

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Diseño de una máquina extrusora para la producción de filamento, a partir
de material residual

INGE-2723

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Mecatrónica

Presentado por:

Edison Eniber Egas Espin

Karla Nicholle Moscoso Arrieta

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi madre, Janeth Espin, quien es el motor de mi vida y la dueña de todos mis éxitos, tanto presentes como futuros. También a mi padre, Edison Egas, mi inspiración y modelo a seguir, quien me alentó y guió a lo largo de mi carrera.

Con especial cariño, recuerdo a mis abuelos, Georgina Espin y Euclides Espin, quienes me llenaron de amor y dejaron en mí un recuerdo imborrable que siempre llevaré en el corazón.

Edison Egas Espín

Dedicatoria

Dedico este trabajo a todas las personas que se sienten perdidas, a quienes dudan de su capacidad. Recuerden que un tropezón no es caída, y aunque el camino parezca difícil, siempre se puede avanzar.

Karla Moscoso Arrieta

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme la vida y la fortaleza para avanzar en este proceso. A mi familia, quienes siempre han sido un pilar fundamental en mi camino: a mi tía Mery y mi primo Henry, quienes siempre buscan guiarme por el mejor camino; y a mi prima Patricia, por ser un apoyo incondicional a lo largo de toda mi carrera.

A mis amigos, quienes han sido mi apoyo emocional y me han permitido avanzar con seguridad en esta travesía, a los que me acompañan desde el colegio y a los que conocí durante este camino académico.

Agradezco a mi padre y a mi madre por darme la oportunidad de seguir este camino y por su amor y apoyo incondicional. A mi compañera de tesis, Karla, quien supo llevar este proyecto adelante conmigo.

Edison Egas

Agradecimientos

Agradezco a mi mami, porque siempre me hizo creer que podía hacer lo que me propusiese.

A Edison y a Brank, porque fueron pilar fundamental en el transcurso de la carrera, me apoyaron y estuvieron en esos momentos de dudas.

A mis amigas, que siempre fueron incondicionales y llenaron mi vida de risas y alegrías. Gracias por escucharme cuando lo necesitaba, por alentarme cuando quería rendirme y por ser mi voz de la razón.

Karla Moscoso Arrieta

Declaración Expresa

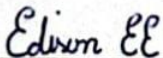
Nosotros **Edison Eniber Egas Espín y Karla Nicholle Moscoso Arrieta** acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 11 de Octubre del 2024.



Edison Eniber Egas Espin



Karla Nicholle Moscoso Arrieta

Evaluadores

Jonathan León Torres, M.Sc.

Profesor de Materia

Marcelo Fajardo Pruna, Ph.D.

Tutor de proyecto

Resumen

En Ecuador, la producción de filamento es prácticamente inexistente, lo que genera una fuerte dependencia de las importaciones. Adicional a ello, la impresión 3D genera una gran cantidad de residuos, lo que no solo lo convierte en un problema económico, sino ambiental. Este proyecto tiene como objetivo diseñar una máquina extrusora para la producción de filamento 3D a partir de material residual. Los resultados incluyen el diseño de un sistema de enfriamiento que mantiene al filamento en condiciones térmicas controladas durante su desplazamiento por el sistema, un sistema de embobinado, que regula de manera precisa la salida del filamento y garantiza un flujo constante del mismo, además de un análisis de las proporciones de filamento virgen y residual para un procesamiento eficiente y una mejor calidad. Para comprender de mejor manera el comportamiento de la máquina extrusora se analizaron gráficas dinámicas y esfuerzos térmicos, lo cual permitió identificar problemas dentro del diseño y plantear soluciones. En conclusión, el diseño de una máquina extrusora ayudaría a una economía circular y sostenible, además de apoyar a la producción y consumo local,

Palabras claves: filamento, máquina extrusora, impresión 3D, desechos.

Abstract

Filament production in Ecuador is practically non-existent, which generates a strong dependence on imports. In addition, 3D printing generates a large amount of waste, which is not only an economic problem but also an environmental one. This project aims to design an extruder machine to produce 3D filament from waste material. The results include designing a cooling system that maintains the filament in controlled thermal conditions during its movement through the system. This winding system precisely regulates the output of the filament. It guarantees a constant flow of the filament and an analysis of virgin and waste filament proportions for efficient processing and better quality. To understand the behavior of the extruder machine, dynamic graphs and thermal stresses were analyzed, which made it possible to identify problems within the design and propose solutions.

In conclusion, the design of an extruder machine would help a circular and sustainable economy and support local production and consumption.

Keywords: *filament, extruder machine, 3D printing, waste.*

Índice general

Resumen	I
Abstract.....	II
Abreviaturas.....	V
Simbología.....	VI
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	VIII
Índice de planos	IX
Capítulo 1	1
1.1. Introducción.....	2
1.2. Descripción del problema	2
1.3. Justificación del problema	3
1.4. Objetivos	4
1.4.1. Objetivo general	4
1.4.2. Objetivos específicos	5
1.5. Marco teórico	5
Capítulo 2	11
2.1. Metodología.....	12
2.2. Análisis de requerimientos.....	12
2.3. Soluciones	14
2.3.1. Soluciones alternativas.....	14
2.3.2. Criterios de selección.....	16
2.3.3. Evaluación de criterios.....	17
2.3.4. Etapas de diseño.....	20
2.3.5. Diseño conceptual	21
2.3.6. Diseño de control	23

2.3.7.	Modelo mecánico y de control	26
2.3.8.	Validación y simulación	29
Capítulo 3	30
3.1.	Diseño preliminar	31
3.2.	Ecuaciones asociadas	32
3.3.	Selección del tornillo de extrusión	35
3.4.	Sistema de enfriamiento	36
3.5.	Sistema de embobinado	37
3.6.	Diseño CAD	39
3.7.	Uso de materia prima y PLA reciclado	40
3.8.	Simulaciones índices de desempeño	41
3.9.	Análisis de tensión tornillo	43
3.10.	Análisis térmico	44
3.11.	Gráficas dinámicas	46
3.12.	Análisis de costos	49
Capítulo 4	55
4.1.	Conclusiones y recomendaciones	56
4.1.1.	Conclusiones	56
4.1.2.	Recomendaciones	57
Referencias	58
Apéndices	62

Abreviaturas

ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno
AMS	Automatic Material System (Sistema de material automático)
CAGR	Compound annual growth rate (Tasa de crecimiento anual compuesto)
FDM	Fused Deposition Modeling (Modelo por deposición fundida)
PETG	Polietileno tereftalato de glicol
PLA	Ácido Poliláctico
TIR	Tasa interna de retorno
VAN	Valor Actual Neto

Simbología

ω_f	Ancho del filete
θ	Ángulo del filete
C_p	Calor específico
h	Coefficiente de transferencia de calor
τ	Constante de tiempo térmica
ρ	Densidad
D	Diámetro
Q	Flujo de aire
\dot{m}	Flujo másico
L	Longitud
Σ	Sumatoria
P_t	Paso de tornillo
H	Profundidad del canal
R	Radio
T	Temperatura
q	Transferencia de calor

Índice de figuras

Figura 1.1. Zona de extrusora	10
Figura 2.1. Doble husillo engranado	14
Figura 2.2. Doble husillo no engranado	15
Figura 2.3. Extrusora de un solo husillo	16
Figura 2.4. Proceso de diseño para la elaboración de la solución	21
Figura 2.5. Flujo de trabajo de máquina extrusora	22
Figura 2.6. Diseño conceptual de la máquina extrusora.....	23
Figura 2.7. Sistema de calefacción	24
Figura 2.8. Secciones del diseño de extrusor.....	25
Figura 2.9. Función de transferencia continua G1.....	25
Figura 2.10. Función de transferencia continua G1.....	26
Figura 2.11. Diagrama de bloques.....	26
Figura 3.1. Diagrama estándar de una máquina extrusora	32
Figura 3.2. Sistema de enfriamiento	37
Figura 3.3. Sistema de embobinado	38
Figura 3.4. Diseño de la máquina extrusora	39
Figura 3.5. Vista interna de componentes	39
Figura 3.6. PI y respuesta de la zona de alimentación.....	41
Figura 3.7. PI y respuesta de la zona de dosificación.....	42
Figura 3.8. Respuesta de la zona de dosificación	42
Figura 3.9. Coeficiente de seguridad	43
Figura 3.10. Tensión de Von Mises.....	44
Figura 3.11. Simulación del gradiente térmico	45
Figura 3.12. Flujo de calor.....	45
Figura 3.13. Temperatura	46
Figura 3.14. Gráfica de momento vs tiempo	47
Figura 3.15. Gráfica de fuerza vs tiempo	48
Figura 3.16. Gráfica de aceleración vs tiempo	48
Figura 3.17. Gráfica velocidad vs tiempo.....	49

Índice de tablas

Tabla 2.1. Requerimientos del cliente	13
Tabla 2.2. Criterios de selección y peso específico	17
Tabla 2.3. Evaluación peso específico - Adquisición de repuestos y componentes.....	18
Tabla 2.4. Evaluación peso específico - Costos de desarrollo y escalabilidad.....	18
Tabla 2.5. Evaluación peso específico - Facilidad de mantenimiento y vida útil	19
Tabla 2.6. Evaluación peso específico - Calidad del producto final	19
Tabla 2.7. Evaluación final de los criterios de selección	20
Tabla 2.8. Propiedades del material.....	24
Tabla 3.1. Especificaciones del tornillo.....	35
Tabla 3.2. Comparación proporción material virgen y reciclado	40
Tabla 3.3. Costos	50
Tabla 3.4. Costo del pellet PLA	50
Tabla 3.5. Costos de materia prima en baja producción.....	51
Tabla 3.6. Costos de materia prima en media producción.....	51
Tabla 3.7. Costos de materia prima en alta producción.....	51
Tabla 3.8. Distribución de la inversión inicial	52
Tabla 3.9. Costos y gastos mensuales	52
Tabla 3.10. Flujo de caja mensual según porcentaje de ventas	53

Índice de planos

INGE-2723.1. Vista explotada de la máquina extrusora

INGE-2723.2. Plano cilindro

INGE-2723.3. Plano tornillo sin fin

INGE-2723.4. Plano tolva

INGE-2723.5. Plano boquilla

INGE-2723.6. Plano acoples

INGE-2723.7. Plano Case

INGE-2723.8. Plano soportes

INGE-2723.9. Plano base

Capítulo 1

1.1. Introducción

La manufactura aditiva consiste en unir material para construir formas físicas de un modelo 3D predefinido o diseñado. Esta tecnología se ha consolidado como una herramienta clave para la producción de diseños en diversos campos de la ingeniería, e incluso en áreas como la agricultura, medicina y cartografía [1].

Gracias a la innovación y versatilidad en sus diseños, además de la reducción de costos y tiempos de producción, las impresiones 3D han cobrado popularidad a lo largo de los años [2].

Así, a medida que la industria de impresión 3D crece, también aumenta la demanda de filamento, impulsando la necesidad de contar con extrusoras de filamento [3]. Estas máquinas permiten la producción del material bajo ciertas condiciones, con diámetros específicos y acordes a las necesidades del usuario.

En cuanto a las técnicas más utilizadas en tecnología de impresión 3D, se conoce al modelado por deposición fundida (FDM), en el cual predomina el filamento de polímero como material base [4].

No obstante, y a pesar de los grandes avances de esta tecnología y su popularidad en crecimiento, en el ámbito nacional, la producción de filamento para impresión 3D es prácticamente inexistente, lo cual genera una alta dependencia de productos importados [5]. Esta situación incrementa los costos de adquisición y limita la accesibilidad para pequeños fabricantes, instituciones educativas y laboratorios de investigación, pues en el mercado ecuatoriano el filamento tiene un costo entre \$20 a \$30 por kilo [6].

1.2. Descripción del problema

El crecimiento acelerado en el uso de la impresión 3D en los últimos años ha impulsado su adopción en múltiples sectores, incluyendo la industria, la educación y el ámbito doméstico [7]. Sin embargo, este avance ha traído consigo un incremento

considerable en el desperdicio de filamento. Entre el 5% y 10% de productos de impresión son desechos [8], derivado principalmente de impresiones fallidas y del uso de soportes necesarios para producir piezas complejas.

A nivel mundial, el mercado de impresión 3D industrial proyecta un notable crecimiento, pasando de 2,100 millones de dólares en 2021 a 5,200 millones de dólares en 2026, con una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 20%. Sin embargo [9], en el contexto local, esta expansión depende exclusivamente de las importaciones de filamento.

1.3. Justificación del problema

Dentro de la empresa, el departamento de impresión 3D enfrenta varios factores que contribuyen al desperdicio de filamento. Mensualmente, se utilizan filamentos de 1000 gramos para la fabricación de piezas. Del total de material utilizado, el 10% se pierde en las estructuras de soporte, lo que representa unos 100 gramos de filamento desperdiciado por cada carrete. Además, en la fase de prueba y error de diseño, el porcentaje de filamento desperdiciado puede variar entre el 10% y el 50%, dependiendo del tamaño de la pieza que se desee fabricar. Las descalibraciones de las máquinas también provocan errores en las impresiones, incrementando el desperdicio, mientras que los cortes de energía generan una pérdida de filamento por cada lote de piezas interrumpido [10]. A esto se suma la falta ocasional de disponibilidad de filamento de PETG negro en el mercado, lo que detiene la producción de piezas específicas.

Además de la producción interna, el departamento diseña piezas para otras empresas y ofrece servicios de impresión, ampliando sus actividades y su alcance de servicios. También, se observa que algunos carretes de filamento, especialmente aquellos de PLA o PETG destinados a trabajos específicos, pueden dañarse por exposición a la humedad cuando no se usan con frecuencia, dado que el tiempo de vida útil del filamento

es de aproximadamente 1 a 2 años si se almacena en condiciones adecuadas [11]. Cabe mencionar que, según estudios en la industria, algunas empresas de impresión 3D reportan niveles de desperdicio de hasta un 30% del material debido a diversos factores en el proceso de fabricación [12].

Recientemente, se han implementado sistemas de cambio automático de filamento, como los módulos AMS (Automatic Material System) de Bambu Lab [13], el ACE Pro (Anycubic Color Engine Pro) en la Anycubic Kobra 3 [14] y el CFS (Creality Filament System) en la Creality K2 [15], que permiten imprimir en múltiples colores o materiales sin intervención manual. Aunque esta tecnología facilita la creación de piezas complejas y multicolor, genera cierto desperdicio de material en el proceso de purga del filamento antiguo al nuevo color. Según estudios, esta tecnología puede contribuir entre un 5% y un 15% de desperdicio adicional debido a la necesidad de limpiar el filamento previo en el cambio de color, lo cual resalta la importancia de contar con un sistema de reciclaje para gestionar los restos generados en el proceso [16]. Si se implementara una máquina de reciclaje de filamento en la empresa, se podría reducir de manera significativa el porcentaje de desperdicio al reutilizar el material sobrante de impresiones fallidas, purgas para cambio de filamento o soportes, al tiempo que se aumentaría el stock de filamento disponible en el país, contribuyendo a la sostenibilidad y eficiencia del proceso de producción.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de extrusión y bobinado de filamento a partir de material reciclado o virgen con el fin de reducir el porcentaje de desechos generados por el proceso de fabricación aditiva.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Estudiar las características técnicas para la fabricación de filamento 3D a partir de material reciclado que permita establecer las especificaciones del sistema.
2. Evaluar y seleccionar los elementos del sistema que permitan un funcionamiento eficiente, garantizando un producto óptimo.
3. Simular el funcionamiento del sistema para validar el cumplimiento de los parámetros requeridos.
4. Estandarizar el procedimiento de obtención de filamento 3D a partir de material reciclado.
5. Analizar el impacto económico de la implementación del sistema propuesto.

1.5. Marco teórico

En el campo de la impresión 3D, el interés por desarrollar tecnologías sostenibles ha impulsado el reciclaje de materiales tales como filamentos antiguos, soportes de impresión, impresiones fallidas y residuos de purga. La producción de filamento reciclado no solo responde a la necesidad de reducir los desechos plásticos, sino que también promueve la eficiencia en el uso de recursos, ofreciendo una alternativa más económica y ecológica. Para cumplir estos objetivos, diferentes investigaciones han explorado el diseño y optimización de extrusoras capaces de procesar estos materiales de desecho.

Agbakoba et al. [17] desarrollaron una extrusora compacta para procesar desechos de impresión, tales como soportes e impresiones fallidas. A través de un análisis termomecánico del PLA reciclado, demostraron que es posible fabricar un filamento de calidad para la impresión 3D, mostrando cómo se puede optimizar el proceso de extrusión para adaptarse a materiales reciclados con propiedades distintas.

En el contexto del diseño específico de una máquina extrusora, Castro Soldevila [18] desarrolló un sistema de extrusión adaptable a diferentes materiales reciclados. Su

investigación incluyó el diseño de componentes como el tornillo y la cámara de calentamiento, optimizados para filamentos reciclados. Al ajustar el diámetro del tornillo y la temperatura de la cámara, el sistema logra mayor precisión y consistencia en la calidad del filamento producido a partir de materiales reciclados. Este estudio ayuda a comprender la relación entre el diseño de componentes específicos en una extrusora y la mejora del procesamiento de materiales de desecho en impresión 3D.

Asimismo, Stoof [19] abordó la creación de una máquina extrusora para materiales compuestos reciclados, destacando la importancia de componentes como el control de la velocidad del tornillo y el sistema de enfriamiento para evitar la degradación del filamento. En su investigación, Stoof detalla cómo el control preciso de la velocidad y temperatura dentro de la extrusora mejora la estabilidad del filamento, reduciendo defectos en su estructura y aumentando su resistencia mecánica. Este trabajo es relevante en la configuración de extrusoras para el uso de materiales reciclados, ya que ayuda a mejorar tanto la calidad como la eficiencia del proceso de extrusión.

En Ecuador existen pocos proyectos enfocados a la fabricación o reciclaje de desperdicios de filamento, uno de los más destacables es el realizado por estudiantes de la Universidad de Loja [20] cuyo innovador proyecto “Extrusora Pet Recic: Sistema de Reciclaje de Botellas de Plástico para la Producción de Filamento de Impresora 3D” obtuvo el tercer lugar en la III Feria Tecnológica Centro Paula Souza. Este sistema convierte botellas de plástico en filamento con una anchura de 1.75 milímetros, adicional a ello, desarrollaron una aplicación móvil que les permite controlar el sistema de forma remota. Este tipo de proyectos destaca la importancia de trabajar en conjunto con la tecnología y la sostenibilidad.

Otro proyecto similar se desarrolló en Colombia, donde dos jóvenes de la Universidad Autónoma de Occidente diseñaron e implementaron un sistema que

convierten botellas y recipientes de plástico en filamento [21]. Consta de dos etapas de procesamiento de material reciclado, la primera se encarga de triturar el material por medio de un sistema de cuchillas, y la segunda extruye el plástico triturado para convertirlo en producto final. Todo este proceso se lleva a cabo mediante un extrusor con un tornillo sin fin donde se funde el material y luego es empujado por la boquilla con un diámetro de 1.75mm. Las limitantes presentes en este proyecto se fundamentan en la resistencia y propiedades mecánicas de los productos impresos con este tipo de material, pues para impresiones 3D los materiales más usados son PLA y ABS.

TetraPak Ecuador realizó una colaboración con la empresa recicladora Ecorevive y con el grupo Maip Compounding para crear ALFAPAK 3D, un filamento hecho a base de polietileno y aluminio (PolyAl) [22] que se deriva de reciclar los envases de bebidas. Este material es ideal para entornos exteriores, a diferencia del plástico común, el PolyAl presenta mayor resistencia a la degradación si es expuesto a condiciones climáticas, como una exposición prolongada al sol.

En resumen, estos estudios representan un avance significativo en el diseño y optimización de extrusoras para producir filamentos reciclados en impresión 3D. Cada investigación aporta ideas clave sobre cómo manejar y procesar materiales reciclados, desde ajustes en la temperatura y presión de extrusión hasta estrategias de purga y diseño de componentes específicos como el tornillo y el sistema de enfriamiento. Esto proporciona una base para el desarrollo de extrusoras sostenibles que no solo permitan reciclar materiales de desecho, sino que también promuevan prácticas sostenibles en la fabricación aditiva.

En términos generales, el proceso de extrusión consiste en la formación de objetos con perfiles transversales constantes mediante la presión ejercida sobre un material,

forzándolo a pasar a través de una matriz que tiene la forma de la sección transversal deseada [23].

Este método se aplica a una amplia variedad de materiales, incluyendo metales, polímeros, cerámica, hormigón, arcilla para modelar y productos alimenticios, permitiendo la fabricación eficiente de componentes con formas complejas y uniformes a lo largo de toda su longitud [24].

Para llevar a cabo este proceso se hace uso de máquinas extrusoras, en la primera fase ingresa el material a la zona de alimentación, para fundirlo y mezclarlo uniformemente bajo la acción de un tornillo. Una vez el insumo es extruido, pasa por un proceso de enfriamiento y finalmente a la zona de solidificación, donde se moldea, de acuerdo con la forma deseada, en función de las características requeridas. Es esencial que en cada una de las etapas se lleve un control precioso de variables como presión, temperatura y velocidad, porque alguna anomalía en estos puntos puede afectar en la calidad del producto final [25].

La eficiencia y calidad del proceso de extrusión dependen en gran medida de parámetros clave del tornillo extrusor, tales como su longitud, diámetro, y relación de compresión. Estos parámetros influyen en la presión, la cantidad de calor generada por fricción, y el tiempo de residencia del material en el tornillo, lo cual afecta directamente la viscosidad, homogeneidad y consistencia del producto final [26]. Para la elección del tornillo, es necesario tomar en consideración los puntos antes mencionados.

- **Longitud**

Influye en el desempeño de la máquina. A mayor longitud, aumenta la capacidad de plastificación y productividad de la máquina. Adicionalmente mejoraría la calidad de mezclado y homogeneización del material.

Se necesita un extrusor de longitud mayor, para llevar un control preciso de la temperatura, es decir, fundir el material antes de llegar al final, y en la longitud sobrante se mezclará hasta la homogeneidad.

- **Diámetro**

Esta medida influye en la capacidad de producción de la máquina. A mayor diámetro, la capacidad en kg/h es superior. Es importante tomar en cuenta que la incrementar el diámetro, se debe incrementar la longitud del husillo y a su vez, requiere mayor potencia para mover el material [27].

Es por ello por lo que se debe considerar especificaciones como una relación longitud/diámetro.

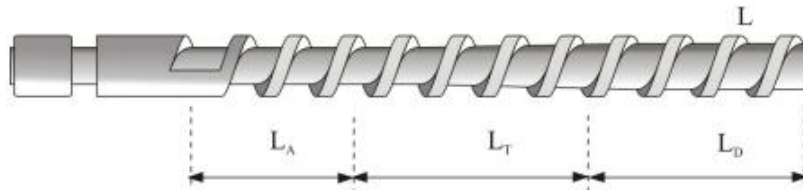
- **Relación L/D**

La relación ideal para polímeros termoplásticos debería estar entre 10:1 y 30:1 [28]. A mayor L/D, mejor homogeneización del material y mayor presión, lo que mejora la calidad del filamento. No obstante, si es muy alto, podría generar mayor fricción, ocasionando una degradación térmica del PLA.

- **Relación de compresión**

Es la relación que existe entre la profundidad del filete en la alimentación y en la descarga. Debe ser siempre mayor a uno y depende del material, para el PLA comúnmente es 3:1 [29]. A menor compresión, la fusión puede ser ineficiente, y a mayor compresión puede existir exceso de presión.

Las extrusoras tienen 3 zonas que se deben tomar en consideración: zona de alimentación, zona de transición y zona de dosificación; tal y como se aprecia en la Figura 1.1.

Figura 1.1.*Zona de extrusora [28]*

Primero se tiene la zona de alimentación L_A , esta etapa es la más cercana a la tolva y compacta el material en una forma sólida densa, para luego dar paso a la siguiente zona. Es importante que esta zona esté a una temperatura controlada, para evitar una fusión prematura y que luego existan problemas de flujo [30].

Como segundo punto está la zona de transición L_T , aquí toma lugar la fusión del material, a medida que el material sólido se compacta, el aire que pudiera quedar atrapado escapa del material vía la tolva de alimentación [28]. Finalmente está la zona de dosificación L_D , aquí la profundidad del canal es muy pequeña y constante, se homogeniza el material y es presurizado para pasar por la boquilla de conformado.

Capítulo 2

2.1. Metodología.

Para comenzar a abordar el diseño de la arquitectura de una máquina extrusora de filamento, se describen las etapas clave que incluyen la formulación de alternativas de solución, el diseño del sistema y parámetros de control. Se proporciona una guía estructurada para comprender el flujo de trabajo en la producción de filamento, enfatizando las herramientas y tecnologías que garantizan su eficiencia y sostenibilidad

El problema radica en la escasez de producción local de filamento para impresión 3D y la alta dependencia de materiales importados. Con el objetivo de encontrar una solución sostenible y efectiva, se analizaron tres posibles alternativas, evaluando su viabilidad técnica, económica y ambiental.

2.2. Análisis de requerimientos

Primero, es fundamental llevar a cabo un análisis exhaustivo de los requerimientos, con el objetivo de desarrollar una solución que cumpla con todos los parámetros establecidos y garantice su viabilidad técnica y funcional.

Para los requerimientos del cliente se consideraron variables como la gestión, accesibilidad de los componentes y materiales, mantenimiento de la máquina extrusora, material a procesar y la forma de ingreso, además del diámetro y tolerancia del filamento final, todo lo antes expuesto se detalla en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1.*Requerimientos del cliente*

Cliente: Geyer Ecuador		Producto: Máquina extrusora de filamento	
Especificaciones			
Concepto		Descripción	
Gestión		Brindar un sistema de procesamiento de filamento reciclado en material funcional.	
Accesibilidad		La selección de componentes debe enfocarse en aquellos disponibles dentro del territorio nacional, asegurando que, al reducir la dependencia de filamento importado, se minimice también la necesidad de recurrir a piezas provenientes del extranjero para la fabricación de la máquina extrusora.	
Mantenimiento		Los componentes deben ser accesibles y desmontables, para que el usuario pueda realizar un mantenimiento periódico y correcto sin períodos prolongados de inactividad.	
Material		Se define como material a procesar al PLA, el cual ingresará a la tolva en forma de escamas trituradas. Adicionalmente se hará uso de una proporción 70% material virgen (pellets de PLA) y 30% de material PLA residual.	
Diámetro y tolerancia		Diámetro del filamento: Uniformidad en medidas de 1.75 mm. Tolerancia: ± 0.05 mm en el diámetro del filamento.	

2.3. Soluciones

2.3.1. Soluciones alternativas

Durante el desarrollo del sistema, se evaluaron diversos modelos para la extrusora, de donde destacan 3 tipos: extrusoras de un solo husillo, de doble husillo engranado y de doble husillo no engranado.

Para ello se realizó un estudio de cada uno de los modelos:

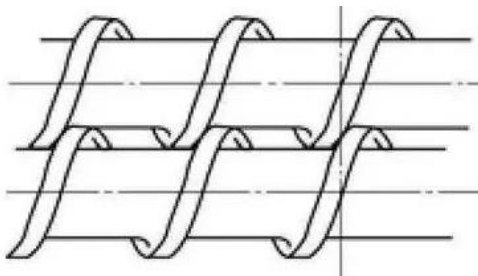
- **Alternativa 1: Extrusora de doble husillo engranado**

Este sistema consta de dos tornillos paralelos que giran en sentido opuesto dentro de un cilindro a una temperatura alta adecuada, el desplazamiento es hacia adelante, pero el avance depende de la proximidad de los husillos (Figura 2.1).

Entre las ventajas que destacan en este tipo de husillo se encuentra mayor transporte de material, capacidad de mezcla mayor, y mayor productividad, no obstante, el costo de fabricación y producción es elevado y la estructura es poco compacta.

Figura 2.1.

Doble husillo engranado [31]



- **Alternativa 2: Extrusora de doble husillo no engranado**

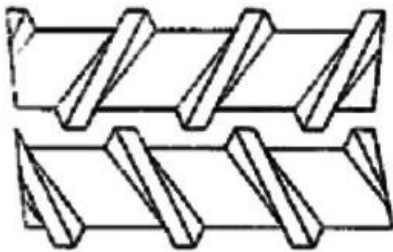
En este tipo de extrusora, la distancia entre los ejes de los tornillos es igual o mayor que la suma de sus radios exteriores. Los tornillos tienen movimiento independiente, lo que significa que pueden girar tanto en la misma dirección

como en direcciones opuestas (Figura 2.2), a diferencia de los sistemas engranados, donde el giro siempre es contrario.

Este diseño ofrece ventajas similares a las extrusoras de doble husillo engranado en términos de producción y eficiencia en la extrusión. Además, reduce la acumulación de material residual en el cilindro y los husillos, lo que facilita la limpieza y el mantenimiento. Sin embargo, los costos de fabricación y producción de este tipo de extrusoras son considerablemente altos.

Figura 2.2.

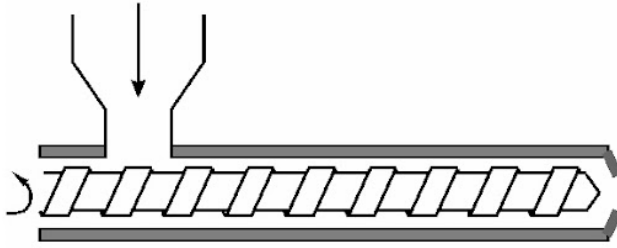
Doble husillo no engranado [31]



- **Alternativa 3: Extrusora de husillo simple**

Es el sistema más simple (Figura 2.3), consta de un solo tornillo que gira constantemente. Una vez el material ingresa, se calentará el sistema a una temperatura adecuada y se producirá la mezcla y finalmente la dosificación.

Una de las ventajas frente a las otras dos opciones es el costo bajo de mantenimiento y construcción, además que su diseño simple permite que la construcción y tareas de mantenimiento y operación sean sencillas. No obstante, tiene un nivel de precisión en la salida menor a las otras dos opciones, por las cuales podría afectar al diámetro requerido del filamento.

Figura 2.3.*Extrusora de un solo husillo [32]*

2.3.2. Criterios de selección

Una estrategia para determinar la solución adecuada es aplicar criterios de selección entre las alternativas antes expuestas, donde se incluyen las limitaciones técnicas y económicas.

- **Adquisición de repuestos y componentes:** Se evalúa la disponibilidad y accesibilidad de los componentes a nivel local, con el objetivo de reducir la dependencia de importaciones y garantizar un suministro continuo.
- **Costos de desarrollo y escalabilidad:** Se analiza el aspecto económico, contemplando los costos asociados a la adquisición de materiales, componentes, instalación, mantenimiento y el potencial para ampliar la capacidad o funcionalidad del sistema en el futuro.
- **Facilidad de mantenimiento y vida útil:** Se priorizan diseños que simplifiquen las tareas de mantenimiento, reduzcan los tiempos de inactividad y prolonguen la vida útil de la máquina para asegurar su operación eficiente a largo plazo.
- **Calidad del producto final:** Se valora la capacidad de la máquina para producir filamento de alta calidad que cumpla con los estándares requeridos para aplicaciones específicas.

Tabla 2.2.*Criterios de selección y peso específico*

Criterio	Adq. de rep y comp.	Costos de desarrollo y escal.	Fac, de mtto y vida útil	Calidad del producto final	$\Sigma+1$	Pond.	
Adq. de rep. y comp.	NA		1	1	1	4	0.40
Costos de desarrollo y escal.	0	NA		1	1	3	0.30
Fac. de mtto y vida útil	0	0	NA		1	2	0.2
Cal. prod. final	0	0	0	NA		1	0.1
Suma					10	1	

Las ponderaciones descritas en la Tabla 2.2 se evaluaron a partir de la incidencia del criterio en el diseño propuesto, dando como resultado la siguiente prioridad:

- Adquisición de repuestos y componentes.
- Costos de desarrollo y escalabilidad.
- Facilidad de mantenimiento y vida útil.
- Calidad del producto final.

2.3.3. Evaluación de criterios

Los criterios establecidos se diseñaron para atender de manera precisa las necesidades del usuario, considerando tanto las limitaciones económicas como las del

entorno operativo. En esta sección, cada solución alternativa propuesta fue contrastada y evaluada sistemáticamente con base en estos criterios.

Para la evaluación de las alternativas, se asignó un determinado valor definido de la siguiente manera:

1 → Criterio de filas superior al de las columnas.

0.5 → Criterio de filas equivalente al de las columnas.

0 → Criterio de filas inferior al de las columnas.

En la evaluación del criterio “Adquisición de repuestos y componentes” expuesto en la Tabla 2.3, se obtuvo *Alternativa 3 > Alternativa 2 = Alternativa 1*.

Tabla 2.3.

Evaluación peso específico - Adquisición de repuestos y componentes

Adquisición de repuestos y componentes					
Criterio	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3		
Alternativa 1	NA	0.5	0	1.5	0.25
Alternativa 2	0.5	NA	0	1.5	0.25
Alternativa 3	1	1	NA	3	0.5
				6	1

En la evaluación del criterio “Costos de desarrollo y escalabilidad”, detallado en la Tabla 2.4, se obtuvo *Alternativa 3 > Alternativa 2 = Alternativa 1*.

Tabla 2.4.

Evaluación peso específico - Costos de desarrollo y escalabilidad

Costos de desarrollo y escalabilidad					
Criterio	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3		
Alternativa 1	NA	0.5	0	1.5	0.25
Alternativa 2	0.5	NA	0	1.5	0.25
Alternativa 3	1	1	NA	3	0.5
				6	1

En la evaluación del criterio “Facilidad de mantenimiento y vida útil”, descrito en la Tabla 2.5, se obtuvo *Alternativa 3 > Alternativa 2 > Alternativa 1*.

Tabla 2.5.

Evaluación peso específico - Facilidad de mantenimiento y vida útil

Facilidad de mantenimiento y vida útil					
Criterio	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3		
Alternativa 1	NA	0	0	1	0.17
Alternativa 2	1	NA	0	2	0.33
Alternativa 3	1	1	NA	3	0.5
				6	1

En la evaluación del criterio “Calidad del producto final”, expuesta en la Tabla 2.6, se obtuvo *Alternativa 1 > Alternativa 2 > Alternativa 3*.

Tabla 2.6.

Evaluación peso específico - Calidad del producto final

Calidad del producto final					
Criterio	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3		
Alternativa 1	NA	1	0.5	2.5	0.42
Alternativa 2	0	NA	1	2	0.33
Alternativa 3	0.5	0	NA	1.5	0.25
				6	1

De acuerdo con las evaluaciones de cada criterio, la mejor opción es la alternativa 3: Extrusora de un solo husillo, de la cual únicamente en la calidad del producto final es relativamente menor a las otras dos alternativas. No obstante, en cuanto a adquisición de componentes, el costo de desarrollo y facilidad de mantenimiento la convierten en la ideal para los requerimientos de la máquina extrusora. Este enfoque permitió identificar la opción óptima mediante un procedimiento estructurado y basado en evidencia, tal como se presenta en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7.*Evaluación final de los criterios de selección*

Alt.	Adquisición de repuestos y componentes		Costos de desarrollo y escalabilidad		Facilidad de mantenimiento y vida útil		Calidad del producto final		Σ	Prio.
	Pond	Peso	Pond	Peso	Pond	Peso	Pond	Peso		
1	0.25	0.4	0.25	0.3	0.17	0.2	0.42	0.1	0.251	3
2	0.25	0.4	0.25	0.3	0.33	0.2	0.33	0.1	0.274	2
3	0.5	0.4	0.5	0.3	0.5	0.2	0.25	0.1	0.475	1

2.3.4. Etapas de diseño

Para un correcto proceso de diseño, es importante aplicar un proceso sistemático de desarrollo de soluciones, tal y como se presenta en la Figura 2.4.

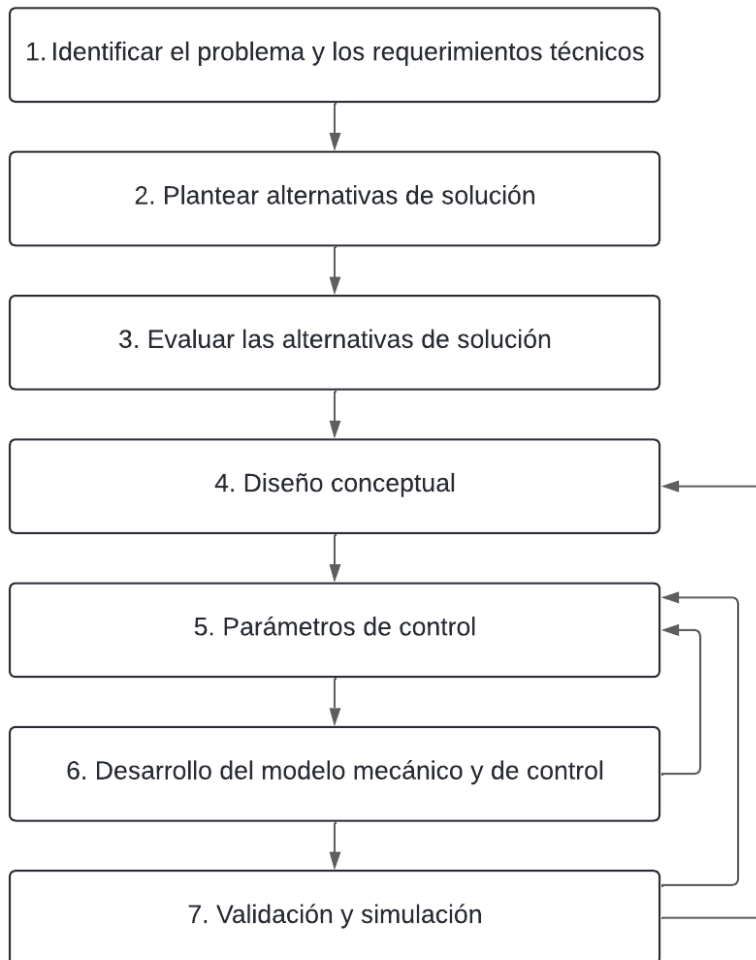
En la etapa 1 se debe identificar el problema y los requerimientos técnicos, pues de esta manera se tiene una visión más detallada del problema y el proceso se alinea con las necesidades reales del cliente. La etapa 2 permite generar ideas y plantear distintos enfoques que permitan resolver el problema antes identificado, dando paso a la etapa 3, donde se evalúan las alternativas propuestas, tomando en consideración criterios técnicos, económicos y de viabilidad, y así elegir la solución más efectiva.

Una vez se ha elegido la solución más adecuada, se empieza con el diseño conceptual en la etapa 4, aquí se presentan los principales componentes y el funcionamiento del sistema. Posterior a ello, en la etapa 5 se diseña el sistema de control que permitirá operar el diseño de manera más eficiente y confiable, esta etapa es esencial para que el sistema pueda responder a las condiciones que se plantearon inicialmente.

Para la etapa 6, se integran la parte mecánica con la de control, para obtener un sistema embebido funcional, que se validará en la etapa 7, donde se probará el sistema mediante simulaciones en busca del cumplimiento de los objetivos y requerimientos.

Figura 2.4.

Proceso de diseño para la elaboración de la solución



2.3.5. Diseño conceptual

Para el diseño de la máquina extrusora, se tomaron en consideración diversos factores, entre ellos la elección del tornillo. Se consideró un tornillo de compresión debido a sus ventajas en cuanto a reducción de defectos, fusión uniforme, eliminación de aire atrapado.

La alta presión en la zona de compresión elimina burbujas de aire, comunes en materiales triturados, de esta manera se mejora la calidad del filamento [33], adicionalmente si se le suma el calor en dicha zona, las partículas irregulares del material reciclado se funden de manera uniforme [34]

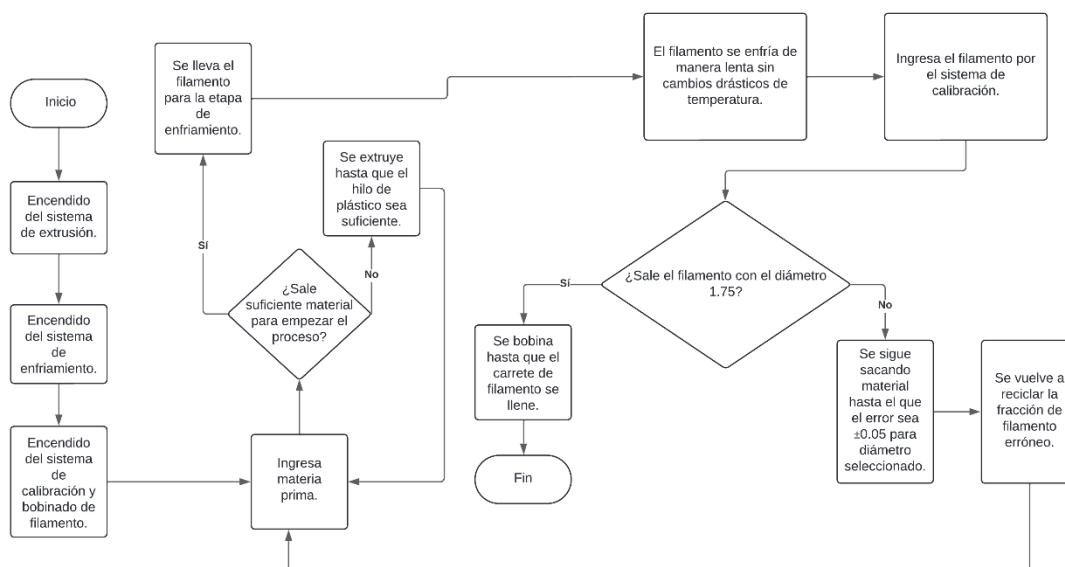
Los cambios en la profundidad del canal generan fuerzas de cizallamiento, lo cual homogeniza el material, reduciendo la porosidad y falta de cohesión [35]

Una característica esencial de este tipo de tornillo es que; a diferencia de tornillos de baja compresión, maneja la variabilidad en tamaño y propiedades del material reciclado [36]

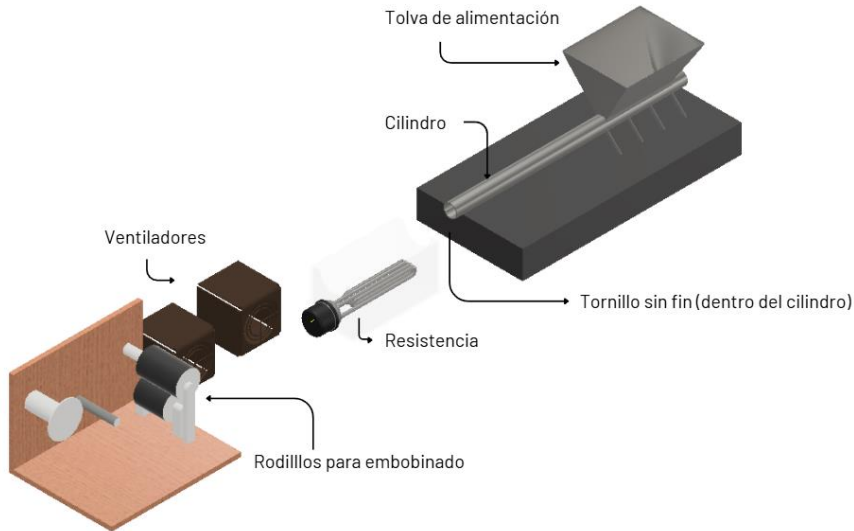
Una vez seleccionados los componentes correspondientes, se procedió a plantear el flujo de trabajo de la máquina extrusora, tal como se detalla en la Figura 2.5.

Figura 2.5.

Flujo de trabajo de máquina extrusora



Se cuenta con un sistema de alimentación que empieza por la tolva, donde ingresa el material a procesarse, para luego ser empujado por el tornillo sin fin; que se encuentra protegido por un cilindro de acero inoxidable. La resistencia y los ventiladores son parte del sistema de enfriamiento, que mantiene al material en temperatura adecuada para evitar su temprana fusión o posible cristalización. Finalmente, pasa por la etapa de embobinado, donde un rodillo se encarga de regular la salida del filamento, tal y como se aprecia en la Figura 2.6.

Figura 2.6.*Diseño conceptual de la máquina extrusora*

2.3.6. Diseño de control

Para el control de la temperatura se hizo uso de un controlador PI. Por ello inicialmente se establecieron los parámetros claves del sistema y las condiciones de operación. Entre ellas la temperatura de extrusión, la velocidad de extrusión y el diámetro del filamento.

Para entender de mejor manera el comportamiento del sistema se realizaron gráficas en Matlab, que ayudan a medir la precisión, estabilidad y rapidez del sistema.

Se consideró un sistema de calefacción por conducción sin pérdidas, como se presenta en la Figura 2.7, y el modelo matemático descrito en la ecuación 2.1.

$$P = \dot{m} * C_p * \frac{dT}{dt} \quad (2.1)$$

Aplicando Laplace se obtuvo:

$$P(S) = \dot{m} * C_p * T(S) * s$$

$$\frac{T(S)}{P(S)} = \frac{1}{m * C_p}$$

Siendo P la potencia en Watts generada por la resistencia, reemplazando la masa por la definición de densidad, se obtiene la ecuación 2.2.

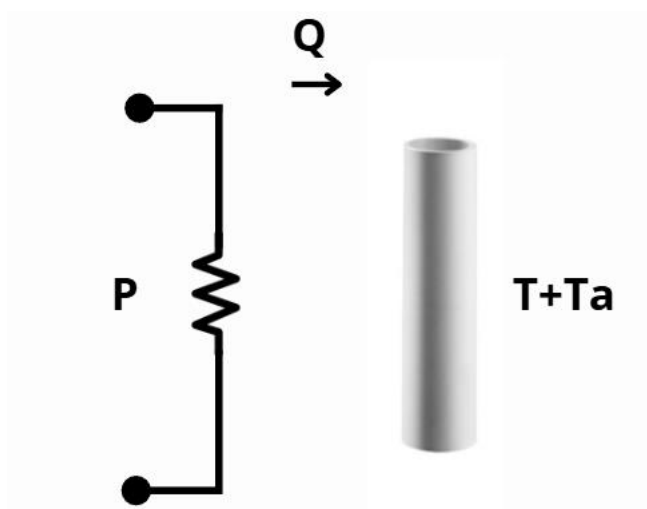
$$\frac{T(S)}{P(S)} = \frac{1}{\rho * V * C_p * S} \quad (2.2)$$

Linealizando la función $P(S)LV(S)$, se obtiene:

$$\frac{T(S)}{V(S)} = \frac{3.38}{\rho * V * C_p * S}$$

Figura 2.7.

Sistema de calefacción



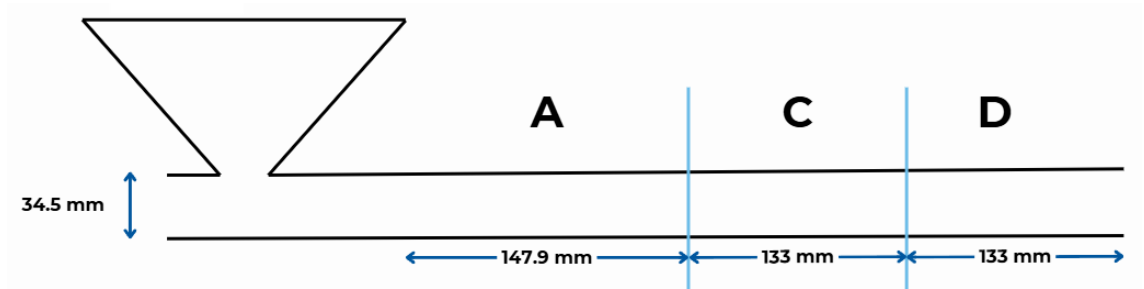
En la Tabla 2.8, se presentan las propiedades del material:

Tabla 2.8.

Propiedades del material

Densidad	a	Conduct. térmica	Calor específico	Resistencia
$20^{\circ}\text{C} \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$		$20^{\circ}\text{C} \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	$20^{\circ}\text{C} \text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$	eléctrica $20^{\circ}\text{C} \Omega \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$
7.98		15	500	0.75

Para las secciones se consideró lo mostrado en la Figura 2.8, donde A corresponde a la zona de alimentación, C a la zona de compresión y D a la zona de dosificación:

Figura 2.8.*Secciones del diseño de extrusor*

Se procedió a calcular los volúmenes en cada área, obteniéndose:

$$V_1 = 0.14 \text{ dm}^3$$

$$V_2 = 0.12 \text{ dm}^3$$

$$V_3 = 0.12 \text{ dm}^3$$

Las unidades están en dm^3 debido a las propiedades del material. Al ser iguales V_2 y V_3 , se concluyó que el sistema es idéntico. Se procedió a obtener las funciones de transferencias descritas en la Figura 2.9 y Figura 2.10.

Figura 2.9.*Función de transferencia continua G1*

G1 =

$$\frac{3.38}{558.6 \text{ s}}$$

Continuous-time transfer function.

Figura 2.10.

Función de transferencia continua G1

$G2 =$

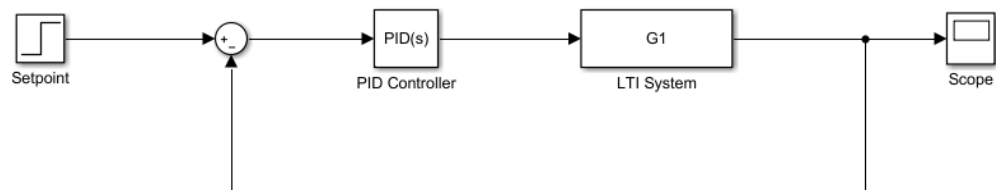
$$\frac{3.38}{478.8 \text{ s}}$$

Continuous-time transfer function.

Se aplicó el método del LGR, y se decidió utilizar un sistema de control PI para el diseño, con el diagrama de bloques expuesto en la Figura 2.11.

Figura 2.11.

Diagrama de bloques



2.3.7. Modelo mecánico y de control

Para el modelo mecánico y de control se destacó el análisis de los diferentes aspectos del proceso, como la temperatura, y el tiempo de extrusión del material.

El sistema está diseñado para garantizar un enfriamiento progresivo y controlado del filamento PLA, que entra al sistema a una temperatura inicial de $T_i = 200 \text{ }^\circ\text{C}$.

El flujo de aire total está dado por la ecuación 2.32.1, donde $n = 4$, pues el diseño cuenta con 4 ventiladores y $Q_{\text{ventilador}} = 90 \text{ CFM}$, que representa el flujo de aire de cada ventilador.

$$Q_{\text{total}} = n * Q_{\text{ventilador}} \quad (2.3)$$

$$Q_{total} = 4 * \left(90 \text{ CFM} * 0.0004719 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$$

$$Q_{total} \approx 0.17 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Por otro lado, la velocidad del flujo de aire total está dado por la ecuación 2.4, donde $n = 4$, pues el diseño cuenta con 4 ventiladores y $Q_{ventilador} = 90 \text{ CFM}$, que representa el flujo de aire de cada ventilador.

$$V_{ventilador} = \frac{Q_{ventilador}}{A_{ventilador}} \quad (2.4)$$

Donde $A_{ventilador}$ está dada por la ecuación 2.5, D es el diámetro de los ventiladores, que se consideran de 14 cm de diámetro cada uno.

$$A_{ventilador} = \pi * \left(\frac{D}{2} \right)^2 \quad (2.5)$$

$$A_{ventilador} = \pi * \left(\frac{0.14}{2} \right)^2$$

$$A_{ventilador} = 0.0154 \text{ m}^2$$

Volviendo a la velocidad, se tiene que:

$$V_{ventilador} = \frac{0.0425 \text{ m}}{0.0154 \text{ s}}$$

$$V_{ventilador} = 2.76 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Para mantener el aire a 60°C, la transferencia de calor está dada por la ecuación 2.6, donde \dot{m} representa el flujo másico del aire, $C_p = 1005 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$ es el calor específico del aire y ΔT es el incremento de temperatura. De la ecuación 2.7, $\rho_{aire} = 1.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ representa la densidad del aire.

$$q = \dot{m} * C_p * \Delta T \quad (2.6)$$

$$\dot{m} = \rho_{aire} * Q_{total} \quad (2.7)$$

$$q = (\rho_{aire} * Q_{total}) * C_p * \Delta T$$

$$q = \left(1.2 \frac{kg}{m^3} * 0.17 \frac{m^3}{s} \right) * 1005 \frac{J}{kgK} * (60^\circ C - 25^\circ C)$$

$$q = 7172 W$$

La resistencia debe suministrar aproximadamente 7.17 kW para mantener la temperatura del flujo de aire.

Una vez obtenido este dato, se procedió al modelado del tiempo de enfriamiento del filamento, lo cual está dado por la ecuación 2.8.

$$t = -\tau \ln \left(\frac{T_{objetivo} - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \right) \quad (2.8)$$

De esa ecuación, se tiene que τ representa la constante de tiempo térmica

$$\tau = \frac{\rho * c_p * V}{hA} \quad (2.9)$$

h representa el coeficiente de transferencia de calor $h = 118.85 \frac{W}{m^2K}$, V el volumen del filamento

$$V = \pi R^2 L \quad (2.10)$$

A el área superficial del filamento

$$A = 2\pi RL \quad (2.11)$$

Haciendo uso de las ecuaciones 2.10 y 2.11, se obtuvo $V \approx 4.8 \times 10^{-8} m^3$ y $A \approx 1.1 \times 10^{-4} m^2$.

$$V = \pi * (0.875 \times 10^{-3})^2 * 0.02 m^3$$

$$V \approx 4.8 \times 10^{-8} m^3$$

$$A = 2\pi * (0.875 \times 10^{-3}) * 0.02 m^2$$

$$A \approx 1.1 \times 10^{-4} m^2$$

Así, en la ecuación 2.9, se reemplazan los datos:

$$\tau = \frac{1250 * 1800 * 4.8 \times 10^{-8}}{118.85 * 1.1 \times 10^{-4}}$$

$$\tau = 98.44 s$$

Obteniendo finalmente el tiempo necesario de acuerdo a la ecuación 2.8:

$$t = -98.44 \ln\left(\frac{70 - 60}{200 - 60}\right)$$

$$t = 21.86 \text{ s}$$

Como se mencionó anteriormente, el sistema de enfriamiento está compuesto por 4 ventiladores y una cabina térmica, lo cual garantiza que el filamento se enfríe desde 200°C hasta 70°C durante aproximadamente 21.86 s. Y para mantener el flujo de aire a 60°C, la resistencia debe suministrar una potencia de 7.17 kW.

2.3.8. Validación y simulación

Para la validación y simulación del sistema se realizaron análisis de elementos finitos, entre ellos se analizó el coeficiente de seguridad y la tensión de Von Mises. El análisis de elementos finitos permitió determinar las tensiones que experimentará el tornillo bajo cargas específicas, además muestra de manera visual cómo se distribuyen las tensiones y deformaciones en el material, lo que proporcionó una mejor comprensión de su comportamiento.

De acuerdo con el criterio de Von Mises, una pieza falla si se cumple que $\sigma_{VM} \geq \sigma_{yield}$ [37], donde σ_{yield} es la tensión del límite elástico del material de la pieza.

Adicionalmente se evaluaron gráficas dinámicas, que sirvieron para monitorear el proceso de extrusión, además de ayudar a diagnosticar posibles problemas y buscar soluciones, pues si la extrusora trabaja con parámetros inestables, pueden generarse desperdicios, fallas mecánicas y un consumo energético innecesario.

Por otro lado, se realizaron simulaciones de esfuerzos térmicos en Fusion, que permiten conocer las zonas de máxima tensión térmica dentro de la pieza y así identificar puntos críticos que podrían estar en riesgo de fallar debido a la expansión o contracción del material.

Capítulo 3

3.1. Diseño preliminar

El diseño de la máquina extrusora se estructuró en una serie de sistemas que, en conjunto, permiten el funcionamiento integral del equipo.

- Sistema estructural

Constituye la base física de la máquina y está compuesto por todos los elementos que aportan estabilidad y soporte al sistema, tales como la tolva, el tornillo extrusor, el motor, la base y todas las partes generales necesarias para el montaje y funcionamiento del sistema.

- Sistema extrusor

Dentro del sistema estructural, se encuentra el sistema extrusor, el cual es el pilar de la máquina extrusora, en ésta resalta el tornillo extrusor, diseñado para impulsar el material hacia la boquilla mientras somete el polímero a un tratamiento térmico y mecánico que permite su fusión y homogenización. Al final del sistema, la boquilla proporciona la forma final al material extruido, asegurando la precisión dimensional y la calidad superficial del filamento.

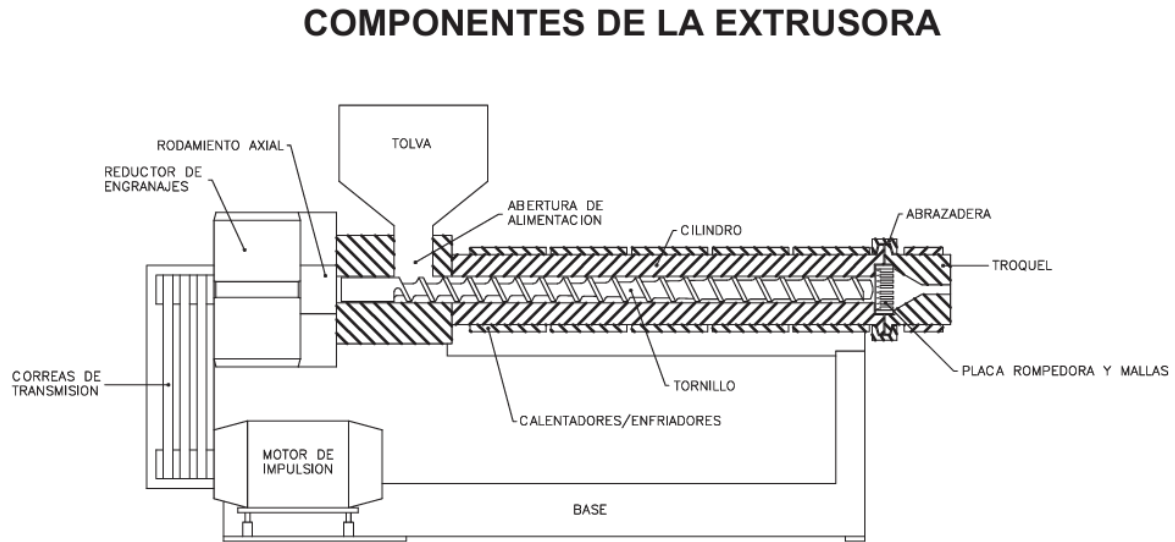
- Sistema térmico

Esta etapa es muy importante para el proceso de extrusión, pues se debe garantizar que el material alcance y mantenga la temperatura adecuada para su fundición y procesamiento. En esta etapa se incluye:

- Zona de calefacción
- Control de temperatura
- Zona de enfriamiento.

Figura 3.1.

Diagrama estándar de una máquina extrusora [38]



3.2. Ecuaciones asociadas

Para una selección adecuada del tornillo se toma en consideración los siguientes puntos:

- **Flujo volumétrico PLA:** $15.6 \frac{mm^3}{s}$
- **Densidad PLA:** $1.24 \frac{g}{cm^3}$
- **Viscosidad:** $0.5 - 0.7 \frac{dL}{g}$
- **Tubo AISI 304**

Diámetro mayor: 31.75 mm

Diámetro interno: 27.75 mm

Para el cálculo de la longitud total del tornillo se hace uso de la ecuación 3.1, donde L corresponde a la Longitud, D al diámetro y 20 es la relación que se aconseja para el termoplástico.

$$L = D * 20 \quad (3.1)$$

$$L = 27.75 * 20$$

$$L = 535 \text{ mm}$$

Posterior a ello, se procede a calcular la longitud de cada una de las zonas. Para la zona de alimentación se considera el 50% de la longitud total, de ahí que en la ecuación 3.2, la longitud total se multiplique por 0.5.

$$L_s = 0.5 * L \quad (3.2)$$

$$L_s = 267.5 \text{ mm}$$

Un caso similar se presenta para la profundidad del canal, de donde el 50% del diámetro representa la profundidad del canal de la zona de alimentación, para ello se hace uso de la ecuación 3.3.

$$H_s = 0.5 * D \quad (3.3)$$

$$H_s = 0.5 * 27.75$$

$$H_s = 13.38 \text{ mm}$$

Para la zona de compresión, en cambio, se considera el 25% de la longitud total, de ahí que en la ecuación 3.4, la longitud total se multiplique por 0.25.

$$L_c = 0.25 * L \quad (3.4)$$

$$L_c = 133.75 \text{ mm}$$

Para la profundidad del canal de la zona de compresión, se hace uso de la ecuación 3.5, de donde H_s representa la profundidad del canal de la zona de alimentación y $CR = 3$, pues con ese valor se trabajan polímeros de baja viscosidad.

$$H_d = \frac{H_s}{CR} = \frac{H_s}{3} \quad (3.5)$$

$$H_d = 4.46 \text{ mm}$$

El caso de la longitud del tonillo en la zona de dosificación es similar al de la zona de compresión, representa el 25%; y para la profundidad se usa la misma ecuación del caso anterior.

$$L_c = 133.75 \text{ mm}$$

$$H_d = 4.46 \text{ mm}$$

Para el paso del tornillo se considera el mismo valor del diámetro.

$$P = D = 26.75 \text{ mm}$$

El diámetro de raíz se obtiene mediante la ecuación 3.6, donde H_d hace referencia a la profundidad del canal de la zona de dosificación.

$$D_{raíz} = D - (2 * H_d) \quad (3.6)$$

$$D_{raíz} = 17.83 \text{ mm}$$

El ángulo de filete θ se calcula mediante el uso de la ecuación 3.7, donde P corresponde al paso del tornillo, antes calculado.

$$\tan\theta = \frac{P}{\pi * D} \quad (3.7)$$

$$\tan\theta = \frac{1}{\pi}$$

$$\theta = 17.7^\circ$$

El ancho de filete ω_f se calcula mediante el uso de la ecuación 3.8, donde P corresponde al paso del tornillo antes calculado.

$$\omega_f = 0.15 * D = 4.01 \text{ mm} \quad (3.8)$$

$$\text{Radio frontal} = 0.05 * D = 1.34 \text{ mm}$$

$$\text{Radio posterior} = 0.1 * D = 2.68 \text{ mm}$$

La potencia está dada por la ecuación 3.9, donde $n = 0.85$, y representa la eficiencia. $P_r = 5 \text{ MPa}$, representa la presión. $Q_v = 15 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}} = 15.6 * 10^{-9} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ y representa el caudal volumétrico.

$$P = \frac{P_r * Q_v}{n} \quad (3.9)$$

$$P = 91.76 \text{ W}$$

La velocidad en revoluciones $\alpha = 0.5 \text{ RPS}$.

El torque está dado por la ecuación 3.10.

$$\text{Torque} = \frac{P}{2\pi \cdot \alpha} \quad (3.10)$$

$$\text{Torque} = \frac{91.76}{2\pi \cdot 0.5}$$

$$\text{Torque} = 29.22$$

$$F_s = 1.5$$

$$T * F_s = 4383 \approx 40 \text{ Nm}$$

Una vez realizados los cálculos correspondientes, el resumen de los parámetros se detallan en la Tabla 3.1:

Tabla 3.1.

Especificaciones del tornillo

Longitud [mm]	535
Diámetro [mm]	27.75
Long zona de alimentación [mm]	267.5
Profundidad del canal [mm]	13.38
Long zona de compresión [mm]	133.75
Profundidad del canal [mm]	4.46
Long zona de dosificación [mm]	133.75
Profundidad del canal [mm]	4.46
Paso del tornillo [mm]	26.75
Diámetro de raíz [mm]	17.83
Ángulo del filete [°]	17.7
Ancho del filete [mm]	4.01
Radio frontal [mm]	1.34
Radio posterior [mm]	2.68
Temperatura crítica [Tm]	470
Potencia [W]	91.76
Velocidad en revoluciones [rps]	0.5
Torque [Nm]	40

3.3. Selección del tornillo de extrusión

El tornillo de extrusión es esencial para el sistema, pues asegura la fusión, mezcla y transporte homogéneo del material reciclado, como PLA. Su relación L/D (20:1 a 30:1) y compresión (2.5:1 a 3:1) están optimizadas para procesar polímeros reciclados sin degradación térmica. Además, su diseño permite producir filamentos de alta calidad con

un diámetro uniforme, ideales para impresión 3D, mientras promueve la sostenibilidad al reciclar materiales desechados de manera eficiente.

Para procesar PLA reciclado, el material ideal para el tornillo es acero nitrurado (Nitralloy 135M) con recubrimiento de cromo. Este material ofrece alta resistencia al desgaste y protección contra la corrosión moderada, esenciales para manejar las impurezas del material reciclado y garantizar la durabilidad del tornillo. Además, soporta las temperaturas de procesamiento típicas del PLA (180–200 °C) y es una opción económica ampliamente utilizada en extrusoras

El Nitralloy 135M es ideal para el tornillo de extrusión porque combina alta resistencia al desgaste y estabilidad térmica, soportando temperaturas de hasta 593 °C, perfectas para procesar PLA reciclado. Su capa nitrurada endurecida (600-1200 HV) protege contra abrasión y contaminantes, garantizando durabilidad y menor mantenimiento a un costo competitivo frente a materiales bimetálicos o inoxidable.

3.4. Sistema de enfriamiento

El sistema de enfriamiento estará compuesto por 4 ventiladores de 14 cm de diámetro que soplarán aire a una temperatura de 60 °C. Detrás de los ventiladores se instalará una cabina térmica equipada con una resistencia de hilo. Esta resistencia será controlada mediante un controlador PID Autonics [39], acompañado de una termocupla colocada en la entrada de la cabina, a la altura donde pasará el filamento. El diseño cuenta con una cabina, que necesita una tapa desmontable para poder poner y sacar el filamento con más facilidad.

El filamento avanzará a una velocidad de 20 mm/segundo, que es la velocidad óptima para garantizar que alcance la temperatura deseada de enfriamiento dentro de la cabina. Este diseño asegura un control preciso y uniforme del enfriamiento, manteniendo

al filamento en condiciones térmicas controladas durante su desplazamiento por el sistema.

Figura 3.2.

Sistema de enfriamiento



En la Figura 3.2 (A) se muestra la representación completa del sistema de enfriamiento, que consiste en una cabina de aluminio a través de la cual pasa el filamento. La imagen B representa la tapa desmontable, que se retira para colocar el filamento y luego se vuelve a cerrar para mantener un ambiente controlado. Finalmente, la imagen C ilustra el sistema en funcionamiento, donde se pueden observar los ventiladores en la parte frontal y, en la parte trasera, una resistencia que generará aire caliente, el cual será distribuido a través del sistema. Este circuito térmico se retroalimenta mediante una termocupla ubicada junto al filamento, asegurando que reciba la temperatura adecuada y evitando choques térmicos. Además, el filamento se guía sobre dobleces de aluminio que garantizan una altura uniforme a lo largo del proceso.

3.5. Sistema de embobinado

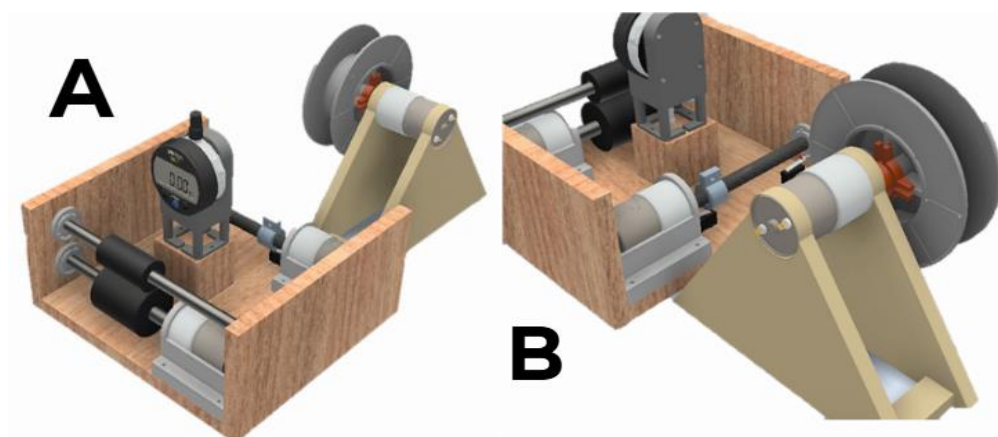
El sistema de embobinado del filamento consta de tres etapas principales. La primera etapa incluye un rodillo controlado mediante un sistema PID conectado a un *encoder*, el cual regula de manera precisa la salida del filamento y garantiza un flujo constante una vez alcanzada la velocidad adecuada para su funcionamiento. La segunda etapa incorpora un sistema de monitoreo visual con un reloj que permite detectar errores potenciales y ajustar parámetros en tiempo real para optimizar la operación.

La tercera etapa es un sistema de guía que previene el enredo del filamento durante el proceso de embobinado. Este sistema está compuesto por un motor que acciona un tornillo, cuyo movimiento es alternado entre los sentidos horario y antihorario mediante finales de carrera colocados a 65 mm de distancia, lo que corresponde al ancho estándar de un carrete de filamento. Finalmente, el filamento se enrolla en un carrete mediante un motor que cuenta con un mecanismo de sujeción adaptable al tamaño del rollo en uso.

Todo el sistema está controlado por una ESP32, que se encarga de gestionar los drivers de los motores y los sensores, garantizando un funcionamiento eficiente y automatizado del proceso.

Figura 3.3.

Sistema de embobinado



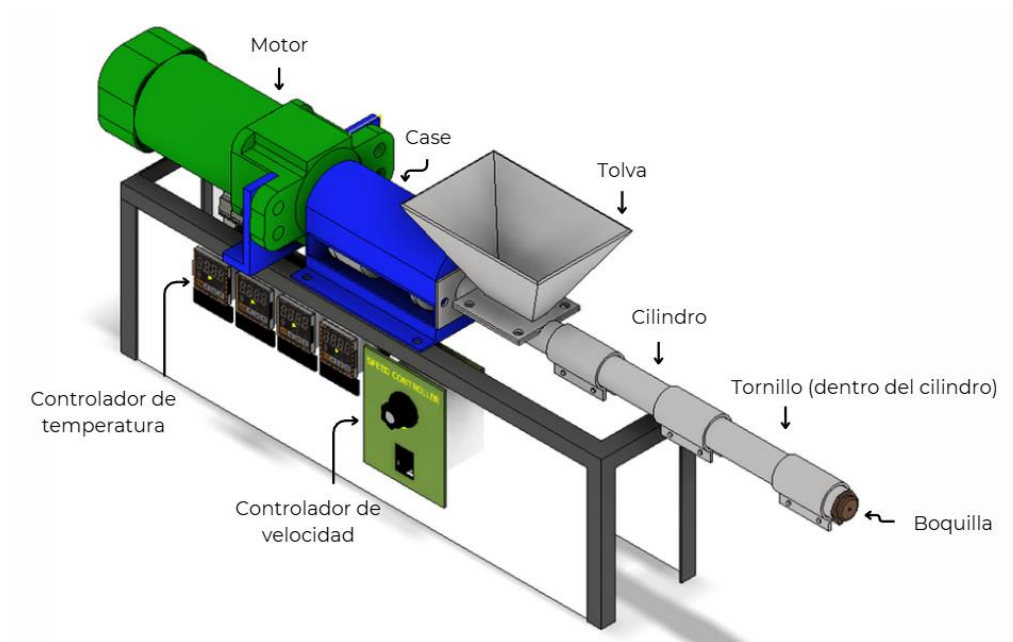
En la Figura 3.3 (A), el sistema de embobinado opera con dos rodillos por donde pasa el filamento a una velocidad de arrastre constante, controlada por un motor con *encoder* para regular la velocidad y garantizar un diámetro uniforme. Después de los rodillos, se encuentra un reloj medidor que verifica que el material cumpla con el diámetro deseado. También se observan dos finales de carrera y un tornillo, los cuales sirven como guía para distribuir el filamento de manera uniforme y evitar enredos. En B, se muestra el motor y el mecanismo utilizados para enrollar el carrete, el cual, al igual que el sistema de rodillos, requiere la intervención de un operador.

3.6. Diseño CAD

Una vez diseñada cada etapa de la máquina extrusora, se ensambló y se obtuvo el diseño mostrado en la Figura 3.4.

Figura 3.4.

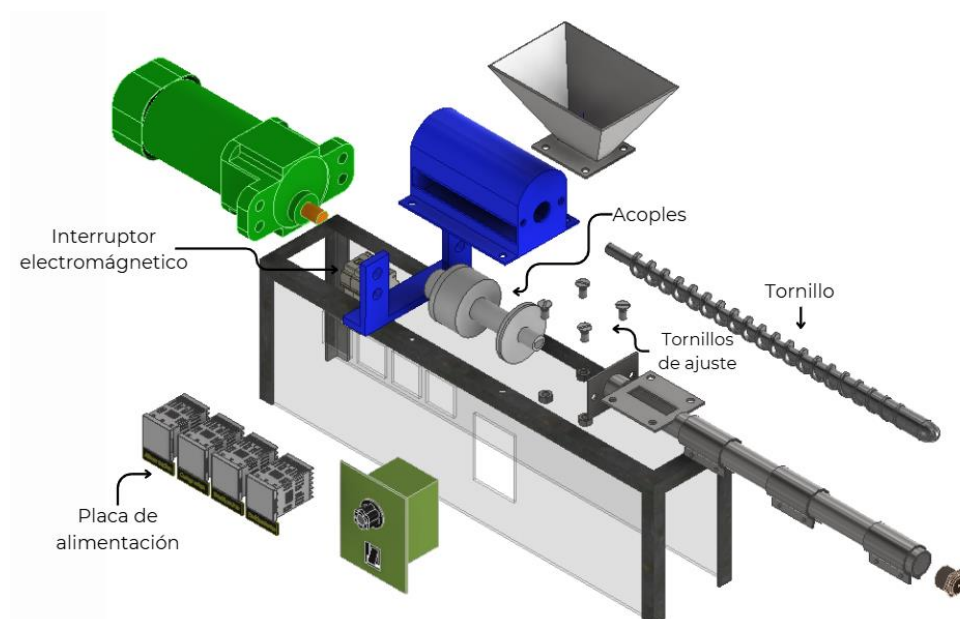
Diseño de la máquina extrusora



En la Figura 3.5 se pueden observar los componentes internos de la máquina extrusora.

Figura 3.5.

Vista interna de componentes



3.7. Uso de materia prima y PLA reciclado

Durante el proceso de reciclaje; donde el producto pasa por trituración o extrusión, el PLA es propenso a sufrir degradación térmica o mecánica, reduciendo sus propiedades físicas, como la resistencia y la flexibilidad. Es por ello por lo que se considera realizar a mezcla con PLA virgen y así restaurar estas propiedades.

Se debe considerar una proporción adecuada que no afecte al producto final y al proceso de extrusión, se consideraron 3 escenarios que se exponen en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2.

Comparación proporción material virgen y reciclado

% mat. virgen	% mat. reciclado	Ventajas	Desventajas
50%	50%	Balance entre costo y propiedades mecánicas.	Piezas estándar, si se busca mayor calidad no es óptimo.
30%	70%	Mayor sostenibilidad.	Deficiencia en propiedades mecánicas.
70%	30%	Máxima calidad y exigencia mecánica alta.	Costo mayor en pellets de PLA virgen.

Para mantener las propiedades mecánicas del PLA, la opción más ideal es 70% material virgen y 30% material reciclado. Al incluir 70% de material virgen el filamento conservará su resistencia y estabilidad térmica, además mantendrá una buena adherencia entre capas, baja deformación y será ideal para piezas que requieran alta precisión. Aunque el costo sea mayor, sigue representando una reducción frente al uso de 100% PLA virgen.

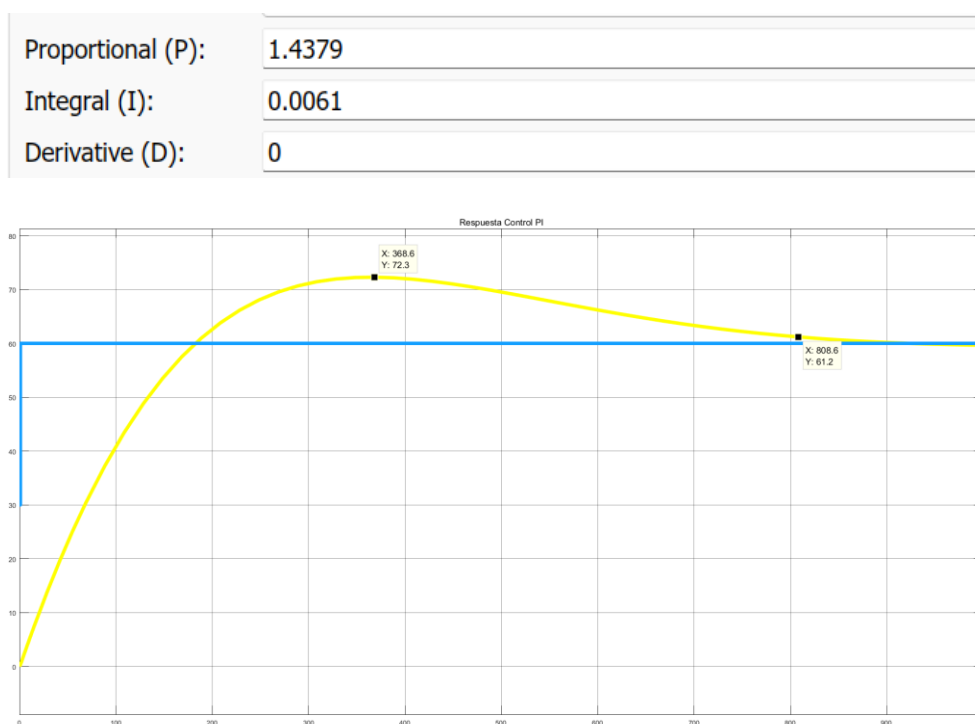
3.8. Simulaciones índices de desempeño

MATLAB sirvió como herramienta para calcular los índices mediante simulaciones en el dominio del tiempo.

En la Figura 3.6 se muestra la respuesta del sistema de control PI, con una ganancia proporcional (P) de 1.4379 y una ganancia integral (I) de 0.0061.

Figura 3.6.

PI y respuesta de la zona de alimentación



En la Figura 3.7, por otro lado, se muestra la respuesta del sistema de control PI, con una ganancia proporcional (P) de 1.4433 y una ganancia integral (I) de 0.00983, la cual es similar a la de la Figura 3.8, que es la zona de dosificación.

La diferencia entre las respuestas presentadas se basa en la respuesta. En la zona de alimentación se observa una respuesta más lenta, pero con menor sobreimpulso, a su vez la temperatura sube de manera más gradual. En las otras dos zonas la respuesta es más rápida, lo cual se ve sustentado en la necesidad de que en esas etapas se requiere de

mayor precisión y estabilidad, a su vez, el ajuste es más brusco, pues la presión y temperatura requieren de rapidez en la estabilización.

Figura 3.7.

PI y respuesta de la zona de dosificación.

Proportional (P):	<input type="text" value="1.4433"/>
Integral (I):	<input type="text" value="0.0098"/>
Derivative (D):	<input type="text" value="0"/>

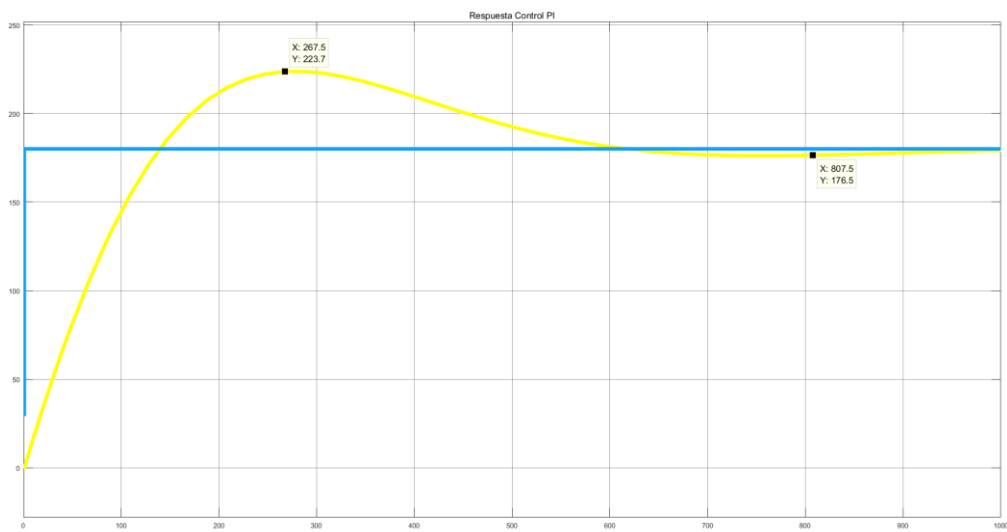
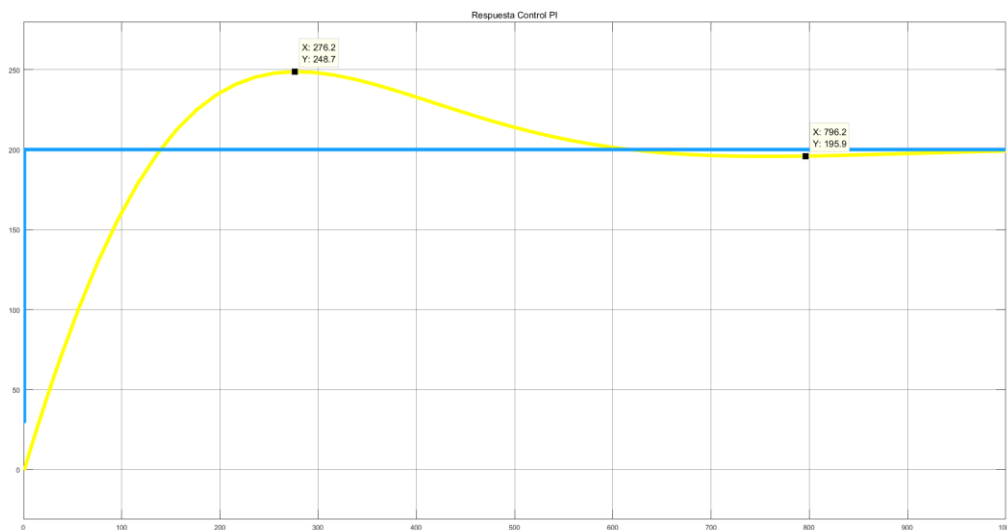


Figura 3.8.

Respuesta de la zona de dosificación

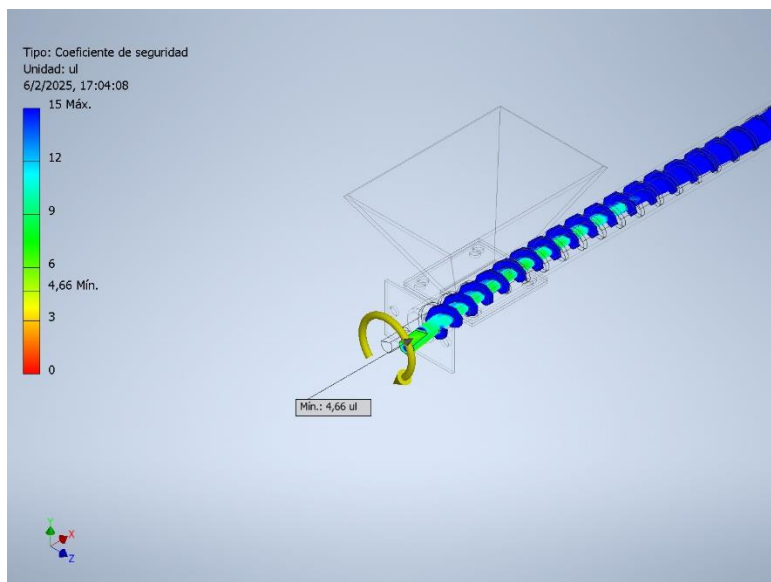


3.9. Análisis de tensión tornillo

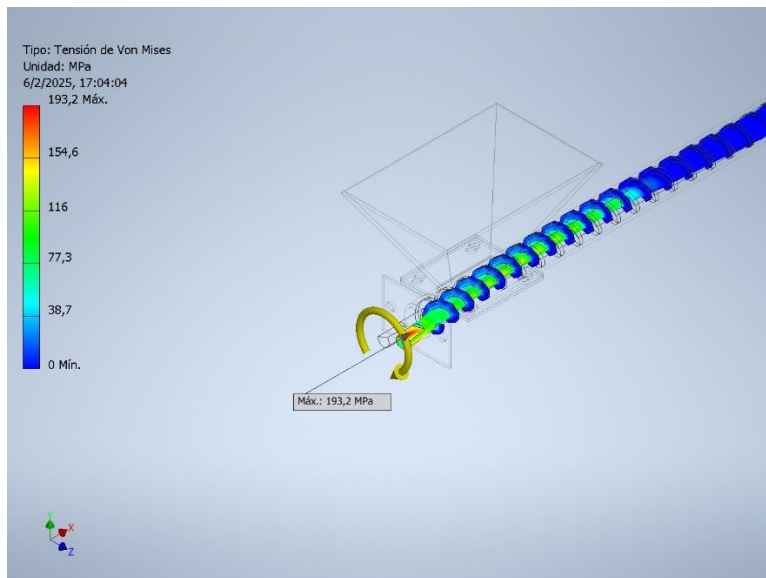
Una vez diseñada la máquina extrusora, es esencial realizar análisis de elementos finitos que permitan conocer el comportamiento del tornillo, para ello se muestra el coeficiente de seguridad en la Figura 3.9, que se presenta con una escala de colores donde predomina el azul indicando que se encuentra en un rango seguro. Además; como se muestra en la imagen, el mínimo coeficiente de seguridad identificado es 4.66 ubicado en la entrada del tornillo, que presenta una zona crítica en términos de resistencia mecánica.

Figura 3.9.

Coeficiente de seguridad

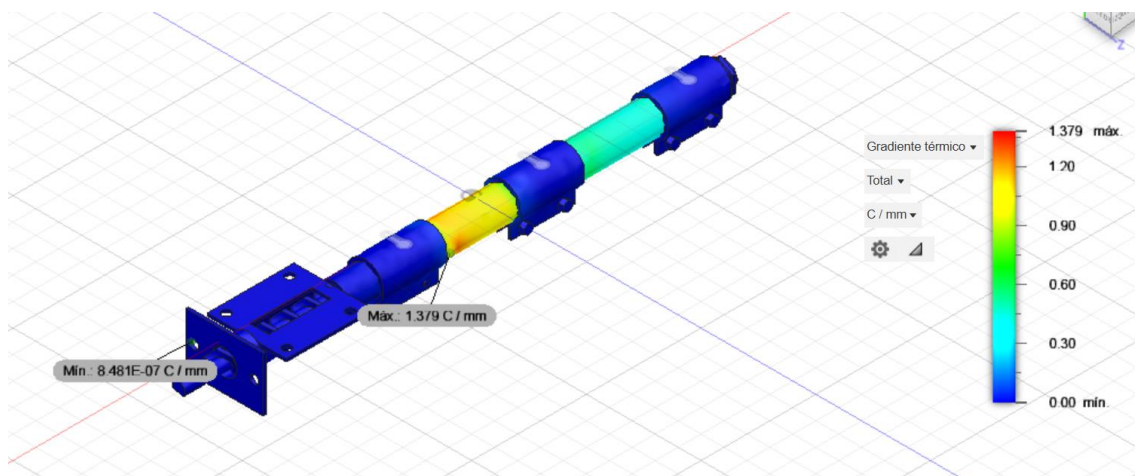


La tensión máxima que se observa en la tensión de Von Mises de la Figura 3.10 es 193.2 MPa; que, comparándolo con la del Nitralloy 135M [40] de 690 MPa, se obtiene $193.2 \text{ MPa} \leq 690 \text{ MPa}$, donde se concluye que la tensión máxima en la pieza está por debajo del límite elástico del material, por lo que la pieza no presenta riesgo de deformación plástica bajo las cargas aplicadas.

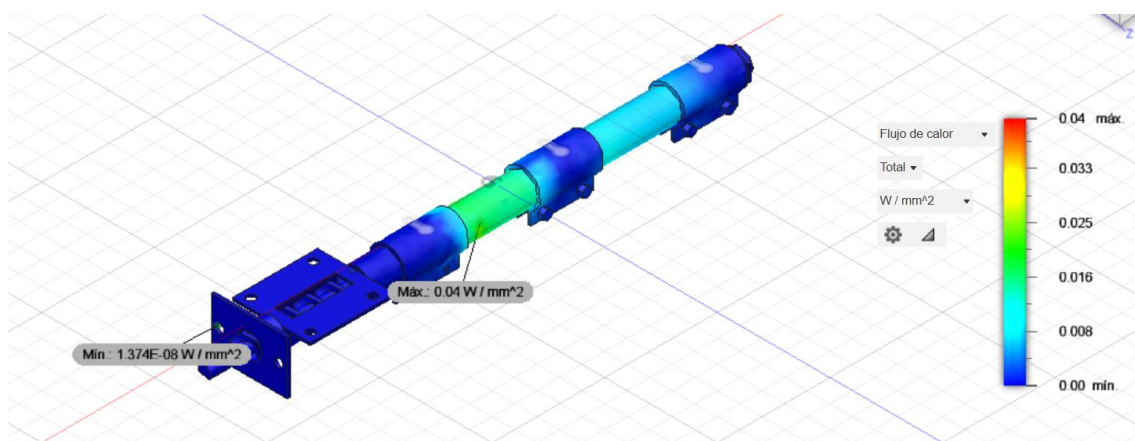
Figura 3.10.*Tensión de Von Mises*

3.10. Análisis térmico

En la Figura 3.11 se presenta el análisis del gradiente térmico en el cilindro de la extrusora, donde se muestra una distribución desigual del calor, con un máximo de 1.379 °C/mm en la zona de transición térmica, denotado por los colores amarillo y rojo, lo que indica un punto crítico de variación de temperatura. Las zonas en azul presentan menor gradiente, presentándose una disipación térmica más estable o menor transferencia de calor. Esta distribución podría generar diferencias en la viscosidad del material extruido, afectando la uniformidad del proceso. Para mejorar la eficiencia térmica, se recomienda evaluar la posición de las resistencias y el aislamiento térmico en las zonas de mayor variación.

Figura 3.11.*Simulación del gradiente térmico*

El análisis del flujo de calor en el cilindro de la extrusora que se presenta en la Figura 3.12 muestra una distribución heterogénea, con un máximo de 0.04 W/mm^2 en la zona central, denotado en verde, lo que indica un área de mayor transferencia térmica. Las regiones en azul presentan menor flujo de calor, lo que sugiere una disipación limitada o una menor conducción térmica en esos puntos. Esta variación puede generar diferencias en la temperatura del material extruido, afectando su homogeneidad.

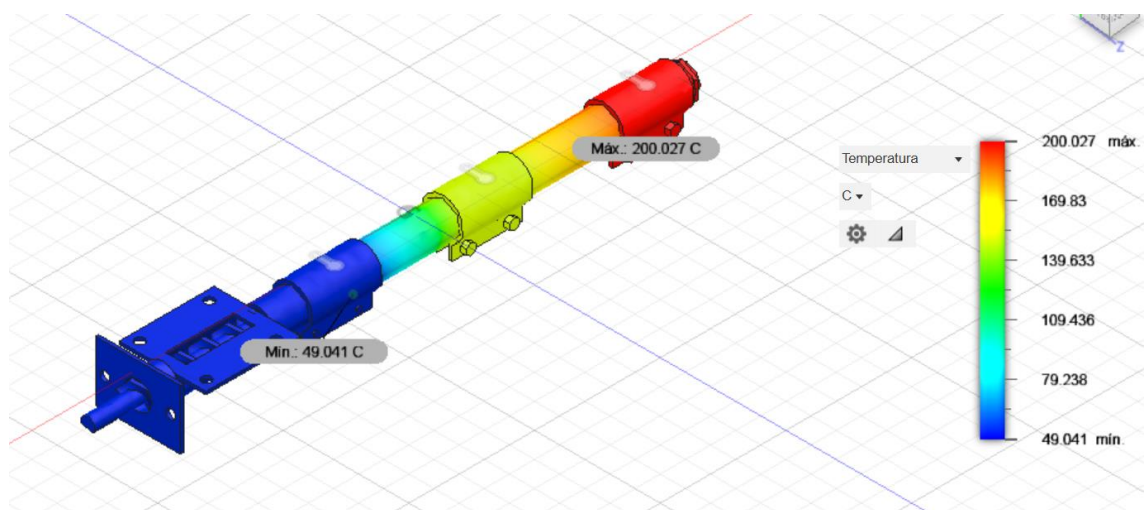
Figura 3.12.*Flujo de calor*

En la Figura 3.13 se presenta la simulación de distribución de temperatura en el cilindro de la extrusora, en ella se puede observar un aumento progresivo del calor desde la entrada con una temperatura de $49.04 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta la salida con una temperatura en

aumento de 200.03 °C, indicando un calentamiento efectivo a lo largo del proceso. La temperatura se ha distribuido de la manera deseada en las tres zonas clave: alimentación, con temperaturas más bajas para evitar la fusión prematura; compresión, con un incremento térmico para ablandar y homogenizar el material; y dosificación, con la máxima temperatura para asegurar una fusión completa y un flujo óptimo.

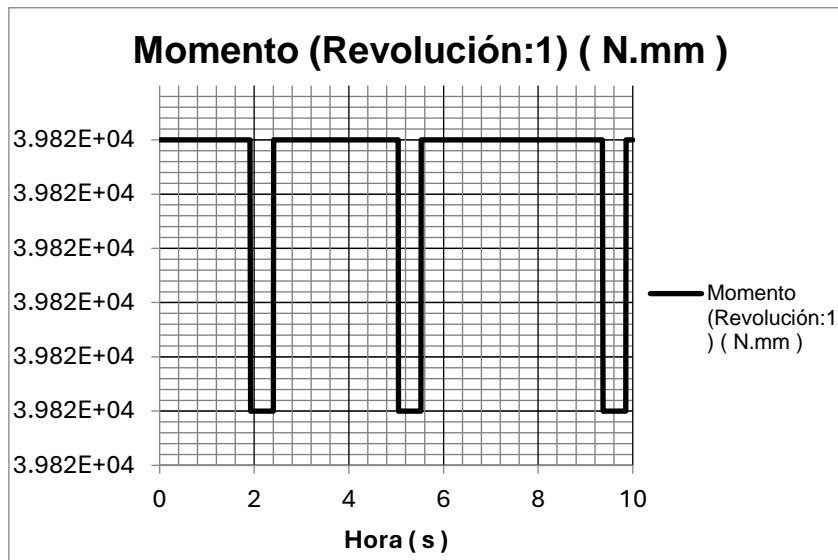
Figura 3.13.

Temperatura

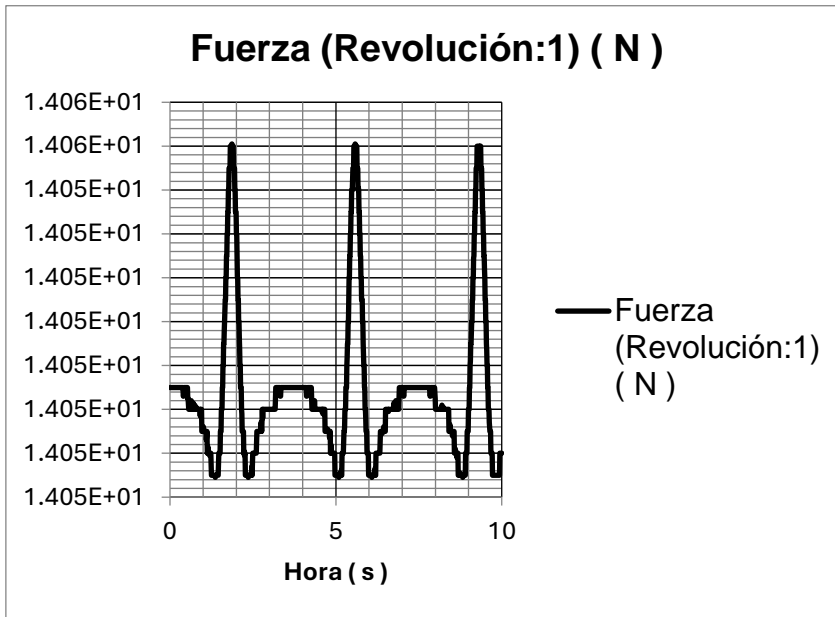


3.11. Gráficas dinámicas

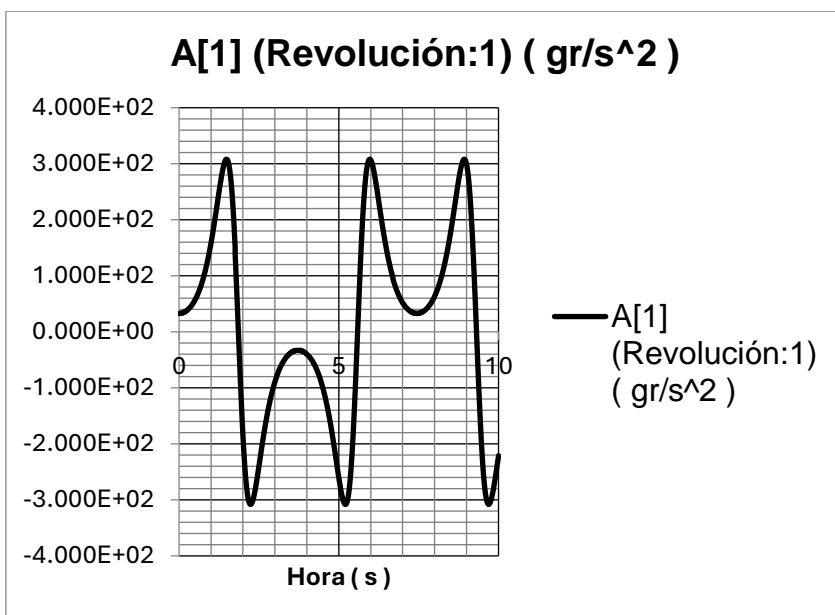
En cuanto a las gráficas dinámicas, se puede observar que la gráfica de momento (Figura 3.14) presenta un comportamiento cíclico que se repite aproximadamente cada 5 segundos, durante la mayor parte del tiempo, el momento se mantiene en un valor cercano a 39,820 N mm. Los momentos donde el torque cae bruscamente indican que el tornillo pierde contacto con el material.

Figura 3.14.*Gráfica de momento vs tiempo*

Por otro lado, en la Figura 3.15, se observan ciclos repetitivos con picos de fuerza cada aproximadamente 5 segundos. Es importante que el suministro de material sea constante, pues esas variaciones de pico denotan que existen obstrucción o acumulación de material, por lo cual se genera mayor resistencia y por ende aumento de fuerza para la extrusión, lo cual puede aumentar el desgaste mecánico en el sistema, reduciendo la vida útil de los componentes de la máquina.

Figura 3.15.*Gráfica de fuerza vs tiempo*

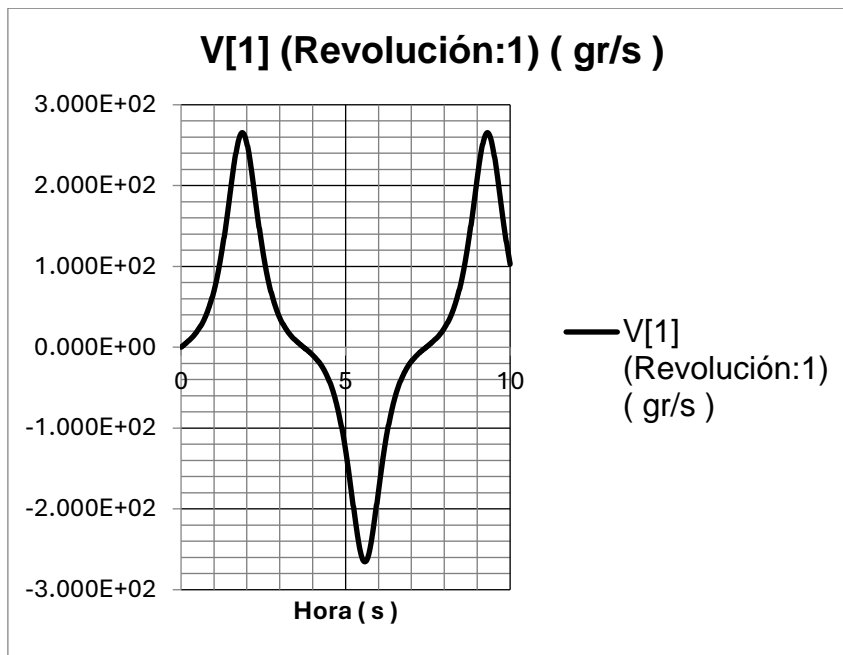
En la Figura 3.16, se realiza el análisis de la gráfica de aceleración, donde se observan valores positivos y negativos, indicando cambios en la dirección de la aceleración. Además, se observa coincidencia entre los picos de aceleración de fuerza y aceleración. Las fluctuaciones no se presentan abruptas, pero se debe considerar que en caso de serlo puede existir desgaste en el motor.

Figura 3.16.*Gráfica de aceleración vs tiempo*

En la Figura 3.17 se presenta la velocidad en función del tiempo, la velocidad tiene una curva suavizada con respecto a la aceleración. Es esencial optimizar la estabilidad en la velocidad, pues de esta manera se evitan problemas en variabilidad de dimensión del filamento.

Figura 3.17.

Gráfica velocidad vs tiempo



3.12. Análisis de costos

Una de las consideraciones para el desarrollo del diseño de la máquina extrusora son los componentes que se requieren para el montaje y correcto funcionamiento del sistema. Los componentes se detallan en la Tabla 3.3, e incluyen rubros como tornillo extrusor, motor, resistencias eléctricas, entre otros, e incluso un valor de contingencia, en caso de algún gasto extra que se requiera.

Se ha incluido nombres de proveedores; en su mayoría de empresas ecuatorianas, como Metalserna e Ilusol, a excepción del motor que es de Alibaba [41].

Tabla 3.3.*Costos*

Ítem	Rubro	Proveedor	Cantidad	V. unit	Total
1	Tornillo extrusor	Metalserna	1	313.23	313.23
2	Motor	Alibaba	1	212.78	212.78
3	Controlador de temperatura TC4S-14R	Ilusol	4	105.74	422.96
4	Resistencias eléctricas		4	15.56	62.24
5	Tolva de aluminio	Metalum	1	200.00	200.00
6	Estructura	Metalum	1	100.00	100.00
7	Contingencia			150.00	150.00
					1,461.21

Adicional a esto, se considera la comparación entre la producción del filamento y la importación y compra a nivel nacional.

Nota: El valor de filamento triturado podría estar llegando a \$1 el kg.

En la Tabla 3.4 se presenta el costo de material y su variación de acuerdo con la cantidad adquirida.

Tabla 3.4.*Costo del pellet PLA*

Costo de pellet PLA					
Costo mat. [\$]	Cant. [Kg]	Flete [\$]	Ar. 10% (\$)	IVA 15% (\$)	\$/Kg
6.00	25	2.00	220.00	253.00	10.12
4.00	1000	2.00	6,600.00	7,590.00	7.59
3.00	10000	2.00	55,000.00	63,250.00	6.33

Se evalúan las opciones de adquisición en baja, media y alta producción. En la Tabla 3.5 se detalla el costo en función de la proporción de material virgen y reciclado en baja producción.

Tabla 3.5.*Costos de materia prima en baja producción*

Costos de materia prima para producir un filamento				
Pellet Virgen [%]	PLA Triturado [%]	Costo kg Pellet [\$]	Kg filamento	
100	0	10.12	10.12	
70	30	10.12	7.38	
50	50	10.12	5.56	
40	60	10.12	4.65	

En la Tabla 3.6 se detalla el costo en función de la proporción de material virgen y reciclado en producción media.

Tabla 3.6.*Costos de materia prima en media producción*

Costos de materia prima para producir un filamento				
Pellet Virgen [%]	PLA Triturado [%]	Costo kg Pellet [\$]	Kg filamento	
100	0	7.59	7.59	
70	30	7.59	5.61	
50	50	7.59	4.30	
40	60	7.59	3.64	

En la Tabla 3.7 se detalla el costo en función de la proporción de material virgen y reciclado en producción alta.

Tabla 3.7.*Costos de materia prima en alta producción*

Costos de materia prima para producir un filamento				
Pellet Virgen [%]	PLA Triturado [%]	Costo kg Pellet [\$]	Kg filamento	
100	0	6.33	6.33	
70	30	6.33	4.73	
50	50	6.33	3.67	
40	60	6.33	3.13	

Para realizar un correcto análisis financiero, se tomaron en consideración los siguientes datos para la inversión inicial:

Tabla 3.8.

Distribución de la inversión inicial

Concepto	Monto (\$)
Extrusora	1,461.00
Empleado (primer mes)	500.00
Materia prima inicial (triturada y virgen)	2,250.00
Herramientas y equipo de protección	300.00
Otros gastos	489.00
	5,000.00

De los datos expuestos en la Tabla 3.8 se obtiene una inversión inicial (I) de \$5,000.00.

En la Tabla 3.9 se detallan los costos y gastos mensuales como materia prima, salario del empleado y energía eléctrica. Se estima una producción de 300 kg de filamento mensual, con un costo de 7.50 el kg.

Tabla 3.9.

Costos y gastos mensuales

Concepto	Costo mensual (\$)
Materia prima (300 kg * \$7.50)	2,250.00
Salario	500.00
Energía eléctrica	38.80
Total	2,788.80

El costo de materia prima está dado por:

$$MP = 300kg \times 7,50 \frac{\$}{kg} = \$ 2,250 \text{ mes}$$

El consumo de la energía eléctrica está dado por:

$$C = 2.5 * 8 * 20$$

$$C = 400 \text{ kWh/mes}$$

El costo por kWh en Ecuador para el sector industrial es de \$0.097 [42], por lo cual se obtiene un costo total mensual de electricidad de \$38.80.

En cuanto al precio de venta del filamento se estima en \$13 por kg y se proponen dos escenarios:

- **Escenario optimista (100% de ventas):** 300 kg x \$13
- **Escenario conservador (80% de ventas):** 240 kg x \$13

Tabla 3.10.

Flujo de caja mensual según porcentaje de ventas

Escenario	Ingreso (\$)	Costos y gastos (\$)	Flujo neto mensual (\$)
100% ventas	3,900.00	2,788.80	1,111.20
80% ventas	3,120.00	2,788.80	331.20

El cálculo del flujo neto mensual en la Tabla 3.10 está dado por la ecuación 3.11.

$$\text{Flujo neto} = \text{Ingresos} - \text{Costos y gastos} \quad (3.11)$$

El valor actual neto está dado por la ecuación 3.12, donde n representa el número de períodos, F_t los flujos de caja en cada período, r el tipo de interés, I la inversión inicial.

El tipo de interés está dado por la tasa mensual de descuento, que en Ecuador es de 12% [43].

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+r)^t} - I \quad (3.12)$$

$$VAN = \frac{13,334.40}{(1.12)^1} + \frac{13,334.40}{(1.12)^2} + \frac{13,334.40}{(1.12)^3} + \frac{13,334.40}{(1.12)^4} - 5000$$

$$VAN = \$36,791.72$$

La tasa interna de retorno está dada por la ecuación 3.13.

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+TIR)^t} - I \quad (3.13)$$

$$TIR \approx 92.5 \%$$

De los valores antes calculados, se puede inferir que el proyecto tiene una viabilidad con alta rentabilidad y un impacto positivo en la economía.

Capítulo 4

4.1. Conclusiones y recomendaciones

4.1.1. Conclusiones

- Tras comparaciones entre materiales para impresión en 3D, donde se evaluaron características técnicas como su facilidad de procesamiento a temperaturas relativamente bajas, un menor requerimiento de energía en comparación con otros plásticos y una menor deformación durante la impresión, además de su compatibilidad una variedad de impresoras 3D y alta demanda en el mercado, se concluye que el material más adecuado es el PLA.
- Una vez evaluados los parámetros técnicos y el material a procesarse, se seleccionaron cuidadosamente los componentes clave del sistema para garantizar un funcionamiento eficiente en el proceso de fabricación de filamento para impresoras 3D. Entre estos, destaca el tornillo sin fin, diseñado para proporcionar un flujo constante y controlado del material, optimizando la extrusión y reduciendo los riesgos de deformación y desperdicio.
- Además, se evaluaron y seleccionaron otros elementos del sistema, como el sistema de calefacción, el control de temperatura y los mecanismos de enfriamiento, asegurando que cada uno contribuya al rendimiento del proceso y a la obtención de un producto final de alta calidad.
- En función a los cálculos realizados, tomando en cuenta los costos de procesamiento y adquisición de materia prima, se simuló un proyecto rentable, del cual se obtuvo un VAN positivo de \$36,791.72, con un TIR mensual de 92.5% anual, mostrando una alta rentabilidad. Esto no solo demuestra una alternativa económica viable, sino que promueve un modelo de producción sostenible y rentable.

4.1.2. Recomendaciones

- Con base al diseño actual de la máquina extrusora y en caso de requerirse trabajar con otro tipo de materiales termoplásticos diferentes al PLA, se recomienda considerar modificaciones que permitan la versatilidad del tratamiento de materiales. Una opción sería un sistema de control de temperatura ajustable, para cubrir mayor rango de temperatura de procesamiento, en función de los materiales que se busquen procesar.
- Para reducir los defectos derivados del choque térmico, es recomendable implementar un sistema de enfriamiento en etapas graduales. Esta implementación podría reducir de manera progresiva la temperatura del material extruido, permite un mayor control y garantiza una solidificación más homogénea del filamento.
- Un aspecto importante en el filamento es su uniformidad, para mejorarla se sugiere establecer una relación precisa entre los giros del rodillo y el peso del filamento, de esta manera se optimiza la distribución y densidad del material en el carrete.
- Es recomendable realizar de manera continua la inspección de las propiedades mecánicas y térmicas del filamento, por lo cual se sugiere realizar pruebas periódicas de tracción, dureza y flexión, para garantizar que el material cumpla con los estándares de calidad requeridos para su aplicación final.

Referencias

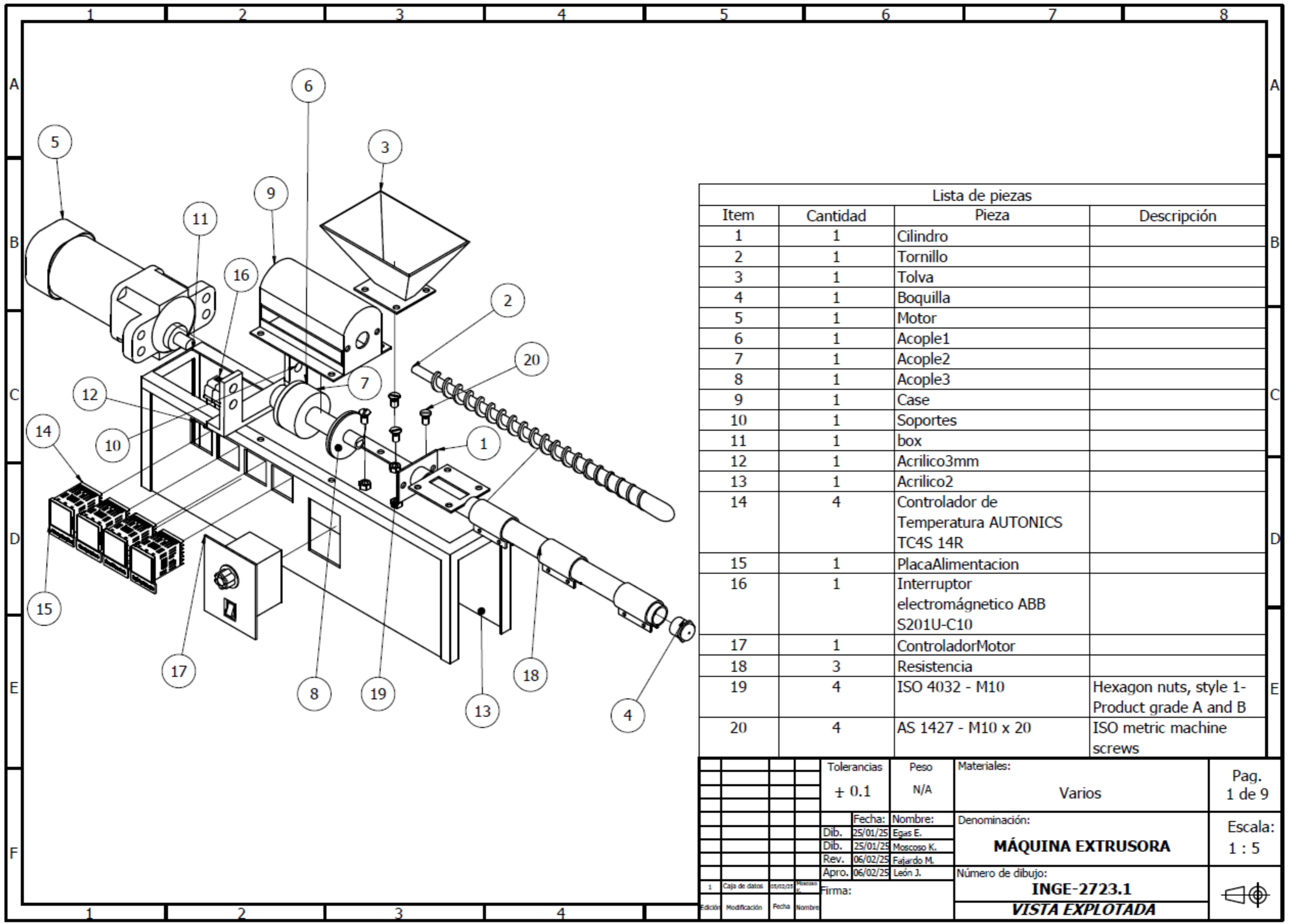
- [1] N. Shahrubudin, T. Lee y R. Ramlan, «An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications,» *Procedia Manufacturing*, 2019.
- [2] Mint, «Mint Rethinking the future,» 12 Julio 2023. [En línea]. Available: <https://mintforpeople.com/impresoras-3d-industria/>. [Último acceso: 27 Octubre 2024].
- [3] ACC Machine, «ACC Machine,» 29 Agosto 2023. [En línea]. Available: <https://www.acceextrusion.com/es/news/3d-printer-filament-extruders/>. [Último acceso: 28 Octubre 2024].
- [4] M. d. I. Á. Corzo Cuesta, «Diseño e implementación de una máquina extrusora para investigación en laboratorio,» *Centro de investigación y de estudios avanzados del Instituto Politécnico Nacional*, 2019.
- [5] R. A. Molina Carrión y R. J. Miño Durán, «Estudio de mercado para determinar la producción y comercialización de filamentos para impresión 3D a base de Polietileno Tereftalato (PET) en la ciudad de Guayaquil,» *Escuela Superior Politécnica del Litoral*, 2019.
- [6] Steren, «Stereon,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.steren.com.ec/filamento-pla-para-impresora-3d-gris.html>. [Último acceso: 5 Noviembre 2024].
- [7] Mordor Intelligence, «Tamaño del mercado de filamentos de impresión 3D y análisis de participación tendencias de crecimiento y pronósticos (2024-2029),» Mordor Intelligence, 2019.
- [8] National Geographic, «¿A quién dañan las impresoras 3D?,» *National Geographic*, 9 Agosto 2018.
- [9] Market Research, «Industrial 3D Printing Market with COVID-19 Impact Analysis, by Offering (Printers, Materials, Software, Services), Application, Process, Technology, Industry (Aerospace & Defense, Automotive) and Geography - Global Forecast to 2026,» MarketsandMarkets, 2022.
- [10] Primicias, «¿Por qué hay cortes de luz en Ecuador? Estas son las razones que ...,» *Primicias*, 13 Octubre 2024.
- [11] AnkerMake, «AnkerMake,» 18 Febrero 2024. [En línea]. Available: <https://www.ankermake.com/blogs/guides/how-long-does-3d-printer-filament-last>. [Último acceso: 7 Noviembre 2024].
- [12] J. Faludi, N. Cline-Thomas y S. Agrawala, 3D printing and its environmental implications, California: The Next Production, 2017.

- [13] BambuLab, «BambuLab,» Automatic Material System (AMS), [En línea]. Available: <https://www.bambulab.com/en/ams>. [Último acceso: 7 Noviembre 2024].
- [14] Anycubic, «Anycubic,» Anycubic Kobra 3 Combo, [En línea]. Available: <https://www.anycubic.com/collections/kobra-series/products/anycubic-kobra-3-combo>. [Último acceso: 7 Noviembre 2024].
- [15] Creality, «Creality,» Creality K2 with CFS Technology, [En línea]. Available: <https://www.creality.com/product/creality-k2>. [Último acceso: 7 Noviembre 2024].
- [16] J. Henry, «Multicolour 3D-Printed Geovisualisation,» 2024.
- [17] V. C. Agbakoba, N. Webb, E. Jegede, R. Phillips, S. P. Hlangothi y M. J. John, «Mechanical recycling of waste PLA generated from 3D printing activities: Filament production and thermomechanical analysis,» *Macromolecular Materials and Engineering*, 2023.
- [18] O. Castro Soldevila, «Upgrade of the polymer filament extrusion device,» *Univerza v Ljubljani*, 2023.
- [19] D. Stoof, «Development of Recycled Polypropylene Composite Materials for Applications in 3D Printing,» *University of Waikato*, 2016.
- [20] La Hora, «Lojanos crearon innovador proyecto de reciclaje 3D y brillaron en Brasil,» *La Hora*, 30 Agosto 2024.
- [21] G. Ramos Espinosa y G. A. Lombana Gomez, «Diseño e implementación de un sistema de extrusión de filamento para impresión 3D a partir de botellas recicladas,» Cali, 2019.
- [22] TetraPak, «TetraPak Protects what's good,» [En línea]. Available: <https://www.tetrapak.com/es-ec/insights/cases-articles/recycling-polyal-from-used-beverage-cartons-into-filament-for-3d#>. [Último acceso: 8 Noviembre 2024].
- [23] P. A. Gutierrez Morales y J. F. Bornacelli Castillo, «Metodología para el diseño de tornillo de máquinas extrusoras monohusillo,» Cali, 2006.
- [24] E. G. Gaibor Rivera y A. V. Loja Viteri, «Desarrollo de sistema de extrusión de filamento a partir de botellas plásticas para el uso en impresión 3D,» Guayaquil, 2024.
- [25] Nanjing Jieya, «Nanjing Jieya,» 14 Agosto 2024. [En línea]. Available: <https://jieyatwinscrew.com/es/blog/extrusora-de-un-solo-tornillo/>. [Último acceso: 28 Octubre 2024].
- [26] A. Spirio, R. Arrigo, A. Frache, L. Tuccinardi y R. Tuffi, «Plastic waste recycling in additive manufacturing: Recovery of polypropylene from WEEE for the production of 3D printing filaments,» *Journal of Environmental Chemical Engineering*.

- [27] G. H. Acuña Fonseca y M. E. Salamanca Vanegas, «Diseño y construcción de una máquina extrusora para la fabricación de filamentos termoplásticos para impresora 3D,» Tunja, 2016.
- [28] M. Beltrán Rico y A. Marcilla Gomis, *Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades*, Alicante: Publicaciones Universidad de Alicante, 2012.
- [29] ArtMe 3D, «ArtMe 3D,» [En línea]. Available: <https://www.artme-3d.de/produkte/desktop-filament-extruder-mk3/03-technische-daten-3/>. [Último acceso: 7 Noviembre 2024].
- [30] System Dissa, «System Dissa,» 20 Febrero 2023. [En línea]. Available: <https://systemdissa.com/technology/filamento-pla-la-temperatura-de-fusion>. [Último acceso: 10 Noviembre 2024].
- [31] Cowin, «CowinExtrusion,» [En línea]. Available: <https://www.cowinextrusion.com/es/4-types-of-fwin-screw-extruders/>. [Último acceso: 1 Diciembre 2024].
- [32] Nanjung Gorry, «Nanjing Gorry Equipos de extrusión,» [En línea]. Available: <http://www.njgorry.com/xi/Index.asp?Products/Product104/168.html>. [Último acceso: 1 Diciembre 2024].
- [33] S. K. A. a. Jagadish, «Design and fabrication of internal mixer and filament extruder for extraction of hybrid filament composite for FDM applications,» *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, vol. 18, p. 419–432, 2023.
- [34] K. Mikula, «3D printing filament as a second life of waste plastics—a review,» *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, p. 12321–12333, 2020.
- [35] H. Shaik, «A scientific review on various pellet extruders used in 3D printing FDM processes,» *Open Access Library Journal*, vol. 8, pp. 1-19, 2021.
- [36] J. I. Orisaleye, «Parametric analysis and design of a screw extruder for slightly Non-Newtonian (pseudoplastic) materials,» *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 21, p. 229–237, 2018.
- [37] T. Yu y P. Xue, «Chapter 4 - Yield criteria,» de *Introduction to Engineering Plasticity*, Elsevier, 2022, pp. 67-87.
- [38] D. V. Rosato, A. V. Rosato y D. D. P., *Blow Molding Handbook*, Hanser Publisher, 1989.
- [39] Autonics Co.; Ltd., «Productos de Control de Temperatura y Velocidad,» [En línea]. Available: <https://www.autonics.com>. [Último acceso: 8 Diciembre 2024].
- [40] Latrobe Specialty Steel Company, «DataSheet Nitralloy 135,» Latrobe, 2017.
- [41] Aliexpress, «12V DC Motor de Engranajes con Caja Reductora,» [En línea]. Available: <https://es.aliexpress.com/i/4001228614526.html>. [Último acceso: 8 Diciembre 2024].

- [42] Boletín de Prensa Nro. 085, «Ministerio de Energía y Minas,» 1 Noviembre 2024. [En línea]. Available: <https://www.recursosyenergia.gob.ec/gobierno-actualizo-la-tarifa-electrica-para-el-sector-industrial-av2-que-incluye-industrias-petroleras-mineras-y-acereras/#:~:text=Es%20as%C3%AD%20como%20la%20tarifa,2%20millones%2C%20en%20el%202024..> [Último acceso: 10 Enero 2025].
- [43] J. G. Castillo y D. Zhangallimbay, «La tasa social de descuento en la evaluación de proyectos de inversión: una aplicación para el Ecuador,» *Revista de la CEPAL*, n° 134, p. 79, 2021.

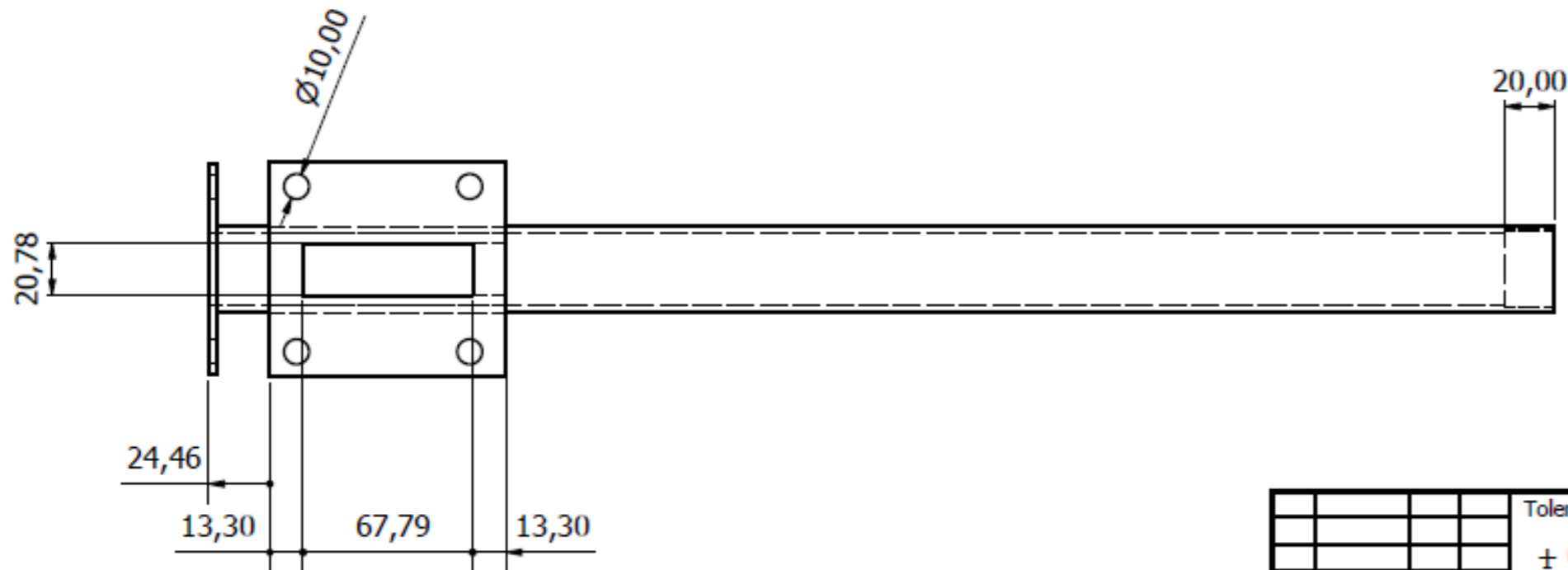
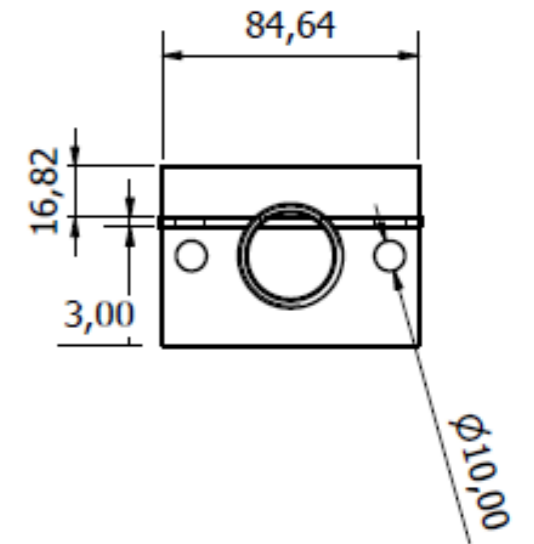
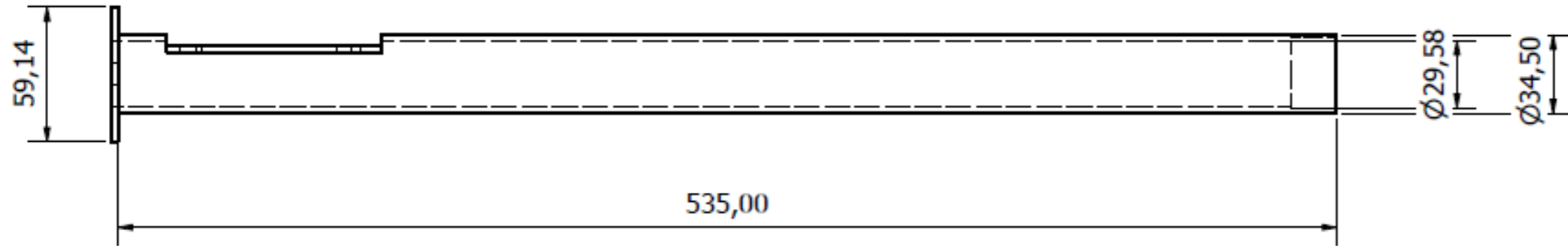
Apéndices



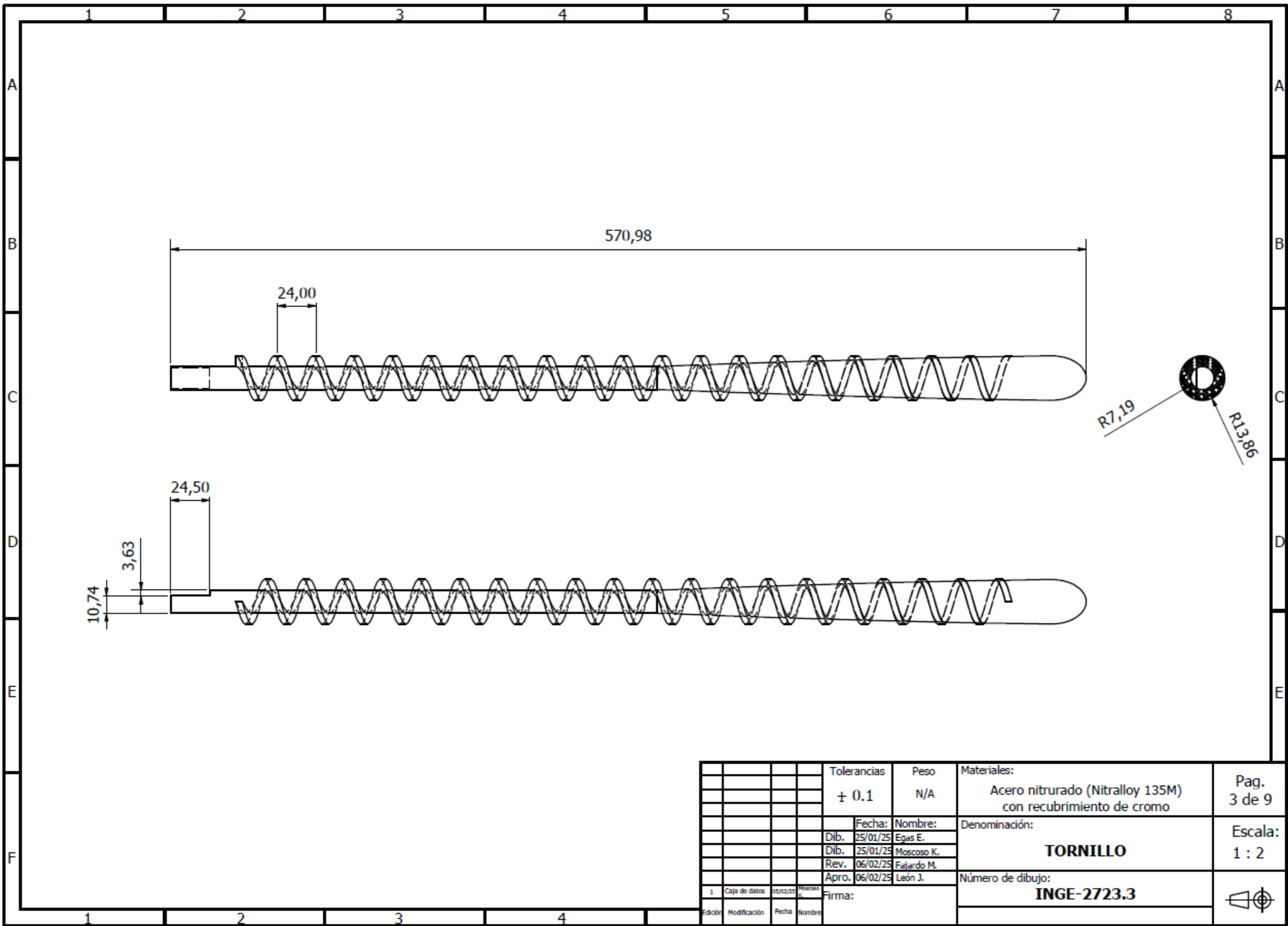
Lista de piezas			
Item	Cantidad	Pieza	Descripción
1	1	Cilindro	
2	1	Tornillo	
3	1	Tolva	
4	1	Boquilla	
5	1	Motor	
6	1	Acople1	
7	1	Acople2	
8	1	Acople3	
9	1	Case	
10	1	Soportes	
11	1	box	
12	1	Acrilico3mm	
13	1	Acrilico2	
14	4	Controlador de Temperatura AUTONICS TC4S 14R	
15	1	PlacaAlimentacion	
16	1	Interruptor electromagnetico ABB S201U-C10	
17	1	ControladorMotor	
18	3	Resistencia	
19	4	ISO 4032 - M10	Hexagon nuts, style 1-Product grade A and B
20	4	AS 1427 - M10 x 20	ISO metric machine screws

Tolerancias		Peso	Materiales:	Pag. 1 de 9
± 0.1		N/A	Varios	
Fecha:		Nombre:	Denominación: MÁQUINA EXTRUSORA	Escala: 1 : 5
Dib.	25/01/25	Egas E.		
Dib.	25/01/25	Moscoso K.		
Rev.	06/02/25	Fajardo M.		
Apro.		06/02/25	León J.	Número de dibujo: INGE-2723.1
Firma:				
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	

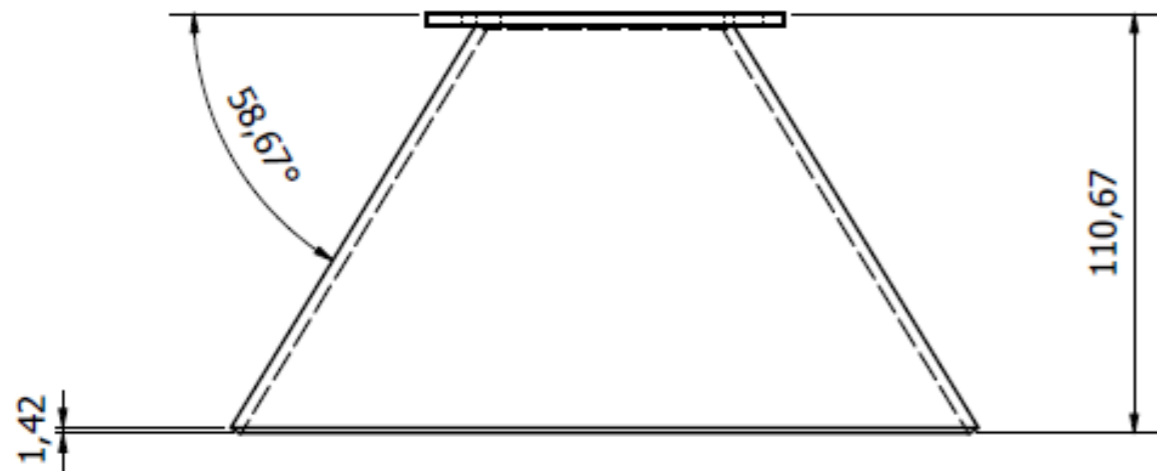
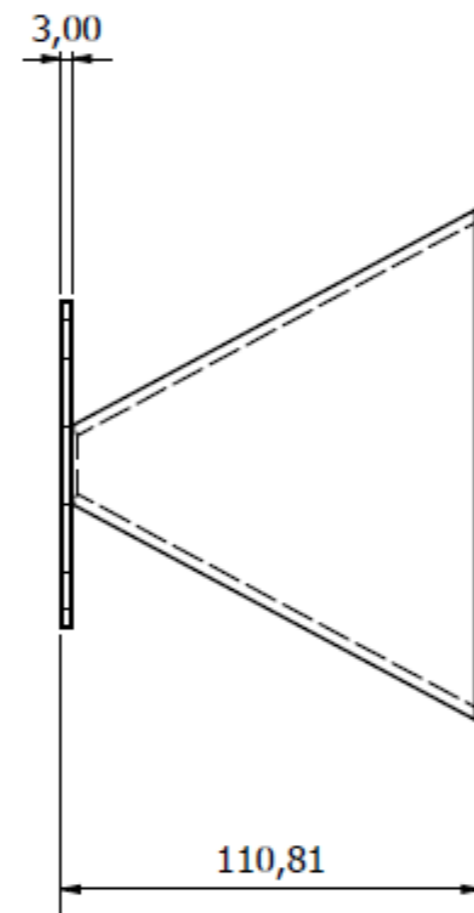
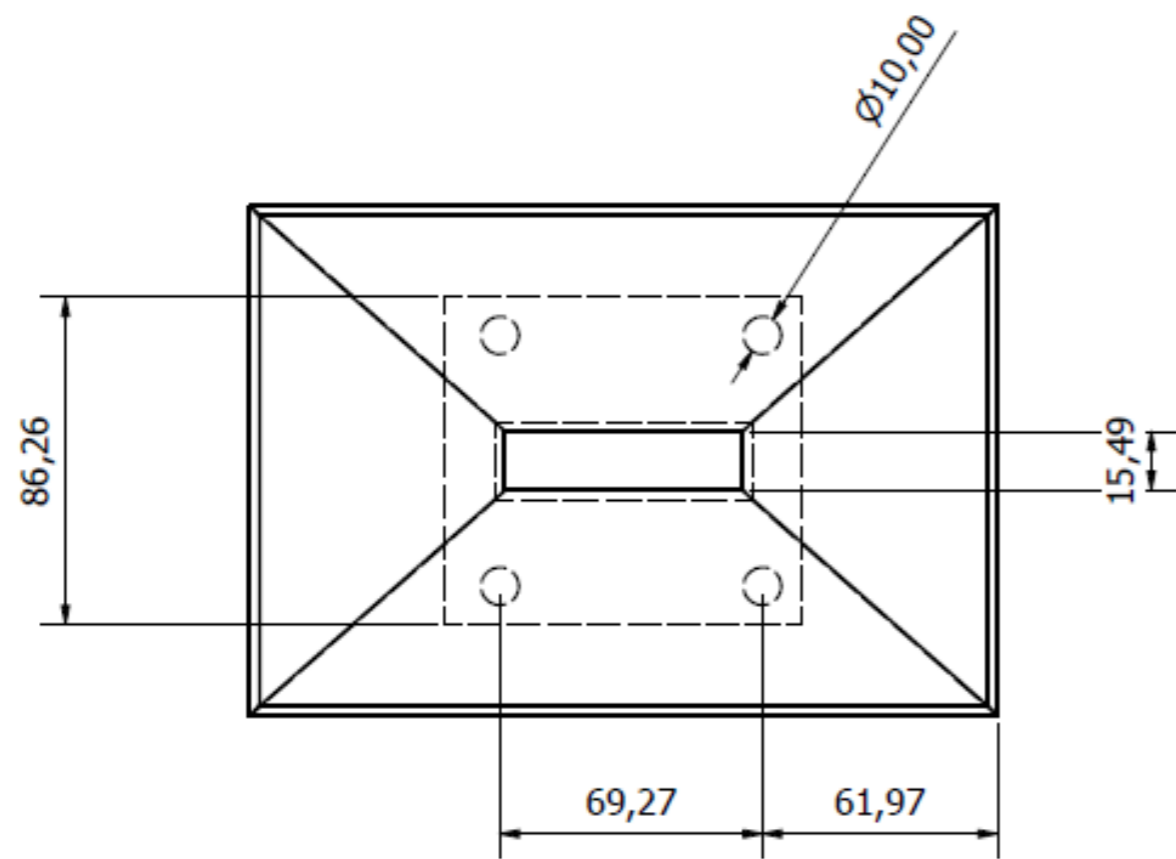
VISTA EXPLOTADA



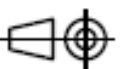
				Tolerancias	Peso	Materiales:	Pag.
				± 0.1	N/A	Acero inoxidable	2 de 9
				Fecha:	Nombre:	Denominación:	Escala:
				Dib. 25/01/25	Egas E.	CILINDRO	1 : 2.5
				Dib. 25/01/25	Moscoso K.		
				Rev. 06/02/25	Fajardo M.		
				Apro. 06/02/25	León J.	Número de dibujo:	
				Firma:		INGE-2723.2	
1	Caja de datos	05/02/25	Moscoso K.				
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				



Tolerancias		Peso	Materiales:	Pag. 3 de 9
± 0.1		N/A	Acero nitrurado (Nitalloy 135M) con recubrimiento de cromo	
Fecha:		Nombre:	Denominación: TORNILLO	Escala: 1 : 2
Dib.	25/01/25	Egas E.		
Dib.	25/01/25	Moscoso K.		
Rev.	06/02/25	Fajardo M.		
Apro.		06/02/25	León J.	Número de dibujo: INGE-2723.3
Firma:				
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	
1	Caja de datos	05/02/25	Moscoso K.	



				Tolerancias	Peso	Materiales:	Pag.
				± 0.1	N/A	Acero inoxidable	4 de 9
				Fecha:	Nombre:	Denominación:	Escala:
				Dib. 25/01/25	Egas E.	TOLVA	1 : 2
				Dib. 25/01/25	Moscoso K.		
				Rev. 06/02/25	Fajardo M.		
				Apro. 06/02/25	León J.	Número de dibujo:	
				Firma:		INGE-2723.4	
1	Caja de datos	05/02/25	Moscoso K.	Edición	Modificación	Fecha	Nombre



1

2

3

4

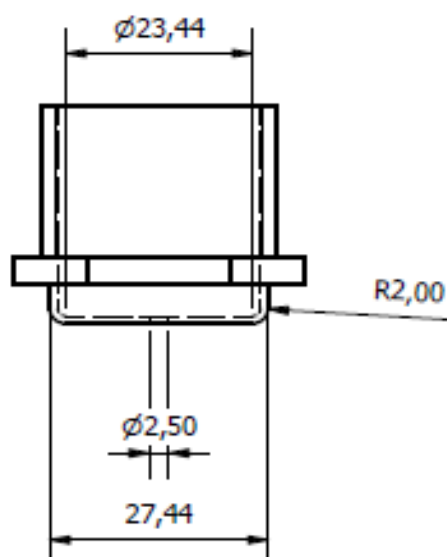
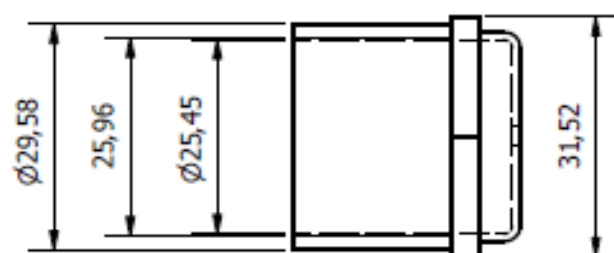
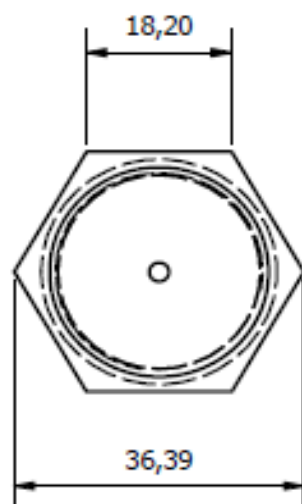
A

B

C

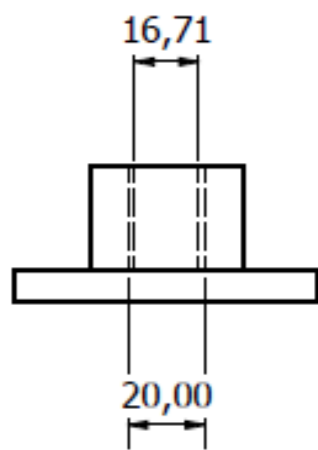
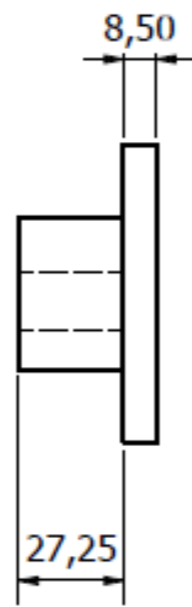
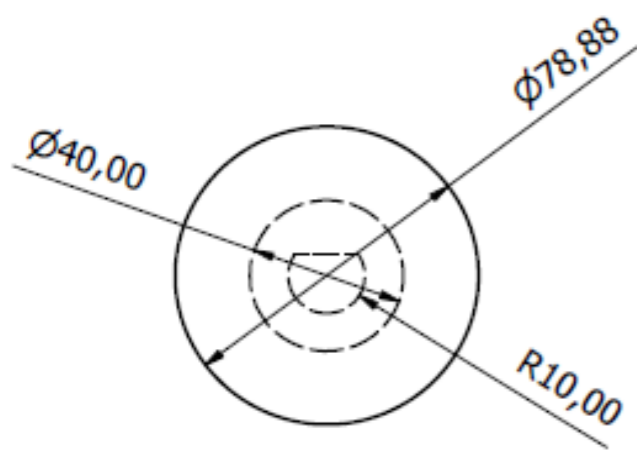
D

E

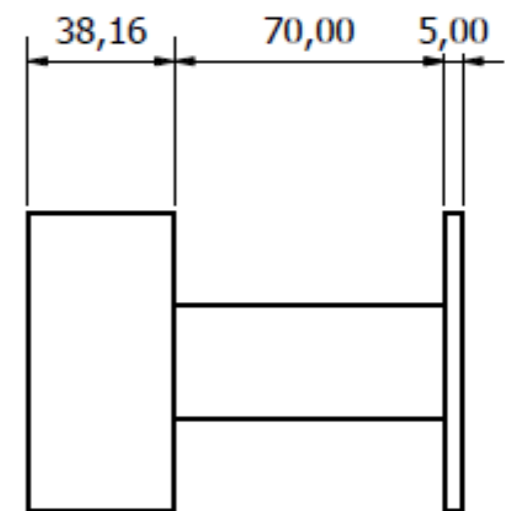
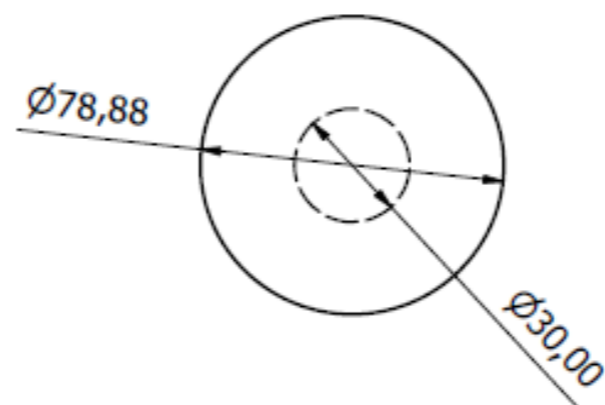


				Tolerancias ± 0.1	Peso	Materiales: Acero inoxidable	Pag. 5 de 9
				Fecha:	Nombre:	Denominación:	Escala:
				Dib. 25/01/25	Egas E.	BOQUILLA	1 : 1
				Dib. 25/01/25	Moscoso K.		
				Rev. 06/02/25	Fajardo M.		
				Apro. 06/02/25	León J.	Número:	
1	Caja de datos	05/02/25	Moscoso	Firma:		INGE-2723.5	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				

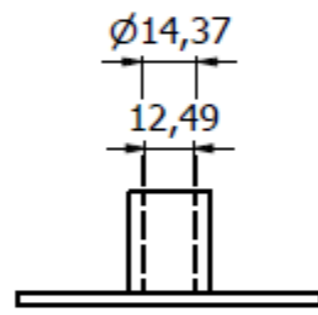
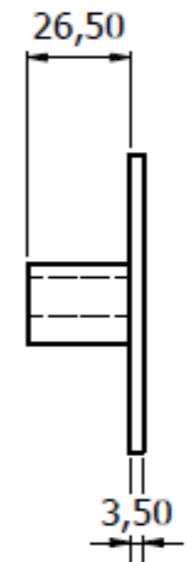
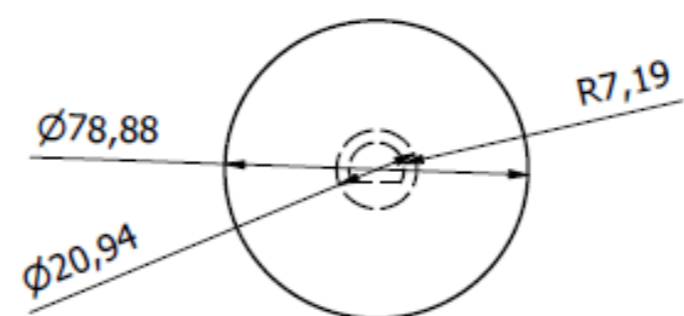
Acople 1



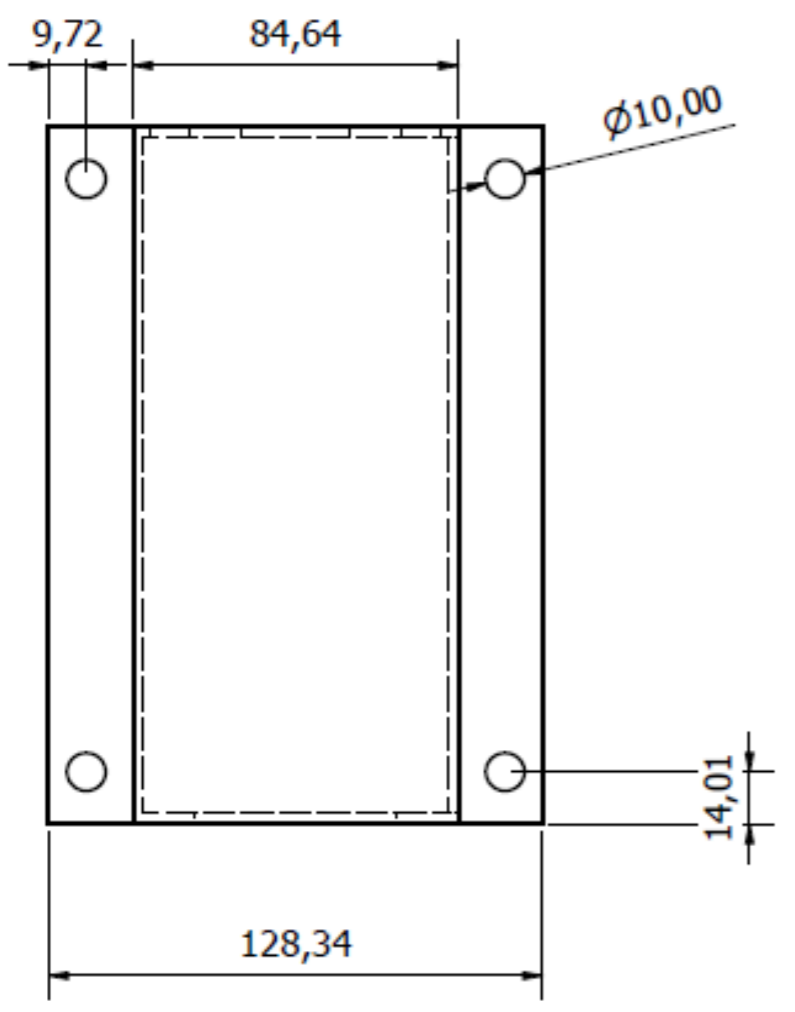
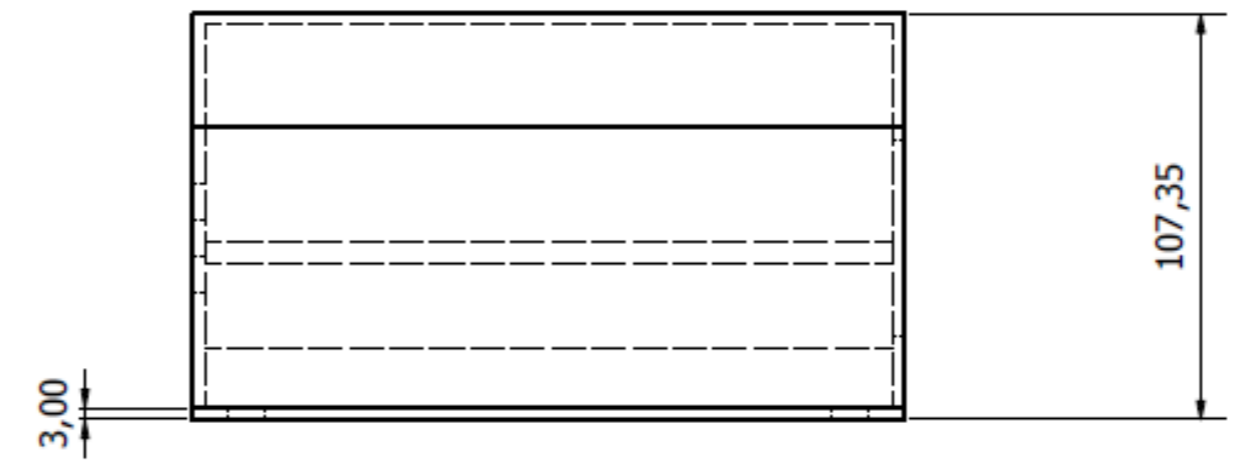
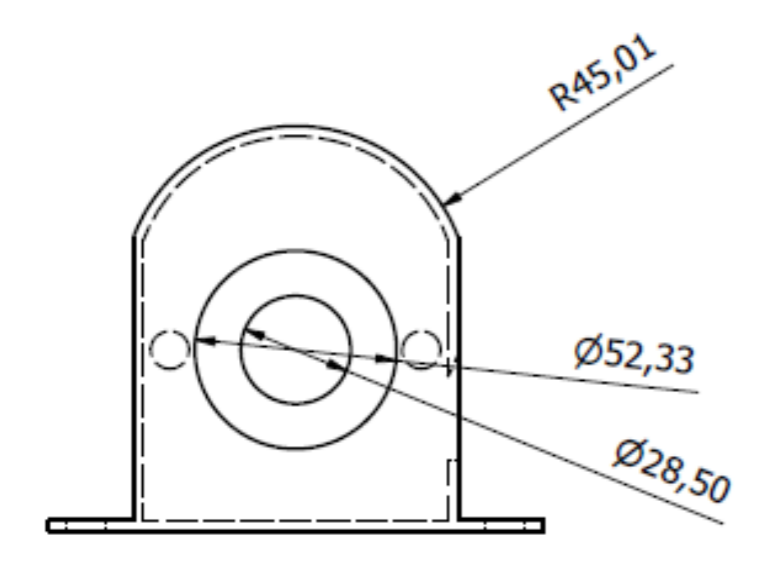
Acople 2



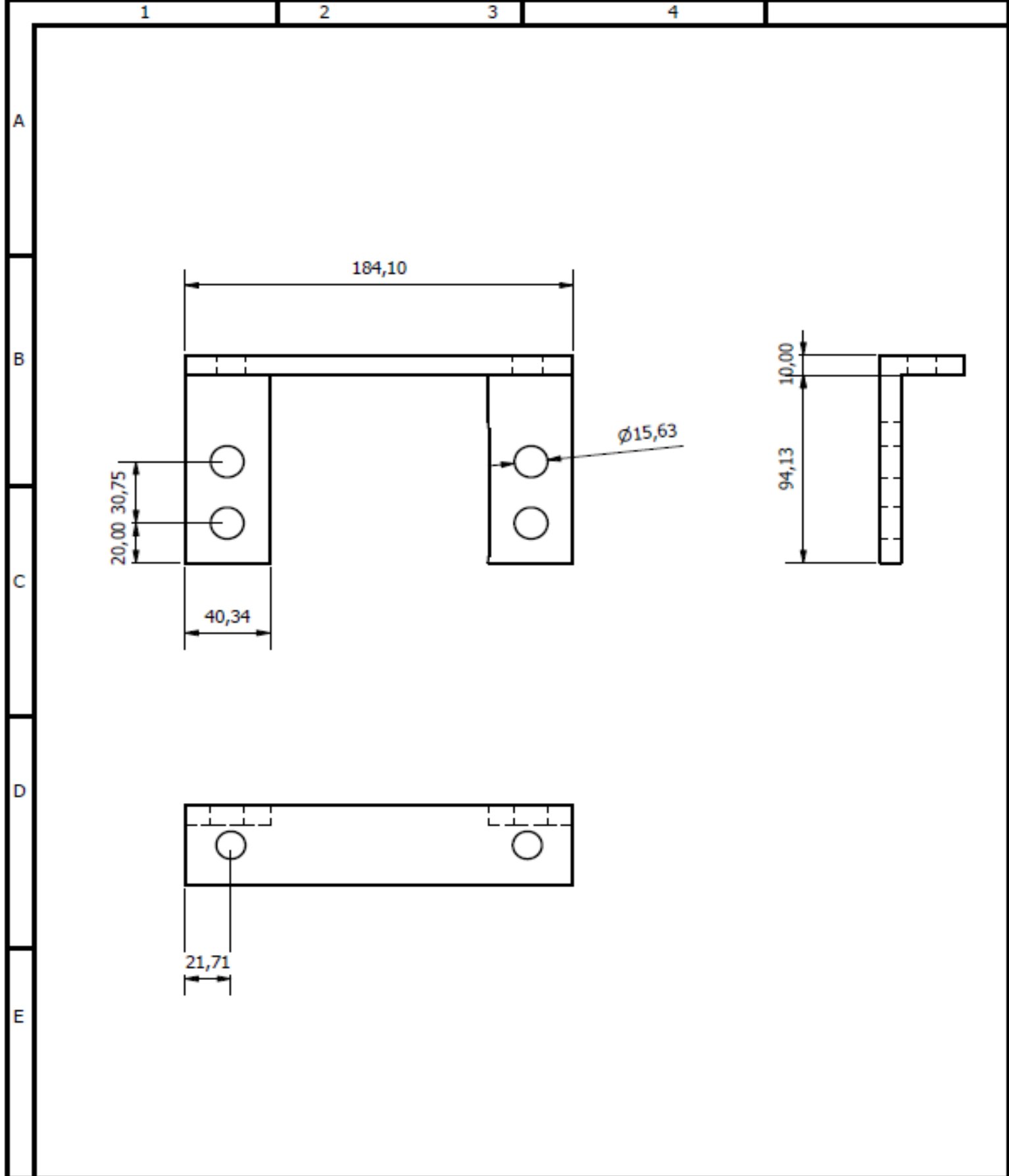
Acople 3



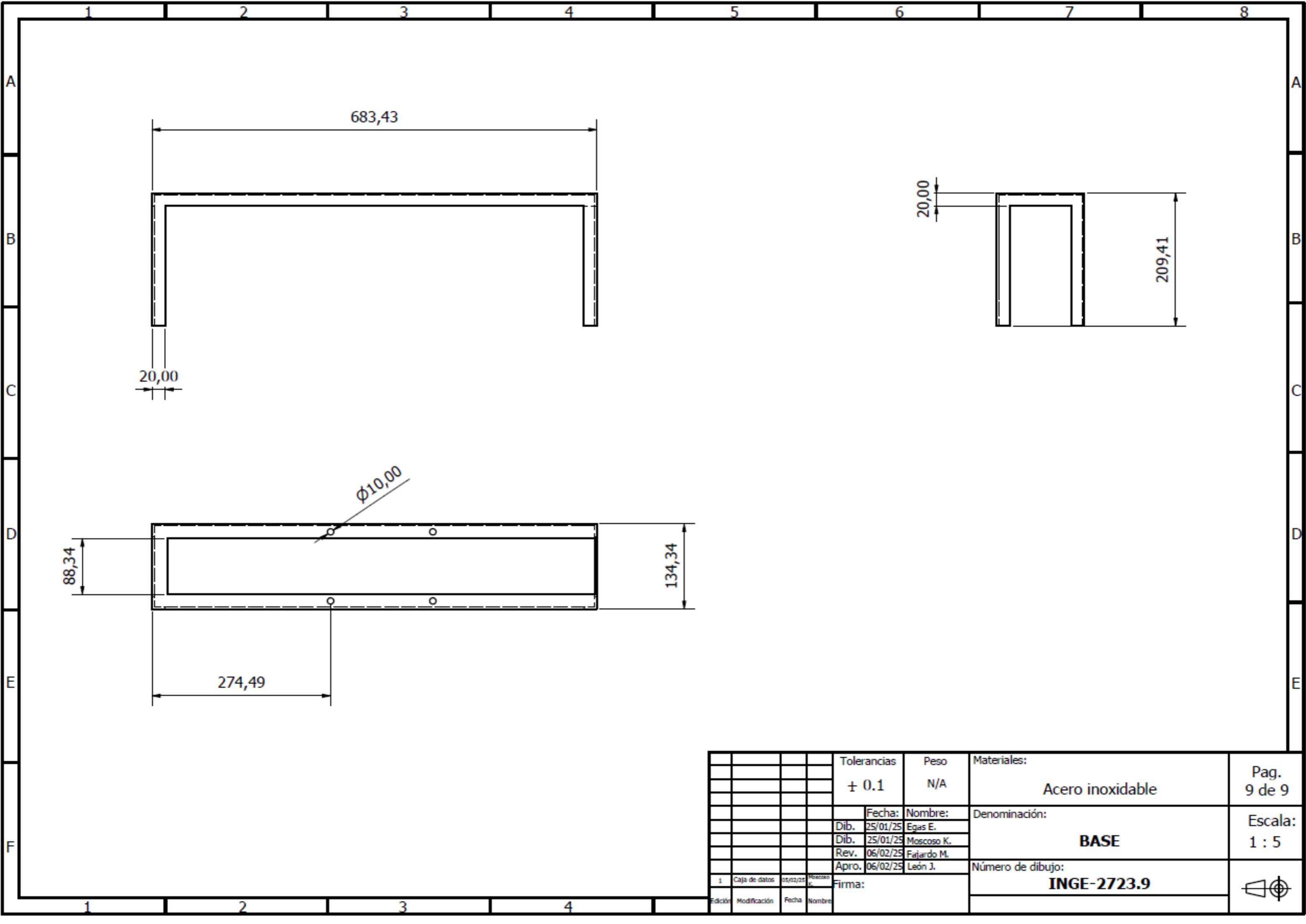
				Tolerancias	Peso	Materiales:	Pag.	
				± 0.1	N/A	Acero inoxidable	6 de 9	
				Fecha:	Nombre:	Denominación:	Escala:	
				Dib. 25/01/25	Egas E.	ACOPLES	1 : 2	
				Dib. 25/01/25	Moscoso K.		Número de dibujo:	
				Rev. 06/02/25	Fajardo M.			
				Apro. 06/02/25	León J.	INGE-2723.6		
1	Caja de datos	05/02/25	Moscoso K.	Firma:				
Edición	Modificación	Fecha	Nombre					



				Tolerancias	Peso	Materiales:	Pag.	
				± 0.1	N/A	Aluminio 1xxx	7 de 9	
					Fecha:	Nombre:	Denominación:	
				Dib.	25/01/25	Egas E.	CASE	
				Dib.	25/01/25	Moscoso K.		
				Rev.	06/02/25	Fajardo M.		
				Apro.	06/02/25	León J.	Número de dibujo:	
							INGE-2723.7	
1	Caja de datos	05/02/25	Moscoso K.	Firma:				
Edición	Modificación	Fecha	Nombre					

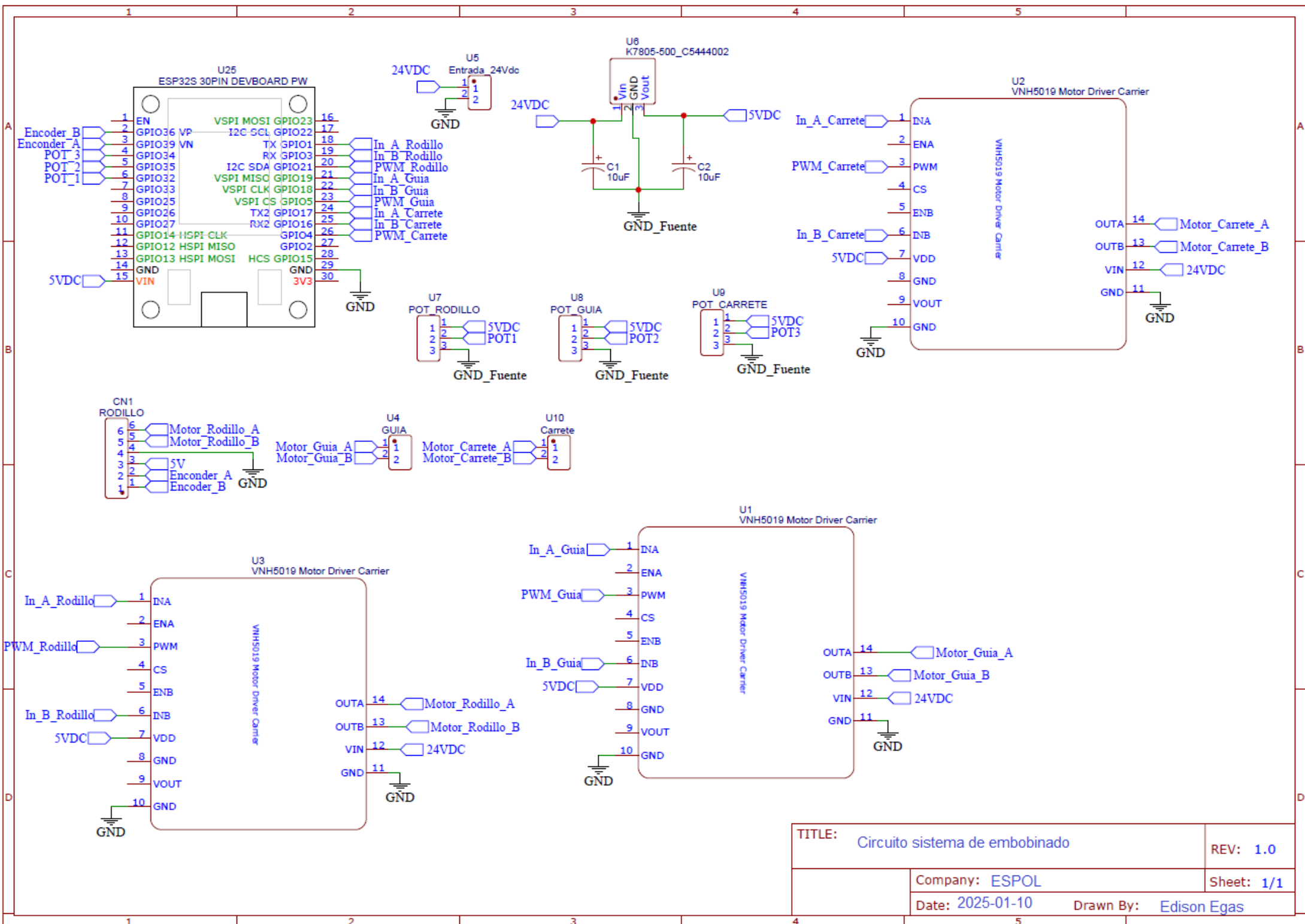


				Tolerancias ± 0.1	Peso	Materiales: Acero inoxidable	Pag. 8 de 9
				Fecha:	Nombre:	Denominación:	Escala:
				Dib. 25/01/25	Egas E.	SOPORTES	1 : 2.5
				Dib. 25/01/25	Moscoso K.		
				Rev. 06/02/25	Fajardo M.		
				Apro. 06/02/25	León J.	Número:	
1	Caja de datos	05/02/25	Moscoso	Firma:		INGE-2723.8	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				

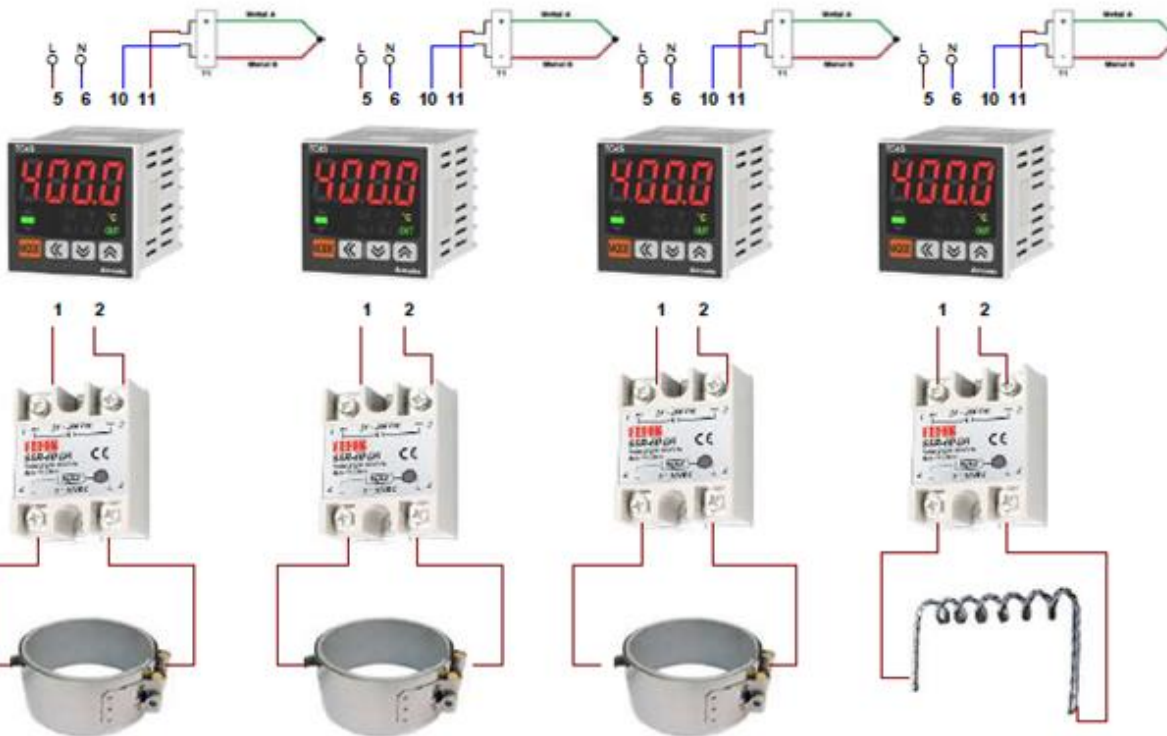
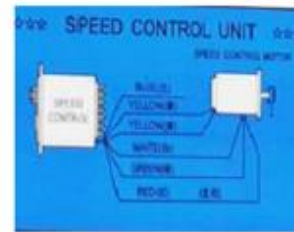
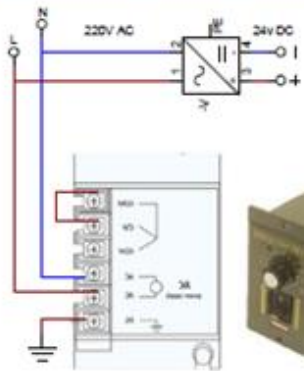


				Tolerancias	Peso	Materiales:	Pag.
				± 0.1	N/A	Acero inoxidable	9 de 9
					Fecha:	Nombre:	Escala:
				Dib.	25/01/25	Egas E.	1 : 5
				Dib.	25/01/25	Moscoso K.	
				Rev.	06/02/25	Fajardo M.	
				Apro.	06/02/25	León J.	
						Número de dibujo:	
						INGE-2723.9	
1	Caja de datos	05/02/25	Moscoso K.	Firma:			
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				

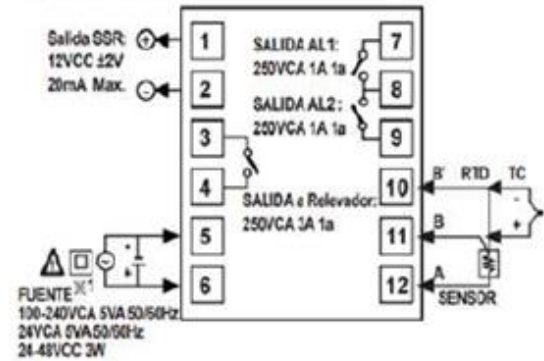




TITLE: Circuito sistema de embobinado		REV: 1.0
Company: ESPOL		Sheet: 1/1
Date: 2025-01-10	Drawn By: Edison Egas	

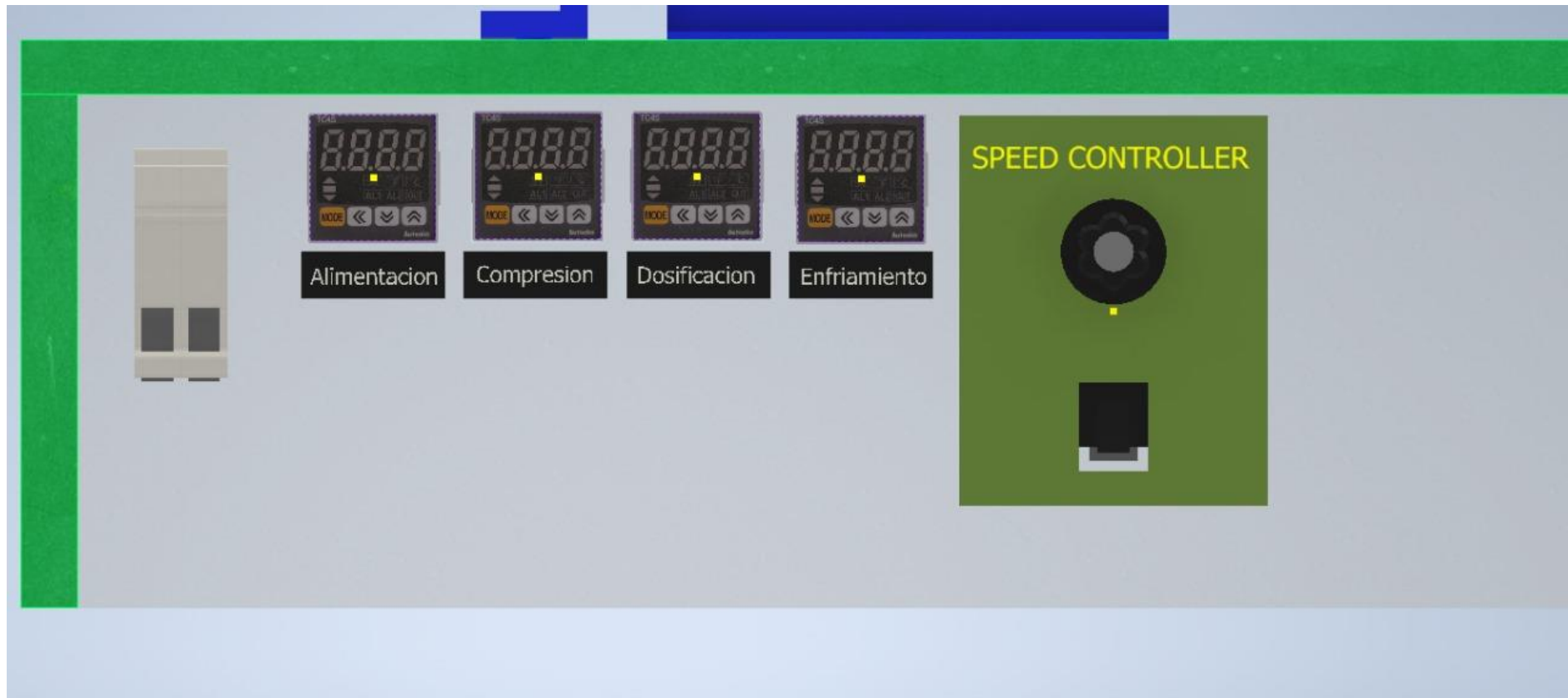


•Serie TC4S



	Fecha	Nombre	Firmas	Entidad	Título	Fecha	08-Jan-2025	Núm:	1 de 1
Dibujado	6-Enero-2025	Edison Egas			Conexiones eléctricas				
Comprobado								PLANO_TESIS1_2tra	

Apéndice A
Controlador de velocidad



Apéndice B
PCB Sistema de embobinado

