ISO - 4035 - M3 - N	4
9	Resorte 10mm		2
10	socket head cap screw_iso	ISO 4762 M3 x 20 - 20N	2
11	socket button head screw_iso	ISO 7380 - M3 x 10 - 10N	2

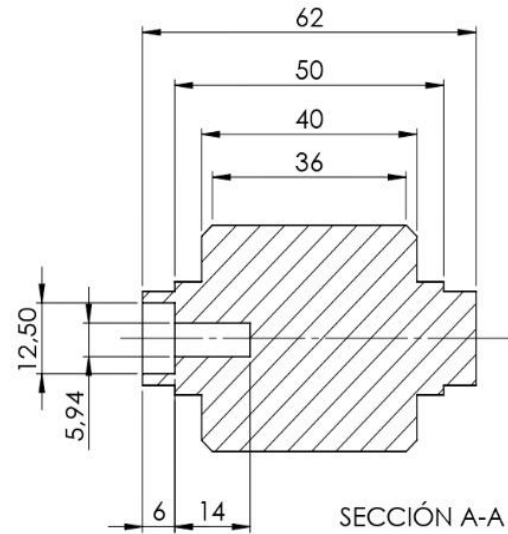
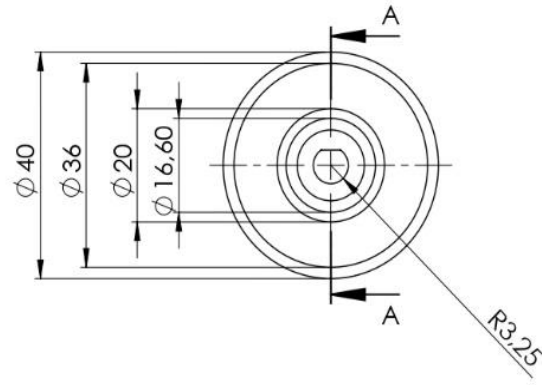


Fza. Sistema Tiro del Hilo		Cod. 01 B XX	Hoja 22/59
Db. Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha (Dd.) 13/12/2020	Formato A3	Escala 1:2
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			



- Nota:
- Todas las medidas en mm
 - Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM

	Pza. Soporte Rodillos		Cod. 01 B 04	Hoja 17/59
	Db. Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib. 02/12/2020	Material PLA	Formato A3
	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			Escala 1:1



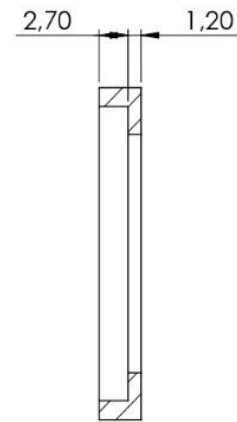
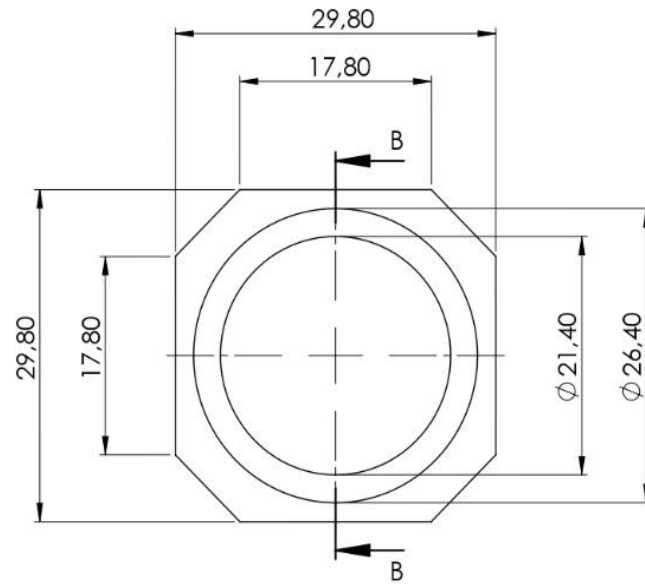
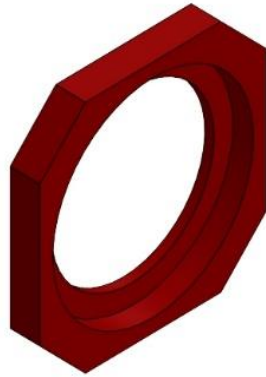
Nota:

- Todas las medidas en mm
- Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM

Universidad
Industrial de
Santander



Pza.	Rodillo		Cod Pza.	01 B 01	Hoja.	14/59	
Dib.	Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib.	02/12/2020	Material.	PLA	Formato.	A4
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA						Escala.	1:1



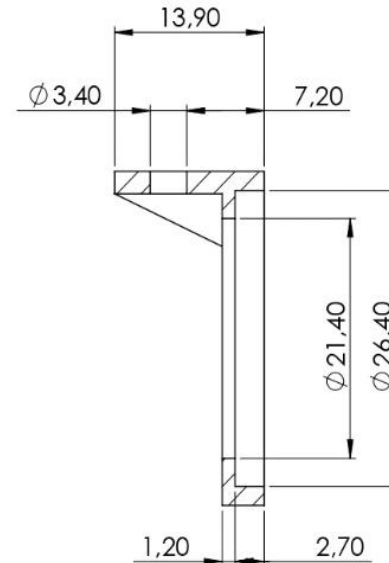
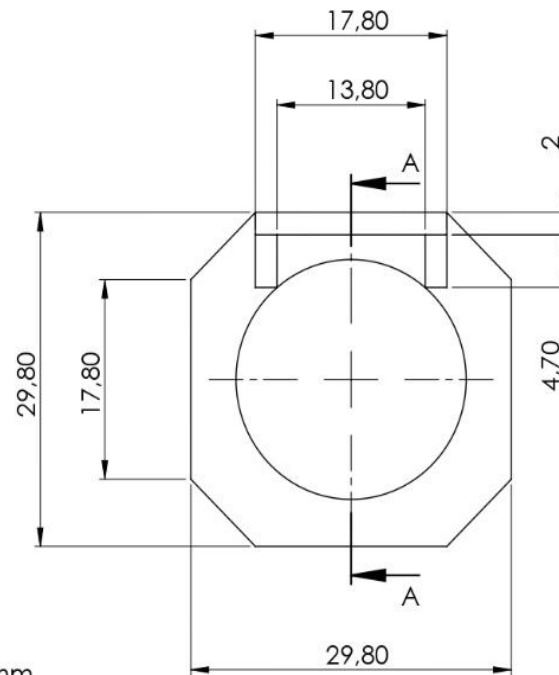
SECCIÓN B-B
ESCALA 2 : 1

Nota:

- Todas las medidas en mm
- Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM



Pza.	Soporte Rodamiento A		Cod Pza.	01 B 02	Hoja.	15/59	
Dib.	Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib.	02/12/2020	Material.	PLA	Formato.	A4
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA						Escala.	2:1



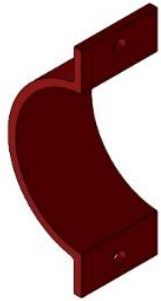
SECCIÓN A-A
ESCALA 2 : 1

Nota:

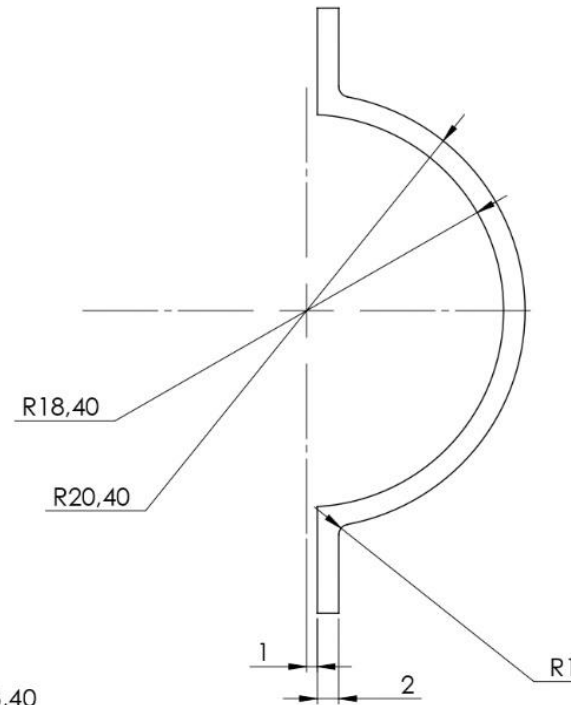
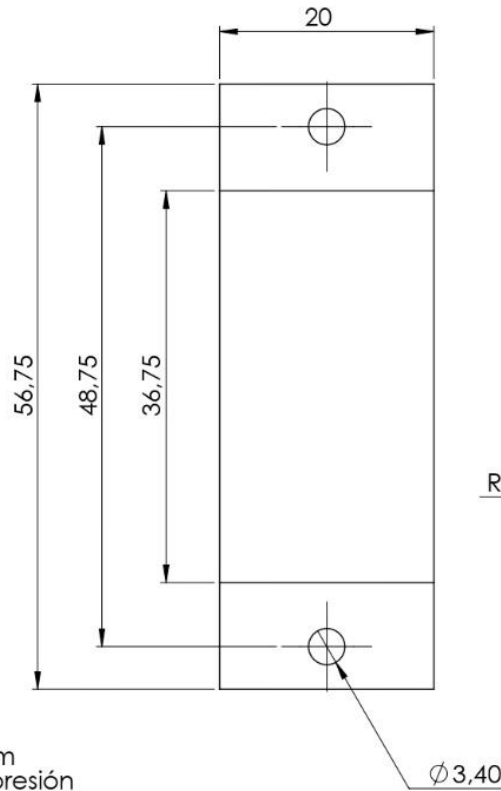
- Todas las medidas en mm
- Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM



Pza.	Soporte Rodamiento B		Cod Pza.	01 B 03	Hoja.	16/59	
Dib.	Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib.	02/12/2020	Material.	PLA	Formato.	A4
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA						Escala.	2:1



ESCALA
1:1



Nota:

- Todas las medidas en mm
- Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM

Universidad
Industrial de
Santander

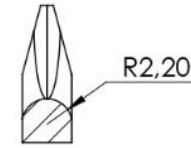
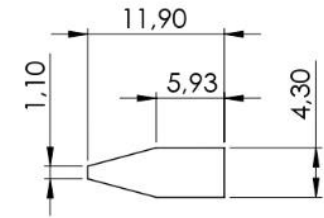
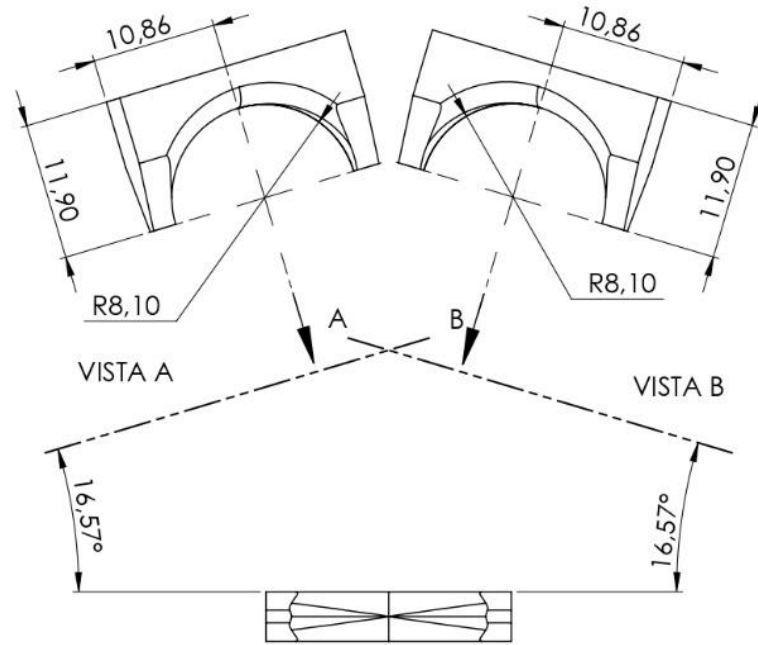


Pza.	Seguro Motor		Cod Pza.	01 B 05	Hoja.	18/59	
Dib.	Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib.	02/12/2020	Material.	PLA	Formato.	A4
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA						Escala.	2:1

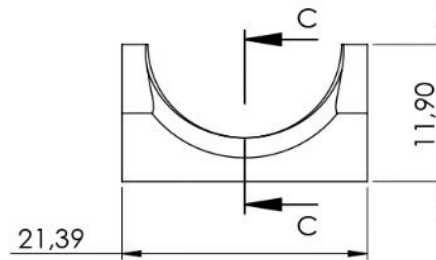
ANEXO F. SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE FILAMENTO.

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	01 C 01	Medialuna Guía	1
2	01 C 02	Medialuna Camisa	1
3	01 C 03	Medialuna Seguro	1
4	01 C 04	Sinfin	1
5	01 C 05	Seguidor	1
6	01 C 06	Rueda	2
7	01 C 07	Soporte A	1
8	01 C 08	Soporte B	1
9	radial ball bearing_68_iso	ISO 15 RBB - 1015 - 12,DE,NC,12_68	1
10	hex thin nut chamfered gradeab_iso	ISO - 4035 - M3 - N	5
11	socket head cap screw_iso	ISO 4762 M3 x 20 - 20N	5
12	Resorte 10mm		1

	Pza. Sistema de distribución de filamento Dib. Aron Meza Manuel Galvis Fecha Dib. 13/12/2020	Cod. 01 C XX Fecha 13/12/2020	Hoja 32/59 Formato A3 Escala 1:2
	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA		



SECCIÓN C-C

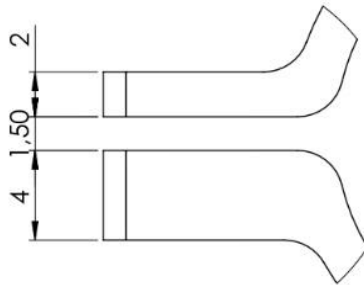
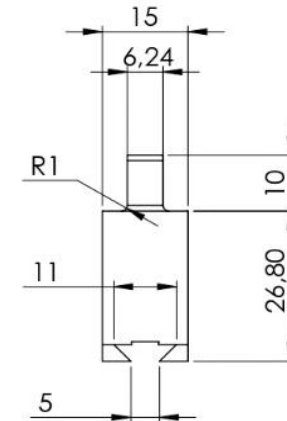
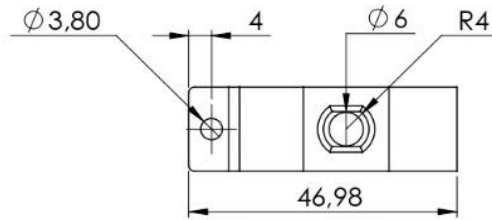


Nota:

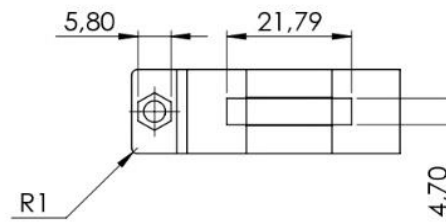
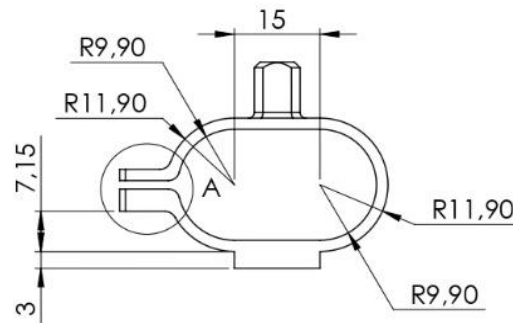
- Todas las medidas en mm
- Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM



Pza.	Medialuna Guía		Cod Pza.	01 C 01	Hoja.	24/59
Dib.	Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib.	03/12/2020		Material.	PLA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA					Formato.	A4
					Escala.	2:1



DETALLE A
ESCALA 4 : 1

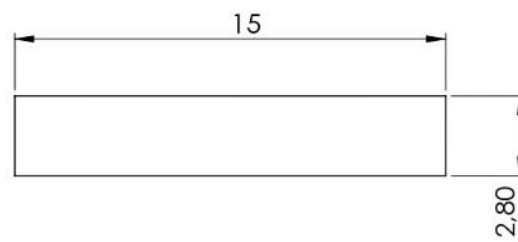
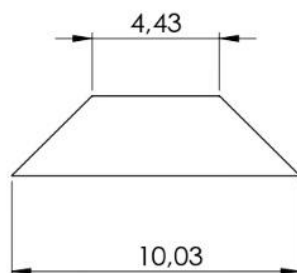
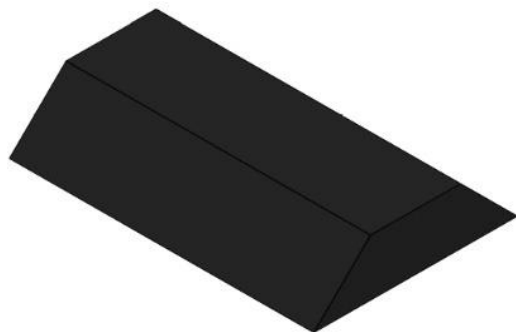


Notas:

- Todas las medidas en mm
- El agujero hexagonal para la tuerca es de 2mm de profundidad
- Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM



Pza.	Medialuna Camisa		Cod Pza.	01 C 02	Hoja.	25/59	
Dib.	Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib.	03/12/2020	Material.	PLA	Formato.	A4
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA						Escala.	1:1



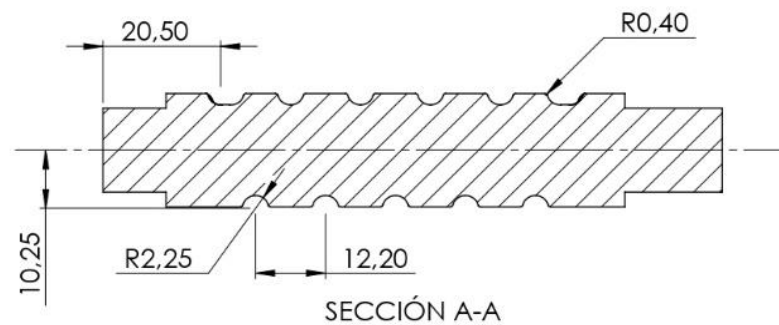
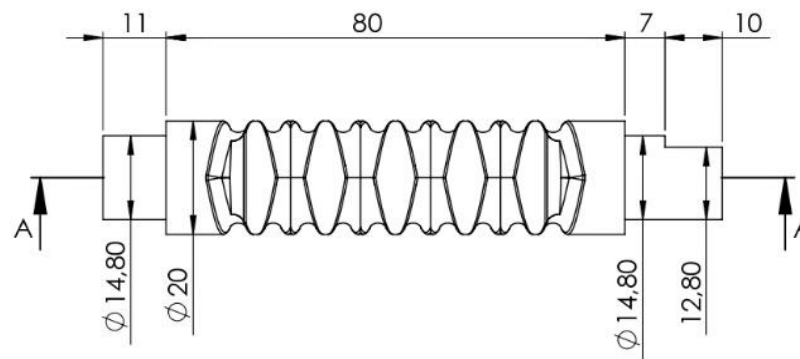
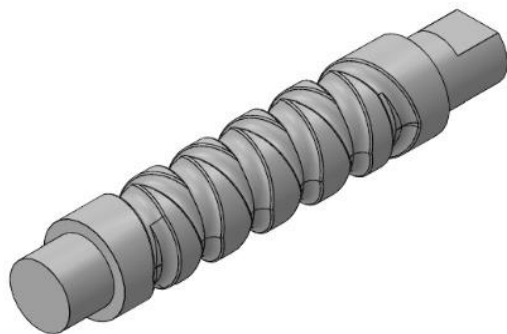
Notas:

- Todas las medidas en mm
- Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM

Universidad Industrial de Santander



Pza.	Medialuna Seguro		Cod Pza.	01 C 03	Hoja.	26/59	
Dib.	Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib.	03/12/2020	Material.	PLA	Formato.	A4
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA					Escala.	5:1	



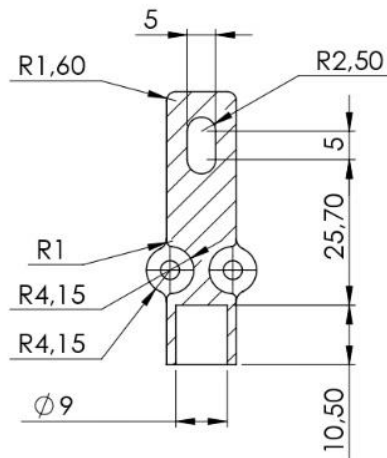
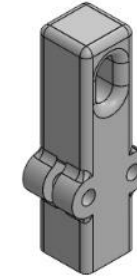
Notas:

- Todas las medidas en mm
- El sinfin está compuesto por dos hélices de igual paso y cantidad de revoluciones (5), pero con sentido contrario
- Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM

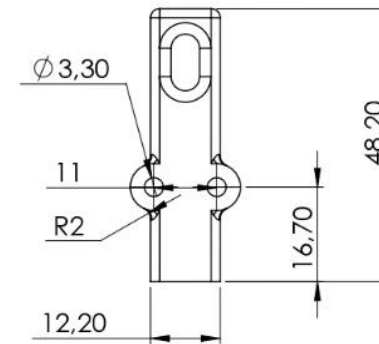
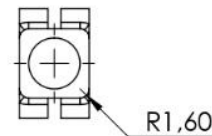
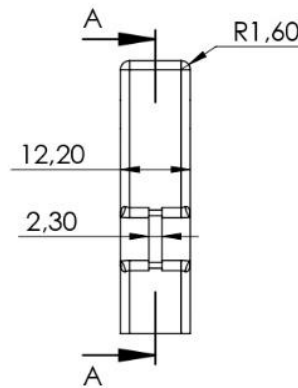
	Pza. Sinfin		Cod Pza. 01 C 04	Hoja. 27/59
	Dib. Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib. 03/12/2020	Material. PLA	Formato. A4
	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			Escala. 1:1

Notas:

- Todas las medidas en mm
- Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM



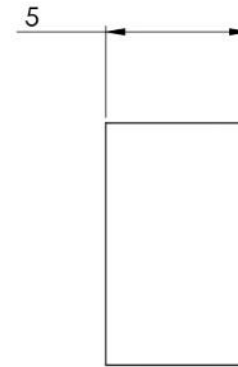
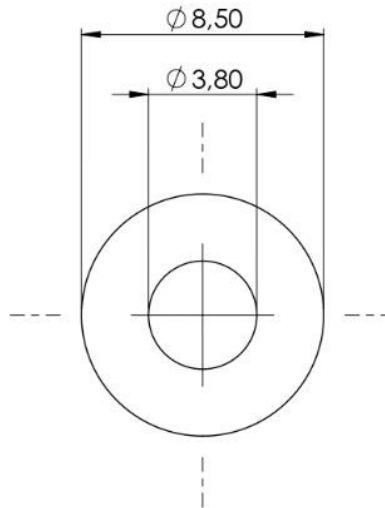
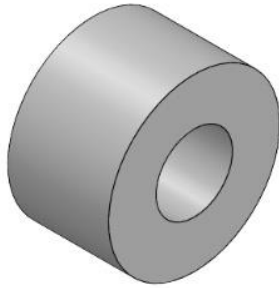
SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 1



Universidad
Industrial de
Santander



Pza.	Seguidor		Cod Pza.	01 C 05	Hoja.	28/59	
Dib.	Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib.	04/12/2020	Material.	PLA	Formato.	A4
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA					Escala.	1:1	

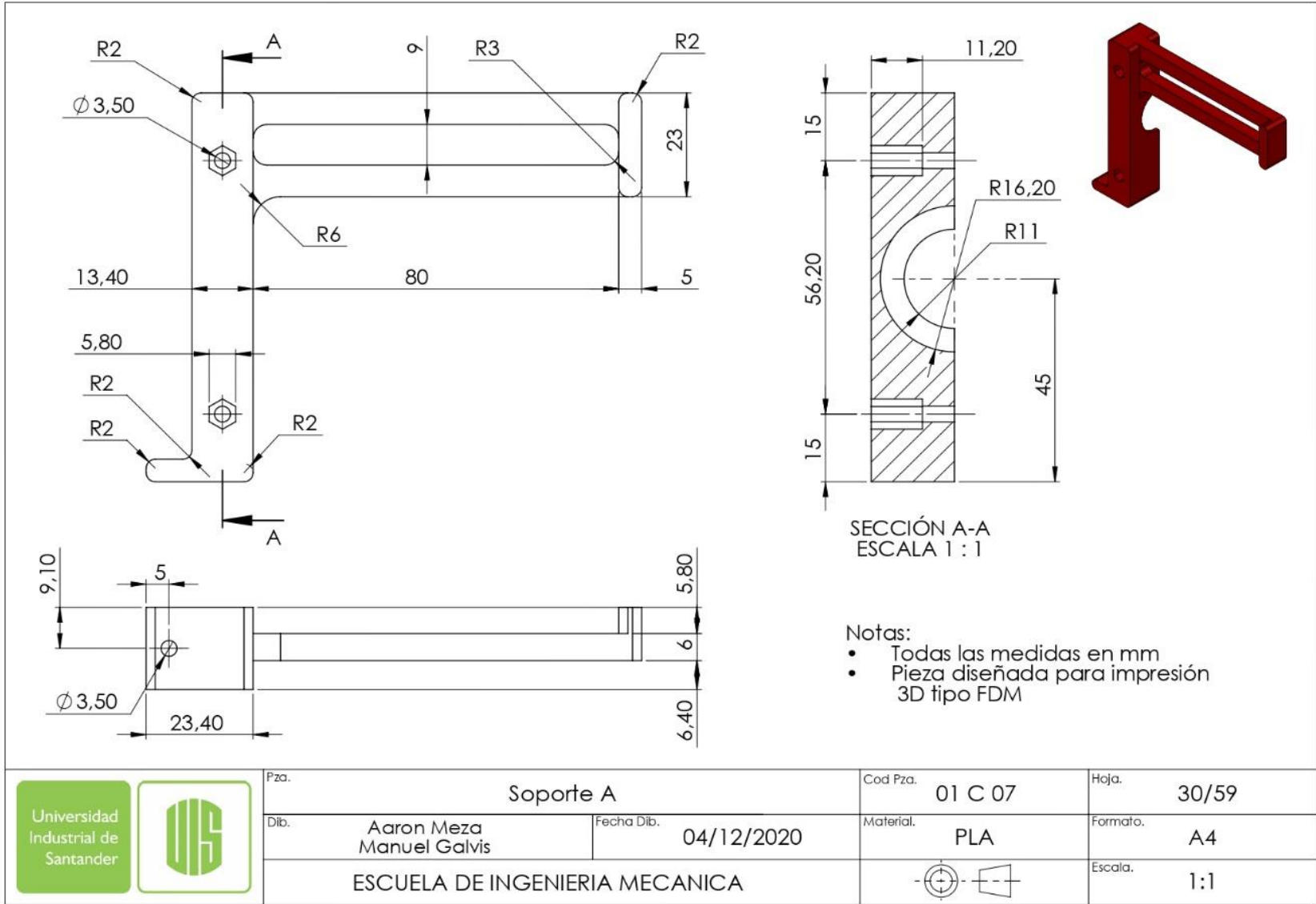


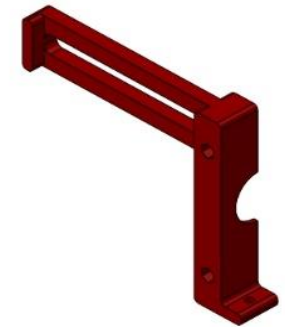
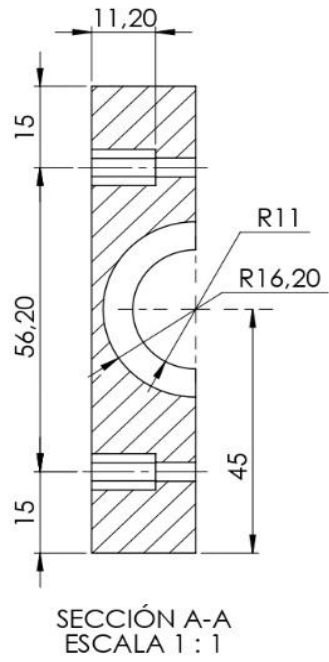
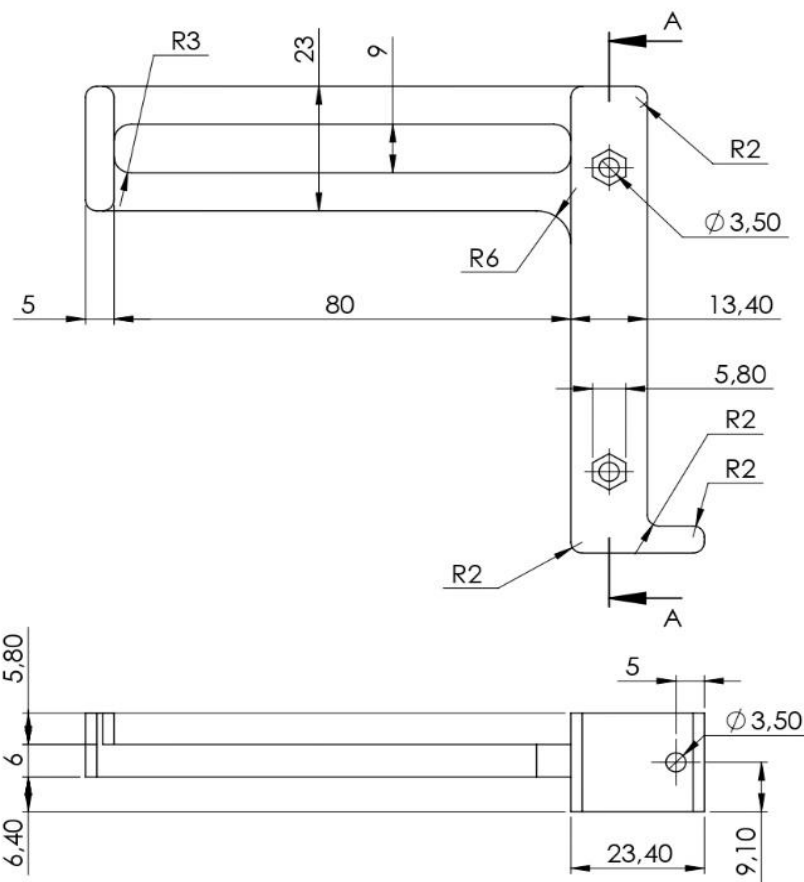
Notas:

- Todas las medidas en mm
- Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM



Pza.	Rueda		Cod Pza.	01 C 06	Hoja.	29/59	
Dib.	Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib.	04/12/2020	Material.	PLA	Formato.	A4
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA					Escala.	5:1	





- Notas:
- Todas las medidas en mm
 - Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM



Pza.	Soporte B		Cod Pza.	01 C 08	Hoja.	31/59	
Dib.	Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib.	04/12/2020	Material.	PLA	Formato.	A4
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA						Escala.	1:1

ANEXO G. SELECCIÓN DE CORREA EN SISTEMA DE HLADO.

El distribuidor escogido para las correas 2GT-6 es Amazon.com. En la Figura G1. se muestra la página web del distribuido donde exhibe un cuadro con las múltiples longitudes de las correas cerradas, que se puede ver en el Cuadro G1.

Figura G1. Correas GT2



amazon Enviar a Colombia Colombia Todos

Industrial y Científico > Productos de Transmisión de Energía > Bandas de Transmisión Industriales > Bandas de Tiempo

GT2 - Correa dentada para impresora 3D CNC (GT2-4.724 in)

Marca: HJZ-US
★★★★★ 1 calificación

No disponible por el momento.
No sabemos si este producto volverá a estar disponible, ni cuándo.

Tamaño:
GT2-120mm

- Nombre del producto: correa dentada GT2.
- Paso de la correa: 0.079 in.
- Ancho de la correa: 0.236 in.
- Material: goma.
- Garantía de envío rápido: todos los paquetes serán entregados en 7 – 15 días

Pasa el mouse encima de la imagen para aplicar zoom > Ver los detalles del producto

Fuente: <https://www.amazon.com/-/es/GT2-Correa-dentada-impresora-GT2-4-724/dp/B07VZ4VS6F?th=1>.

Cuadro G1. Cuadro de correas 2GT-6.

Type	Perimeter	Type	Perimeter	Type	Perimeter
GT2-98mm	98	GT2-208mm	208	GT2-524mm	524
GT2-102mm	102	GT2-220mm	220	GT2-528mm	528
GT2-110mm	110	GT2-228mm	228	GT2-540mm	540
GT2-112mm	112	GT2-240mm	240	GT2-550mm	550
GT2-120mm	120	GT2-252mm	252	GT2-600mm	600
GT2-122mm	122	GT2-260mm	260	GT2-606mm	606
GT2-124mm	124	GT2-264mm	264	GT2-610mm	610
GT2-126mm	126	GT2-268mm	268	GT2-616mm	616
GT2-128mm	128	GT2-280mm	280	GT2-640mm	640
GT2-130mm	130	GT2-288mm	288	GT2-670mm	670
GT2-132mm	132	GT2-294mm	294	GT2-696mm	696
GT2-134mm	134	GT2-300mm	300	GT2-752mm	752
GT2-136mm	136	GT2-302mm	302	GT2-760mm	760
GT2-140mm	140	GT2-308mm	308	GT2-784mm	784
GT2-150mm	150	GT2-320mm	320	GT2-810mm	810
GT2-154mm	154	GT2-322mm	322	GT2-840mm	840
GT2-158mm	158	GT2-336mm	336	GT2-848mm	848
GT2-160mm	160	GT2-348mm	348	GT2-852mm	852
GT2-172mm	172	GT2-350mm	350	GT2-860mm	860
GT2-180mm	180	GT2-400mm	400	GT2-900mm	900
GT2-186mm	186	GT2-460mm	460	GT2-930mm	930
GT2-188mm	188	GT2-410mm	410	GT2-976mm	976
GT2-190mm	190	GT2-444mm	444	GT2-1000mm	1000
GT2-192mm	192	GT2-450mm	450	GT2-1140mm	1140
GT2-194mm	194	GT2-488mm	488	GT2-1220mm	1220
GT2-200mm	200	GT2-494mm	494	GT2-1350mm	1350
GT2-202mm	202	GT2-500mm	500	GT2-1360mm	1360
GT2-204mm	204	GT2-520mm	520	GT2-1524mm	1524

Fuente: <https://www.amazon.com/-/es/GT2-Correa-dentada-impresora-GT2-4-724/dp/B07VZ4VS6F?th=1>.

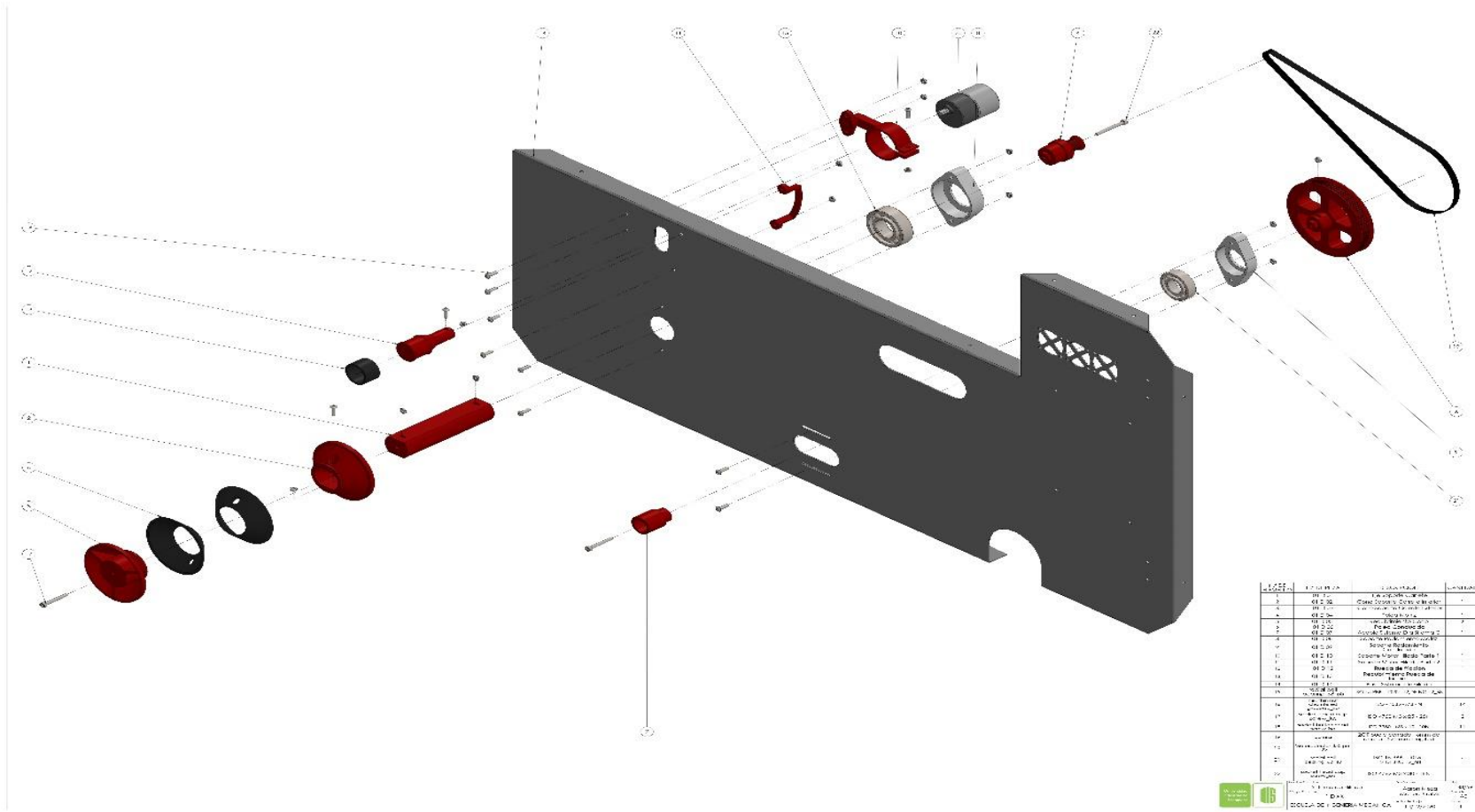
Del cuadro anterior escogemos el perímetro de correa que sea mayor a la distancia calculada, como vemos en el Cuadro G2.

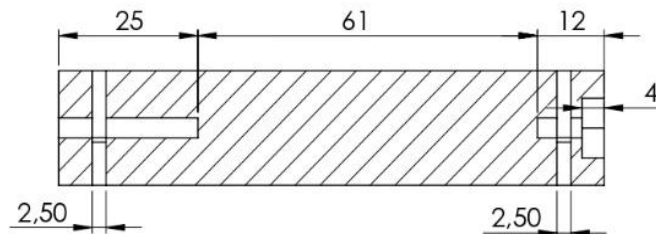
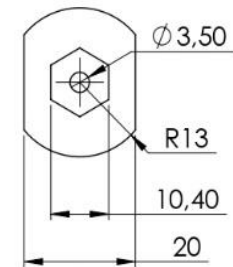
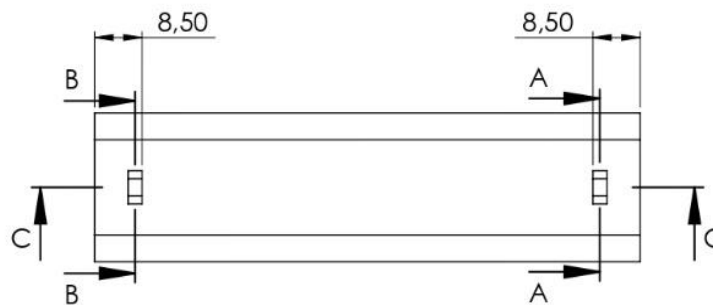
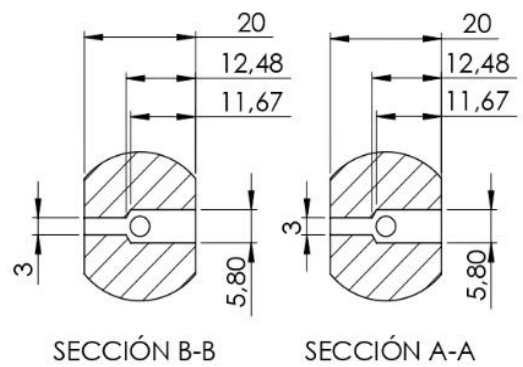
Cuadro G2. Selección de correa 2GT.

Type	Perimeter	Type	Perimeter	Type	Perimeter
GT2-98mm	98	GT2-208mm	208	GT2-524mm	524
GT2-102mm	102	GT2-220mm	220	GT2-528mm	528
GT2-110mm	110	GT2-228mm	228	GT2-540mm	540
GT2-112mm	112	GT2-240mm	240	GT2-550mm	550
GT2-120mm	120	GT2-252mm	252	GT2-600mm	600
GT2-122mm	122	GT2-260mm	260	GT2-606mm	606
GT2-124mm	124	GT2-264mm	264	GT2-610mm	610
GT2-126mm	126	GT2-268mm	268	GT2-616mm	616
GT2-128mm	128	GT2-280mm	280	GT2-640mm	640
GT2-130mm	130	GT2-288mm	288	GT2-670mm	670
GT2-132mm	132	GT2-294mm	294	GT2-696mm	696
GT2-134mm	134	GT2-300mm	300	GT2-752mm	752
GT2-136mm	136	GT2-302mm	302	GT2-760mm	760
GT2-140mm	140	GT2-308mm	308	GT2-784mm	784
GT2-150mm	150	GT2-320mm	320	GT2-810mm	810
GT2-154mm	154	GT2-232mm	232	GT2-840mm	840
GT2-158mm	158	GT2-336mm	336	GT2-848mm	848
GT2-160mm	160	GT2-348mm	348	GT2-852mm	852
GT2-172mm	172	GT2-350mm	350	GT2-860mm	860
GT2-180mm	180	GT2-400mm	400	GT2-900mm	900
GT2-186mm	186	GT2-460mm	460	GT2-930mm	930
GT2-188mm	188	GT2-410mm	410	GT2-976mm	976
GT2-190mm	190	GT2-444mm	444	GT2-1000mm	1000
GT2-192mm	192	GT2-450mm	450	GT2-1140mm	1140
GT2-194mm	194	GT2-488mm	488	GT2-1220mm	1220
GT2-200mm	200	GT2-494mm	494	GT2-1350mm	1350
GT2-202mm	202	GT2-500mm	500	GT2-1360mm	1360
GT2-204mm	204	GT2-520mm	520	GT2-1524mm	1524

La correa seleccionada tiene la referencia 2GT-6-520, de 6 milímetros de ancho y 520 milímetros de perímetro.

ANEXO H. SISTEMA DE HILADO.





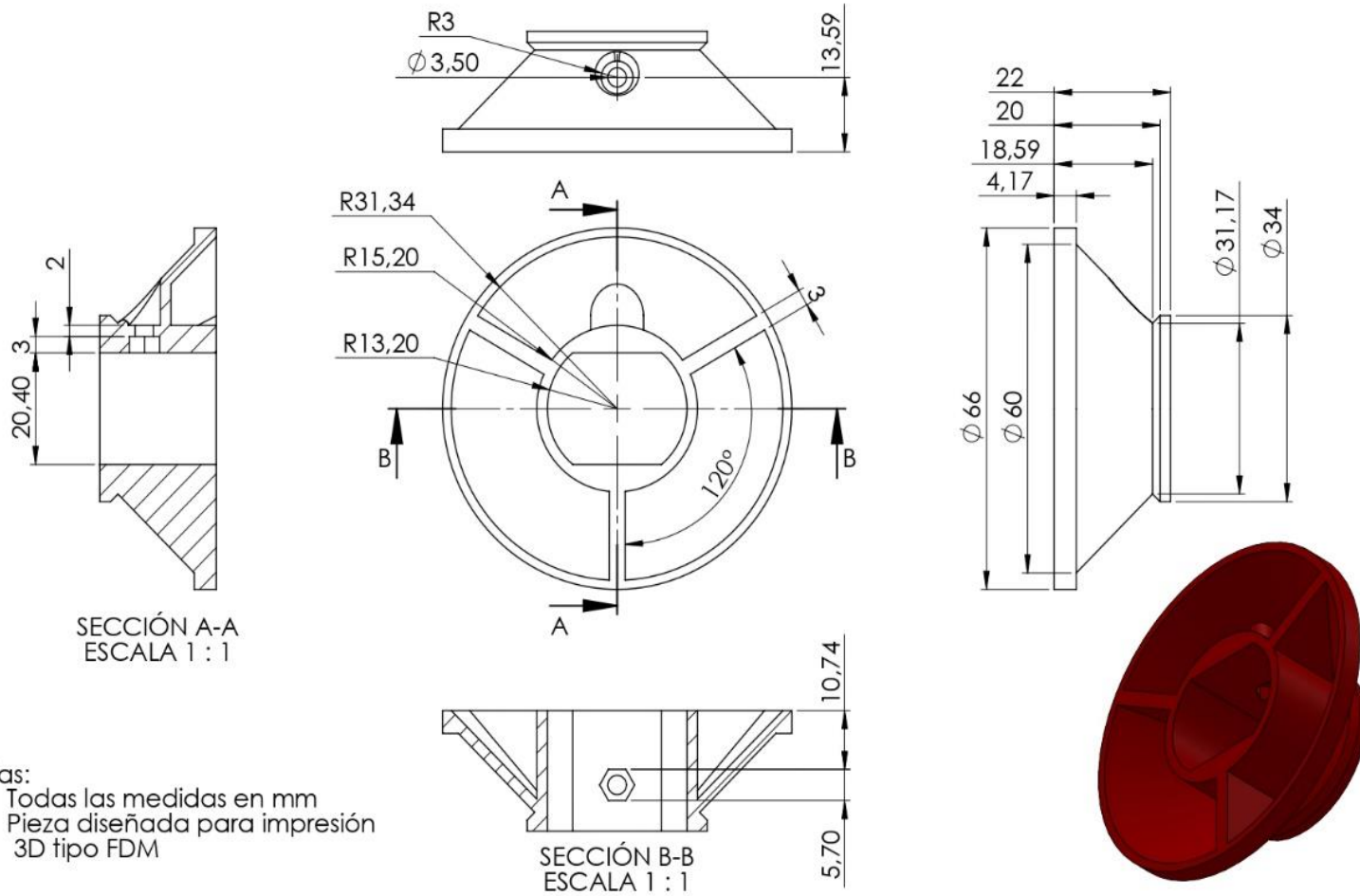
SECCIÓN C-C

Notas:

- Todas las medidas en mm
- Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM



Pza.	Eje doporte de Carrete		Cod Pza.	01 D 01	Hoja.	33/59	
Dib.	Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib.	04/12/2020	Material.	PLA	Formato.	A4
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA						Escala.	1:1



SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 1

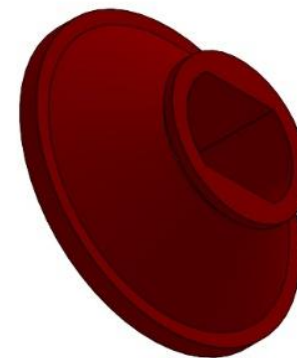
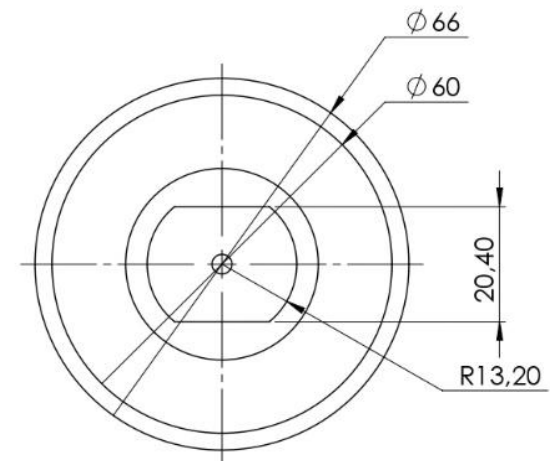
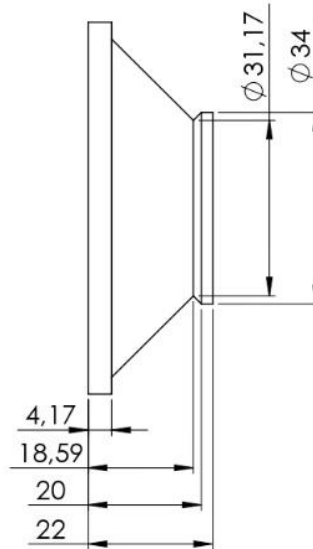
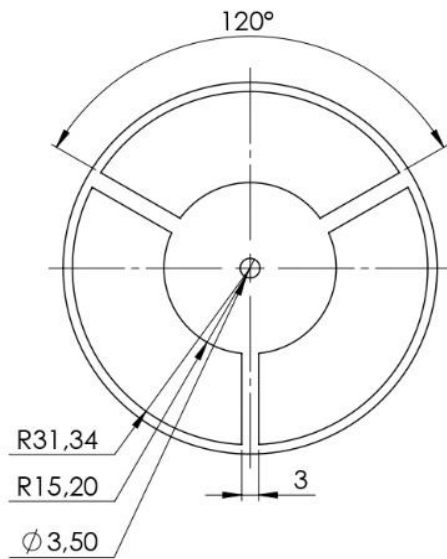
Notas:

- Todas las medidas en mm
- Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM

SECCIÓN B-B
ESCALA 1 : 1



Pza.	Cono Interior Soporte de Carrete		Cod Pza.	01 D 02	Hoja.	34/59	
Dib.	Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib.	04/12/2020	Material.	PLA	Formato.	A4
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA						Escala.	1:1

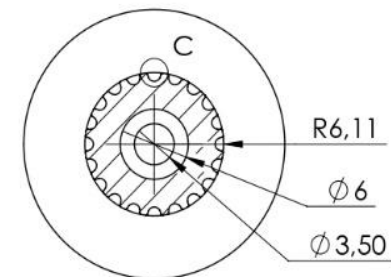
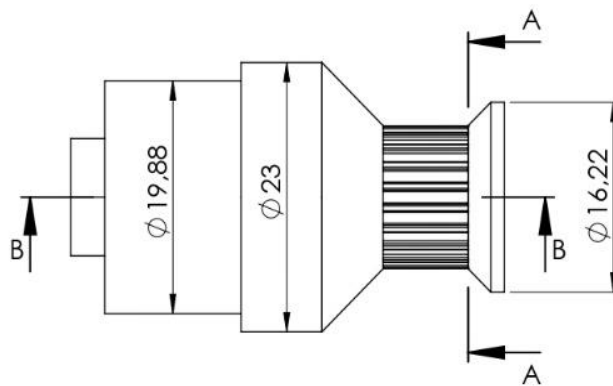
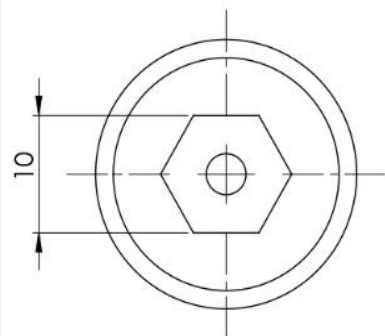


Notas:

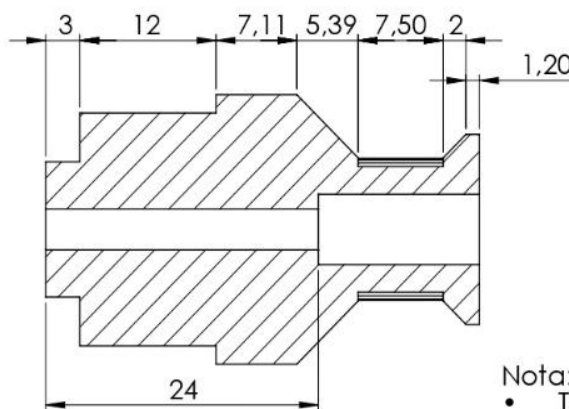
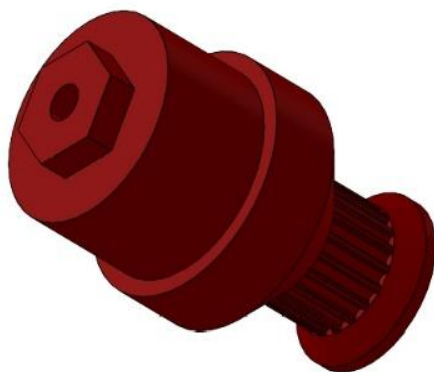
- Todas las medidas en mm
- Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM



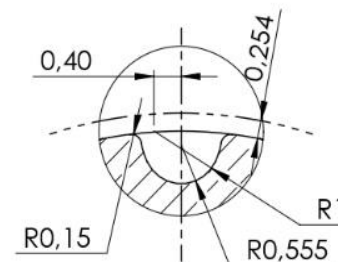
Pza.	Cono Exterior Soporte de Carrete		Cod Pza.	01 D 03	Hoja.	35/59	
Dib.	Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib.	04/12/2020	Material.	PLA	Formato.	A4
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA						Escala.	1:1



SECCIÓN A-A



SECCIÓN B-B

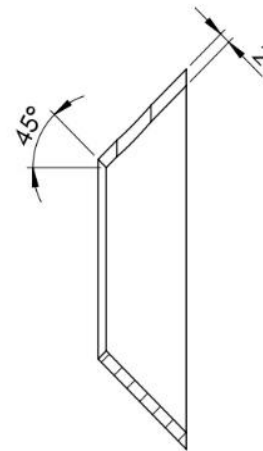
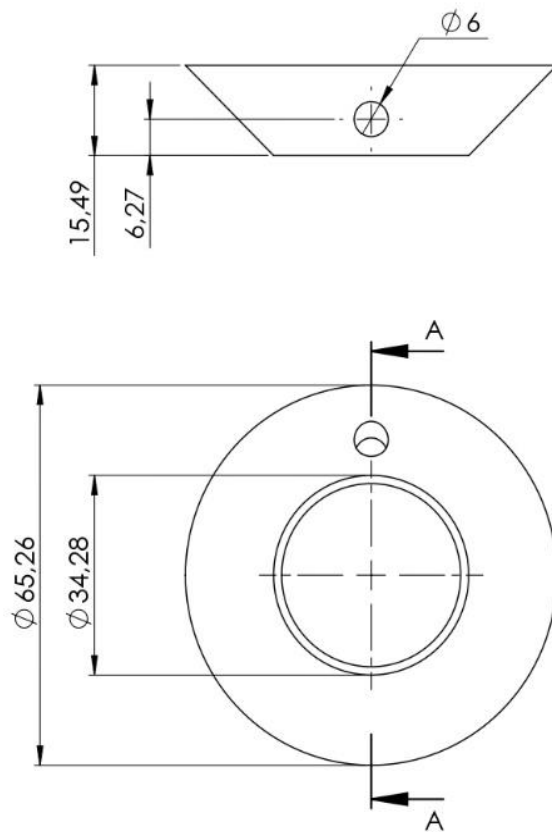


DETALLE C
ESCALA 12 : 1

Nota:

- Todas las medidas en mm
- Polea de 20 dientes, paso 2mm y diámetro primitivo de 12.73mm, para correa dentada GT2 de 6mm de ancho
- Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM

 	Pza. Polea Motriz		Cod Pza. 01 D 04	Hoja. 36/59
	Dib. Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib. 04/12/2020	Material. PLA	Formato. A4
	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			Escala. 2:1



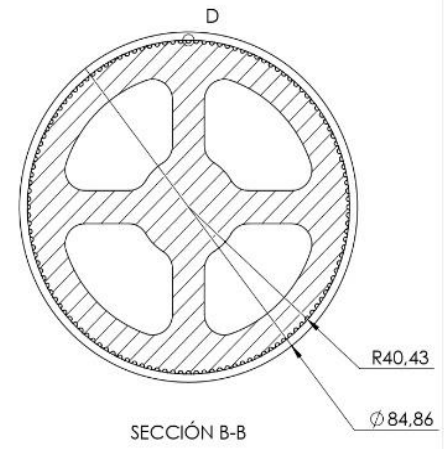
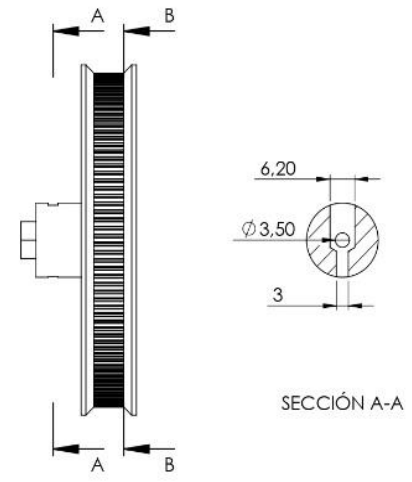
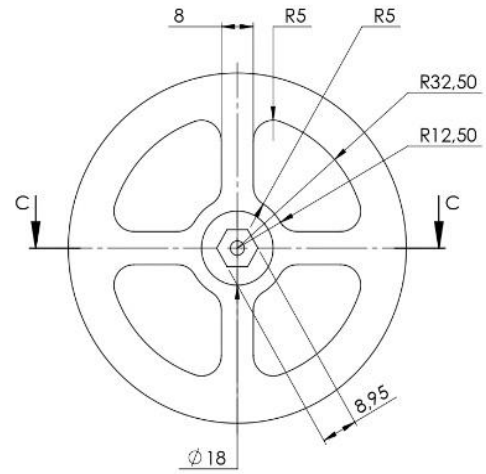
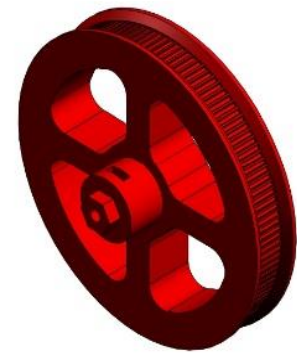
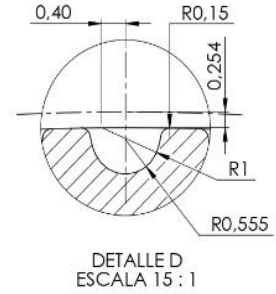
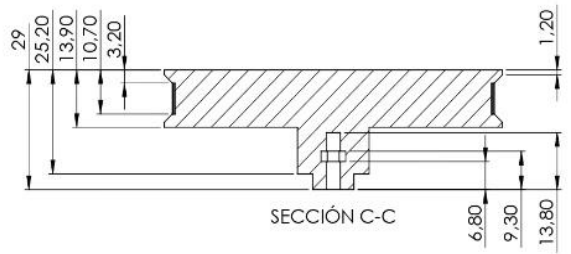
SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 1



- Nota:
- Todas las medidas en mm
 - Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM

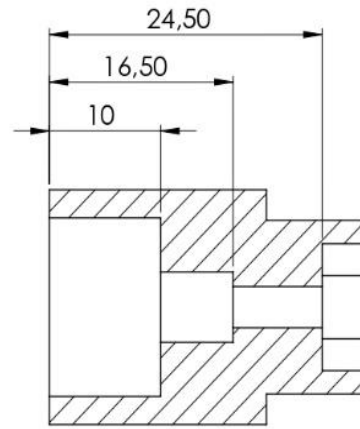
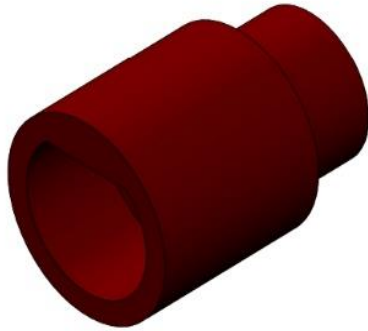


Pza.	Recubrimiento Cono		Cod Pza.	01 D 05	Hoja.	37/59	
Dib.	Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib.	04/12/2020	Material.	TPU	Formato.	A4
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA					Escala.	1:1	



- Nota:
- Todas las medidas en mm
 - Polea de 128 dientes, paso 2mm y diámetro primitivo de 81.37mm, para correa dentada GT2 de 6mm de ancho
 - Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM

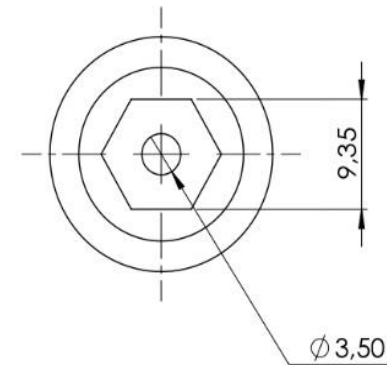
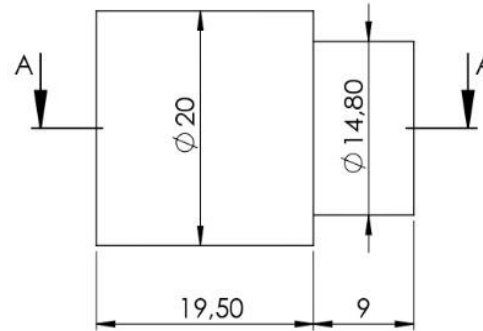
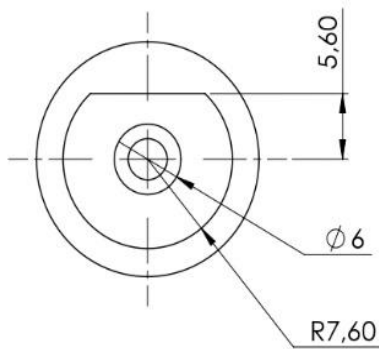
	Pza. Polea Conducida		Cod. 01 D 06	Hoja 38/59
	Dib: Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib. 04/12/2020	Material: PLA	Formato: A3
	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			Escala: 1:1






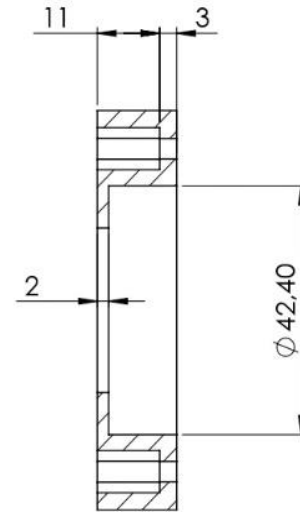
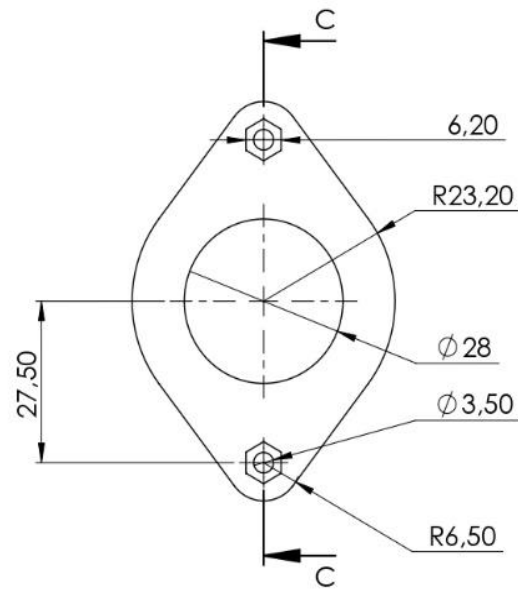
SECCIÓN A-A

Nota:

- Todas las medidas en mm
- Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM



 	Pza. Acople Sitema D a Sistema C		Cod Pza. 01 D 07	Hoja. 39/59
	Dib. Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib. 04/12/2020	Material. PLA	Formato. A4
	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			Escala. 2:1



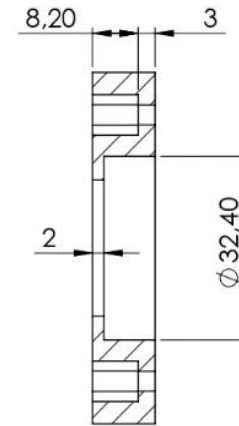
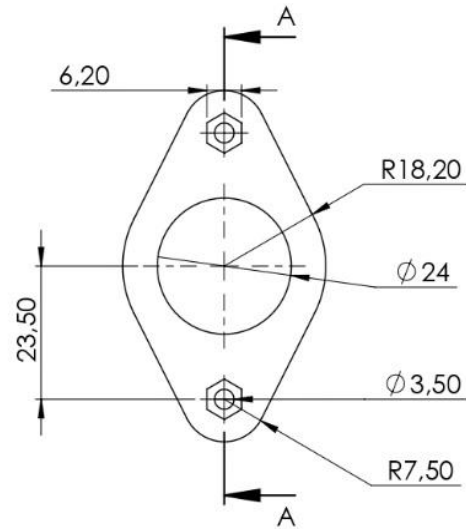
SECCIÓN C-C

Nota:

- Todas las medidas en mm
- Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM



Pza.	Soporte Rodamiento Motriz		Cod Pza.	01 D 08	Hoja.	40/59	
Dib.	Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib.	04/12/2020	Material.	PLA	Formato.	A4
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA					Escala.	1:1	



SECCIÓN A-A

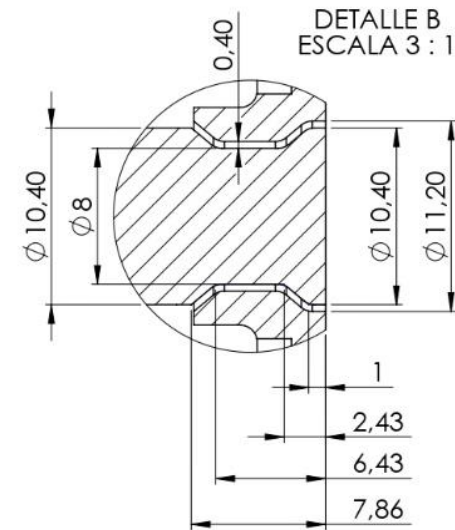
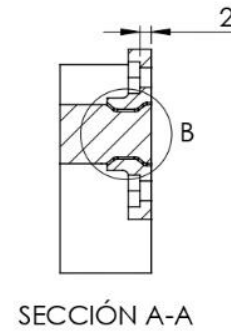
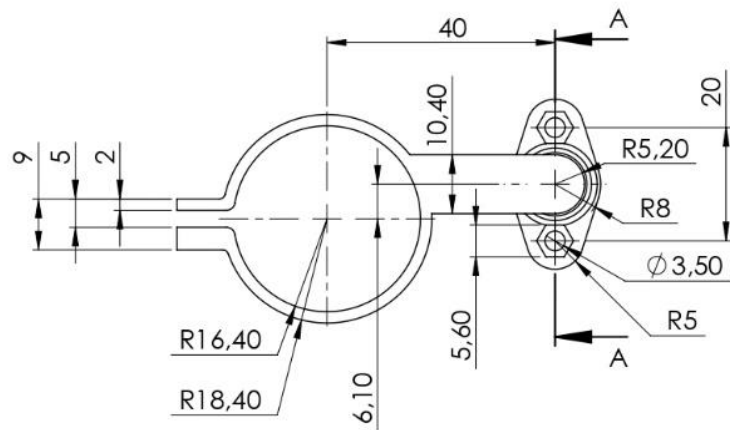
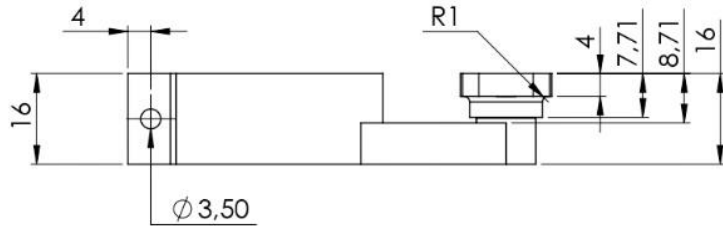
Nota:

- Todas las medidas en mm
- Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM

Universidad Industrial de Santander





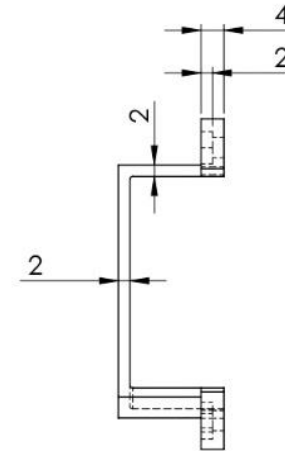
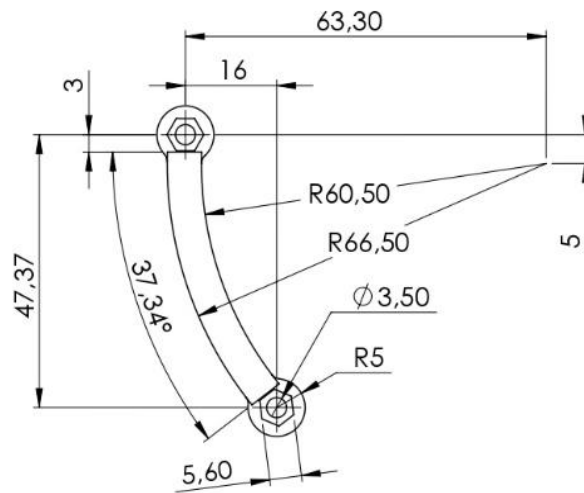
Pza.	Soporte Rodamiento Conducido		Cod Pza.	01 D 09	Hoja.	41/59	
Dib.	Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib.	04/12/2020	Material.	PLA	Formato.	A4
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA						Escala.	1:1



Nota:

- Todas las medidas en mm
- Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM

 	Pza. Soporte Motor Hilado parte 1		Cod Pza. 01 D 10	Hoja. 42/59
	Dib. Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib. 04/12/2020	Material. PLA	Formato. A4
	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			Escala. 1:1



Nota:

- Todas las medidas en mm
- Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM

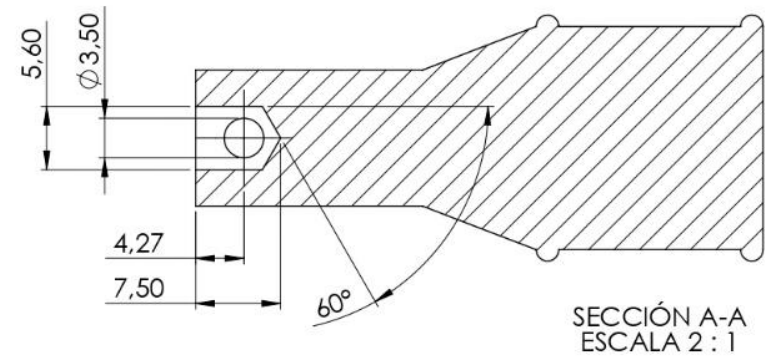
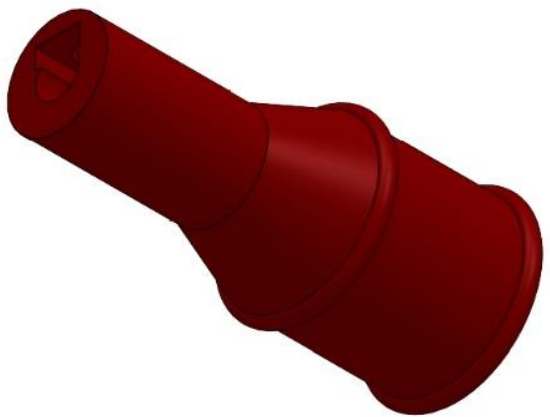
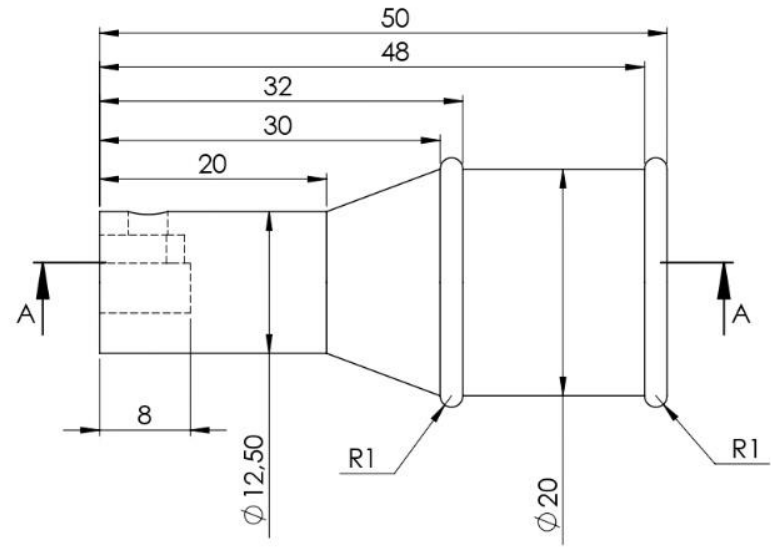
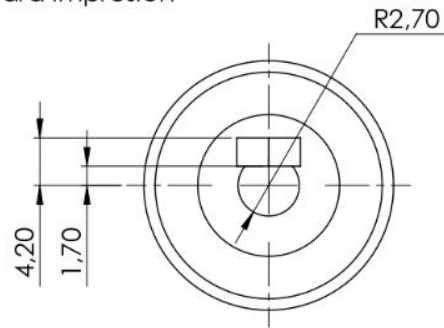
Universidad
Industrial de
Santander



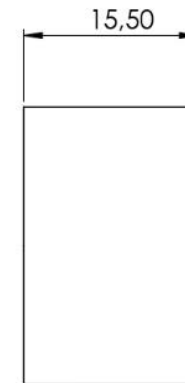
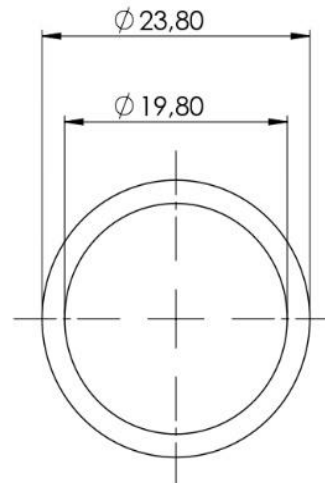
Pza.	Soporte Motor Hilado parte 2		Cod Pza.	01 D 11	Hoja.	43/59	
Dib.	Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib.	04/12/2020	Material.	PLA	Formato.	A4
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA						Escala.	1:1

Nota:

- Todas las medidas en mm
- Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM



	Pza. Rueda de Fricción		Cod Pza. 01 D 12	Hoja. 44/59
	Dib. Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib. 04/12/2020	Material. PLA	Formato. A4
	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			Escala. 2:1



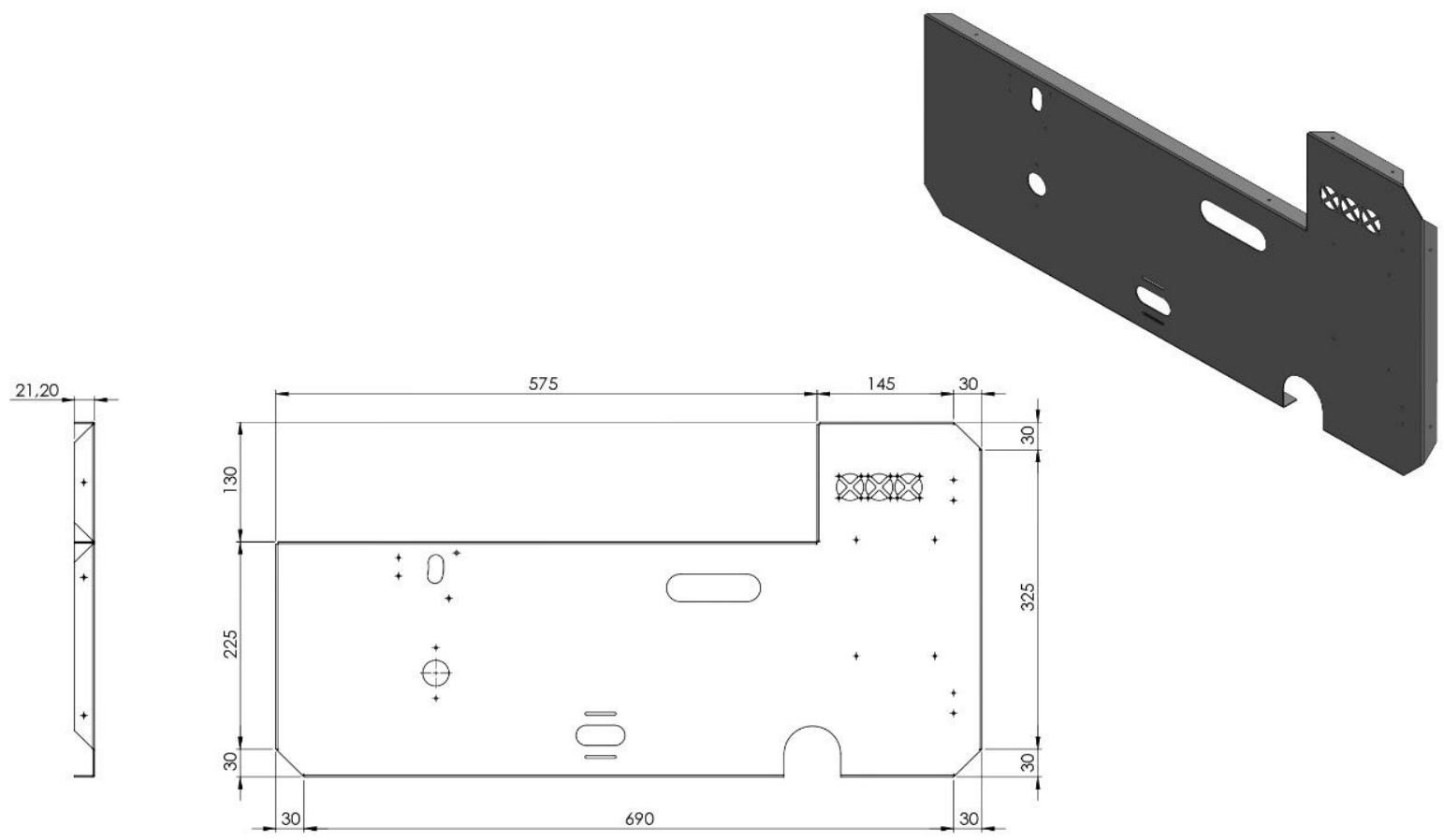
Nota:

- Todas las medidas en mm
- Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM

Universidad
Industrial de
Santander



Pza.	Recubrimiento Rueda de Fricción		Cod Pza.	01 D 13	Hoja.	45/59	
Dib.	Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib.	04/12/2020	Material.	TPU	Formato.	A4
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA						Escala.	2:1

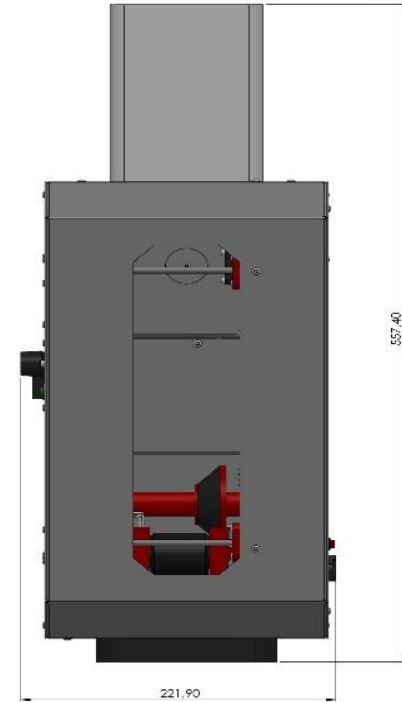
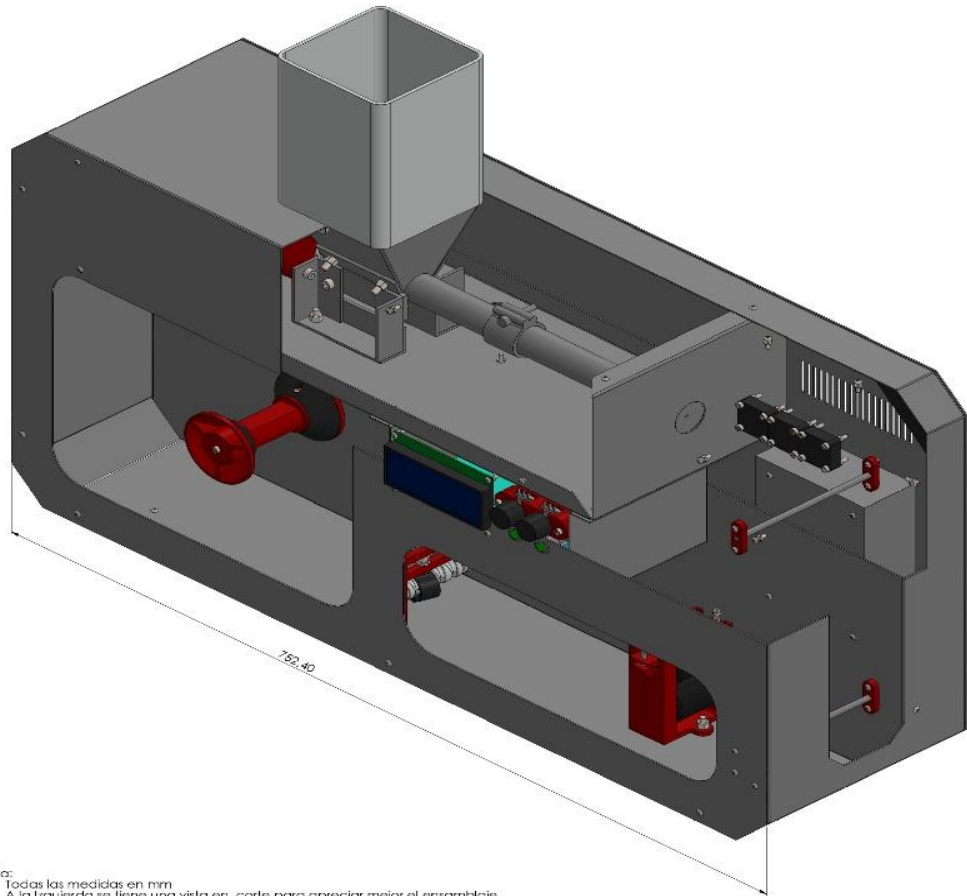


Nota:

- Todas las medidas en mm
- La pieza se haría de una lámina calibre 18

	Pza. Base Sistema de Hilado		Cod. 01 D 14	Hoja 47/59
	Dib. Acron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib. 06/12/2020	Materia: AISI 304	Formato A3
	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			Escala 1:4

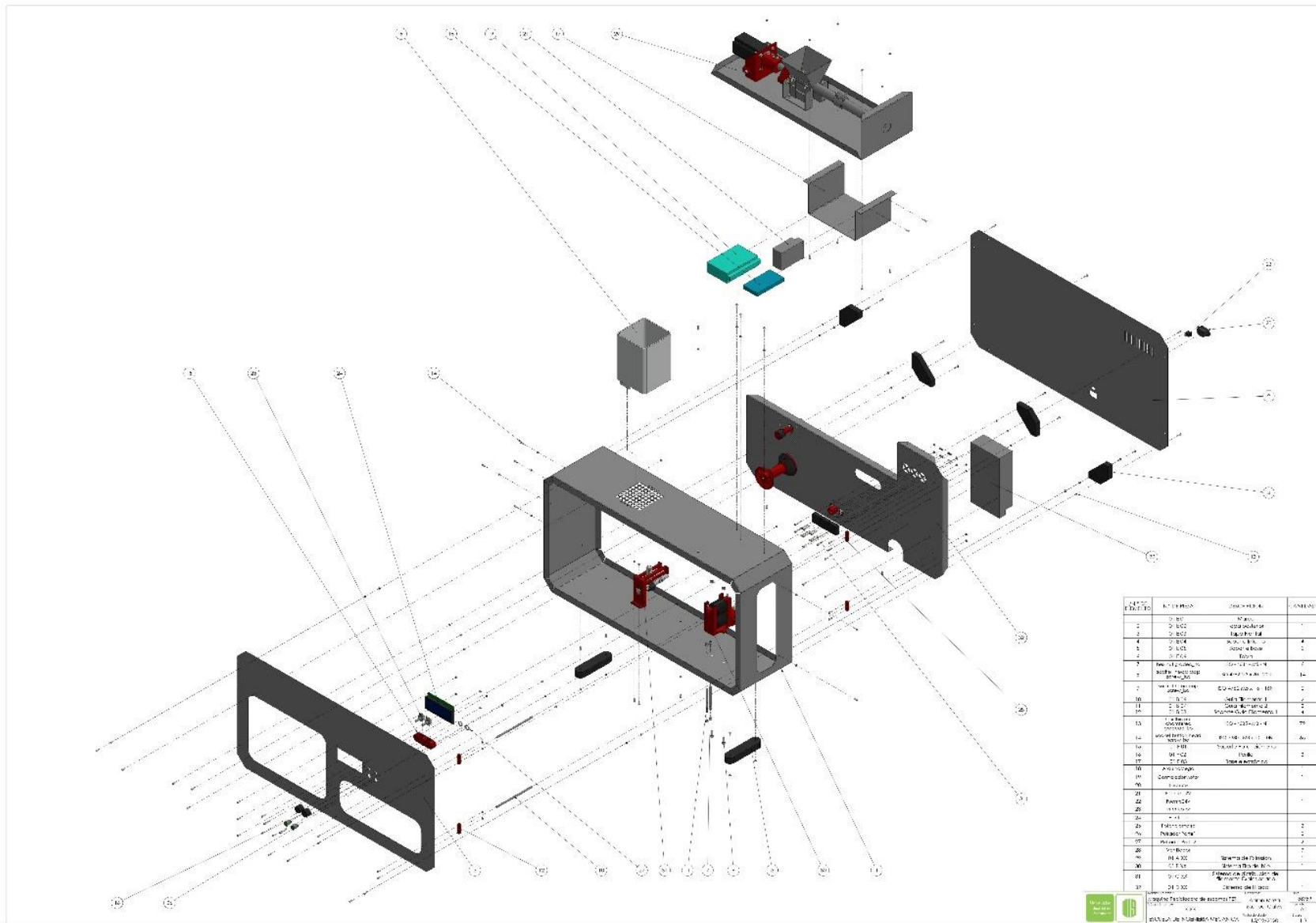
ANEXO I. SISTEMA DE RECICLAJE DE PLASTICO PET.

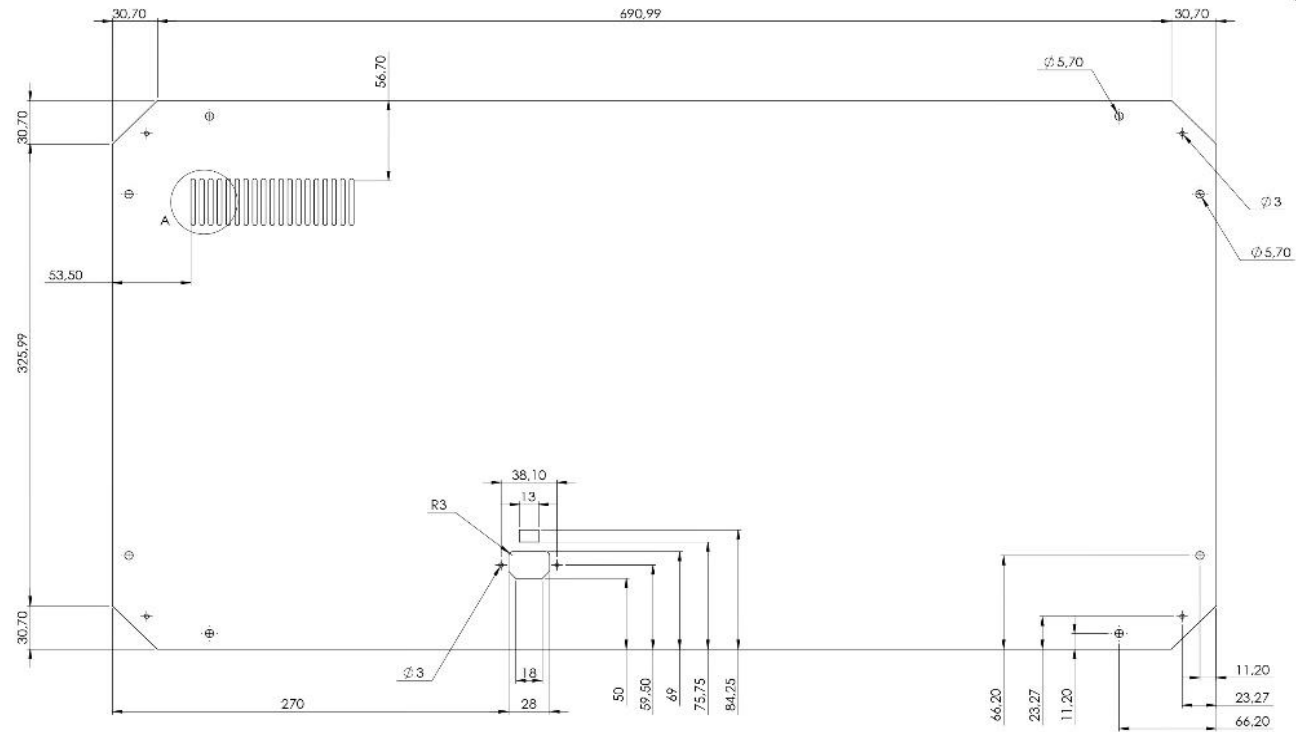


Nota:
 • Todas las medidas en mm
 • A la izquierda se tiene una vista en corte para apreciar mejor el ensamblaje



Pro:	Máquina Recicladora de escamas Pet	Cod:	01 X XX	Folio:	59/59
Dis:	Aaron Meza	Fecha Dis:	15/12/2020	Formato:	A2
ESCUOLA DE INGENIERIA MECANICA				Propio:	1:2





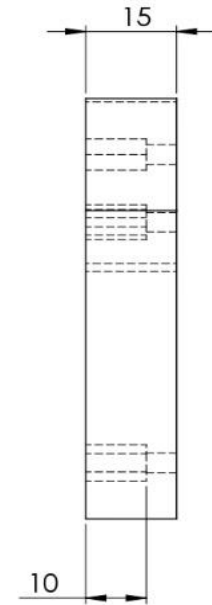
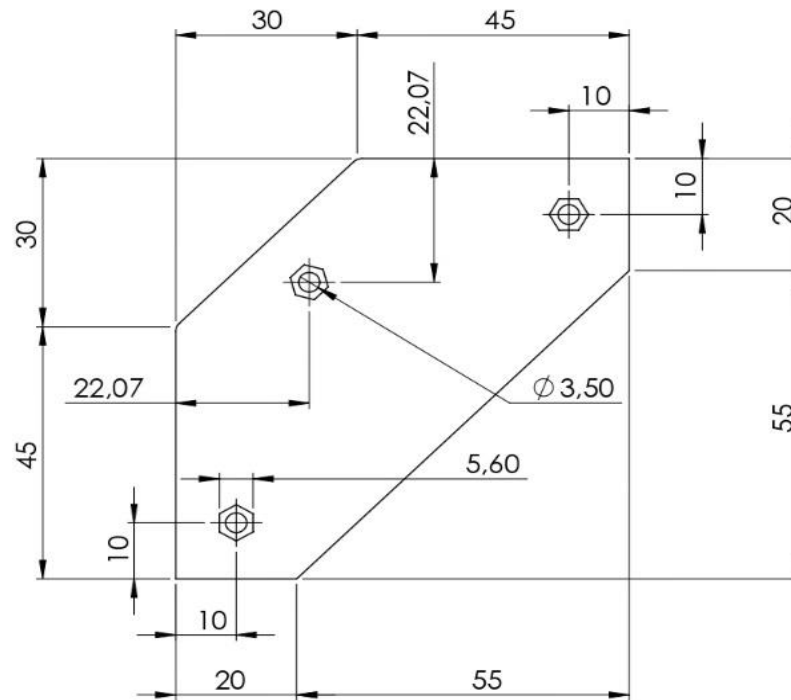
Nota:

- Todas las medidas en mm
- Los agujeros circulares de las esquinas tienen una relación de simetría, por tanto, usar de referencia la esquina inferior izquierda
- Las ranuras del detalle A son 19 en total
- La pieza se hace de una lámina calibre 18



Pza: Tapa Posterior
 Dib.: Aaron Meza
 Manuel Galvis
 Fecha: 08/12/2020
 ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

Cod: 01 E 02
 Variante: AISI 304
 Hoja: 50/59
 Formato: A2
 Escala: 1:2

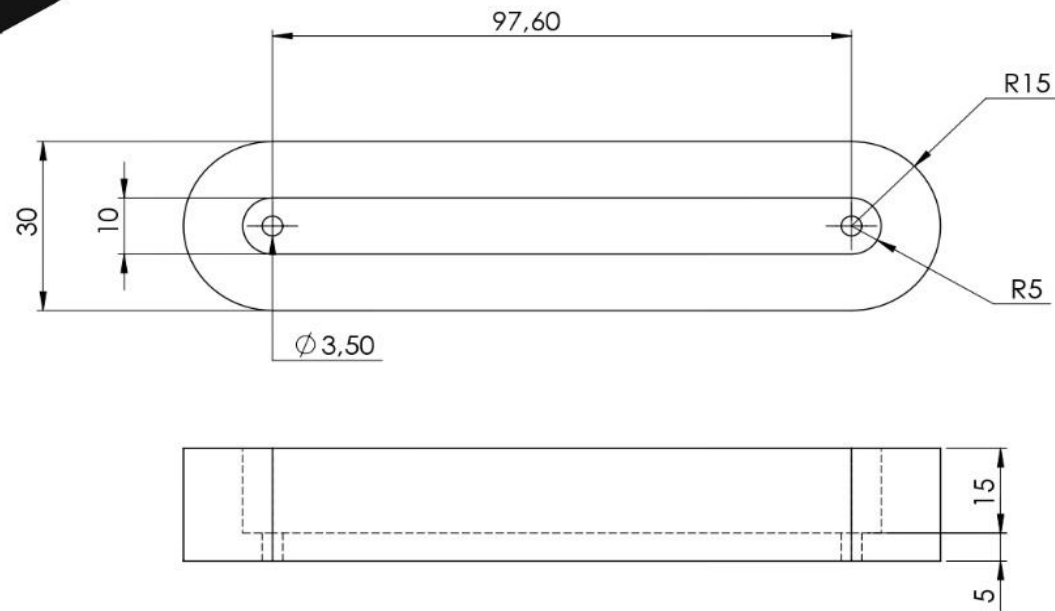


Nota:

- Todas las medidas en mm
- Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM



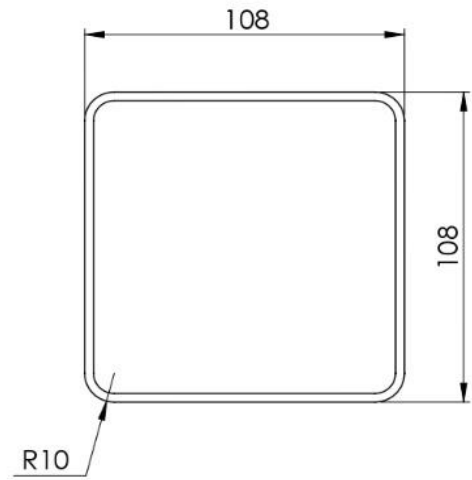
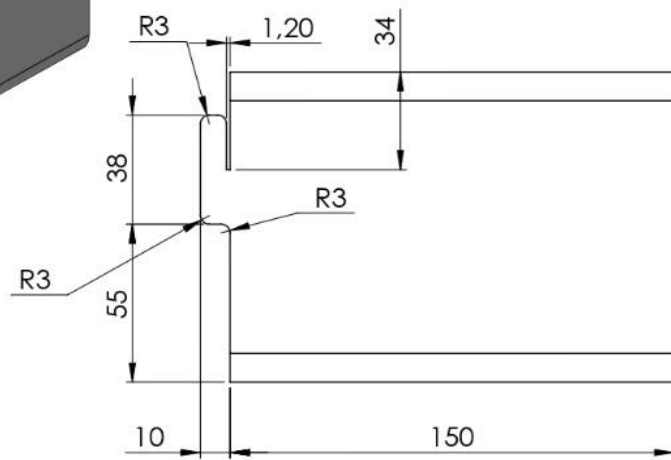
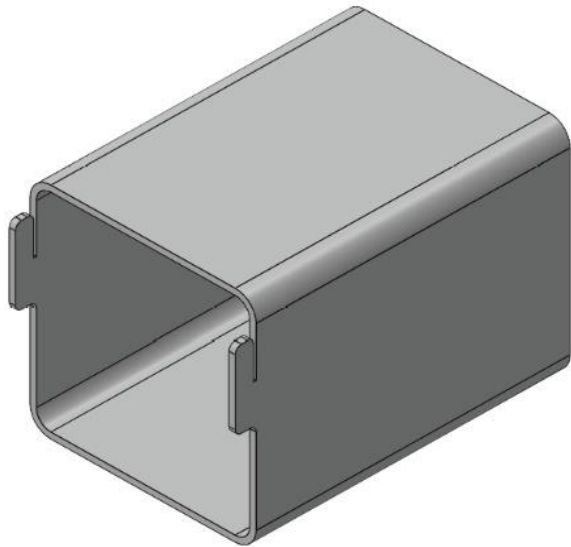
Pza.	Soporte Interno		Cod Pza.	01 E 04	Hoja.	52/55	
Dib.	Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib.	06/12/2020	Material.	PLA	Formato.	A4
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA						Escala.	1:1



Nota:

- Todas las medidas en mm
- Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM

	Pza. Soporte Base		Cod Pza. 01 E 05	Hoja. 53/59
	Dib. Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib. 06/12/2020	Material. PLA	Formato. A4
	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			Escala. 1:1

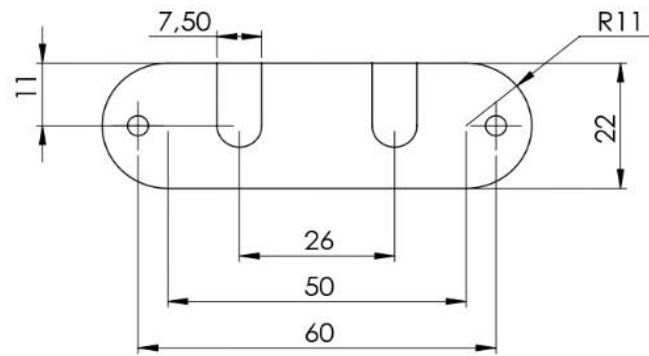
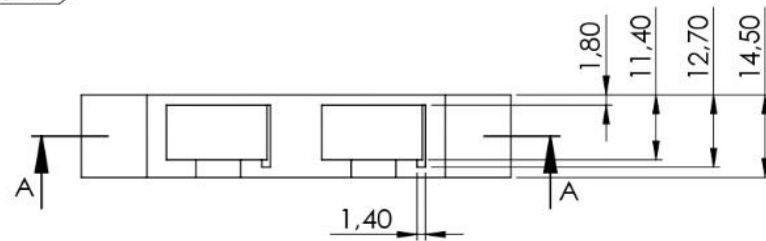
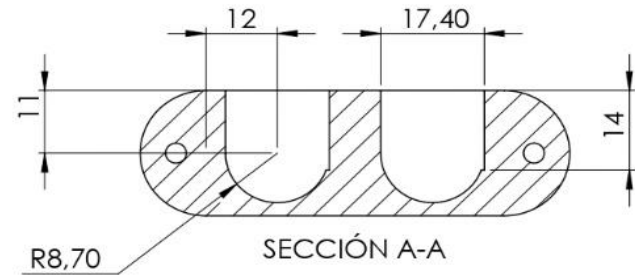
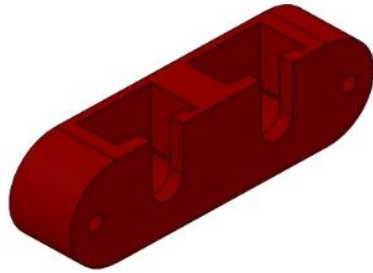


Nota:

- Todas las medidas en mm
- Pieza para realizar de una lámina de acrílico de 3mm de espesor



Pza.	Tolva		Cod Pza.	01 E 06	Hoja.	54/59	
Dib.	Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib.	06/12/2020	Material.	Acrílico	Formato.	A4
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA					Escala.	1:2	

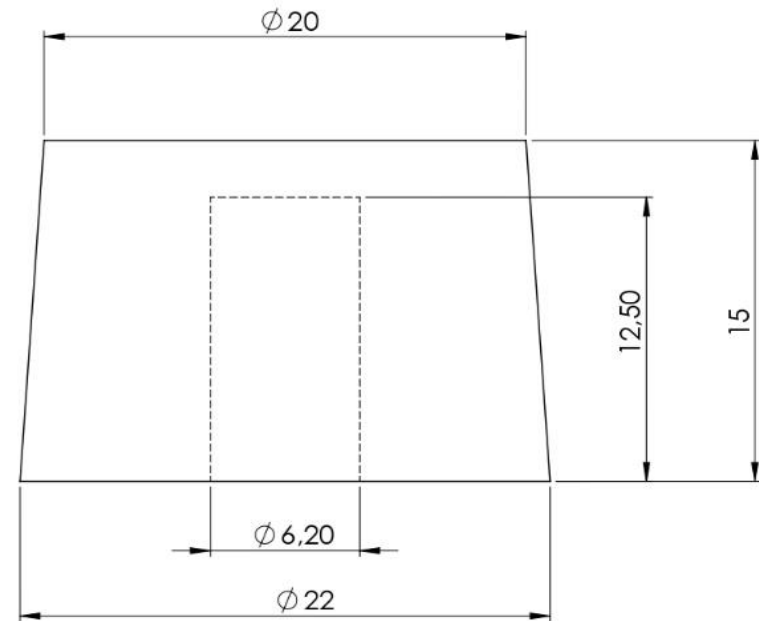
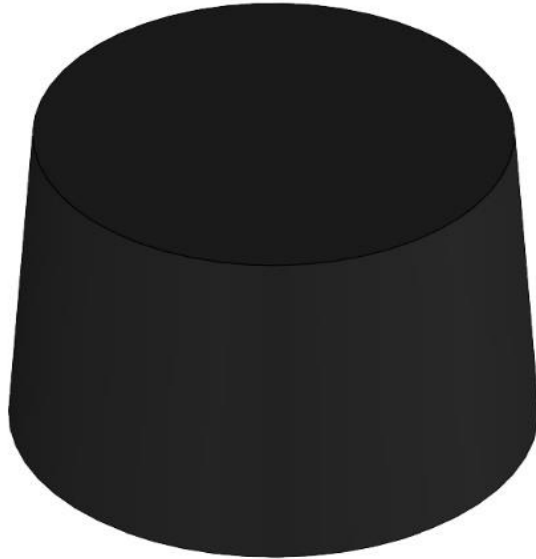


Nota:

- Todas las medidas en mm
- Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM



Pza.	Soporte Potenciómetros		Cod Pza.	01 F 01	Hoja.	55/59	
Dib.	Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib.	06/12/2020	Material.	PLA	Formato.	A4
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA						Escala.	1:1

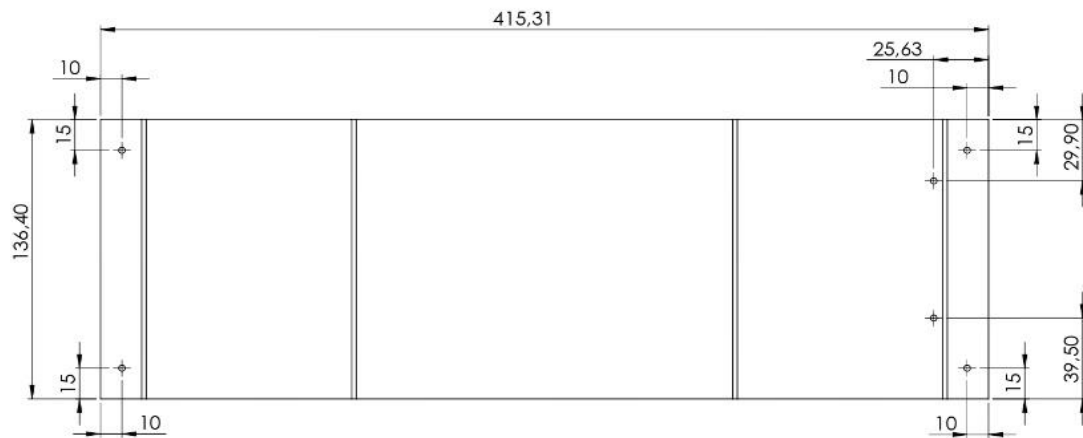


Nota:

- Todas las medidas en mm
- Pieza diseñada para impresión 3D tipo FDM

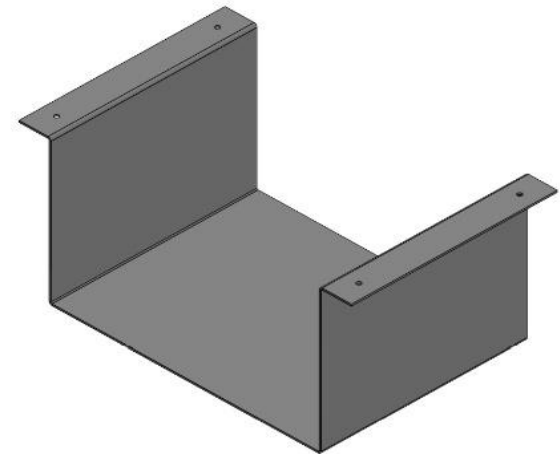
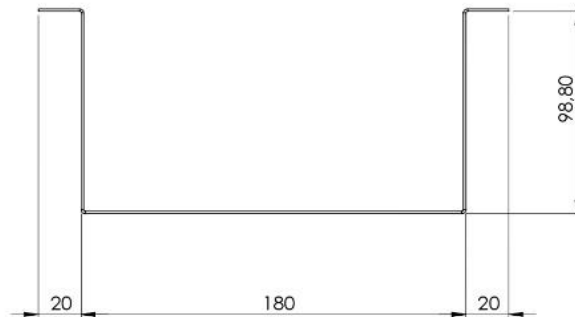


Pza.	Perilla		Cod Pza.	01 F 02	Hoja.	56/59	
Dib.	Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib.	06/12/2020	Material.	PLA	Formato.	A4
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA					Escala.	4:1	



Nota:

- Todas las medidas en mm
- Todos los agujeros circulares tienen un diámetro de 3mm
- La pieza se hace de una lámina calibre 18
- En la parte superior se muestra el desarrollo de la pieza y en la inferior la pieza doblada.



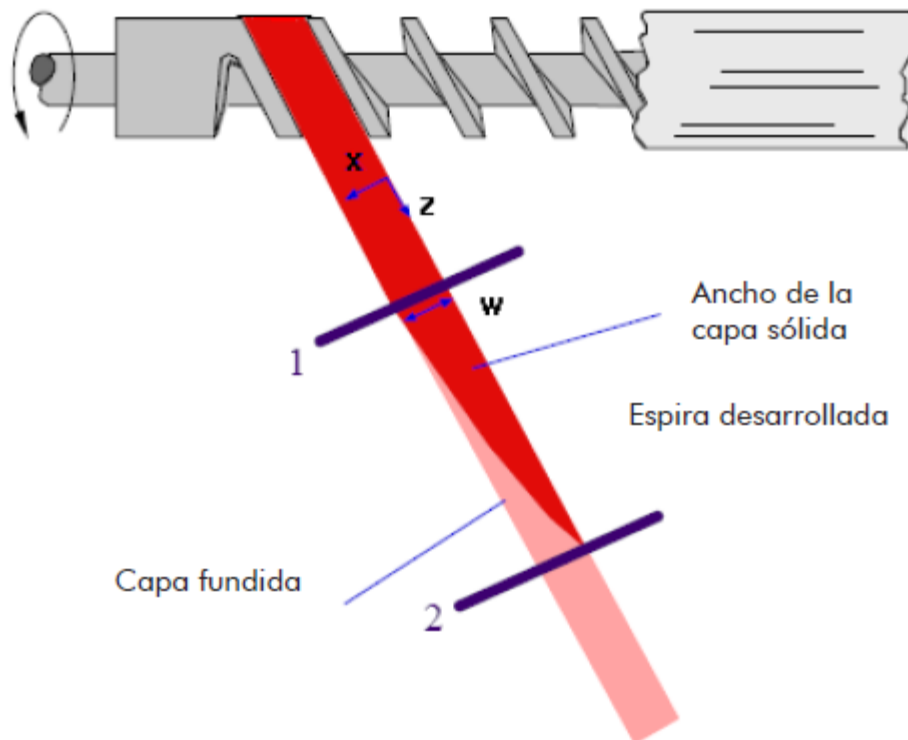
		Pza. Base Electrónica	Cod. 01 F 03	Hoja 57/59	
		Dib. Aaron Meza Manuel Galvis	Fecha Dib. 02/12/2020	Material AISI 304	Formato A3
		ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			Escala 1:2

ANEXO J. MODELO DE FUSIÓN.

El estudio del proceso de fusión es un problema que existe desde mucho tiempo atrás, desde mediados de los 50's en el siglo pasado se ha estado investigando cual es el mecanismo de fusión en las extrusoras, pero no fue hasta 1966 cuando Zehev Tadmor, ingeniero químico israelí, dio los primeros pasos para el modelo de fusión, y posteriormente en 1976 J.R.A. Pearson dio solución a las ecuaciones fundamentales del modelo. En el año 2001 la ingeniera química María del Pilar Noriega confirmó científicamente el modelo.

El modelo plantea que se desarrolla el material del canal de usillo formando una banda de polímero, esta banda se encuentra alojada entre dos superficies, la del cilindro y la del husillo, como podemos ver en la Figura J1.

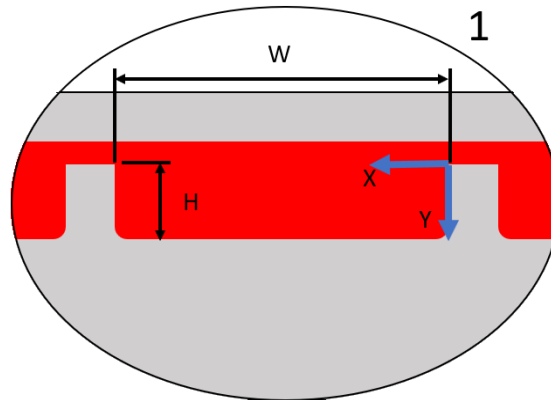
Figura J1. Desarrollo de la cama de polímero.



Fuente: GUTIÉRREZ, Paola y BORNACELLI, Jimmy. Metodología para el diseño de tornillos de máquinas extrusoras monohusillo. Cali: Universidad Autónoma de Occidente, 2008. P. 50.

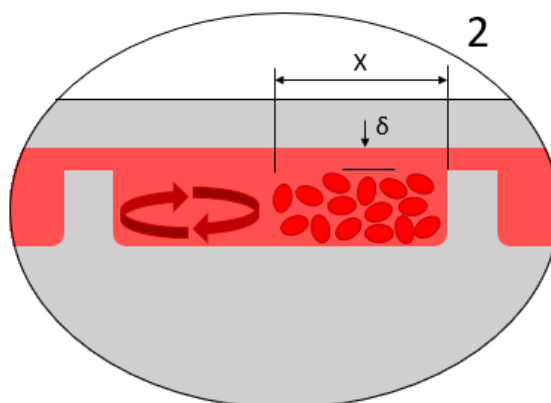
Como podemos ver en el corte 1 de la Figura J2. se coloca un eje coordenado en la esquina superior derecha de la sección transversal de la banda, y se definen la dimensión W como el ancho del canal y H como la profundidad del canal.

Figura J2. Corte 1 de la banda de polímero.



Como se muestra en el corte 2, Figura J3, el ancho de canal de ocupa el polímero que permanece en estado sólido se representa con la dimensión X , y el material que se funde se acumula al lado izquierdo de la sección.

Figura J3. Corte 2 de la banda de polímero.



El modelo matemático completo consiste en ecuaciones de alta, por ello aquí solo nombraremos las suposiciones planteadas para la construcción del modelo, sus ecuaciones constitutivas, y las ecuaciones resultado utilizadas en la predicción del comportamiento del sistema de extrusión diseñado.

El modelo se basó en las siguientes simplificaciones:

- Se asumen fluidos newtonianos con viscosidad constante e independientes de la velocidad de corte.
- La extrusora trabaja en estado estacionario.
- La sección transversal del canal en el husillo se asume rectangular.
- La fusión del polímero ocurre solamente en la superficie del cilindro.
- Los pellets forman una cama sólida que es considerada homogénea, deformable y continua.
- La fundición del polímero origina una película de plástico fundido de espesor δ que es mucho muy pequeña en relación con el ancho del canal ($\delta/W \ll 1$).
- No existe deslizamiento del plástico fundido con relación a las paredes del canal.
- Las velocidades en la cama sólida son constantes.
- Las propiedades físicas y termo-físicas se asumen constantes.
- La interfaz de la cama sólida con la película fundida se asume a una temperatura T_m .
- Se desprecian las fuerzas gravitacionales.
- Se asume que la superficie interior de cilindro se encuentra a T_b .

Las ecuaciones utilizadas para plantear el modelo son:

- **Continuidad del flujo**

$$\frac{\partial V_x}{\partial X} + \frac{\partial V_y}{\partial Y} = 0$$

- **Ecuación del movimiento**

$$\frac{\partial P}{\partial X} = \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial Y}$$

- **Definición de viscosidad**

$$\eta = m_0 e^{-a(T-T_m)}$$

La conclusión del trabajo matemático fueron las siguientes expresiones:

- Numero de Brighman

$$Br = \frac{\eta * V_j^2}{K * (T_b - T_m)}$$

- Temperatura media adimensional

$$\bar{\theta} = \frac{2}{3} + \frac{Br}{12}$$

- Grupo dimensional de fusión

$$\phi = \left\{ \frac{V_{bX} * \rho_m * \left[k_m * \left(T_b - T_m + \left(\frac{\mu}{2} \right) * V_j^2 \right) \right]}{2 * \left[C_{ps} * (T_m - T_s) + C_{pm} * \bar{\theta} * (T_b - T_m) + \lambda \right]} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

- Constante de fusión

$$\psi = \frac{\phi}{V_{sz} * \rho_s}$$

- Velocidad de fusión

$$V_f = \left\{ \frac{V_{bx} * \rho_m * [k_m * (T_b - T_m) + \mu * (V_j^2 / 2)] * X}{C_{ps} * (T_m - T_s) + C_{pm} * \bar{\theta} * (T_b - T_m) + \lambda} \right\}^{1/2}$$

- Zona de alimentación

$$\frac{X_2}{W} = \frac{X_1}{W} * \left[1 - \frac{\psi * (Z_2 - Z_1)}{2 * H} \right]^2$$

- Zona de compresión

$$\frac{X_2}{W} = \frac{X_1}{W} * \left[\frac{\psi}{A} - \left(\frac{\psi}{A} - 1 \right) * \sqrt{\frac{H_1}{H_2}} \right]^2$$

Otras ecuaciones usadas en el modelo:

Velocidad de la hélice

$$\phi_B = \tan^{-1} \left(\frac{S}{\pi * D} \right) [rad]$$

Ancho del canal

$$W = S * \cos(\phi_B) [m]$$

Conicidad interna zona transición

$$\phi_i = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{H_A - H_D}{L} - S}{D_C} \right) [rad]$$

Velocidad relativa del barril

$$V_b = \pi * D * RPS [m / s]$$

Velocidad relativa del barril en X

$$V_{bX} = V_b * \sin(\phi_B)$$

Velocidad relativa del barril en Z

$$V_{bZ} = V_b * \cos(\phi_B)$$

Velocidad del solido

$$V_{sZ} = \frac{M_K}{\rho_s * H_A * W}$$

Velocidad resultante

$$V_j = \sqrt{V_b^2 + V_{sZ}^2 - 2 * V_b * V_{sZ} * \cos(\phi_B)}$$

$$H_2 = H_1 - S * \tan(\theta_i)$$

Estrechamiento

$$A = \frac{H_A - H_D}{\left(\frac{L * D}{D_C * \sin(\phi_B)} \right)}$$

Calor suministrado para fundición

$$Q = C_{pm} * \bar{\theta} * (T_b - T_m)$$

Flujo de calor para fundición

$$\dot{Q} = M_k * Q$$

ANEXO K. ENFRIAMIENTO DEL FILAMENTO.

Se utiliza la herramienta EES para facilitar el cálculo de la transferencia de calor desde el filamento. La herramienta contiene funciones preprogramadas que suministran las propiedades térmicas y físicas de una variedad de fluidos ideales y reales como es visto en la siguiente serie de figuras.

Figura K1. Temperaturas.

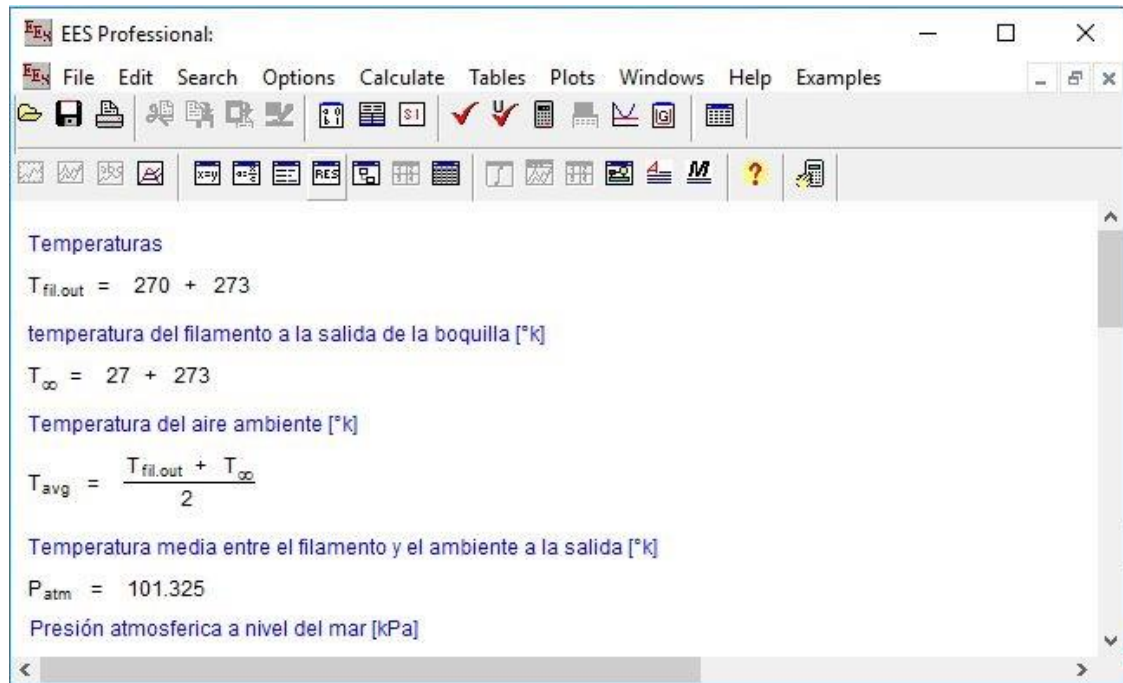


Figura K2. Propiedades del aire a T_{avg}.

The image shows a screenshot of the EES Professional software interface. The window title is "EES Professional:". The menu bar includes "File", "Edit", "Search", "Options", "Calculate", "Tables", "Plots", "Windows", "Help", and "Examples". The toolbar contains various icons for file operations, calculations, and plotting. The main workspace displays the following text and equations:

Propiedades del aire una temperatura de película T_{avg}

$$k_{\text{air}} = k(\text{Air}_{\text{ha}}, T = T_{\text{avg}}, P = P_{\text{atm}})$$

Coefficiente de transferencia de calor por conducción del aire [W/(m*K)]

$$\rho_{\text{air}} = \rho(\text{Air}_{\text{ha}}, T = T_{\text{avg}}, P = P_{\text{atm}}) \quad \text{Densidad del aire [kg/m}^3\text{]}$$
$$\mu_{\text{air}} = \text{Visc}(\text{Air}_{\text{ha}}, T = T_{\text{avg}}, P = P_{\text{atm}})$$

Viscosidad dinamica del aire [Pa*s]

$$\alpha_{\text{air}} = \text{ThermalDiffusivity}(\text{Air}_{\text{ha}}, T = T_{\text{avg}}, P = P_{\text{atm}}) \quad \text{Difusividad termica [m}^2\text{/s]}$$
$$\text{Pr}_{\text{air}} = \frac{\nu_{\text{air}}}{\alpha_{\text{air}}} \quad \text{Numero de Prandtl}$$
$$\nu_{\text{air}} = \frac{\mu_{\text{air}}}{\rho_{\text{air}}}$$

Viscosidad cinematica del aire [m²/s]

Propiedades del PET reciclado

$$C_{p\text{PET}} = 1000 \quad \text{[J/(kg*K)]}$$

Calor específico del pet reciclado

Figura K3. Correlaciones empíricas.

The screenshot shows the EES Professional software interface. The title bar reads "EES Professional:". The menu bar includes "File", "Edit", "Search", "Options", "Calculate", "Tables", "Plots", "Windows", "Help", and "Examples". The toolbar contains various icons for file operations, calculations, and plotting. The main workspace displays the following text:

Correlaciones empíricas

$vel_{air} = 1.5 \text{ [m/s]}$

Velocidad del aire expulsado por los ventiladores [m/s]

$Lc = 0.00175 \text{ [m]}$

Longitud característica (diámetro del filamento)

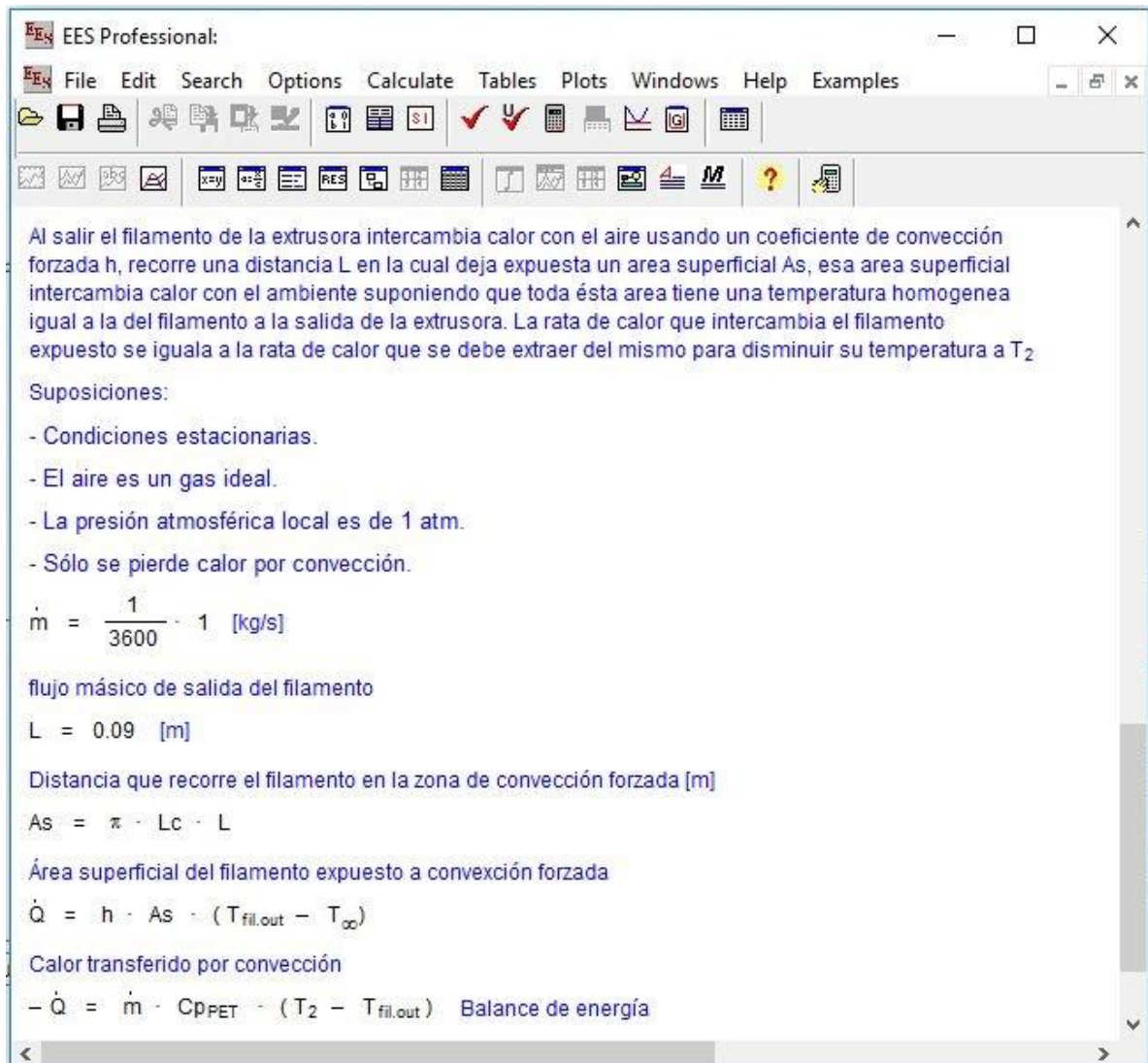
$Re = vel_{air} \cdot \frac{Lc}{\nu_{air}} \text{ Numero de Reynolds}$

$Nuss = 0.911 \cdot Re^{0.385} \cdot Pr_{air}^{(1/3)}$

Tabla 7-1 pag. 436 Transferencia de Calor y Masa Cengel 4ta Ed

$Nuss = h \cdot \frac{Lc}{k_{air}}$

Figura K4. Calor perdido y cambio en la energía.



EES Professional: File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Examples

Al salir el filamento de la extrusora intercambia calor con el aire usando un coeficiente de convección forzada h , recorre una distancia L en la cual deja expuesta un area superficial A_s , esa area superficial intercambia calor con el ambiente suponiendo que toda ésta area tiene una temperatura homogénea igual a la del filamento a la salida de la extrusora. La rata de calor que intercambia el filamento expuesto se iguala a la rata de calor que se debe extraer del mismo para disminuir su temperatura a T_2

Suposiciones:

- Condiciones estacionarias.
- El aire es un gas ideal.
- La presión atmosférica local es de 1 atm.
- Sólo se pierde calor por convección.

$\dot{m} = \frac{1}{3600} \cdot 1 \text{ [kg/s]}$

flujo másico de salida del filamento

$L = 0.09 \text{ [m]}$

Distancia que recorre el filamento en la zona de convección forzada [m]

$A_s = \pi \cdot L_c \cdot L$

Área superficial del filamento expuesto a convección forzada

$\dot{Q} = h \cdot A_s \cdot (T_{fil.out} - T_\infty)$

Calor transferido por convección

$-\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_{pPET} \cdot (T_2 - T_{fil.out}) \text{ Balance de energía}$

Figura K5. Resultados.

EES Professional: File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Examples

Main

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

$\alpha_{\text{air}} = 0.00009434$	$A_s = 0.0004948 \text{ [m}^2\text{]}$	$C_{\text{PPET}} = 1000 \text{ [J/(kg}\cdot\text{K)]}$
$h = 98.11 \text{ [W/(m}^2\cdot\text{K)]}$	$k_{\text{air}} = 0.05146$	$L = 0.09 \text{ [m]}$
$L_c = 0.00175 \text{ [m]}$	$\mu_{\text{air}} = 0.000034$	$\dot{m} = 0.0002778 \text{ [kg/s]}$
$Nuss = 3.337 \text{ [m}^{0.77}\text{/s}^{0.385}\text{]}$	$v_{\text{air}} = 0.00006695$	$Pr_{\text{air}} = 0.7096$
$P_{\text{atm}} = 101.3$	$\dot{Q} = 11.8 \text{ [W/K]}$	$Re = 39.21 \text{ [m}^2\text{/s]}$
$\rho_{\text{air}} = 0.5078$	$T_2 = 600.5$	$T_{\text{avg}} = 421.5$
$T_{\text{fil.out}} = 543$	$T_{\infty} = 300$	$vel_{\text{air}} = 1.5 \text{ [m/s]}$

5 potential unit problems were detected. **Check Units**

EES suggested units (shown in purple) for A_s \dot{m} $Nuss$ \dot{Q} Re .

Calculation time = .1 sec.

ANEXO L. CALOR PERDIDO EN EL CILINDRO.

Se utiliza la herramienta EES para facilitar el cálculo de la transferencia de calor en el cilindro. La herramienta contiene funciones preprogramadas que suministran las propiedades térmicas y físicas de una variedad de fluidos ideales y reales como es visto en la siguiente serie de figuras.

Figura L1. Datos geométricos y temperaturas.

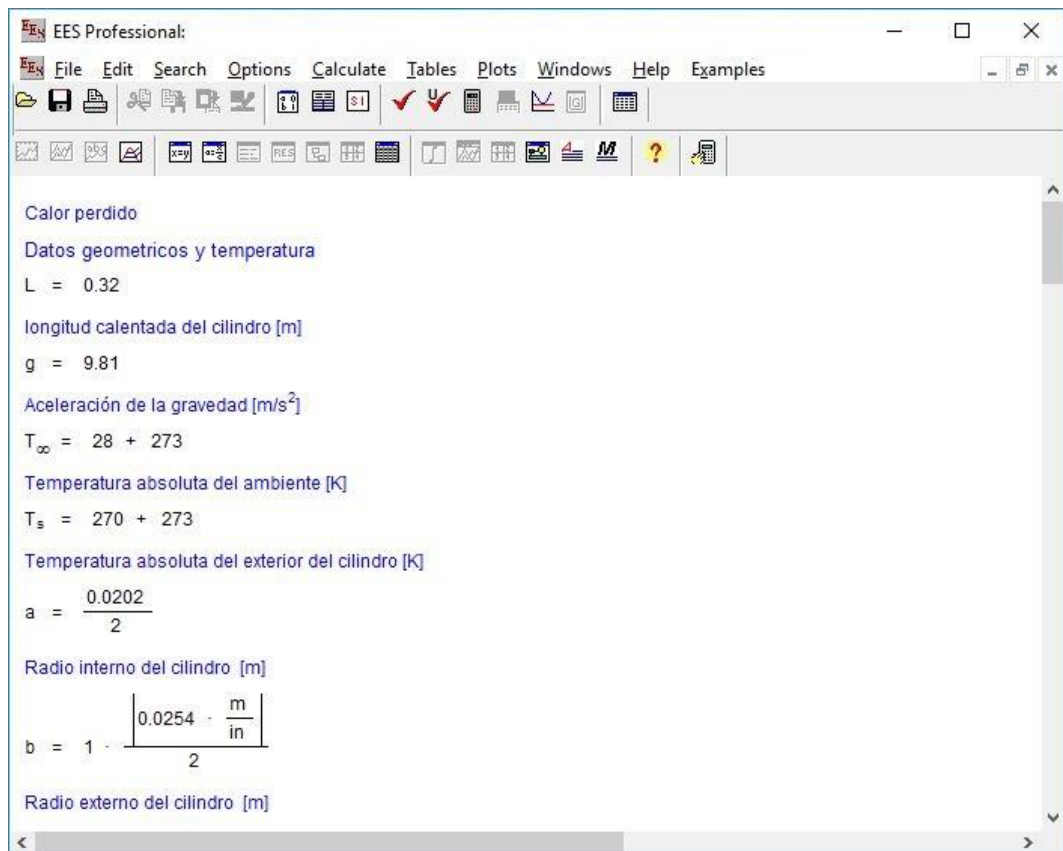


Figura L2. Propiedades termo físicas.

The screenshot shows the EES Professional software interface. The main window displays the following text and equations:

Propiedades termicas

$$T_{avg} = \frac{T_{\infty} + T_s}{2}$$

Temperatura media entre la superficie y el medio [K]

$$P_{atm} = 101.325$$

Presión atmosferica a nivel del mar [kPa]

$$\beta = \beta (Air_{ha} , T = T_{avg} , P = P_{atm})$$

Coefficiente de expansión termica [1/K]

$$\rho = \rho (Air_{ha} , T = T_{avg} , P = P_{atm})$$

Densidad del aire [kg/m³]

$$\mu = \text{Visc} (Air_{ha} , T = T_{avg} , P = P_{atm})$$

Viscosidad dinamica del aire [Pa*s]

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Viscosidad cinematica del aire [m²/s]

$$k_{T,aire} = k (Air_{ha} , T = T_{avg} , P = P_{atm})$$

Coefficiente de transferencia de calor por conducción del aire [W/(m*K)]

$$\alpha = \text{ThermalDiffusivity} (Air_{ha} , T = T_{avg} , P = P_{atm})$$

Difusividad termica [m²/s]

Figura L3. Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección.

$$N_{u,D} = \frac{h \cdot 2 \cdot b}{k_{T,aire}} \quad \text{Numero de Nusselt}$$

$$N_{u,D} = \left[0.6 + \frac{0.387 \cdot Ra_D^{(1/8)}}{\left(1 + \left[\frac{0.559}{Pr} \right]^{(9/16)} \right)^{(8/27)}} \right]^2$$

$$Ra_D = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot (2 \cdot b)^3}{\nu \cdot \alpha} \quad \text{Numero de Rayleigh}$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad \text{Numero de Prandtl}$$

$$Q_{lost} = A_{rea} \cdot h \cdot (T_s - T_\infty)$$

Calor perdido [W]

$$A_{rea} = 2 \cdot \pi \cdot b \cdot L$$

Figura L4. Resultados.

Unit Settings: SI K kPa kJ mass deg

a = 0.0101	$\alpha = 0.00004107$	$A_{rea} = 0.02553$	b = 0.0127	$\beta = 0.002372$
g = 9.81	h = 10.02	$k_{T,aire} = 0.03492$	L = 0.32	$\mu = 0.00002398$
$\nu = 0.00002868$	$N_{u,D} = 7.284$	Pr = 0.6984	$P_{atm} = 101.3 \text{ [Pa]}$	$Q_{lost} = 61.89$
$Ra_D = 78336$	$\rho = 0.8361$	$T_{avg} = 422$	$T_\infty = 301$	$T_s = 543$

5 potential unit problems were detected.

Calculation time = .1 sec.

ANEXO M. RENTABILIDAD EXIGIDA Y RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN MES A MES.

Una manera alternativa de obtener el saldo después de recuperar una inversión es crear tablas donde se agrupen los periodos y se calcule la rentabilidad exigida a la inversión, el saldo de la inversión y la recuperación de la inversión, usando las siguientes formulas:

$$RentabilidadExigida = SaldoInversion \times PorcentajeRentabilidad$$

$$RecuperacionInversion = FlujoMensual - RentabilidadExigida$$

$$SaldoInversion = SaldoInversion - ReperacionInversion$$

Usando las anteriores ecuaciones construimos las siguientes Tablas

Tabla M1. Primer Año.

Saldo Inversión [COP]	Flujo Mensual [COP]	Rentabilidad [COP]	Recuperación Inversión [COP]
3,300,000.00	80,000.00	33,000.00	47,000.00
3,253,000.00	80,000.00	32,530.00	47,470.00
3,205,530.00	80,000.00	32,055.30	47,944.70
3,157,585.30	80,000.00	31,575.85	48,424.15
3,109,161.15	80,000.00	31,091.61	48,908.39
3,060,252.76	80,000.00	30,602.53	49,397.47
3,010,855.29	80,000.00	30,108.55	49,891.45
2,960,963.85	80,000.00	29,609.64	50,390.36
2,910,573.48	80,000.00	29,105.73	50,894.27
2,859,679.22	80,000.00	28,596.79	51,403.21
2,808,276.01	80,000.00	28,082.76	51,917.24
2,756,358.77	80,000.00	27,563.59	52,436.41

Tabla M2. Segundo Año.

Saldo Inversión [COP]	Flujo Mensual [COP]	Rentabilidad [COP]	Recuperación Inversión [COP]
2,703,922.36	80,000.00	27,039.22	52,960.78
2,650,961.58	80,000.00	26,509.62	53,490.38
2,597,471.20	80,000.00	25,974.71	54,025.29
2,543,445.91	80,000.00	25,434.46	54,565.54
2,488,880.37	80,000.00	24,888.80	55,111.20
2,433,769.17	80,000.00	24,337.69	55,662.31
2,378,106.86	80,000.00	23,781.07	56,218.93
2,321,887.93	80,000.00	23,218.88	56,781.12
2,265,106.81	80,000.00	22,651.07	57,348.93
2,207,757.88	80,000.00	22,077.58	57,922.42
2,149,835.46	80,000.00	21,498.35	58,501.65
2,091,333.81	80,000.00	20,913.34	59,086.66

Tabla M3. Tercer Año.

Saldo Inversión [COP]	Flujo Mensual [COP]	Rentabilidad [COP]	Recuperación Inversión [COP]
2,032,247.15	80,000.00	20,322.47	59,677.53
1,972,569.62	80,000.00	19,725.70	60,274.30
1,912,295.32	80,000.00	19,122.95	60,877.05
1,851,418.27	80,000.00	18,514.18	61,485.82
1,789,932.46	80,000.00	17,899.32	62,100.68
1,727,831.78	80,000.00	17,278.32	62,721.68
1,665,110.10	80,000.00	16,651.10	63,348.90
1,601,761.20	80,000.00	16,017.61	63,982.39
1,537,778.81	80,000.00	15,377.79	64,622.21
1,473,156.60	80,000.00	14,731.57	65,268.43
1,407,888.17	80,000.00	14,078.88	65,921.12
1,341,967.05	80,000.00	13,419.67	66,580.33

Tabla M4. Cuarto Año.

Saldo Inversión [COP]	Flujo Mensual [COP]	Rentabilidad [COP]	Recuperación Inversión [COP]
1,275,386.72	80,000.00	12,753.87	67,246.13
1,208,140.58	80,000.00	12,081.41	67,918.59
1,140,221.99	80,000.00	11,402.22	68,597.78
1,071,624.21	80,000.00	10,716.24	69,283.76
1,002,340.45	80,000.00	10,023.40	69,976.60
932,363.86	80,000.00	9,323.64	70,676.36
861,687.50	80,000.00	8,616.87	71,383.13
790,304.37	80,000.00	7,903.04	72,096.96
718,207.41	80,000.00	7,182.07	72,817.93
645,389.49	80,000.00	6,453.89	73,546.11
571,843.38	80,000.00	5,718.43	74,281.57
497,561.82	80,000.00	4,975.62	75,024.38

Tabla M5. Quinto Año.

Saldo Inversión [COP]	Flujo Mensual [COP]	Rentabilidad [COP]	Recuperación Inversión [COP]
422,537.43	80,000.00	4,225.37	75,774.63
346,762.81	80,000.00	3,467.63	76,532.37
270,230.44	80,000.00	2,702.30	77,297.70
192,932.74	80,000.00	1,929.33	78,070.67
114,862.07	80,000.00	1,148.62	78,851.38
36,010.69	80,000.00	360.11	79,639.89
-43,629.20	80,000.00	-436.29	80,436.29
-124,065.50	80,000.00	-1,240.65	81,240.65
-205,306.15	80,000.00	-2,053.06	82,053.06
-287,359.21	80,000.00	-2,873.59	82,873.59
-370,232.80	80,000.00	-3,702.33	83,702.33
-453,935.13	80,000.00	-4,539.35	84,539.35

Saldo después de recuperar la inversión: 538,474.48

Como vemos en la Tabla L5, a mediados del quinto se recupera por completo la inversión lo que significa que de ese momento en adelante el saldo a la inversión se convierte en una ganancia, lo que explica el cambio de signo en la columna.