

DISEÑO DE UNA EXTRUSORA PARA LA FABRICACION DE FILAMENTO DE
IMPRESION 3D POR FDM UTILIZANDO MATERIAL PLASTICO PET
RECICLADO

ESTUDIANTE
JUAN DAVID BARBOSA RODRIGUEZ

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
SECCIONAL BUCARAMANGA

2021

DISEÑO DE UNA EXTRUSORA PARA LA FABRICACION DE FILAMENTO DE
IMPRESION 3D POR FDM UTILIZANDO MATERIAL PLASTICO PET
RECICLADO

ESTUDIANTE
JUAN DAVID BARBOSA RODRIGUEZ

DIRECTOR
MSC. SERGIO ANDRÉS GÓMEZ SUÁREZ

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
SECCIONAL BUCARAMANGA

2021

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Floridablanca, Santander

AGRADECIMIENTOS

A mis padres principalmente, que son los dos pilares que me permitieron crecer y cumplir con una meta más en mi vida. A la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga por la formación profesional brindada. Al director del proyecto de grado el Ing. Sergio Andres Gómez Suárez por su guía y apoyo para realizar y culminar este proyecto. A los docentes que impartieron sus conocimientos y experiencias a lo largo de la carrera.

CONTENIDO

1	INTRODUCCION	12
2	ANTECEDENTES	13
3	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
4	JUSTIFICACION	17
5	OBJETIVOS	18
5.1	OBJETIVO GENERAL.....	18
5.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS	18
6	ALCANCE	19
7	MARCO TEORICO	20
7.1	TERMOPLASTICOS:	20
7.2	PROPIEDADES DE LOS TERMOPLASTICOS:	20
7.3	TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET):.....	21
7.4	PROCESO DE EXTRUSION:.....	21
7.5	PARAMETROS DEL PROCESO:.....	22
7.6	CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA DE UN TORNILLO EXTRUSOR	22
7.7	FABRICACION ADITIVA (AM)	24
7.8	MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA (FDM).....	25
8	METODOLOGIA	26
9	DESARROLLO DE IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS	28
9.1	OBJETIVOS DE REQUERIMIENTO	28
9.2	ANÁLISIS FUNCIONAL.....	30
9.2.1	CAJA NEGRA:.....	30
9.2.2	CAJA TRANSPARENTE:	31
9.3	FIJACIÓN DE REQUERIMIENTO	32
9.4	COMPETIDORES INDUSTRIALES Y ACADEMICAS	33
9.5	PARÁMETROS ESPECIFICOS	34
9.6	DETERMINACION DE CARACTERISTICAS.....	35
10	DESARROLLO DEL DISEÑO CONCEPTUAL	38
10.1	DIAGRAMA MORFOLOGICO.....	38
10.2	POSIBLES SOLUCIONES CONCEPTUALES	38
10.2.1	DISEÑO CONCEPTUAL 1	38
10.2.2	DISEÑO CONCEPTUAL 2.....	40
10.2.3	DISEÑO CONCEPTUAL 3.....	42
10.3	SELECCIÓN DEL DISEÑO CONCEPTUAL	44
11	DISEÑO DETALLADO	46
11.1	PARÁMETROS.....	46
11.2	DISEÑO DEL TORNILLO.....	47
11.3	ANÁLISIS DE RESISTENCIA DEL TORNILLO	61
11.4	DISEÑO DEL CILINDRO	66
11.5	DISEÑO DE LA TOLVA.....	68
11.6	DISEÑO DE LA BOQUILLA	71
11.7	DISEÑO DEL MUÑON	74
11.8	DISEÑO DEL SISTEMA TÉRMICO	75
11.8.1	RESISTENCIAS ELÉCTRICAS	78

11.8.2	CONTROLADOR DE LAS RESISTENCIAS	79
11.9	DILATACION TERMICA	81
11.10	SELECCIÓN DEL SISTEMA DE ACCIONAMIENTO DEL TORNILLO	82
11.11	MOTOR.....	82
11.12	REDUCTOR DE VELOCIDAD	83
11.13	CONTROL DE VELOCIDAD	84
11.14	FUENTE DE ALIMENTACIÓN	85
11.15	DISEÑO DE LA ESTRUCTURA	86
11.16	MAQUINA EXTRUSORA	86
11.17	OPERACIONES DE FABRICACIÓN DE LA MAQUINA EXTRUSORA	89
11.18	FASES DE ENSAMBLAJE	91
12	CONCLUSIONES.....	96
13	ANEXOS 1.....	104

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades de Tereftalato de polietileno	21
Tabla 2. Objetivos principales y secundarios	29
Tabla 3. Componentes	32
Tabla 4. Características de extrusoras a nivel industrial	33
Tabla 5. Características de extrusoras a nivel académico	34
Tabla 6. Características técnicas del diseño	34
Tabla 7. Diagrama morfológico	38
Tabla 8. Componentes del diseño conceptual 1.....	39
Tabla 9. Componentes del diseño conceptual 2.....	41
Tabla 10. Componentes del diseño conceptual 3.....	43
Tabla 11. Evaluación de objetivos ponderados de los tres diseños conceptuales	45
Tabla 12. Guía de temperatura por zona	46
Tabla 13. Tiempo de secado para el procesamiento del PET	47
Tabla 14. Propiedades del material PET	47
Tabla 15. Diámetros comunes de tornillos en el mercado.....	48
Tabla 16. Ventajas de tornillo con relación de longitud y diámetro (L/D) corta y larga	48
Tabla 17. Viscosidad efectiva en función de la temperature	54
Tabla 18. Parámetros de diseño del tornillo	60
Tabla 19. Características del polímero y material de tornillo	64
Tabla 20. Ficha técnica del acero AISI 4140	65
Tabla 21. Parámetros del tornillo extrusor.....	66
Tabla 22. Parámetros de diseño del cilindro	68
Tabla 23. Parámetros de diseño de la tolva	70
Tabla 24. Parámetros de diseño del cabezal	74
Tabla 25. Parámetros de diseño del muñón y vástago	75
Tabla 26. Propiedades térmicas del acero AISI 4140	77
Tabla 27. Parámetros de diseño de las resistencias eléctricas	78
Tabla 28. Características de la resistencia eléctrica	78
Tabla 29. Características del controlador de temperatura PID.....	79
Tabla 30. Características del relé de estado sólido.....	80
Tabla 31. Características del motor eléctrico del tornillo extrusor	83
Tabla 32. Características del reductor DEVO.....	84
Tabla 33. Características del controlador de velocidad PWD	85
Tabla 34. Características de la fuente de alimentación.....	85
Tabla 35. Componentes de la maquina extrusora.....	87
Tabla 36. Resumen de las operaciones de fabricación de la maquina	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Componentes y características de una extrusora	22
Figura 2. Seccion detallada de la extrusor	23
Figura 3. Diagrama de metodología	26
Figura 4. Arbol de objetivos.....	29
Figura 5. Diagrama del sistema del modelo de la caja negra.....	30
Figura 6. Diagrama de la caja transparente	31
Figura 7. Casa de la calidad.....	36
Figura 8. Vista isométrica del diseño conceptual 1	39
Figura 9. Vista seccionada del diseño conceptual 1.....	40
Figura 10. Vista isométrica del diseño conceptual 2	41
Figura 11. Vista isométrica sin carcasa del diseño conceptual 2	42
Figura 12. Vista seccionada del diseño conceptual 2.....	42
Figura 13. Vista isométrica del diseño conceptual 3	43
Figura 14. Vista isométrica sin carcasa del diseño conceptual 3	44
Figura 15. Vista superior del diseño conceptual 3.....	44
Figura 16. Salida de material de tornillos de una y dos etapas sencillos en proporción con la relación L/D.....	49
Figura 17. Configuración geométrica del tornillo	50
Figura 18. Grafica curvas viscosidad efectiva vs velocidad de corte de PET virgen y reciclado	53
Figura 19. Diagrama de fuerzas del tornillo extrusor.....	61
Figura 20. Garganta de alimentación	68
Figura 21. Dimensiones de la tolva	70
Figura 22. Dimensiones de la boquilla de extrusión	72
Figura 23. Plato rompedor.....	73
Figura 24. Resistencia eléctrica de banda de acero inoxidable.....	78
Figura 25. Controlador PID REX-C100 y relé de estado sólido SSR-40 AD	79
Figura 26. Entradas y salidas del circuito eléctrico del controlador PID	80
Figura 27. Entradas y salidas del circuito eléctrico del SSR	80
Figura 28. Diagrama del circuito eléctrico del sistema térmico.....	81
Figura 29. Motor eléctrico Ampflow	83
Figura 30. Reductor de velocidad DEVO	83
Figura 31. Controlador de velocidad DRIV-PWM-36V-360W	84
Figura 32. Fuente de alimentación LRS-150-24.....	85
Figura 33. Diagrama del circuito eléctrico del control de velocidad del motor.....	86
Figura 34. Estructura con soporte externo para el motor y partes internas con cubierta superior.....	86
Figura 35. Vista isométrica de la maquina extrusora.....	88
Figura 36. Vista isométrica seccionada de la extrusora	88
Figura 37. Diagrama de operaciones de fabricación de los componentes	90
Figura 38. Vista explosionada de la extrusora.....	92
Figura 39. Ensamble del tornillo, cilindro y estructura	92
Figura 40. Ensamble de la boquilla, cabezal, plato rompedor y cilindro.....	93
Figura 41. Ensamble del motor, reductor y tornillo	93

Figura 42. Ensamble de la tolva al cilindro	93
Figura 43. Ensamble de las resistencias eléctricas y cilindro.....	94
Figura 44. Ensamble del sistema del control de temperatura y del motor en la estructura	94
Figura 45. Ensamble de la cubierta de la estructura	95

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: DISEÑO DE UNA EXTRUSORA PARA LA FABRICACIÓN DE FILAMENTO DE IMPRESIÓN 3D POR FDM UTILIZANDO MATERIAL PLÁSTICO PET RECICLADO

AUTOR(ES): JUAN DAVID BARBOSA RODRIGUEZ

PROGRAMA: FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR(A): MSC. SERGIO ANDRES GOMEZ SUAREZ

RESUMEN

La fabricación masiva de productos plásticos de un solo uso como envases que son en su mayoría de material PET, provocan cada vez más una enorme contaminación a nivel global, ya que la cantidad de este material reciclado es muy reducido. Aun así, ha ido creciendo la implementación de técnicas para el aprovechamiento de los residuos plásticos, tal como el reciclaje mecánico que es una de las alternativas más desarrolladas para recuperar esta clase de residuos. Este tipo de reciclaje procesa el material para finalmente ser transformado en un producto reutilizable mediante una máquina extrusora. Al mismo tiempo, la fabricación aditiva mediante la impresión 3D se ha tornado en una solución viable y económica para la reutilización de residuos plásticos. Por esta razón, surge la idea de diseñar una máquina extrusora para la fabricación de filamento para impresión 3D a partir de material PET reciclado. El proyecto presenta una investigación relacionada al material y al diseño de la máquina, la cual está conformada por una parte conceptual y otra detallada, donde se tiene en cuenta la información recopilada en el árbol de objetivos, análisis funcional, fijación de requerimientos, análisis de competidores, relación de características y parámetros en la casa de calidad, componentes propuestos en el diagrama morfológico para la selección del diseño conceptual, dimensiones, cálculos, selección de los componentes, planos y etapas de fabricación.

PALABRAS CLAVE:

Plástico PET, contaminación, reciclaje mecánico, extrusora, fabricación aditiva, impresión 3D

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: DESIGN OF AN EXTRUDER FOR THE MANUFACTURE OF 3D PRINTING FILAMENT BY FDM USING RECYCLED PET PLASTIC MATERIAL

AUTHOR(S): JUAN DAVID BARBOSA RODRIGUEZ

FACULTY: FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

DIRECTOR: MSC. SERGIO ANDRES GOMEZ SUAREZ

ABSTRACT

The mass manufacture of single use plastic products such as containers that are mostly made of PET material, increasingly cause enormous pollution at a global level, since the amount of this recycled material is very small. Even so, the implementation of techniques for the use of plastic waste has been growing, such as mechanical recycling, which is one of the most developed alternatives to recover this kind of waste. This type of recycling processes the material to finally be transformed into a reusable product by means of an extruder machine. At the same time, additive manufacturing through 3D printing has become a viable and economical solution for the reuse of plastic waste. For this reason, the idea arose to design an extruder machine to manufacture filament for 3D printing from recycled PET material. The project presents an investigation related to the material and the design of the machine, which is made up of a conceptual and a detailed part, where the information collected in the objective tree, functional analysis, requirements setting, analysis of competitors, relation of characteristics and parameters in the quality house, components proposed in the morphological diagram for the selection of the conceptual design, dimensions, calculations, selection of components, plans and manufacturing stages.

KEYWORDS:

PET plastic, pollution, mechanical recycling, extruder, additive manufacturing, 3D printing

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

1 INTRODUCCION

La fabricación de productos plásticos de tipo PET como son las botellas o envases de distintas formas es cada vez mayor, por lo que la reutilización de este material es fundamental para la disminución de la contaminación, y es ahí donde técnicas como el reciclaje mecánico y tecnologías como la fabricación aditiva, permiten procesar y reutilizar material plástico de diferente tipo.

La técnica del reciclaje mecánico está compuesta por etapas para procesar los residuos plásticos tales como la recolección, clasificación, limpieza y secado del material para finalmente ser procesado por una maquina extrusora generando un producto reutilizable. Por tal razón, la fabricación aditiva puede aprovechar este tipo de técnica para poner en circulación este material reciclado como insumo para impresoras 3D.

Por lo tanto, este proyecto tiene como objetivo diseñar una maquina extrusora con la capacidad de procesar material PET reciclado para obtener filamento como insumo para impresoras 3D, de esta forma se aporta al aprovechamiento de los residuos plásticos y a la disminución de la contaminación.

2 ANTECEDENTES

En la última década, la creciente adopción de la fabricación aditiva, ha dado un impulso a nuevas formas de tratamiento y aprovechamiento de los residuos plásticos a través del reciclaje mecánico, con el que se podrá fabricar insumos sostenibles para la impresión 3D que serán más asequibles debido a que se reducirán sus costos de producción por venir de un material reciclado, tal como lo indican Ramos y Lombana [1] en su tesis “Diseño e implementación de un sistema de extrusión de filamento para impresión 3D a partir de botellas recicladas”, donde tuvieron como objetivo generar filamento con residuos plásticos de botellas mediante un sistema de extrusión diseñado a través del desarrollo conceptual, el diseño a nivel sistemático, el diseño detallado y finalmente con pruebas y refinamiento. Las pruebas se realizaron en los materiales plásticos más comunes como RPET, PP, HDPE y PS, siendo triturados hasta diámetros inferiores a los 8 mm para un mejor proceso de extrusión, demostrando que los plásticos seleccionados para el proyecto que más se destacan en el proceso y con acabados sobresalientes son el PP y el HDPE.

La fabricación aditiva tiene la capacidad de reducir los costos de producción y aumentar la sostenibilidad a partir de métodos de reciclaje que aprovechan los desechos plásticos más comunes y fáciles de reciclar como lo es el material PET que fue utilizado por Zander, Gillan y Lambeth [2] en su proyecto “Recycled polyethylene terephthalate as a new FFF feedstock material” en el que desarrollaron filamento para impresión 3D mediante botellas y empaques reciclados de este material sin utilizar aditivos o modificando el material y evaluando sus propiedades térmicas y mecánicas en distintas condiciones de procesamiento, además realizando pruebas de tracción y flexibilidad a las muestras impresas obteniendo resultados similares a ciertos tipos de filamentos comerciales, lo que lo habilita como material reutilizable para la impresión 3D.

Por otro lado, la fabricación aditiva ha ido fomentando avances en la producción de insumos para impresión 3D a partir no solo de material PET sino también de residuos de impresiones con filamento comercial tal como se observa en el proyecto de Esquivel, Jimenez y Mena [3] titulado “Diseño de una máquina extrusora de filamento termoplástico alimentada por desechos plásticos”, en el que se enfocaron en diseñar una extrusora con la capacidad de procesar residuos plásticos de material PET y ABS en filamento para impresión 3D. Los resultados obtenidos de la máquina les indicaron que hay dos parámetros críticos que son el largo del canal del dado de extrusión debido que se ve afectado por la presión que se genera en el material, por lo que se requiere reducir el largor, y el otro parámetro fue el ángulo del dado donde se recomienda no usar ángulos elevados para así asegurar el flujo adecuado del material.

Aunque la fabricación aditiva es considerada por utilizar cada vez menos cantidad de material para desarrollar productos, no dejan de aparecer residuos en cada impresión que pueden volver a ser reutilizados como lo explica Kotsar [4] en su

proyecto titulado “Filament extrusion of recycled polylactic acid and its suitability for three-dimensional printing”, en el cual aplicaron procesos de reciclaje mecánico de los residuos del plástico PLA de las impresiones con el objetivo de fabricar filamento reciclado de este material y realizar una comparación con filamento virgen del mismo tipo a través de pruebas de tracción, mediante la comparación de los métodos y hardware que se utilizan en el proceso de extrusión del filamento, la impresión 3D de las muestras y finalmente con el análisis de tracción demostraron que se puede obtener filamento reutilizable de residuos plásticos PLA con propiedades ligeramente por debajo al filamento virgen debido al reprocesamiento, además agregan que se requiere ajustar adecuadamente los parámetros de extrusión prestando atención al diámetro del filamento.

Con los avances de la tecnología, las extrusoras se han tornado más rápidas y compactas abarcando diferentes tipos de termoplásticos incluyendo material reciclado tal como lo realiza Ortiz [5] en su proyecto “Diseño y construcción de una máquina extrusora de filamento de 1,75 mm y 3 mm para impresoras 3D, a partir de polímero reciclado” con el objetivo de realizar pruebas mecánicas a filamento fabricado a partir de residuos termoplásticos tales como ABS o PLA provenientes de procesos de impresión para determinar su viabilidad en la fabricación aditiva. Utilizo el método inductivo para mejorar el proceso de extrusión mediante el control de las variables para obtener filamento con material reciclado y a bajo costo, por otro lado aplico el método experimental para realizar las pruebas para corregir las posibles fallas y cumplir con los requisitos para su reutilización en la impresión 3D, pero sus resultados obtenidos demuestran que requiere un sistema de control del diámetro y de temperatura para que el filamento sea viable para la impresión 3D.

El desarrollo de prototipos a través del método de hardware de código abierto impulsa la creación de máquinas como Woern, McCaslin, Pringle y Pearce [6] que lo describen en su proyecto “RepRapable Recyclebot: Open source 3-D printable extruder for converting plastic to 3-D printing filament”, donde implementaron este método junto al desarrollo de prototipos rápidos (RepRap) de la comunidad de impresoras 3D para fabricar funcionalmente un robot extrusor de desechos de plástico reciclado para generar filamento de calidad para impresoras 3D. Su prototipo obtuvo filamento de polímeros con temperaturas de extrusión por debajo de los 250 °C permitiendo la fabricación de filamento en diferentes tipos de polímeros, además, el sistema ofrece mayor control debido a su diseño modular.

Aunque la fabricación aditiva tiene la capacidad de desarrollar piezas de gran variedad con plástico reciclado, aun continua siendo limitado a pesar de la cantidad de residuos que se encuentran, por esta razón investigaciones desarrollan formas de aumentar el proceso de fabricación de este insumo tal como lo realizó Herianto, Atsani y Mastriswadi [7] en el proyecto de investigación “Recycled Polypropylene Filament for 3D Printer: Extrusion Process Parameter Optimization”, que tuvieron el objetivo de mejorar el proceso de extrusión optimizando los parámetros para la fabricación de filamento utilizando plástico de PP reciclado, mediante el método Taguchi para identificar el nivel óptimo de los parámetros y el método ANOVA para determinar la relación de las variables con los parámetros en el proceso de extrusión

pero aun así requieren mayor información para su viabilidad en la impresión 3D ya que obtuvieron filamento con una superficie rugosa y con un diámetro promedio de 1,6 mm a partir de los parámetros arrojados por el método Taguchi.

3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente, se fabrican cientos de millones de toneladas de plásticos en el mundo, y gran parte de estos se transforman en residuos contaminantes ya que solo se recicla el 9% de este material al año [8]. Además, los recipientes, botellas y envases son los productos plásticos que más se fabrican y en su mayoría están hechos para un solo uso [9], donde se conoce que se llegan a producir más de 500 mil millones de botellas de este material al año [10].

En Colombia, se reciclan 25 botellas de cada 100 que se fabrican, por lo que una gran cantidad de este material no es desechado adecuadamente y aunque los productores están interesados en reutilizar el plástico reciclado, aun falta articular a los consumidores en la cadena de reciclaje [11]. De igual manera, ciudades como Bucaramanga registran un 2% de reciclaje de los desechos sólidos, por lo que la mayor parte del plástico de estos residuos no se están aprovechando [12].

Por otro lado, la industria 4.0 ha tenido grandes avances en la manufacturación sostenible debido a la utilización del plástico en la fabricación aditiva en especial con la impresión 3D por modelado por deposición fundida (FDM), ya que permite utilizar menos material para fabricar piezas y así generar menos residuos [13]. Aun así los insumos para la impresión 3D tienen costos elevados por lo que se debe tener un buen manejo y rendimiento ya que en muchas piezas se pierde material por fallas o en soportes [14]. Por tal razón, se requiere el diseño de una máquina extrusora con el fin de aprovechar los residuos plásticos PET para fabricar filamento funcional y de menor costo para impresión 3D más sostenible.

4 JUSTIFICACION

Aunque el material PET es uno de los plásticos con mayor capacidad de reciclaje debido a sus propiedades y facilidad de recolección por ser utilizado para la fabricación en masa de botellas plásticas, tiene un bajo índice de reciclaje ya que en países como Colombia se fabrican alrededor de 12 millones de botellas de este material al día, de los cuales solo se alcanzan a reciclar el 25 por ciento [15].

Por otro lado, la fabricación aditiva le ha dado interés a la reutilización de los residuos de material PET como insumo, aun que este material no se utiliza normalmente sin procesar en la impresión 3D debido a que puede resultar quebradizo, de tal forma que se le hace una modificación agregándole glicol para volverlo mas apto al proceso de impresión, ya que resulta con mejores propiedades de resistencia y durabilidad y con mayor facilidad de usar en el proceso que filamentos comerciales, ademas de ser 100% recuperable [16].

Lo cual resulta relevante el diseño de una maquina extrusora como una alternativa para aportar a la reducción y reutilización de los residuos plásticos de material PET para fabricar filamento funcional de bajo costo y accesible, ademas de incentivar el diseño de piezas impresas 3D con un enfoque más sostenible.

5 OBJETIVOS

5.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar una extrusora para fabricar filamento en base de material plástico PET reciclado a través de la metodología de diseño de Nigel Cross.

5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- ✓ Identificar las características claves, funciones y requerimientos que se deben tener en cuenta para la conceptualización de la máquina de extrusión.
Indicador: Mínimo cuatro características, funciones o requerimientos para la maquina según árbol de objetivo y diagrama de funciones de la máquina.
Resultado: Características, funciones y requerimientos para el diseño maquina

- ✓ Establecer soluciones conceptuales para el diseño de una máquina de extrusora que permitan obtener filamento PET para ser utilizada en impresora 3D.
Indicador: Mínimo tres esquemas de solución según método de diagrama morfologico
Resultado: Esquemas conceptuales de solución en software CAD

- ✓ Seleccionar solución conceptual más adecuada para el diseño de la maquina extrusora.
Indicador: Mínimo cuatro factores evaluados para elegir la más adecuada por método de objetivos ponderados.
Resultado: Selección de la solución conceptual

- ✓ Diseñar detalladamente los componentes de la máquina de extrusión obteniendo la lista completa de componentes, agrupados según sea necesario en subensambles con sus funciones identificadas.
Indicador: Planos de detalles, materiales, lista de componentes, procedimiento de fabricación de min.
Resultado: Planos de detalle, cálculos mecánicos, cálculos térmicos, lista de componentes, materiales, fases de fabricación.

6 ALCANCE

En el alcance de este proyecto comprende la realización del diseño de una maquina extrusora con la capacidad de fabricar filamento para impresión 3D por FDM a partir de residuos de material plástico PET. Se entrega un prototipo en software CAD, planos, etapas de fabricación junto con la descripción de los componentes a detalle. Por lo tanto, no se realizo la fabricación física de la maquina ni de ningún modelo a escala.

7 MARCO TEORICO

7.1 TERMOPLASTICOS:

Los polímeros termoplásticos se caracterizan por comportarse como un líquido viscoso a elevadas temperaturas, lo cual les permite moldearse o adoptar formas con mayor facilidad a través de distintos procesos para obtener finalmente una pieza que a temperatura ambiente se solidifica, además no se degradan significativamente si el material ha pasado varias veces por el ciclo de calentamiento.

Los termoplásticos son los polímeros con mayor relevancia en el sector comercial ya que abarcan un 70 por ciento del peso total de la producción de todos los polímeros sintéticos en el mercado [17].

7.2 PROPIEDADES DE LOS TERMOPLASTICOS:

La mayoría de los termoplásticos son completamente amorfos o bien pueden ser semicristalinos, es decir, que cuentan con un componente amorfo a pesar de ser cristalinos. Las propiedades mecánicas de estos termoplásticos presentan cambios cuando están cerca a la temperatura de transición vítrea, tal como pasa con los termoplásticos amorfos que son rígidos cuando están por debajo de esta temperatura, y son flexibles y blandos cuando están sobre ella, por lo que se vuelven moldeables [18].

Por otro lado, los polímeros fundidos son aquellos materiales termoplásticos que han sido calentados para ser tratados, ya que se encuentran de manera fluida y que presentan una propiedad llamada viscoelasticidad que es una combinación entre viscosidad y elasticidad, por lo cual a temperaturas altas presentan un comportamiento viscoso y a temperaturas bajas presentan un comportamiento elástico, pero cuando la temperatura aumenta por arriba de la temperatura de transición vítrea, se vuelven viscoelásticos, es decir, adoptan una deformación que esta en función de la temperatura y del tiempo. Por tal razón esta propiedad es relevante en el procesamiento de estos materiales debido que la mayoría de los métodos para dar forma implican el flujo del polímero fundido a través de canales u orificios diminutos [17].

Las propiedades presentes en el material virgen para el moldeo de plásticos tiene resultados tan solo aceptables en ciertas aplicaciones en comparación con los termoplásticos provenientes de residuos o piezas desechadas, debido a que se han deteriorado químicamente por cada ciclo térmico por el que han sido procesados [17].

7.3 TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET):

El PET además de ser uno de los polímeros representativos de los termoplásticos, también es un poliéster por lo que está caracterizado por las uniones del éster (CO-O). Este polímero tiene también la característica de ser amorfo o tener hasta un grado de cristalinidad de 30% según la forma en que fue enfriado, ya que la velocidad en la que se enfría afecta su composición. Las principales aplicaciones de este material son la fabricación de botellas de bebidas moldeadas por soplado, pero también las fibras de este tipo de polímero cuentan con características como baja absorción de humedad y buena recuperación a la deformación, de tal manera que es un material adecuado para la industria textil. [17]

Polímero representativo:	Tereftalato de polietileno ($C_2H_4-C_8H_4O_2$) _n	Elongación:	200%
Símbolo:	PET	Gravedad específica:	1.3
Método de polimerización:	Etapas (condensación)	Temperatura de transición al vidrio:	70 °C (158 °F)
Grado de cristalinidad:	Amorfo a 30% cristalino	Temperatura de fusión:	265 °C (509 °F)
Módulo de elasticidad:	2 300 MPa (325 000 lb/in ²)	Participación aproximada en el mercado:	Alrededor de 2%
Resistencia a la tensión:	55 MPa (8 000 lb/in ²)		

Tabla 1. Propiedades de Tereftalato de polietileno [17]

7.4 PROCESO DE EXTRUSION:

El proceso de extrusión es fundamental para darle la forma alargada y continua al polímero, ya que se realiza mediante la compresión del material que es forzado a fluir a través de un orificio en el cual adquiere la sección transversal de este. De tal manera que se obtienen filamentos, tuberías, mangueras y otros tipos de productos [17].

El material es introducido en la tolva de la máquina extrusora para alimentar el tornillo rotatorio que tiene la función de mover el material a lo largo del barril de la máquina, donde se calienta y se funde, además de ser forzado a pasar a través del orificio del troquel para que adquiera la forma de filamento. La máquina extrusora cuenta con secciones dentro del proceso las cuales implican la sección de alimentación, donde el polímero es introducido y precalentado; se cuenta con una sección de compresión, en la que el material empieza a fluir y a ser comprimido; y por último tenemos la sección de medición, en la cual el material es homogeneizado al fundido y se produce la presión suficiente para realizar la extrusión [17].

El polímero fundido es transportado en los canales que se forman entre las paletas que van en espiral alrededor del tornillo extrusor, de tal forma que al girar el tornillo, las paletas empujan el polímero desde la tolva hasta el troquel a través de estos canales, y a medida que avanza se va aumentando la presión. Además, entre las paletas y el barril se haya un claro el cual tiene la función de limitar la fuga del polímero fundido por la parte posterior del canal. Cuando el polímero atraviesa la

sección de medición, la presión llega a su punto máximo debido a la reducción del canal y a la placa rompedora que filtra los grumos duros del polímero fundido, además de romper con el movimiento circular provocado por los giros del tornillo, ya que el material puede permanecer rotando dentro de la cámara de extrusión o troquel y deformar así el filamento [17].

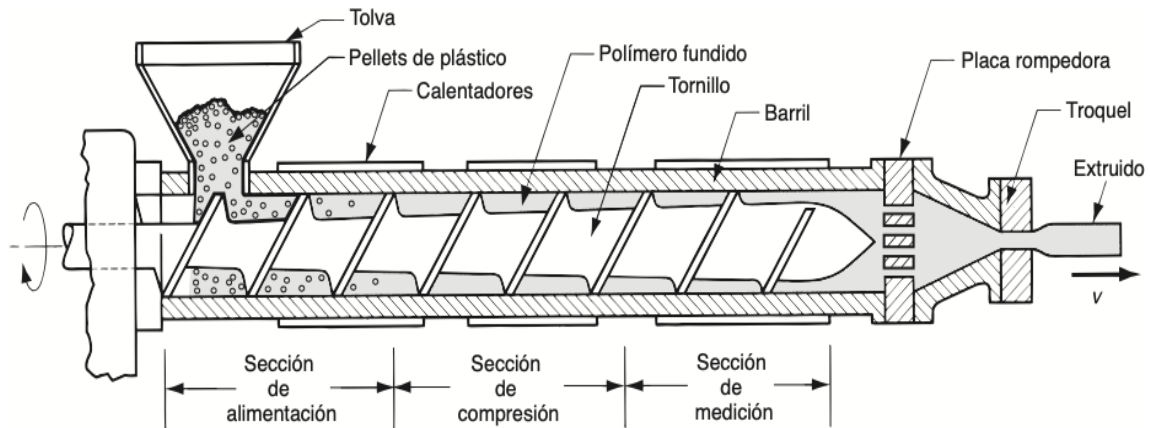


Figura 1. Componentes y características de una extrusora [17]

7.5 PARAMETROS DEL PROCESO:

En el diseño de la máquina comprenden parámetros tales como el diámetro de las paletas D , profundidad del canal d_c y el ángulo de la hélice A . En cambio, en la operación de la extrusora se presentan parámetros como la velocidad rotacional N , viscosidad del polímero fundido h y la presión piezométrica que es el gradiente de presión en el transcurso del barril, que son capaces de cambiar en el proceso y de afectar el flujo de extrusión [17].

7.6 CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA DE UN TORNILLO EXTRUSOR

Los parámetros a tener en cuenta en la extrusora se presentan en el flujo por arrastre que resulta de la fricción entre las superficies del canal por donde avanza el polímero, las paredes del barril que será la parte estacionaria y el líquido viscoso. De tal forma que la velocidad promedio del fluido es $0,5v$, lo que podría resultar en un caudal volumétrico de [17]:

$$Q_{\text{flujo por arrastre}} = 0.5 v d_c w_c$$

- Diámetro de la paleta alrededor del tornillo (D)
- Velocidad rotacional del tornillo (N)

- Profundidad del canal del tornillo (d_c)
- Ancho del canal del tornillo (w_c)
- Ángulo de la cuerda (A)
- Ancho del filo de la paleta (w_f)
- Velocidad de la placa móvil (v)

El diámetro de la paleta en relación al diámetro del barril, es mucho menor, alrededor de 0.05mm, de tal manera que se supone que es despreciable, por lo tanto, se tiene:

$$\tan A = \frac{p}{\pi D}$$

$$v = \pi D N \cos A$$

$$w_c = (\pi D \tan A - w_f) \cos A = \pi D \tan A \cos A = \pi D \sin A$$

$$Q_{\text{flujo por arrastre}} = 0.5\pi^2 D^2 N d_c \sin A \cos A$$

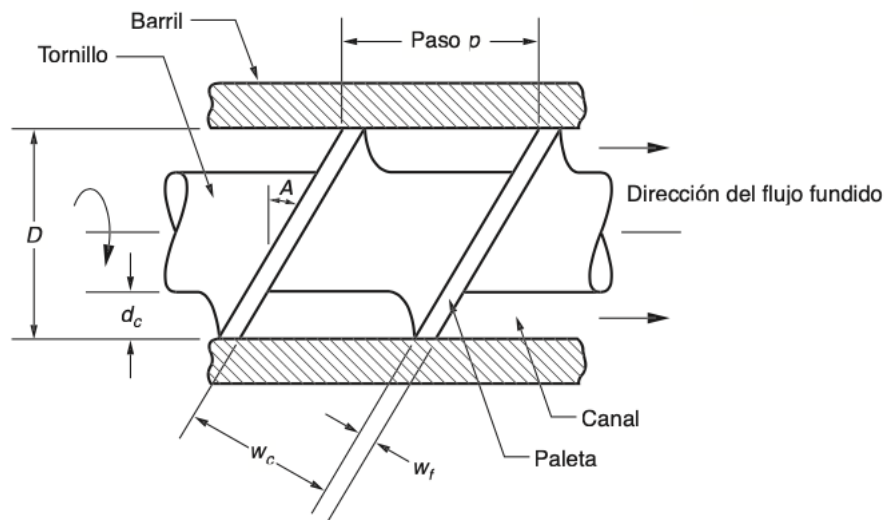


Figura 2. Sección detallada de la extrusor [17]

Cuando el polímero fundido es comprimido y forzado a través del troquel, se forma un flujo a contrapresión que podría disminuir el flujo de arrastre debido al pequeño espacio entre el barril y la paleta por donde se crea una fuga de flujo mínima. La causa de la fuga del fluido es por la reducción del polímero fundido en el canal

provocado por la contrapresión en la entrada del troquel. En el flujo a contrapresión entran en juego parámetros como la viscosidad del polímero fundido, las dimensiones del tornillo y el gradiente de presión real que es constante a lo largo del tornillo, de tal manera que se tiene [17]:

$$Q_{\text{flujo a contrapresion}} = \left(\frac{p\pi D d_c^3 \text{sen}^2 A}{12\eta L} \right)$$

En el proceso de extrusión, el flujo por arrastre sería máximo si el flujo a contrapresión es igual a cero. Por otro lado, no se produciría un flujo en el proceso si el flujo a contrapresión fuera igual al flujo por arrastre. De igual manera se requiere conocer la presión piezométrica máxima en el proceso ya que afectaría el flujo en el proceso.

$$Q_{\text{max}} = Q_{\text{flujo por arrastre}} - Q_{\text{flujo a contrapresion}}$$

$$p = \frac{6pDNL \cot A}{d_c^2}$$

$$Q_{\text{max}} = kp$$

$$k = \frac{pd^4}{128\eta L_d}$$

- Diámetro de la abertura del troquel (d)
- Viscosidad del fundido (η)
- Longitud de la abertura del troquel (L_d)
- Factor de forma para el troquel (k)
- Presión en el cilindro (p)

Estos últimos parámetros corresponden a las características del troquel y del extrusor, donde la forma del orificio del troquel establece la sección transversal del filamento extruido. De tal manera que el caudal en el troquel depende del tamaño y la forma de la abertura y de la presión ejercida en el polímero fundido [17].

7.7 FABRICACION ADITIVA (AM)

Es la tecnología que abarca los procesos de fabricación de objetos en 3D a través de la adición de capa sobre capa de un material mediante la utilización de un

software de diseño asistido por computadora (CAD) o de modelado 3D para la generación de los archivos que los equipos o máquinas van a leer y de esta forma crear un objeto 3D a partir de agregar una capa que sucesivamente se une a la capa anterior de material fundido parcial o completamente.

La fabricación aditiva está siendo utilizada para producir piezas finales en aeronaves, implantes médicos, automoción, además de suplir diversas necesidades como herramientas industriales o de visualización en diseño, crear productos personalizados para profesionales y consumidores o para producir pequeñas piezas en masa, ya que ofrece la accesibilidad para crear, personalizar y reparar productos.

Actualmente, existen diversos procesos tecnológicos de fabricación aditiva como [19]:

Estereolitografía (SLA)

Modelado Multi-Jet (MJM)

Modelado por deposición fundida (FDM)

Sinterización por láser selectiva (SLS)

7.8 MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA (FDM)

Las máquinas que funcionan mediante este método de impresión 3D están formadas básicamente por una placa o cama de impresión en donde se deposita el material, una base para la bobina del filamento que es el material con el cual se crean las piezas, además que tienen dimensiones de 1,75 mm o 3 mm de diámetro y un extrusor que se mueve sobre los ejes x, y y z.

La impresión 3D se empieza a realizar cuando la máquina alcanza la temperatura de fusión del material del filamento, para luego ser extruido y depositado de forma precisa capa por capa sobre la cama de impresión hasta crear la pieza en 3D [20].

8 METODOLOGIA

Para llevar a cabo los objetivos del proyecto se desarrolla un método de diseño a nivel conceptual y detallado basado en la metodología implementada por Nigel Cross en el libro “Métodos de diseño: estrategias para el diseño de productos” [21].

Metodología que describe el proceso de diseño, donde los círculos representan las etapas y los rectángulos representan las actividades en curso:

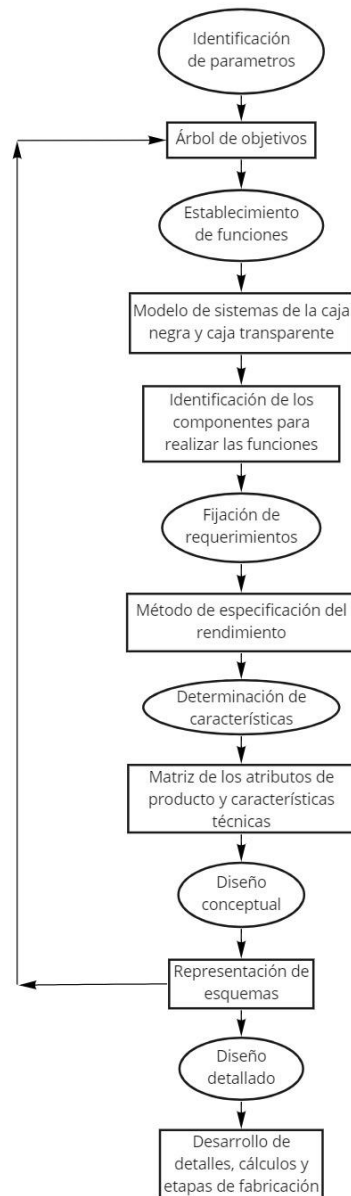


Figura 3. Diagrama de metodología

El proceso de diseño empezara con la recopilación y procesamiento de información para buscar las necesidades y requerimientos para determinar los parámetros, funciones y características técnicas, con esto se realizara el diseño conceptual con la generación de esquemas que darán solución al problema de diseño, para esto se desarrollaran las siguientes actividades dentro de las etapas:

- Recopilacion de información de los parametros
- Lista de los requerimiento de diseño
- Árbol de objetivos
- Sistema de la caja negra
- Diagrama de bloques mediante caja transparente
- Busqueda de los componentes apropiados para las funciones
- Considerar y determinar el nivel de generalidad en el que se va a trabajar
- Identificar los atributos de rendimiento requeridos
- Establecer requerimientos de rendimientos en términos cuantificables
- Analisis de atributos de producto y características técnicas
- Matriz de atributos y características técnicas
- Diagrama morfológico
- Análisis de combinaciones factibles
- Comparación y selección del concepto

En el diseño detallado se determinara la geometría de los componentes, la selección de los materiales, la definición de las etapas de fabricación, el modelado 3D en Solidworks, la generación de los planos y la elección del sistema de control y de temperatura.

9 DESARROLLO DE IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS

Para la identificación de los parámetros, se necesita pasar del planteamiento del problema a uno que muestre claramente los objetivos de diseño. Estos objetivos de diseño son los requerimientos que se deben satisfacer para el completo funcionamiento de la máquina. Para esto, se aplicó la metodología de árbol de objetivos que permite mostrar los requerimientos y los medios generales para alcanzarlos.

9.1 OBJETIVOS DE REQUERIMIENTO

En esta sección, se definen los objetivos de requerimiento mediante información bibliográfica. A partir de esto, se genera una lista de los objetivos para luego ser ordenada en conjuntos de mayor y menor nivel. Al último se realiza un diagrama del árbol de objetivos que muestra la relación entre ellos.

Lista de objetivos:

1. Seguridad
2. Durabilidad
3. Operación confiable
4. Mantenimiento sencillo
5. Generar poco ruido
6. Facilidad de operación
7. Fabricación sencilla
8. Económica
9. Ligera
10. Buena apariencia
11. Bajo riesgo de lesión al operador
12. Bajo riesgo de error del operador
13. Bajo riesgo de daño a los componentes
14. Paro automático de la máquina
15. Tipos de componentes
16. Material de los componentes
17. Operación sin interrupciones
18. Tolerancia a fallos
19. Cumplimiento del mantenimiento
20. Componentes sencillos
21. Mantenimiento rutinario sencillo
22. Componentes aislados
23. Sistema de control sencillo
24. Componentes fáciles de fabricar
25. Componentes asequibles
26. Fácil de ensamblar
27. Pocos componentes
28. Bajo consumo de energía
29. Componentes de bajo costo
30. Compacta
31. Componentes pequeños

A partir de la lista de los objetivos, se genera la table 2 que relaciona a los objetivos principales con los secundarios, de esta manera se tendrán en cuenta cuales objetivos se deben cumplir para satisfacer a los principales.

OBJETIVOS PRINCIPALES	OBJETIVOS SECUNDARIOS	
Seguridad	Bajo riesgo de lesión al operador	Paro automático de la maquina
	Bajo riesgo de error del operador	
	Bajo riesgo de daño a los components	
Durabilidad	Tipo de component	Material de los componentes
Operación confiable	Operación sin interrupciones	Cumplimiento del mantenimiento
	Tolerancia a fallos	
Mantenimiento sencillo	Mantenimiento rutinario sencillo	Componentes sencillos
Poco ruido de operación	Componentes aislados	
Facilidad de operación	Sistema de control sencillo	
Fabricación sencilla	Componentes fáciles de fabricar	Componentes estandarizados
	Componentes asequibles	Pocos componentes
	Fácil de ensamblar	Componentes sencillos
Económica	Bajo consumo de energía	
	Componentes de bajo costo	
Ligera	Compacta	Componentes pequeños
Buena apariencia		

Tabla 2. Objetivos principales y secundarios

El siguiente diagrama presenta el árbol de objetivos realizado a partir de la tabla 2 anterior, la cual permite la relación e interconexión entre cada objetivo principal con los secundarios.

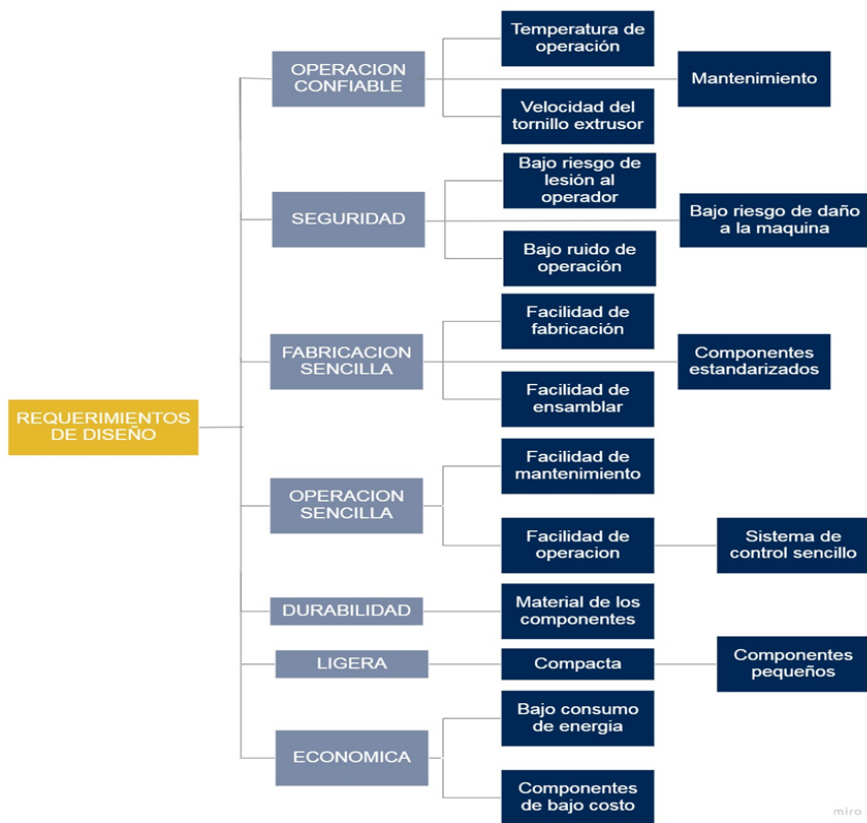


Figura 4. Arbol de objetivos

A partir de los requerimientos identificados mediante la generación del árbol de objetivos, se conoce que la máquina debe ser económica, por lo que debe tener un bajo consumo de energía, y estar compuesta por componentes asequibles de bajo costo. Por otro lado, estos componentes deben estar fabricados con materiales con buena durabilidad. Mediante la correcta operación, se obtiene una operación sin interrupciones que se realiza a través de tener un sistema de control sencillo, siendo fácil, confiable y segura ya que se disminuyen riesgos como riesgo por error del operador. Se requiere que sea ligera para transportar, para esto es necesario componentes pequeños que la permitan ser compacta y que proporcionen un ensamblaje sencillo.

9.2 ANALISIS FUNCIONAL

En esta sección, se consideran las funciones esenciales que un tipo de solución debe lograr y no en cómo se va a lograr, de esta manera, se establecen límites alrededor de un subconjunto de funciones. Por esta razón, se aplica el modelo de sistema de la caja negra para expresar la función global del diseño en términos de la conversión de entradas en salidas, y mediante el método de la caja transparente, se realiza un diagrama de bloques que muestra las relaciones entre las funciones secundarias que se encargan de lograr en conjunto la función global.

9.2.1 CAJA NEGRA:

La función global del diseño consiste en convertir la entrada de material PET reciclado en la salida de filamento PET extruido. Aun así, dentro del proceso se incorpora las entradas de energía eléctrica y las señales del operador a través del sistema de control, por lo que se obtienen las salidas del consumo y pérdida de energía e información de medición de las señales del operador.

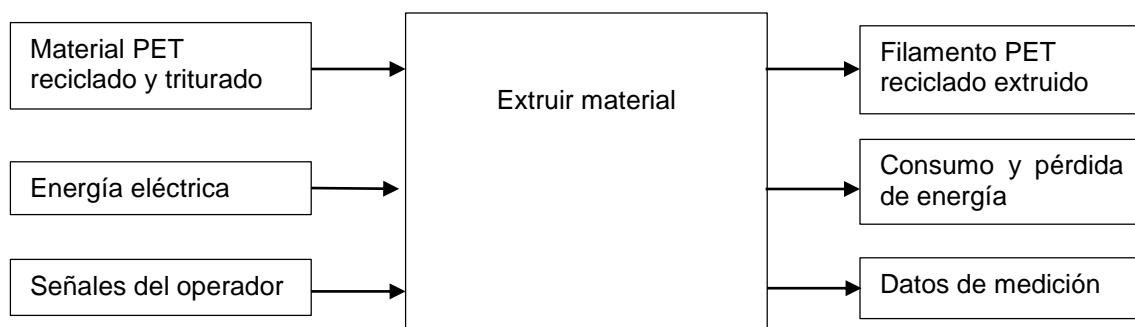


Figura 5. Diagrama del sistema del modelo de la caja negra

9.2.2 CAJA TRANSPARENTE:

A partir de la caja negra, las funciones secundarias para convertir el material PET reciclado, junto con las demás entradas y salidas relevantes, están indicadas en el diagrama de la caja transparente que muestra cada una de las funciones requeridas dentro de los límites del sistema para realizar en conjunto la función global.

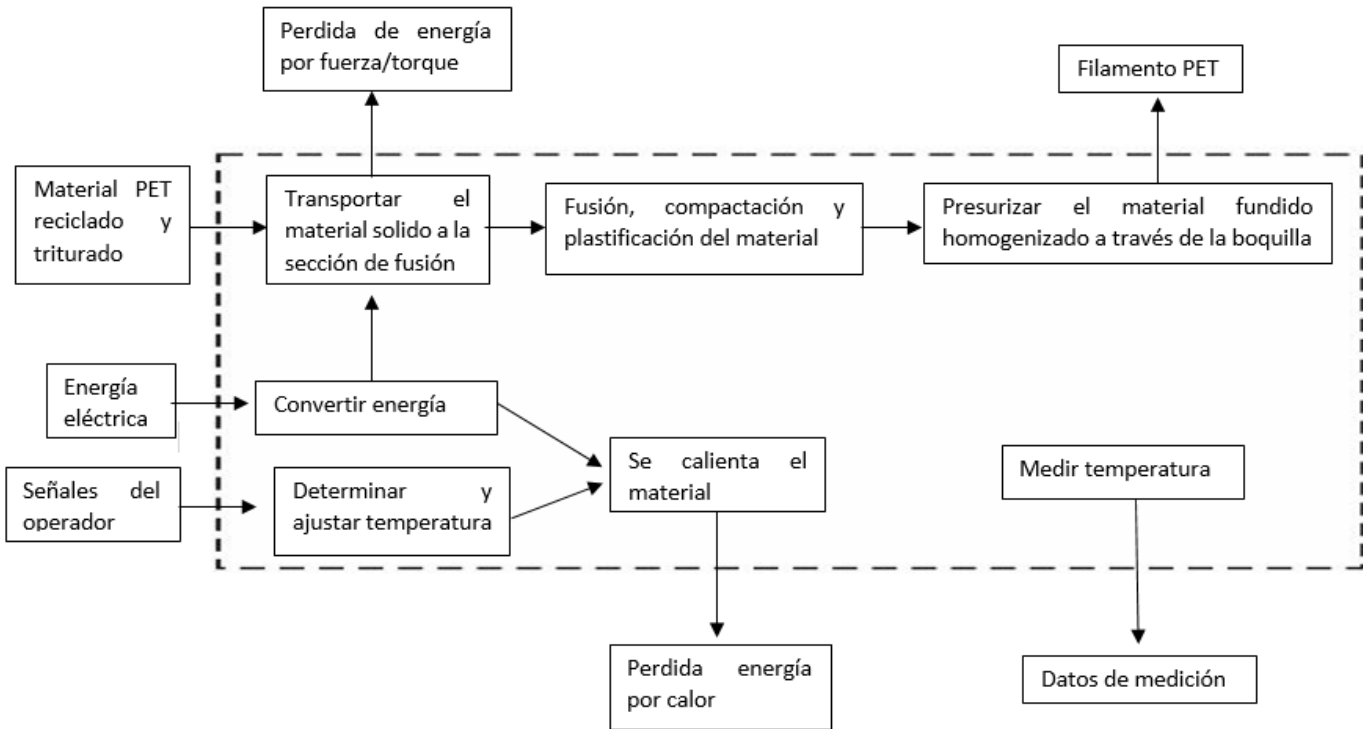


Figura 6. Diagrama de la caja transparente

Según el diagrama de funciones de la caja transparente, se definieron los siguientes componentes necesarios que deberá tener la máquina para su operación.

COMPONENTES	DESCRIPCION:	FUNCION
Tolva	Contiene el material que entra a la zona de alimentación del tornillo.	Contiene el material que se introduce a la extrusora.
Sección de alimentación del tornillo	La profundidad del canal del tornillo en esta sección es máxima debido que recibe el material en forma sólida para compactarla y transportarla a una velocidad adecuada a la sección de compresión.	Transporte del material.
Sección de compresión del tornillo	La profundidad del canal disminuye de forma gradual por lo que el material se va compactando aún más y el aire que puede quedar atrapado escapa del material vía la tolva mientras se realiza la fusión del material.	Presurizado del material.

Sección de dosificado del tornillo	La profundidad del canal es la más reducida y constante además de ser la más cercana a la boquilla. En esta sección el material fundido es homogeneizado y presurizado para forzarlo a atravesar a presión la boquilla de conformado.	Homogeneización del material.
Tornillo de extrusión	Parte principal de la extrusora ya que se obtiene la estabilidad del proceso y calidad del producto.	Transportar, calentar, fundir y mezclar el material.
Cilindro	A través del cilindro se transfiere calor hacia el interior donde está contenido el tornillo de extrusión.	Contener el tornillo de extrusión y transferir el calor desde el exterior al interior.
Garganta de alimentación	Situada debajo de la tolva justo antes de la sección de alimentación del tornillo.	Conecta la tolva con el cilindro y el tornillo.
Plato rompedor y filtros	El plato rompedor se encuentra al final del cilindro y soporta el paquete de filtros.	Atrapar contaminantes antes de realizar la extrusión del filamento y ayudan a mejorar el mezclado y homogeneizado del fundido.
Cabezal	El cabezal se sitúa al final del cilindro y sostiene la boquilla y también mantiene el plato rompedor en su lugar.	Facilita el flujo del material hacia la boquilla.
Boquilla	Se pueden clasificar según su forma.	Moldeo el material.
Calentadores	Calentadores externos sirven para aislar el material y evitar que la máquina se detenga al inicio cuando el material sólido está frío.	Fundir el material.
Motor eléctrico	Se pueden usar motores con velocidad variable o de velocidad constante con un equipo de velocidad variable.	Accionar el tornillo extrusor
Dosificador	La tolva como principal dosificador puede estar provisto de un mecanismo para asegurar el flujo constante del material.	Controlar la cantidad de material que entra en la extrusora
Panel de control	Enciende, apaga y controla los sistemas mecánicos y térmicos de la máquina.	Control y monitoreo de los parámetros
Carcasa	Cubre proporcionalmente los elementos térmicos y demás componentes de la máquina	Proteger al usuario de los componentes de la máquina.
Aislante térmico	Aísla la resistencia y el barril para mantener el calor en el proceso	Mantiene el calor en el barril

Tabla 3. Componentes

9.3 FIJACION DE REQUERIMIENTO

Este método aporta a definir el problema de diseño, haciendo énfasis en el rendimiento que la solución debe alcanzar y no en los componentes físicos como forma para lograr este rendimiento. Para esto se determina la generalidad del nivel, y luego se realiza una comparación de los objetivos de requerimiento de diferentes extrusoras que hay en el mercado y en el área académico con la función de identificar parámetros específicos de diseño.

El nivel de generalidad en el diseño de la maquina extrusora es bajo, ya que conduce a una reducción de los conceptos iniciales, de tal manera, permite centrarse en las características, parámetros específicos y en las diferentes formas de aplicar cada una de ellas a partir de componentes o elementos ya existentes y aplicados a maquinas extrusoras del mercado.

9.4 COMPETIDORES INDUSTRIALES Y ACADEMICAS

La siguiente tabla presenta las características técnicas de máquinas que están disponibles en el mercado en el sector de la fabricación de filamentos para impresoras 3D. Lo que permite tener un punto de referencia y rango, para identificar y determinar parámetros específicos del diseño.

CARACTERISTICAS	FELFIL [46]	FILABOT [47]	3DEVO [48]	NOZTEK [49]	ROBOTDIGG [50]
TIPO	Felfil Evo	EX2	Precision Series	Pro	Wellzoom
TAMAÑO	100x18x10 cm	46x18x24 cm	506x448x216 mm	270x270x800 mm	560x160x252 mm
DIAMETRO	No reportado	No reportado	No reportado	14 mm	20 mm
POTENCIA	240 W	500 W	300 – 1300 W	No reportado	240 W
ALIMENTACION	110-230 V	110-220 V	110-220 V	110-220 V	110-220 V
PESO	9 kg	13 kg	27 kg	15 Kg	15 Kg
TEMPERATURA	300°C	450°C	350-450°C	300°C	320°C
MATERIAL	PLA, ABS, HIPS, HDPE	PLA, ABS, HIPS, ULTEM, PC	PLA, ABS, PS, PC	ABS, PLA, PET, PP, HDPE, PP	Nylon, PLA, ABS, PVA, PP, etc.
RPM	9	35	15	8	No reporta
BOQUILLA DE EXTRUSION	1,75-2,85 mm	1,75 - 2,85 mm	1,75 - 4 mm	1,75 mm	1,75-2,85 mm
TASA DE PRODUCCION	No reportado	2 lb/h	1 kg/h	0,27 Kg/h	No reporta
VELOCIDAD DE EXTRUSION	1.15 m/min	0,6 m/min	No reportado	2,5 m/min	1,8 – 2,5 m/min
PRECIO	USD \$600	USD \$899	USD \$4850	RU \$1000	USD \$1549
VOLUMEN DE ALIMENTACION	1 Lt	No reportado	2 Lt	1,25 Kg	No reporta
FACIL DE OPERAR	SI	SI	SI	NO	SI

Tabla 4. Características de extrusoras a nivel industrial

La siguiente tabla proporciona otros puntos de referencia y rangos a tener en cuenta en la determinación de los parámetros a partir de máquinas extrusoras diseñadas a nivel académico.

CARACTERISTICAS	Diseño y construcción de una maquina extrusora de filamento de 1,75 y 3 mm a partir de polímero reciclado [5]	Diseño de una maquina extrusora de filamento termoplástico alimentada por desechos plásticos [3]	Extrusora de monofilamento para impresión 3D [51]
-----------------	---	--	---

Relación longitud y diámetro del tornillo (L/D)	14	21	25
Longitud del tornillo (L)	400 mm	406,34 mm	290 mm 25
Diámetro del tornillo (D)	28 mm	19,05 mm	12 mm
Numero de revoluciones por minuto (N)	4 - 15 rpm	40 rpm	17 rpm
Razón de material extruido	2,2 lb/h	9,24 lb/h	No registrado
Temperatura (T)	500 °C	260 °C	312 °C
Numero de calentadores	3	2	2

Tabla 5. Características de extrusoras a nivel académico

La mayoría de las maquinas a nivel industrial presentan en su proceso de extrusión temperaturas por encima de los 300°C y con menos potencia aquellas que trabajan máximo hasta esta temperatura. Por otro lado, son de menor tamaño y pueden presentar igual o más cantidad de filamento producido por hora. Para algunas maquina como la Filabot que es de dimensiones pequeñas, puede llegar a producir 2 Lb/h de filamento con una velocidad del tornillo de 35 RPM pero para esto se requiere más potencia. Extrusoras académicas requieren más de dos resistencias térmicas para alcanzar la temperatura requerida y de mayores revoluciones por minuto del tornillo.

9.5 PARÁMETROS ESPECIFICOS

En esta fase, se identifican y se determinan los parámetros específicos a tener en cuenta en el diseño a partir del análisis de las características de las maquinas extrusoras a nivel industrial y académico.

Las características técnicas están presentes en la siguiente tabla. Las columnas de la derecha clasifican las características en requerida y deseada, donde la primera indica que ese parámetro específico es necesario que se cumpla, en cambio en las deseadas se propone un rango para satisfacer esa característica.

La tabla 6 presenta las características tecnicas para el diseño de la extrusora:

ITEM	CARACTERISTICA	VALOR	REQUERIDA	DESEADA
1	Temperatura	300°C Max	X	
2	Cantidad de calentadores	1 a 3		X
3	RPM	<40	X	
4	Diámetro de la boquilla de extrusion	1.75-2.85 mm	X	
5	Potencia eléctrica consumida	<300 W	X	X
6	Razón de extrusión	2 lb/h		X
7	Peso	<20 kg		X
8	Dimensiones	60x20x25 cm		X
9	Entrada de alimentación	110 – 220 V	X	
10	Tiempo de mantenimiento	<2 h		X
11	Relación de la longitud y diámetro	20:1		X
12	Componentes y piezas	<100		X

Tabla 6. Características técnicas del diseño

9.6 DETERMINACION DE CARACTERISTICAS

Las características técnicas deben tratar de satisfacer completamente los objetivos de diseño, por esta razón se aplica el método de despliegue de la función de calidad, donde se determina la importancia de cada característica y objetivo a partir de una matriz que identifica la relación entre ellos, es decir, que no todas las características afectan a los objetivos, de tal manera que la matriz permite conocer que características si afectan.

La matriz que se aplica es la casa de la calidad, donde los objetivos de requerimiento están en forma horizontal en el lado izquierdo, con sus respectivos pesos relativos, que indican su nivel de importancia en el diseño, además forman las filas de la matriz. Las características están en posición vertical, a lo largo de la parte superior, lo que conforman las columnas. Cada celda de la matriz representa una relación potencial entre las características técnicas y los objetivos.

Por otro lado, la matriz incorpora en la parte superior una sección que identifica las interacciones que tienen las características técnicas entre ellas, que pueden ser positivas o negativas.

La figura 8 muestra la casa de la calidad que relaciona parametros y características de la extrusora:

tiene interacciones negativas que afectan el costo del consumo de energía y el costo de las resistencias eléctricas.

Entre la sección superior de la matriz y las características técnicas, se tiene la dirección de mejora, que indica que característica se maximiza, se minimiza o tiene un alcance fijo según la magnitud. Por lo tanto, la única característica fija que se debe alcanzar por requerimiento es el diámetro de la boquilla de extrusión, ya que está en función del diámetro del filamento para impresoras 3D. Las demás características cumplen con la maximización o minimización, es decir, características como la relación de la longitud y el diámetro del tornillo, tiene una dirección de mejora a minimizar las dimensiones del tornillo ya que esto afecta positivamente otras características. En cambio, se nota que al aumentar la cantidad de temperatura máxima, se afecta negativamente el consumo de energía y la cantidad de resistencias eléctricas necesarias.

En la sección central de la matriz, se tiene la relación entre los objetivos y las características, que están evaluadas a partir de que tan fuerte, moderada o débil es la relación entre ellas. Los objetivos que tienen una fuerte relación con la mayoría de las características técnicas, además de tener una gran importancia en el diseño, son que tenga un diseño económico y una operación confiable, por lo que afectan fuertemente en el nivel de importancia de las características, es decir en el peso relativo, como lo son la temperatura y la velocidad del tornillo, que sobresalen de las demás.

10 DESARROLLO DEL DISEÑO CONCEPTUAL

En esta etapa, se tomo el planteamiento del problema y la información recopilada y procesada de los parámetros y requerimientos de diseño a partir de sus funciones y características técnicas, y se desarrollan las soluciones conceptuales en forma de esquemas. Mediante el método del diagrama morfológico, se identifican las combinaciones de los elementos o componentes para generar así las alternativas conceptuales de la maquina extrusora.

10.1 DIAGRAMA MORFOLOGICO

En la siguiente tabla se presentan la gama de elementos o componentes que pueden combinarse para formar las tres posibles soluciones conceptuales.

N°	FUNCION	1	2	3
1	TOLVA	Flujo en plano axial simétrico	Flujo en plano simétrico	Flujo en plano asimétrico
2	RESISTENCIAS ELECTRICAS	Tipo banda mica	Tipo banda mica con núcleo de cerámica	
3	TRANSMISION DE MOVIMIENTO	Reductor	Poleas y correa	Cadena y piñones
4	AISLANTE	Sin aislante	Coquilla térmica de lana mineral	Manta térmica
5	TORNILLO	Estándar	Barrera	Mezclador

Tabla 7. Diagrama morfológico

Mediante un nivel bajo de generalidad se seleccionaron componentes que realicen completamente las funciones requeridas. Además, en los conceptos se tendrán en cuenta elementos como la carcasa, boquilla y motor eléctrico como partes ya identificadas para realizar esta función.

10.2 POSIBLES SOLUCIONES CONCEPTUALES

A partir de la tabla del diagrama morfológico, se presentan las tres alternativas para las posibles soluciones del diseño. Donde, los componentes seleccionados están indicados en cada una de las respectivas soluciones conceptuales.

10.2.1 DISEÑO CONCEPTUAL 1

La siguiente tabla presenta los diferente componentes que conforman el primer concepto de la máquina extrusora.


FUNCION	COMPONENTE	CONCEPTO
TOLVA	Flujo en plano axial simétrico	
RESISTENCIAS ELECTRICAS	Tipo banda mica con núcleo de cerámica	
TRANSMISION DE MOVIMIENTO	Reductor	
AISLANTE	Sin aislante	
TORNILLO	Estándar	

Tabla 8. Componentes del diseño conceptual 1

Las figuras 9 y 10 representan el modelado 3D del concepto numero 1:

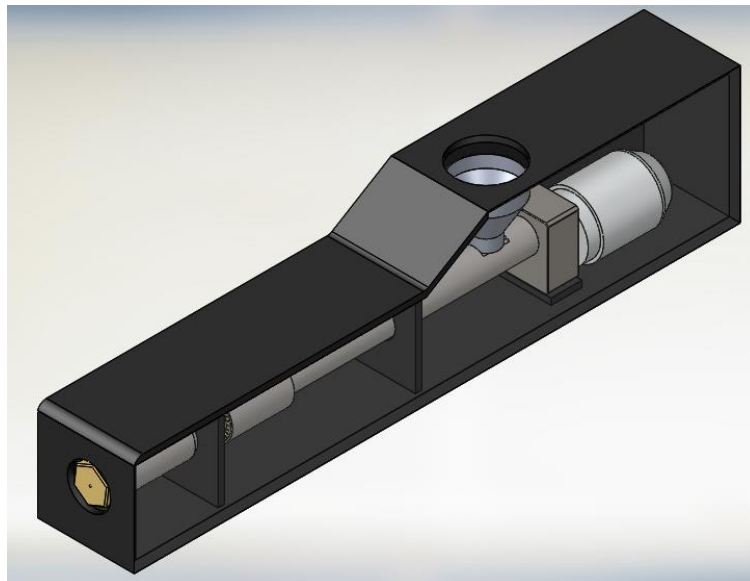


Figura 8. Vista isométrica del diseño conceptual 1

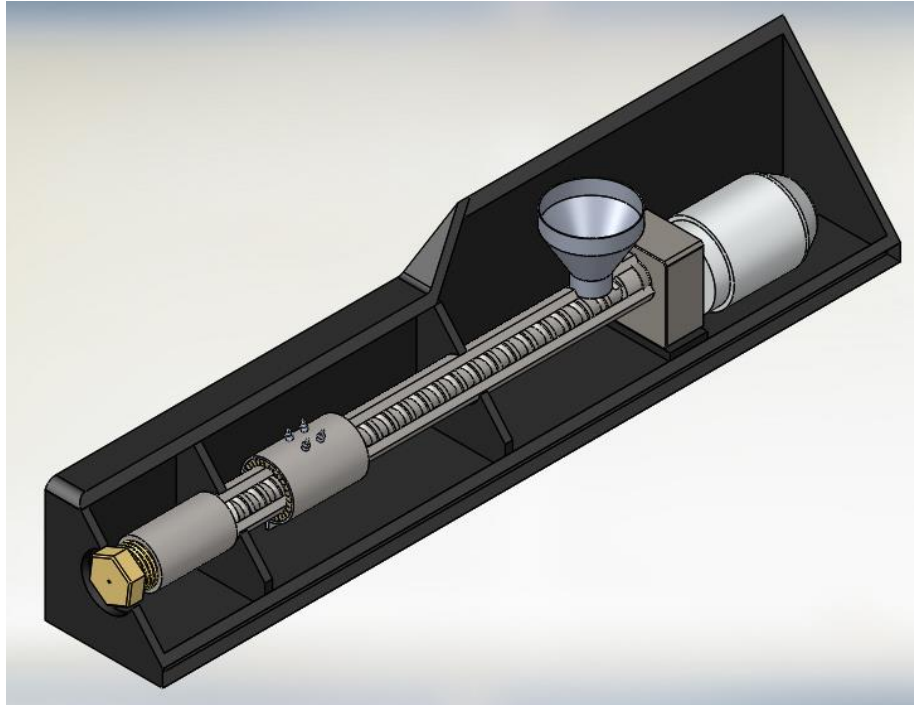


Figura 9. Vista seccionada del diseño conceptual 1

El sistema está compuesto por un tornillo de extrusión estándar que son muy funcionales para el transporte del material y mezclar la mayoría de los plásticos, además de generar una masa fundida uniforme, pero su único inconveniente ocurre con materiales difíciles de fundir. Los componentes de alimentación de la extrusora, como la tolva, garganta de alimentación y boquilla de entrada están diseñadas en un solo concepto en función del flujo del material, en este caso se tiene un flujo en plano axial simétrico con tolva de sección circular que consigue un flujo de material constante aunque son más costosas y complejas de fabricar. Este concepto no incorpora aislante debido que la transferencia de calor se realiza mediante una resistencia tipo banda de mica con núcleo de cerámica que reduce la pérdida de calor, por lo que conserva la energía generando menos costos de operación, además, son fáciles de instalar y de ajustar al proceso. La transmisión de movimiento se realiza mediante un reductor coaxial acoplado directamente al motor, lo cual proporciona menos peso a la máquina debido a su tamaño, además cuenta con buen rendimiento y el tiempo de mantenimiento es menor. Por último, una carcasa incorpora la máquina en su interior como medio de seguridad, y se podrá observar la extrusora a través de una de sus caras que estará fabricada en un material transparente.

10.2.2 DISEÑO CONCEPTUAL 2

La tabla 9 muestra los componentes del segundo concepto de la máquina.

FUNCION	COMPONENTE	CONCEPTO
TOLVA	Flujo en plano simétrico	
RESISTENCIAS ELECTRICAS	Tipo banda mica	
TRANSMISION DE MOVIMIENTO	Cadena y piñones	
AISLANTE	Manta térmica	
TORNILLO	Barrera	

Tabla 9. Componentes del diseño conceptual 2

Las siguientes figuras representan el modelado 3D del concepto numero dos:

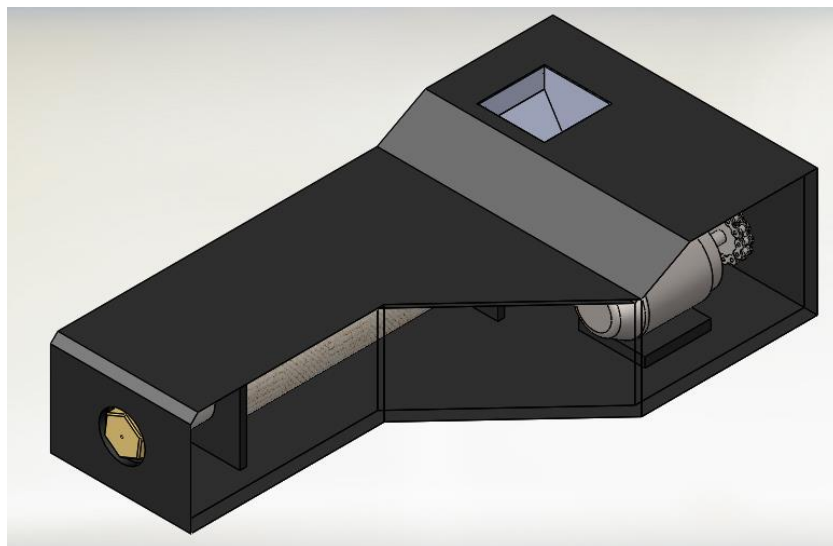


Figura 10. Vista isométrica del diseño conceptual 2

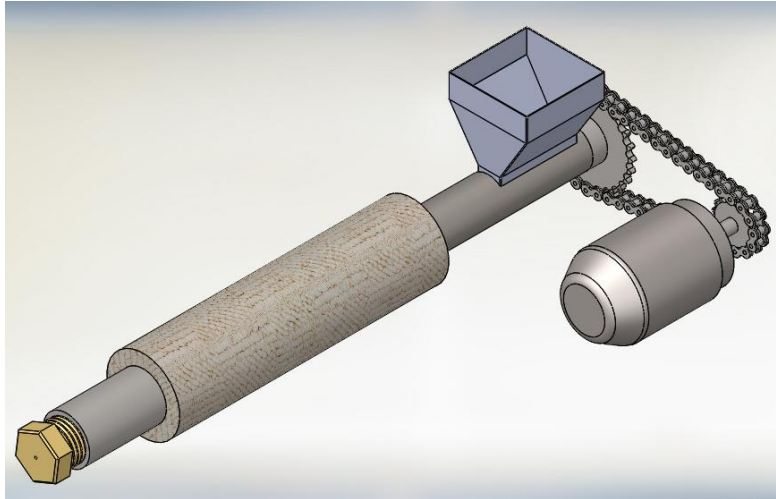


Figura 11. Vista isométrica sin carcasa del diseño conceptual 2

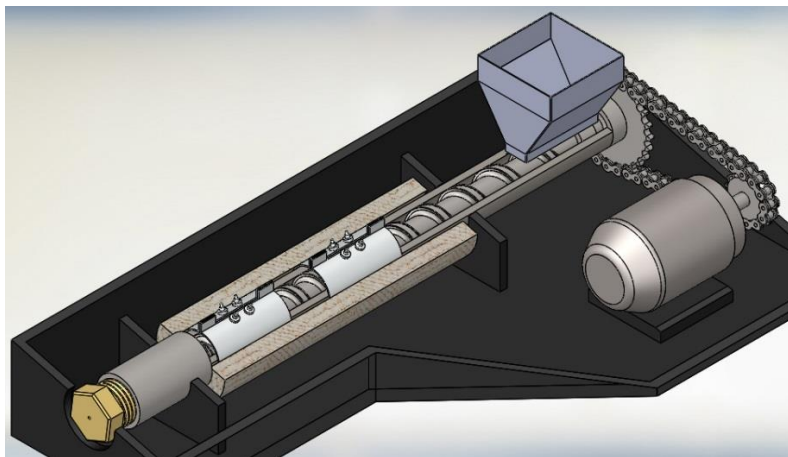


Figura 12. Vista seccionada del diseño conceptual 2

El diseño conceptual 2, está compuesto por un tornillo extrusor de barrera que proporciona una mejor eficiencia de fusión y elimina la ruptura del lecho sólido debido a sus paletas en la sección de transición. Está provisto con una tolva biselada con flujo en plano simétrico, que son más sencillas de fabricar. Cuenta con una manta térmica que reduce los costos de operación, ya que acelera el calentamiento y lo mantiene en el proceso, y por otro lado, es un componente fácil de desmontar. Se utilizan resistencias de banda de mica para transferir el calor al sistema debido a su eficiencia para suministrar el calor requerido, además de que son de bajo costo. La transmisión de movimiento es realizada mediante cadena y piñón que trabaja a una velocidad baja y constante.

10.2.3 DISEÑO CONCEPTUAL 3

La tabla a continuación presenta los componentes del tercer concepto del diseño.

FUNCION	COMPONENTE	CONCEPTO
TOLVA	Flujo en plano asimétrico	
RESISTENCIAS ELECTRICAS	Tipo banda mica	
TRANSMISION DE MOVIMIENTO	Correa y poleas	
AISLANTE	Coquilla térmica de lana mineral	
TORNILLO	Mezclador	

Tabla 10. Componentes del diseño conceptual 3

Las figuras 14, 15 y 16 enseñan las vistas del modelado 3D del concepto numero tres:

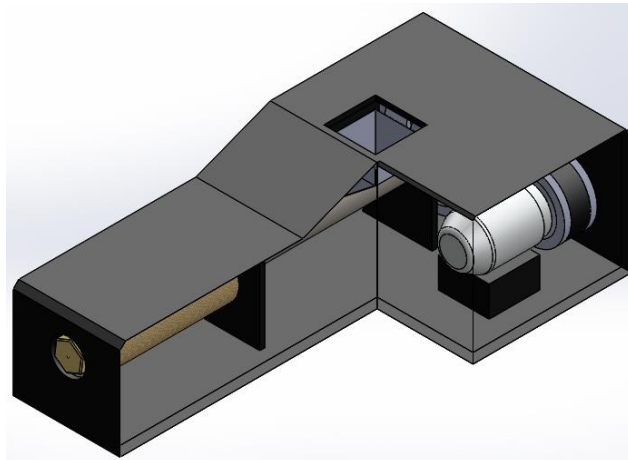


Figura 13. Vista isométrica del diseño conceptual 3

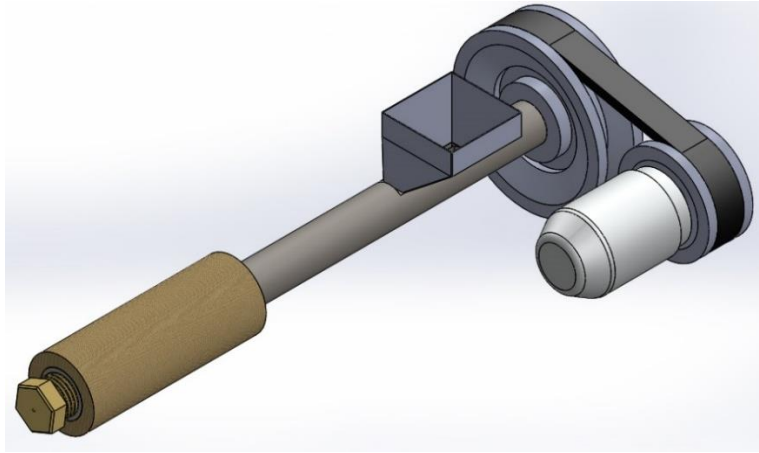


Figura 14. Vista isométrica sin carcasa del diseño conceptual 3

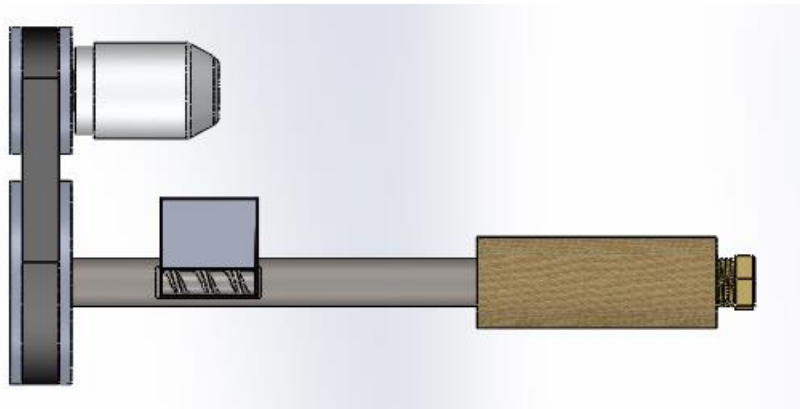


Figura 15. Vista superior del diseño conceptual 3

El sistema está compuesto por un tornillo mezclador que permite desarrollar filamento de diferentes polímeros y aditivos y proporcionando una mejor calidad, aun así este tipo de tornillo es más usado para la experimentación e investigación, lo que no lo hace tan útil en la producción y fabricación en masa. Una tolva con sección rectangular y con flujo en plano asimétrico cumple con la función de alimentar constantemente y con descargas rápida dependiendo de la inclinación de la pared. La coquilla térmica de lana mineral tiene alta eficiencia como aislante térmico además de ser también un buen aislante acústico. La transferencia de movimiento es realizada por medio de poleas y correa que podrían provocar variaciones de rendimiento debido al deslizamiento de la correa.

10.3 SELECCIÓN DEL DISEÑO CONCEPTUAL

En esta etapa, se tomarán los requisitos de diseño como criterios para la selección del diseño conceptual, y para esto se aplicará el método de objetivos ponderados. De tal forma, se establece una escala de puntaje entre 1 a 5, siendo 1 muy malo y 5 muy bueno para realizar cada objetivo. Además, se tiene en cuenta el peso relativo

obtenido de cada objetivo en la matriz de requerimientos con la función de conocer la importancia de cada atributo.

En la tabla 11 se evalúan los diseños conceptuales a partir del peso relativo de cada atributo de requerimiento y del puntaje asignado.

N°	REQUERIMIENTOS DE DISEÑO	PESO RELATIVO	DISEÑO CONCEPTUAL 1		DISEÑO CONCEPTUAL 2		DISEÑO CONCEPTUAL 3	
			PESO	PUNTAJE	PESO	PUNTAJE	PESO	PUNTAJE
1	Seguridad	14,1%	0,564	4	0,71	5	0,71	5
2	Durabilidad	12,5%	0,5	4	0,5	4	0,38	3
3	Operación confiable	12,5%	0,625	5	0,5	4	0,38	3
4	Mantenimiento sencillo	12,5%	0,625	5	0,63	5	0,5	4
5	Mínima producción de residuos	6,3%	0,252	4	0,25	4	0,25	4
6	Facilidad de operación	10,9%	0,436	4	0,44	4	0,44	4
7	Fabricación sencilla	9,4%	0,47	5	0,38	4	0,38	4
8	Económica	7,8%	0,234	3	0,23	3	0,23	3
9	Ligera	7,8%	0,39	5	0,23	3	0,23	3
10	Buena apariencia	6,3%	0,315	5	0,25	4	0,25	4
TOTAL			4,411	44	4,11	40	3,74	37

Tabla 11. Evaluación de objetivos ponderados de los tres diseños conceptuales

Según los resultados en la tabla, se obtuvo con mayor peso y puntaje el diseño conceptual 1, lo que indica que cumple mejor con los requerimientos. Este diseño conceptual cuenta con ciertas ventajas ante los otros diseños como ser más pequeño debido al reductor de velocidad, además de ofrecer mejor eficiencia de transferencia de movimiento en este tipo de máquinas. La resistencia eléctrica tiene mayor alcance de temperatura y aunque es más costosa en fabricación, obtiene menos costos de operación. La tolva por ser de sección circular requiere mayor complejidad de fabricación y de costos, por tal razón, se podría cambiar por una de sección rectangular para satisfacer mejor estos atributos.

11 DISEÑO DETALLADO

En el diseño detallado se determina la geometría de los componentes, la selección de los materiales, la definición de las etapas de fabricación, el modelado 3D en Solidworks, la generación de los planos y la selección del sistema de control y de temperatura.

11.1 PARÁMETROS

Los parámetros principales de una maquina extrusora son el diámetro del tornillo, su relación de longitud y diámetro (L/D) y velocidad de rotación. El movimiento del tornillo depende de la velocidad de rotación, el ángulo de hélice del filete y del coeficiente de fricción provocado por el roce entre el material y las superficies del tornillo y del cilindro. Estos factores dependen a su vez del material y de la temperatura en las superficies de contacto del tornillo y del cilindro [22].

Una temperatura excesiva del cilindro dificulta significativamente el proceso de extrusión ya que afecta las capas del material cercanas a la superficie, lo que disminuye la capacidad de arrastre del material por los primeros filetes del tornillo. Por tal razón, se debe prestar atención a la regulación de la temperatura en cada zona del tornillo [1]. Para esto, se recomienda que la temperatura para derretir el PET este entre los 270-300°C [23].

La siguiente tabla da una guía de la temperatura de extrusión para el PET:

Relación de compresión	Zona de alimentación	Zona de compresión	Zona de dosificación	Zona de boquilla	TEMPERATURA DE FUSION
3:1	270°C	290°C	265°C	265°C	270°C

Tabla 12. Guía de temperatura por zona [23]

A través de esta tabla, se conoce que en la zona de transición o de compresión se presenta la mayor temperatura con 290°C, lo cuales se toman como temperatura máxima de referencia para extruir el material dentro de la operaciones normales de la máquina.

Una limitación para el funcionamiento óptimo de la extrusora es el contenido de humedad en el PET, ya que es un material higroscópico y su secado antes del proceso de extrusión es fundamental para mantener el rendimiento de las propiedades del producto final. La presencia de humedad ocasiona una reacción de hidrolisis entre el polímero y el agua, lo que disminuye el peso molecular, la resistencia y la tenacidad de la pieza, a su vez, dificultando la manipulación de la masa fundida [23].

Se recomienda que antes del proceso de extrusión se mida el contenido de humedad en el material para asegurar que la humedad este por debajo del límite de

procesamiento aceptable, ya que los cilindros de extrusión no cuentan con ventilación para eliminar la humedad, por tal razón debe hacerse antes del proceso [23].

La siguiente tabla proporciona los datos de los tiempos de secada en horas a una temperatura específica [23]:

CONDICIONES DE SECADO	225°F 107°C	250°F 121°C	275°F 135°C
PET virgen	8	4	3
PET reciclado	8	5	4
PET húmedo	8	6	4
PET saturado	16	9	6

Tabla 13. Tiempo de secado para el procesamiento del PET [23]

La siguiente tabla presenta las propiedades del material PET que pueden ser aplicados en cálculos de los parámetros de diseño y operativo:

Índice de ley de potencia, n	Punto de fusión, Tm	Transición vítrea, Tg	Densidad, ρ	Conductividad térmica, k	Calor específico, cp	Gravedad específica, SG
0.6	275°C	70°C	1,35 g/cm ³	0.29 J/msC	1.55 kJ/Kg°C	1,3

Tabla 14. Propiedades del material PET [23]

11.2 DISEÑO DEL TORNILLO

El tornillo es el componente principal en la maquina extrusora, ya que la producción como la aplicación dependen de su relación de longitud y diámetro (L/D), de la velocidad de rotación y su forma geométrica. A su vez, la relación de longitud y diámetro del tornillo influye en otros componentes de la extrusora [22].

La relación de longitud y diámetro (L/D) del tornillo viene dada por la ecuación [23]:

$$\frac{L}{D} = \frac{\text{Longitud de zona con filete a lo largo del tornillo}}{\text{Diámetro externo del tornillo}}$$

La mayoría de las extrusoras que se venden en el mercado son según su diámetro de tornillo, relación de longitud y diámetro (L/D) del tornillo o por el diámetro del cilindro. La siguiente tabla presenta algunos diámetros comunes de tornillos en el mercado [23].

<4" (100mm)		>4" (100mm)	
inch	mm	inch	mm
0.5	15	4.5	120
0.75	20	6	150
1.0	25		180
	30	8	220
1.25	35	10	250
1.5		12	300
1.75	45	14	350
2.0	50	16	400
2.5	60	18	450
3.0	70	20	500
3.5	90	24	600

Tabla 15. Diámetros comunes de tornillos en el mercado [23]

Dos extrusoras con el mismo diámetro pero diferente longitud, tendrán capacidades de rendimientos distintas. Por tal razón, la siguiente tabla presenta las ventajas que tienen extrusoras con una relación de longitud y diámetro (L/D) corta y larga.

VENTAJAS	
RELACION L/D CORTA	RELACION L/D LARGA
Inversión inicial es menos costosa	Más capacidad de mezclado
Menor costo de componentes	Capacidad de extruir material a una presión más alta
Menos tiempo de procesamiento de materiales sensibles a la temperatura	Mayor capacidad de fusión con menos calentamiento por cizallamiento
Requiere menos torque	Mayor calentamiento conductivo del cilindro
Tamaño del motor pequeño	

Tabla 16. Ventajas de tornillo con relación de longitud y diámetro (L/D) corta y larga [23]

Además, se debe tener en cuenta que las relaciones L/D más comunes en el mercado son 18:1, 20:1, 24:1, 30:1, 36:1, 40:1. Por otra parte, los tornillos con mayor diámetro tienen también un mayor rendimiento [23].

Tornillos con una relación de L/D larga, tienen un mayor efecto del calor en el material, mayor velocidad de rotación del tornillo y mayor potencia de accionamiento. En cambio, los que tienen una relación de L/D corta, tienen mejores resultados en la fabricación de tubos, perfiles continuos y láminas debido a sus ventajas [22].

La siguiente imagen, presenta la producción de material en proporción a la relación de L/D de tornillos sencillos de una etapa contra tornillos de dos etapas, donde los primeros obtienen una mayor salida de material, por lo tanto, un tornillo de dos etapas debe ser más largo para obtener una producción de un tornillo de una etapa con una longitud menor [24].

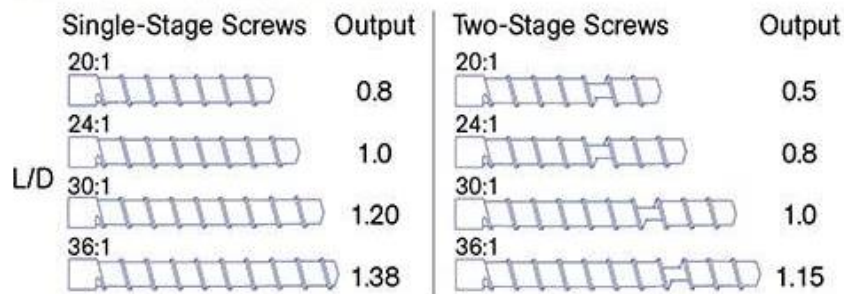


Figura 16. Salida de material de tornillos de una y dos etapas sencillos en proporción con la relación L/D [24].

El PET se procesa en extrusoras con relación de L/D entre 20-30:1 y con una relación de compresión de 3-3,25:1, ya que este tipo de plástico es sensible a la temperatura y su viscosidad cambia más con la temperatura que con la velocidad de cizallamiento, por esta razón, las extrusoras de mezcla de dispersión de alto cizallamiento no funcionan bien con este material. Una forma de hacerlo funcionar mejor, es con cabezales que permitan la mezcla distributiva, es decir, que dividan y recombinen la corriente de fusión [23].

La compañía RobotDigg Equip Makers fabrica extrusoras de escritorio con la capacidad de procesar material PET reciclado, donde la más asequible es la SJ20 a partir de USD \$725. Esta extrusora cuenta con un tornillo de dos etapas con un diámetro de 20 mm y una relación L/D de 14:1 pero tiene la opción de tener una relación de L/D de 20:1, la cual dará una mayor productividad. Además, tiene una relación de compresión de 3:1 y una potencia del motor de 120 W con una velocidad del tornillo de 20 rpm [25].

A través de la información anterior, se ha decidido utilizar una relación L/D de 20:1, ya que esta entre las relaciones más usadas para procesos de extrusión debido a su corta relación que permite un mejor proceso para materiales sensibles a la temperatura, además de obtener una mayor productividad y ser adecuados para la fabricación de productos continuos como el filamento. Con relación a esto, se selecciona un tornillo sencillo de una etapa debido que tiene una mayor producción en comparación con tornillos de dos etapas, y un diámetro exterior de 20 mm que es lo suficientemente grande para extrusoras de escritorio pero que proporciona una longitud correspondiente a la relación L/D corta. Se debe tener en cuenta también que este diámetro se encuentra entre los más comunes en el mercado, haciéndolo un componente más asequible. Por otro lado, la relación de compresión del tornillo es fundamental en el proceso de extrusión, de tal manera que se considera la relación de compresión recomendada para el material PET en la tabla guía para temperatura por zona que es de 3:1.

A partir del diámetro, relación L/D y relación de compresión ya determinados, se procede a calcular la configuración geométrica del tornillo mediante las formulas

presentes en el marco teórico, además de contar con las recomendaciones de Savgorodny en el libro “Transformación de plástico” [22].

La siguiente imagen presenta los parámetros y configuración geométrica del tornillo extrusor:

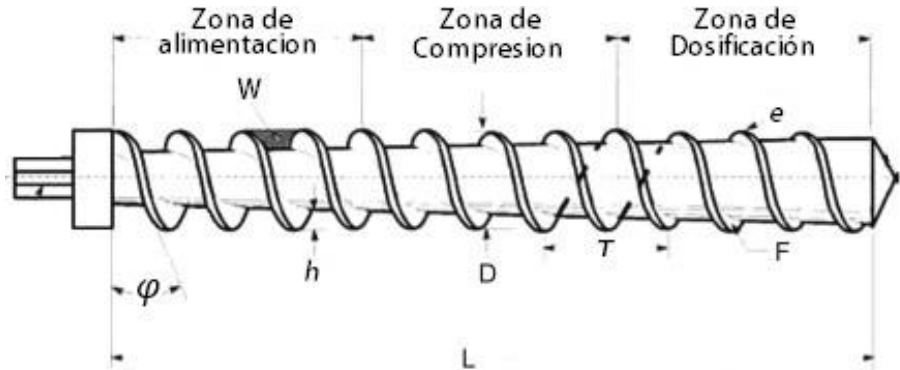


Figura 17. Configuración geométrica del tornillo [5]

D: Diámetro
L: Longitud
T: Paso

F: Filete
e: Ancho del filete
h: Profundidad del canal

W: Ancho del canal
φ: Angulo hélice

Las siguientes ecuaciones determinan los parámetros de la configuración geométrica del tornillo:

- Relación de longitud y diámetro del tornillo (L/D):

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

- Diámetro exterior (D):

$$D = 20 \text{ mm}$$

- Longitud total del tornillo (L):

$$L = 20 * 20 = 400 \text{ mm}$$

- Cantidad de filetes:

$$N^{\circ} \text{ Filetes} = \frac{L}{D} = 20$$

- Relación de compresión (i):

$$i = 3$$

- Paso del tornillo (t):

$$t = D$$

- Ancho del filete (e):

$$t = 20 \text{ mm}$$

$$e = (0,1)D$$

$$e = 0,1 * 20 = 2 \text{ mm}$$
- Ancho del canal (W):

$$W = (\pi D \tan(\varphi - e) \cos(\varphi))$$

$$W = (\pi * 20 * \tan(17,66) - 2) \cos(17,66) = 17,15 \text{ mm}$$
- Profundidad del canal de la zona de alimentación (h_a):

$$h_a = (0,2)D$$

$$h_a = 0,2 * 20 = 4 \text{ mm}$$
- Profundidad del canal de la zona de dosificación (h_d):

$$h_d = \frac{h_a}{i}$$

$$h_d = \frac{4}{3} = 1,3 \text{ mm}$$
- Diámetro alma (d):

$$d = 0,6D$$

$$d = 0,6 * 20 = 12 \text{ mm}$$
- Angulo de hélice (φ):

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{t}{\pi D}\right)$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{20}{\pi * 20}\right) = 17,66^\circ$$

La longitud de la zona de alimentación, zona de compresión y de la zona de dosificación se determinan a partir de las siguientes fórmulas para extrusoras universales a través de las recomendaciones [22]:

- Longitud de la zona de alimentación (L_a):

$$L_a = 8D$$

$$L_a = 8 * 20 = 160 \text{ mm}$$

- Longitud de la zona de compresión (L_c):

$$L_c = 7D$$

$$L_c = 7 * 20 = 140 \text{ mm}$$

- Longitud de la zona de dosificación (L_d):

$$L_d = 5D$$

$$L_d = 5 * 20 = 100 \text{ mm}$$

La holgura entre el tornillo y el cilindro tiene mucha importancia en el proceso de extrusión ya que el material se mezcla con mayor efectividad cuando la holgura es grande, pero disminuye el avance debido que se aumenta el flujo inverso del material. Es común utilizar una holgura entre el tornillo y el cilindro de $0,005D$ para diámetros pequeños de tornillos, y de $0,002D$ para diámetros grandes. También se recomienda trabajar con una holgura no superior de $0,1 \text{ mm}$ cuando el material tiene una viscosidad reducida [22].

$$\delta = 0,005D$$

$$\delta = 0,005 * 20 = 0,1 \text{ mm}$$

Se requiere para el diseño de la máquina la velocidad de rotación del tornillo, ya que la extrusora tiene el objetivo de generar 2 Lb/h de material extruido. La velocidad se determina a partir del flujo másico que depende de esta, de la configuración geométrica del tornillo y de la densidad del material, por lo tanto se tiene [23]:

$$M = D^2 * N * h_d * \rho$$

M : Flujo másico [Kg/min]

D : Diámetro del tornillo [mm]

h_d : Profundidad del canal de la zona de dosificación [mm]

ρ : Densidad del PET [Kg/mm^3]

N : velocidad de rotación del tornillo [rpm]

De tal manera se puede determinar la velocidad del tornillo como parámetro de operación:

$$N = \frac{0,0151 \text{ Kg}/\text{min}}{20^2 \text{ mm}^2 * 1,3 \text{ mm} * 1,35 \times 10^{-6} \text{ Kg}/\text{mm}^3} = 21,5 \text{ rpm} \cong 22 \text{ rpm}$$

El resultado indica que para obtener 2 Lb/h de filamento extruido, el tornillo debe girar a una velocidad de 22 revoluciones por minuto.

Para determinar el consumo volumétrico que pasa a través del cilindro y del cabezal, es preciso conocer la viscosidad efectiva del material fundido, que se determinada a partir de la velocidad de corte.

La velocidad de corte (v) depende de la forma geométrica del canal y de la rotación del tornillo [23]:

$$v = \frac{\pi DN}{\delta}$$

$$v = \frac{\pi * 20 * 22}{0,1 * 60} = 230,4 \text{ 1/s}$$

La viscosidad efectiva se determina a través de diagramas de curvas de viscosidad que están en función de la velocidad de corte a una cierta temperatura. El siguiente diagrama presenta las curvas de viscosidad efectiva para el PET tanto virgen como reciclado.

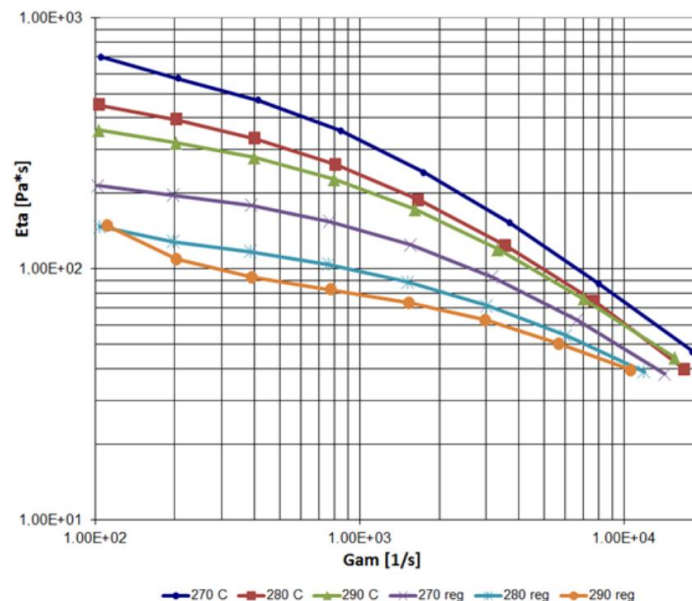


Figura 18. Grafica curvas viscosidad efectiva vs velocidad de corte de PET virgen y reciclado [27]

A partir de la gráfica, y con una velocidad de corte de $230,4 \text{ 1/s}$ a 270°C que es la temperatura de fusión del PET, y con una temperatura máxima de 290°C para procesar el PET, se puede determinar la viscosidad efectiva tal como se observa en la tabla 17.

Temperatura	Viscosidad efectiva, μ
270°C	420 Pa s
290°C	210 Pa s

Tabla 17. Viscosidad efectiva en función de la temperature

Se observa que la viscosidad efectiva a 290°C se ha reducido un 50% en comparación con la viscosidad efectiva a la temperatura de fusión. Se tomara la viscosidad efectiva más alta para desarrollar los procesos, además de ser la temperatura a la cual el material se funde.

En el proceso de extrusión, se presentan tres diferentes flujos que dan como resultado el flujo volumétrico. El primero, es el flujo de arrastre que se genera a partir de la rotación del tornillo. El segundo, es el flujo a contrapresión que es provocado por la presión resultante en el cabezal. Tercer y último, es el flujo de fuga que se presenta en la holgura entre el tornillo y el cilindro. Estos tres flujos están presentes en la zona de dosificación y debido al estado físico en el que se encuentra, es útil aplicar las leyes hidrodinámicas para fluidos viscosos. La zona de dosificación generalmente determina la producción de la extrusora [22].

Flujo volumétrico (Q):

$$Q = \left(\frac{\alpha * K}{K + \beta + \gamma} \right) N$$

α : Volumen unitario del flujo de arrastre [mm^3]

β : Volumen unitario del flujo a contrapresión [mm^3]

γ : Volumen unitario del flujo de fuga [mm^3]

K : Constante de la forma geométrica del cabezal [mm^3]

N : Velocidad de rotación del tornillo [rpm]

Los flujos dependen de parámetros como la profundidad y ancho del canal, diámetro y longitud del tornillo, además de requerir propiedades del material como la viscosidad o la densidad que influyen en el flujo volumétrico. Los siguientes parámetros se requieren para desarrollar el volumen unitario de cada flujo.

D : Diámetro del tornillo [mm]

h_a : Profundidad del canal de la zona de alimentación [mm]

t : Paso del tornillo [mm]

e : Ancho del filete [mm]

φ : Ángulo de la hélice

L : Longitud del tornillo [mm]

δ : Holgura entre el tornillo y cilindro [mm]

A partir de esto, se prosigue a realizar los cálculos de cada flujo:

Volumen unitario del flujo de arrastre (α):

$$\alpha = \frac{\pi * D * h_a * (t - e) * \cos^2(\varphi)}{2}$$

$$\alpha = \frac{\pi * 20 * 4 * (20 - 2) * \cos^2(17.66)}{2} = 2053,77 \text{ mm}^3$$

Volumen unitario del flujo a contrapresión (β):

$$\beta = \frac{h_a^3 * (t - e) \text{sen}(\varphi) * \cos(\varphi)}{12 * L}$$

$$\beta = \frac{4^3 * (20 - 2) \text{sen}(17,66) * \cos(17.66)}{12 * 400} = 0,0693 \text{ mm}^3$$

Volumen unitario del flujo de fuga (γ):

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

$$\gamma = \frac{\pi^2 * 20^2 * 0,1^3 * \tan(17.66)}{10 * 2 * 400} = 1,57 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$$

Constante total de la forma geométrica del cabezal (K):

Para determinar la constante K , se debe tener en cuenta la forma geométrica del cabezal, compuesta por dos zonas con diferente configuración geométrica. La primera, es de canal cónico en la entrada del cabezal y la segunda es un canal cilíndrico en la boquilla para dar forma de filamento al material [22].

A partir de la tabla de características de extrusoras a nivel industrial, se determina que los diámetros para la boquilla de extrusión que son de 1,75 mm y 2,85 mm, con una longitud de 10 mm.

- Diámetro de boquilla; $d_1 = 1,75 \text{ mm}$
- Diámetro de boquilla; $d_2 = 2,85 \text{ mm}$
- Longitud del canal; $L_c = 10 \text{ mm}$
- Diámetro del canal; d_c : Diámetro del canal

Los diámetros 1,75 mm y 2,85, corresponden al diámetro del canal en las siguientes formulas:

Canal cilíndrico (k_1):

$$k_1 = \frac{\pi * d_c^4}{128 * L_c}$$

Canal cilíndrico para d_1 (k_{1a}):

$$k_{1a} = \frac{\pi * 1,75^4}{128 * 10} = 0,023 \text{ mm}^3$$

Canal cilíndrico para d_2 (k_{1b}):

$$k_{1b} = \frac{\pi * 2,85^4}{128 * 10} = 0,1619 \text{ mm}^3$$

Canal cónico (k_2):

$$k_2 = \frac{3 * \pi * D^3 * d_c^3}{128 * L_c (D^2 + D * d_c + d_c^2)}$$

Canal cónico para d_1 (k_{2a}):

$$k_{2a} = \frac{3 * \pi * 20^3 * 1,75^3}{128 * 10 * (20^2 + 20 * 1,75 + 1,75^2)} = 0,7206 \text{ mm}^3$$

Canal cónico para d_2 (k_{2b}):

$$k_{2b} = \frac{3 * \pi * 20^3 * 2,85^3}{128 * 10 * (20^2 + 20 * 2,85 + 2,85^2)} = 2,93 \text{ mm}^3$$

Para determinar la constante común del cabezal, se realiza una suma de las resistencias experimentadas en las diferentes zonas:

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

Constante común para d_1 (K_a):

$$K_a = \frac{1}{\frac{1}{0,023} + \frac{1}{0,7206}} = 0,0222 \text{ mm}^3$$

Constante común para d_2 (K_b):

$$K_b = \frac{1}{\frac{1}{0,1619} + \frac{1}{2,93}} = 0,15 \text{ mm}^3$$

A partir de los resultados, se puede determinar la velocidad de rotación del tornillo con cada diámetro de boquilla que permita extruir 2 Lb/h de material. Se aplica la fórmula del flujo volumétrico para obtener las rpm del tornillo. La densidad determina la tasa de material extruido en kilogramos por hora.

$$Q = \left(\frac{\alpha * K}{K + \beta + \gamma} \right) N$$

- | | |
|---|--|
| • Densidad del material; | $\rho = 1,35 \times 10^{-6} \frac{\text{Kg}}{\text{mm}^3}$ |
| • Volumen unitario del flujo de arrastre; | $\alpha = 2053,77 \text{ mm}^3$ |
| • Constante de la forma geométrica del cabezal; | $K_a = 0,0222 \text{ mm}^3$ |
| • Constante de la forma geométrica del cabezal; | $K_b = 0,15 \text{ mm}^3$ |
| • Volumen unitario del flujo a contrapresión; | $\beta = 0,0693 \text{ mm}^3$ |
| • Volumen unitario del flujo de fuga; | $\gamma = 1,57 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$ |
| • Flujo de masa; | $M = 0,0151 \frac{\text{Kg}}{\text{minuto}}$ |

Flujo volumétrico con la boquilla de 1,75 mm:

$$Q = \left(\frac{2053,77 * 0,0222}{0,0222 + 0,0693 + 1,57 \times 10^{-4}} \right) \left(\frac{22}{60} \right)$$
$$Q = 182,39 \frac{mm^3}{s}$$

El producto del flujo volumétrico y de la densidad del material, permiten determinar el flujo másico [22]:

$$M = 182,39 * 1,35 \times 10^{-6} = 2,46 \times 10^{-4} \frac{Kg}{s} = 1,95 \frac{Lb}{h}$$

La extrusora con esta boquilla, cumple con un 97% del objetivo de producir 2 Lb/h de material extruido.

Flujo volumétrico del tornillo con la boquilla de 2,85 mm:

$$Q = \left(\frac{2053,77 * 0,15}{0,15 + 0,0693 + 1,57 \times 10^{-4}} \right) \left(\frac{22}{60} \right)$$
$$Q = 514,71 \frac{mm^3}{s}$$

El producto del flujo volumétrico y la densidad es:

$$M = 514,71 * 1,35 \times 10^{-6} = 6,95 \times 10^{-4} \frac{Kg}{s} = 5,5 \frac{Lb}{h}$$

La dimensión de la boquilla genera 5,5 Lb/h a una velocidad de 22 rpm, más del doble del objetivo. Para cumplir justamente con esta característica, se debe determinar la velocidad de rotación, para esto se utilizara un flujo volumétrico de $186,4 \text{ mm}^3/s$ para cumplir con una producción de 2 Lb/h.

$$186,4 * 60 = \left(\frac{2053,77 * 0,15}{0,15 + 0,0693 + 1,57 \times 10^{-4}} \right) N$$
$$N = 7,97 \cong 8 \text{ rpm}$$

Debido que la constante de la forma geométrica del cabezal de la boquilla de 2,85 mm es más grande, se obtiene la misma cantidad de filamento extruido con menos velocidad de rotación del tornillo, utilizando solo el 36% de esta velocidad.

La presión máxima generada en la maquina extrusora detiene el flujo del material a través del cabezal. Esto ocurre cuando el flujo volumétrico de arrastre y a contrapresión es igual. Por esta razón, se considera la presión máxima que depende de parámetros tanto operativos como de diseño geométrico:

$$P_{max} = \frac{6\pi D L N \mu}{h_d \tan \varphi}$$

- | | |
|---|---------------------------------------|
| - Diámetro del tornillo; | $D = 20 \text{ mm}$ |
| - Longitud del tornillo; | $L = 400 \text{ mm}$ |
| - Viscosidad efectiva; | $\mu = 420 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ |
| - Velocidad de rotación del tornillo; | $N = 22 \text{ rpm}$ |
| - Profundidad del canal de la zona de dosificación; | $h_d = 1,3 \text{ mm}$ |
| - Angulo de hélice; | $\varphi = 17,66^\circ$ |

Por lo tanto:

$$P_{max} = \frac{6\pi(20 \times 10^{-3})(400 \times 10^{-3})(22/60)(420)}{(1,3 \times 10^{-3}) \tan(17,66)} = 13788438,14 \text{ Pa} \approx 13,79 \text{ MPa}$$

Para determinar el diferencial de presión en la máquina, se tiene en cuenta el flujo total volumétrico, de arrastre y a contrapresión [22]:

$$Q = \alpha N - \beta \left(\frac{\Delta P}{\mu} \right)$$

$$(186,4 \times 10^{-9}) = (2053,77 \times 10^{-9}) \left(\frac{22}{60} \right) - (0,0693 \times 10^{-9}) \left(\frac{\Delta P}{420} \right)$$

$$\Delta P = 3434236,36 \text{ Pa} \approx 3,4 \text{ MPa}$$

El cabezal presenta una presión de operación, la cual se determina a partir de la viscosidad efectiva, velocidad del tornillo y la geometría de la boquilla [22]:

$$P_{op} = \frac{2\pi\mu N h_d D^2 \sin \varphi \cos \varphi}{\left(\frac{r^2}{2L_c} \right) + \left(\frac{D h_d^3 \text{sen}^2(\varphi)}{2L} \right)}$$

Donde:

- Presión de operación (P_{op})
- Radio de la boquilla (r)
- Longitud de la boquilla (L_c)

$$P_{op} = \frac{2\pi(420)(22/60)(1,3 \times 10^{-3})(0,02)^2 \sin(17,66) \cos(17,66)}{\left(\frac{(0,000875)^2}{2(0,01)}\right) + \left(\frac{(0,02)(1,3 \times 10^{-3})^3 \text{sen}^2(17,66)}{2(0,4)}\right)}$$

$$P_{op} = 4233695 \text{ Pa} = 4,23 \text{ MPa}$$

Se requiere determinar la suficiente potencia para accionar el tornillo a una velocidad dada para extruir 2 Lb/h de material. Por lo tanto, se puede determinar a partir del número de revoluciones del tornillo, diámetro del tornillo y con el factor de proporcionalidad (K), que generalmente es 66,7 [22].

Potencia del tornillo (P_{ot}): $P_{ot} = \frac{\pi N D^3}{K^2}$

$$P_{ot} = \frac{\pi(22)(20)^3}{66,7^2} = 124,28 \text{ W}$$

La siguiente tabla contiene los parámetros de diseño determinados anteriormente:

PARAMETROS	
Diámetro del tornillo	20 mm
Longitud del tornillo	400 mm
Holgura	0,1 mm
Angulo de hélice	17,66°
Profundidad de canal de dosificación	1,3 mm
Profundidad de canal de alimentación	4 mm
Ancho de canal	17,15 mm
Ancho del filete	2 mm
Paso del tornillo	20 mm
Numero de filetes	20
Longitud zona de alimentación	160 mm
Longitud zona de compression	140 mm
Longitud zona de dosificación	100 mm
Revoluciones del tornillo	22 rpm
Potencia de accionamiento del tornillo	124,28 W
Presión de operación	4,23 MPa
Presión máxima	13,79 MPa
Flujo volumétrico con la boquilla de 1,75 mm	182,39 mm ³ /s
Flujo volumétrico con la boquilla de 2,85 mm	514,71 mm ³ /s

Tabla 18. Parámetros de diseño del tornillo

11.3 ANALISIS DE RESISTENCIA DEL TORNILLO

A partir del cálculo de resistencia, se comprueban las dimensiones determinadas del tornillo, además, determina la deflexión máxima admisible. En la figura 19, se presenta el diagrama de fuerzas del tornillo, donde actúan la fuerza axial, el momento de giro y la carga uniforme repartida generada por el peso del tornillo.

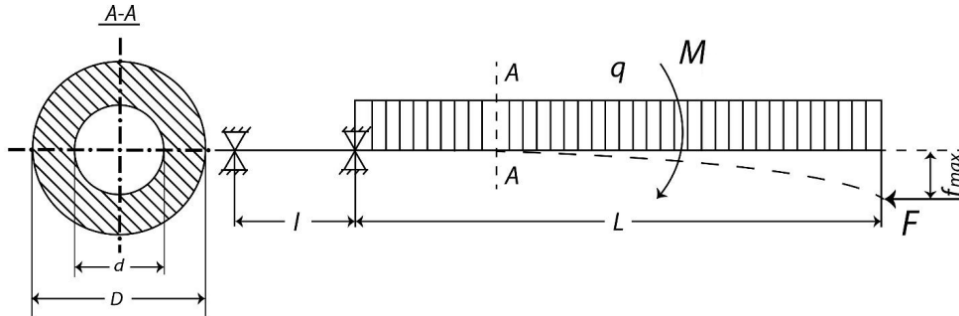


Figura 19. Diagrama de fuerzas del tornillo extrusor [22]

Mediante las siguientes ecuaciones se determinan los valores iniciales para el cálculo del tornillo [22]:

Momento torsor (M):

$$M = 9550 \frac{Pot}{N}$$

Fuerza axial (F):

$$F = SP_{max}$$

Superficie de la sección transversal del tornillo (S):

$$S = \frac{\pi D^2(1 - u^2)}{4}$$

Relación entre los diámetros del tornillo (u):

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

Donde:

- Potencia de accionamiento del tornillo; $Pot = 0,12428 \text{ kW}$
- Velocidad de rotación del tornillo; $N = 22 \text{ rpm}$
- Presión máxima; $P_{op} = 4233695 \text{ Pa}$
- Diámetro alma del tornillo; $d = 12 \text{ mm}$
- Diámetro del tornillo; $D = 20 \text{ mm}$

Por lo tanto, se obtiene:

$$M = 9550 \left(\frac{0,12428}{22} \right) = 53,95 \text{ Nm}$$

$$u = \frac{12}{20} = 0,6$$

$$S = \frac{\pi(20 \times 10^{-3})^2(1 - 0,6^2)}{4} = 2,01 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$F = (2,01 \times 10^{-4})(4233695) = 850,97 \text{ N}$$

La tensión tangencial máxima en la superficie del tornillo viene dada por [22]:

$$\tau = \frac{M}{W}$$

Donde W , es el momento polar de resistencia:

$$W = \frac{\pi D^3(1 - u^4)}{16}$$

Reemplazando W en la ecuación de la tensión tangencial:

$$\tau = \frac{16M}{\pi D^3(1 - u^4)}$$

$$\tau = \frac{16(53,95)}{\pi(20 \times 10^{-3})^3(1 - 0,6^4)} = 39459601,01 \text{ Pa} \approx 39,46 \text{ MPa}$$

Debido a las tensiones normales generadas por la fuerza axial y la carga repartida, se provoca una tensión máxima [22]:

$$\sigma = \frac{F}{S} + \frac{M_f}{W_0}$$

Donde M_f es el momento flector máximo y W_0 es el momento resistente respecto al eje neutro [22]:

$$M_f = \left(\frac{\rho L^2}{2}\right) \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) (1 - u^3) G$$

- Densidad del material; $\rho = 1350 \text{ Kg}/\text{m}^3$
- Longitud del tornillo; $L = 400 \text{ mm}$
- Aceleración de gravedad; $G = 9,81 \text{ m}/\text{s}^2$

$$M_f = \left(\frac{(1350)(400 \times 10^{-3})^2}{2}\right) \left(\frac{\pi(20 \times 10^{-3})^2}{4}\right) (1 - 0,6^3)(9,81) = 0,26 \text{ Nm}$$

Para calcular el momento de resistencia respecto al eje neutro:

$$W_0 = \frac{\pi D^3}{32} (1 - u^4)$$

$$W_0 = \frac{\pi(20 \times 10^{-3})^3}{32} (1 - 0,6^4) = 6,84 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

De esta manera, se determina el esfuerzo máximo en el cojinete:

$$\sigma = \frac{850,97}{2,01 \times 10^{-4}} + \frac{0,26}{6,84 \times 10^{-7}} = 4613798,55 \text{ Pa} \approx 4,61 \text{ MPa}$$

Para una combinación de cargas, se aplica esfuerzos equivalentes, donde la tensión tangencial y el esfuerzo máximo determinan un esfuerzo resultante [28]:

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}$$

Donde:

- Esfuerzo máximo; $\sigma = 4,61 \text{ MPa}$
- Tensión tangencial; $\tau = 4,76 \text{ MPa}$
- Esfuerzo resultante; σ_r

Se obtiene:

$$\sigma_r = \sqrt{(4,61)^2 + 4(39,46)^2}$$

$$\sigma_r = 79,05 \text{ MPa}$$

Con este valor del esfuerzo equivalente en la combinación de cargas, se considera el material del que estará hecho el tornillo para soportar esta tensión. De tal manera, para que el tornillo soporte y realice su función, la tensión resultante debe ser menor que la admisible del material.

Selección del material del tornillo:

La siguiente tabla, muestra las características abrasivas y corrosivas hacia tornillos de algunos polímeros comunes. El material del tornillo y cilindro deben coincidir para obtener mejores resultados al desgaste [23].

Polymer	Abrasiveness	Corrosiveness	Base Material	Flight Hardening Material
Nylon 6, LDPE	Soft	Not Corrosive	AISI 4140	Stellite 12, Flame Hardened to 50 RC
Flexible PVC	Soft	Medium	AISI 4140	Stellite 12
FEP	Soft	High	Inconel 718; Hastelloy C-276; AISI 4140	Stellite 12, Age Hardened to 39–42 RC
HDPE, PP, GP PS	Medium	Not Corrosive	AISI 4140	Colomony 56
Rigid PVC	Medium	Medium	AISI 4140; Nitralloy 135M	Colomony 56
High Loadings FR	Medium	High	Inconel 718; Hastelloy C-276	Colomony 56, Age Hardened to 39–43 RC
Glass Filled	High	Not Corrosive	CPM 9V/10V; AISI D2	Heat Treated to 39–43 RC
Clay Filled PVC	High	Medium	Nitralloy 135M	Coltung 1
PTFE/TFE Filled	High	High	AISI 4140	Coltung 1

Tabla 19. Características del polímero y material de tornillo [23]

A partir de las características del material, se ha decidido por el acero AISI 4140, ya que presenta propiedades adecuadas para trabajar con este material, donde el tornillo requiere tener una alta dureza y resistencia para minimizar el desgaste provocado por la abrasión y la corrosión. La siguiente tabla presenta las características técnicas del acero AISI 4140 [29]:

Mechanical Properties	
Parámetro	Valor
Tensile strength, ultimate	655 Mpa
Tensile strength, yield	415 MPA
Modulus of elasticity	190-210 GPa
Shear modulus (typical for steel)	80 GPa
Bulk modulus (typical for steel)	140 GPa
Hardness, Brinell	197
Thermal Properties	
Thermal conductivity	42,6 W/mK
Thermal Expansion	12,2 (10 ⁻⁶ /°C)

Tabla 20. Ficha técnica del acero AISI 4140 [29]

Teniendo en cuenta las características técnicas del material del tornillo, se determina que la tensión resultante es menor que la admisible del acero AISI 4140 [22]:

$$\sigma_r = 79,05 \text{ MPa} < 415 \text{ MP}$$

Por último, se requiere determinar la deflexión máxima del tornillo al aplicar la carga repartida [22]:

$$f_{max} = \frac{qL^4}{8EJ}$$

Donde:

- Carga repartida (q):

$$q = \rho GS$$

$$q = 1350 * 9,81 * 2,01 \times 10^{-4} = 2,66 \frac{Kg}{s^2}$$

- Longitud del tornillo (L):

$$L = 400 \text{ mm}$$

- Módulo de elasticidad del tornillo (E):

$$E = 210 \text{ GPa} \approx 2,1 \times 10^{11} \text{ Pa}$$

- Momento de inercia de la sección transversal (J):

$$J = \frac{\pi D^4}{64} (1 - u^4)$$

$$J = \frac{\pi(20 \times 10^{-3})^4}{64} (1 - 0,6^4) = 6,84 \times 10^{-9} \text{ m}^4$$

Por lo tanto, se determina la deflexión máxima:

$$f_{max} = \frac{(2,66)(400 \times 10^{-3})^4}{8(2,1 \times 10^{11})(6,84 \times 10^{-9})}$$

$$f_{max} = 5,93 \times 10^{-6} \text{ m} = 5,93 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

$$f_{max} = 5,93 \times 10^{-3} \text{ mm} < 0,1 \text{ mm}$$

La deflexión máxima cumple con ser menor que la holgura radial entre la cresta del filete del tornillo y el cilindro.

La siguiente tabla contiene los parámetros determinados anteriormente:

PARAMETROS	
Momento torsor	53,95 Nm
Fuerza axial	850,97 N
Tensión tangencial máxima	39,46 MPa
Momento flector máximo	0,26 Nm
Esfuerzo máximo	4,61 MPa
Esfuerzo resultante	79,05 MPa
Material del tornillo	AISI 4140
Potencia de accionamiento del tornillo	124,28 W
Presión de operación	4,23 MPa
Presión máxima	13,79 MPa
Flujo volumétrico con la boquilla de 1,75 mm	182,39 mm ³ /s
Flujo volumétrico con la boquilla de 2,85 mm	514,71 mm ³ /s

Tabla 21. Parámetros del tornillo extrusor

11.4 DISEÑO DEL CILINDRO

El cilindro debe ser lo suficientemente sólido para soportar las presiones y resistente al desgaste, la corrosión y a los efectos térmicos.

Se parte determinando el diámetro interno, para esto, se consideran parámetros como la holgura entre el filete del tornillo y el cilindro, y el diámetro del tornillo, por lo tanto [22]:

Diámetro interno (D_i):

$$D_i = D + 2\delta$$

Donde:

- Diámetro del tornillo (D)
- Holgura entre el tornillo y el cilindro (δ)

$$D_i = (20) + 2(0,1) = 20,2 \text{ mm}$$

Selección del material:

A partir de la tabla de características del polímero y material de tornillo, se selecciona el acero AISI 4140, ya que indica que tiene una alta resistencia a la abrasión y a la corrosión, además, se recomienda que el material del tornillo y del cilindro coincidan para obtener una resistencia optima [23].

Espesor mínimo del cilindro (ε):

$$\varepsilon = r_i \left(1 - \sqrt{\frac{2P_{max}}{\sigma_{adm} - 2P_{max}}} \right)$$

Donde:

- Presión máxima (P_{max})
- Esfuerzo admisible (σ_{adm})
- Radio interno del cilindro (r_i)

$$\varepsilon = \frac{20,2}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{2(13,79)}{415 - 2(13,79)}} \right) = 7,41 \text{ mm}$$

El espesor del cilindro debera aproximarse a una medida de 10 mm para tener una dimension estandar en la fabricacion.

A partir de este valor, obtenemos el diámetro externo (D_e):

$$D_e = D_i + 2\varepsilon$$

$$D_e = 20,2 + 2(10) = 40,2 \text{ mm}$$

Con un diámetro interno de 20 mm y externo de 40 mm, el cilindro tendrá un espesor de 10 mm y deberá tener mínimo una longitud de 410 mm para cubrir la zona útil del tornillo.

La siguiente tabla contiene los parámetros de diseño determinados anteriormente:

PARAMETROS	
Diámetro interno	20.2 mm
Espesor del cilindro	10 mm
Diámetro externo	40.2 mm
Material del cilindro	AISI 4140
Longitud del cilindro	<410 mm

Tabla 22. Parámetros de diseño del cilindro

11.5 DISEÑO DE LA TOLVA

En el diseño, se considera en primer lugar la garganta de alimentación, ya que conecta el cilindro con la tolva. La garganta o entrada de alimentación suele tener una longitud de 1,5 y un ancho de 0,7 veces el diámetro del cilindro, además, es común que este desplazada del eje para facilitar la entrada del polímero en el tornillo [30].

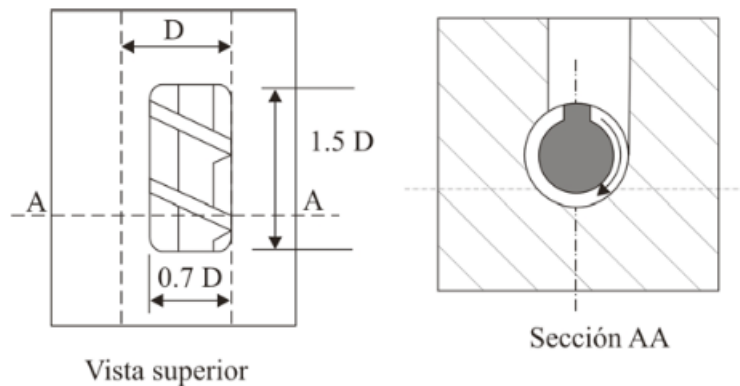


Figura 20. Garganta de alimentación [30]

Longitud de la garganta de alimentación (l_g):

$$l_g = 1,5D$$

$$l_g = 1,5(20,2) = 30,3 \text{ mm}$$

Ancho de la garganta de alimentación (a_g):

$$a_g = 0,7D$$

$$a_g = 0,7(20,2) = 14,14 \text{ mm}$$

Área de la entrada de alimentación (A_1):

$$A_1 = a_g l_g$$

$$A_1 = 14,14 * 30,3 = 428,44 \text{ mm}^2$$

Se requiere para el diseño de la tolva, la densidad aparente del PET, además del tiempo en el que la maquina opera con material suficiente. El tiempo de operación es de una hora para extruir 2 Lb de filamento.

Volumen de la tolva (V_t):

$$V_t = \frac{m}{\rho}$$

Donde:

- Masa del polímero (m)
- Volumen del polímero (ρ)

$$V_t = \frac{0,91}{1350} = 6,74 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

A partir del volumen, se procede a dimensionar la tolva [31]:

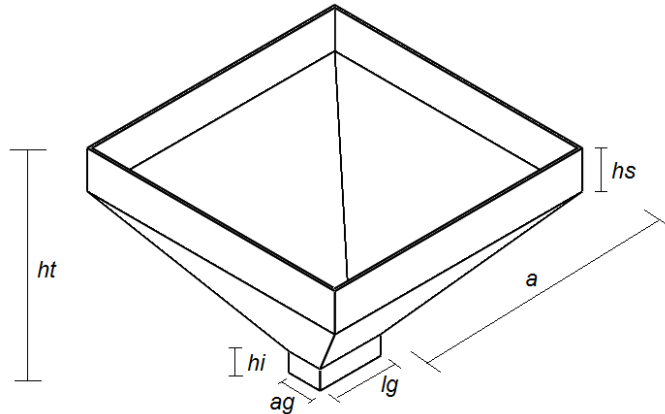


Figura 21. Dimensiones de la tolva

$$V_t = \left(\frac{h_t}{3}\right) \left(A_1 + A_2 + (A_1 A_2)^{\frac{1}{2}}\right) + A_1 h_a$$

$$6,74 \times 10^{-4} = \left(\frac{0,1}{3}\right) \left(4,28 \times 10^{-4} + A_2 + (4,28 \times 10^{-4} A_2)^{\frac{1}{2}}\right) + (4,28 \times 10^{-4})(0,01)$$

$$A_2 = 0,017 \text{ m}^2$$

$$A_2 = a^2$$

$$a = 0,130 \text{ m} = 130 \text{ mm}$$

Selección del material de la tolva:

La tolva al ser un componente que no se soporta altas temperaturas, ni sufre desgaste por corrosión significativamente, se selecciona un acero que aporte características adecuadas como la soldabilidad o maquinabilidad para la fabricación de la tolva. Por tal razón, se seleccionó el acero ASTM A36, ya que cumple con estos requisitos, además de ser un acero para estructuras metálicas en general.

La siguiente tabla contiene los parámetros de diseño determinados anteriormente:

PARAMETROS	
Longitud de la garganta de alimentación	30,3 mm
Ancho de la garganta de alimentación	14,14 mm
Área de la entrada de alimentación	428,44 mm
Volumen del polímero en la tolva	$6,74 \times 10^{-4} \text{ m}^3$
Material de la tolva	ASTM A36
Área superior de la tolva	130 mm
Altura total de la tolva	100 mm

Tabla 23. Parámetros de diseño de la tolva

11.6 DISEÑO DE LA BOQUILLA

El diseño de la boquilla se realiza a partir del diámetro del filamento, que son de 1,75 mm y de 2,85 mm.

El material a la salida de la boquilla va con cierta velocidad que se determina a partir del flujo volumétrico y el área de la boquilla del cabezal [32].

Velocidad del polímero (v):

$$Q = vA_{boquilla}$$

Boquilla de 1,75 mm:

$$v = \frac{186,4 \times 10^{-9}}{\frac{\pi}{4} (1,75 \times 10^{-3})^2} = 0,077 \text{ m/s}$$

Boquilla de 2,85 mm:

$$v = \frac{186,4 \times 10^{-9}}{\frac{\pi}{4} (2,85 \times 10^{-3})^2} = 0,029 \text{ m/s}$$

Con una reducción de las revoluciones del tornillo, el material tendrá menos velocidad operando con esta boquilla.

La boquilla debe tener un espesor mínimo capaz de soportar la presión de operación, además, se selecciona el Latón con un esfuerzo admisible de 310 MPa. Por lo tanto, se determina a partir del diámetro interno del cilindro, ya que es la parte donde hay un menor espesor de pared en el cabezal [12].

Espesor mínimo de la boquilla ($\varepsilon_{boquilla}$):

$$\varepsilon_{boquilla} = r_i \left(1 - \sqrt{\frac{2P_{max}}{\sigma_{adm} - 2P_{max}}} \right)$$

Donde:

- Presión máxima (P_{max})
- Esfuerzo admisible del material (σ_{adm})
- Radio interno del cilindro (r_i)

$$\varepsilon_{boquilla} = 10,1 \left(1 - \sqrt{\frac{2(13,79)}{310 - 2(13,79)}} \right) = 6,94 \text{ mm}$$

El diámetro y la longitud de la boquilla tienen una relación por debajo de 10 debido a sus dimensiones relativamente pequeñas, además, el ángulo de apertura en la entrada de la boquilla esta entre los 30 y los 90 grados, de esta manera, elimina las zonas de estancamiento debido al flujo secundario provocado en la entrada de la boquilla [34].

Relación de longitud y diámetro de la boquilla:

$$\frac{L_c}{d_c} < 10$$

- Longitud del canal de la boquilla (L_c)
- Diámetro de la boquilla (d_c)

Para la boquilla de 1,75 mm:

$$\frac{10}{1,75} = 5,71 < 10$$

Para la boquilla de 2,85 mm:

$$\frac{10}{2,85} = 3,51 < 10$$

La siguiente imagen presenta las dimensiones determinadas de la boquilla:

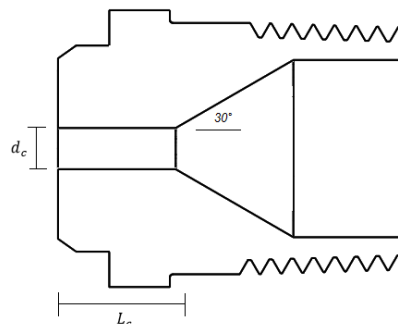


Figura 22. Dimensiones de la boquilla de extrusión

Se ha seleccionado un ángulo en la entrada de la boquilla de 30 grados, ya que ofrece un buen rendimiento ante el gradiente de presión generado por la geometría de la boquilla, además de considerar la viscosidad y la densidad del material a extruir [32].

El plato rompedor funciona como soporte a un paquete de filtros para contener los contaminantes en el proceso de extrusión. Este plato rompedor está compuesto por cierta cantidad de orificios de un diámetro específico, el cual se determina a través del diámetro del tornillo [30].

La siguiente imagen presenta el dimensionamiento del plato rompedor a través del diámetro del tornillo [30]:

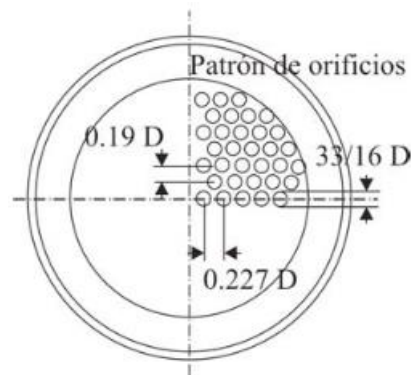


Figura 23. Plato rompedor [30]

A partir de esto, se determina:

Diámetro de orificios:

$$\frac{3}{16}D = \frac{3}{16}(20) = 3,75 \text{ mm}$$

Distancia entre orificios vertical:

$$0,19D = 0,19(20) = 3,8 \text{ mm}$$

Distancia entre orificios horizontal:

$$0,227D = 0,227(20) = 4,54 \text{ mm}$$

La siguiente tabla contiene los parámetros de diseño determinados anteriormente:

PARAMETROS	
Diámetro de la boquilla	1,75 mm – 2.85 mm
Longitud de la boquilla	10 mm
Espesor mínimo de la boquilla	6,94 mm
Relación $\frac{L_c}{d_c}$ de la boquilla de 1,75 mm	5,71
Relación $\frac{L_c}{d_c}$ de la boquilla de 2,85 mm	3,51
Angulo de apertre	30°
Diámetro de orificio del plato rompedor	3,75 mm
Distancia entre orificios vertical	3,8 mm
Distancia entre orificios horizontal	4,54 mm
Velocidad del polímero con la boquilla de 1,75 mm	0,077 m/s
Velocidad del polímero con la boquilla de 2,85 mm	0,029 m/s

Tabla 24. Parámetros de diseño del cabezal

11.7 DISEÑO DEL MUÑÓN

Esta es la parte del tornillo que se acopla con el motor, por lo tanto, el muñón va por fuera del cilindro que ocupa mínimo la longitud útil del tornillo. Para evitar fugas del material, se establece una longitud y un diámetro igual al del tornillo [22].

$$L_{\text{muñon}} = 20 \text{ mm}$$

$$D_{\text{muñon}} = 20 \text{ mm}$$

El vástago tendrá una longitud de 50 mm mientras que su diámetro está determinado a partir de la transmisión de la potencia y bajo condiciones de carga. Por lo tanto, se determina el diámetro adecuado para que el vástago no falle en la operación a partir de la teoría del esfuerzo cortante máximo [33].

$$d^3 \geq \frac{32n}{\pi S_y} \sqrt{\left(\left(M_f + F \frac{D}{8} \right)^2 + M^2 \right)}$$

Donde:

- Diámetro mínimo del vástago (d)
- Factor de seguridad (n)
- Límite de fluencia del material (S_y)
- Momento torsor (M_f)
- Fuerza axial (F)
- Diámetro del tornillo (D)

Se considera un factor de seguridad de 3 para el diámetro mínimo, por lo tanto:

$$d^3 \geq \frac{32(3)}{\pi(415 \times 10^6)} \sqrt{\left(0,26 + (850,97) \frac{0,02}{8}\right)^2 + 53,95^2}$$

$$d \geq \sqrt[3]{3,97 \times 10^{-6}} = 0,0158 \text{ m} \cong 15,83 \text{ mm}$$

De tal forma, se determina que el diámetro del vástago tenga un diámetro mayor a 15,83 mm.

La table 25 contiene los parámetros de diseño determinados anteriormente:

PARAMETROS	
Longitud del muñón	20 mm
Diámetro del muñón	20 mm
Diámetro del vástago	>16 mm
Longitud del vástago	50 mm

Tabla 25. Parámetros de diseño del muñón y vástago

11.8 DISEÑO DEL SISTEMA TÉRMICO

El sistema térmico incorpora resistencias eléctricas de banda con un diámetro igual al del cilindro, y para cumplir con su funcionamiento correctamente, se requiere la potencia necesaria para fundir el material, por lo tanto, se debe determinar parámetros como el volumen del cilindro, tiempo de residencia del material y flujo de calor [35].

Volumen del cilindro (V_c):

$$V_c = L\pi(r_e^2 - r_i^2)$$

Donde:

- Longitud del tornillo (L)
- Radio externo del cilindro (r_e)
- Radio interno del cilindro (r_i)

Por lo tanto:

$$V_c = (0,4)\pi(0,02^2 - 0,0101^2) = 3,74 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

Área de la superficie externa del cilindro (A):

$$A = 2\pi r_e L$$
$$A = 2\pi(0,02)(0,4) = 0,05 m^2$$

Tiempo de residencia de la mezcla (t):

$$t = \frac{\pi L r_t^2}{Q}$$

Donde:

- Flujo volumétrico (Q)
- Radio del tornillo (r_t)

Se obtiene:

$$t = \frac{\pi(0,4)(0,01)^2}{1,864 \times 10^{-7}} = 674,16 s \approx 11,23 \text{ minutos}$$

Diferencial de temperatura (ΔT):

$$\Delta T = T_{maxima} - T_{ambiente}$$

- Temperatura máxima (T_{maxima})
- Temperatura ambiente ($T_{ambiente}$)

$$\Delta T = 573,15 - 298,15 = 275 \text{ } ^\circ K$$

Flujo de calor (Q_r):

$$Q_r = \rho V_c C_p \Delta T \left[1 - e^{\left(-\frac{t U_B A}{\rho V_c C_s} \right)} \right]$$

Donde:

- Densidad del acero AISI 4140 (ρ)
- Volumen del cilindro (V_c)
- Calor específico del acero (C_p)
- Coeficiente de conductividad térmica del acero (U_B)

La siguiente tabla presenta las propiedades térmicas del acero AISI 4140 que se requieren en el cálculo del flujo de calor [36] [37]:

PROPIEDADES TERMICAS		
Calor específico	519 (J/Kg.°K)	20-400 °C
Coefficiente de conductividad térmica	37,7 (W/m.°K)	300 °C
Densidad	7833 Kg/m ³	

Tabla 26. Propiedades térmicas del acero AISI 4140 [36] [37]

Por lo tanto, se determina:

$$Q_r = (7833)(3,74 \times 10^{-4})(519)(275) \left[1 - e^{\left(-\frac{(674,16)(37,7)(0,05)}{(7833)(3,74 \times 10^{-4})(519)} \right)} \right]$$

$$Q_r = 236854,54 J$$

A partir del flujo de calor que la resistencia eléctrica debe ejercer, se determina la potencia aparente (Pot_a) [35]:

$$Pot_a = \frac{Q_r}{t}$$

$$Pot_a = \frac{236854,54}{674,16} = 351,33 W$$

Para estimar la potencia real (Pot_{real}) se tienen en cuenta el factor por desgaste y el factor de sobredimensionamiento [35]:

$$Pot_{real} = Pot_a * f_d * f_s$$

Donde:

- Factor de desgaste (f_d)
- Factor de sobredimensionamiento (f_s)

Se obtiene:

$$Pot_{real} = 351,33 * 1,1 * 1,2 = 463,76 W$$

La siguiente tabla contiene los parámetros de diseño determinados anteriormente:

PARAMETROS	
Volumen del cilindro	$3,74 \times 10^{-4} m^3$
Tiempo de residencia de la mezcla	674,16 s

Flujo de calor	236854,54 J
Potencia aparente	351,33 W
Potencia real	369,6 W
Cantidad de resistencias de banda	2
Diámetro de la resistencia	40 mm
Longitud de la resistencia	60 mm
Potencia	250 W
Temperatura máxima de funcionamiento	400 °C
Voltaje	110 V

Tabla 27. Parámetros de diseño de las resistencias eléctricas

A partir de los parámetros determinados, se procede a seleccionar los componentes para realizar cada función.

11.8.1 RESISTENCIAS ELÉCTRICAS

A partir de la potencia real determinada, se seleccionan dos resistencias de banda a nivel comercial con la capacidad de operar a más de 300°C [38].

La siguiente imagen muestra la resistencia eléctrica seleccionada:



Figura 24. Resistencia eléctrica de banda de acero inoxidable [38]

La siguiente tabla presenta las características de la resistencia eléctrica de banda:

CARACTERÍSTICAS DE RESISTENCIAS ELECTRICAS	
Tipo	Banda
Material de la banda	Acero inoxidable
Voltaje	110 V
Potencia	200 W
Temperatura máxima	400°C
Diámetro	35 mm
Longitud	60 mm
Precio	COP \$ 63.700

Tabla 28. Características de la resistencia eléctrica [38]

11.8.2 CONTROLADOR DE LAS RESISTENCIAS

El control de temperatura de las resistencias eléctricas se realiza a través de un controlador digital PID que proporciona un ajuste de la temperatura requerida. Se selecciona un controlador PID REX-C100FK02 que incorpora un termopar tipo k. La salida es para un relé de estado sólido SSR-40 DA. Las siguientes imágenes muestran el controlador PID y el relé de estado sólido:



Figura 25. Controlador PID REX-C100 y relé de estado sólido SSR-40 AD [39] [40]

Las siguientes tablas presentan las características del controlador y del relé:

CARACTERISTICAS DEL CONTROLADOR PID	
Modelo	REX-C100
Voltaje de alimentación	110 V
Rango de medición	0 – 999°C
Precisión de medición	±5% FS
Resolución	14 bit
Periodo de muestreo	0,5 seg
Resistencia de aislamiento	>500 mΩ
Dimensiones	85x47x47mm
Temperatura de operación	0 - 50°C
Salida a relé	0 - 240 VAC 3ª
Precio	COP \$ 69.700

Tabla 29. Características del controlador de temperatura PID [39]

CARACTERISTICAS DEL RELE DE ESTADO SOLIDO	
Marca	Fotek
Serie	SSR
Modelo	SSR-40DA
Voltaje de entrada	3 - 23V DC
Voltaje de salida	24 -380V AC

Corriente de salida	40 A
Tiempo de encendido	<= 10 ms
Corriente de fuga apagada	<= 2 mA
Dimensiones	6x4,5x2,2 cm
Peso	0,105 Kg
Precio	COP \$ 23.950

Tabla 30. Características del relé de estado sólido [40]

Conexión eléctrica del sistema de control térmico:

Para realizar el circuito eléctrico se requiere conocer las salidas y las entradas del controlador PID y del SSR. De esta manera, se tendrá claro la conexión entre los componentes. Las siguientes imágenes representan las salidas y las entradas del PID y del SSR.



Figura 26. Entradas y salidas del circuito eléctrico del controlador PID



Figura 27. Entradas y salidas del circuito eléctrico del SSR

A partir de esto, y de las recomendaciones del manual PID installation and wiring diagram obtenemos un diagrama del circuito eléctrico del sistema:

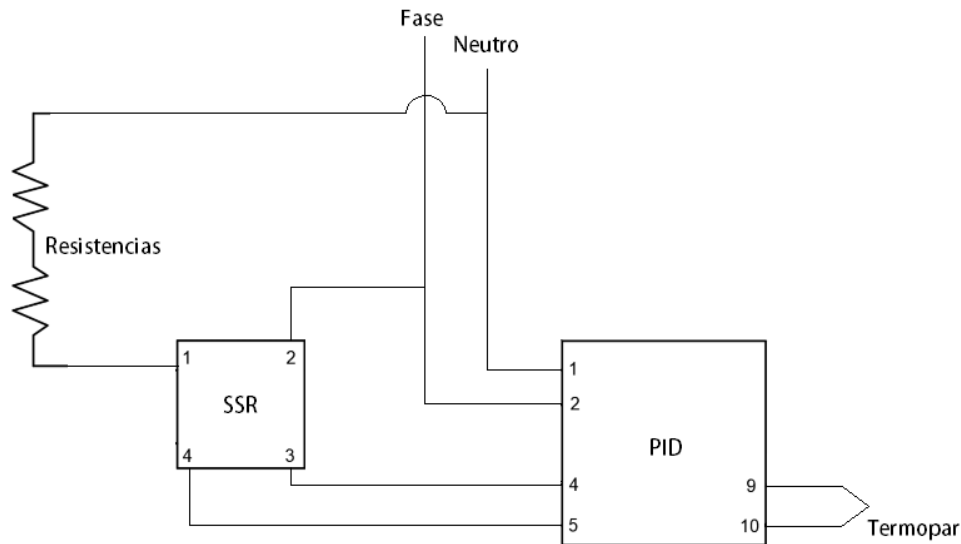


Figura 28. Diagrama del circuito eléctrico del sistema térmico

La unidad de control PID es alimentada a través de los puertos 1 y 2, que están conectados a una red de alimentación de 110 V. Las conexiones de los puertos 1 y 2 del relé permiten el paso de la corriente hacia las resistencias. El puerto 3 y 4 del relé, son la entrada y la salida de la señal proveniente del puerto 4 la unidad de control cuando se ha determinado una temperatura. Por último, los puertos 9 y 10 están conectados con el termopar.

11.9 DILATACION TERMICA

La máquina podría sufrir una deformación o estar sometida a esfuerzos por cambios de temperatura en el proceso de extrusión. Partes como el tornillo y cilindro de extrusión, estarán al inicio de la operación a temperatura ambiente y en el transcurso del proceso de fusión, se calentarán cada vez más. Por lo tanto, estos componentes podrían presentar un crecimiento de sus dimensiones o sufrir esfuerzos por restricciones, de tal manera se requiere determinar la dilatación de cada componente [41].

Dilatación térmica lineal (δ):

$$\delta = L(\alpha\Delta T)$$

Donde:

- Longitud del componente (L)

- Coeficiente de dilatación térmica del acero AISI 4140 entre 20 a 400°C (α)
- Diferencial de temperatura (ΔT)

$$\alpha = 13,7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\Delta T = T_{\text{max}} - T_{\text{ambiente}} = 300 - 25 = 275 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$L_{\text{tornillo}} = 400 \text{ mm}$$

$$L_{\text{cilindro}} = 410 \text{ mm}$$

Tornillo:

$$\delta = (410)((13,7 \times 10^{-6})(275)) = 1,54 \text{ mm}$$

Cilindro:

$$\delta = (410)((13,7 \times 10^{-6})(275)) = 1,51 \text{ mm}$$

La dilatación térmica para el tornillo y el cilindro representa un 0,38% de la longitud de cada componente. Este resultado, indica que la dilatación en los componentes no es significativa para la operación de la máquina.

11.10 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE ACCIONAMIENTO DEL TORNILLO

En esta sección se determinan los elementos encargados del control de velocidad del tornillo, los cuales se describen a continuación:

11.11 MOTOR

A partir de la baja potencia y torque de accionamiento que necesita el tornillo, además de la velocidad requerida de operación, se selecciona un motor DC que proporciona un fácil control de velocidad y una gran flexibilidad de las características par-velocidad.

Se selecciona un motor eléctrico DC de escobillas de la marca Ampflow que cumple con la potencia y dimensiones requeridas, aun así la velocidad de salida debe ser regulada al igual que el torque. A continuación se presenta la imagen y la tabla de las características del motor [42]:



Figura 29. Motor eléctrico Ampflow [42]

CARACTERISTICAS DEL MOTOR	
Tipo	DC
Marca	Ampflow
Referencia	M27-150
Potencia	150 W
Velocidad max	3800 rpm
Voltaje	24 V
Dimensiones motor	2,7x3,9 in
Peso	3 Lb
Precio	COP \$361.900

Tabla 31. Características del motor eléctrico del tornillo extrusor [42]

11.12 REDUCTOR DE VELOCIDAD

Mediante un reductor se obtendrá el suficiente par y se determina la velocidad de operación para obtener 2 Lb/h de material extruido. Se seleccionó el reductor de la marca DEVOC de engranajes helicoidal que brinda un alto par. A continuación se presenta la imagen y la tabla de las características del reductor [43]:

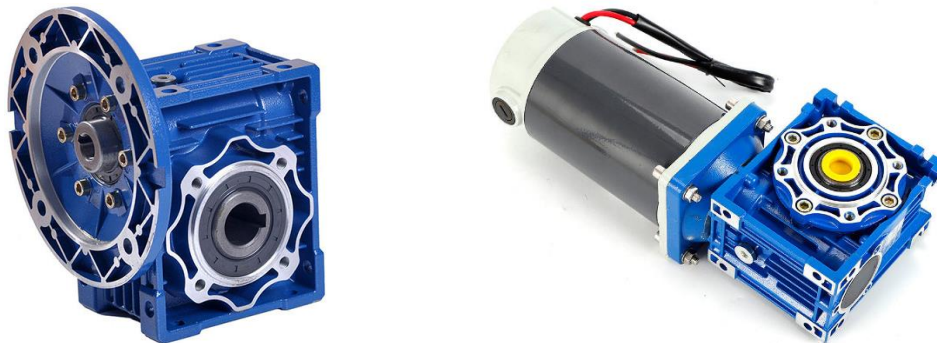


Figura 30. Reductor de velocidad DEVO [43]

CARACTERISTICAS DEL REDUCTOR	
Marca	DEVO
Referencia	NMRV 50
Velocidad de salida	14 – 186 rpm
Potencia de entrada	0,12 – 0,75 Kw
Relación	7,5 – 100:1
Torque permisible	65 – 84 Nm
Peso	9,5 – 14,5 Kg
Dimensiones	24x28x22 cm
Precio	USD \$ 48

Tabla 32. Características del reductor DEVO [43]

A partir de las características del reductor seleccionado, se determina una relación de 80:1 con una regulación de la velocidad del motor a la entrada del reductor para obtener a la salida una velocidad del tornillo de 22 rpm con un par torsor de mayor de 53 Nm.

11.13 CONTROL DE VELOCIDAD

El control de velocidad del motor se realiza por modulación de ancho de pulso (PWM). El PWM es una manera de establecer una potencia intermedia entre la potencia máxima y la de apagado. Con un interruptor simple y una fuente de alimentación proporcionan una potencia solo cuando está activado [44].

La siguiente imagen es un controlador de velocidad para motores dc con escobilla:

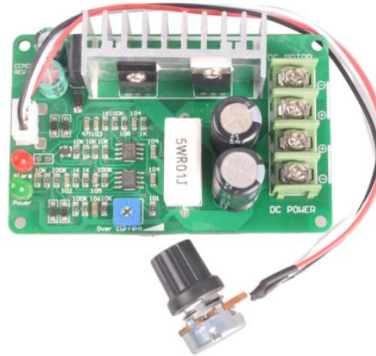


Figura 31. Controlador de velocidad DRIV-PWM-36V-360W [45]

La siguiente tabla presenta las características del controlador de velocidad:

CARACTERISTICAS DEL CONTROLADOR DE VELOCIDAD	
Tipo	PWM
Referencia	DRIV-PWM-36V-360W

Corriente máxima continua de salida	10 A
Corriente graduable	1 – 10 A
Potencia máxima de salida	360 W
Frecuencia	21 KHz
Dimensiones	85,5x54x27 mm
Precio	COP \$ 28.560

Tabla 33. Características del controlador de velocidad PWD [45]

11.14 FUENTE DE ALIMENTACIÓN

El sistema cuenta con una fuente conmutada de 24V y con una potencia máxima de entrega de 156W, además cuenta con una protección contra el sobrevoltaje, sobrecarga y cortocircuito.

La siguiente imagen muestra la fuente de alimentación del sistema [45]:



Figura 32. Fuente de alimentación LRS-150-24 [45]

La siguiente tabla muestra las características de la fuente:

CARACTERISTICAS DE LA FUENTE DE ALIMENTACION	
Referencia	LRS-150-24
Voltaje de salida	24 V
Corriente	6,5 A
Voltaje de entrada	110 – 220 V
Potencia de salida	156 W
Precio	COP \$ 116.263

Tabla 34. Características de la fuente de alimentación [45]

El módulo de control de velocidad PWM y la fuente de alimentación van conectados a los puertos de entrada y salida a 24V. El motor dc va conectado al módulo de control, donde el potenciador regula la velocidad del motor.

El siguiente diagrama muestra el circuito eléctrico de los componentes:

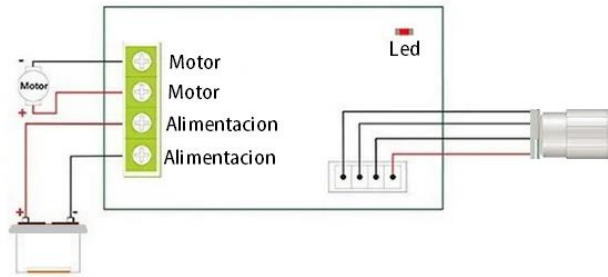


Figura 33. Diagrama del circuito eléctrico del control de velocidad del motor

11.15 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

A partir del dimensionamiento de los componentes de la extrusora, se procede a diseñar la estructura que soporta los componentes de la máquina. La parte externa de la estructura soporta el sistema de accionamiento del tornillo, con el fin de que sea adaptable a cualquier tipo de transmisión de potencia. En el interior se encuentran el cilindro con las resistencias, protegiendo al usuario de la alta temperatura de los componentes. En una parte interna de la estructura se encuentran los componentes del sistema de control de velocidad y de temperatura. Se selecciona acero ASTM A36 para la fabricación de la estructura debido a sus características mecánicas y de soldabilidad apropiadas.

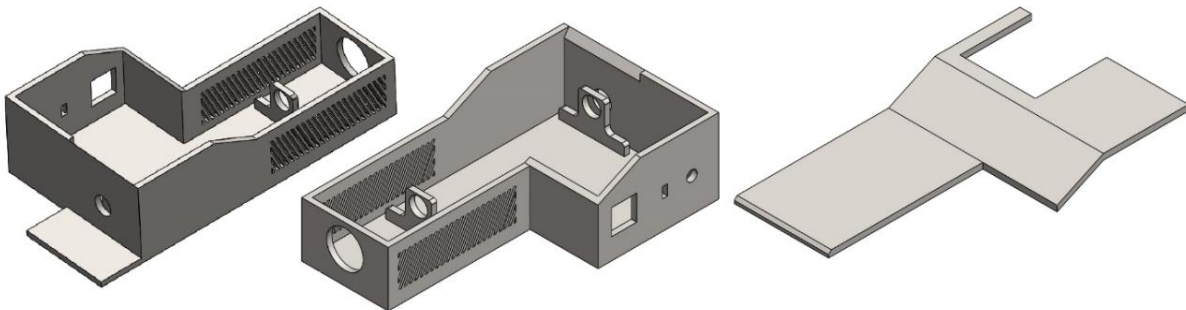


Figura 34. Estructura con soporte externo para el motor y partes internas con cubierta superior

11.16 MAQUINA EXTRUSORA

Esta sección presenta los componentes determinados a partir del diseño de detalle, el concepto final de la máquina y las fases de ensamblaje.

La siguiente tabla presenta los componentes que incorpora la maquina extrusora:

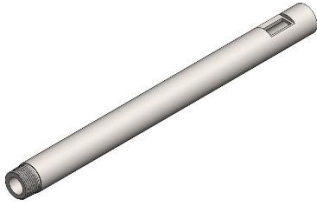

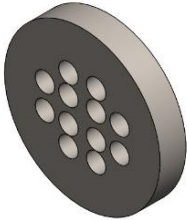
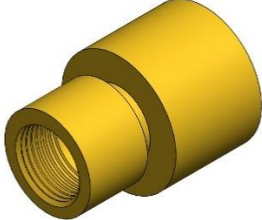
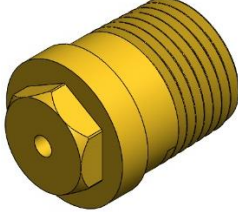
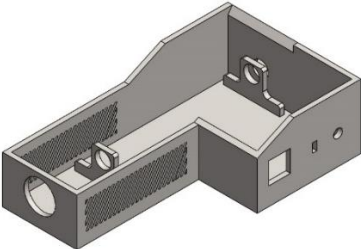
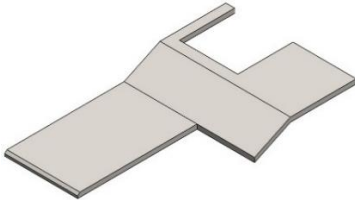






COMPONENTES DE LA MAQUINA EXTRUSORA		
		
Cilindro	Tornillo	Tolva
		
Plato rompedor	Cabezal	Boquilla
		
Estructura de soporte	Cubierta superior de la estructura	Fuente de alimentación
		
DRIV-PWM	Reductor	Motor eléctrico DC
		
SSR-40	PID y termopar tipo K	Resistencia eléctrica

Tabla 35. Componentes de la maquina extrusora

Mediante los componentes determinados, se obtiene el diseño del concepto final, donde cada pieza está ubicada en el interior de la estructura excepto del sistema de accionamiento del tornillo.

Las siguientes imágenes presentan la vista isométrica de la extrusora:

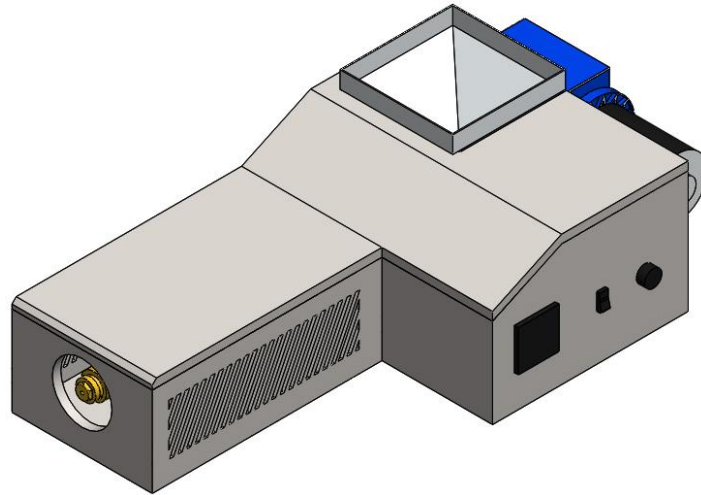


Figura 35. Vista isométrica de la maquina extrusora

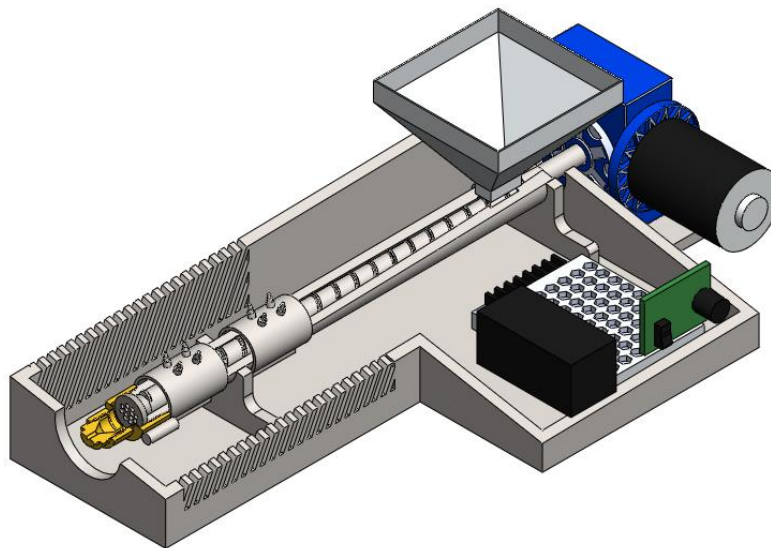


Figura 36. Vista isométrica seccionada de la extrusora

El tornillo extrusor se encuentra en el interior del cilindro, el cual está ubicado en los soportes internos de la base de la estructura. El tornillo va acoplado al motorreductor que se encuentra en la parte externa. El motor es alimentado a 24V y genera una potencia mayor a los 125W que requiere el tornillo, además el reductor permite desarrollar el par suficiente. Un controlador de velocidad va conectado al motor para regular las revoluciones a la entrada del reductor. La tolva está ubicada en la zona de alimentación del cilindro y tiene una capacidad de suministrar material para una hora de operación, obteniendo la cantidad de material requerido. Las resistencias están ubicadas alrededor del cilindro en la zona de compresión y de dosificación, alimentadas a 110V con una potencia de 200W cada una, lo suficiente para generar y mantener una temperatura de operación de 265 a 270°C. Las resistencias están conectadas al relé de estado sólido que permite proveer una potencia máxima de 380W, y un controlador PID que regula la temperatura de operación. El cabezal en la parte frontal del cilindro incorpora el plato rompedor, y acopla el cilindro con la boquilla. La boquilla es fácil de intercambiar, ya que se requiere extruir filamento tanto de 1,75 mm de diámetro como de 2,85 mm. Por último, la estructura proporciona la base y el soporte de los componentes que incorpora la maquina extrusora, además brinda protección al usuario de la alta temperatura de operación.

11.17 OPERACIONES DE FABRICACIÓN DE LA MAQUINA EXTRUSORA

El proceso de fabricación de la maquina conlleva un conjunto de operaciones necesarias para transformar la materia prima en las características requeridas de cada componente. Por tal razón, el siguiente diagrama presenta el flujo de operaciones requeridas para obtener el ensamblaje final de la maquina extrusora.

La figura 38 presenta el diagrama del flujo de operaciones de fabricacion de los componentes hasta su ensamblaje:



Figura 37. Diagrama de operaciones de fabricación de los componentes

TIPO	SIMBOLO	CANTIDAD
Paso de fabricacion	○	35
Ensamble	□	1

Tabla 36. Resumen de las operaciones de fabricación de la maquina

El flujo de operaciones indica que se requieren de 35 pasos en total para obtener el ensamblaje de la máquina.

A continuación se describen las operaciones de fabricación presentes en los componentes que se encuentran en el diagrama:

Cortes de láminas:

Los cortes de las láminas se realizan a través de una cizalla, donde también se pueden considerar otro tipo de herramienta adecuada para esta función.

Perforación de agujeros y rosca:

La perforación de los agujeros de las láminas para la estructura y tolva, el cilindro y el cabezal, se considera un taladro de árbol con las brocas requeridas para cada elemento, y un torno industrial para realizar el roscado del cilindro y la boquilla, además realizara el maquinado y transformado de las barras de latón en el cabezal y boquilla.

Unión:

Las láminas para la estructura y la tolva al igual que el cilindro están compuestos por tornillos M5. El cilindro y el cabeza están unidos con rosca M35x1,5. Por último el cabezal está unido a la boquilla por rosca M22. Las uniones mediante soldadura se realizan a través de arco revestido con electrodo de 6010 o 6013 debido a la facilidad de soldabilidad de los materiales para la estructura y otros elementos.

Pulir láminas:

Según la condición del elemento se utiliza un esmeril de banco para pulir los cortes de las láminas.

Dobles:

Para los dobles de las láminas para la estructura y tolva se utiliza una dobladora de lámina manual.

11.18 FASES DE ENSAMBLAJE

Para ensamblar los componentes de la máquina, se presentan las siguientes imágenes y descripciones como guía. La siguiente imagen presenta el explosionado de los componentes de la maquina:

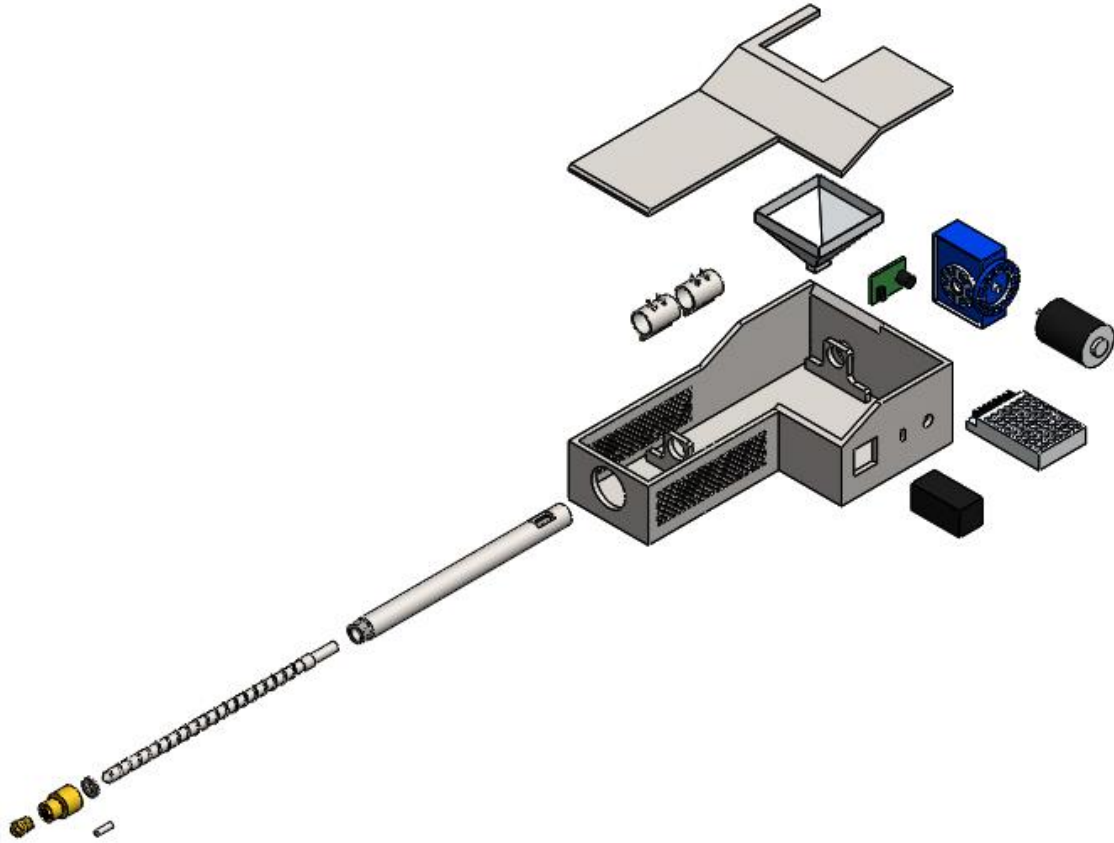


Figura 38. Vista explosionada de la extrusora

Las siguientes descripciones presentan el ensamblaje de los componentes:
El tornillo junto al cilindro van posicionados en los soportes internos de la estructura, como se muestra en la siguiente imagen:

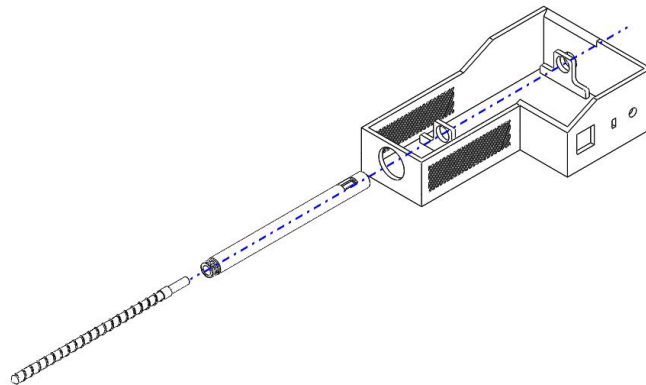


Figura 39. Ensamble del tornillo, cilindro y estructura

La boquilla se acopla al cabezal que incorpora el plato rompedor y luego todo el sistema de la boquilla se une al cilindro.

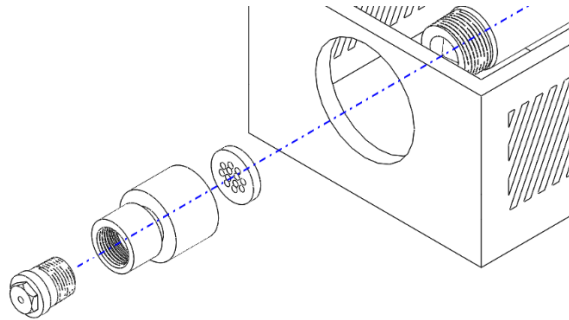


Figura 40. Ensamble de la boquilla, cabezal, plato rompedor y cilindro

El motor está acoplado al reductor y este al tornillo a través del vástago que sobresale de la estructura.

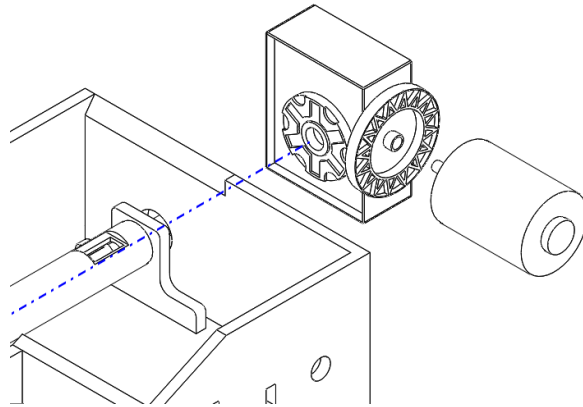


Figura 41. Ensamble del motor, reductor y tornillo

La tolva se acopla al cilindro soportado en el interior de la estructura.

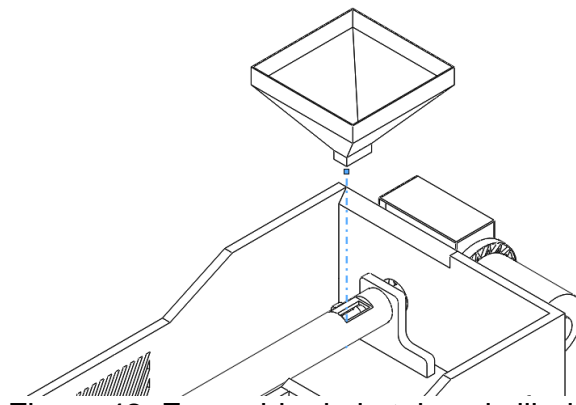


Figura 42. Ensamble de la tolva al cilindro

Se adaptan las resistencias eléctricas tipo abrazadera o banda en las zonas de compresión y de dosificación del cilindro.

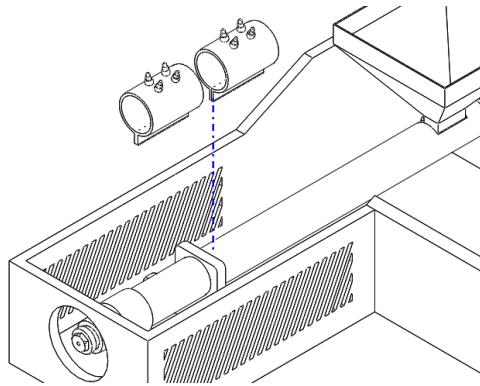


Figura 43. Ensamble de las resistencias eléctricas y cilindro

El sistema de control de temperatura y del motor, como la fuente de alimentación, el módulo PWM junto con sus demás piezas y el controlador PID van instalados en el interior de la estructura. El sensor termopar va acoplado al cabezal.

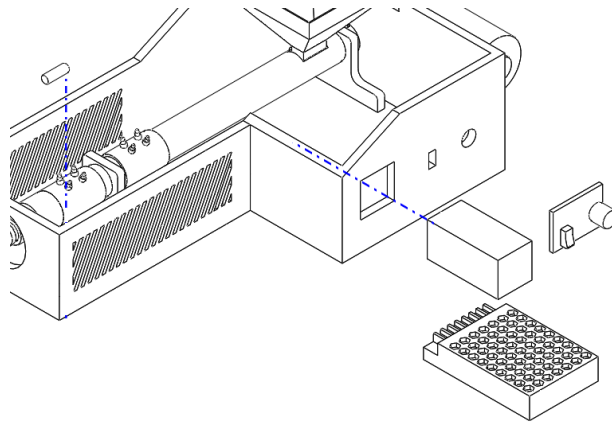


Figura 44. Ensamble del sistema del control de temperatura y del motor en la estructura

Por último se ubica la cubierta en la parte superior de la estructura, dejando al descubierto la entrada de la tolva.

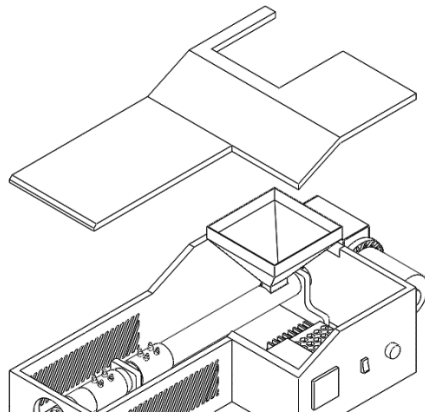


Figura 45. Ensamblaje de la cubierta de la estructura

Los planos a detalle de los componentes se encuentran en el Anexo 1.

12 CONCLUSIONES

La máquina extrusora diseñada para generar filamento a partir de PET reciclado se desarrolló a través de la metodología de Cross. Esta metodología permitió desarrollar la máquina mediante el diseño conceptual que identifico las características claves, funciones y requerimientos, además, estableció la solución conceptual en forma de esquema que determino el diseño de la extrusora. Por último, el diseño detallado permitió determinar la geometría de los componentes, la selección de los materiales, la definición de las etapas de ensamblaje, el diseño conceptual final, la generación de los planos y la selección del sistema de control de temperatura y velocidad.

El árbol de objetivos desarrollado en el diseño conceptual, identifico los requerimientos que debían cumplirse en el diseño de la máquina. Requerimientos como la seguridad, durabilidad, poco ruido, facilidad de operación, fabricación sencilla, económica, ligera y buena apariencia, los cuales debían ser incorporados en el diseño. El diseño de la máquina extrusora desarrollado satisface en gran medida estos objetivos de la siguiente manera: La seguridad de la máquina es realizada a través de la estructura que soporta en su interior los componentes que están a elevadas temperaturas y a su vez, aísla el ruido provocado por la operación. La durabilidad es satisfecha mediante el material del que están conformados los componentes, ya que son resistentes a la abrasión, la corrosión y a altas temperaturas. El sistema de control de temperatura y de velocidad del motor proporcionan un fácil manejo y operación de la máquina, además, el diseño de la tolva permite contener el material suficiente para cumplir con el objetivo de obtener 2 Lb de filamento PET extruido en una hora. A partir de componentes estándar y de piezas con un diseño similar a máquinas extrusoras a nivel comercial y académico, la extrusora cumple con una fabricación sencilla, pero componentes como el motor eléctrico representan un costo de adquisición significativo. Por lo cual, la máquina está compuesta con piezas costosas, y sin embargo sigue siendo aún más asequible que una extrusora comercial, además su consumo de operación es menor al de muchas máquinas extrusoras de escritorio que hay en el mercado. Los componentes de la máquina al estar en el interior de una estructura base y de tener dimensiones pequeñas, permite ser compacta y fácil de transportar. La apariencia de la máquina es sencilla y solo los componentes de accionamiento del tornillo se encuentran en el exterior.

A través de la verificación sistemática entre las características técnicas y los objetivos en la casa de la calidad, se identifica que la relación de la longitud y diámetro (L/D) requería ser apropiada, ya que puede afectar positiva o negativamente parámetros como la velocidad de operación del tornillo, la potencia consumida de las resistencias eléctricas y del motor, además de la razón de producción del filamento. Por esta razón, se determinó una relación L/D del tornillo corta, ya que cumple con la dirección de mejora para afectar positivamente a estas

características, además permite un mejor proceso de temperatura para el material PET.

El diseño conceptual determinado a partir de los requerimientos en la tabla de objetivos ponderados, indicaba que el primer concepto tenía mayor relevancia en requerimientos como la operación confiable, fabricación sencilla y en un diseño ligero, ya que los componentes presentan menor tamaño como lo es el sistema de transmisión de potencia que es un motorreductor, que a su vez, representa una operación más confiable. Aun así, el diseño de la tolva se cambió por uno de sección cuadrada ya que es menos compleja de fabricar, lo que afecta positivamente la fabricación sencilla del diseño. Por otro lado, el diseño estándar del tornillo extrusor en comparación con los de dos etapas presenta una mayor producción y es aún más asequible que tornillos mezcladores o de barrear.

El resultado final del diseño es determinado en la sección de diseño detallado, donde la máquina fue diseñada para generar un flujo de 2 Lb/h de filamento a partir de dos diferentes diámetros, los cuales son los más comunes en el mercado, que son de 1,75 mm y de 2,85 mm. Las boquillas de diferente diámetro se intercambian fácilmente ya que el cabezal cuenta con un sistema de roscado sencillo. La boquilla de 1,75 mm obtiene el flujo requerido a partir de una velocidad de operación del tornillo de 22 rpm, en cambio la boquilla de 2,85 mm obtiene este mismo flujo con una cantidad mucho menor, con un 36% de la velocidad de rotación de la primera boquilla.

Para el desarrollo de la maquina se establecieron unos requerimientos y parámetros técnicos, los cuales fueron abordados y determinados, por lo tanto, se concluye que se obtuvieron mejores resultados de lo esperado como lo es en el caso de la velocidad de rotación del tornillo, la cantidad de componentes, la obtención de la temperatura de operación de dos resistencias con una temperatura de hasta 400°C máximo de los cuales solo se requieren 270°C para operar. Por otro lado, la potencia consumida resulto mayor a lo esperado, aun así se mantiene por debajo de la mayoría de máquinas extrusoras comerciales. Por lo tanto, el diseño de la maquina extrusora cumple satisfactoriamente con la mayoría de los objetivos de diseño y parámetros técnicos para la generación de filamento funcional y de bajo costo con material PET reciclado.

BIBLIOGRAFIA

[1] RAMOS ESPINOSA, Giancarlo y LOMBANA GOMEZ, Guillermo. Diseño e implementación de un sistema de extrusión de filamento para impresión 3D a partir de botellas recicladas. Proyecto de grado para optar al título de ingeniero mecatrónico. Santiago de Cali. Universidad Autónoma de Occidente. Facultad de ingeniería. Departamento de automática y electrónica. 2019.

[2] ZANDER, Nicole.GILLAN, Margaret. LAMBETH, Robert. "Recycled polyethylene terephthalate as a new FFF feedstock material". {En línea}. {11 Marzo de 2018} disponible en: (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860418300046?via%3Dihub>)

[3] ESQUIVEL CUBILLO, Jose Alberto. JIMENEZ ABARCA, Jose Martin. MENA VALVERDE, Adrian Josue. Diseño de una maquina extrusora de filamento termoplástico alimentada por desechos plásticos. Trabajo final para aspirar al título y grado de Licenciatura en ingeniera mecánica. Costa Rica. Universidad de Costa Rica. Faculta de ingeniería. Escuela de ingeniería mecánica. 2018

[4] KOTSAR, Mari-Liis. Filament extrusion of recycled polylactic acid and its suitability for three-dimensional printing. Tallinn. Tallinna Tehnika Kõrgkool University of Applied Science. Institute of Circular Economy and Technology. Environmental Technology and Management. 2018.

[5] ORTIZ ABATA, Cristian. Diseño y construcción de una maquina extrusora de filamento de 1,75 mm y 3 mm para impresoras 3D, a partir de polímero reciclado. Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de ingeniero en mecatrónica. Latacunga. Universidad de las fuerzas armadas. Departamento de ciencias de la energía y mecánica. 2018.

[6] WOERN, Aubrey. MCCASLIN, Joseph. PRINGLE, Adam. PEARCE, Joshua. "RepRapable Recyclebot: Open source 3-D printable extruder for converting plastic to 3-D printing filament". {En línea}. {3 Mayo 2018} disponible en: (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468067218300208?via%3Dihub>).

[7] HERIANTO. ATSANI, S. . MASTRISISWADI, H. "Recycled Polypropylene Filament for 3D Printer: Extrusion Process Parameter Optimization". {En línea}. {1 Enero de 2020} disponible en: (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/722/1/012022>).

[8] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Plastic recycling: an underperforming sector ripe for a remake [sitio web]. 2 de Enero de 2019.

[Consultado: 3 de Agosto de 2020]. Disponible en: <https://www.unenvironment.org/news-and-stories/story/plastic-recycling-underperforming-sector-ripe-remake>

[9] CLINICA JURIDICA DE MEDIO AMBIENTE Y SALUD PUBLICA. Situación actual de los plásticos en Colombia y su impacto en el medio ambiente. [Consultado: 3 de Agosto de 2020]. Disponible en: http://greenpeace.co/pdf/2019/gp_informe_plasticos_colombia_02.pdf

[10] GREENPEACE. Datos sobre la producción de plásticos. [sitio web]. [Consultado: 3 de Agosto de 2020]. Disponible en: <https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/consumismo/plasticos/datos-sobre-la-produccion-de-plasticos/>

[11] EL TIEMPO. No para debate sobre el uso del plástico. [sitio web]. [Consultado: 3 de Agosto de 2020]. Disponible en: <https://www.eltiempo.com/colombia/cali/no-para-debate-sobre-el-uso-del-plastico-415106>

[12] VANGUARDIA. Bucaramanga aumentó el reciclaje en más de 72 toneladas cada mes. [sitio web]. [Consultado: 3 de Agosto de 2020]. Disponible en: <https://uao.libguides.com/c.php?g=529834&p=3623716#Informe>

[13] IMPRESION DIGITAL. Tendencias en impresión 3D y fabricación aditiva para 2020. [sitio web]. [Consultado: 3 de Agosto de 2020]. Disponible en: <https://impresiondigital.ituser.es/noticias-y-actualidad/2020/01/tendencias-en-impresion-3d-y-fabricacion-aditiva-para-2020-i>

[14] ALL3DP. How Much Do 3D Printing Materials Cost?. [sitio web]. [Consultado: 3 de Agosto de 2020]. Disponible en: <https://all3dp.com/2/how-much-do-3d-printer-materials-cost/>

[15] CAMARA DE COMERCIO DE BOGOTA, CLUSTER DE COMUNICACION GRAFICA DE BOGOTA. Colombia entierra anualmente 2 billones de pesos en plásticos que se pueden reciclar. [sitio web]. [Consultado: 9 de Agosto de 2020]. Disponible en: <https://www.ccb.org.co/Clusters/Cluster-de-Comunicacion-Grafica/Noticias/2019/Julio-2019/Colombia-entierra-anualmente-2-billones-de-pesos-en-plasticos-que-se-pueden-reciclar>

[16] NTH GRILON. Cómo imprimir PETG con éxito. [sitio web]. [Consultado: 9 de Agosto]. Disponible en: <http://www.nth.com.ar/es/blog/como-imprimir-petg-con-exito--n70>

[17] GROOVER. Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna: Materiales, procesos y sistemas [En línea]. 3 ed. Mexico: McGraw-Hill Interamericana. 2007. pp.

60 - 266. Disponible en: https://www.elsolucionario.org/fundamentos-de-manufactura-moderna_19/

[18] KUTZ, Myer. Mechanical Engineers' Handbook [En línea]. 2 ed. United States of America: John Wiley & Sons, Inc. 1998, 116 p. Disponible en: <https://www.elsolucionario.org/mechanical-engineers-handbook-myer-kutz-2nd-edition/>

[19] ADDITIVE MANUFACTURING. What is Additive Manufacturing?. [sitio web]. [Consultado: 20 de Agosto de 2020]. Disponible en: <https://additivemanufacturing.com/basics/>

[20] EDNATIVES. FDM o modelado por deposición fundida, te explicamos todo!. [sitio web]. [Consultado: 20 de Agosto de 2020]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/modelado-por-deposicion-fundida29072015/#!>

[21] CROSS, Nigel. Métodos de Diseño: Estrategias para el diseño de productos. Mexico: Limusa Wiley. 2002. 55 p. Disponible en: https://www.academia.edu/33266990/Cross2002Metodos_Métodos_de_Diseño_Estrategias_para_el_Diseño_de_Productos

[22] SAVGORODNY, V. K. Transformación de plásticos. España, Barcelona: Editorial Gustavo Gili, S. A., 1973.

[23] GILES, Harold; WAGNER, John; MOUNT, Eldridge. Extrusion: the definitive processing guide and handbook. EEUU: William Andrew, Inc, 2004.

[24] CHANDA, Mana. Plastics technology handbook. 5 ed. EEUU: Taylor and Francis Group, LLC, 2018.

[25] ROBOTDIGG EQUIP MAKERS: Empower Engineers Global Sourcing Supply Chain from Shanghai. Disponible en: <https://www.robotdigg.com/>

[26] ASHTER, Syed Ali. Thermoforming of Single and Multilayer Laminates. 1 ed. EEUU: William Andrew, Inc, 2014.

[27] BATA, Attila. Melt shear viscosity of original and recycled PET in wide range shear rate. Hungría: John Von Neumann University, 2017.

[28] BUDYNAS, Richard y NISBETT, Keith. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. 9 ed. Mexico: McGraw Hill/Interamericana editores, S.A. 2012.

[29] AZO MATERIALS. AISI 4140 Alloy Steel (UNS G41400). 2012. Disponible en: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6769>

- [30] BELTRAN, M. y MARCILLA, A. Tecnología de polímeros.
- [31] CIFUENTES, R. Diseño de una maquina extrusora para la empresa Plastik de occidente. Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero de materiales. Universidad del Valle. Santiago de Cali, 2011
- [32] ESQUIVEL, José; JIMENEZ, José y MENA, Adrián. Diseño de una maquina extrusora de filamento termoplástico alimentada por desechos plásticos.
- [33] PARRA, Rodrigo. Diseño de extrusora de filamento para impresión 3D a partir de plásticos reciclados. Memoria para optar al título de ingeniero civil mecánico. Universidad técnica Federico Santa María. Santiago de Chile. 2017
- [34] MICHAELI, Walter. Extrusión dies for plastics and rubber: design and engineering computations. 2 ed. Munich; Vienna; New York; Barcelona: Hanser. 1992.
- [35] ORTIZ, Cristian. Diseño y construcción de una maquina extrusora de filamentos de 1,75 mm y 3 mm para impresoras 3D, a partir de polímero reciclado. Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de ingeniero en mecatrónica. Universidad de las fuerzas armadas Espe. Latacunga. 2018.
- [36] GRADOS DE MATERIAL MUNDIAL: SAE AISI Acero 4140 Ficha Técnica, Propiedades, Dureza, Características, Tratamiento Térmico. Disponible en: <https://www.materialmundial.com/>
- [37] THYSSENKRUPB STEEL: catalogo comercial acero AISI 4140. Disponible en: https://www.thyssenkruppsteel.com/media/cl/media/aceros/aceros_de_f_cil_mecanizaci_n/aceros_aleados/sae_4140.pdf
- [38] MERCADO LIBRE: Resistencia eléctrica tipo abrazadera. Disponible en: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-580158241-resistencia-de-banda-extrusora-inyectora-200w-_JM?matt_tool=19390127&utm_source=google_shopping&utm_medium=organic
- [39] MERCADO LIBRE: Controlador De Temperatura Pid Rex C100 Pirómetro 400°C. Disponible en: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-556377055-controlador-de-temperatura-pid-rex-c100-pirometro-400c-_JM?matt_tool=19390127&utm_source=google_shopping&utm_medium=organic
- [40] MERCADO LIBRE: Rele De Estado Solido Ssr-40 Da 40a 24-380vac Fotek Arduino. Disponible en: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-596659216-rele-de-estado-solido-ssr-40-da-40a-24-380vac-fotek-arduino-_JM#position=5&type=item&tracking_id=df8ecb99-f89e-4ec6-af73-a0bb28a8ff35

[41] MOTT, Robert. Resistencia de materiales. 5 ed. México: Pearson Educación, Inc. 2009.

[42] MERCADO LIBRE: Motor Eléctrico Cepillado Ampflow M27-150, 150w, 12v, 24v. Disponible en: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-576166593-motor-electrico-cepillado-ampflow-m27-150-150w-12v-24v-o-JM#position=6&type=item&tracking_id=a7729d77-b49a-4be2-a1fa-3b62381464e3

[43] ALIBABA: DEVO nmrV 400w caja de engranajes nmrV63 pequeño gusano cajas con el estándar IEC 24v motor de CA. Disponible en: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/devo-nmrV-400w-gear-box-nmrV63-small-worm-gearboxes-with-iec-standard-24v-ac-motor-62020637004.html?spm=a2700.details.maylikeexp.7.1a3141227BRpNk>

[44] PWM: Control de Velocidad en motores eléctricos [Blog]. Electric Bricks. 2010. Disponible en: <http://blog.electricbricks.com/2010/03/pwm-control-de-velocidad-en-motores-electricos/>

[45] ELECTRONICA I+D: Fuente suicheada Mean Well 24V 6.5A 156W y Control de velocidad motor DC con escobillas. Disponible en: www.didacticaselectronicas.com/~didactic/index.php/fuentes-adaptadores/fuentes-fijas/24v/fuente-suicheada-mean-well-24v-6-5a-156w-fuentes-fijas-switcheadas-suicheadas-devoltaje-poder-alimentacion-de-24v-detail y www.didacticaselectronicas.com/index.php/robotica/controladores-1/control-controlador-controladores-driver-drivers-control-de-velocidad-motor-dc-con-escobillas-10a-driv-pwm-36v-360w-motor-de-escobillas-detail

[46] FELFIL, Sistema de extrusion de filament felfil.[en linea]. Disponible en: <https://felfil.com/full-extrusion-system/>

[47] FILABOT, extrusora EX2 [en linea]. Disponible en: <https://www.filabot.com/collections/filabot-core/products/filabot-original-ex2>

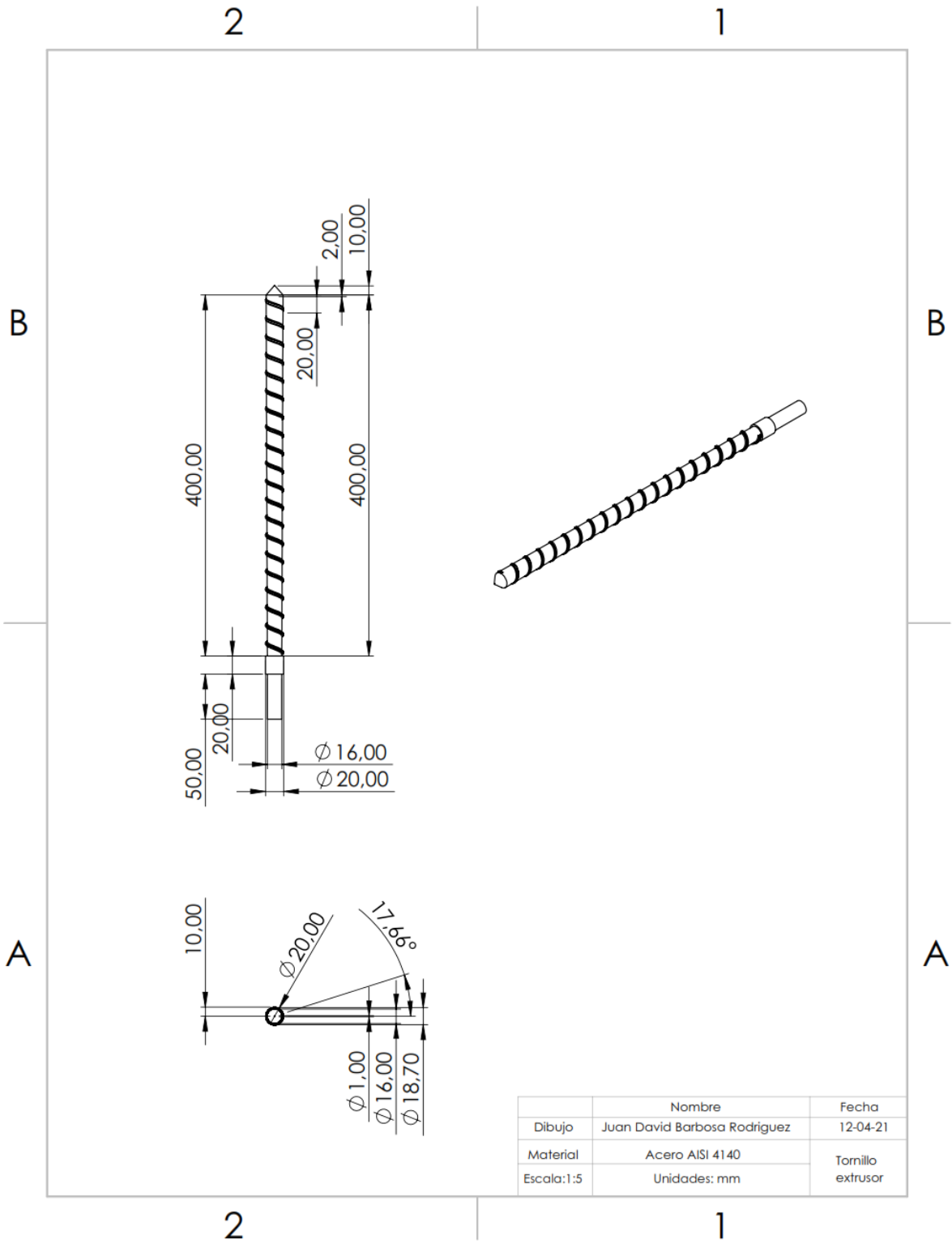
[48] 3DEVO, filament makers [en linea]. Disponible en: <https://3devo.com/filament-makers/>

[49] NOZTEK, Noztek Pro filament extruder [en linea]. Disponible en: <https://www.noztek.com/product/noztek-pro/>

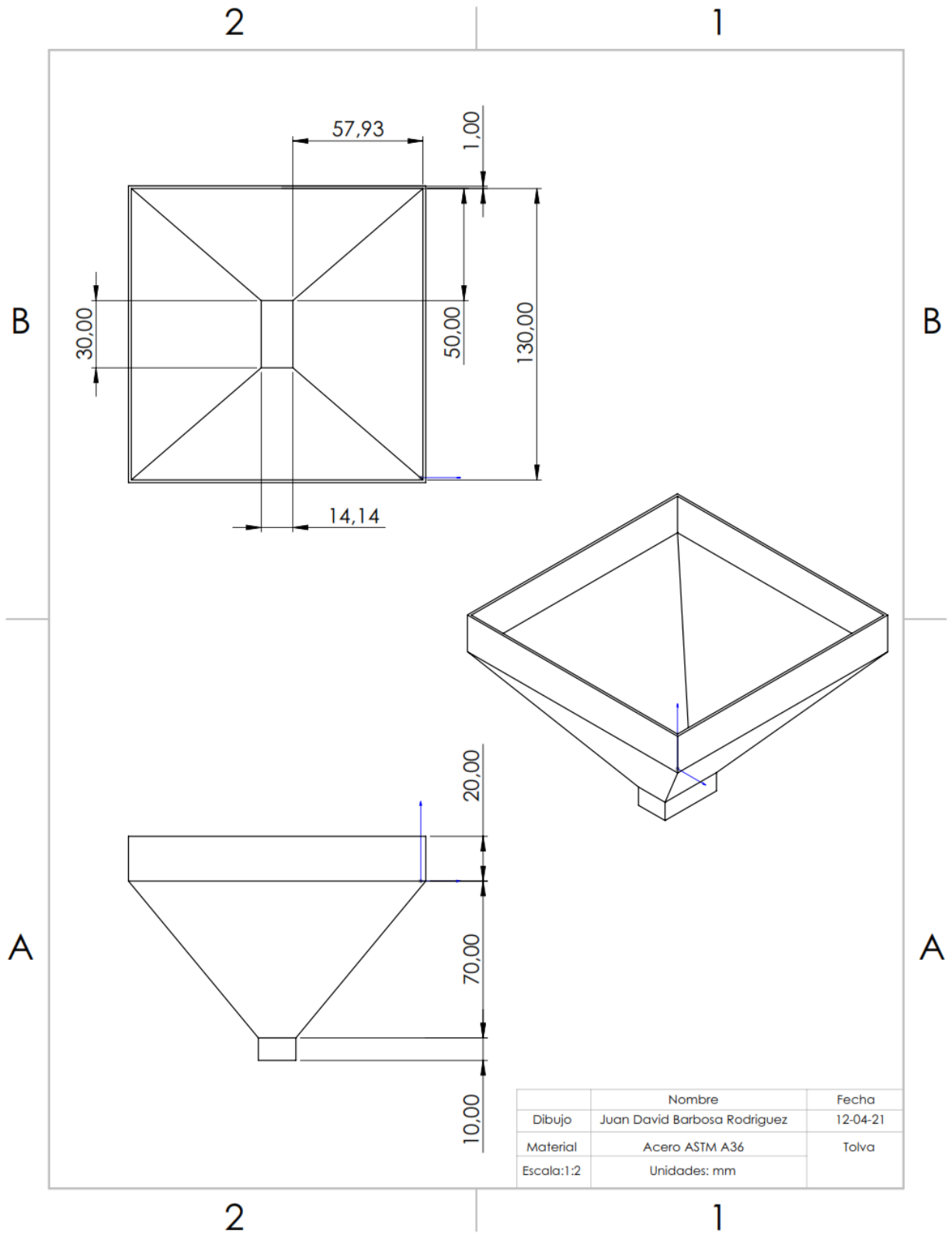
[50] ROBOTDIGG EQUIP MAKERS, Desktop Pellet Filament Extruder, Production Line [en linea]. Disponible en: <https://www.robotdigg.com/product/1029/Desktop-Pellet-Filament-Extruder,-Production-Line>

[51] DRUETTA, Manuel y FAZI, Exequiel. Extrusora de monofilamento para impresión 3D. Proyecto integrador para la obtención del título de grado ingeniero electrónico. Córdoba, Argentina. Universidad nacional de córdoba. Facultad de ciencias exactas, físicas y naturales. Carrera de ingeniería electrónica.

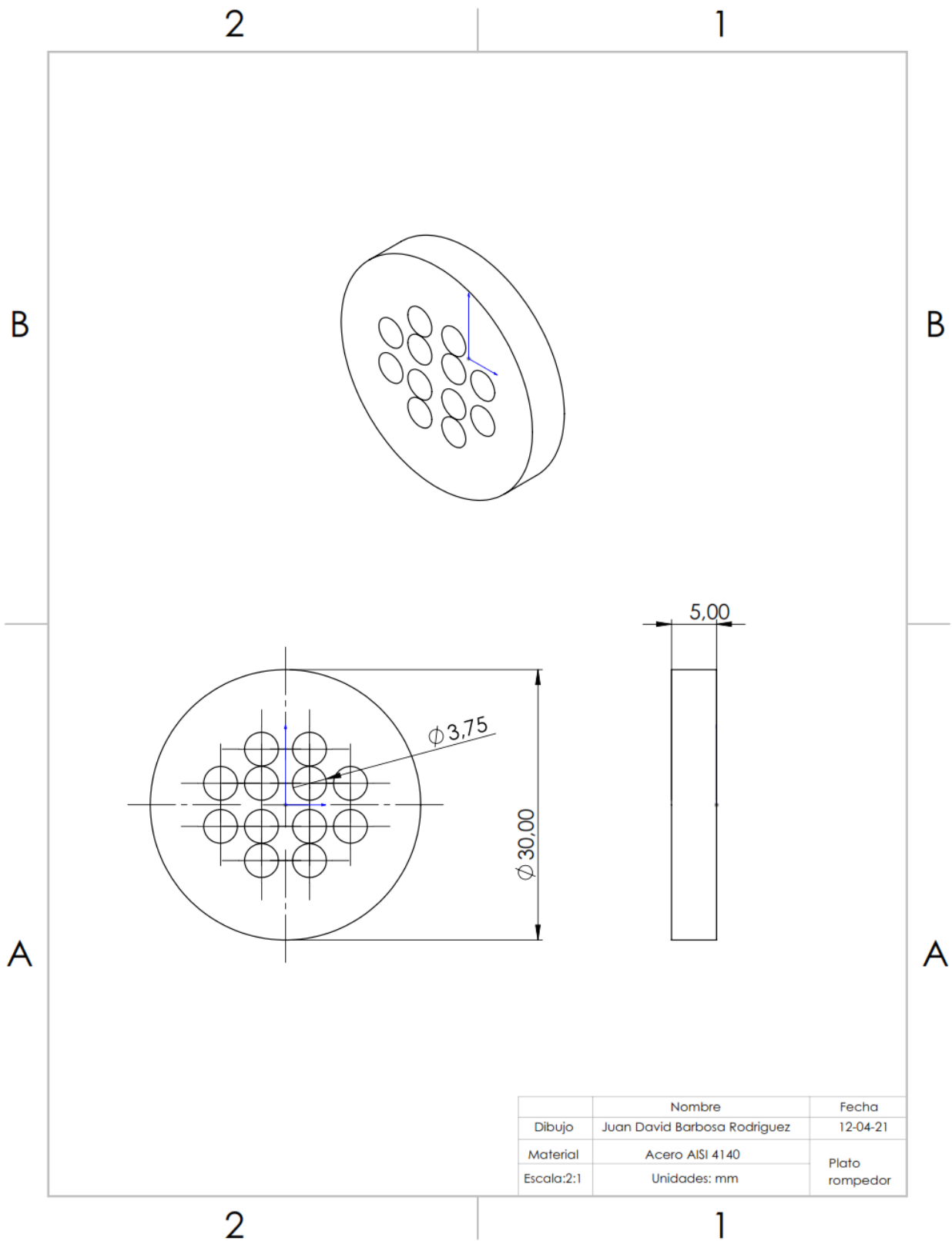
13 ANEXOS 1



Anexo A, plano tornillo extrusor

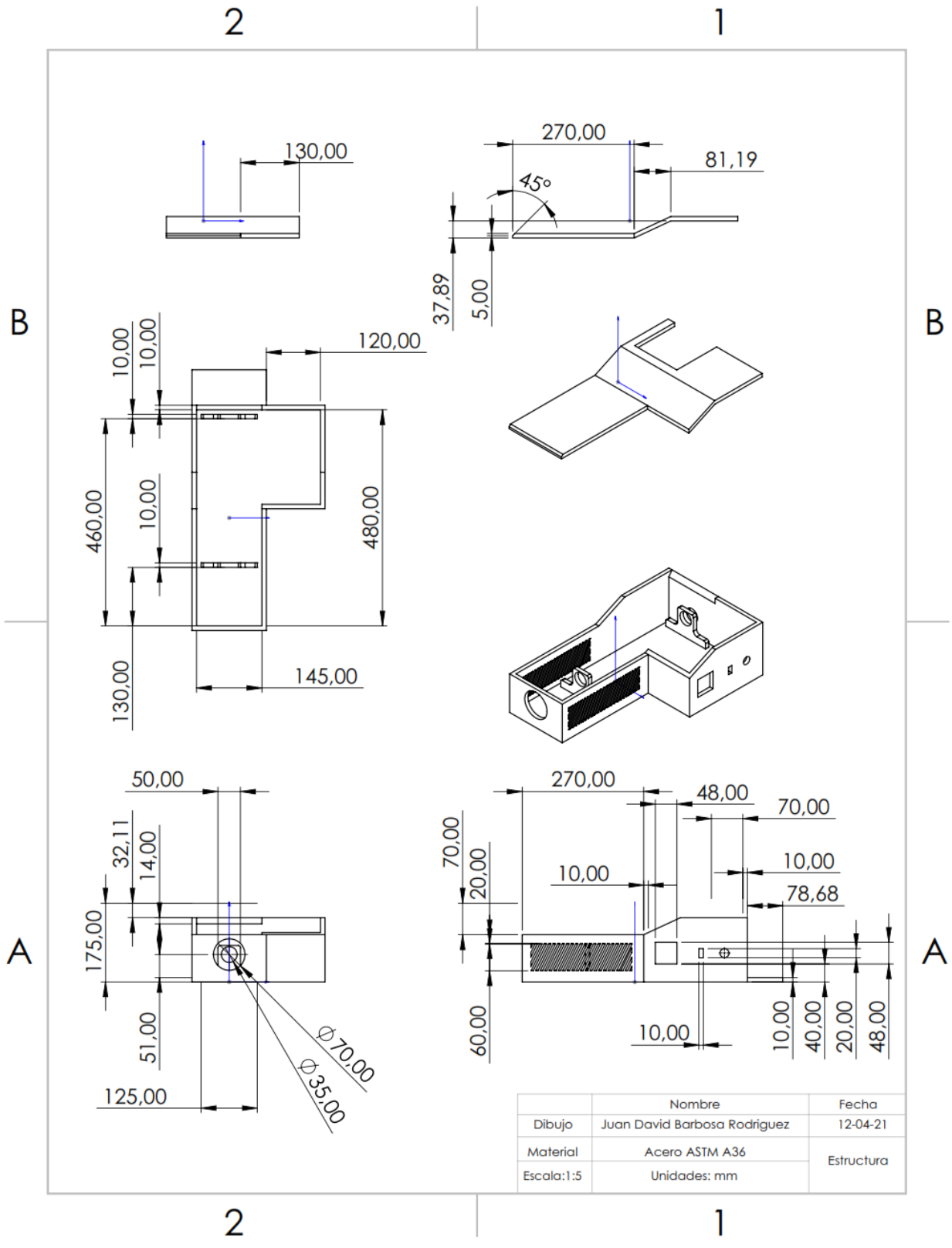


Anexo B, plano tolva

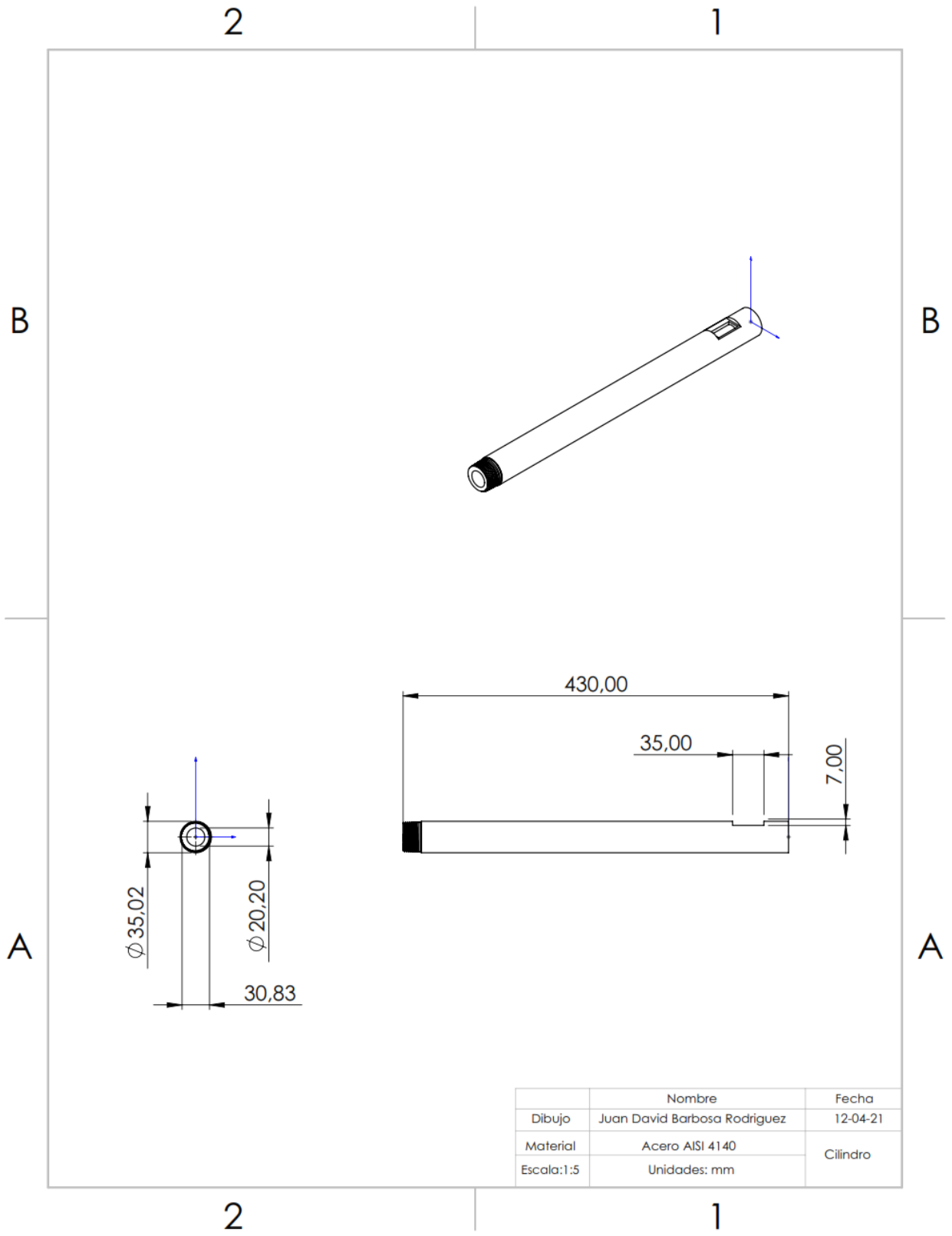


	Nombre	Fecha
Dibujo	Juan David Barbosa Rodriguez	12-04-21
Material	Acero AISI 4140	Plato rompedor
Escala:2:1	Unidades: mm	

Anexo C, plano plato rompedor

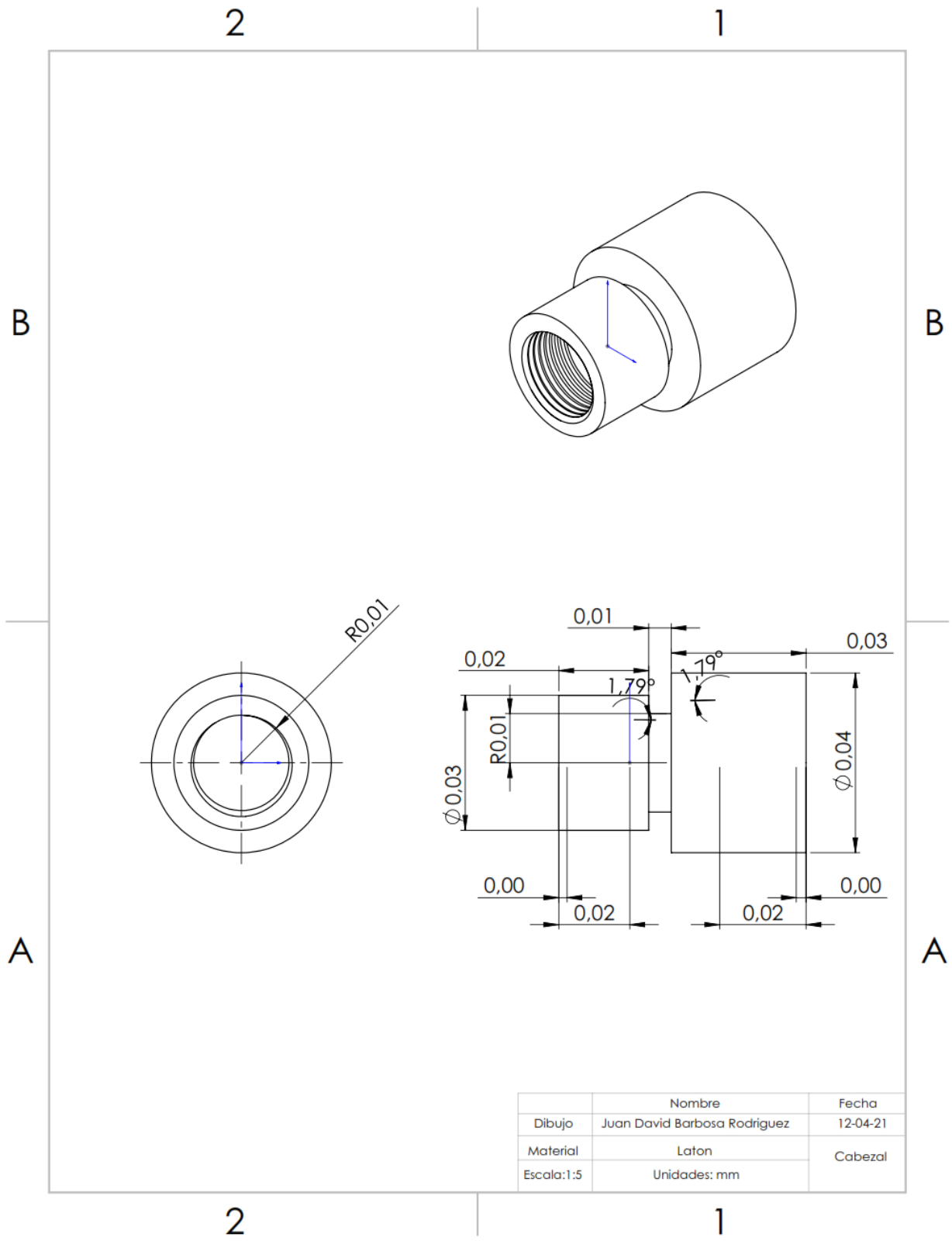


Anexo D, plano estructura

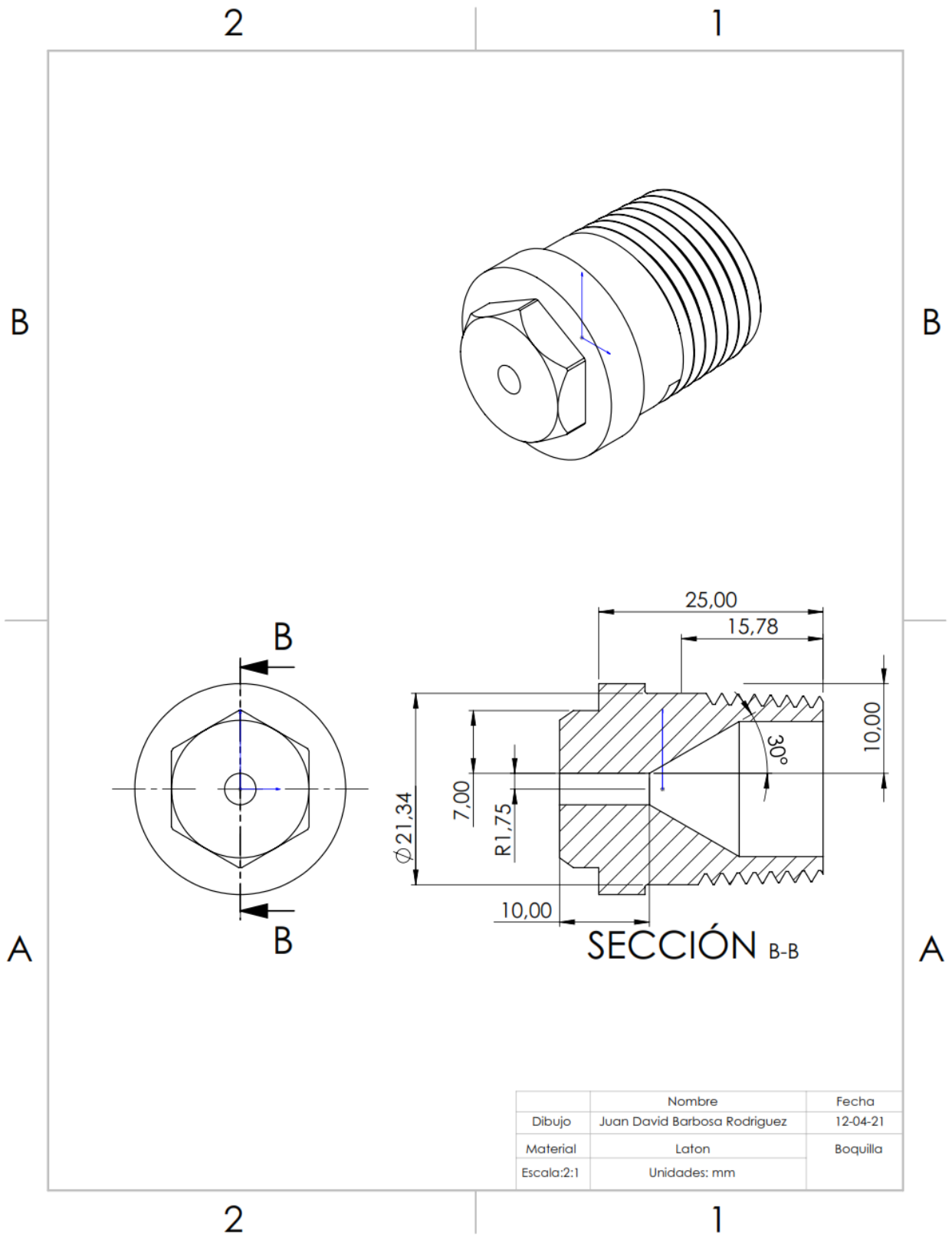


	Nombre	Fecha
Dibujo	Juan David Barbosa Rodriguez	12-04-21
Material	Acero AISI 4140	Cilindro
Escala: 1:5	Unidades: mm	

Anexo E, plano cilindro



Anexo F, plano cabezal



Anexo G, plano boquilla