

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

Diseño y validación de una extrusora de filamento para impresoras 3D

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingenieras en Mecatrónica

Presentado por:

Doménica Lorena Velasco Ramos

Nicole Andrea Pilco Freire

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

El presente proyecto se lo dedicamos a las personas que quisiéramos que fueran eternas, nuestros abuelos.

Gracias por todo su amor.

Doménica Lorena Velasco Ramos

Nicole Andrea Pilco Freire

AGRADECIMIENTOS

Quiero empezar por agradecer a Dios, quien siempre me dio más de lo que pensé que era posible.

De igual forma a mi familia por todo su apoyo y preocupación hasta el día de hoy, sobre todo a mis padres por convertirme en la persona que soy hoy. Sin ellos nada de esto fuera posible.

Y por último mis más sinceros agradecimientos a mis amigos y cercanos, por ser fuente de felicidad y nunca dejarme bajar los brazos.

Doménica Lorena Velasco Ramos

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme esta oportunidad y darme la fortaleza necesaria para seguir en cada momento de mi vida.

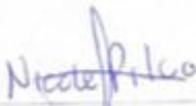
Quiero agradecerles también a mis padres por ser siempre una fuente de ejemplo e inspiración, a ellos les debo todos mis logros.

A mi familia y amigos por acompañarme y apoyarme incondicionalmente durante todo este proceso.

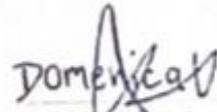
Nicole Andrea Pilco Freire

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Nicole Andrea Pilco Freire* y *Doménica Lorena Velasco Ramos* damos nuestro consentimiento para que la ESPOC realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Nicole Andrea Pilco
Freire



Doménica Lorena
Velasco Ramos

EVALUADORES

Marcelo Rodolfo Fajardo Pruna, PhD.

PROFESOR DE LA MATERIA

Jonathan Roberto León Torres, MSc.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Con la creciente popularidad de la impresión 3D, se está generando un aumento de materiales residuales postproducción que no tienen utilidad representando pérdida de materia prima, además de una falta de conciencia sobre el reciclaje y los objetivos sostenibles en la cultura actual. En el mercado no existen productos disponibles para solucionar esta problemática de manera sostenible y económica. Por lo tanto, el proyecto busca profundizar en la producción de dispositivos de bajo costo para la reutilización de desechos poliméricos. Proponiendo así el diseño de un sistema de trituración y extrusión de filamento para impresoras 3D, triturando los residuos y convirtiéndolos en pellets que posteriormente serán extruidos y moldeados por la extrusora para obtener un rollo de filamento. Se realizaron los modelos finales en el software de Autodesk Inventor permitiendo la simulación y validación de los componentes mecánicos. Para la trituradora se contempló el uso de dos ejes con cuchillas de garras que facilitarían la pulverización, mientras que la extrusora posee un sistema de empuje de polímeros por medio de un husillo.

Principalmente se hizo uso de los materiales como el Acero A36 para carcasas y soportes de componentes grandes, entregando factores de seguridad efectivos para el prototipo, mientras que el Acero inoxidable A304 se escogió por sus propiedades mecánicas para piezas sometidas a calor. En lo referente al sistema eléctrico y de control, se simuló en el software Proteus la aplicación de un Arduino para controlar la velocidad y temperatura, validando dentro de las limitaciones del programa la autorregulación de los calentadores.

El sistema se diseñó con la capacidad de procesar PLA y ABS reciclable y se estima alcanzar una extrusión de 1 kg en 2 horas y media, de manera que se disminuirían los costos de servicios de reciclaje y se reduciría la cantidad de materia prima desperdiciada.

Palabras Clave: Impresiones 3D, Residuos, Trituradora, Extrusora, PLA, ABS.

ABSTRACT

With the growing popularity of 3D printing, there is an increase in post-production waste materials representing a loss of raw material and a lack of awareness of recycling and sustainability goals in today's culture. No products are available on the market to solve this problem sustainably and economically. Therefore, the project seeks to deepen the production of low-cost devices to reuse polymeric waste. Thus, proposing the design of a filament crushing and extrusion system for 3D printers, crushing the waste and turning it into pellets that will later be extruded and molded by the extruder to obtain a roll of filament. The final models were made in the Autodesk Inventor software allowing the simulation and validation of the mechanical components. For the shredder, using two axis with claw blades that facilitate pulverization was contemplated, while the extruder has a polymer push system utilizing a screw.

Materials such as A36 Steel were mainly used for the prototype's casings and supports of significant components, providing practical safety factors. At the same time, A304 Stainless Steel was chosen for its mechanical properties for parts subjected to heat. Regarding the electrical and control systems, the application of an Arduino to control the speed and temperature was simulated in the Proteus software, validating the self-regulation of the heaters within the program's limitations.

The system was designed with the capacity to process recyclable PLA and ABS, and it is estimated to reach an extrusion of 2 kg in 2 and a half hours, thus reducing the costs of recycling services and reducing the amount of wasted raw material.

Keywords: *3D Prints, Waste, Shredder, Extruder, PLA, ABS.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	VII
SIMBOLOGÍA.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
ÍNDICE DE PLANOS.....	XIII
CAPÍTULO 1	
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Justificación del problema	3
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Marco teórico.....	4
1.4.1 Termoplásticos usados para los distintos tipos de filamentos	4
1.4.2 Sistema de triturado.....	7
1.4.3 Extrusión.....	8
1.4.4 Máquinas extrusoras.....	8
1.4.5 Efecto de los parámetros de extrusión.....	11
1.4.6 Extrusoras de filamento 3D de baja producción en el mercado	13
CAPÍTULO 2	
2. METODOLOGÍA.....	16
2.1 Alternativas de solución.....	17
2.1.1 Sistema de trituración	17

2.1.2	Sistema de extrusora de filamento.....	19
2.2	Requerimientos del sistema de trituración.....	22
2.2.1	Requerimientos de la extrusora de filamento.....	23
2.3	Diseño de forma del sistema de trituración.	24
2.3.1	Eje de transmisión.	25
2.3.2	Cuchillas.	25
2.3.3	Caja de filtrado.....	25
2.4	Diseño de forma de la extrusora de filamento.	26
2.4.1	Área de alimentación.	26
2.4.2	Cilindro exterior.....	27
2.4.3	Cámara de fusión.....	27
2.4.4	Husillo.	28
2.5	Diseño del mecanismo del sistema de trituración.	28
2.5.1	Eje de transmisión.	29
2.5.2	Chaveta y chavetero.	32
2.5.3	Cuchillas.	33
2.5.4	Sistema de transmisión.....	34
2.6	Mecanismos de diseño de la extrusora de filamento.....	35
2.6.1	Sistema de empuje de plástico.	36
2.6.2	Sistema de transmisión de potencia.	41
2.6.3	Diseño de los calentadores.....	44
2.7	Diseño sistema de control de la extrusora.....	44
CAPÍTULO 3		
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	46
3.1	Cálculos para el sistema de trituración.....	46
3.1.1	Cálculos para las cuchillas.....	46
3.1.2	Cálculo de potencia del motor.....	46

3.1.3	Cálculos del eje de transmisión.	47
3.1.4	Cálculos de la chaveta.	50
3.2	Selección de elementos normalizados de la trituradora.	51
3.2.1	Motor.	51
3.2.2	Chumaceras.	51
3.2.3	Pasador cilíndrico.	52
3.2.4	Perfiles de acero	52
3.2.5	Plancha de acero negro.	52
3.3	Simulaciones y validaciones de los elementos de trituración.	52
3.3.1	Simulación de la cuchilla.	52
3.3.2	Simulación del eje de transmisión.	54
3.3.3	Simulación de la estructura.	55
3.4	Cálculos del sistema de extrusión.	57
3.4.1	Cálculos de diseño del Husillo.	57
3.4.2	Cálculos del cilindro.	59
3.4.3	Cálculos de motor para extrusora.	60
3.4.4	Diseño de sistema de transmisión de cadena y Catarina.	60
3.4.5	Cálculos del sistema de calentamiento.	61
3.4.6	Diseño de sistema de control.	62
3.4.7	Diseño de sistema eléctrico	62
3.5	Selección de elementos normalizados de la extrusora.	64
3.5.1	Selección de motor.	64
3.5.2	Selección de Catarinas.	64
3.5.3	Selección de cadena.	64
3.5.4	Selección de rodamientos para el tornillo.	65
3.6	Simulaciones y validaciones de los elementos de la extrusora.	65
3.6.1	Tolva.	65

3.6.2	Husillo.....	66
3.6.3	Cilindro del husillo.....	67
3.6.4	Sistema total.....	69
3.7	Análisis de costos.....	70
3.7.1	Costos de materiales de construcción del sistema de trituración.....	71
3.7.2	Costos de materiales de construcción del sistema de extrusión.....	72
3.7.3	Costos totales.....	73
CAPÍTULO 4		
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	75
4.1	Conclusiones.....	75
4.2	Recomendaciones.....	76
BIBLIOGRAFÍA		
APÉNDICES		

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ABS	Acrilonitrilo Butadieno Estireno
PLA	Ácido Poliláctico
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
RUT	Resistencia última a la tensión
CAD	Diseño asistido por computador

SIMBOLOGÍA

M	Metro
m/min	Metros por minutos
h	Horas
cm	Centímetro
mm	Milímetro
kg	Kilogramo
°C	Grados centígrados
kJ/m^2	Kilo Jules por metro cuadrado
Sy	Esfuerzo de fluencia
Sut	Resistencia mínima a la tensión
MPa	Mega pascales
Ka	Factor de modificación de condición de superficie
Kb	Factor de modificación de tamaño
Kc	Factor de modificación de carga
Kd	Factor de modificación de temperatura
Ke	Factor de confiabilidad
Kf	Factores de modificación varios
S'e	Límite de resistencia a la fatiga sin corregir
Se	Límite de resistencia a la fatiga en punto crítico
d	Diámetro del eje
D	Diámetro del husillo
Nf	Factor de seguridad contra la fatiga
Kf	Factor de concentración de esfuerzo contra la fatiga
Kfm	Factor de concentración de esfuerzo de fatiga por flexión media
Ma	Momento máximo
Mm	Momento medio a lo largo del eje
Ta	Torque máximo sobre el eje componente alternante
Tm	Torque sobre el eje componente medio
Sf	Resistencia a la fatiga
Sf	Límite de resistencia a la fatiga
Kfsm	Factor de concentración de esfuerzo de torsión por fatiga media
S_{sy}	Resistencia al cizallamiento

τ	Esfuerzo cortante
σ_{ap}	Esfuerzo de aplastamiento
G_c	Energía absorbida por unidad de área
δW	Trabajo generado por la cuchilla
δa	Avance de la fractura
e	Espesor
F_c	Fuerza de corte de la cuchilla
P_i	Presión interna del cilindro
σ_T	Esfuerzo máximo de fluencia del material
$\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$	Kilo jules sobre kilogramo por grado centígrado
kg/h	Kilogramo por hora
kJ/k	Kilo jules por Kelvin
N	Newton
Nm	Newton metro
g/cm^3	Gramo por centímetro cúbico
in	Pulgada
in^3	Pulgada cúbica
Rad	Radianes
lbf	Libra fuerza
J/m	Jules por metro
GPa	Giga Pascales
Rpm	Radianes por minuto
w	Velocidad angular
P	Potencia del motor
hp	Caballo de fuerza
W	Watts
kW	Kilo watts
m/s	Metros por segundo
Ω	Ohmios
ρ	Densidad

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ventajas esperadas para la fabricación aditiva en 3 años.....	2
Figura 1.2 Ciclo de fabricación del PLA.....	5
Figura 1.3 Proceso de obtención del ABS.....	6
Figura 1.4 Sistema de trituración de eje simple.....	7
Figura 1.5 Sistema de trituración de doble eje.	8
Figura 1.6 Cabezal de extrusora	9
Figura 1.7 Esquema de extrusora de husillo sencillo.	10
Figura 1.8 RUT vs número de inyección.....	13
Figura 1.9 Módulo de elasticidad vs número de inyección	13
Figura 1.10 Extrusora 3Devo Extruder	14
Figura 1.11 Felfill Evo Filament Extruder.....	15
Figura 1.12 Extrusora EXO Extruder	15
Figura 2.1 Metodología de trabajo.....	16
Figura 2.2 Propuestas de solución..	17
Figura 2.3 Criterios a evaluar.	18
Figura 2.4 Propuestas de solución..	19
Figura 2.5 Criterios de evaluación para soluciones.....	21
Figura 2.6 Diseño del sistema de trituración.....	24
Figura 2.7 Cuchilla de 3 mandíbulas.	25
Figura 2.8 Caja de filtrado.	26
Figura 2.9 Boceto de tolva.....	27
Figura 2.10 (a) Cilindro exterior. (b) Cilindro con gargantilla de conexión..	27
Figura 2.11 Cámara de fusión..	28
Figura 2.12 Husillo o tornillo sin fin.....	28
Figura 2.13 Producción típica según diámetro del husillo	37
Figura 2.14 Índice de ley de potencia versus ángulo de hélice óptimo en la sección de medición.	37
Figura 2.15 Curvas de viscosidad compleja y de corte para PLA 7000D obtenidas correspondientemente en reómetros capilares y de placas paralelas a 180, 190 y 200°	40
Figura 2.16 Diagrama de bloques del modelo de calentamiento del sistema.....	45
Figura 2.17 Controlador PI propuesto.	45

Figura 3.1 Diagrama de cuerpo libre obtenido en Inventor.....	47
Figura 3.2 Diagrama de fuerza cortante.	48
Figura 3.3 Diagrama de momento flector.	48
Figura 3.4 Esfuerzo de Von-Mises..	53
Figura 3.5 Deformación de la cuchilla..	53
Figura 3.6 Factor de seguridad.....	54
Figura 3.7 Deformación del eje.....	54
Figura 3.8 Esfuerzo de Von mises.....	55
Figura 3.9 Deformación del perfil.....	55
Figura 3.10 Esfuerzo mínimo.....	56
Figura 3.11 Esfuerzo máximo.....	56
Figura 3.12 Respuesta al escalón unitario	62
Figura 3.13 Menú principal del circuito eléctrico.....	63
Figura 3.14 Menú de sensores	64
Figura 3.15 Análisis de desplazamiento de la tolva.....	66
Figura 3.16 Análisis de esfuerzo de Von Misses de la tolva.....	66
Figura 3.17 Diseño CAD del husillo, vista lateral.....	67
Figura 3.18 Análisis estático del husillo aplicando cargas.....	67
Figura 3.19 Análisis de esfuerzo de Factor de Seguridad del cilindro del husillo.	68
Figura 3.20 Análisis de esfuerzos del cilindro del husillo.....	68
Figura 3.21 Factor de seguridad del cilindro del husillo.....	69
Figura 3.22 Análisis de desplazamiento de la estructura de la estructura.....	69
Figura 3.23 Análisis de factor de seguridad de la estructura.....	70
Figura 3.24 Análisis de desplazamiento del soporte del cilindro.	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Propiedades mecánicas, físicas y térmicas del PLA.....	5
Tabla 1.2 Propiedades mecánicas, físicas y térmicas del ABS	6
Tabla 1.3 Diámetro (mm) de filamento bajo diferentes condiciones de extrusión.....	11
Tabla 1.4 Resistencia ultima a la tensión (MPa) de filamento bajo diferentes condiciones de extrusión	12
Tabla 2.1 Ponderación de cada criterio de evaluación.	18
Tabla 2.2 Tabla de conclusiones de las soluciones.....	19
Tabla 2.3 Ponderación de cada criterio de evaluación.	22
Tabla 2.4 Conclusiones de prioridad de soluciones.	22
Tabla 2.5 Requerimientos y limitaciones del sistema de triturado.....	22
Tabla 2.6 Requerimientos y limitaciones del sistema de extrusión.....	23
Tabla 2.7 Propiedades mecánicas del acero SAE 1020 normalizado.	29
Tabla 2.8 Valores constantes del acabado superficial.....	30
Tabla 2.9 Guía general para la selección de un husillo	36
Tabla 2.10 Propiedades para la selección del husillo	37
Tabla 2.11 Factores de aplicación.....	42
Tabla 2.12 Factores de velocidad.....	42
Tabla 2.13 Potenciales nominales de cadenas ANSI.	43
Tabla 2.14 Factores de corrección K.....	43
Tabla 3.1 Constantes del controlador PI	62
Tabla 3.2 Cotización de materiales para la trituradora	71
Tabla 3.3 Cotización de materiales para la extrusora.....	72
Tabla 3.4 Costos totales	73

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1	Plano eléctrico en Proteus
PLANO 2	Trituradora explotado general
PLANO 3	Trituradora explotado
PLANO 4	Trituradora
PLANO 5	Perfil de acero
PLANO 6	Tolva de la trituradora
PLANO 7	Explotado Eje Acoplado 1
PLANO 8	Cuchilla
PLANO 9	Separador
PLANO 10	Eje 2
PLANO 11	Sistema completo de la extrusora
PLANO 12	Husillo
PLANO 13	Cabezal carcasa
PLANO 14	Abrazadera
PLANO 15	Cilindro
PLANO 16	Soporte eje
PLANO 17	Tolva extrusora

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto busca dar una solución dentro de un contexto de aumento de manufactura aditiva, la cual brinda baja complejidad en elaboración de piezas y rápida adaptación a las necesidades. Entre los métodos de manufactura más populares se encuentra la técnica de impresión 3D, *Fused Deposition Modeling* (FDM), proceso en el que se derrite el polímero y posteriormente se usa para construir formas nuevas.

Estas características indican que se proyecta una producción desmedida y poco equilibrada como consecuencia de una falta de planificación sostenible para el manejo de los residuos. En este trabajo se presenta la incidencia en el medio ambiente de los materiales más comunes en la impresión 3D teniendo en cuenta el impacto de su fabricación dentro de otros sectores y las concepciones erróneas acerca de las propiedades biodegradables que se les han asignado a ciertos filamentos, las cuales no contemplan el requerimiento de un proceso industrial para hacer posible su recirculación.

Por ello se considera necesario una profundización en el estudio de la cadena de producción de dispositivos de bajo costo dedicados a la reutilización de desechos poliméricos. Siendo aplicados para la conversión de procesos de impresión eco amigables, especialmente en una cultura poco concientizada en cuanto al reciclaje y objetivos sostenibles.

1.1 Descripción del problema

En los últimos años, se ha incrementado y masificado la implementación de la manufactura aditiva, particularmente de la impresión 3D FDM (*Fused Deposition Modeling*) aplicada a la industria y al uso personal. Los filamentos más frecuentemente utilizados son el PLA (*polylactic acid*) y el ABS (*acrylonitrile butadiene styrene*), con un costo promedio de \$25 por kilogramo en Ecuador.

Este hecho tiene como consecuencia el incremento proporcional de materiales residuales que no tienen utilidad posterior. Lo que implica que existe una pérdida irrecuperable de materia prima. A esto se le agrega que al no requerir mecanizado se tiene un menor costo de fabricación de piezas, por lo que se realizan muchos prototipos desechables para un mismo proyecto.

Aunque en la actualidad los desechos postproducción de impresiones 3D no muestran un problema significativo para el medio ambiente, se espera que el mercado tenga un crecimiento del 25% en el 2023 en comparación con el 2019 [1].

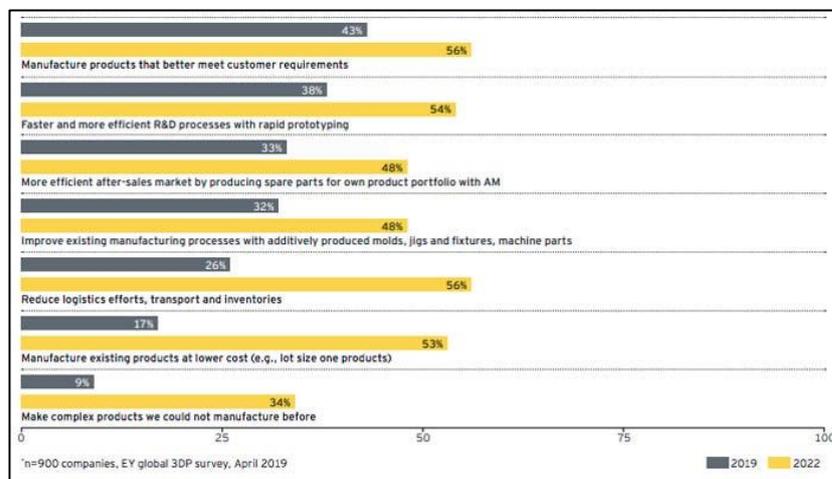


Figura 1.1 Ventajas esperadas para la fabricación aditiva en 3 años [1].

Incluso se plantea el uso del material PLA como un sustituto para plásticos convencionales a base de petróleo [2], sin embargo, se concibe erróneamente como “biodegradable”, cuando es así solo dentro del contexto de compostaje industrial, caso contrario se degradaría al aire libre en aproximadamente 80 años [3]. Este malentendido conlleva a una producción y manejo indiscriminado de los desechos que no toma en cuenta que la mera producción del filamento en cuestión toma gran parte de los recursos agrícolas, compitiendo con en el sector alimenticio. De igual forma, el segundo material en la lista al estar compuesto de combustibles fósiles representa una alternativa nociva para el ambiente, tanto para su elaboración como su descomposición.

En el país no existen en distribución comercial productos capaces de solventar la reutilización de los residuos de las impresoras 3D de tal forma que contribuya a un manejo sustentable de los mismos. La falta de opciones viables locales conduce a operaciones de importación que representan un gasto lo suficientemente elevado como para desanimar a la clientela final, en especial cuando no se trata de una compañía con fondos de inversión que pueda justificar costos. Como consecuencia, se desacelera la evolución de una consciencia ecológica en un país con una cultura poco direccionada hacia el ámbito de reciclaje.

1.2 Justificación del problema

El aumento de proyectos utilizando impresión 3D dentro de la ESPOL ha aumentado considerablemente debido a sus bajos costos de producción y facilidad de uso. Esto ha conllevado a que al mismo tiempo se incrementen los desperdicios plásticos, comprometiendo la sostenibilidad que todos los proyectos deben aspirar alcanzar.

Por ende, se busca aprovechar los desperdicios plásticos producto de piezas que no llegaron al prototipo final, piezas con errores y soportes de impresión para producir nuevo filamento que pueda ser reutilizado para la impresión de nuevas piezas.

Se desea reutilizar los desperdicios generados durante la fabricación de piezas dentro del proyecto de vinculación "Diseño y fabricación de prótesis, órtesis y sistemas de rehabilitación usando la tecnología de impresión 3D" perteneciente a la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

En adición se esperaría que la tecnología pueda ser aplicada a cualquier proyecto de la institución. Esto reduciría el impacto ambiental de los proyectos del plantel en lineamiento con los objetivos sostenibles de esta. Además, se reducirían los costos de fabricación de los proyectos al reutilizar materiales que de otra forma serían desechados.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar y validar un mecanismo de extrusión de filamentos para impresoras 3D capaz de recuperar los residuos de impresiones previas del proyecto de vinculación de diseño y fabricación de prótesis.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Diseñar un sistema de trituración de pequeña escala para residuos plásticos que permita su posterior fusión.
2. Diseñar los sistemas mecánicos de las etapas de trituración y extrusión tomando en cuenta los diversos factores de influencia que sean de importancia para el diseño.
3. Diseñar un sistema de control de temperatura por fases, que permita la fundición adecuada y adaptada para cada material.
4. Simular el funcionamiento de los diferentes sistemas involucrados, mediante el uso de softwares de ingeniería que permitan la validación electrónica y mecánica del sistema.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Termoplásticos usados para los distintos tipos de filamentos

En el caso del filamento para impresión 3D se requiere de un material moldeable a altas temperaturas con el que se pueda realizar un embobinado, por esta razón se hace uso de termoplásticos fabricados con polímeros, en el caso de este proyecto se utilizarán los más comunes.

PLA (*ácido poliláctico*)

El PLA es uno de los materiales más utilizados en la industria de la impresión 3D debido a su bajo costo en comparación con el ABS y otros materiales, además de su proceso de fabricación amigable con el medio ambiente al ser obtenido de fuentes renovables como almidón, maíz y arroz [4].

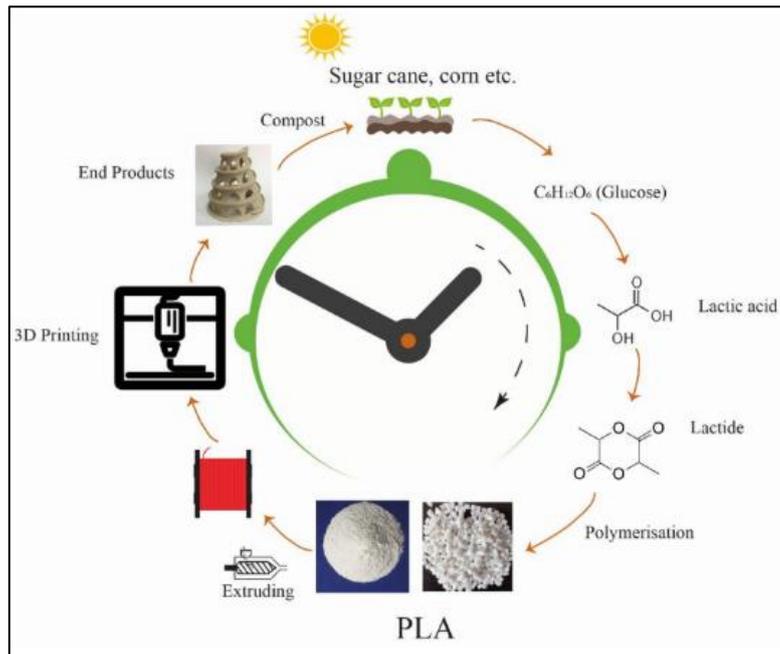


Figura 1.2 Ciclo de fabricación del PLA [5].

Propiedades mecánicas, físicas y térmicas del PLA

Entre sus propiedades mecánicas se encuentran muchas ventajas y desventajas para la industria de la impresión 3D por lo que constantemente se busca mejorar la composición de este material. Entre estas propiedades se encuentran las expuestas en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Propiedades mecánicas, físicas y térmicas del PLA [6].

Densidad	1.24 g/cm ³
Resistencia a la tracción	37 MPa
Módulo de tracción	3500 MPa
Sensibilidad a la humedad	Alta
Resistencia a la hidrolisis	Baja
Temperatura de extrusión	180° C – 200° C
Temperatura de transición	175° C
Resistencia al impacto (ensayo Charpy)	16.5 kJ/m ²

Entre las desventajas que se encuentran en las propiedades de este material, es su baja resistencia mecánica, lo que hace que las impresiones

sean más susceptibles a romperse debido a que el material no es capaz de resistir las fuerzas aplicadas sobre el mismo sin que sufra una ruptura [5].

ABS (aracrilonitrilo butadieno estireno)

El ABS es un material derivado del petróleo que también es muy utilizado para filamento de impresión 3D debido a que permite realizar post procesamiento en las piezas, generalmente requerido en componentes mecánicos, como el lijado, el pintado e incluso pueden pasar por un proceso de mecanizado debido a su alta resistencia mecánica [7].

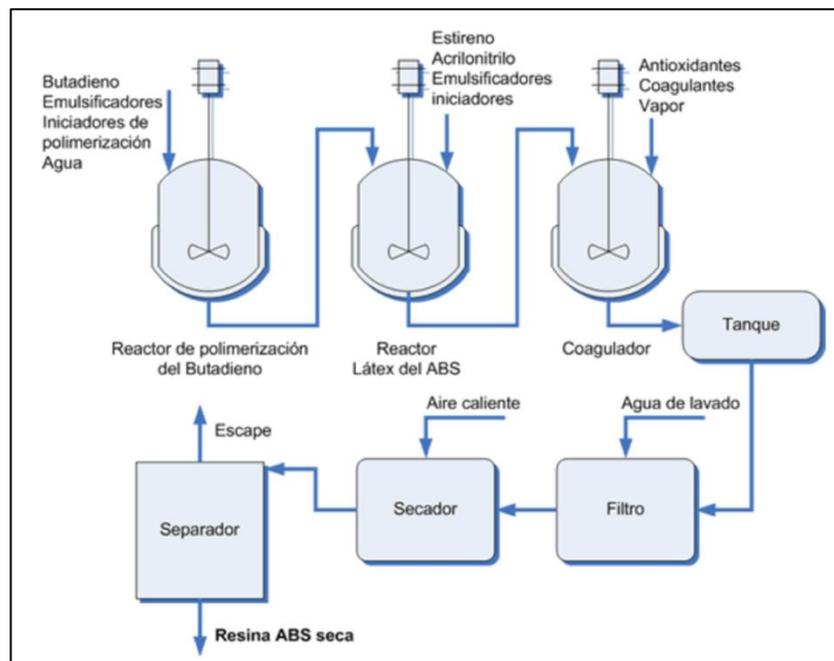


Figura 1.3 Proceso de obtención del ABS [8].

Propiedades mecánicas, físicas y térmicas del ABS

Debido a que posee 3 diferentes componentes en su estructura como son el acrilonitrilo, el butadieno y el estireno, se tienen propiedades más variadas que en otros tipos de plásticos como resistencia térmica, mecánica y de impacto elevadas [9]. En la Tabla 1.2 se aprecia las propiedades del ABS.

Tabla 1.2 Propiedades mecánicas, físicas y térmicas del ABS [10].

Densidad	1.07 g/cm ³
Resistencia a la tracción	27 MPa
Módulo de tracción	2.1 – 2.4 GPa

Temperatura de extrusión	220° C – 260° C
Resistencia al impacto	375 - 640 J/m
Temperatura de precalentamiento	100° C – 110° C

1.4.2 Sistema de triturado

Una trituradora es un sistema mecánico que se encarga de cortar plástico en piezas pequeñas de tamaño irregular. Este proceso es el primer paso en el reciclaje de plásticos ya que permite trabajar las piezas de la misma forma que se utilizan los pellets en el proceso de manufactura de polímeros.

La trituradora consta de cuchillas que giran a bajas rpm, lo que no permite el paso de piezas grandes de plástico. Una vez estas son trituradas, las pequeñas piezas caen a una tolva que las deposita en un contenedor [11].

Existen dos tipos de trituradoras en el mercado: de eje simple y de doble eje. Las trituradoras de eje simple cuentan con un sistema de cuchillas giratorio que se entrelazan con un sistema de cuchillas estacionario. Estas suelen ser de menor tamaño y tienen una reducida capacidad de trituración.

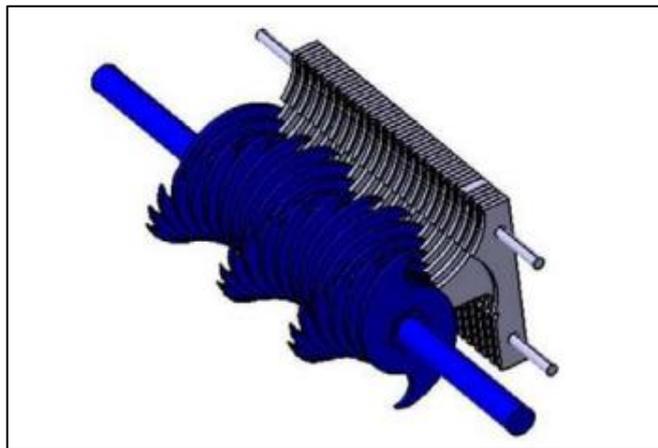


Figura 1.4 Sistema de trituración de eje simple [11].

Las trituradoras de eje doble constan de dos sistemas de cuchillas giratorias que rotan en direcciones contrarias y se enlazan entre sí. Estas suelen ser más robustas y tienen una mayor capacidad de trituración, pero son más

costosas y complejas. Para manejar ambos ejes estas constan de dos motores independientes o un motor y sistema de engranajes con ratio 1:1 [11].



Figura 1.5 Sistema de trituración de doble eje [12].

1.4.3 Extrusión

El moldeado por extrusión es el procedimiento capaz de realizar la transformación de un material y darle forma. Se caracteriza por el flujo del material a través de una boquilla debido a su compresión con ayuda de una herramienta, obteniendo el producto extruido con un perfil deseado [13].

Extrusión de termoplásticos

Debido a la propiedad maleable de los materiales termoplásticos, pueden transformarse según su necesidad. Usando así la extrusión para procesar en filamentos de diversas formas, incluso combinando diferentes tipos de plásticos [14]. Esta técnica se utiliza mucho en procesos de producción para artículos de filamento continuo y longitud indefinida.

1.4.4 Máquinas extrusoras

Componentes de máquinas extrusoras

- **Tolva:** Contenedor por el cual ingresa el material plástico. El diseño de la tolva influye en el transporte, la elección de su geometría impacta en la presión con la que entran los pellets.
- **Cámara cilíndrica:** El cilindro que envuelve al husillo y donde se encuentran las zonas de alimentación, fusión y dosificación. Suelen

diseñarse con superficie rugosa para aumentar temperatura con la fricción.

- **Husillo:** Tornillo helicoidal que permite el transporte, presurización, compactación y mezcla del material fundido. Con las especificaciones de diseño garantiza la extrusión requerida.
- **Sistema de calentamiento:** Generalmente son resistencias eléctricas distribuidas a lo largo del cilindro para elevar la temperatura. Su control modulado es esencial para la homogenización.
- **Motor y caja de reducción:** Sistema encargado de energizar el husillo para el flujo de los termoplásticos. La caja de reducción permite el ajuste de torque y velocidad.
- **Cabezal y boquilla:** Pieza que facilita el flujo hacia la boquilla a través del “torpedo”. Esta configuración se diseña para un caudal proporcional a velocidad constante, tal como se aprecia en la Figura 1.9 [15].

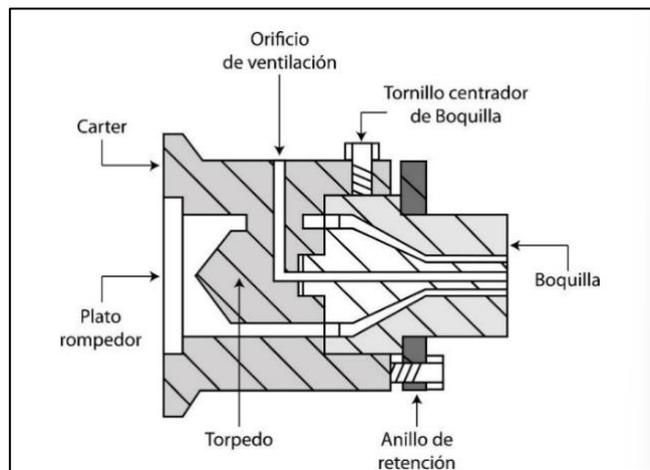


Figura 1.6 Cabezal de extrusora [16].

Descripción del proceso de extrusión de termoplásticos

El proceso de extrusión descrito por Bralla [17], empieza cuando se alimentan las extrusoras con polímeros en forma sólida, estos se colocan en la tolva, donde por acción del tornillo helicoidal avanzará por la recámara caliente y por defecto el material tendrá salida en estado de fundición por una boquilla, formando el filamento. Según Beltrán y Marcilla [16], el funcionamiento de una extrusora sencilla se puede resumir en:

- Transporte del material sólido a la zona de fusión.
- Sistema de fusión y plastificación del material.
- Transporte y presurización del fundido.
- Mezclado.
- Conformado.

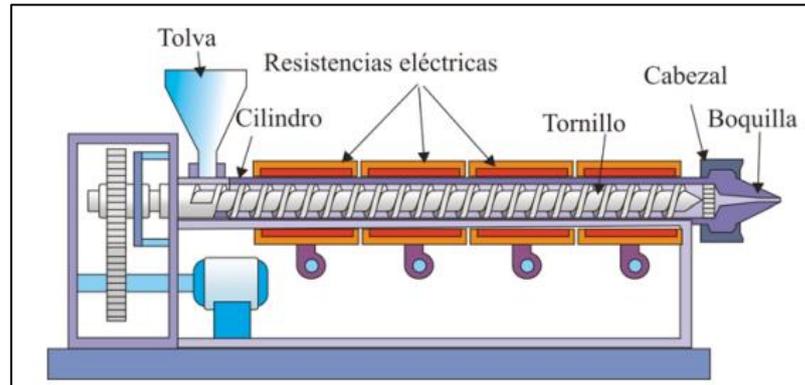


Figura 1.7 Esquema de extrusora de husillo sencillo [14].

Área de alimentación:

Zona que recibe el material sólido y comprende desde la tolva hasta la raíz del husillo. Debe tener la capacidad para contener gran parte del material y un acabado liso del tornillo para evitar la adhesión inicial [18].

Transporte del material sólido a la zona de fusión.

El material es transportado desde la tolva hacia el cilindro por acción de la gravedad y una vez en la sección inicial del husillo, este lo trasladará a la zona de fusión. Debe considerarse la fricción interna entre el tornillo y el cilindro por su favorecimiento al aumento de temperatura.

Sistema de fusión y transporte del fundido.

En esta etapa, el material se plastifica debido a la fricción y el calor producido por las resistencias eléctricas. El material que entra en contacto directo con el husillo se funde inmediatamente y el resto de materia sólida se funde por el calor que se irá expandiendo e intensificando por la fricción del giro del tornillo.

Presurización, mezclado y conformado.

Disminuye espacio en el canal por el ensanchamiento del tornillo, sometiendo al material a un aumento de presión. El aire atrapado entre la primera capa fundida por contacto y el resto de material es expulsado por la tolva. El giro favorece a la homogenización, pero para asegurarlo se mantiene la temperatura uniforme a través del cilindro agregando mezcladores [18].

El área final es la zona de dosificación y se encuentra cercana a la boquilla, con una profundidad de canal pequeña dispuesta para la expulsión [16].

1.4.5 Efecto de los parámetros de extrusión.

El diámetro del filamento es un parámetro de crucial importancia en el desempeño de un filamento en la calidad de la impresión, esta característica del filamento depende de dos condiciones en la extrusión del filamento: la temperatura y la velocidad de extrusión.

Como se muestra en la Tabla 1.3 [17], en el caso de aumentar la velocidad de extrusión existe un mayor diámetro en el filamento producido, debido a un aumento del flujo volumétrico del material [19], mientras que en el caso de la temperatura al aumentar la misma se disminuye el diámetro del filamento, ya que en los termoplásticos la viscosidad del material disminuye con el aumento de temperatura [20].

Tabla 1.3 Diámetro (mm) de filamento bajo diferentes condiciones de extrusión [19].

	185 °C	190°C	195 °C	200°C
2 rpm	1.756	1.680	1.620	1.448
3 rpm	1.760	1.721	1.680	1.575
4 rpm	-	1.791	1.727	1.665
5 rpm	-	1.831	1.810	1.747
6 rpm	-	1.946	1.888	1.857

Otro importante efecto por considerar es la seguridad del producto reciclado, ya que al ser calentado y reprocesado el material termoplástico pierde estabilidad y parte de las propiedades físicas y químicas, ya que según Lietner et al [21]., las reacciones de polimerización rara vez se completan totalmente y pueden quedar monómeros libres lo cuales no son bio-inertes, presentando riesgos para la salud humana.

Al mismo tiempo la temperatura tiene un efecto sobre la resistencia ultima a la tensión (RUT), como se muestra en la Tabla 1.4 [17]. Adicionalmente la RUT aumenta con respecto a la velocidad de extrusión hasta un valor crítica y para valores mayores de velocidad la RUT disminuye.

Tabla 1.4 Resistencia ultima a la tensión (MPa) de filamento bajo diferentes condiciones de extrusión [17].

	185 °C	190°C	195 °C	200°C
2 rpm	6.0	58.2	54.8	51.7
3 rpm	5.4	57.5	55.1	53.3
4 rpm	-	58.8	58.7	55.6
5 rpm	-	58.4	60.4	56.6
6 rpm	-	54.2	55.9	53.4

Resultados de mediciones por Pillin et al. [22], muestran que las propiedades mecánicas y térmicas del PLA se ven afectadas drásticamente por la cantidad de ciclos de reciclaje al que este sea sometido. En la Figura 1 se visualiza el efecto en la RUT, esta disminuye desde un valor de 66 MPa para PLA virgen, hasta 25 MPa después de ser sometido a 7 ciclos de inyección, mientras que el módulo de elasticidad no se ve afectado por los ciclos de reprocesado y se puede observar Figura 1.

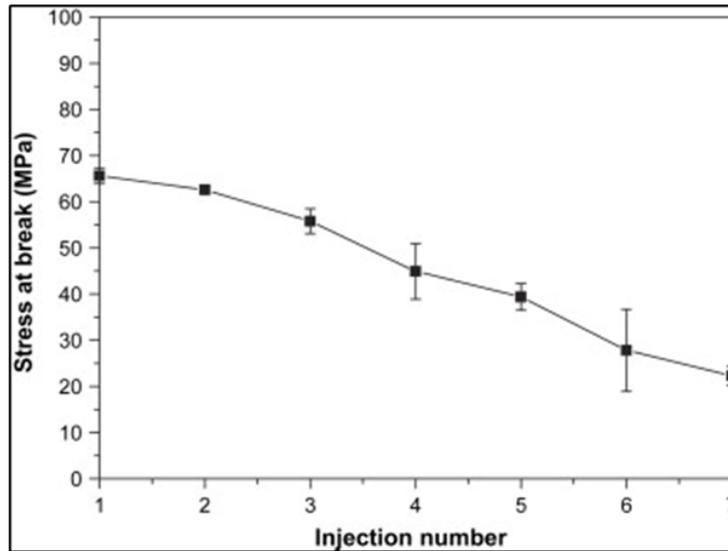


Figura 1.8 RUT vs número de inyección [20].

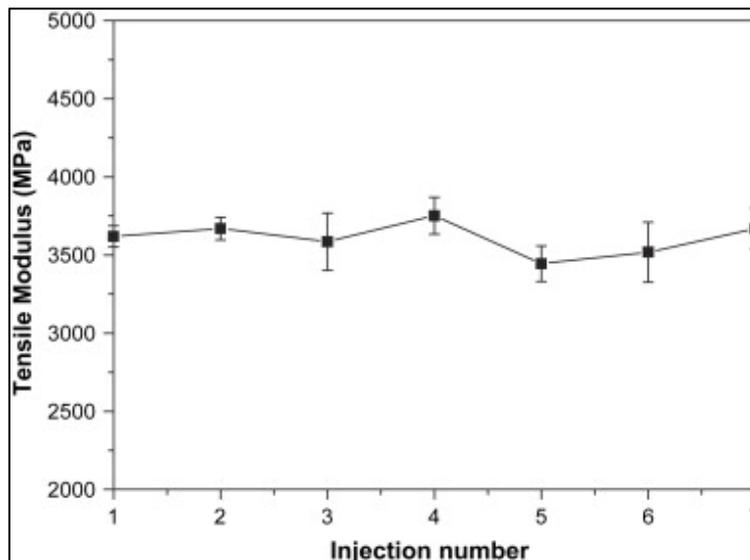


Figura 1.9 Módulo de elasticidad vs número de inyección [20].

Para reducir el efecto de las pérdidas de propiedades se han experimentado con el uso de aditivos como quinona y tropoleno [22], además de añadir material virgen al material reciclado [23].

1.4.6 Extrusoras de filamento 3D de baja producción en el mercado

Las extrusoras de filamento son una alternativa para usuarios de mayor experiencia en trabajos con impresión 3D. Permiten obtener materia prima

inmediata, reducir el gasto variable que representa el filamento y participar en el reciclaje.

Es una opción ajustable a las necesidades del usuario, que conviene en tiempo y costo. Los sistemas en el mercado actual más recalables son:

3Devo Extruder

Es una línea completa de producción de filamento 3D presentada en un diseño escalado. Este producto cuenta con un panel de control, sistema de enfriamiento y un embobinador.

Entre sus características más recalables está su capacidad de acceder hasta una temperatura de 450°C; abriendo un amplio rango de materiales procesables, un rango de diámetros a cargo del sistema de control automatizado es de 0.5 a 3 mm y el sistema de fundición cuenta con 4 zonas separadas para un mejor procesado del material.



Figura 1.10 Extrusora 3Devo Extruder [24].

FelFil evo

La marca FelFil ofrece en el mercado un sistema compacto de extrusión de filamento y de código abierto. Es capaz de utilizar material reciclado que ha sido triturado.

Puede procesar diversos materiales y extruirlos a partir de una velocidad de 1.15 m/min con la opción de regular los rpm en un rango de 1 a 9, según el

material. El rango de diámetros es similar al de la 3Devo Extruder y, además, cuenta con un husillo de acero k100 con perfil cónico que garantiza una tasa apropiada de compresión.

El torque producido de 23 N/m permitiendo extruir variedad de materiales e incluye un sistema pasivo de enfriamiento que enfría de forma inmediata el filamento.



Figura 1.11 Felfill Evo Filament Extruder [25].

EXO Extruder

Extrusora de filamentos para impresoras 3D que cuenta con una estructura de gran tamaño que es capaz de extruir y embobinar. En cuanto a la parte de extrusión, cuenta con la capacidad de regular temperatura, posee un solo tornillo/husillo y es configurable para diversos polímeros.



Figura 1.12 Extrusora EXO Extruder [26].

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Se busca diseñar y validar un sistema de trituración y el sistema de extrusión de filamento por lo que se buscaron las diferentes alternativas de solución tomando en cuenta las necesidades del cliente, eligiendo la opción más conveniente por medio de una matriz de decisión.

En el caso de la metodología a seguir para el diseño y la validación de la extrusora de filamento 3D se tiene el diagrama de flujo de la Figura 2..

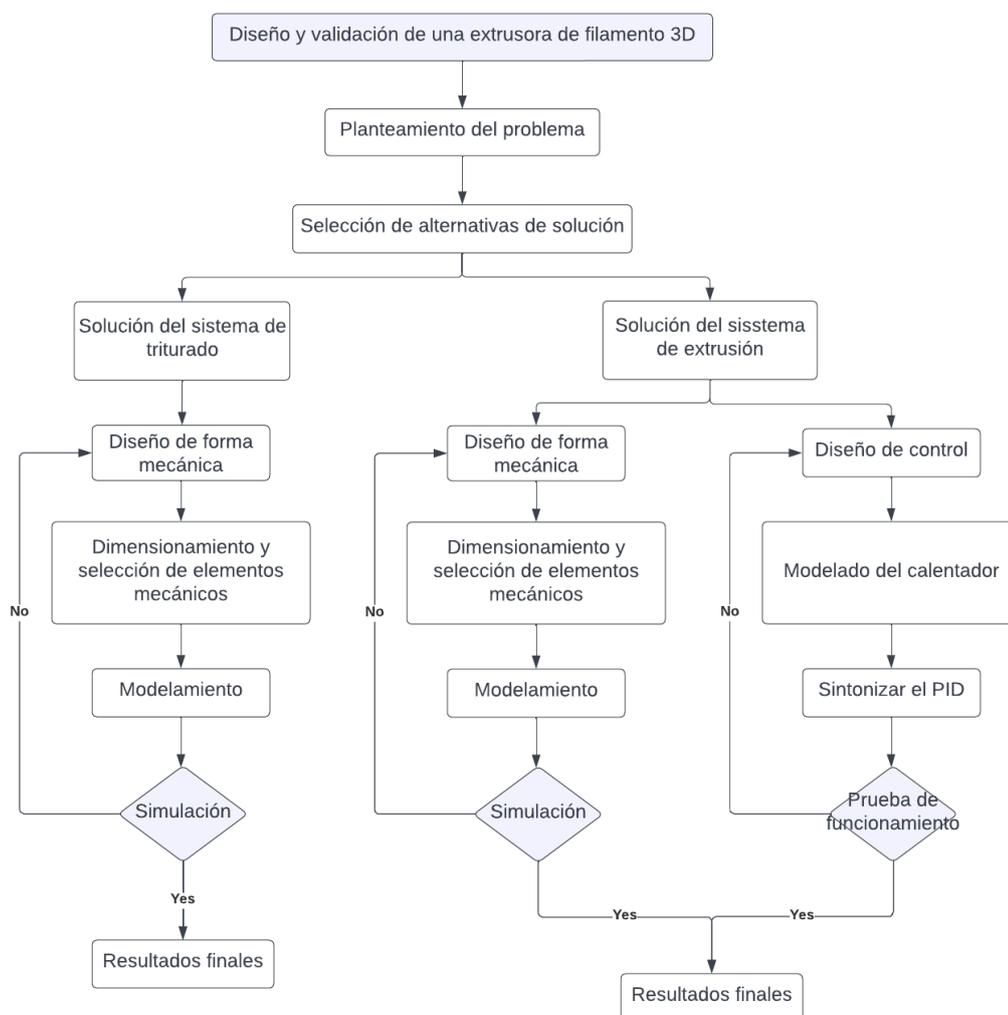


Figura 2.1 Metodología de trabajo. Elaboración propia.

2.1 Alternativas de solución

2.1.1 Sistema de trituración

En el caso del sistema de trituración las opciones variaron dependiendo de la cantidad de ejes que pueden tener las trituradoras previamente descritas en el Capítulo 1.

Solución A	Trituradora de eje simple con cuchillas desfasadas
Solución B	Trituradora de eje doble
Solución C	Trituradora de cuatro ejes

Figura 2.2 Propuestas de solución. Elaboración propia.

Se explican a continuación las diferentes propuestas de soluciones expuestas en la Figura 2. con cada uno de sus componentes.

Solución A: Trituradora de eje simple

- › **Cuchillas:** Desfasadas de garras de 2 mandíbulas
- › **Eje:** Eje Hexagonal en el centro y cilíndrico en los extremos
- › **Transmisión de potencia:** Motor

Solución B: Trituradora de eje doble

- › **Cuchillas:** Desfasadas de garras de 3 mandíbulas
- › **Eje:** Eje cilíndrico con chaveteros
- › **Transmisión de potencia:** Engranajes y un motor

Solución C: Trituradora de cuatro ejes

- › **Cuchillas:** Desfasadas de garras de 3 mandíbulas
- › **Eje:** Eje cilíndrico con chavetero
- › **Transmisión de potencia:** Banda y polea, motor

Criterios para evaluar

Para hacer posible la selección de la alternativa que más se acerque a los requerimientos de diseño de la trituradora se tomaron los criterios mostrados en la Figura 2.

Criterio 1	Menor costo
Criterio 2	Menor tamaño
Criterio 3	Fuerza de corte
Criterio 4	Menor necesidad de mantenimiento

Figura 2.3 Criterios a evaluar. Elaboración propia.

- **Menor costo:** La trituradora debe ser la opción más económica para ser fabricada.
- **Menor tamaño:** Debe ser compacta por lo que se busca que tenga el menor tamaño.
- **Fuerza de corte:** Debe ser capaz de triturar en la menor cantidad de pasadas posibles.
- **Menor necesidad de mantenimiento:** se busca que los mantenimientos de la trituradora sean en menor frecuencia y sencillos de realizar.

Peso de criterios

A continuación, se muestran los pesos de cada uno de los criterios a evaluar mostrando así el orden de importancia que tienen. Esto tomando en cuenta las necesidades y especificaciones del proyecto.

Tabla 2.1 Ponderación de cada criterio de evaluación.

Criterio	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	$\Sigma+1$	ponderación
Criterio 1		1	1	1	4	0,4
Criterio 2	0		0	0	1	0,1
Criterio 3	0	1		1	3	0,3
Criterio 4	0	1	0		2	0,2
				Suma	10	1

Tabla de conclusiones

Tabla 2.2 Tabla de conclusiones de las soluciones.

Conclusión	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	$\Sigma+1$	prioridad
Solución A	0,2	0,1	0,1	0,0	0,3	2
Solución B	0,1	0,0	0,1	0,1	0,4	1
Solución C	0,0	0,0	0,2	0,1	0,3	3

Se concluye que la solución que más nos beneficiaría es la solución B que corresponde al sistema de trituración de eje doble.

2.1.2 Sistema de extrusora de filamento.

Para el sistema de extrusión de filamento se proponen diversas alternativas como resultado de las posibles combinaciones de componentes de la extrusora. Esto es dependiendo de las necesidades del diseño y tomando en cuenta las más usuales en el mercado.

SOLUCIÓN A	Husillo simple con diámetro constante
SOLUCIÓN B	Husillo doble con giro contrareloj
SOLUCIÓN C	Husillo simple con diámetro constante
SOLUCIÓN D	Husillo simple con diámetro ascendente
SOLUCIÓN E	Husillo simple con diámetro ascendente y caja reductora

Figura 2.4 Propuestas de solución. Elaboración propia.

A continuación, se describen las características que identifican cada una de las soluciones mencionadas en la Figura 2. y sus campos más importantes dentro del diseño.

Solución A: Husillo simple-diámetro constante.

- › **Área de alimentación:** Tolva cónica y ranura de conexión con la cámara.
- › **Husillo:** Simple – diámetro constante.
- › **Cilindro:** Largo – liso.
- › **Sistema de calentamiento:** Cámara de fusión.

- › **Cabezal:** Placa rompedora.
- › **Boquilla:** V6 CHT base.
- › **Sistema de potencia:** Caja reductora.
- › **Sistema de enfriamiento:** Ventilación.

Solución B: Husillo doble-giro contrarreloj

- › **Área de alimentación:** Tolva cónica y ranura de conexión con la cámara.
- › **Husillo:** Doble – contrarreloj.
- › **Cilindro:** Largo – liso.
- › **Sistema de calentamiento:** Resistencias distribuidas.
- › **Cabezal:** Placa rompedora.
- › **Boquilla:** V6.
- › **Sistema de potencia:** Caja reductora.
- › **Sistema de enfriamiento:** Agua.

Solución C: Husillo simple-diámetro ascendente.

- › **Área de alimentación:** Tolva cuadrada con cámara descubierta.
- › **Husillo:** Simple – diámetro constante.
- › **Cilindro:** Corto – Canales zona A.
- › **Sistema de calentamiento:** Cámara de fusión.
- › **Cabezal:** Placa rompedora.
- › **Boquilla:** MK8.
- › **Sistema de potencia:** Catarinas y cadenas.
- › **Sistema de enfriamiento:** Ventilación.

Solución D: Husillo simple-diámetro constante

- › **Área de alimentación:** Tolva cono truncado con ranura.
- › **Husillo:** Simple – diámetro constante.
- › **Cilindro:** Corto – Canales zona A.
- › **Sistema de calentamiento:** Cámara de fusión.

- › **Cabezal:** Placa rompedora.
- › **Boquilla:** MK8.
- › **Sistema de potencia:** Catarinas y cadenas.
- › **Sistema de enfriamiento:** Ventilación.

Solución E: Husillo simple-diámetro ascendente.

- › **Área de alimentación:** Tolva cónica cuadrada cámara descubierta.
- › **Husillo:** Simple – diámetro ascendente.
- › **Cilindro:** Largo - Canales zona A.
- › **Sistema de calentamiento:** Resistencias distribuidas.
- › **Cabezal:** Placa rompedora.
- › **Boquilla:** MK8 CHT base.
- › **Sistema de potencia:** Caja reductora.
- › **Sistema de enfriamiento:** Agua.

Criterios Por Evaluar.

Para el proceso de selección de la solución más efectiva según las necesidades del proyecto, se realiza un análisis y evaluación de cada alternativa en base a los criterios proyectados en la Figura 2 , donde además se visualiza el peso de cada uno de ellos y por ende la importancia adquirida para facilitar decisiones.

CRITERIO 1	Diámetro Uniforme
CRITERIO 2	Facilidad de extrusión
CRITERIO 3	Complejidad mecánica
CRITERIO 4	Mantenimiento
CRITERIO 5	Precio

Figura 2.5 Criterios de evaluación para soluciones. Elaboración propia.

- **Diámetro uniforme:** El filamento extruido debe mantener un diámetro constante o dentro de la tolerancia máxima requerida.
- **Facilidad de extrusión:** Se deben evitar complicaciones dentro del proceso de extrusión debido a un buen trabajo del mecanismo.

- **Complejidad mecánica:** El mecanismo presenta facilidad sin perder eficiencia.
- **Mantenimiento:** Complejidad de mantenimiento y frecuencia.
- **Precio:** La aceptabilidad del valor del producto en el mercado.

Tabla 2.3 Ponderación de cada criterio de evaluación.

Criterio	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	Criterio 5	$\Sigma+1$	ponderación
Criterio 1		1	1	1	1	5	0.33333333
Criterio 2	0		0	1	1	3	0.2
Criterio 3	0	1		1	1	4	0.26666667
Criterio 4	0	0	0		0	1	0.06666667
Criterio 5	0	0	0	1		2	0.13333333
						Suma	15
							1

Tabla 2.4 Conclusiones de prioridad de soluciones.

Conclusión	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	Criterio 5	$\Sigma+1$	prioridad
Solución A	0.07	0.04	0.07	0.01	0.04	0.23	2
Solución B	0.09	0.05	0.02	0.00	0.02	0.18	4
Solución C	0.04	0.01	0.09	0.02	0.03	0.19	3
Solución D	0.11	0.07	0.04	0.01	0.01	0.24	1
Solución E	0.02	0.03	0.05	0.02	0.04	0.16	5

A partir de la matriz de decisión se prioriza la alternativa D como la solución a diseñarse para efectuar los objetivos propuestos para el sistema de extrusión final.

2.2 Requerimientos del sistema de trituración.

Se trabajó la Tabla 2.5 de especificaciones para poder realizar el diseño preliminar del sistema de trituración.

Tabla 2.5 Requerimientos y limitaciones del sistema de triturado.

		Producto: Sistema de trituración		Fecha inicial: 12/02/22	
				Página 1	
Especificaciones					
Concepto	Fecha	Propone	R/D	Descripción	
Función	12/2/2022	C+D	R	Capaz de triturar residuos de impresiones 3D previas	

Dimensiones	12/3/2022	C	D	Debe ser compacta y de tamaño reducido
Vida útil	12/4/2022	D	D	10 años, realizando mantenimientos
Componentes	12/5/2022	C+D	R	Componentes genéricos de acceso local
Costos	12/5/2022	C	R	Diseño de bajo costo
Seguridad	12/6/2022	D	R	Posea tapa en la parte de arriba de la trituradora para accidentes al triturar y tener un botón de paro de emergencia
Material a triturar	12/7/2022	C	R	PLA y ABS
Mantenimiento	12/8/2022	C	D	Mayor facilidad de mantenimiento
Cantidad de ejes de triturado	12/9/2022	D	D	2 ejes de trituración
Energía	12/10/2022	D+C	R	Alimentación eléctrica

2.2.1 Requerimientos de la extrusora de filamento

Se realizó un diseño del extrusor de filamento basado en los requerimientos expuestos en la Tabla 2.6, a través del dimensionamiento de sus componentes y la selección de elementos para la implementación de este.

Tabla 2.6 Requerimientos y limitaciones del sistema de extrusión

		Producto: Sistema de extrusión		Fecha inicial: 12/02/22
				Página 1
Especificaciones				
Concepto	Fecha	Propone	R/D	Descripción
Función	12/2/2022	D	R	Capaz de extruir filamento a partir de partículas de plástico irregulares
Dimensiones	12/3/2022	D+C	R	Longitud de aproximadamente 1.5 m
Vida útil	12/4/2022	D		Vida útil de por lo menos 2 años

Componentes	12/5/2022	C+D		Componentes genéricos de acceso local
Costo	12/5/2022	C+D		Costo de aproximadamente 800\$
Seguridad	12/6/2022	C		Posea protocolos para limitar los riesgos en caso de fallas
Velocidad de extrusión	12/7/2022	C		1.5 Kg por 2 horas
Mantenimiento	12/8/2022	C		
Tolerancia de diámetro de extrusión	12/9/2022	D+C		+0.0875 mm
Variación de material	12/10/2022	D+C		+5%

2.3 Diseño de forma del sistema de trituración.

Se realizó el diseño preliminar del triturador mostrado en la Figura 2. donde se especificarán los diferentes elementos que se utilizarán.

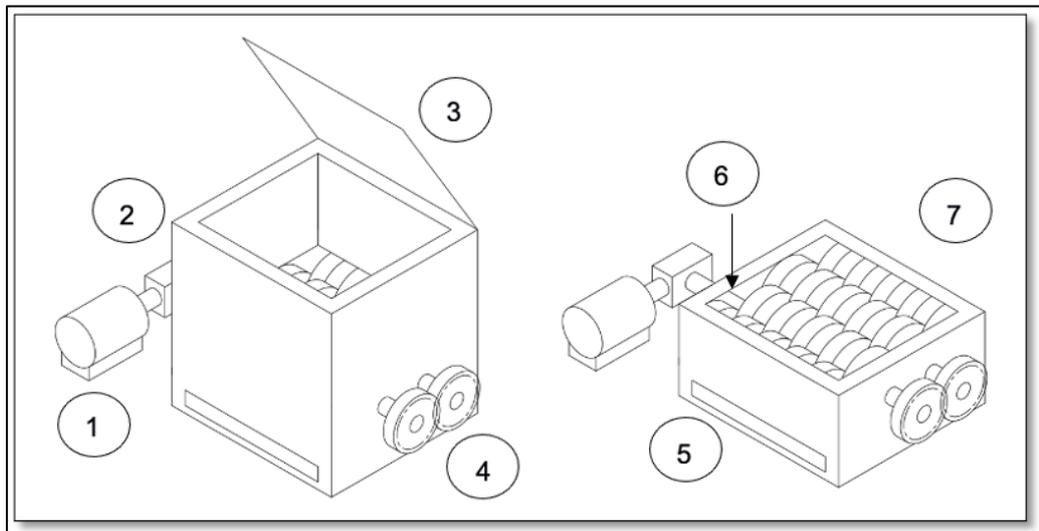


Figura 2.6 Diseño del sistema de trituración. Elaboración propia.

- 1) Motor.
- 2) Reductor.
- 3) Caja del sistema de triturado.

- 4) Sistema de engranajes.
- 5) Almacenamiento de material triturado.
- 6) Eje de transmisión

2.3.1 Eje de transmisión.

Para la geometría del diseño del eje de transmisión se utilizará una forma cilíndrica con chavetero. Los extremos cilíndricos permitirán el acople con el sistema de transmisión de engranajes para el movimiento de las cuchillas.

2.3.2 Cuchillas.

En el caso de una trituradora de eje doble es necesario una cuchilla de garras tal como la observada en la Figura 2., generalmente se usan de 3, 8 y 12 mandíbulas dependiendo de la aplicación. Para trituradoras de plásticos se hacen uso de cuchillas de 3 mandíbulas para reducir el tamaño de los materiales [25]. Se eligió un espesor de 10 mm para las cuchillas [26].

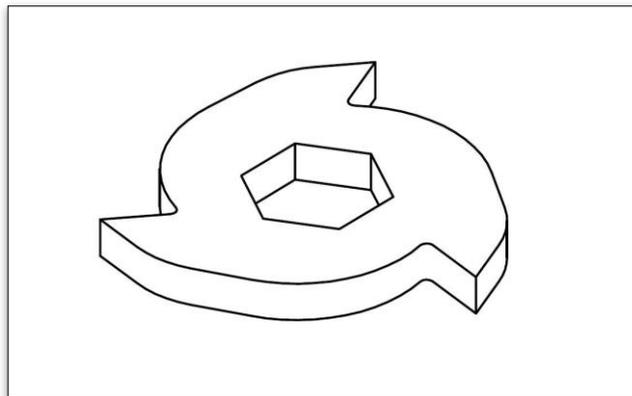


Figura 2.7 Cuchilla de 3 mandíbulas. Elaboración propia.

2.3.3 Caja de filtrado.

En la parte baja de la caja del sistema de triturado se colocará la caja de filtrado la cual estará conformada por dos bandejas separadas. La bandeja superior mostrada en la Figura 2 es la encargada de filtrar los pedazos grandes que necesitan pasar por un segundo proceso de triturado de los que tienen el tamaño adecuado para la extrusión.

Para realizar este filtrado es necesario retirar manualmente la bandeja interior, sacudirla hasta que todos los pellets de tamaño adecuado caigan sobre la segunda bandeja.

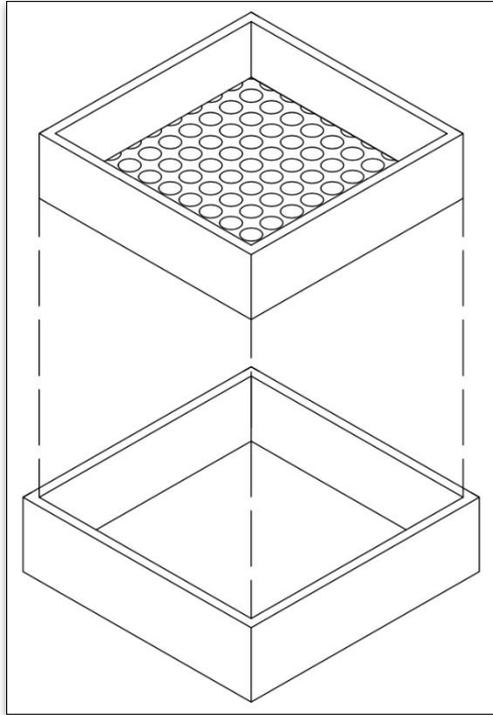


Figura 2.8 Caja de filtrado. Elaboración propia.

2.4 Diseño de forma de la extrusora de filamento.

Se realizó un boceto de un modelo preliminar del sistema de extrusión de filamento, con los siguientes componentes en su ensamblaje:

2.4.1 Área de alimentación.

La tolva se planea en base a una geometría pirámide rectangular truncada que permita presión uniforme al momento de bajar los pellets.

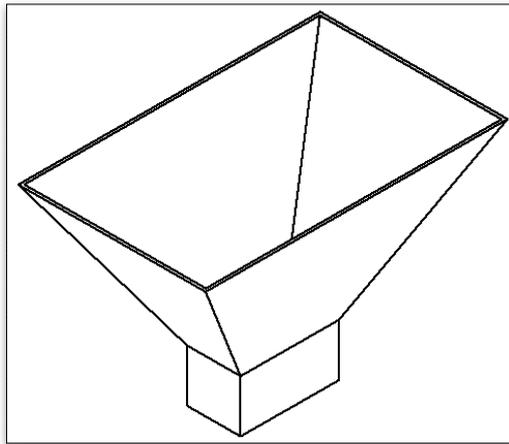


Figura 2.9 Boceto de tolva. Elaboración propia.

2.4.2 Cilindro exterior.

El cilindro exterior cuenta con una garganta de conexión para poder encajar la tolva y que no haya fugas en la etapa de alimentación.

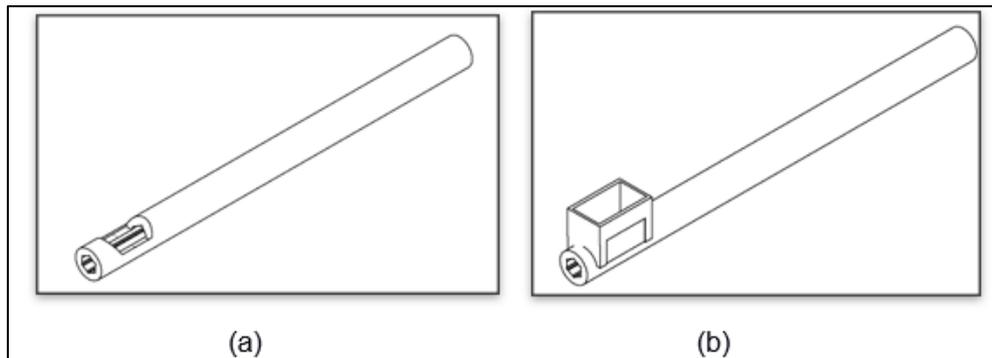


Figura 2.10 (a) Cilindro exterior. (b) Cilindro con gargantilla de conexión. Elaboración propia.

2.4.3 Cámara de fusión.

La cámara de fusión hace referencia a los calentadores que se encargaran de derretir el polímero según la necesidad de la etapa.

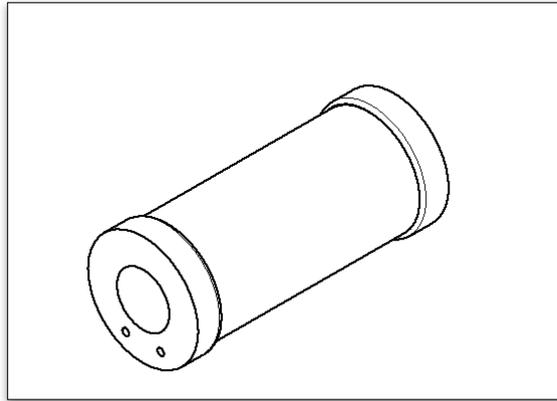


Figura 2.11 Cámara de fusión. Elaboración propia.

2.4.4 Husillo.

El husillo es el componente más relevante, el que se encarga de avanzar y extruir el plástico durante toda la longitud del cilindro mientras está siendo calentado.

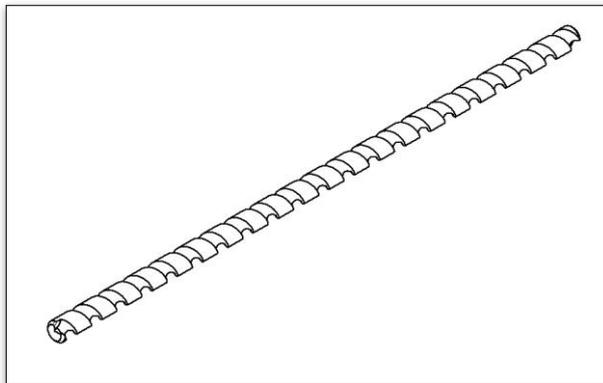


Figura 2.12 Husillo o tornillo sin fin. Elaboración propia.

2.5 Diseño del mecanismo del sistema de trituración.

Para el mecanismo de diseño de trituración es necesario tener en cuenta las dimensiones que debe tener el eje de transmisión para que no falle, por lo que es necesario aproximar las cargas a las que se va a ver sometido. En el caso del sistema de transmisión se seleccionó un motor de acuerdo con las necesidades del eje implementando también un reductor y rodamientos para el sistema de sujeción.

2.5.1 Eje de transmisión.

El eje de transmisión debe contar con chuchillas que se desfasen entre sí con las colocadas en el soporte del eje, se plantea el uso del acero SAE 1020 debido a que posee baja dureza y ductilidad. Sus propiedades se muestran en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Propiedades mecánicas del acero SAE 1020 normalizado [24].

Propiedades mecánicas del acero SAE 1020	
Resistencia a la tensión (MPa)	379
Limite elástico (MPa)	343
Esfuerzo máximo de fluencia (MPa)	207

El eje se encuentra sometido a distintos tipos de cargas debido a todos los elementos que interactúan con él, como el motor y las cuchillas. Por lo que es necesario realizar todos los análisis pertinentes para evitar fallas.

Análisis de resistencia a la fatiga.

Debido a que el eje se encuentra sometido a cargas fluctuantes se debe analizar si no va a existir algún tipo de fallo o deformación del material, utilizando la ecuación de Marin (2.1) [27], para determinar el límite de resistencia a la fatiga en un punto crítico.

$$S_e = K_a \cdot K_b \cdot K_c \cdot K_d \cdot K_e \cdot K_f \cdot S'_e \quad (2.1)$$

Donde:

K_a = Factor de modificación de condición superficial

K_b = Factor de modificación del tamaño

K_c = Factor de modificación de la carga

K_d = Factor de modificación de la temperatura

K_e = Factor de confiabilidad

K_f = Factor de modificación de efectos varios

S'_e = Límite de resistencia a la fatiga sin corregir

Factor de modificación de condición superficial.

En límite de resistencia a la fatiga se ve afectado por el tipo de proceso de manufactura mediante el cual se formó la pieza.

$$Ka = aSut^b \quad (2.2)$$

Donde:

Sut = Resistencia mínima a la tensión

a y b = dependen de la Tabla 2.8.

Tabla 2.8 Valores constantes del acabado superficial [27].

Acabado Superficial	Factor a		Exponente b
	$Sutr$ (kpsi)	$Sutr$ (MPa)	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272	-0.995

Debido a la forma del eje el acabado se realizará por maquinado tomando como unidad los MPa . El valor de Sut será el establecido en la Tabla 2.7.

Factor de modificación del tamaño.

En el caso del factor de tamaño es necesario analizar donde se encontrará el punto crítico en el eje, debido a que le eje tiene cambios de diámetro y de forma. En el caso de que este se encuentre en la parte cilíndrica del eje, se coloca el diámetro en la fórmula (2.3).

Por otro lado, si existiera una parte hexagonal en el eje se debe calcular un diámetro equivalente utilizando la fórmula (2.4).

$$k_b = \begin{cases} (d/7.62)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases} \quad (2.3)$$

$$d_{equiv} = \sqrt{\frac{A_{95}}{0.0766}} \quad (2.4)$$

Factor de modificación de la carga.

En el caso de este proyecto se aplican cargas combinadas por lo que se va a encontrar tanto flexión como torsión. En este caso se debe utilizar el valor de k_c que corresponda al peor caso que es el de torsión.

$$k_c = 0.59$$

Factor de modificación de la temperatura.

Se espera trabajar el proceso de triturado del material a condiciones de temperatura ambiente.

$$k_d = 1$$

Factor de confiabilidad.

Se trabajará con una confiabilidad del 90%.

$$k_e = 0.897$$

Factor de modificación de efectos varios.

No se incluirán otro tipo de factores.

$$k_f = 1$$

Límite de resistencia a la fatiga sin corregir.

En el caso de conocer la resistencia mínima a la tensión se hace uso de la fórmula (2.5) para obtenerla.

$$S'_e = 0.5S_{ut} \quad (2.5)$$

Diámetro mínimo del eje.

Es necesario calcular el diámetro mínimo con la fórmula (2.6) para que el eje tenga vida infinita. Tomando en cuenta los concentradores de esfuerzos que se dan debido tanto al cambio de diámetro como al cambio de forma del eje.

$$D = \left\{ \frac{32N_f}{\pi} \left[\frac{\sqrt{(k_f M_a)^2 + \frac{3}{4}(k_{fs} T_a)^2}}{S_f} + \frac{\sqrt{(k_{fm} M_m)^2 + \frac{3}{4}(k_{fsm} T_m)^2}}{S_{ut}} \right] \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (2.6)$$

Donde:

N_f = Factor de seguridad contra la fatiga

K_f, k_{fm} = Factores de concentración de esfuerzo por fatiga

M_a = Momento máximo

M_m = Momento mínimo

T_a = Torque máximo

T_m = Torque medio

S_{ut} = Resistencia ultima a la tensión

S_f = Resistencia a la fatiga

2.5.2 Chaveta y chavetero.

La chaveta es un elemento utilizado para acoplar elementos al eje en nuestro caso las cuchillas y los espaciadores. Las dimensiones de la chaveta se seleccionan según la norma y se debe determinar la longitud mínima de la chaveta haciendo un análisis por esfuerzos cortantes con la ecuación (2.7) y esfuerzos de aplastamiento usando la ec. (2.9).

Cortante puro

$$\eta_{cp} = \frac{S_{sy}}{\tau} \quad (2.7)$$

Donde

S_{sy} = Resistencia al cizallamiento

τ = Esfuerzo cortante

El valor del esfuerzo cortante se calcula utilizando la formula (2.8).

$$\tau = \frac{F}{bL} \quad (2.8)$$

Donde

F = Fuerza cortante

b = Ancho de la chaveta

L = Longitud de la chaveta

Aplastamiento

$$\eta_{ap} = \frac{s_y}{\sigma_{ap}} \quad (2.9)$$

Donde

s_y = Esfuerzo a la fluencia

σ_{ap} = Esfuerzo de aplastamiento

El esfuerzo de aplastamiento se calcula mediante la formula (2.10).

$$\sigma_{ap} = \frac{F}{\frac{h}{2} * L} \quad (2.10)$$

Donde

h = Altura de la chaveta

2.5.3 Cuchillas.

Se debe lograr que el material en este caso ABS o PLA se rompa por efecto de las cuchillas, por lo que se deberá tener en cuenta cual es el material que requiere de mayor esfuerzo para que se realice el corte y realizar los cálculos con el mismo. En el caso de este proyecto es el PLA.

Se utilizan las ecuaciones de ensayo de Charpy en donde la fuerza cortante obtenida dependerá del tipo de material y la absorción de energía en el mismo despreciando los efectos en la zona elástica obteniendo la formula (2.11).

$$\delta W = G_c * t * \delta a \quad (2.11)$$

Donde:

δW = Trabajo generado por la cuchilla

G_c = Energía absorbida por unidad de área

t = Longitud del material que se va a cortar

δa = Avance de la fractura

Para el cálculo de la fuerza de corte se utiliza la formula (2.12) utilizando el trabajo obtenido.

$$W = F_c * r \quad (2.12)$$

Donde:

F_c = Fuerza de corte

r = Radio de la cuchilla

Debido a que el sistema se encuentra rotando se obtendrá el torque por medio de la fuerza de corte obtenida anteriormente haciendo uso de la fórmula (2.13).

$$\tau = F_c * r \quad (2.13)$$

Donde:

τ = Torque

F_c = Fuerza de corte

r = Radio de la cuchilla

2.5.4 Sistema de transmisión.

En el caso del sistema de transmisión se hará uso de un sistema de engranajes y de un motor.

Motor

Para la selección de un motor para el sistema es necesario tener en cuenta la potencia mínima calculada con la fórmula (2.14) necesaria para producir el torque que permita el proceso de triturado. El torque será en base a las 16 cuchillas que conforman el sistema.

$$P = \tau\omega \quad (2.14)$$

Donde:

τ = Torque aplicado

ω = Velocidad angular

Sistema de engranaje

Para realizar el sistema de engranaje es necesario tener identificado parámetros como la velocidad de entrada y de salida del motor, además de la potencia. El diseño de los dos engranajes se realizará mediante el software Inventor, tomando en cuenta el diámetro primitivo el cual debe ser igual a la distancia entre ejes de la trituradora.

2.6 Mecanismos de diseño de la extrusora de filamento.

Para el diseño de la extrusora de filamento se tuvo que considerar cumplir con los requerimientos planteados en la Tabla 2.6. Para cumplir con estos requerimientos y poder realizar un diseño exitoso se identificaron tres componentes para el desarrollo de la extrusora, siendo estos el componente mecánico, eléctrico y de control por lo cual el diseño se descompuso en estas tres etapas principales.

Para el diseño mecánico del sistema de extrusión es importante dos aspectos de este: el mecanismo encargado de empujar los fragmentos de plástico a la zona de calentamiento, y el diseño del sistema de transmisión de potencia.

2.6.1 Sistema de empuje de plástico.

Husillo.

En el diseño del sistema de empuje de fragmentos de plástico, el primer paso fue la selección y dimensionamiento del husillo, para elegir el mismo se tuvo que determinar los siguientes parámetros del husillo: el diámetro, la longitud, y la longitud de avance del husillo. Estos parámetros se relacionan directamente con la velocidad de extrusión deseada y por lo cual se usó el requerimiento de la Tabla 2.9.

Para la determinación de esos parámetros se siguió una referencia en el diseño de extrusoras propuestas por F. Giles et. al [28] que se resume en la Tabla 2.9

Tabla 2.9 Guía general para la selección de un husillo [28].

Parameter	Effect on Screw
Output	Calculate screw diameter from chart.
Number of vent or feed ports	0 L/D = 25 1 L/D = 30 2 L/D = 35–40 3 L/D = 45
Barrel	Smooth: Use normal compression ratio. Grooved: Use low compression ratio.
Bulk/actual density ratio	>50% of melt density: Use normal feed depth. <50% of melt density: Use large feed depth.
Melt viscosity	Helix angle from power law index. High viscosity, use a deep metering section. Low viscosity, use shallow metering section.
Melting rate	For higher melting rate, use small clearance, large helix angle, and multiple flights. Can also use internal screw heating.
Melt quality	For higher melt quality, use efficient mixing section.

La alternativa seleccionada fue la D por lo cual se usó un solo husillo simple de diámetro constante con una sola entrada por lo cual se escogió una relación L/D (longitud del husillo vs Diámetro del husillo) de 25. Para determinar el diámetro del husillo se usó el grafico de la Figura 2.

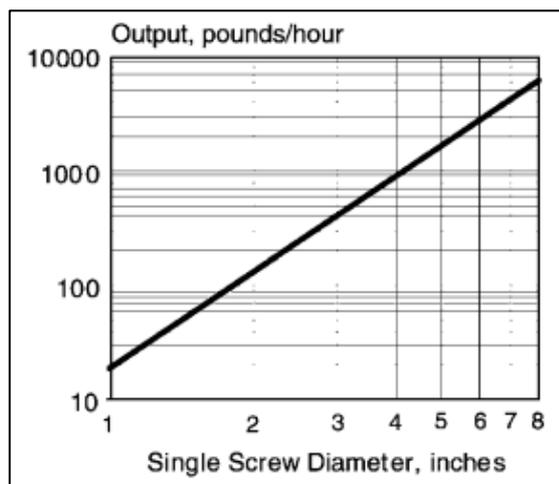


Figura 2.13 Producción típica según diámetro del husillo [28].

Al requerir una producción de 1Kg en 2.5 h se pudo seleccionar un husillo de una pulgada de diámetro, siendo la longitud total del husillo 30 pulgadas.

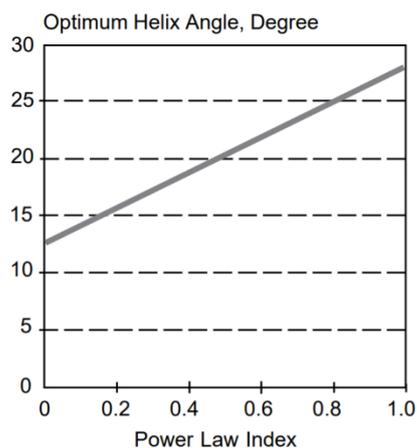


Figura 2.14 Índice de ley de potencia versus ángulo de hélice óptimo en la sección de medición. [28]

Finalmente, se seleccionó el ángulo de avance del hilo del husillo, basado en las propiedades del termoplástico a ser extruido. Para el PLA 2003D el índice de ley de potencia n es 0.725 a temperaturas cercanas a las óptimas para la extrusión del filamento (200 C). A través del uso de Figura 2. se determinó un ángulo de avance de 25 grados.

Tabla 2.10 Propiedades para la selección del husillo

Propiedades del Husillo	
Diámetro [in]	1

Longitud [in]	25
Angulo de avance [°]	25
Espesor de paso [in]	0.1
Paso del husillo [in]	1.46
Profundidad de canal [in]	0.3

En consecuencia, el cilindro que recubre al husillo también tiene una longitud de 25 pulgadas y tiene una pulgada de diámetro interno. Para poder realizar el cálculo de espesor de paso del husillo se usó la ecuación (2.15) y para obtener la profundidad del canal se utilizó la ecuación (2.16), según se especifica en [28].

$$t = 0.8 * D \quad (2.15)$$

$$h = 0.1 * D \quad (2.16)$$

Para calcular la holgura radial entre la cresta del filete del husillo y el cilindro, se toma en cuenta la ecuación (2.17).

$$\delta = 0.003 * D \quad (2.17)$$

Donde:

δ : Holgura entre la cresta del filete del husillo y el cilindro

D : El diámetro del husillo

0.003: Constante

Cilindro.

Para el cálculo del diámetro interior del barril se usa:

$$D_i = D + 2 * \delta \quad (2.18)$$

Donde:

D_i : Diámetro interior del barril.

D : Diámetro del husillo.

Mientras que el espesor de la pared del barril se calcula mediante la fórmula (2.19).

$$e = r_i \left(\sqrt{\frac{2 * P_i}{\sigma_T - 2 * P_i}} \right) \quad (2.19)$$

e : Espesor de pared del barril

r_i : Radio interno del barril

σ_T : Esfuerzo máximo de fluencia del material

P_i : Presión interna del cilindro

Las características del husillo también permitieron dimensionar otros parámetros del sistema como la velocidad de rotación del husillo y la potencia requerida por el mismo (2.20) y (2.21)

$$Q = \frac{\dot{M}}{\rho} = V_z * W * h \quad (2.20)$$

$$V_z = \pi * D * N * \tan(\varphi) \quad (2.21)$$

Esta velocidad considera que a lo largo de las 2 horas de producción de plástico el sistema se encontrará extruyendo la misma cantidad, sin embargo, es parcialmente correcto dado que el sistema estará en pausa por momentos o rotará más lento. Por ello, se busca una aproximación conservativa de la velocidad máxima para las siguientes etapas de diseño y cálculos. Se multiplica por un factor de diseño de 2 la velocidad requerida.

$$N_{max} \approx 18 \text{ rpm}$$

Velocidad de extrusión del fluido

Para obtener la velocidad de extrusión del fluido en la salida de la boquilla se debe tomar en cuenta el área transversal de la boquilla.

$$V_{fluido} = \frac{\text{Flujo volumétrico}}{A_{trans} \text{Boquilla}} \quad (2.22)$$

Según los parámetros se dimensiona la potencia requerida por el tornillo en función de la geometría de la boquilla y de la viscosidad del PLA a 200 °C. Propiedad obtenida a partir de la Figura 2, aproximando con el PLA7000D.

Este cálculo depende de la determinación de la presión a la que se somete el plástico en el extrusor usando la ecuación del trabajo de F. Giles [28]

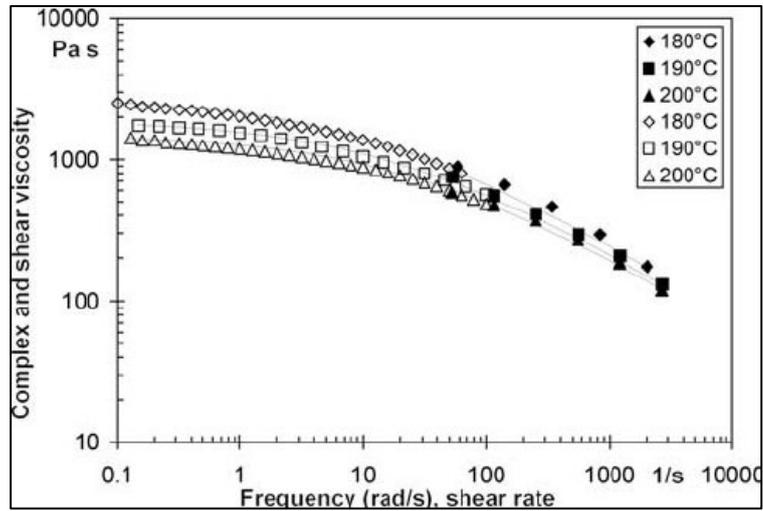


Figura 2.15 Curvas de viscosidad compleja y de corte para PLA 7000D obtenidas correspondientemente en reómetros capilares y de placas paralelas a 180, 190 y 200 °C [29].

Para la obtención de la viscosidad debe obtenerse la razón de cortante del polímero, basándose en lo descrito en el trabajo de F. Giles [28], se obtiene con la ecuación (2.23) y así mismo la presión (2.24).

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (2.23)$$

La presión de la extrusión permite un diseño basado en la obtención de fuerza necesaria para que el eje extruya el material base. Y se obtiene con la ecuación

$$\Delta P = \frac{6\pi D L N \eta}{h^2 \tan \phi} \quad (2.24)$$

Con este valor se calcula la fuerza aplicada por el eje para la extrusión a partir de la fórmula (2.25).

$$F_R = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \Delta P \quad (2.25)$$

Velocidad de avance del tornillo.

Mientras que la fuerza de reacción asiste en el dimensionamiento de los rodamientos axiales del tornillo también participa en la obtención de potencia requerida para el motor junto con la velocidad de avance V_z , representada por la ecuación (2.26).

$$Potencia = FV_z \quad (2.26)$$

Potencia para la extrusión de polímero.

De igual forma, en función de la ecuación (2.27), resulta la energía necesaria para calentar el polímero desde la zona de alimentación hasta el estado de fusión, es decir, la potencia de la resistencia de calentamiento.

$$Potencia_{extr\ polymer} = \dot{m}C_p\Delta T + \dot{m}\Delta H_{fusion} \quad (2.27)$$

Donde los parámetros se definen como:

m = Caudal másico. [kg/h]

C_p = Calor específico. [kJ/kg°C]

ΔT = Variación entre temperatura de alimentación y la de derretimiento. [°C]

$\Delta H_{fusión}$ = Entalpía de fusión de la matriz polimérica. [kJ/k]

Torque.

Existe la generación de un torque producido por el esfuerzo de extruir el plástico que es equivalente al torque del motor, con dirección opuesta. Se obtiene con la ecuación (2.28).

$$\tau = \frac{Potencia_{extr\ polymer}}{Velocidad_{extrusión}} \quad (2.28)$$

2.6.2 Sistema de transmisión de potencia.

Selección de Motor.

La selección de motor depende de la potencia obtenida en la anterior sección. Esta selección toma en consideración el deseo de diseño que plantea la capacidad de cambiar las condiciones de velocidad de avance y de calentamiento de acuerdo el tipo de material trabajado.

Se propone evaluar el uso de un servomotor o uno de paso, que reciba como entrada la velocidad y tenga una eficiencia alineada con los requerimientos del proyecto.

Sistema de Cadena y Catarina.

A partir de la matriz de decisión, el sistema de transmisión de basa en una cadena y catarinas con avance controlado. A continuación, se describen los parámetros que usados dentro de su diseño. Se debe tener en cuenta la capacidad del motor seleccionado según los requerimientos de la máquina, funcionamiento a bajas velocidades y entrega suficiente de torque.

Para la reducción de la cantidad de revoluciones por minuto entregado por el motor, es necesario realizarlo con la planificación de uso de más de una Catarina, por lo que se aplicó una relación de transmisión. En la selección de cadenas y catarinas se utiliza como fundamento las guías dadas por el proveedor SKF en su catálogo de sistemas de transmisión de potencia.

El primer paso, consiste en la determinación de factores de servicio usando las Tabla 2.11 y Tabla 2.12

Tabla 2.11 Factores de aplicación.

Application service factor (F_a)		Type of prime mover		
Load classification	Driven equipment	Electric motor or turbine	Internal combustion engine > 6 cylinders, with flywheel, or hydraulic coupling	Internal combustion engine <6 cylinders, with NO flywheel, or hydraulic coupling
Uniform load (U)	Agitators; centrifugal blowers; generators, centrifugal pumps; Uniformly loaded belt conveyor, lightly loaded chain conveyors	1.0	1.0	1.2
Moderate shock (M)	Centrifugal compressors; kilns and dryers; conveyors and elevators with intermittent, medium load fluctuations; Dryers; Pulverisers; machinery with moderate pulsating loads (machine tools paper, textiles)	1.3	1.2	1.4
Heavy shock (H)	Press, construction and mining equipment; reciprocating machinery, (compressors, reciprocating feeders, oil well rigs) rubber mixers, roll lines, machinery with heavy shock or reversing torques	1.5	1.4	1.7 - 1.9

Tabla 2.12 Factores de velocidad.

Speed of chain	Speed factor	Speed of chain	Speed factor
m/s	F_n	m/s	F_n
Less than 0.17	1.0	>0.5 - < 0.67	1.3
>0.17 and <0.33	1.1	>0.67 - < 0.83	1.4
>0.33 and < 0.5	1.2	>0.83 - <1.17	1.6

La relación de reducción usada se calcula usando la ecuación (2.29) Procurando mantener una velocidad de operación del motor cercana a 20 rpm.

$$R = \frac{\omega_m}{\omega_T} \quad (2.29)$$

En base a la ecuación (2.30) se calcula la velocidad de la cadena con la velocidad de rotación del tornillo y el paso de la Catarina adjunta al tornillo.

$$V = n_{diente} * pitch * \omega_T \quad (2.30)$$

Por medio de la ecuación (2.31) se calcula la potencia de diseño para escoger la cadena y con apoyo en la Tabla 2.13 se obtiene la potencia nominal.

$$P_D = P_M * F_a * F_n \quad (2.31)$$

Tabla 2.13 Potenciales nominales de cadenas ANSI.

35-1 (06C-1); (9.53 mm Pitch) Power ratings in kilowatt (ANSI standard)																	
Z	Pitch circle Dia. mm	rpm (N ₂) of small (faster) sprocket z ₁															
		50	100	200	240	500	700	900	1200	1500	1800	2100	2500	3000	3500	4000	4500
13	39,80	0,10	0,19	0,37	0,45	0,90	1,25	1,58	2,09	2,59	3,08	3,57	3,70	2,81	2,24	1,83	1,53
15	45,81	0,11	0,22	0,43	0,51	1,04	1,43	1,83	2,41	2,98	3,55	4,12	4,59	3,49	2,77	2,27	1,90
17	51,84	0,13	0,25	0,48	0,58	1,18	1,63	2,07	2,73	3,38	4,03	4,67	5,52	4,21	3,34	2,74	2,29
19	57,87	0,14	0,28	0,54	0,65	1,31	1,82	2,31	3,05	3,77	4,50	5,22	6,17	4,98	3,95	3,23	2,71
21	63,91	0,16	0,31	0,60	0,72	1,45	2,01	2,56	3,37	4,18	4,98	5,77	6,82	5,78	4,59	3,75	3,15
23	69,95	0,17	0,34	0,66	0,79	1,60	2,20	2,80	3,69	4,57	5,45	6,32	7,47	6,62	5,26	4,30	3,60
25	76,00	0,19	0,37	0,72	0,86	1,73	2,39	3,04	4,01	4,97	5,92	6,86	8,12	7,51	5,96	4,88	4,09
Lubrication method		TYPE 1					TYPE 2					TYPE 3					

El cálculo de la longitud de la cadena se determina con ecuación (2.32), mientras que el factor de corrección K parte de la Tabla 2.14.

Tabla 2.14 Factores de corrección K.

'K' Factors													
Z ₁ -Z ₂	K	Z ₁ -Z ₂	K	Z ₁ -Z ₂	K	Z ₁ -Z ₂	K	Z ₁ -Z ₂	K	Z ₁ -Z ₂	K	Z ₁ -Z ₂	K
1	0,0	11,00	3,06	21,00	11,17	31,00	24,34	41,00	42,58	51,00	65,88	61	94,25
2	0,1	12,00	3,65	22,00	12,26	32,00	25,94	42,00	44,68	52,00	68,49	62	97,37
3	0,2	13,00	4,28	23,00	13,40	33,00	27,58	43,00	46,84	53,00	71,15	63	100,54

$$L = \frac{Z_2 + Z_1}{2} + 2C + \frac{K}{C} \quad (2.32)$$

Selección de Rodamientos para el tornillo.

El tornillo del sistema de extrusión se encuentra expuesto a cargas mayormente axiales y cargas radiales de baja magnitud, esto es debido a la cadena que al transmitir potencia al tornillo también produce una carga radial que se encuentra localizada puramente en donde la cadena tiene tensión.

Mediante la calculadora de SKF se deduce que los rodamientos de bolas son los adecuados para el soporte de carga axial, además que soportan también cargas radiales.

2.6.3 Diseño de los calentadores.

La obtención de las resistencias de los calentadores parte de la ecuación (2.33) de potencia que considera el uso de la fuente de voltaje de 24 voltios.

$$Power = \frac{V^2}{R} \quad (2.33)$$

2.7 Diseño sistema de control de la extrusora.

Para el sistema de control de temperatura se realizó un modelo aproximado y lineal del calentamiento del cilindro husillo y material en estado estable, el cual se muestra en la ecuación (2.34) y (2.35), además este modelo toma en consideración los efectos del aislante y de las perdidas al ambiente. Cabe recalcar que en modelo realizado se despreció la resistencia térmica entre el calentador el husillo y el material ya que se asumió que son muchos más grandes los efectos de la inercia térmica del sistema que los de la resistencia térmica en su calentamiento. La descripción grafica en diagrama de bloques del modelo realizado se encuentra en la Figura 2.

$$\dot{W}_e = \dot{Q}_H + \dot{Q}_c + \dot{Q}_{pl} + \dot{Q}_p \quad (2.34)$$

$$\frac{V^2}{R} = (m_H C_H + m_C C_C + m_{pl} C_{pl}) \dot{T} + \frac{2\pi L K (T - T_{amb})}{\ln \left(\frac{r_o}{r_i} \right)} \quad (2.35)$$

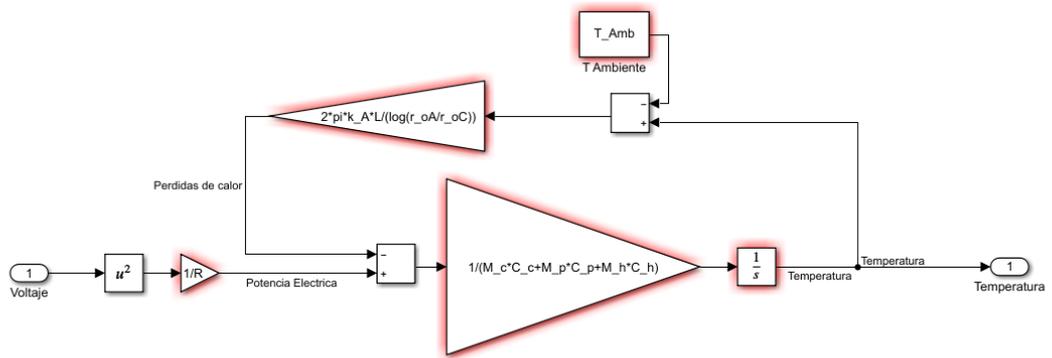


Figura 2.16 Diagrama de bloques del modelo de calentamiento del sistema. Elaboración propia.

Se propone usar un esquema de controlador PI usando una retroalimentación de temperatura para poder regular la potencia o voltaje como se muestra en la Figura 2. poder sintonizar este controlador se hizo uso de las herramientas de Matlab como el “*PID tuning*”, considerando un punto de fijación de prueba de 220 °C y teniendo la limitación de un voltaje máximo de salida de 24V.

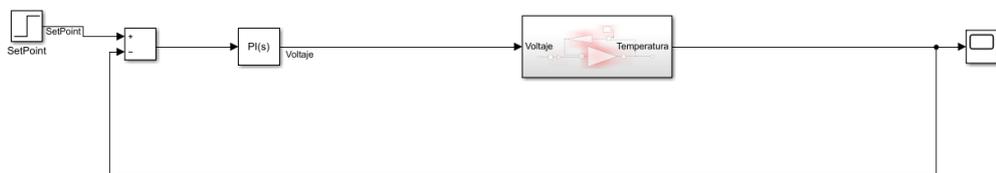


Figura 2.17 Controlador PI propuesto. Elaboración propia.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Cálculos para el sistema de trituración.

3.1.1 Cálculos para las cuchillas.

Se dispusieron 16 cuchillas, 8 en cada eje de transmisión junto a un separador que las mantenga alejadas y estables. Se establece como tamaño máximo a cortar una pieza de 3x3 cm con un espesor de 3 mm.

Cálculo del trabajo.

Para el cálculo del trabajo se conoce que la energía absorbida por el PLA es de 16500 J/m^2 . Además, se integra el avance de la fractura, siendo reemplazado por el espesor de la muestra a cortar mostrado en la ecuación (3.1).

$$W = G_c * t * e \quad (3.1)$$

$$W = 16500 * 0.03 * 0.003$$

$$W = 1.485 \text{ J}$$

Cálculo de la fuerza de corte.

$$F_c = \frac{1.485}{0.05}$$

$$F_c = 29.7 \text{ N}$$

Cálculo del torque ejercido por la cuchilla

$$\tau = 29.7 * 0.05$$

$$\tau = 1.485 \text{ Nm}$$

3.1.2 Cálculo de potencia del motor.

Con el torque obtenido para una cuchilla se puede obtener la potencia del motor que se va a utilizar. Es necesario multiplicar ese valor por las 16

cuchillas que se van a utilizar en los dos ejes. Se usará un motor a 60 RPM.

$$P = 1.485 * 16 * \left(60 * \frac{2\pi}{60}\right)$$

$$P = 149.29 W$$

$$P = 0.20 HP$$

3.1.3 Cálculos del eje de transmisión.

Para realizar los cálculos del eje de transmisión se definió una longitud de 310 mm incluyendo los acoplos cilíndricos para la caja de triturado.

Se obtienen los valores faltantes al realizar el diagrama de cuerpo libre mediante el análisis estático del eje usando la fórmula (3.2) .

$$\sum M_x = 0 \quad (3.2)$$

$$2T - 4\tau - T = 0$$

$$T - 4(1.485) = 0$$

$$T = 5.94 Nm$$

Se realiza la simulación del eje en el software Inventor como se muestra en la Figura 3 para obtener los valores de las fuerzas de reacción producidas en los rodamientos que se colocan a los extremos de la caja.

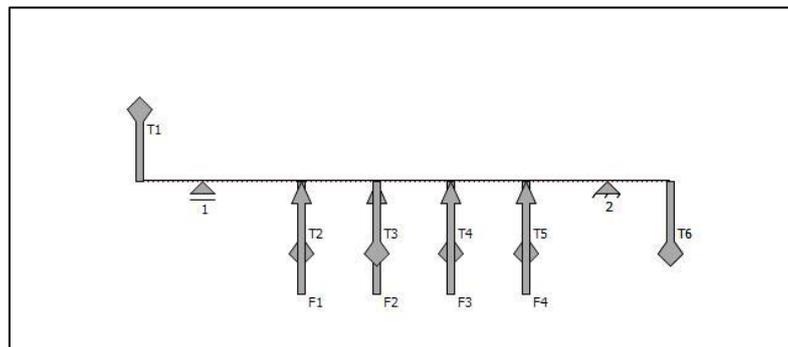


Figura 3.1 Diagrama de cuerpo libre obtenido en Inventor. Elaboración propia.

Reacciones de los rodamientos.

$$R_1 = 52.405 \text{ N}$$

$$R_2 = 52.439 \text{ N}$$

Realizados los cálculos respectivos se obtienen los diagramas de fuerza cortante y momento flector para el diseño.

Diagramas de fuerza cortante

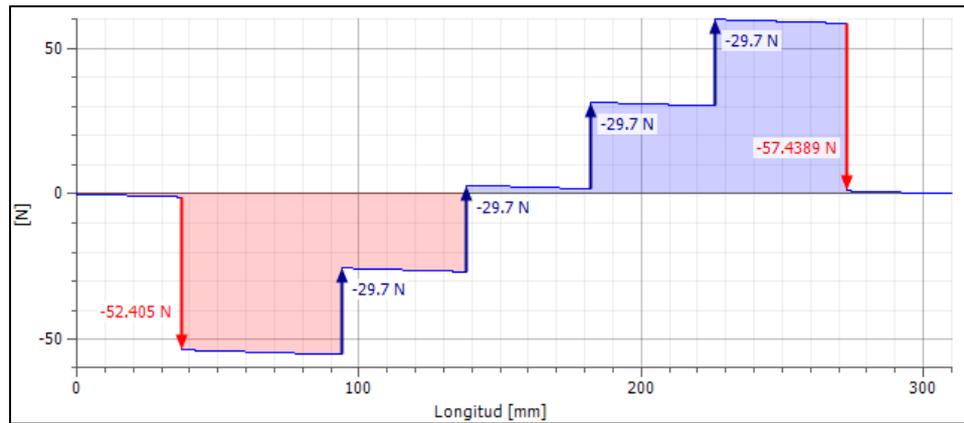


Figura 3.2 Diagrama de fuerza cortante.

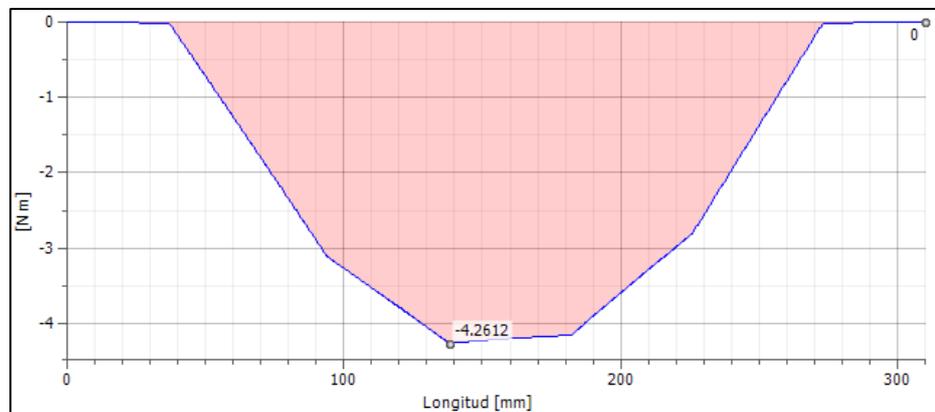


Figura 3.3 Diagrama de momento flector.

Análisis de resistencia a la fatiga.

Factor de modificación de condición superficial.

$$k_a = (4.51) * (410)^{-0.265} \tag{3.3}$$

$$k_a = 0.916$$

Factor de modificación del tamaño.

Como diseño preliminar se elegirá la constante como 0.6 ya que es lo máximo que se puede reducir la resistencia a la fatiga por el factor de modificación de tamaño.

$$k_b = 0.6$$

Límite de resistencia a la fatiga sin corregir.

Se realiza el cálculo del límite de resistencia a la fatiga sin corregir usando un valor de 410 Mpa como resistencia última a la tracción correspondiente al acero.

$$S'_e = 205 \text{ MPa}$$

Reemplazando en la fórmula (3.4) se obtiene:

$$S_e = K_a \cdot K_b \cdot K_c \cdot K_d \cdot K_e \cdot K_f \cdot S'_e \quad (3.4)$$

$$S_e = (0.916) * (0.6) * (0.59) * (1) * (0.897) * (1) * (205)$$

$$S_e = 59.62 \text{ MPa}$$

Diámetro mínimo del eje.

Para el cálculo del diámetro se estableció un factor de seguridad de 1.5 y se calculan los valores de k_f y de k_{fs} con la fórmula (3.5) y (3.6). El valor de k_t y de k_{ts} se establecen como 4 debido a que es la máxima concentración de esfuerzo que puede tener el chavetero.

$$k_f = 1 + q (Kt - 1) \quad (3.5)$$

$$k_{fs} = 1 + q (Kt - 1) \quad (3.6)$$

Donde:

$$q \text{ para flexión} = 0.72$$

$$q_s \text{ para torsión} = 0.75$$

Se obtienen los siguientes valores:

$$k_f = 3.16$$

$$k_{fs} = 3.25$$

Para el cálculo del diámetro mínimo se toma como torque máximo y torque medio a la suma del torque de entrada ($2T$) y los cuatro torques generados por las cuchillas.

$$D = \left\{ \frac{32(1.5)}{\pi} \left[\frac{\sqrt{(3.16 * 4.26)^2 + \frac{3}{4}(3.25 * 17.82)^2}}{59.62 \text{ MPa}} + \frac{\sqrt{(k_{fm} * 0)^2 + \frac{3}{4}(3.25 * 17.82)^2}}{410 \text{ MPa}} \right] \right\}^{\frac{1}{3}}$$

$$D = 24.76 \text{ mm}$$

Obteniendo el diámetro mínimo se puede determinar el diámetro del eje el cual se establece de 25.4 mm.

3.1.4 Cálculos de la chaveta.

Cortante puro.

Se determina el factor de seguridad η_{cp} como 1.5, con este valor se obtiene el esfuerzo cortante a partir de la ecuación (2.8). Los valores de b y h se eligen dependiendo del diámetro del eje seleccionados. [24]

$$\tau = \frac{0.5 * 207}{1.5}$$

$$\tau = 69 \text{ MPa}$$

Con este valor obtenido se calcula la longitud mínima que va a tener la chaveta. La fuerza se obtiene haciendo uso del torque que ejerce cada cuchilla.

$$L = \frac{4 * \frac{1.485}{0.0127}}{8 * 10^{-3} * 69 \text{ MPa}}$$

$$L = 0.000847 \text{ m}$$

Aplastamiento.

Se calcula el esfuerzo de aplastamientos tomando el factor de seguridad como 1.5.

$$\sigma_{ap} = \frac{207 \text{ MPa}}{1.5}$$

$$\sigma_{ap} = 138 \text{ MPa}$$

Se calcula la longitud con el valor de esfuerzo previamente obtenido.

$$L = \frac{4 * \frac{1.485}{0.0127}}{\frac{7 * 10^{-3}}{2} * 138 * 10^6}$$
$$L = 0.000968 \text{ m}$$

De las longitudes calculadas se toma como mínima el valor mayor de 0.00968 para que el eje no falle por aplastamiento.

Se requiere calcular también la longitud mínima de las chavetas adicionales que van a sostener los engranajes, por lo que se realiza el mismo proceso, pero utilizando la mitad del torque entregado por el motor. Se utilizan el mismo valor de esfuerzo cortante y de esfuerzo de aplastamiento obtenidos previamente. De esta forma se obtiene una longitud mínima de 0.000968 m.

3.2 Selección de elementos normalizados de la trituradora.

3.2.1 Motor.

Se hizo uso de los 60 RPM a los que va a funcionar el motor y la potencia calcula previamente. Al tener una potencia de 0.2 HP se eligió un motor con 0.6 HP aproximadamente, sin necesidad de colocarle un reductor ya que funciona de 60 RPM a 72 RPM.

Marca: CHANCS.

Velocidad: 60-72 RPM.

Material: imán.

Potencia: 500 vatios.

3.2.2 Chumaceras.

Se hace uso de una chumacera de pared de una pulgada que sirva de soporte para el eje y le permita rotar. Se seleccionó la chumacera ovalada de dos huecos UCFL 205-16, ver Figura A3.

3.2.3 Pasador cilíndrico.

Se colocaron pasadores cilíndricos que mantendrán fijas las cuchillas y los separadores en el eje. Se uso pasadores DIN 6325 de diámetro 5 mm. Ver Figura A1.

3.2.4 Perfiles de acero

Para la estructura de la trituradora se colocaron perfiles de acero ASTM A36 1 x 1 x 49/1000 con el fin de disminuir la vibración de la caja, las especificaciones se encuentran en la Figura A5. También se usan para poder colocar las chumaceras, las paredes de las cajas y sostener el eje. Los ángulos colocados son usados para sujetar el motor son ASTM A36 L1 x1 x 1/8, ver Figura A2.

3.2.5 Plancha de acero negro.

Se eligen planchas de acero negro para las tapas de la caja y la base donde se colocará la caja de filtrado. Usando acero negro A36 liso de 2 mm, ver Figura A4.

3.3 Simulaciones y validaciones de los elementos de trituración.

3.3.1 Simulación de la cuchilla.

Se coloca la fuerza de corte en la punta de la cuchilla y se fija el centro que rota con el eje para realizar la simulación. Como se puede observar en la Figura 3. la mayor concentración de esfuerzos se da en la punta donde se colocó la fuerza.

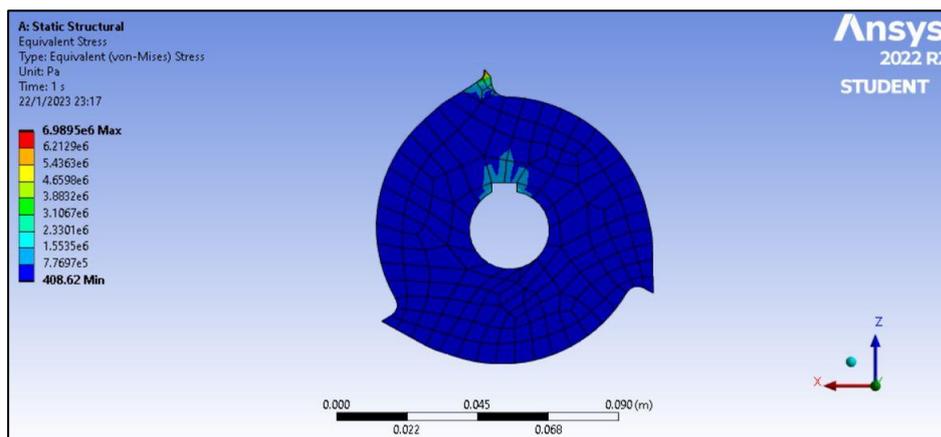


Figura 3.4 Esfuerzo de Von-Mises. Elaboración propia.

Al colocar la fuerza en la punta se asume como la situación más crítica posible como se observa en la Figura 3.. En una situación real la fuerza normalmente se distribuirá en una mayor área alrededor de la punta presentando menor deformación.

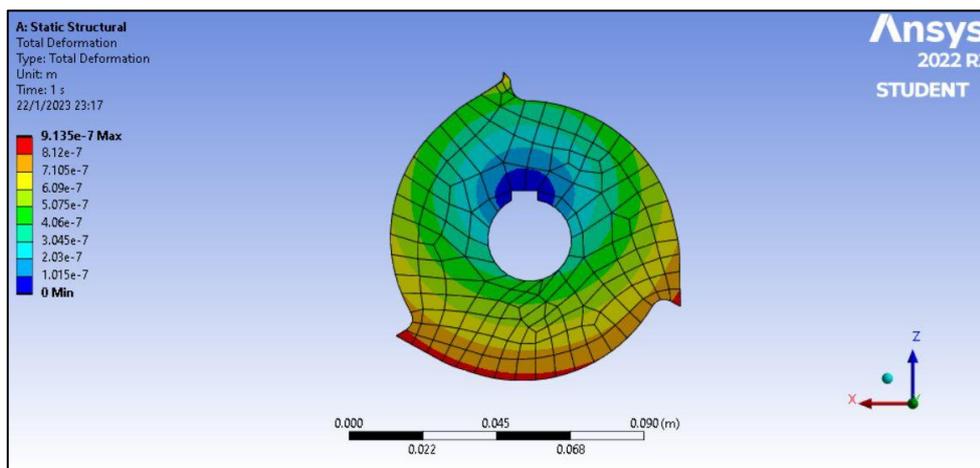


Figura 3.5 Deformación de la cuchilla. Elaboración propia.

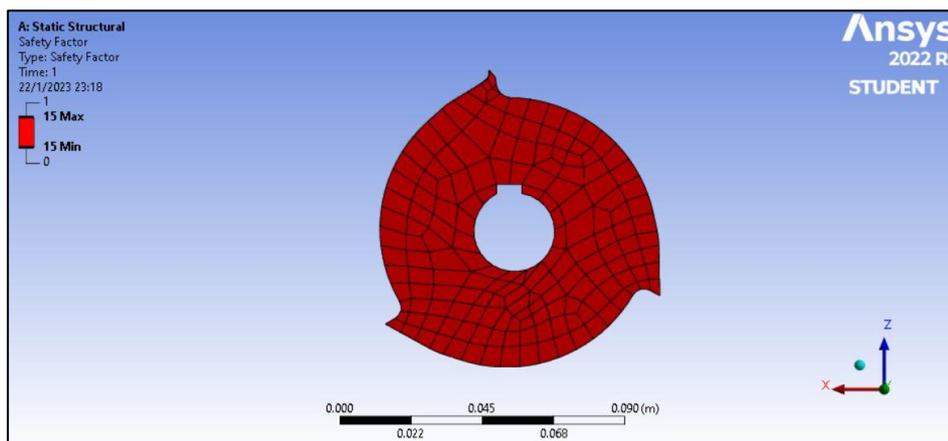


Figura 3.6 Factor de seguridad. Elaboración propia.

Se obtiene un factor de seguridad elevado mostrado en la Figura 3 debido al diámetro dimensionado para la cuchilla. Este fue elegido considerando el requerimiento de una mayor distancia entre los ejes para poder sujetarlos con las chumaceras debido al tamaño del equipo.

3.3.2 Simulación del eje de transmisión.

Para la simulación del eje de transmisión se colocaron las cargas que producen las cuchillas, los separadores y las chumaceras. Se puede observar en la Figura 3 que se tiene una deformación pequeña aún cuando se colocó el caso extremo de que 4 cuchillas estén cortando a la vez.

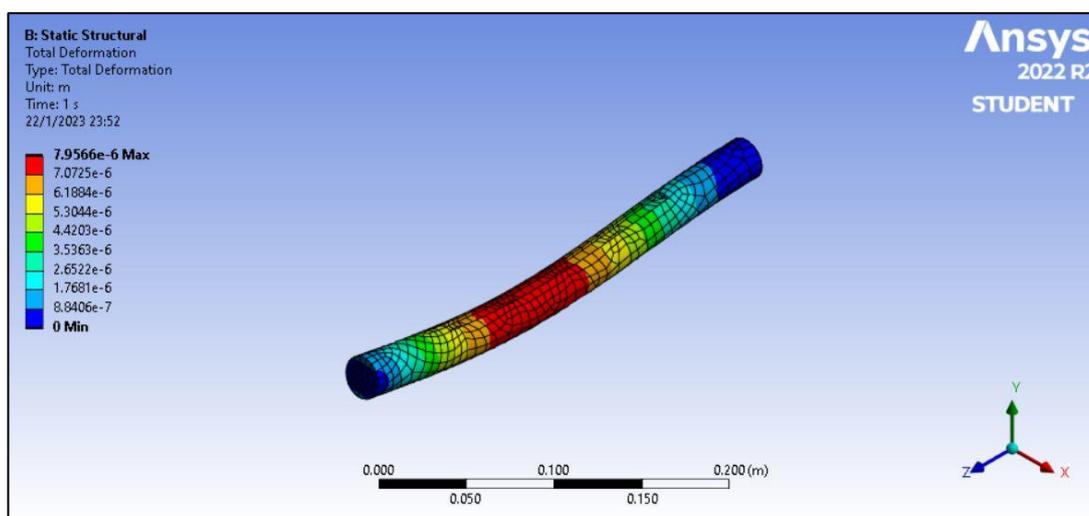


Figura 3.7 Deformación del eje. Elaboración propia.

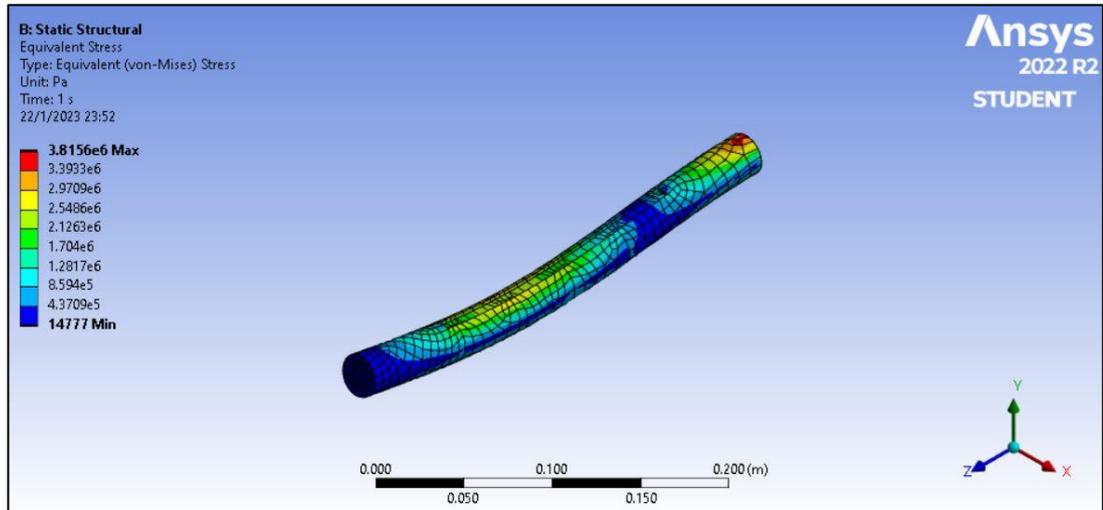


Figura 3.8 Esfuerzo de Von mises. Elaboración propia.

3.3.3 Simulación de la estructura.

Se realizó la simulación de la estructura de acero con el programa ANSYS aplicando el peso total del eje con las cuchillas y los separadores, además se colocó el peso del motor en el apoyo para el mismo.

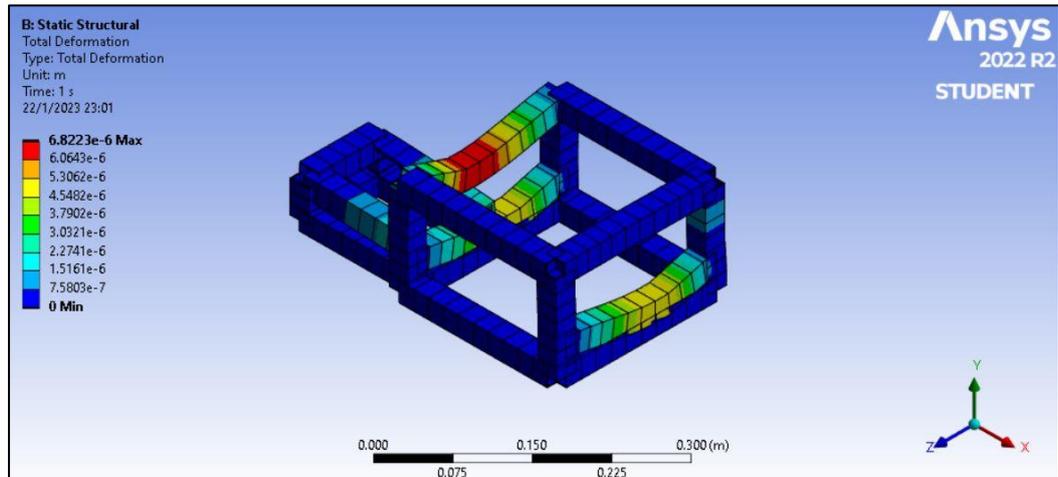


Figura 3.9 Deformación del perfil. Elaboración propia.

Con los valores obtenidos de esfuerzo máximo que se encuentran en Figura 3 y mínimo en la Figura 3. se calcula el factor de seguridad con la fórmula (3.7) para los perfiles de acero usando el esfuerzo de fluencia del acero A36 (250 MPa).

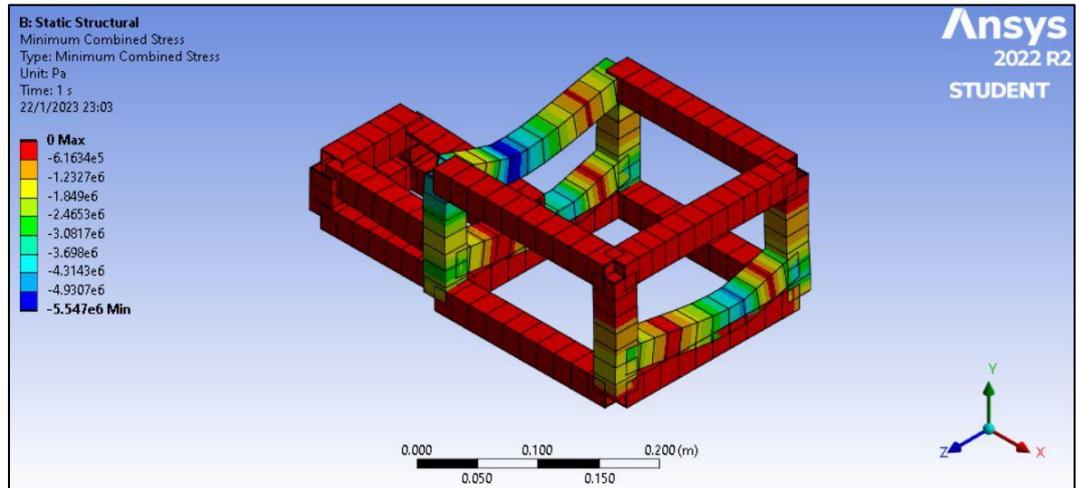


Figura 3.10 Esfuerzo mínimo. Elaboración propia.

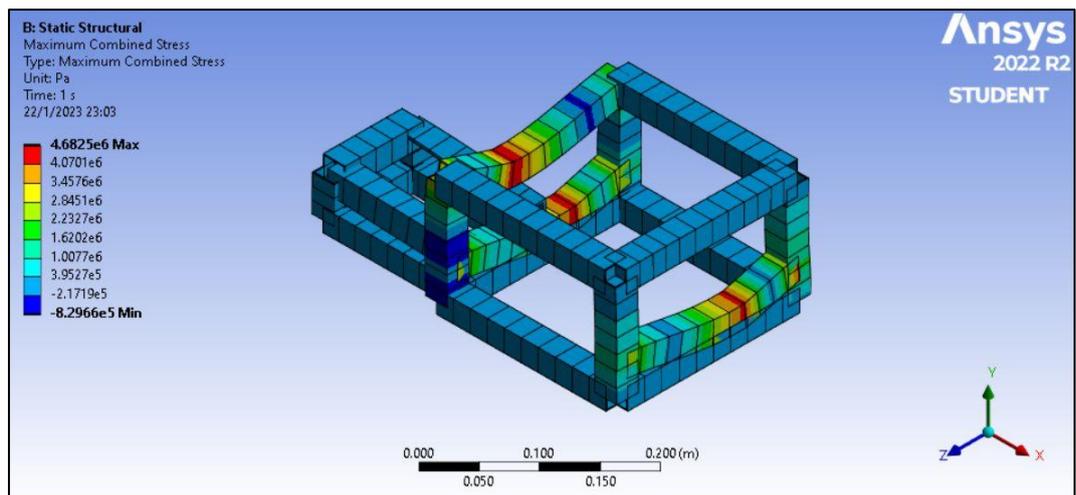


Figura 3.11 Esfuerzo máximo. Elaboración propia.

Esfuerzo máximo.

$$N = \frac{S_y}{\sigma_M} \quad (3.7)$$

$$N = \frac{250 \text{ MPa}}{8.2966 * 10^5}$$

$$N = 301.32$$

Esfuerzo mínimo.

$$N = \frac{S_y}{\sigma_M} \quad (3.8)$$

$$N = \frac{250}{5.547 * 10^6}$$

$$N = 45.07$$

Una vez obtenidos los dos valores elegimos el menor factor de seguridad obtenido. Como se puede observar es un valor de 45.07 el cual es alto debido a que la estructura no está soportando mucha carga.

3.4 Cálculos del sistema de extrusión.

3.4.1 Cálculos de diseño del Husillo.

Velocidad de trabajo del husillo

Para la determinación de la velocidad de trabajo del husillo se usó el flujo másico propuesto en los requerimientos del proyecto. A partir de la ecuación (2.21) se expande el término V_z aplicando la ecuación (3.9)

$$\frac{1Kg/2h}{1.24Kg/L} = \pi * D * N * Tan(\varphi) * W \quad (3.9)$$

$$* h$$

$$0.403 \frac{L}{h} = \pi * 1in * N * Tan(25) * 0.1in * 0.3in$$

$$0.403 \frac{L}{h} = 0.0439in^3 * N$$

$$0.00683 \frac{in^3}{s} = 0.0439in^3 * N$$

$$0.15558 \frac{rev}{s} = N = 9 \text{ rpm}$$

$$V_z = \pi * 1 i * Tan(25) * 0.15 = 0.2279 \text{ in/s}$$

Velocidad de extrusión del fluido.

Para la velocidad con la que el fluido es extruido se hace uso de la ecuación (2.22), en conjunto al flujo volumétrico resultante de $0.00683 \frac{in^3}{s}$ y el área transversal de la boquilla seleccionada, una MK8 1.75 mm.

$$0.00683 \frac{in^3}{s} = V_{fluido} * \pi \left(\frac{1.75mm}{2} \right)^2$$

$$V_{fluido} = \frac{0.00683 \frac{in^3}{s}}{\pi \left(\frac{1.75 \text{ mm}}{2} * \frac{0.0393 \text{ in}}{1 \text{ mm}} \right)^2}$$

$$V_{fluido} = 1.8319 \text{ in/s}$$

Se recalca que el cálculo considera que durante las 2 horas se está extruyendo a la misma velocidad sin considerar cambios, es decir, la situación más ideal a la que se aproxima.

Viscosidad.

A partir de la ecuación (2.23) se obtiene primero la razón de cortante del polímero. Correspondiendo a una viscosidad aproximada de 1 kPa s para una temperatura de 200 °C.

$$\dot{\gamma} = \frac{4(223.89 \text{ mm}^3/\text{s})}{\pi * (1.75/2 \text{ mm})^3}$$

$$\dot{\gamma} = 425.52 \text{ s}^{-1} = \frac{67.72 \text{ rad}}{\text{s}}$$

Presión de extrusión.

Se considera la ecuación (2.24) referente a la presión de extrusión para posteriormente obtener potencia necesaria por el tornillo.

$$\Delta P = \frac{6 * \pi * 1 * 25 * 0.15558 * 1 \text{ [kPA]}}{0.3^2 * \tan 25}$$

$$\Delta P = 1684.291 \text{ kPa} = 243.85 \text{ psi}$$

Fuerza de extrusión.

La fuerza que aplica el eje para extruir resulta a partir de la ecuación (2.25), donde se utiliza la presión obtenida anteriormente y las características definidas anteriormente de longitud y diámetro.

$$F_R = \pi \left(\frac{1 \text{ in}}{2} \right)^2 (243.85 \text{ psi}) = 191.51 \text{ lbf}$$

Potencia para extrusión de polímero.

Teniendo en cuenta que los factores para tratar el PLA, se toma la temperatura de alimentación igual a la temperatura ambiente (25°C) y la temperatura final de extrusión (200 °C) se visualiza en la Tabla 1.1, propiedades del polímero. Entre las propiedades térmicas del PLA, este tiene un calor específico de 2060 [J/kg°C] según [30].

La entalpía de fusión del 100% cristalino PLA es de aproximadamente 93,6 J/g, se aclara en el trabajo [31]. En cuanto al caudal másico se definió como 0.4 [kg/h].

$$\begin{aligned}
 \text{Potencia} &= 0.4 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 2060 \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * (200 - 25)^\circ\text{C} + 0.4 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 93,6 \frac{\text{J}}{\text{g}} \\
 \text{Potencia} &= 0.4 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \left(2060 \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * 175^\circ\text{C} + 93,6 \frac{\text{J}}{\text{g}} * \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \right) \\
 \text{Potencia} &= \frac{181640 \frac{\text{J}}{\text{h}} * \frac{1 \text{ kJ}}{1000 \text{ J}}}{3600} = 0.0504 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

3.4.2 Cálculos del cilindro.

Holgura del cilindro y husillo.

$$\delta = 0.003 * 1 \text{ in} = 0.003 \text{ in}$$

Diámetro interno del cilindro

$$D_i = 1 \text{ in} + 2 * 0.003 \text{ in} = 1.006 \text{ in}$$

Debido a que se decidió usar un cilindro disponible comercialmente para reducir los costos se itero la ecuación (2.18) para reducir ligeramente el diámetro del husillo a un menor diámetro que quepa dentro del cilindro de una pulgada.

$$D_H = 0.994 \text{ in}$$

$$D_i = 1 \text{ in}$$

Espesor de la pared del cilindro.

Para el espesor de la pared del cilindro se toma en consideración el esfuerzo de fluencia 235 MPa del material AISI 304 y se utiliza la ecuación siendo el

$$e = 0.01 \left(\sqrt{\frac{2 * 1.6812 \text{ Mpa}}{235 \text{ Mpa} - 2 * 1.6812 \text{ Mpa}}} \right) = 0.00129 \text{ m} \approx 2 \text{ mm}$$

Se utilizaron las medidas dimensionadas para diseñar el cilindro de la extrusora.

3.4.3 Cálculos de motor para extrusora.

Potencia requerida para el motor.

En la potencia requerida participa la fuerza de reacción del fluido contra el empuje obtenida anteriormente.

$$Power = 191.51 \text{ lbf} * \frac{0.2279 \text{ in}}{s} = 3.64 \text{ lbf ft} \approx 5 \text{ [W]}$$

3.4.4 Diseño de sistema de transmisión de cadena y Catarina.

El motor escogido es capaz de ser operado directamente a la velocidad requerida, aunque no resulta conveniente según la curva de la Figura B2, debido a que este punto no ofrece la mayor salida de potencia posible.

Reducción de RPM.

Para la reducción de revoluciones por minuto entregadas por el motor, se planificó el uso de un sistema de transmisión de potencia, además de su necesidad dado que la carga axial sobre el tornillo supera la carga soportada por el eje del motor. La reducción usada es calculada a partir de la ecuación (2.29) y se obtuvo una reducción de 2.22:1.

Haciendo uso de la ecuación anterior y las catarinas de preferencia dentro de la norma ANSI, se escogen las que corresponden a 19 dientes y de 40 dientes con un paso de 9.53 mm. A pesar de ser posible obtener la misma relación con elementos más pequeños, se opta por las mencionadas para minimizar las fluctuaciones en velocidad de extrusión debido a su efecto en la calidad del filamento.

Velocidad de cadena.

Utilizando la ecuación (2.30), con la ayuda de la velocidad de rotación del tornillo y el paso de la Catarina, se obtiene como resultado una velocidad de 0.06 m/s y una corrección de velocidad de 1.

$$V_{cadena} = 40 * 9.53 \text{ mm} * 0.15558 \frac{rev}{s} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} = 0.0593 \text{ m/s}$$

Potencia de diseño de la cadena.

$$P_D = 5 * 1 * 1$$

La potencia de diseño para la cadena resulta ser 5 [W], considerando que la potencia requerida de diseño es 5 [W] y al ser la velocidad de la cadena baja, los factores de corrección de la fórmula son equivalentes a 1.

Potencia nominal de la cadena.

Debe considerarse que a partir de la Tabla 2.13, se extrapolaron de los datos a velocidad de 50 RPM y 100 RPM para estimar la potencia nominal a 20 RPM. Con ello se obtiene una potencia nominal de 56 [W], confirmando su eficiencia para la transmisión de potencia deseada, con un amplio margen de diseño, es decir, un factor de seguridad de 10.

Longitud de cadena.

Usando 40.104 pasos como la distancia entre centros (C) y el parámetro K de la Tabla 2.14, que resulta en el valor 11.17. Así se obtiene una longitud de 110 pasos equivalente a 1.05 m.

$$L = \frac{40 + 19}{2} + 2(40.104) + \frac{11.17}{40.104} = 109.986 \approx 110 \text{ pasos}$$

3.4.5 Cálculos del sistema de calentamiento.

Resistencias de calentadores.

Para obtener la resistencia que se va a aplicar a los calentadores se necesita de la potencia de extrusión del polímero como del voltaje de la fuente a utilizar.

$$0.0504 \text{ kW} = \frac{24 \text{ V}^2}{R}$$

$$R = \frac{24 V^2}{0.0504 \text{ kW} * \frac{1000 W}{1 kW}} = 11.429 \Omega$$

3.4.6 Diseño de sistema de control.

Se logro sintonizar el controlador del sistema usando las constantes y dimensiones del sistema que se especificaron previamente, se usó la metodología y modelo detallados en el capítulo 2 para obtener las constantes de PI que se muestran en la Tabla 3.1

Tabla 3.1 Constantes del controlador PI

Proporcional (P)	0.3519
Integral (I)	0.0027

Adicionalmente se realizó una simulación del calentamiento que se muestra en la Figura 3. la cabe recalcar que la simulación realizada se realizó a una temperatura ambiente de 20 °C con un punto de ajuste de 220 °C y se obtuvo un tiempo de respuesta aproximadamente a 90 segundos.

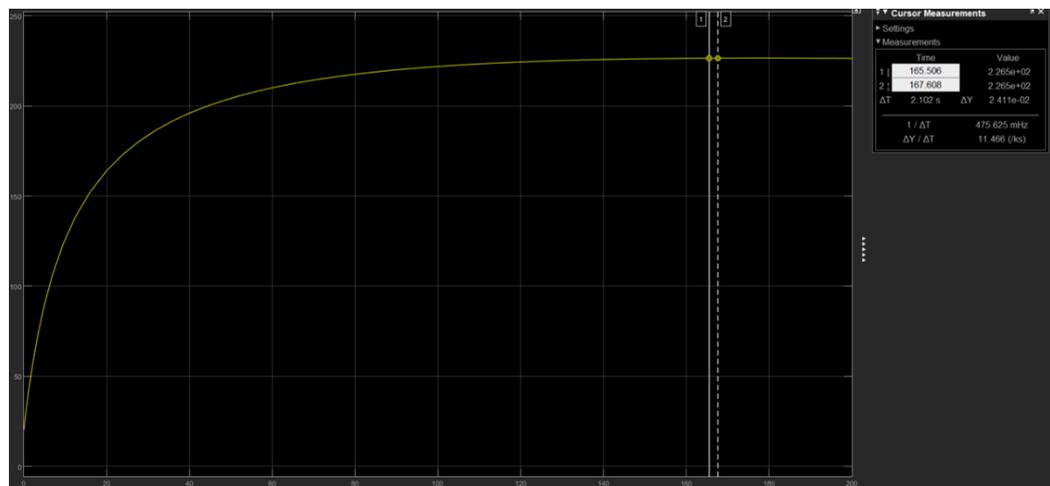


Figura 3.12 Respuesta al escalón unitario

3.4.7 Diseño de sistema eléctrico

Se implementó un sistema electrónico el cual está compuesto principalmente por un circuito de control y un circuito de potencia. Los

miembros del circuito de control consisten en un microcontrolador “Arduino Nano”, una pantalla LCD 16x4 para que el usuario visualice el menú y el estado de los sensores, 4 botones para que el usuario puede realizar las respectivas selecciones y tres termistores que sirven como transductores de temperatura.

Por otro lado, los miembros del circuito de potencia incluyen a un puente H para el accionamiento del motor de pasos y 3 MOSFET de potencia en conjunto de 3 resistencias que representan los calentadores. El menú principal se muestra en la Figura 3 y el menú con el monitoreo de los sensores se muestre en la Figura 3.

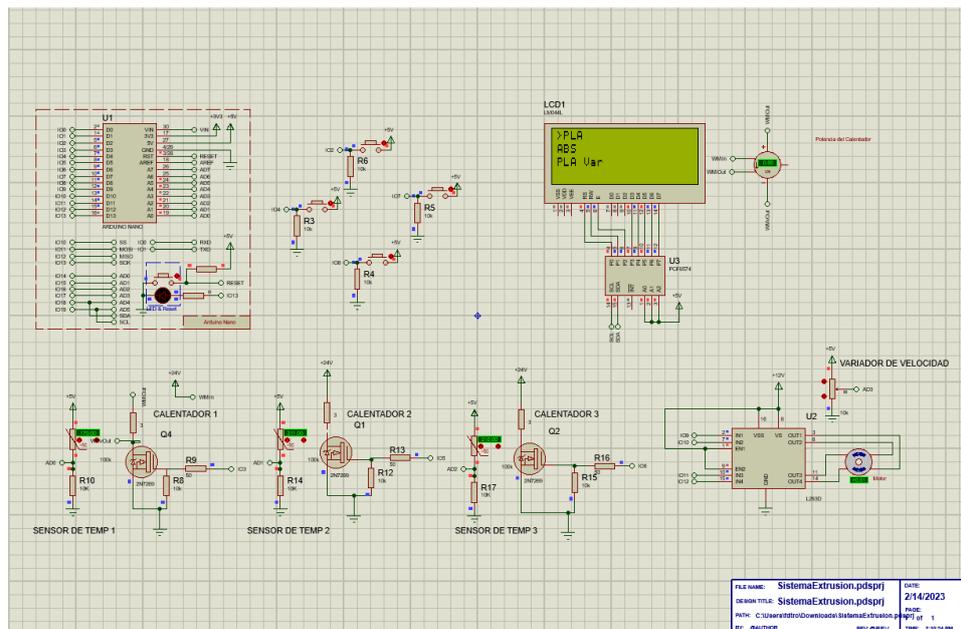


Figura 3.13 Menú principal del circuito eléctrico

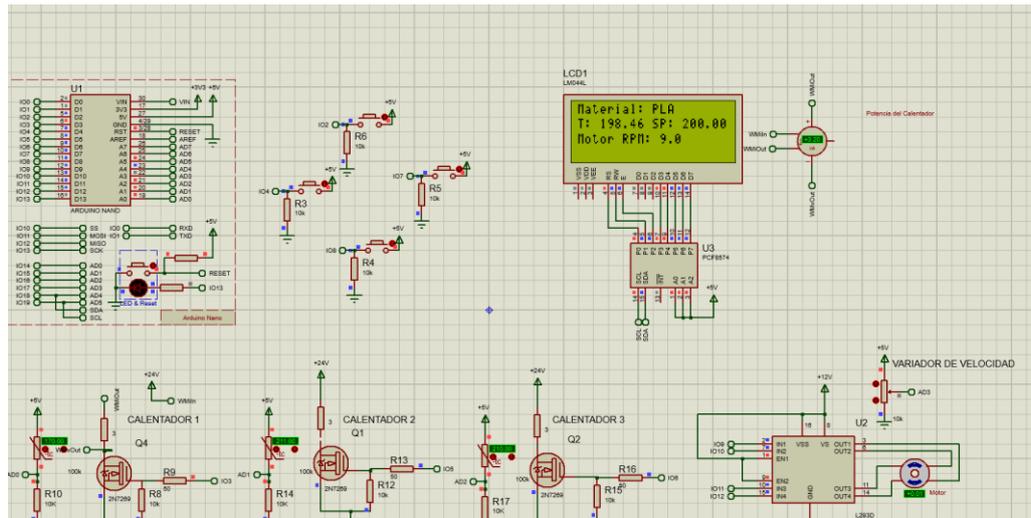


Figura 3.14 Menú de sensores

3.5 Selección de elementos normalizados de la extrusora.

3.5.1 Selección de motor.

El motor de pasos seleccionado es el NEMA 23HS22-2804S-PG15, cuenta con una caja reductora de bajo costo y una potencia nominal de 15 [W]. Sus características se visualizan en la Tabla A1 y la curva de torque vs velocidad se enuncia en la Figura A12. Su facilidad en control de velocidad puede usarse en lazo abierto fue una fortaleza más en su selección.

3.5.2 Selección de Catarinas.

Para la Catarina de diámetro mayor se selecciona el elemento “PHS 35-1B40” del proveedor SKF cuyas características se aprecian en Figura A8, mientras que para la Catarina del motor se escoge el elemento “PHS 35-1AH19” que se detalla en la Figura A9.

3.5.3 Selección de cadena.

Finalmente, se selecciona la cadena PHC 35-1X10FT, cuyas características se encuentran en la [Figura A19](#), puesto que tiene la menor longitud disponible que cumple con la requerida.

3.5.4 Selección de rodamientos para el tornillo.

Utilizando la calculadora SKF parámetros de entrada en la calculadora, se calcula con un diámetro min de eje de 0.7 in y uno máximo de 0.9 in, además de las fuerzas axiales calculadas previamente para el tornillo de potencia. Adicionalmente, debido a la baja potencia del motor, se estima las fuerzas radiales como 0.1 de las axiales y así se selecciona el rodamiento 62/22 cuyos factores de rendimiento están descritos por la Figura A11.

3.6 Simulaciones y validaciones de los elementos de la extrusora.

3.6.1 Tolva.

Se realizó una simulación de estudio de estrés del componente tolva con la finalidad de realizar un análisis de desplazamiento y el esfuerzo de Von Mises considerando que se trabaja con el material Acero ASTM A36. El estudio evalúa la deformación de las paredes de la tolva cuando se encuentra ocupada a su máxima capacidad. Los resultados de la simulación de desplazamiento y esfuerzo se muestran en la Figura 3 y la Figura 3 respectivamente.

Se realiza el análisis de la presión aplicada contral las paredes de la tolva considerando la forma de pirámide truncada que presenta en la parte superior aplicando un factor de distribución.

$$\begin{aligned} \text{Factor}_{\text{distribución}} &= \rho * g * h \\ \text{Factor}_{\text{distribución}} &= 1.24 \frac{g}{\text{cm}^3} * \frac{1000000 \text{ cm}^3}{1 \text{ m}^3} * 0.180\text{m} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * \frac{\pi}{4} \\ \text{Factor}_{\text{distribución}} &= 1719701.53 \frac{1 \text{ kg}}{\text{ms}^2} * \frac{1}{1000 \text{ kg}} \\ \text{Factor}_{\text{distribución}} &= 1719.701 \frac{\text{kg}}{\text{ms}^2} \end{aligned}$$

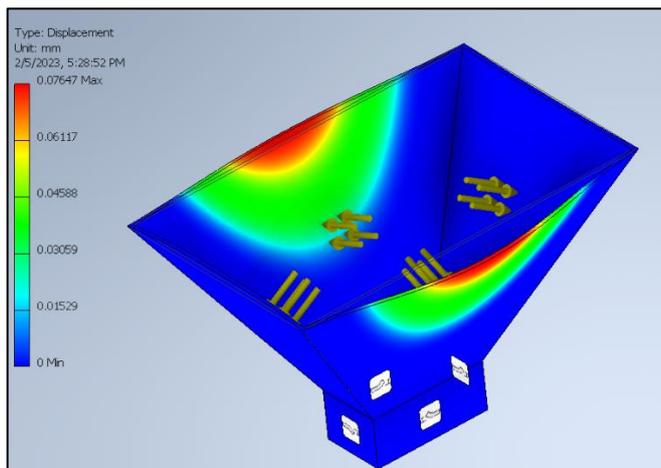


Figura 3.15 Análisis de desplazamiento de la tolva.

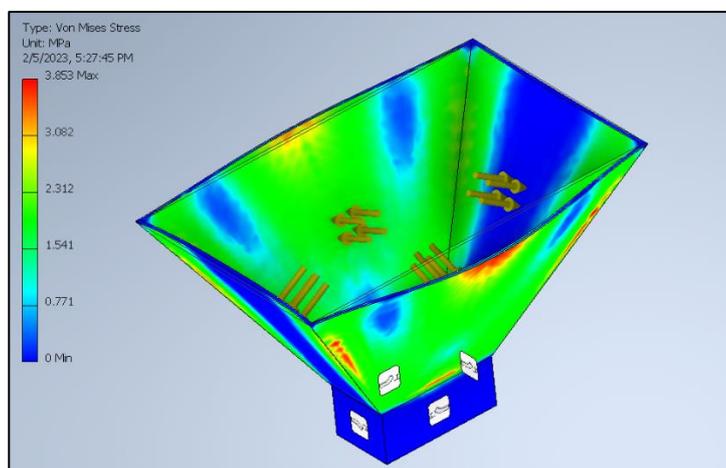


Figura 3.16 Análisis de esfuerzo de Von Misses de la tolva.

3.6.2 Husillo.

Se diseñó un husillo en inventor 2021 como el que se muestra en su vista lateral e isométrico de la Figura 3 y Figura 3.

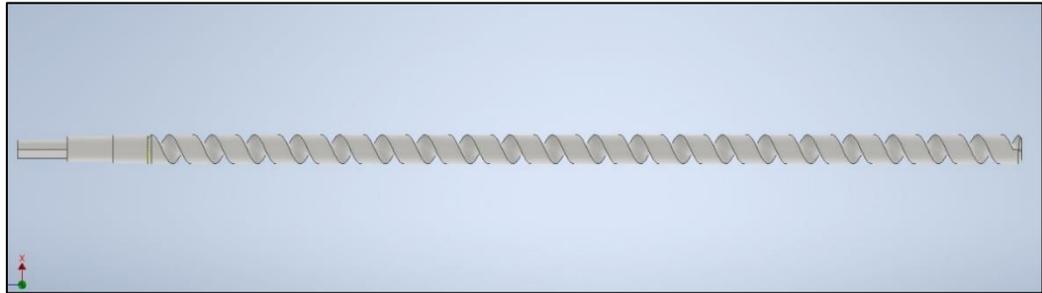


Figura 3.17 Diseño CAD del husillo, vista lateral.

En la vista lateral se puede apreciar niveles escalonados en la base del husillo, estos diámetros se eligieron en función del diámetro del rodamiento axial y del diámetro de la Catarina.

A partir del diseño CAD creado se realizó un estudio estático considerando la fuerza axial y el torque, del cual se obtuvo un factor de seguridad de 10.64, como se evidencia en la Figura 3. Lo cual significa que el modelo del eje es válido y es capaz de transmitir la potencia necesaria para extruir el plástico.

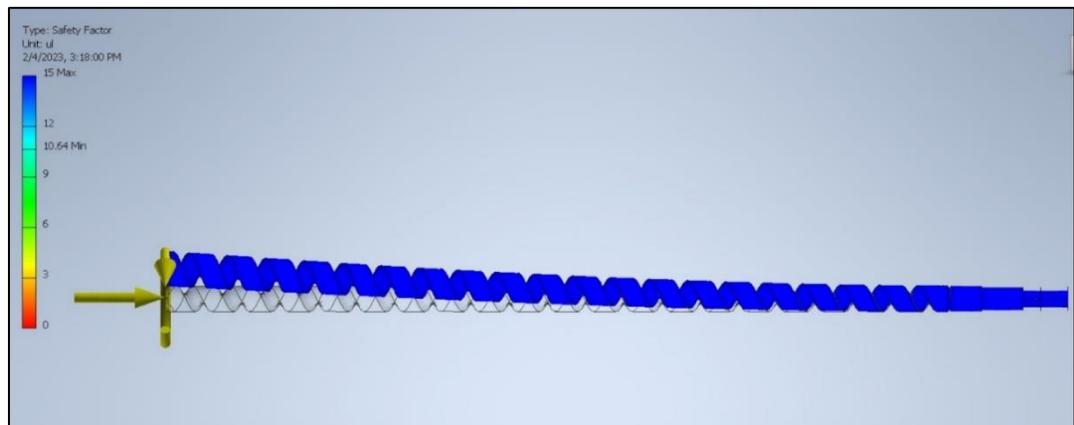


Figura 3.18 Análisis estático del husillo aplicando cargas.

3.6.3 Cilindro del husillo.

El análisis del factor de seguridad del cilindro que contiene al husillo se realizó considerando la presión de extrusión obtenida en la sección de cálculos. Esa presión es la aplicada cuando el fluido se encuentra en

movimiento por la rotación del husillo y que se ejerce sobre las paredes internas del cilindro.

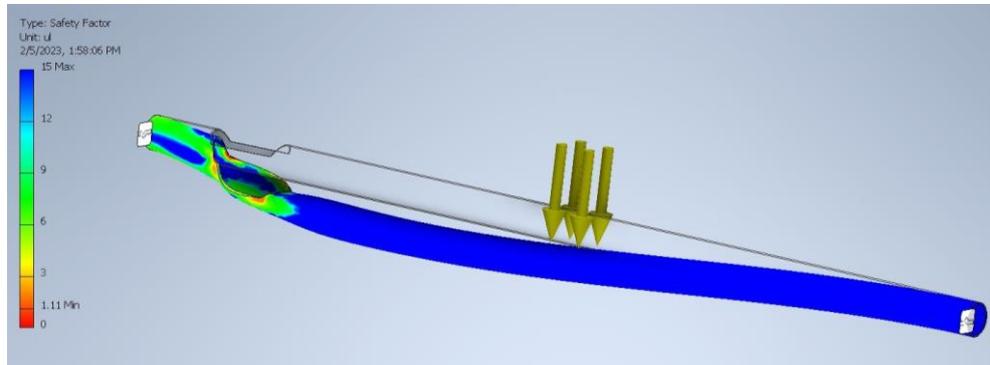


Figura 3.19 Análisis de esfuerzo de Factor de Seguridad del cilindro del husillo.

Debido a las limitaciones del software se recalca que el análisis aplicado no refleja en su totalidad el escenario real debido a que el orificio de entrada de pellets se traduce a pérdida de superficie y simula un desplazamiento hacia abajo (Figura 3), mientras que en la Figura 3 se evidencia la expansión del cilindro por la presión interna del fluido. El cilindro tiene un factor de seguridad de 15 tal como se observa, en la Figura 3.

El cilindro en su extremo izquierdo acarrea también con el peso de la tolva y los pellets del polímero.

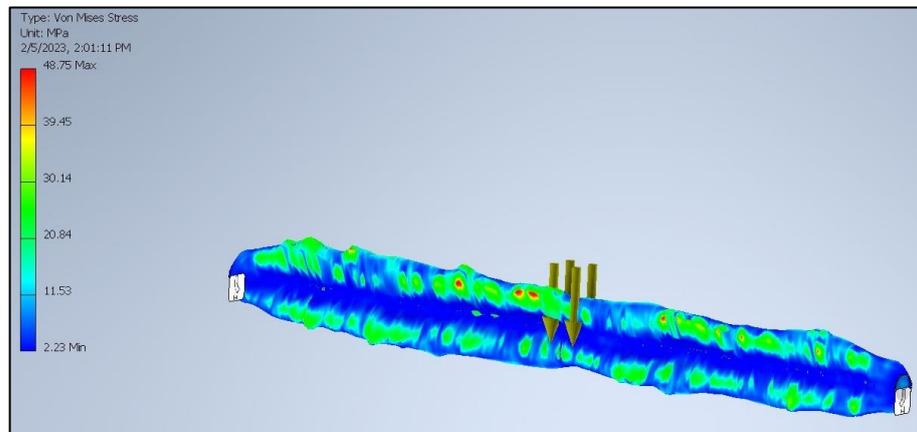


Figura 3.20 Análisis de esfuerzos del cilindro del husillo.

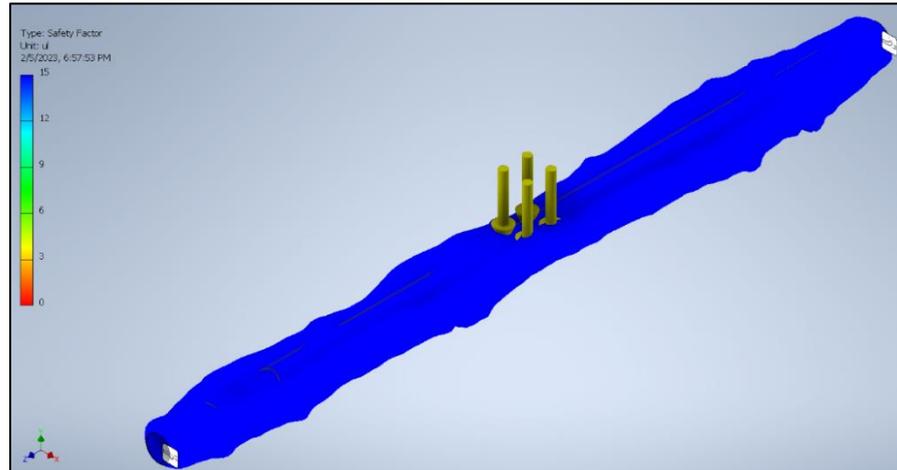


Figura 3.21 Factor de seguridad del cilindro del husillo.

3.6.4 Sistema total.

El análisis de la estructura de montaje se puede resumir en la Figura 3 y la Figura 3, siendo que la primera representa el máximo desplazamiento que sufre el marco debido al peso de los componentes que es aproximadamente 0.09073 mm. La segunda figura demuestra un factor de seguridad alto, concordante con el mínimo desplazamiento que se analizar en los diferentes componentes.

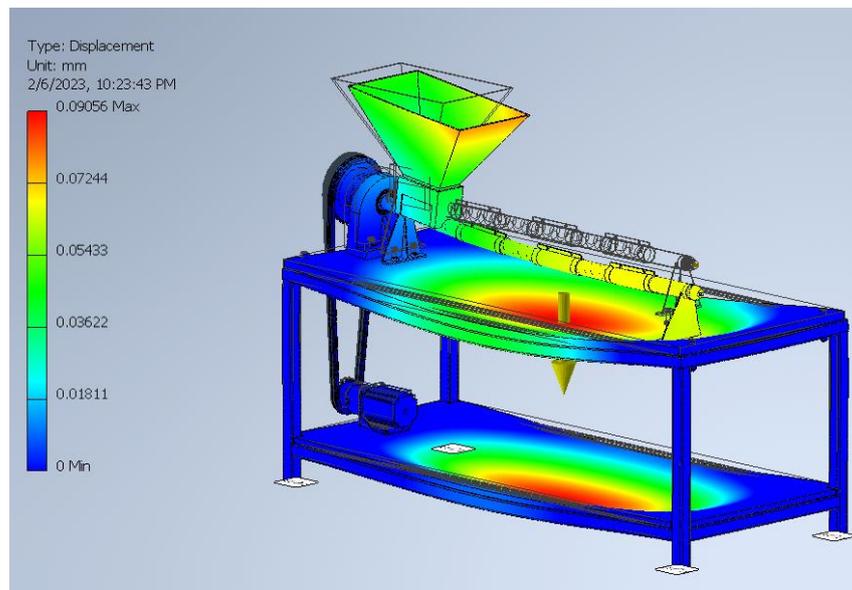


Figura 3.22 Análisis de desplazamiento de la estructura de la estructura

Los soportes del cilindro que se encuentran en los extremos y evitan el movimiento libre del mismo, tienen un máximo de desplazamiento de

0.069 mm y a la par tiene un factor de seguridad muy alto, se debe a que no soportan esfuerzos grandes.

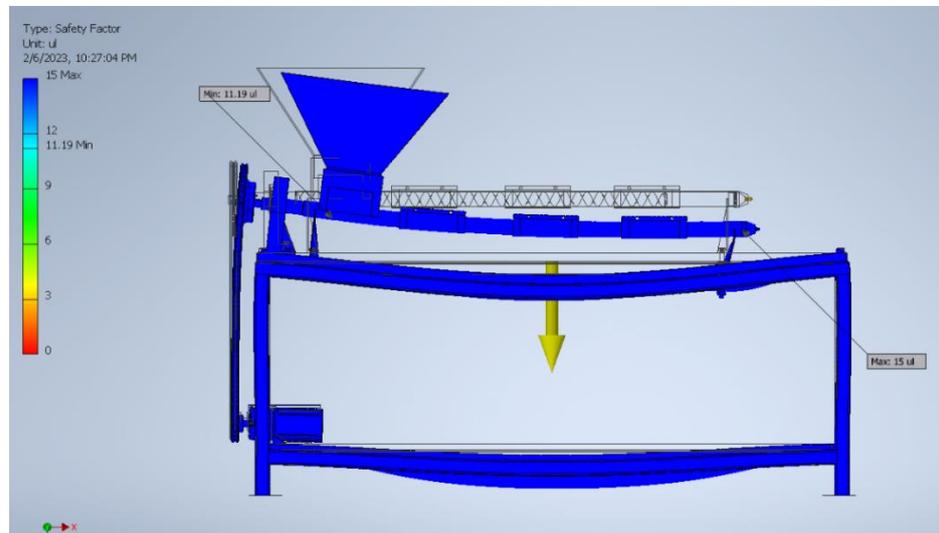


Figura 3.23 Análisis de factor de seguridad de la estructura.

El factor de seguridad mínimo es 11.19 y el máximo 15, tal como se ve en la Figura 3.

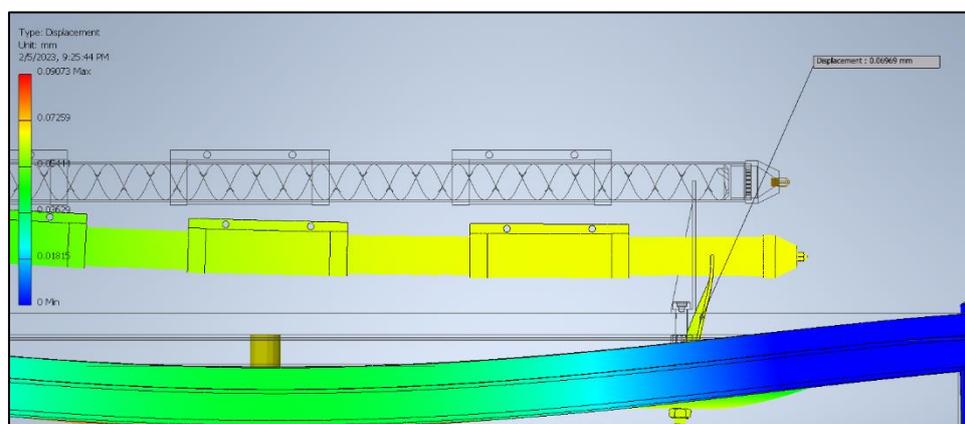


Figura 3.24 Análisis de desplazamiento del soporte del cilindro.

3.7 Análisis de costos.

En esta sección del documento se desglosarán los costos a cubrir necesarios para la construcción de ambos sistemas.

3.7.1 Costos de materiales de construcción del sistema de trituración.

Al ser un proyecto para los laboratorios de ESPOL se puede utilizar para la construcción de la máquina material reciclable que ya se encuentre en la institución disminuyendo así los costos. Además, al ser compacta y pequeña el triturador material sobrante de las planchas se puede utilizar en futuros proyectos.

Tabla 3.2 Cotización de materiales para la trituradora

Material	Cantidad	Valor unitario [\$]	Valor total [\$]
Plancha acero negro ASTM A36 lisa (1220x2440) 2mm	1	51.22	51.22
Plancha acero negro ASTM A36 lisa (1220x2440) 12 mm	1	362.39	362.39
Tubo cuadrado de acero (1x1x49/1000)	1	11.81	11.81
Ángulo de acero ASTM A36 (L1x1x1/8)	1	58.16	58.16
Chumacera KDF de pared dos huecos (UCFL 205-16)	4	5	20
Eje cilíndrico de acero SAE 1020 (1 in)	1	89.46	89.46
Eje cilíndrico de transmisión 2"x80	1	28.25	28.25
Pernos M4x20	4	0.05	0.20
Pernos M5x20	4	0.08	0.32
Tuercas M4x0.7	4	0.02	0.08
Tuercas M5x0.8	4	0.02	0.08
Tuercas M16x2	8	0.39	3.12
Remaches 5x8	58	0.06	3.48

Material	Cantidad	Valor unitario [\$]	Valor total [\$]
Chaveta DIN 6885-A 8X7X32	2	1.07	2.14
Chaveta DIN 6885-B 8X7X90	4	2.68	10.72
Motor 60 RPM (1/4 HP) y soporte	1	36.90	36.90
Acople del motor 44x45 (6-25)	1	30.33	30.33
Prisionero M6x8	4	0.13	0.52
Prisionero M3x10	1	0.16	0.16
Pasadores 5x40	4	0.43	1.72
Barras roscadas M16	1	28.90	28.90

3.7.2 Costos de materiales de construcción del sistema de extrusión

Tabla 3.3 Cotización de materiales para la extrusora

Material	Cantidad	Valor unitario [\$]	Valor total [\$]
Tubo rectangular de acero (25x25x2 mm) Acero negro	1	0	0
Rodamiento SFK 62/22	1	11.69	11.69
Eje cilindrico de acero (25.4 mm)	1	0	0
Tubo cilindrico D:25.4mm-E:2mm	1	21.95	21.95
Pernos M8x50 ISO4762	4	0,24	0,96
Pernos M8x30 DIN6912	4	0,20	0,80
Pernos M8x40 DIN6912	2	0,21	0,42

Tuercas M8 ISO4033	4	0,06	0,12
Tuercas M8 DIN EN 24032	6	0,06	0,36
Motor NEMA 23HS22-2804S- PG15, planetary gearbox 15.3:1	1	56.99	56.99
Soporte Motor NEMA	1	1.96	1.96
Resistencias abrazaderas	3	1	3
Plancha madera	1	35	35
Bloque Nylon	1	5.30	5.30
Prisionero M3x10	2	\$0.16	0.32
Cadena	1	16	16
Catarina	1	149.96	149.96
Catarina	1	185	185
Termistores NTC 100K	3	4	12
Arduino	1	8	8
Material electrico		28.6	28.6
Aislante termico de fibra de ceramica	1	28	28

3.7.3 Costos totales

Los costos totales contemplaran también la mano de obra necesaria para la manufactura de ciertas piezas, soldadura de perfiles de acero y para la construcción de los sistemas finales.

Tabla 3.4 Costos totales

Descripción	Costos [\$]
Materiales para el sistema de trituración	738.67

Materiales para el sistema de extrusión	566.43
Mano de obra para mecanizado de piezas y soldadura	1500
Total	2805

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El diseño de un sistema que permita el reciclaje de filamento de impresión 3D no solo aporta al desarrollo sostenible si no también al desarrollo tecnológico de la Escuela Superior Politécnica del Litoral. Se planteo el diseño de dos sistemas separados para llevar a cabo el reciclaje, el sistema de triturado y el sistema de extrusión. Se dimensionaron ambos sistemas a las necesidades de los laboratorios de la institución por lo que son compactos y versátiles.

Una fortaleza importante es que brinda mayor visibilidad y accesibilidad a proyectos de manufactura aditiva, ya que muchas veces se evitan implementar estos proyectos que llevan mucha prueba y error debido al desperdicio de material que se generan. Entre las debilidades del proyecto se tiene primero la cantidad de dinero que se requiere invertir, ya que en un inicio la cantidad de ahorro monetario al reciclar el filamento no será significativo. Otra desventaja seria que en cada proceso de reciclaje las propiedades del material se van deteriorando por lo que el material se vuelve más frágil y débil.

4.1 Conclusiones

- El diseño de la trituradora tiene como objetivo entregar *pellets* con un diámetro establecido de 4 mm para luego pasar al proceso de extrusión. Como solución se realizó un sistema de dos ejes de 1" de diámetro con cuchillas de garra de 3 mandíbulas que funciona a 60 rpm. Los desechos ya triturados pasan por una caja de filtrado, lo que permite la clasificación de piezas que requieran un ciclo adicional de triturado de aquellas que cumplen con el diámetro requerido para la extrusora.
- Al realizar el análisis y la simulación de elementos finitos se obtuvieron factores de seguridad altos valorados en 15 y deformaciones pequeñas en los distintos elementos aun cuando se tomaron las situaciones más críticas al momento de colocar las cargas. Esto sucedió debido a las especificaciones de tamaño de la

máquina, al ser pequeña y compacta esta requiere de un mayor diámetro de cuchillas para así tener el espacio mínimo entre ambos ejes. Además, las cargas aplicadas sobre las piezas como ejes, cuchillas y estructura son muy pequeñas debido al material triturado, sea PLA como ABS.

- A través del diseño del extrusor se tuvieron varios parámetros que se pueden variar y de igual forma obtener un diseño funcional como extrusor de filamento, algunos de estos parámetros incluyeron el diámetro del husillo, el ángulo de avance y la velocidad de extrusión por lo cual es posible concluir que en el diseño de una extrusora de filamento funcional existe más de un posible diseño y para poder optimizar estos parámetros se debe de tener más restricciones como por ejemplo los componentes o materiales con disponibilidad y de fácil adquisición.
- Adicionalmente durante el proceso de diseño se estableció como objetivo la creación de un diámetro constante de 1.75 mm el cual es el más común en las impresoras 3D comerciales. Este diámetro objetivo se usó en el cálculo de velocidad, así como en la dimensión del diámetro del extrusor, sin embargo, en estos cálculos se asumió que el elemento embobinador trabajará a la misma velocidad del husillo, por lo cual es evidente concluir que el diseño creado funciona correctamente solo cuando existe total sincronía entre la máquina de embobinado y el extrusor.
- Si bien el gasto inicial para la fabricación del sistema en conjunto supone un gasto alto, la recuperación de la inversión se verá a corto plazo puesto que da paso a un ahorro de recursos para proyectos que va de la mano con aumentar la visibilidad y posibles inversiones, y además disminuye el costo de reciclaje que se debe cumplir en cuanto a los residuos de forma casi obligatoria ya que se realiza a nivel industrial.

4.2 Recomendaciones

- Diseñar una guarda en el caso del sistema de trituración para el motor y los engranajes para evitar accidentes con la ropa y las extremidades.

- Para el mecanizado de las cuchillas adquirir planchas con un espesor mayor al esperado en el acabado final ya que estas suelen venir con errores desde su fabricación en las que no todas las partes de la plancha tienen el espesor esperado.
- Engrasar correcta y constantemente los engranajes de manera que no exista ningún atascamiento que requiera del paro del funcionamiento al momento de utilizar la máquina.
- Disminuir la velocidad de extrusión del filamento ya al salir más lento el mismo presenta mayores ventajas como un mejor acabado y un filamento más uniforme.
- Si la presión interna y la velocidad de extrusión que se está utilizando son bajas, es posible no necesitar un tubo de gran espesor, compensándolo con un buen material aislante térmico y de esta forma disminuir costos.
- En caso de no ser necesarias varias cámaras de fusión como se abordó en este proyecto, se alienta a que se considere el uso de controladores de temperatura que reciben entradas directas del usuario.
- Con el fin de mitigar los efectos de la degradación del material durante su reciclaje es recomendable agregar material virgen a la mezcla previo al proceso de extrusión, o alternativamente agregar aditivos al material.
- El diámetro constante del filamento es un factor de suma importancia en la calidad de la impresión, por lo cual se recomienda añadir al sistema compuesto por extrusora y embobinado, instrumentación capaz de medir este diámetro y correspondientemente ajustar las respectivas velocidades para mantener el diámetro deseado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Lucía, 4 noviembre 2019. [En línea]. Available: Lucía, C. (2019, noviembre 3). Global 3D Printing Report 2019, crece la adopción de las tecnologías. 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/global-3d-printing-report-2019-041120192/>. [Último acceso: octubre 2022].
- [2] M. A. E. a. K.-H. K. a. J.-W. P. a. Akash, «Hydrolytic degradation of polylactic acid (PLA) and its composites,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79, pp. 1346-1352, 2017.
- [3] L. C., «¿Qué tan 'ecológico' es realmente el filamento PLA?», 3Dnatives, 22 julio 2019. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/ecologico-realmente-filamento-pla-230720192/#!>. [Último acceso: 10 noviembre 2022].
- [4] J. Ren, *Biodegradable Poly (Lactic Acid): Synthesis, Modification, Processing and Applications*, Shanghai: Springer, 2010.
- [5] E. Hazal y H. Yildirim, «Extrusion-Based 3D Printing Applications of PLA,» Kocaeli, Turkey, 2021.
- [6] EOLAS prints, «Neurotec,» 2019. [En línea]. Available: <https://neurotec.es/wp-content/uploads/2019/01/ficha-tecnica-pla.pdf>.
- [7] C. A. Avilés Muñoz y N. D. Freire Reyes, «"Desarrollo de un sistema de extrusión de filamento para impresión 3D de bajo costo",» 2017.
- [8] T. Científicos, «Obtención de ABS,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.textoscientificos.com/polimeros/abs/obtencion>.
- [9] J. V. Molina Osejos, «Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PLA semi-rígido impresos en 3D con cinco mallados internos diferentes,» 2016.
- [10] Siim and Co, «ABS - POLIACRILONITRILO BUTADIENO ESTIRENO,» [En línea]. Available: <http://www.siim.com/docs/RAE-1018.pdf>.
- [11] T. Raju y . S. Redd, «Design and Development of mini plastic shredder machine,» *Materials Science and Engineering*, 2018.
- [12] CMBE, «Trituradores industriales de dos ejes,» [En línea]. Available: <https://www.interempresas.net/Plastico/FeriaVirtual/Producto-Trituradores-industriales-de-dos-ejes-Stokkermill-Serie-D-142535.html>.

- [13] M. P. Groover, Fundamentos de manufactura, México: McGraw Hill, 2007.
- [14] J. M. L. Romero, Transformación de materiales termoplásticos, IC Editorial, 2014.
- [15] R. N. P. Brito, «DISEÑO DE EXTRUSORA DE FILAMENTO PARA IMPRESIÓN 3D A PARTIR DE PLÁSTICOS RECICLADOS,» UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA., Chile, 2017.
- [16] A. M. G. Maribel Beltrán Rico, Tecnología de polímeros: Procesado y propiedades, España: Universidad de Alicante, 2012.
- [17] J. G. Bralla, Design for Manufacturability Handbook, New York: McGraw Hill, 1998.
- [18] S. O. y. H. Beatríz, «Diseño, construcción y monitoreo de Extrusora de filamento con Cámara reguladora de humedad usando LabVIEW,» Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, 2022.
- [19] J. Z. Y. M. J. W. a. J. X. Wenjie Liu, «Fabrication of PLA Filaments and its Printable Performance,» *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 275, p. 12033, dic 2017.
- [20] T. B. D. A. C. C. H. W. R. J. V. a. A. P. M. K. Pingkarawat, «Healing of carbon fibre–epoxy composites using thermoplastic additives,» *Polym. Chem*, vol. 4, p. 5007, 2013.
- [21] Å. DelilahLithner, «Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition,» *Science of The Total Environment*, vol. 409, nº 18, pp. 3309-3324, August 2011.
- [22] N. M. A. B. Y. G. Isabelle Pillin, «Effect of thermo-mechanical cycles on the physico-chemical properties of poly(lactic acid),» *Polymer Degradation and Stability*, vol. 93, nº 2, pp. 321-328, February 2008.
- [23] J. M. Shan Zhonga, «Tightening the loop on the circular economy: Coupled distributed recycling and manufacturing with recyclebot and RepRap 3-D printing,» *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 128, pp. 48-58, 2018.
- [24] R. L.Norton, Diseño de máquinas, Pearson, 2011.
- [25] Maanshan JHT Co., «Made-in-China,» 2022. [En línea]. Available: https://es.made-in-china.com/co_8d00d20e92c56407/product_High-Hardness-Double-Shaft-Metal-Plastic-Shredder-Blades_uoniiehhuy.html.
- [26] R. S. Avilez Arévalo y S. D. Ochoa Guaraca, «Diseño de una máquina trituradora-extrusora de residuos de impresiones 3D para la empresa Alium EC ubicada en la ciudad de cuenca,» Cuenca, 2021.

- [27] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, McGraw Hill, 2011.
- [28] J. R. W. J. M. M. I. Harold F. Giles, *Extrusion: The definitive Processing Guide and Handbook*, New York: William Andrew, 2005.
- [29] E. T. J. V. D. Kanev, «Rheological Evaluation and Observations of Extrusion Instabilities of Biodegradable Polyesters,» *International Polymer Processing*, vol. 22, nº 5, pp. 395-401., 2007,.
- [30] S. Farah, D. G. Anderson y R. S. Langer, «Physical and Mechanical Properties of PLA, and Their Functions in Widespread Applications — A Comprehensive Review,» *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 107, p. 367–92, 2016.
- [31] R. K. I. Chow, «Thermal and Morphological Properties of Poly (Lactic Acid)/Nanocellulose Nanocomposites,» *5th International Conference on Recent Advances in Materials, Minerals and Environment*, p. 88 – 794 , 2016.
- [32] «Extrusora Exo Extruder,» epo3d, 2018. [En línea]. Available: <https://epo3d.com/>. [Último acceso: 2022].
- [33] «Extrusora 3Devo,» 3D Printing Industry, 2016. [En línea]. Available: <https://www.3devo.com/filament-makers>. [Último acceso: 2022].
- [34] «Felfil Evo Filament Extruder,» Felfil Evo, 2016. [En línea]. Available: <https://felfil.com/felfilevo-filament-extruder/?v=5ea34fa833a1>. [Último acceso: 2022].
- [35] C. G. d. A. S.A., «Unilibre,» [En línea]. Available: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7826/VasquezTorresEdwinLibardo2013Anexos.pdf>.
- [36] W. S. Espinosa Salguero y R. A. Tatamués Pozo, «Diseño y simulación de una máquina trituradora de llantas, de una tonelada por hora de capacidad, para la empresa Optra-Sembres,» 2016.
- [37] M. P. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna*, Mc Graw Hill.

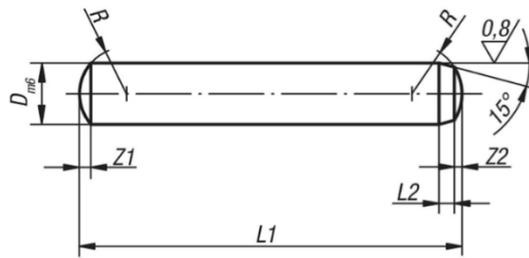
APÉNDICES

APÉNDICE A

Catálogos de elementos seleccionados

- Pasadores cilíndricos

Planos

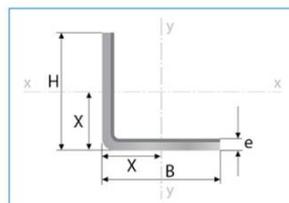


Nuestros productos

Referencia	D	L1 = longitud	L2	R	Z1	Z2
03320-02X	2	6/8/10/12/14/16/18/20	0,6	2	0,3	0,18
03320-25X	2,5	6/8/10/12/14/16/18/20/22/24	0,7	2,5	0,4	0,25
03320-03X	3	8/10/12/14/16/18/20/22/24/28/30/32	0,8	3	0,45	0,3
03320-04X	4	8/10/12/14/16/18/20/22/24/28/30/32/36/40	1	4	0,6	0,4
03320-05X	5	10/12/14/16/18/20/22/24/28/30/32/36/40/45/50	1,2	5	0,75	0,5
03320-06X	6	10/12/14/16/18/20/22/24/28/30/32/36/40/45/50/55/60	1,5	6	0,9	0,6
03320-08X	8	12/14/16/18/20/22/24/28/30/32/36/40/45/50/55/60/70/80	1,8	8	1,2	0,8
03320-10X	10	16/18/20/24/28/30/32/36/40/45/50/55/60/70/80/90/100	2	10	1,5	1
03320-12X	12	18/20/24/28/30/32/36/40/45/50/55/60/70/80/90/100/120	2,5	12	1,8	1,3
03320-14X	14	24/28/32/36/40/45/50/55/60/70/80/90/100/120	2,5	16	2	1,3
03320-16X	16	24/28/32/36/40/45/50/55/60/70/80/90/100/110/120	3	16	2,5	1,7

Figura A1 Pasadores cilíndricos

- Ángulos ASTM A36



Largo Normal:
6 metros
Recubrimiento:
Negro o Galvanizado
Calidad de Acero:
ASTM A36 / ASTM A572 Gr 50 /
ASTM A653
Norma de Fabricación:
NTE INEN 1623
Espesores:
Desde 1,50 a 6,00 mm
Observaciones:
Otras dimensiones y largos,
previa consulta

Designaciones	Esp.	Peso	Propiedades Estáticas								
			Eje x-x			Eje y-y			Distancia desde la superficie		
H	B	e	P	P	I	W	i	I		W	i
mm	mm	mm	kg/m	kg/6m	cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm ³	cm	cm
20	20	1,50	0,44	2,61	0,21	0,15	0,47	0,21	0,15	0,47	0,54
		2,00	0,58	3,46	0,28	0,20	0,62	0,28	0,20	0,62	0,59
		3,00	0,83	4,96	0,38	0,28	0,60	0,38	0,28	0,60	0,64
25	25	1,50	0,55	3,32	0,42	0,24	0,59	0,42	0,24	0,59	0,67
		2,00	0,73	4,38	0,56	0,32	0,78	0,56	0,32	0,78	0,72
		3,00	1,06	6,36	0,79	0,45	0,76	0,79	0,45	0,76	0,77
30	30	1,50	0,67	4,03	0,75	0,35	0,71	0,75	0,35	0,71	0,79
		2,00	0,89	5,34	1,00	0,46	0,94	1,00	0,46	0,94	0,84
		3,00	1,30	7,78	1,41	0,67	0,92	1,41	0,67	0,92	0,89
40	40	1,50	0,91	5,44	1,83	0,63	0,95	1,83	0,63	0,95	1,04
		2,00	1,21	7,23	2,44	0,84	1,26	2,44	0,84	1,26	1,09
		3,00	1,77	10,61	3,50	1,22	1,25	3,50	1,22	1,25	1,14
		4,00	2,31	13,83	4,46	1,58	1,23	4,46	1,58	1,23	1,19

Figura A2 Ángulos ASTM A36

- Chumacera de pared de dos huecos

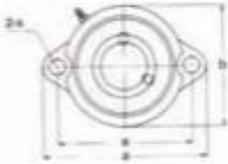
Datos Técnicos																
																
CÓDIGO IBCA	Diám. del eje		Dimensiones (mm)										Perno	Tipo de rodami.	Soporte	Peso (kg)
	mm	pulg	a	e	i	g	L	s	b	Z	Bl	n				
UCFL 204-12	19.05	3/4	113	90	15	12	25.5	12	60	33.3	31	12.7	M10 (W3/8)	204-12	FL 204	0.49
UCFL 205	25		130	99	16	14	27	16	68	35.7	34	14.3	M14	UC 205	FL 205	0.65
205-16	25.4	1											(W1/2)	205-16		
UCFL 206	30		148	117	18	14	31	16	80	40.2	38.1	15.9	M14 (W1/2)	UC 206	FL 206	0.98
UCFL 207-20	31.75	1 1/4	161	130	19	16	34	16	90	44.4	42.9	17.5	M14 (W1/2)	207-20	FL 207	1.25
UCFL 210	50	1 7/8	197	157	22	18	40	19	115	54.6	51.8	19	M16 (W5/8)	UCFL 210	FL 210	2.25

Figura A3 Chumacera de pared de dos huecos

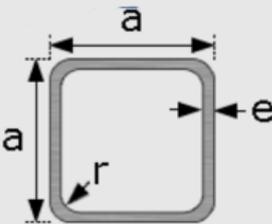
- Plancha de acero negro ASTM A36 2mm

Norma	NTE INEN 115
Calidad	ASTM A36 – SAE J 403 1008
Espesores	2mm hasta 75 mm
Acabados	Acero Negro

ESPESOR	DIMENSIONES		PESO
	ancho	largo	
mm	mm	mm	kg.
2	1220	2440	46.74
2.5	1220	2440	58.42
3	1220	2440	70.10
4	1220	2440	93.47

Figura A4 Plancha de acero negro ASTM A36 2mm

- Perfil de acero ASTM A36

	CALIDAD:	ASTM A36
	OTRAS CALIDADES:	PREVIA CONSULTA
	LARGO NORMAL:	6.00m
	OTROS LARGOS:	PREVIA CONSULTA
	ACABADOS:	PREVIA CONSULTA
	USOS:	MUEBLES, ESTRUCTURAS

TIPO	DIMENSIONES		PESO
EXTERIOR	a	e	kg/6m.
	mm	mm	
3/4"	20	1.20	4.32
1"	25	1.20	5.46
1"	25	1.50	6.72
1 1/4"	30	1.20	6.54
1 1/4"	30	1.50	8.10
1 1/2"	40	1.20	8.82
1 1/2"	40	1.50	10.92
1 1/2"	40	2.00	14.76
2"	50	1.50	13.74
2"	50	2.00	18.80

Figura A5 Perfil de acero ASTM A36

- Plancha de acero inoxidable

304			
C max	0.08%	Si max	1.00%
Mn max	2.00%	Cr	18.00 / 20.00%
P max	0.04%	Ni	8.00 / 10.50%
S max	0.03%		
304 L			
C max	0.03%	Si max	1.00%
Mn max	2.00%	Cr	18.00 / 20.00%
P max	0.04%	Ni	8.00 / 12.00%
S max	0.03%		
Acero Inoxidable 304 y 304L			
Acero Inoxidable 304 y 304L austeníticos que combinan una buena resistencia a la corrosión y buenas propiedades mecánicas.			
El tipo 304L es una modificación de bajo carbón del tipo 304. La ventaja en el tipo 304L es que se minimiza el problema de la precipitación de carburos durante el proceso de soldadura.			
Aplicaciones: Ampliamente usado en la Industria Química, lechera, de bebidas y otros productos alimenticios.			
Resistencia a la Corrosión: En su condición de recocido, estos aceros son altamente resistentes a la corrosión atmosférica, a ácidos como el acético, nítrico, cítrico, etc. A muchos compuestos químicos orgánicos e inorgánicos, al petróleo curado o refinado. Puede ocurrir corrosión intergranular si es calentado o enfriado lentamente dentro del rango de temperatura de 425° – 900°C.			
Temperatura Máxima de Servicio: 880° si es en servicio continuo y 840°C en servicio intermitente.			
Maquinabilidad: Tiene una maquinabilidad media debido a su baja dureza.			
Soldabilidad: Estos aceros pueden ser soldados satisfactoriamente por cualquier método y sólo la soldadura con oxiacetileno no se recomienda. Para el tipo 304 se recomienda las soldaduras AWS E/E308 o la AWS E/ER312. Para el tipo 304L se debe usar la soldadura AWS E/ER308L o AWS E/ER347.			
Formado en Frío: Estos aceros pueden ser fácilmente estirados, doblados o estampados.			
Forjado en Caliente: Forjar entre 1150° – 1250°C. No forjar abajo de 930°C. Las forjas deben ser recocidas para recuperar toda su resistencia a la corrosión.			
Tratamientos Térmicos:			
Recocido: Calentar entre 1010° – 1120°C y enfriar en agua. Se obtiene aproximadamente una dureza 150 Brinell.			
Templado: No se puede ser endurecido por tratamiento térmico, sólo por deformación en frío.			

Figura A6 Plancha de acero inoxidable

- Varilla de acero inoxidable

Especificaciones Generales:

Calidad:	AISI – 304
Otras Calidades:	Previa Consulta
Largo normal:	6.00 m
Otros largos:	Previa Consulta
Acabado:	Natural Brillante
Otro acabado:	Previa Consulta
Norma:	AISI 304
Descripción:	Acero Inoxidable austenítico al cromo-níquel con bajo contenido de carbono. Resiste a la corrosión intercrystalina hasta 300 C. Resistencia al efecto corrosivo del medio ambiente, vapor, agua y ácidos, así como de soluciones alcalinas, si se emplea con la superficie pulida espejo.
Aplicaciones:	Industrias alimenticias, cervecera, azucarera, utensillos domésticos, industria del cuero, farmacéutica dental, etc...
Largo:	6 mts

PROPIEDADES MECÁNICAS			
RESISTENCIA MECÁNICA (N / mm ²)	PUNTO DE FLUENCIA (N / mm ²)	Elongación % Min.	DUREZA ROCKWELL B
520	220	20	249 – 278

DENOMINACION	DIAMETRO	PESOS	
	mm		
	a	kg/m	kg/6m
VRL 3/16	4,76	0,14	0,83
VRL 1/4	6,35	0,25	1,51
VRL 5/16	7,94	0,39	2,36
VRL 3/8	9,52	0,57	3,39
VRL 1/2	12,70	1,01	6,03
VRL 5/8	15,87	1,57	9,41
VRL 3/4	19,05	2,26	13,56
VRL 7/8	22,00	3,02	18,09
VRL 1	25,40	4,02	24,11

Figura A7 Varilla de acero inoxidable

- Catarina para el tornillo seleccionado

Pitch P (in)	0.38	
No. of teeth	40	
Diameter (in)	4.99	
Min. bore (in)	0.63	
Max. bore (in)	1.5	
Hub H (in)	2.25	
Hub L (in)	1	
Weight (lbs)	1.62	

Figura A8 Catarina para el tornillo seleccionado

- Catarina para el motor seleccionado

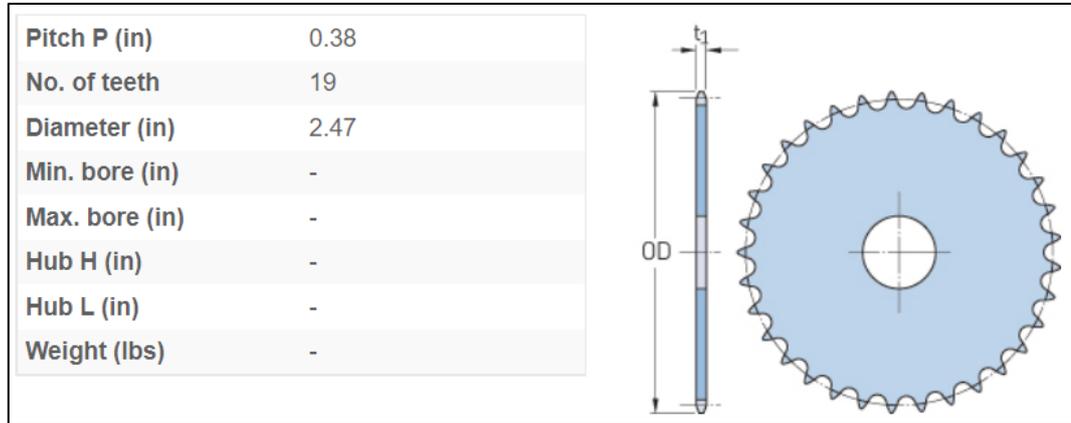


Figura A9 Catarina para el motor seleccionado

- Cadena seleccionada para el sistema de transmisión

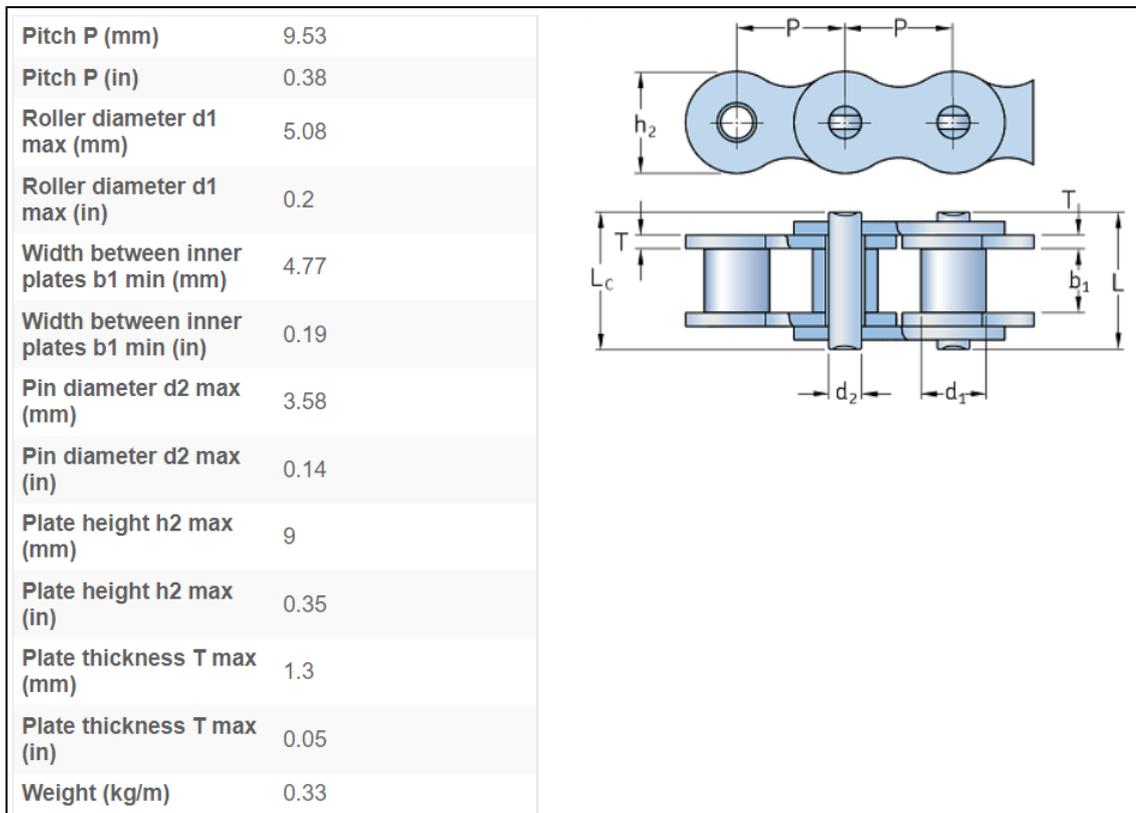


Figura A10 Cadena seleccionada para el sistema de transmisión

- Factores de rendimiento del rodamiento seleccionado

Results			
SKF	Power loss	Frictional moment	
Designation		Total	
	P_{loss} (W)	M (Nmm)	
62/22	0.061	64.2	
SKF	Lubrication condition	Load ratio	Static safety factor
Designation	Viscosity ratio		
	κ	C/P	S_0
62/22	0.02	10.71	15.2

Figura A11 Factores de rendimiento del rodamiento seleccionado

APÉNDICE B

- Características del motor seleccionado

SPECIFICATION	CONNECTION	BIPOLAR
AMPS/PHASE		2.80
RESISTANCE/PHASE(Ohms)@25°C		0.90±10%
INDUCTANCE/PHASE(mH)@1KHz		2.50±20%
HOLDING TORQUE(Nm) w/o GEARBOX(Nm)[lb-in]		1.25[11.06]
GEAR RATIO		15 ₁₀ ³
EFFICIENCY		81.00%
STEP ANGLE w/o GEARBOX(°)		1.80
BACKLASH@NO-LOAD		<=1.5°
MAX.PERMISSIBLE TORQUE(Nm)		30.00
MOMENT PERMISSIBLE TORQUE(Nm)		50.00
SHAFT MAXIMUM AXIAL LOAD(N)		100.00
SHAFT MAXIMUM RADIAL LOAD(N)		200.00
WEIGHT(Kg)[lb]		—
TEMPERATURE RISE:MAX.80°C (MOTOR STANDSTILL;FOR 2PHASE ENERGIZED)		
AMBIENT TEMPERATURE -10°C~50°C[14°F~122°F]		
INSULATION CLASS B 130°C[266°F]		

Tabla B1 Factores de rendimiento del rodamiento seleccionado

- Curva de torque del motor seleccionado

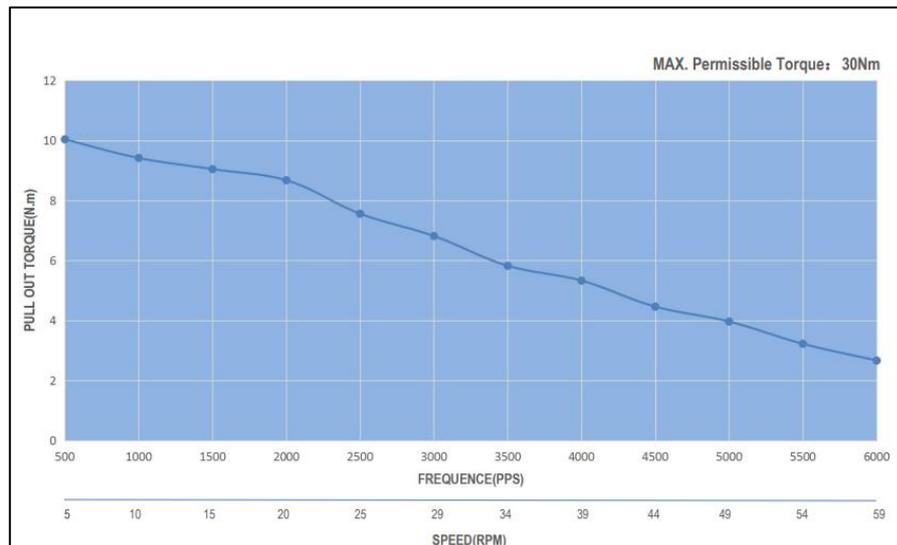
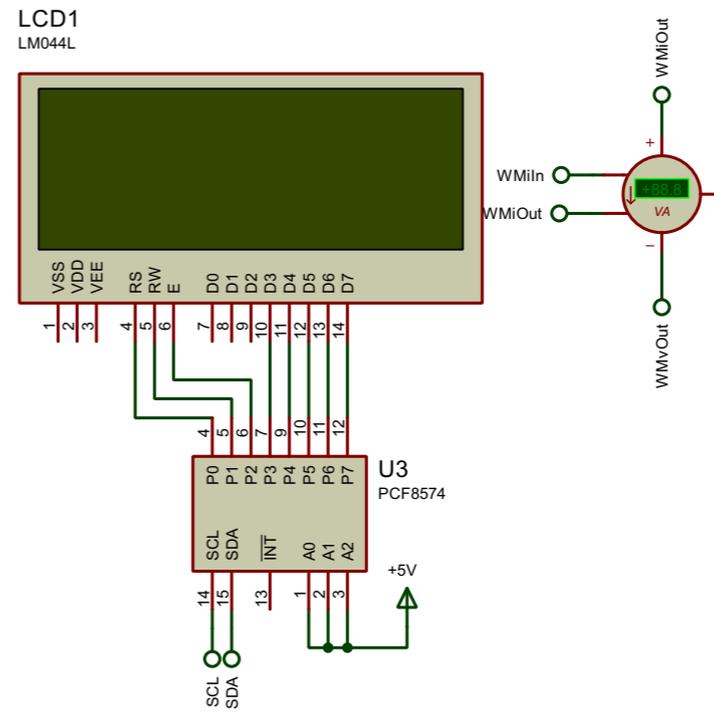
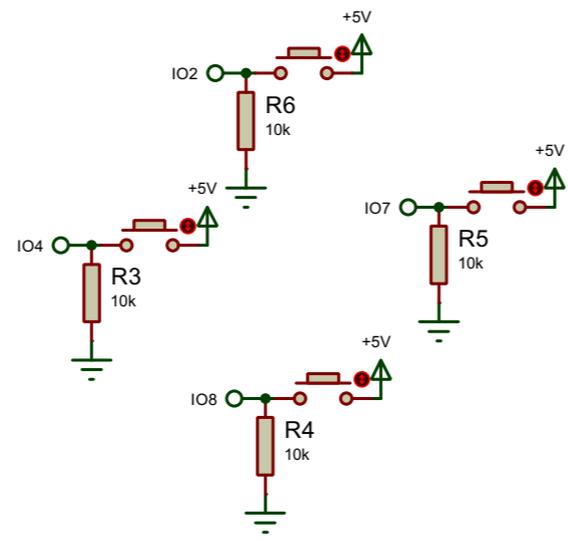
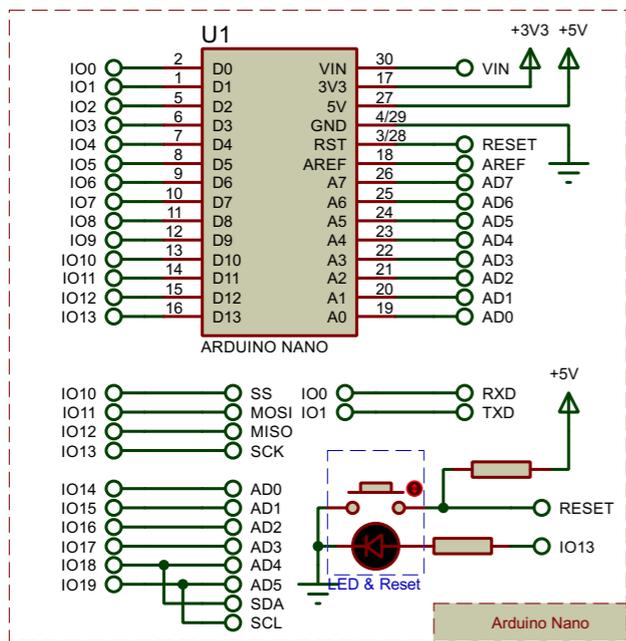


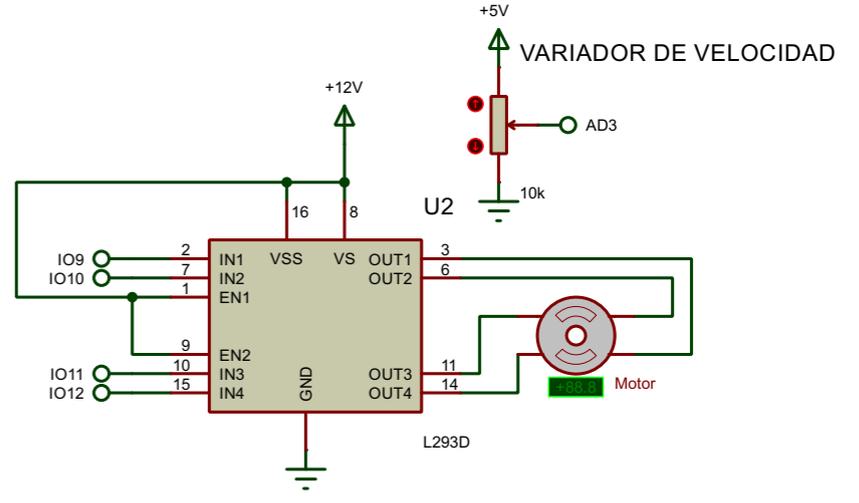
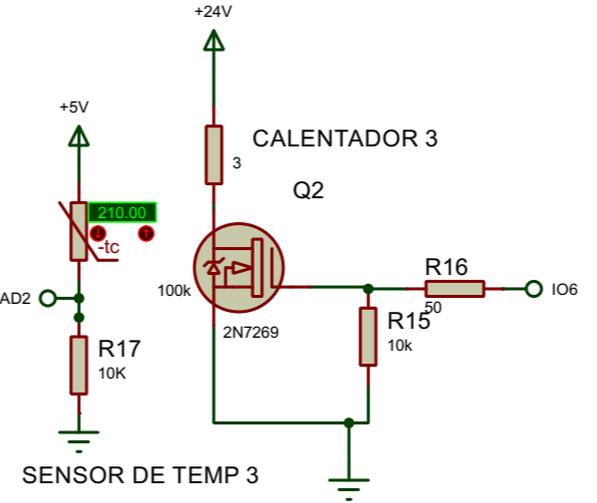
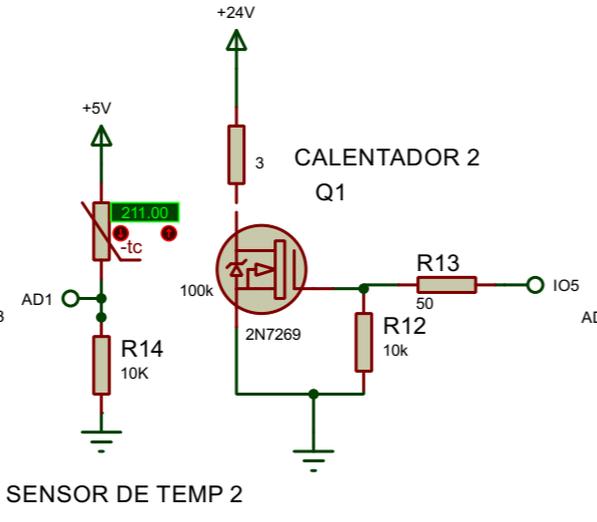
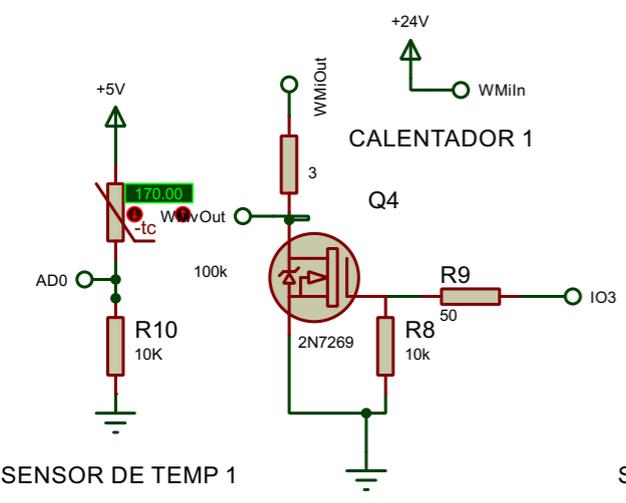
Figura B12 Factores de rendimiento del rodamiento seleccionado

APÉNDICE C

Planos



Potencia del Calentador



6 1 5 1 4 3 1 2 1 1

D

D

C

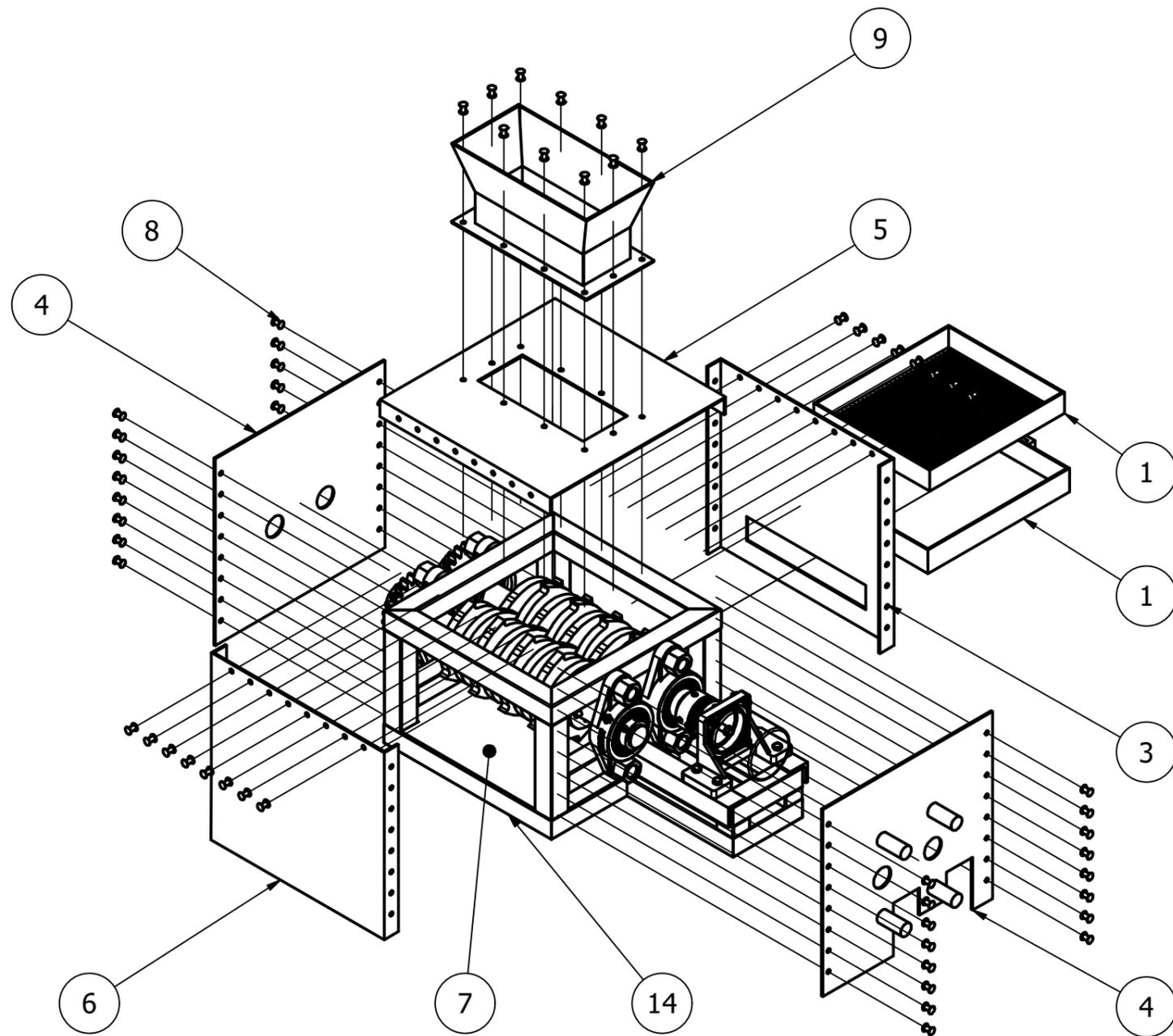
C

B

B

A

A



LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Caja de filtrado	
14	1	Estructura	
3	1	Pared Frontal	
4	2	Pared Lateral	
5	1	Pared Superior	
6	1	Pared Trasera	
7	1	Placa	
8	58	Remaches	Rivet GB/T 1011-1986-5 X 8
9	1	Tolva	

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA EN MECÁNICA Y CIENCIAS
DE LA PRODUCCIÓN

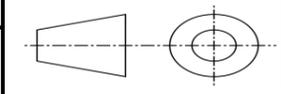
TUTOR:	M.Sc. J.LEON
ALUMNO:	N. Pilco D.Velasco
FECHA:	
UNIDADES:	MM
LÁMINA:	9

espol

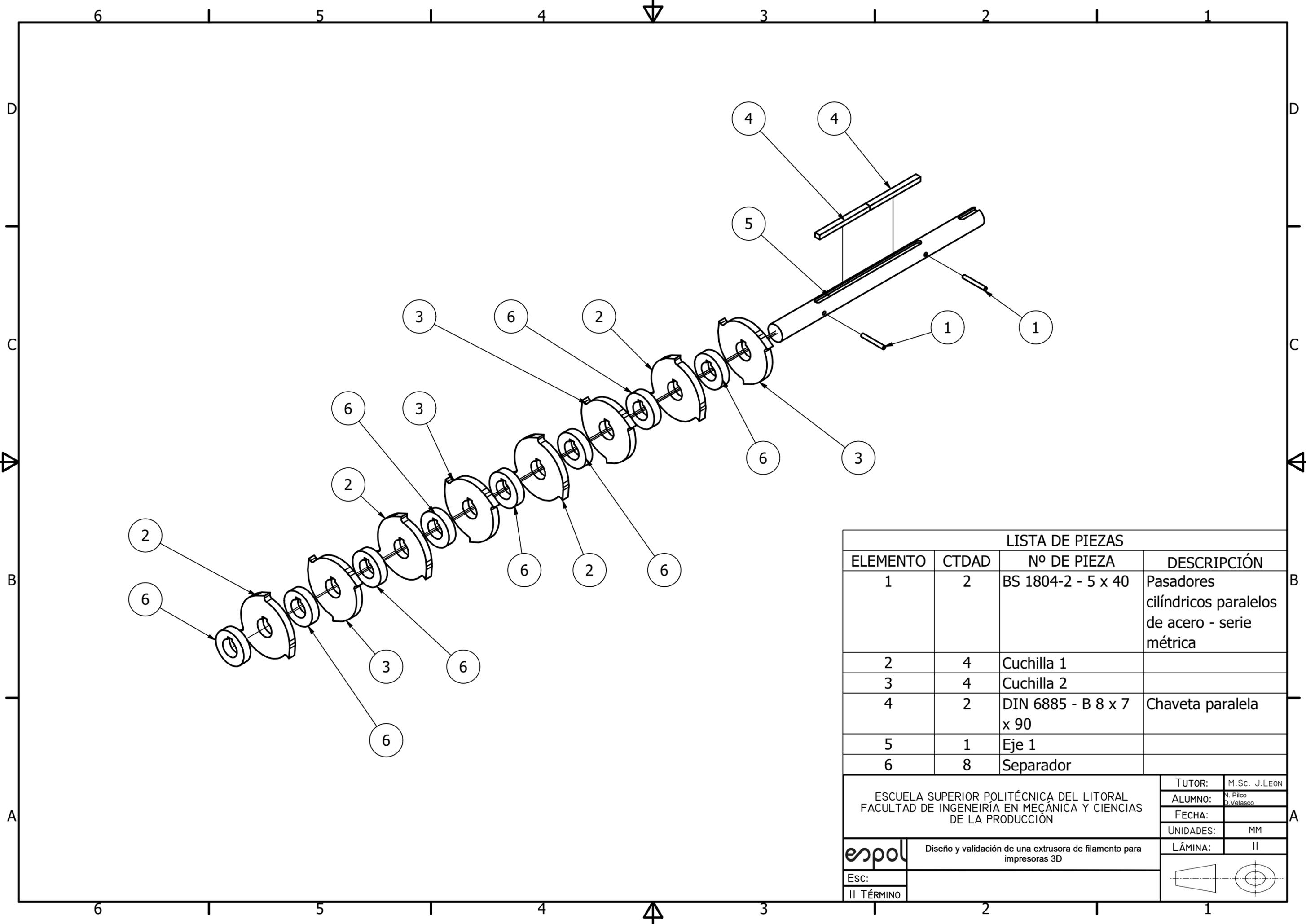
Diseño y validación de una extrusora de filamento para
impresoras 3D

Esc: 1:6
II TÉRMINO

Trituradora

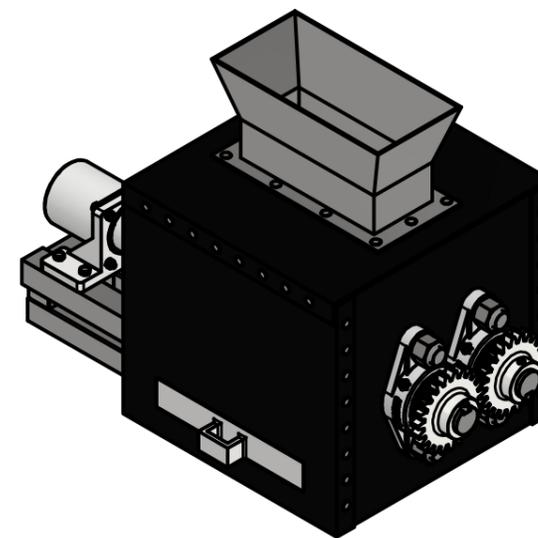
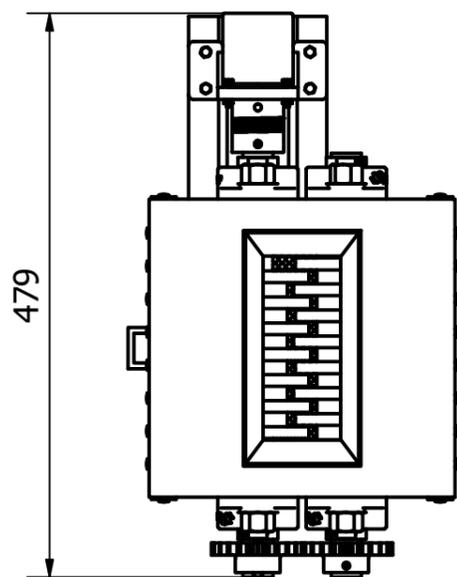
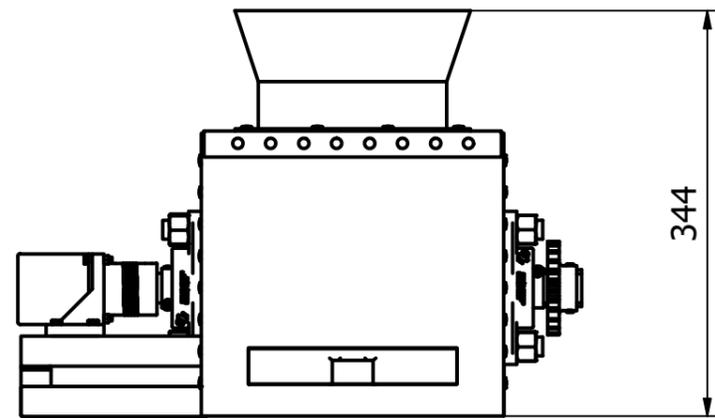
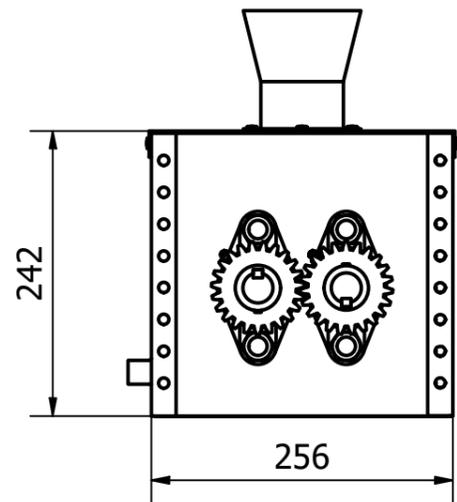


6 1 5 1 4 3 1 2 1 1

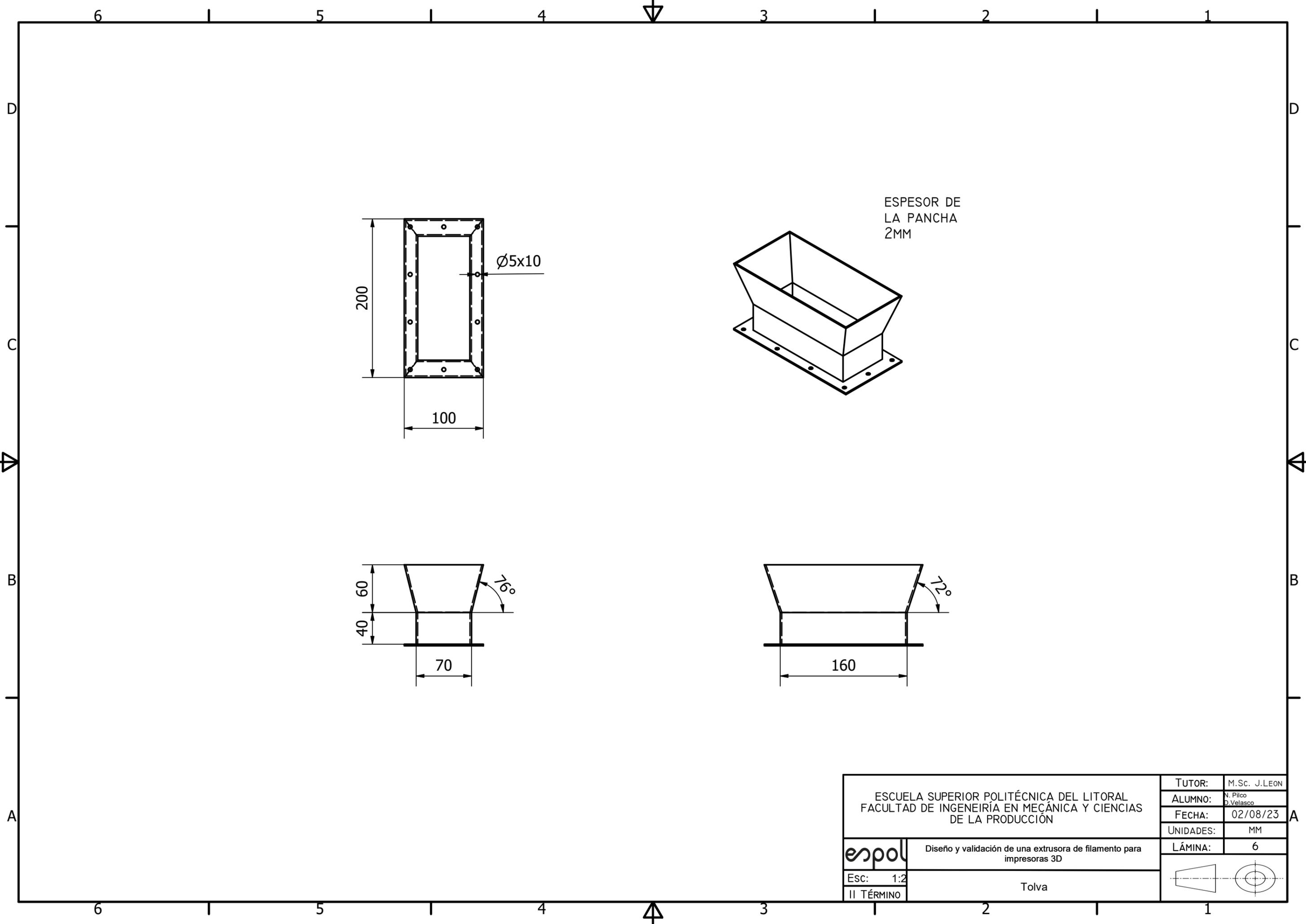


LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	2	BS 1804-2 - 5 x 40	Pasadores cilíndricos paralelos de acero - serie métrica
2	4	Cuchilla 1	
3	4	Cuchilla 2	
4	2	DIN 6885 - B 8 x 7 x 90	Chaveta paralela
5	1	Eje 1	
6	8	Separador	

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL FACULTAD DE INGENIERÍA EN MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN		TUTOR:	M.Sc. J.LEON
		ALUMNO:	N. Pilco D.Velasco
		FECHA:	
		UNIDADES:	MM
Diseño y validación de una extrusora de filamento para impresoras 3D		LÁMINA:	II



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL FACULTAD DE INGENIERÍA EN MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN		TUTOR:	M.Sc. J.LEON
		ALUMNO:	N. Pilco D.Velasco
		FECHA:	02/08/23
		UNIDADES:	MM
		LÁMINA:	8
Esc:	1:6	Trituradora	
II TÉRMINO			



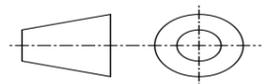
ESCUOLA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA EN MECÁNICA Y CIENCIAS
 DE LA PRODUCCIÓN

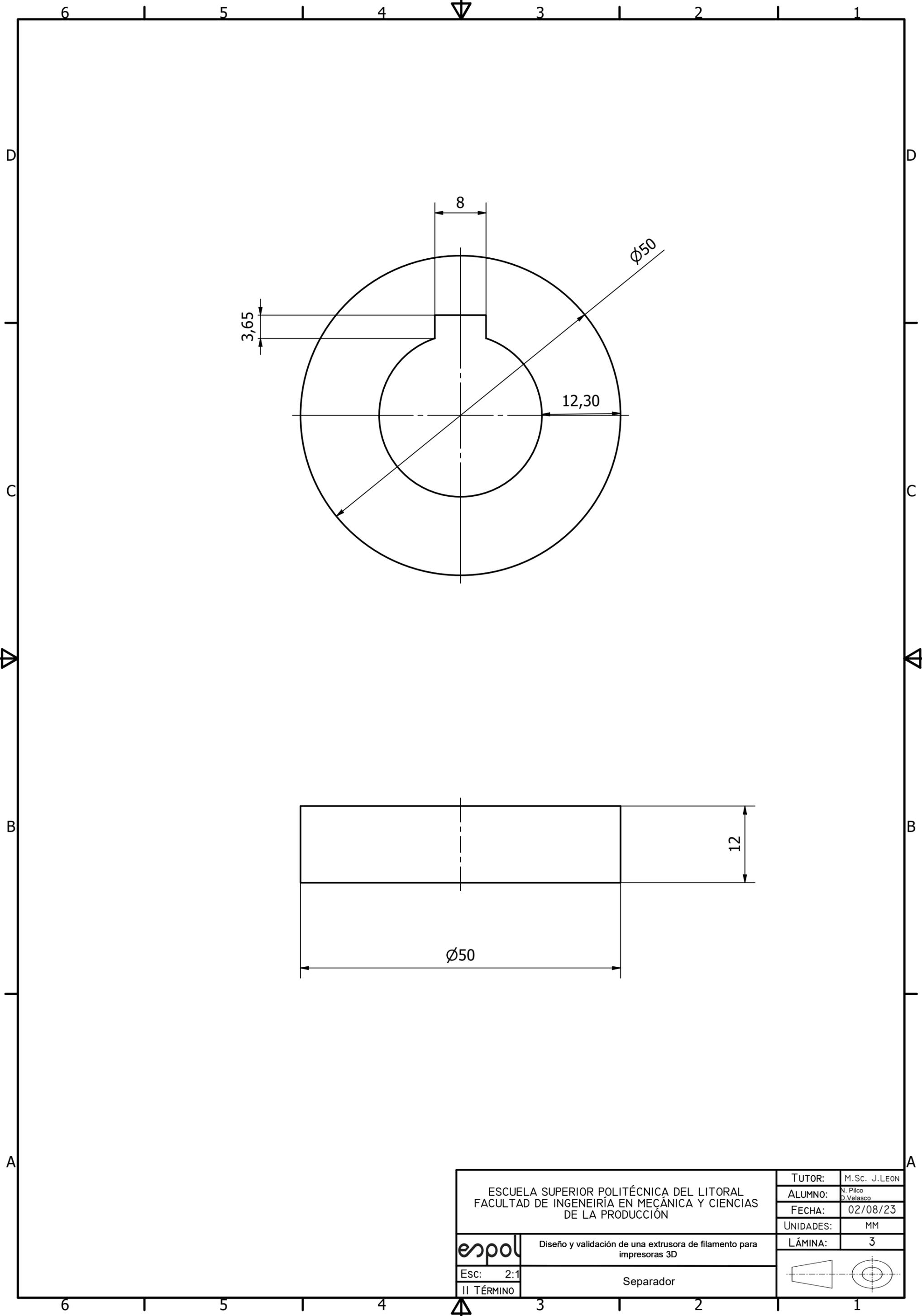
espol Diseño y validación de una extrusora de filamento para
 impresoras 3D

Esc: 1:2
 II TÉRMINO

Tolva

TUTOR:	M.Sc. J.LEON
ALUMNO:	N. Pilco D.Velasco
FECHA:	02/08/23
UNIDADES:	MM
LÁMINA:	6





ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA EN MECÁNICA Y CIENCIAS
 DE LA PRODUCCIÓN

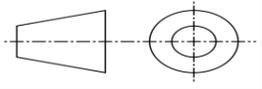
TUTOR:	M.Sc. J.LEON
ALUMNO:	N. Pilco D.Velasco
FECHA:	02/08/23
UNIDADES:	MM
LÁMINA:	3

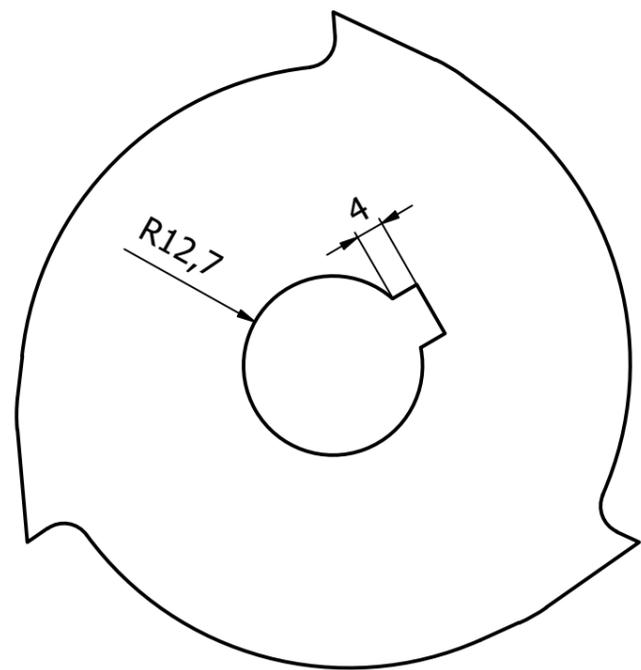
espol

Diseño y validación de una extrusora de filamento para
 impresoras 3D

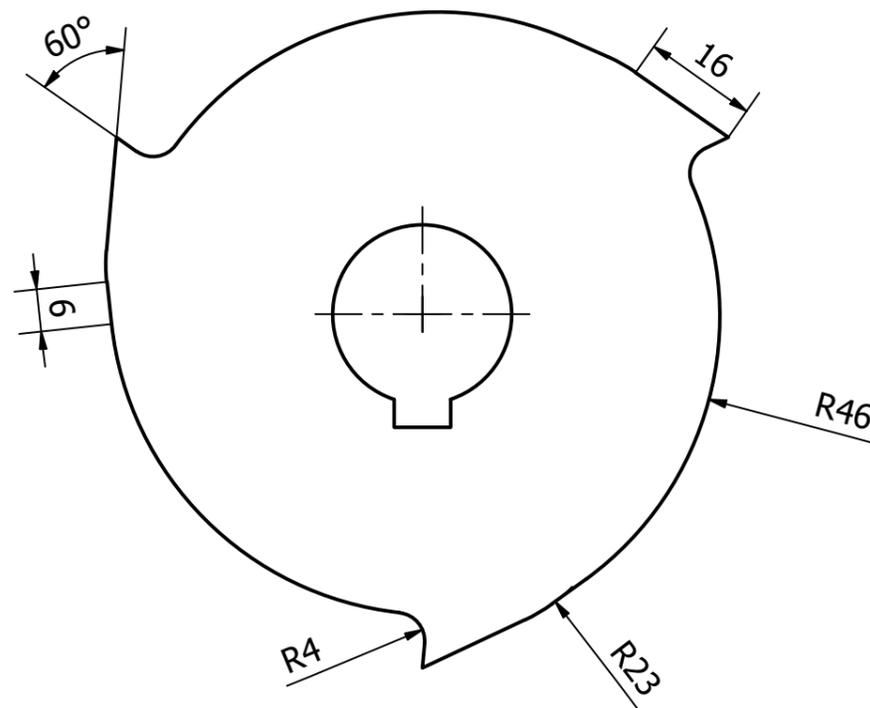
Esc: 2:1
 II TÉRMINO

Separador





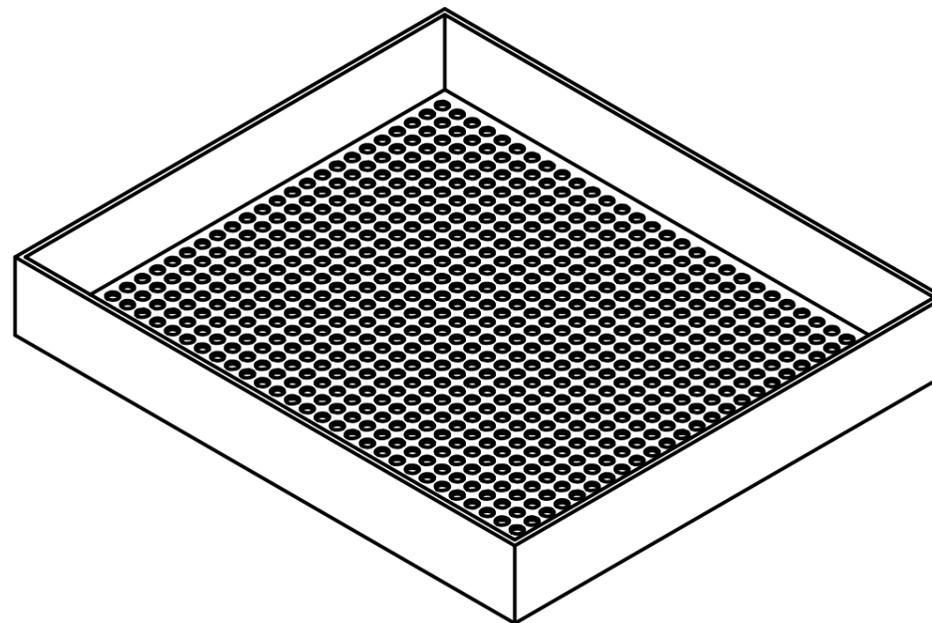
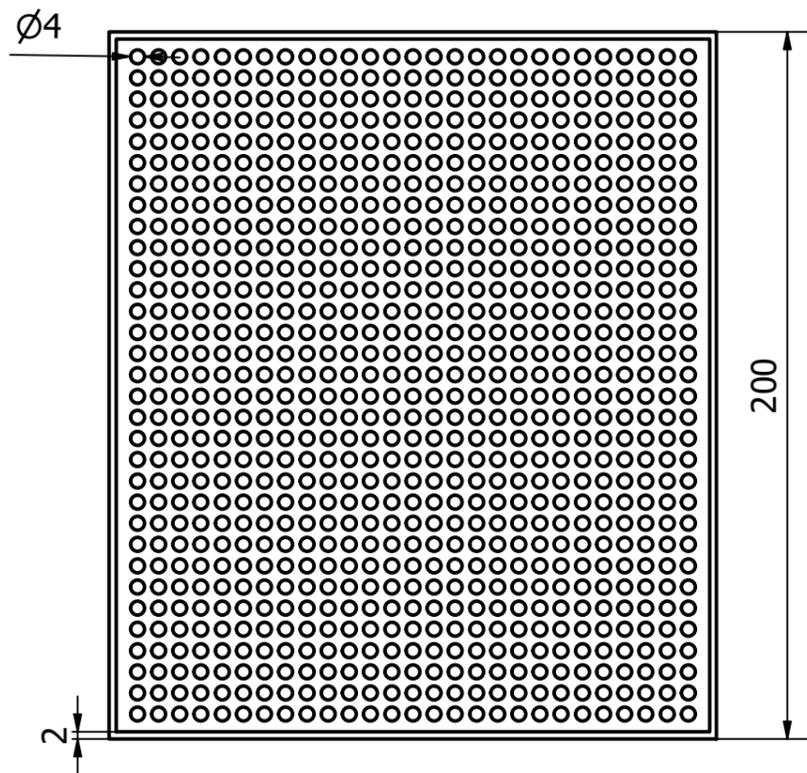
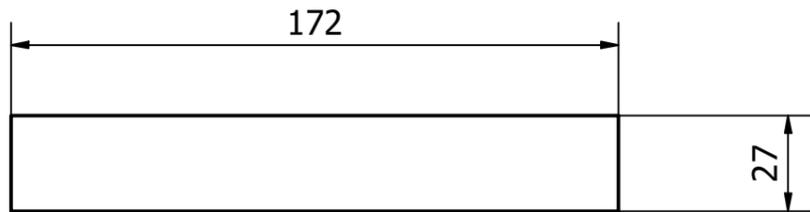
CUCHILLA 1



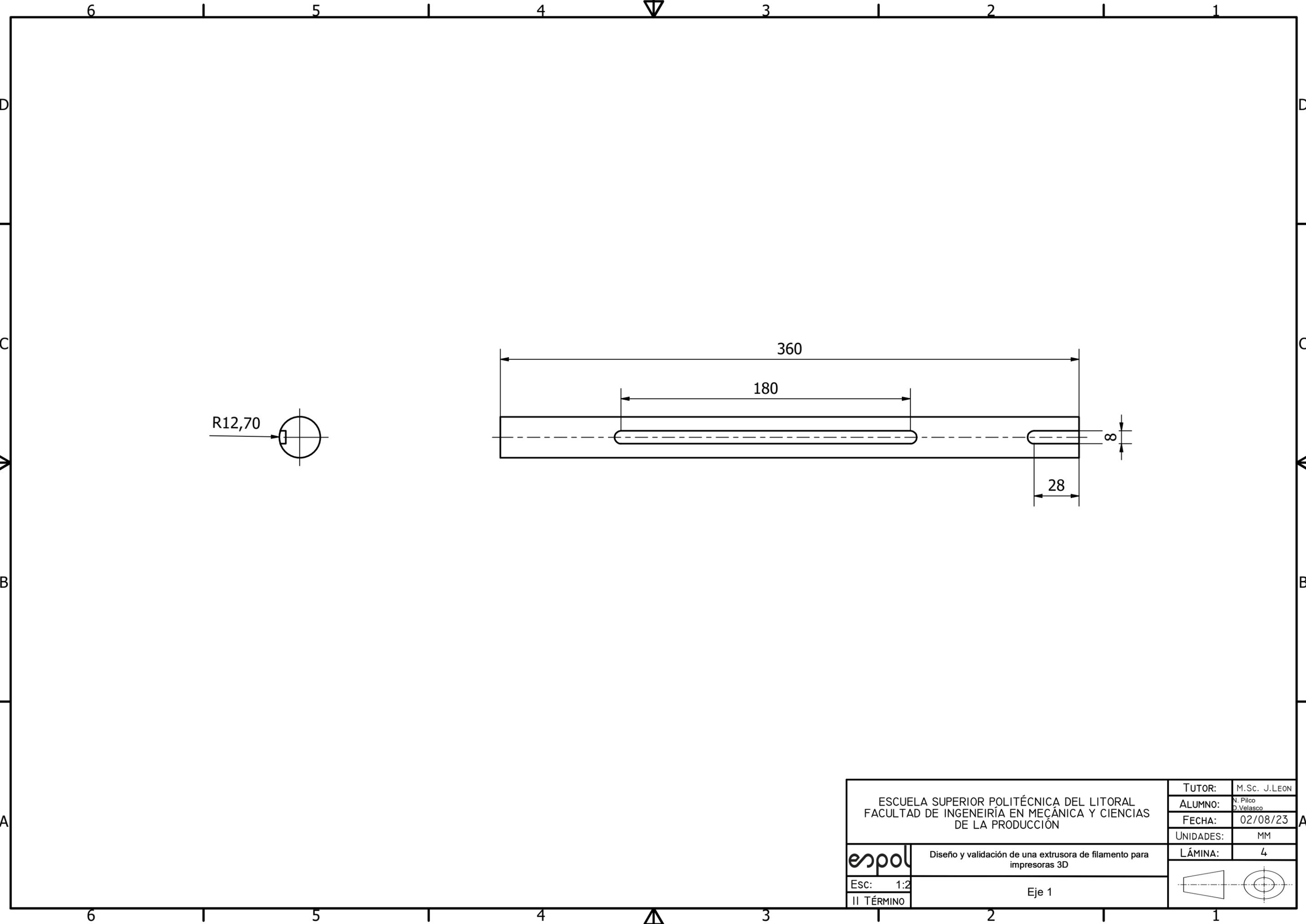
CUCHILLA 2



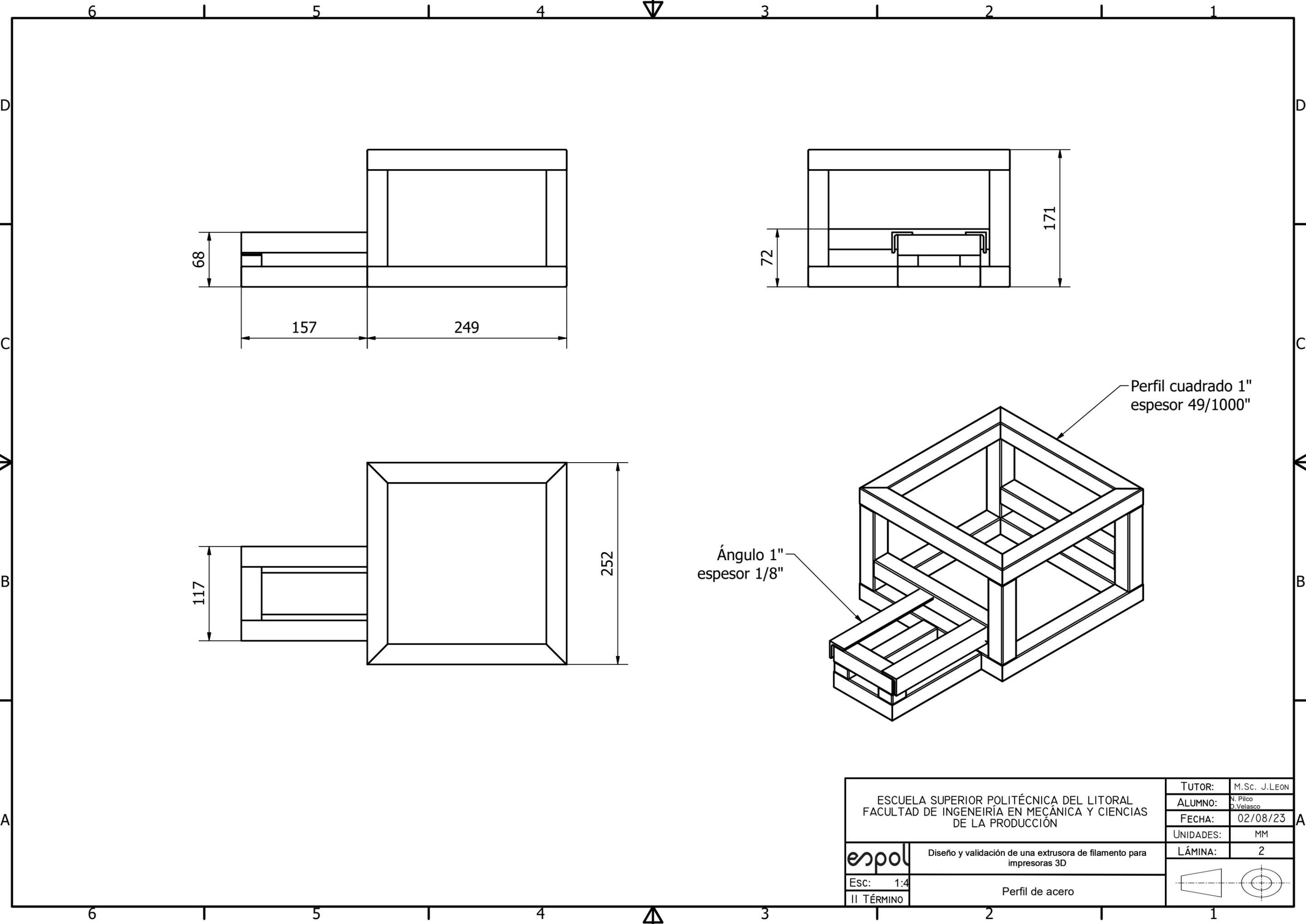
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL FACULTAD DE INGENIERÍA EN MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN		TUTOR:	M.Sc. J.LEON
		ALUMNO:	N. Pilco D.Velasco
		FECHA:	02/08/23
		UNIDADES:	MM
		LÁMINA:	14
Esc:	1:1	Cuchilla	
II TÉRMINO			



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL FACULTAD DE INGENIERÍA EN MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN		TUTOR:	M.Sc. J.LEON
		ALUMNO:	N. Pilco D.Velasco
		FECHA:	02/08/23
		UNIDADES:	MM
		LÁMINA:	7
Esc:	1:6	Caja de filtrado	
II TÉRMINO			

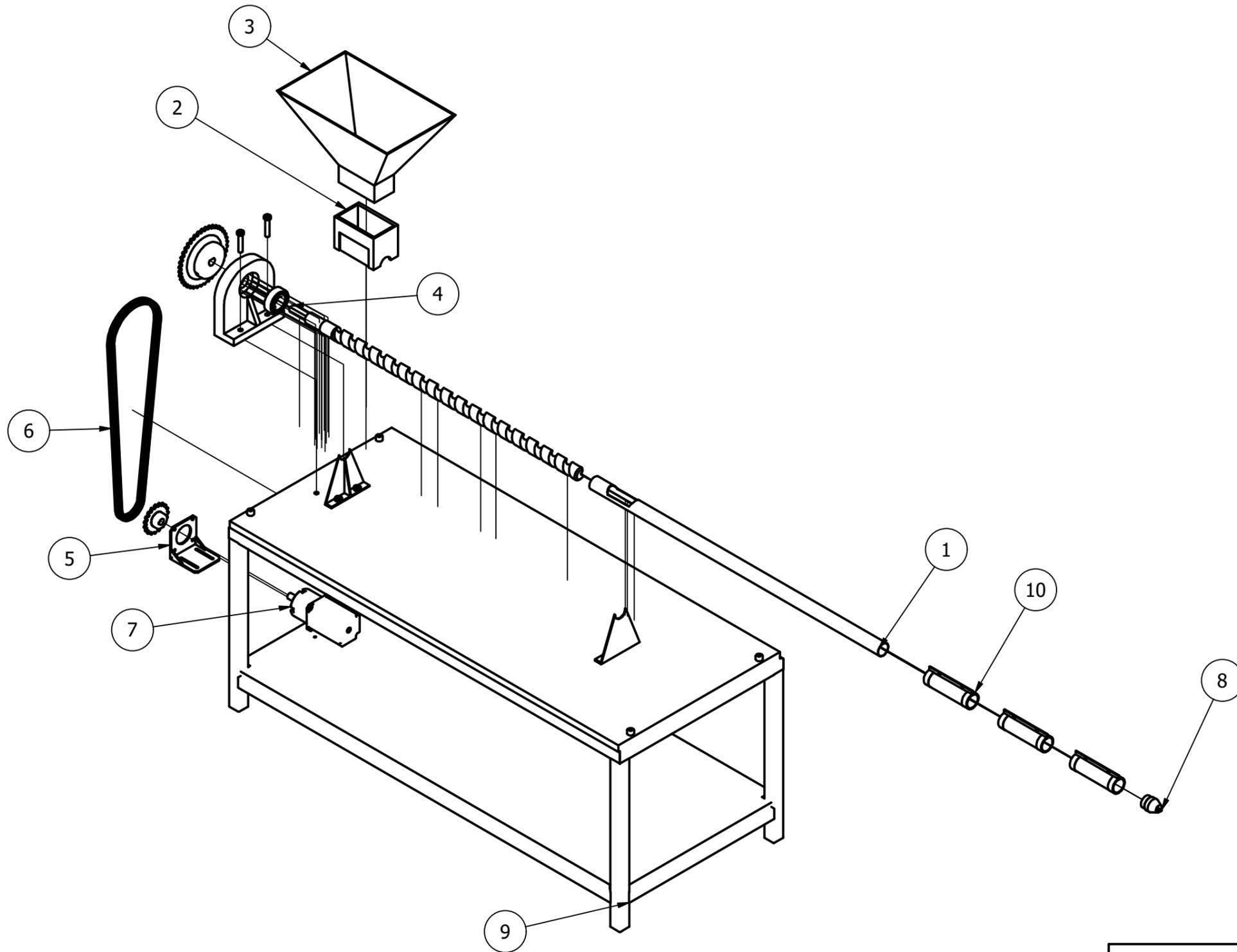


ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL FACULTAD DE INGENIERÍA EN MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN		TUTOR:	M.Sc. J.LEON
		ALUMNO:	N. Pilco D.Velasco
		FECHA:	02/08/23
		UNIDADES:	MM
		LÁMINA:	4
Esc:	1:2	Eje 1	
II TÉRMINO			



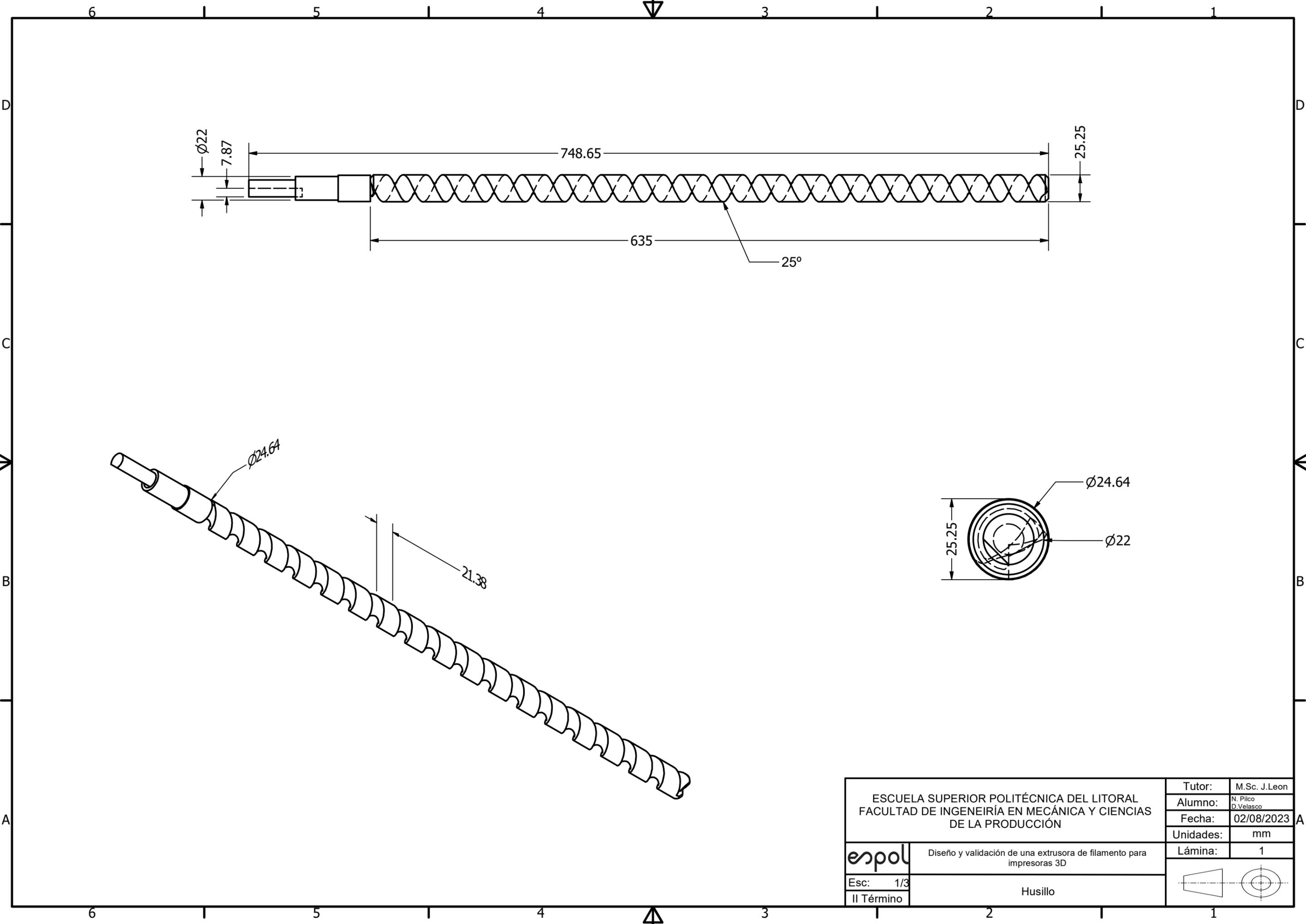
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL FACULTAD DE INGENIERÍA EN MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN		TUTOR:	M.Sc. J.LEON
		ALUMNO:	N. Pilco D. Velasco
		FECHA:	02/08/23
Diseño y validación de una extrusora de filamento para impresoras 3D		UNIDADES:	MM
		LÁMINA:	2
Esc: 1:4	II TÉRMINO		

Perfil de acero



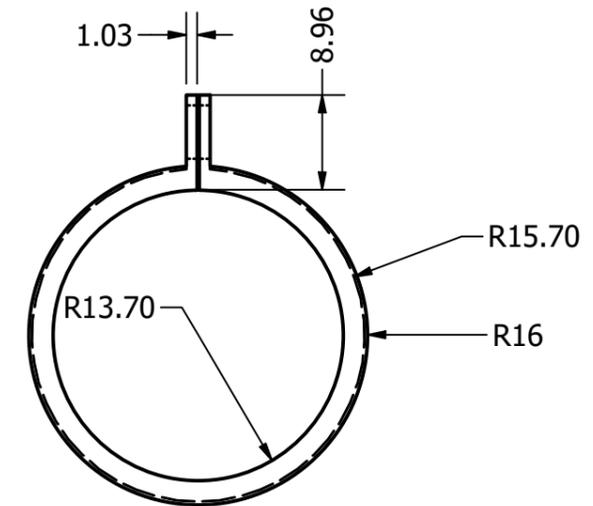
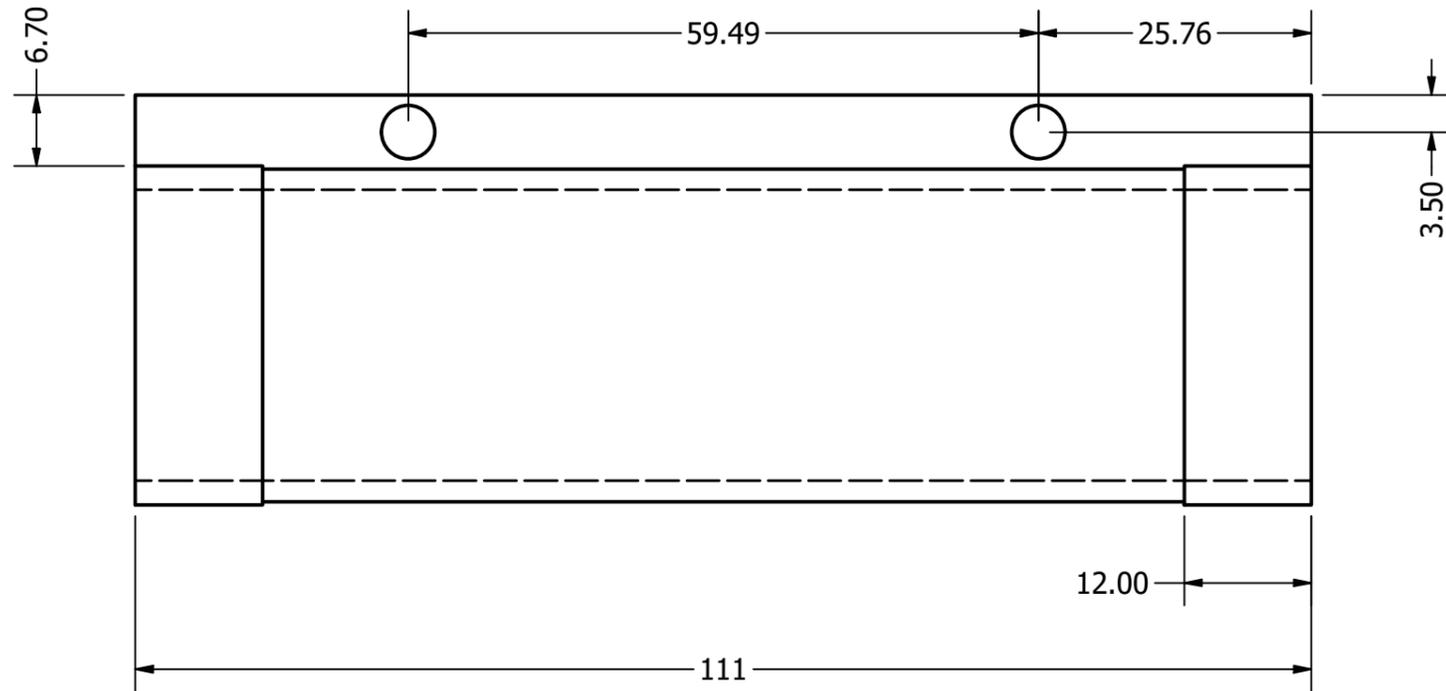
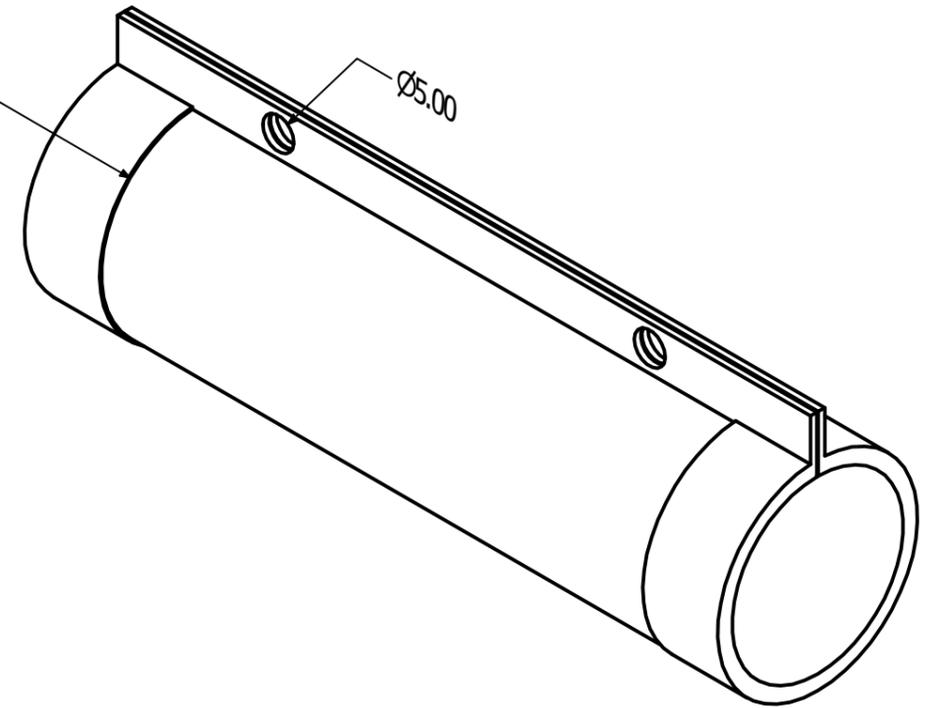
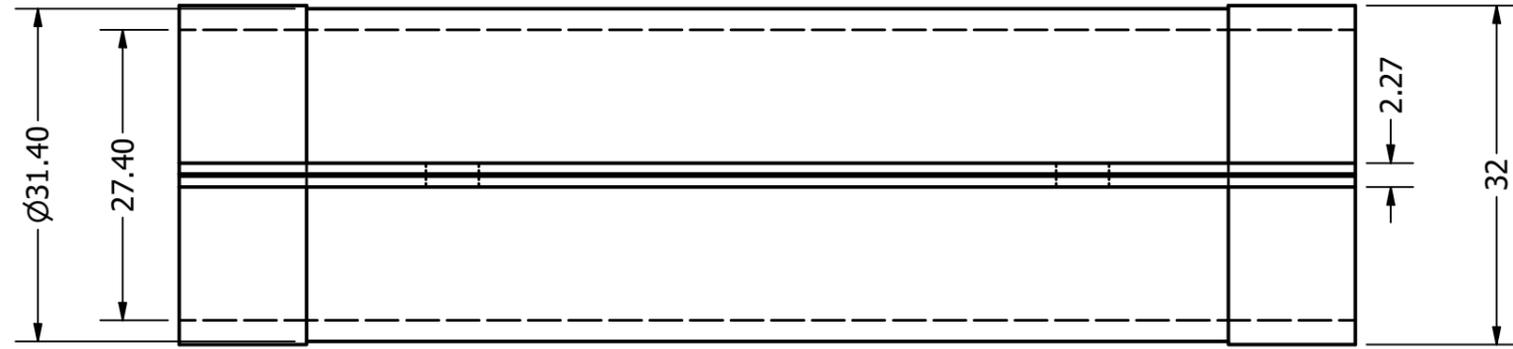
PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	Cilindro del husillo	
2	1	Conector	
3	1	Tolva	
4	1	Husillo	Mecanizado
5	1	Soporte motor	
6	1	Sistema transmisión	Cadena y Catarina
7	1	Nema23 motor	De pasos
8	1	Cabezal	Plato rompedor/Boquilla
9	1	Estructura	Frame mesa
10	3	Abrazaderas	Calentadores

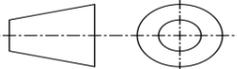
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL FACULTAD DE INGENIERÍA EN MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN		TUTOR:	M.Sc. J.LEON
		ALUMNO:	N. Pilco D.Velasco
		FECHA:	02/08/2023
		UNIDADES:	MM
Diseño y validación de una extrusora de filamento para impresoras 3D		LÁMINA:	I
Esc: 0.12	Sistema completo		
II TÉRMINO			

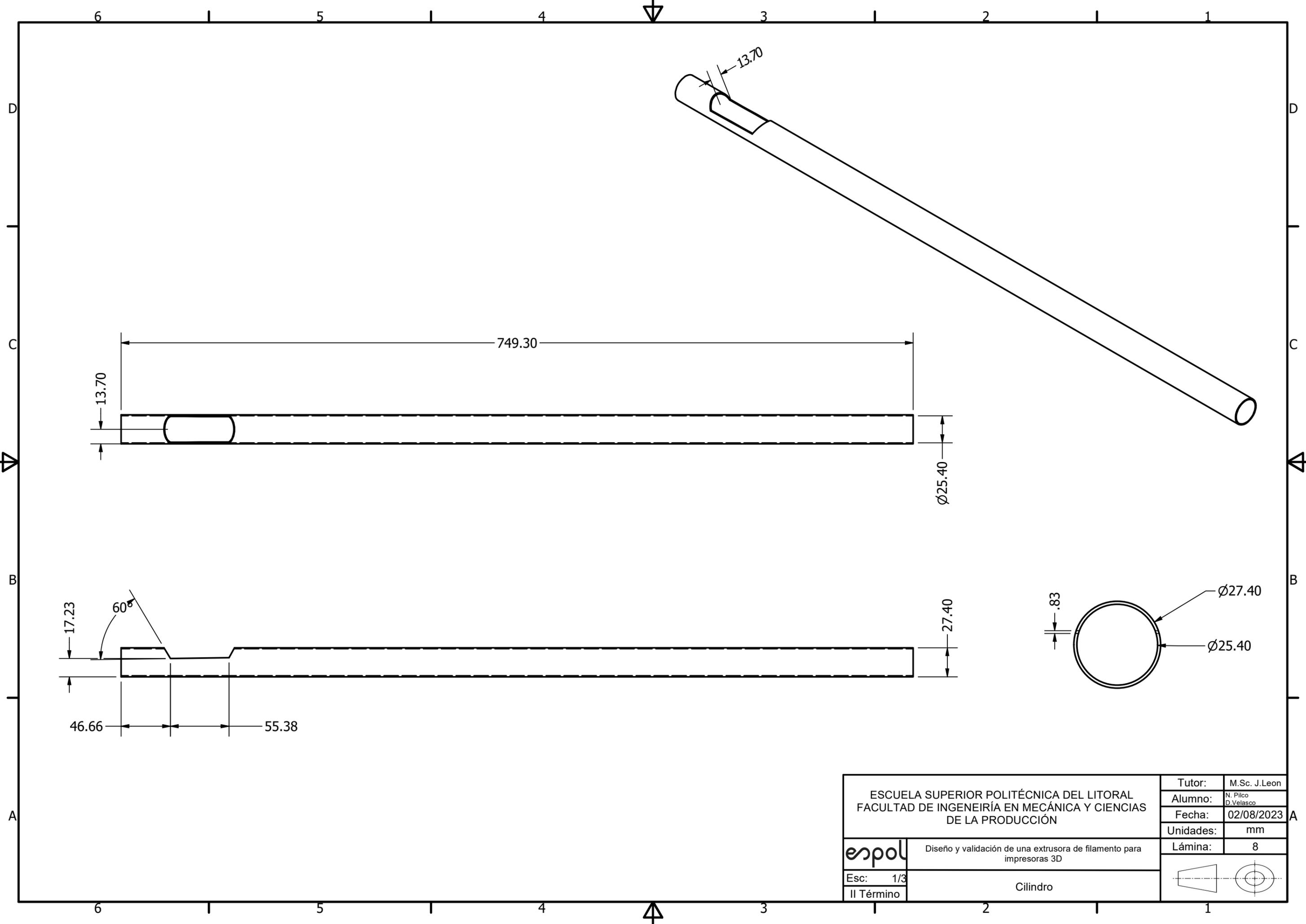


ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL FACULTAD DE INGENIERÍA EN MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN		Tutor:	M.Sc. J.Leon
		Alumno:	N. Pilco D.Velasco
Diseño y validación de una extrusora de filamento para impresoras 3D		Fecha:	02/08/2023
		Unidades:	mm
Esc: 1/3 II Término		Lámina:	1
		Husillo	

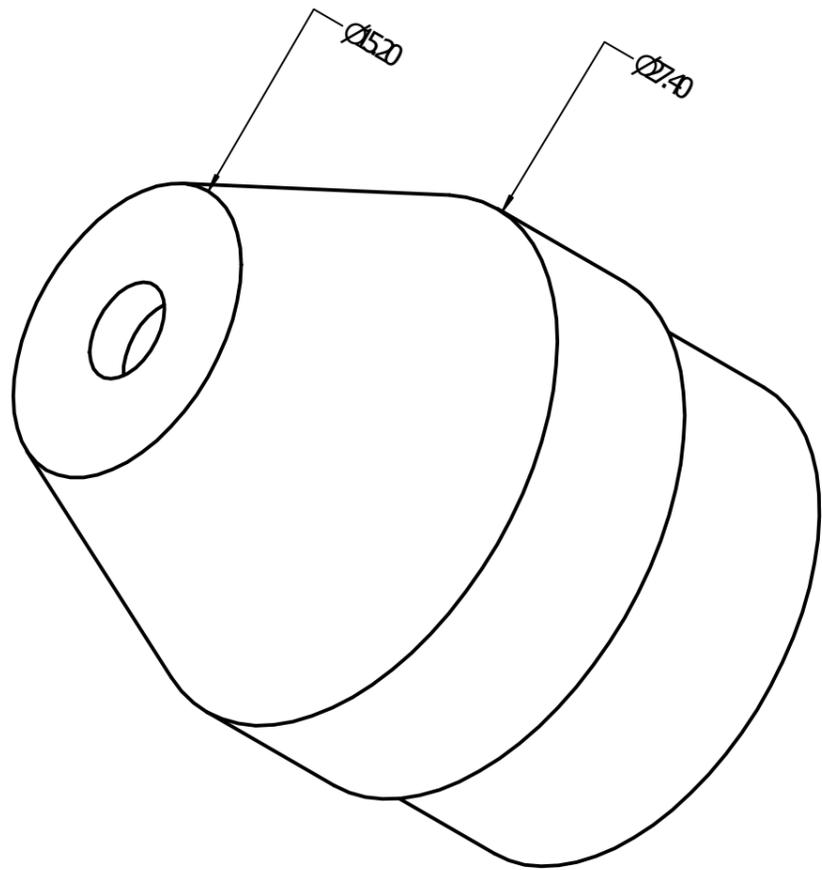
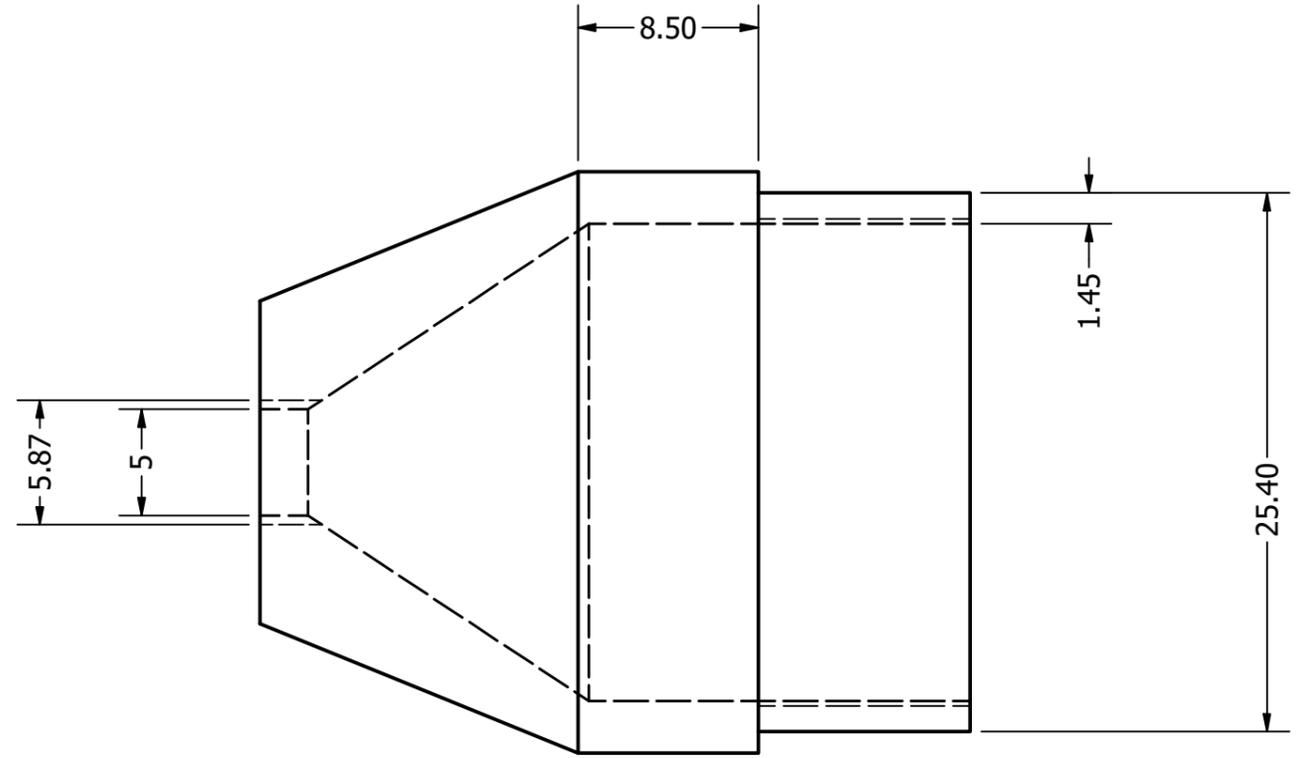
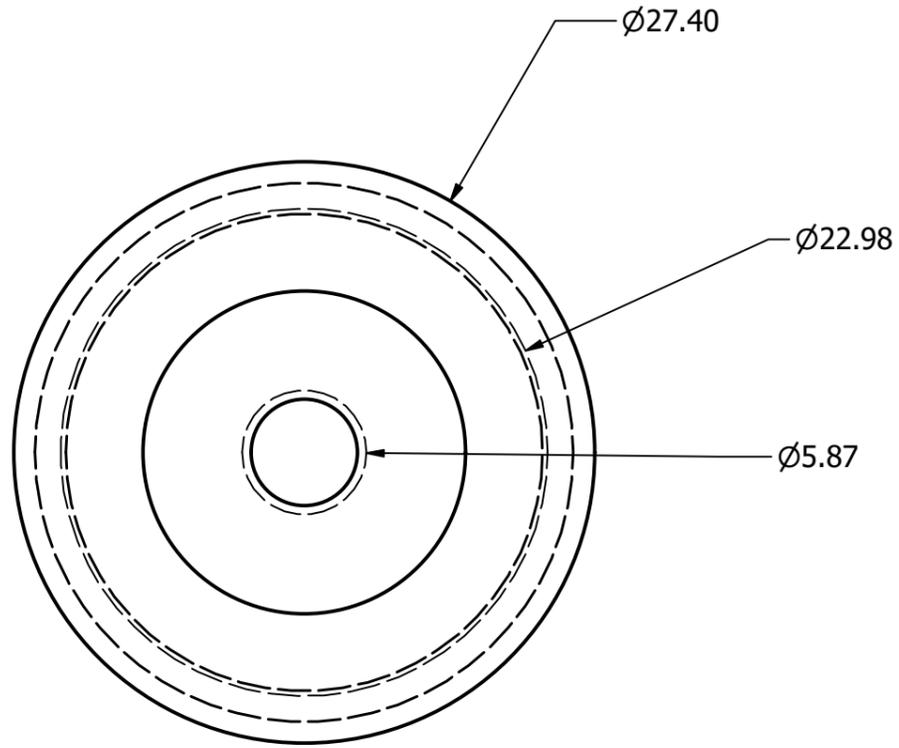
--	--

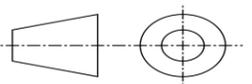


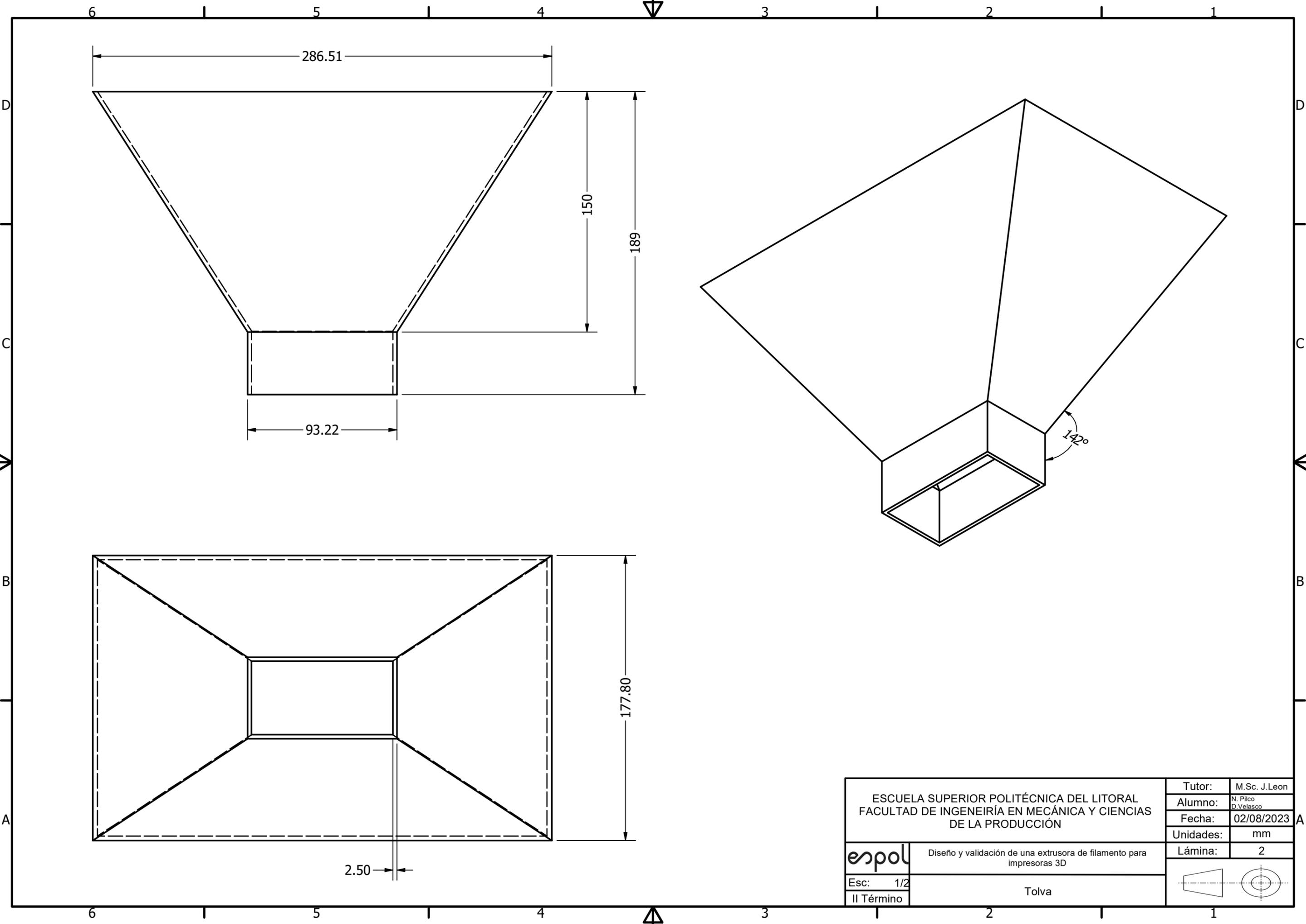
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL FACULTAD DE INGENIERÍA EN MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN		Tutor:	M.Sc. J.Leon
		Alumno:	N. Píco D.Velasco
 Diseño y validación de una extrusora de filamento para impresoras 3D		Fecha:	02/08/2023
		Unidades:	mm
Esc: 1.25:1 II Término		Lámina:	7
		Abrazadera	
			



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL FACULTAD DE INGENIERÍA EN MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN		Tutor:	M.Sc. J.Leon
		Alumno:	N. Pilco D.Velasco
		Fecha:	02/08/2023
		Unidades:	mm
Diseño y validación de una extrusora de filamento para impresoras 3D		Lámina:	8
Esc:	1/3	Cilindro	
II Término			



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL FACULTAD DE INGENIERÍA EN MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN		Tutor:	M.Sc. J.Leon
		Alumno:	N. Pico D.Velasco
		Fecha:	02/08/2023
 Diseño y validación de una extrusora de filamento para impresoras 3D		Unidades:	mm
		Lámina:	6
Esc: 3:1	Cabezal carcasa		
II Término			



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL FACULTAD DE INGENIERÍA EN MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN		Tutor:	M.Sc. J. Leon
		Alumno:	N. Pilco D. Velasco
espol		Fecha:	02/08/2023
		Unidades:	mm
Diseño y validación de una extrusora de filamento para impresoras 3D		Lámina:	2
		Esc:	1/2
II Término		Tolva	

--	--