



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTROMECAÁNICA**

**ELABORACIÓN DE UNA EXTRUSORA PARA PLÁSTICO  
HÚMEDO PARA AUMENTAR LA PRODUCCIÓN DE LA  
EMPRESA RECIPLAS EN EL CANTÓN LATACUNGA**

**PROPUESTA TECNOLÓGICA PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

**AUTORES:**

Richard Alexander Padilla Toapanta

José Luis Rodríguez Berrezueta

**TUTOR:**

Ing. Mg. Luis Miguel Navarrete López

**LATACUNGA - ECUADOR**

**OCTUBRE – FEBRERO**

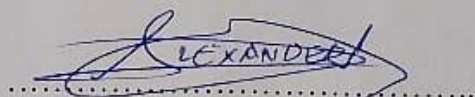
**2024-2025**

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

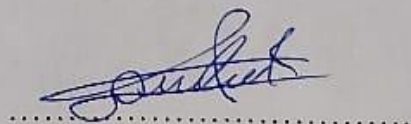
Nosotros Richard Alexander Padilla Toapanta, con cédula de ciudadanía N.º 1728206556 y José Luis Rodríguez Berrezueta con cedula de ciudadanía N.º 0502928062 declaramos ser autores de la presente PROPUESTA TECNOLÓGICA: **“ELABORACIÓN DE UNA EXTRUSORA PARA PLÁSTICO HÚMEDO PARA AUMENTAR LA PRODUCCIÓN DE LA EMPRESA RECIPLAS EN EL CANTÓN LATACUNGA.”** Siendo el Ing. Mg. Luis Miguel Navarrete López, tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Latacunga, Febrero del 2025.



Richard Alexander Padilla Toapanta  
C.C: 1728206556



José Luis Rodríguez Berrezueta  
C.C: 0502928062

## **AVAL DEL TUTOR DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA**

En calidad de Tutor de la Propuesta Tecnológica sobre el título:

**“ELABORACIÓN DE UNA EXTRUSORA PARA PLÁSTICO HÚMEDO PARA AUMENTAR LA PRODUCCIÓN DE LA EMPRESA RECIPLAS EN EL CANTÓN LATACUNGA”**, de: Richard Alexander Padilla Toapanta con número de cédula N.º 1728206556 y José Luis Rodríguez Berrozuela con número de cédula N.º 0502928062, de la carrera de Ingeniería en Electromecánica, considero que dicha Propuesta Tecnológica es merecedor del aval de aprobación al cumplir las normas técnicas, traducción y formatos previstos, así como también ha incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la pre-defensa.

Latacunga, febrero del 2025.



Ing. Mg. Luis Miguel Navarrete López

C.C. 1803747284

**TUTOR**

## AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban la presente propuesta tecnológica de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y, por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulantes Padilla Toapanta Richard Alexander; Rodríguez Berrezueta José Luis, con el título del Proyecto de titulación “**Elaboración de una extrusora para plástico húmedo para aumentar la producción de la empresa RECIPLAS en el cantón Latacunga**”, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Latacunga, 19 de febrero de 2025

Para constancia firman:



Ing. Vizquete Fiallos Gonzalo

C.C: 1714631361

**LECTOR 1(PRESIDENTE)**



PhD. Torres Tamayo Enrique

C.C: 1757121940

**LECTOR 2 (MIEMBRO)**



Ing. MSc. Segundo Ángel Cevallos Betún

C.C: 0501782437

**LECTOR 3 (MIEMBRO)**

## *AVAL DE TRADUCCIÓN*

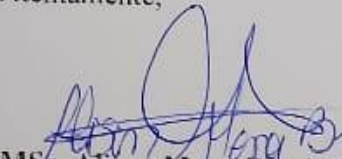
En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que:

La traducción del resumen al idioma Inglés de la propuesta tecnológica cuyo título versa: **“ELABORACIÓN DE UNA EXTRUSORA PARA PLÁSTICO HÚMEDO PARA AUMENTAR LA PRODUCCIÓN DE LA EMPRESA RECIPLAS EN EL CANTÓN LATACUNGA”** presentado por: **Padilla Toapanta Richard Alexander y Rodríguez Berrezueta José Luis** egresados de la Carrera de Ingeniería Electromecánica perteneciente a la **Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas**, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente aval para los fines académicos legales.

Latacunga, febrero de 2025

Atentamente,

  
MSc. Alison Mena Barthelotty  
DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC  
CI: 0501801252



### ***AGRADECIMIENTO***

Mi eterna gratitud con la Universidad Técnica de Cotopaxi por abrirnos sus puertas, a cada una de las autoridades, mis docentes, personas de gran sabiduría que supieron guiarme hasta el punto en el que me encuentro hoy, a la carrera de Ingeniería Electromecánica, que me permitió obtener conocimientos de calidad para desenvolverme en mi futura vida profesional y permitió cumplir mi objetivo planteado.

***Richard***

***José***

## DEDICATORIA

*Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. A mis padres Richard y Carmen por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, a mis hermanos y a toda mi familia, porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.*

***Richard Padilla***

## DEDICATORIA

*Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. A mis padres Efrain y Piedad por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, a mis hermanos, mi sobrino y a toda mi familia, porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.*

*A mi pareja Gaby que igual ha sido incondicional en el transcurso de mi carrera..*

***José Rodríguez***

## ÍNDICE GENERAL

2. INTRODUCCIÓN.....	i
2.1. Situación problemática .....	1
2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	2
2.2.1. Objeto de investigación.....	2
2.2.2. Campo de acción .....	2
2.1. BENEFICIARIOS .....	2
2.1.1. Directos .....	2
2.1.2. Indirectos.....	2
2.2. JUSTIFICACIÓN.....	2
2.3. OBJETIVOS.....	3
2.3.1. Objetivo general .....	3
2.3.2. Objetivos específicos.....	3
2.3.3. Sistemas de tareas.....	4
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	5
3.1. ANTECEDENTES .....	5
3.2. HISTORIA DE LA EXTRUSIÓN DE PLÁSTICOS .....	6
3.2.1. Origen y desarrollo histórico del LDPE.....	6
3.3. PARTES DE UNA EXTRUSORA .....	7
3.3.1. Componentes principales de una extrusora.....	7
3.3.2. Tolva de Alimentación .....	7
3.3.3. Tornillo de Extrusión.....	7
3.3.4. Barril de extrusión.....	8
3.3.5. Zonas de calentamiento .....	9
3.3.6. Sistema de desgasificación.....	10
3.3.7. Cabezal o matriz de extrusión .....	11
3.3.8. Sistema de enfriamiento .....	11
3.3.9. Tipo de husillo de extrusor.....	12
3.4. TIPOS DE EXTRUSORAS.....	13

3.4.1.	Extrusora de husillo simple:.....	13
3.4.2.	Extrusora de doble husillo:.....	13
3.4.3.	Extrusora desgasificadora: .....	13
3.4.4.	Extrusora de husillo cónico:.....	14
3.4.5.	Extrusora Multicomponentes .....	14
3.5.	SISTEMAS DE CALEFACCIÓN EN EXTRUSORAS DE PLÁSTICO.....	14
3.5.1.	Calefacción por Resistencias Eléctricas.....	14
3.5.2.	Calefacción por Gas Licuado de Petróleo (GLP).....	15
3.6.	Influencia del Método de Calefacción en la Extrusión de Plástico .....	16
4.	METODOS Y PROCEDIMIENTOS .....	17
4.1.	DESCRIPCION DEL PROYECTO .....	17
4.2.	VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN.....	17
4.2.1.	Variables Independientes.....	17
4.2.2.	Variable Dependiente .....	18
4.3.	IDENTIFICACIÓN DE COMPONENTES DE LA EXTRUSORA.....	18
4.4.	METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE.....	20
4.4.1.	Diseño de la Estructura en FUSION 360 .....	20
4.4.2.	Cálculo de Carga y Resistencia de la Estructura.....	21
4.4.3.	Análisis y elección del material para la construcción de la estructura.....	21
4.4.4.	Fabricación e Instalación de la Estructura.....	22
4.5.	METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL HUSILLO .....	23
4.5.1.	Descripción de las variables del husillo .....	23
4.5.2.	Procedimiento para la evaluación del husillo.....	23
4.6.	METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA CAMISA .....	25
4.6.1.	Descripción de las variables de la camisa .....	25
4.6.2.	Procedimiento para la evaluación de la camisa.....	26
4.7.	METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA CAJA REDUCTORA .....	26
4.7.1.	Procedimiento para la Evaluación de la Caja Reductora .....	27
4.8.	METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN Y EVALUACIÓN DEL MOTOR .....	28
4.8.1.	Procedimiento para la Evaluación del Motor.....	29
4.9.	METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE LAS POLEAS.....	30
4.9.1.	Procedimiento para el Dimensionamiento de las Poleas.....	31

4.10. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LA BOQUILLA DE LA EXTRUSORA .....	32
4.10.1. Procedimiento para el Diseño y Fabricación de la Boquilla .....	32
4.10.1.1. Diseño en FUSION 360.....	33
4.10.1.2. Fabricación de la Boquilla.....	34
4.11. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO Y EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN .....	34
4.11.1. Selección y diseño del sistema de calefacción .....	35
4.11.2. Cálculo de potencia térmica requerida .....	35
4.11.3. Adquisición y Montaje de los Sopletes .....	37
4.12. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL RECUBRIMIENTO TÉRMICO .....	37
4.12.1. Diseño del Recubrimiento en FUSION 360 .....	37
4.12.2. Cálculo de la Eficiencia Térmica del Recubrimiento térmico.....	39
4.12.3. Selección de material para la construcción.....	39
4.12.4. Fabricación e Instalación del Recubrimiento térmico .....	40
4.12.5. Pruebas de funcionamiento y validación.....	40
4.13. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LA TOLVA DE ALIMENTACIÓN.....	41
4.13.1. Justificación y Función de la Tolva .....	41
4.13.2. Diseño de la Tolva en FUSION 360 .....	41
4.13.3. Cálculo de la Capacidad Volumétrica de la Tolva .....	42
4.13.4. Cálculo del peso del LDPE en la tolva .....	43
4.13.5. Cálculo de la autonomía de la tolva .....	43
4.13.6. Fabricación e instalación de la tolva .....	43
4.13.7. Análisis y selección del material para la fabricación de la tolva.....	44
4.14. SELECCIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD PARA EL DISEÑO DE LA EXTRUSORA .....	45
4.15. DISEÑO CONTROL ELÉCTRICO.....	46
4.15.1. Diagrama del sistema eléctrico.....	46
4.15.2. Organigrama del Sistema de Control Eléctrico .....	47
4.15.3. Simulación y Seguridad del Sistema de Control .....	48
4.16. METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE CABLE .....	49
4.16.1. Cálculo de la corriente nominal.....	50

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....	50
5.1. CONSTRUCCIÓN DE LA EXTRUSORA.....	50
5.1.1. Fabricación del bastidor y soporte de la extrusora.....	50
5.1.2. Ensamblaje del soporte para la caja reductora .....	51
5.1.3. Construcción del recubrimiento térmico de Calefacción .....	52
5.1.4. Fabricación de la tapa del recubrimiento térmico .....	53
5.1.5. Instalación del motor y transmisión .....	54
5.1.6. Montaje del Husillo de Extrusión.....	55
5.1.7. Implementación de los sopletes.....	55
5.2. EVALUACIÓN DE LOS MATERIALES PROPORCIONADOS POR LA EMPRESA .....	56
5.2.1. Husillo, Camisa, Caja Reductora y Motor .....	56
5.2.2. Validación del factor de seguridad en la extrusora.....	59
5.3. EVALUACIÓN DE LA ESTRUCTURA.....	59
5.3.1. Validación del Factor de Seguridad.....	60
5.4. RESULTADOS DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN .....	61
5.5. RESULTADOS DE LA TOLVA DE ALIMENTACIÓN.....	62
5.6. EVALUACIÓN DE LAS POLEAS Y CORREA DE TRANSMISIÓN .....	63
5.7. EVALUACIÓN DE LA BOQUILLA DE EXTRUSIÓN.....	64
5.7.1. Esfuerzos .....	64
5.7.2. Deformación.....	65
5.7.3. Factor de seguridad .....	66
5.8. EVALUACIÓN DE LA SELECCIÓN DEL CABLE .....	67
5.9. PRUEBAS EXPERIMENTALES DEL PROTOTIPO.....	67
5.10. EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN .....	69
5.1. COMPARATIVA DEL DISEÑO Y SELECCIÓN DE MATERIAL PARA LA EXTRUSORA .....	70
5.1.1. Comparación del factor de seguridad.....	70
5.2. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO .....	71
5.2.1. Costos directos de fabricación.....	72
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	74
6.1. CONCLUSIONES.....	74
6.2. RECOMENDACIONES .....	75
7. REFERENCIAS .....	76

8. ANEXOS .....;Error! Marcador no definido.

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Sistemas de tareas .....	4
Tabla 4.2 Proceso de extrusión .....	18
Tabla 4.3 Análisis de Componentes de la Extrusora .....	19
Tabla 4.4 Elección de materiales .....	22
Tabla 4.5 Descripción de variables del husillo .....	23
Tabla 4.6 Descripción de variables de la camisa .....	25
Tabla 4.7 Descripción de variables de la caja reductora.....	26
Tabla 4.8 Descripción de variables del motor .....	29
Tabla 4.9 Variables de las poleas .....	30
Tabla 4.10 Parámetros de Diseño de la Boquilla de la Extrusora.....	32
Tabla 4.11 Propiedades mecánicas del acero ASTM A36 .....	45
Tabla 5.12 Dimensiones de la tolva.....	62
Tabla 5.13 Pruebas de poleas.....	63
Tabla 5.14 Pruebas experimentales con 10kg.....	67
Tabla 5.15 Pruebas experimentales con 100 kg.....	68
Tabla 5.16 Comparación entre la Extrusora en Funcionamiento y la Nueva Extrusora.....	69
Tabla 5.17 Diferencia en los factores de seguridad .....	70
Tabla 5.18 Comparación de materiales.....	71
Tabla 5.19 Costos varios.....	72
Tabla 5.20 Comparación de costos de la extrusora .....	73

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Tornillo de una extrusora [11] .....	8
Figura 3.2 Zonas de calentamiento .....	9
Figura 3.3 Desgasificación de una extrusora .....	10
Figura 3.4 Cabezal de una extrusora .....	11
Figura 3.5 Resistencia Eléctrica .....	15
Figura 3.6 Calefacción por GLP .....	16
Figura 4.7 Modelo 3D de la Estructura en FUSION 360 .....	20
Figura 4.8 Paso y Perfil del Filete en el Husillo .....	24
Figura 4.9 Diagrama de Cargas y Deformación en el Husillo .....	24
Figura 4.10 Cilindro acero AISI/SAE 1080 421 austenítico. ....	25
Figura 4.11 Placa de características del motor .....	29
Figura 4.12 Diagrama geométrico de la boquilla .....	33
Figura 4.13 Modelo del cilindro y sistema de calefacción. ....	36
Figura 4.14 Diseño del Recubrimiento térmico de Calefacción.....	38
Figura 4.15 Fabricación del recubrimiento térmico .....	40
Figura 4.16 Modelo 3D de la Tolva de Alimentación Acoplada a la Extrusora .....	42
Figura 4.17 Diagrama de control arranque estrella – triángulo.....	46
Figura 4.18 Diagrama de potencia arranque estrella – triángulo.....	47
Figura 4.19 Organigrama del Sistema de Control Eléctrico .....	48
Figura 4.20 Simulación realizada en el software CadeSimu .....	49
Figura 5.21 Proceso de fabricación del soporte estructural .....	50
Figura 5.22 Proceso de fabricación del bastidor.....	51
Figura 5.23 Estructura base completa.....	51
Figura 5.24 Fabricación del soporte para la caja reductora.....	52
Figura 5.25 Instalación de la caja reductora sobre su soporte .....	52

Figura 5.26 Instalación del cilindro .....	53
Figura 5.27 Construcción del recubrimiento térmico con ladrillos refractarios.....	53
Figura 4.28 Fabricación de la tapa del recubrimiento térmico con material refractario .....	54
Figura 5.29 Montaje de la caja reductora .....	54
Figura 5.30 Sistema de calentamiento por sopletes en la extrusora .....	56
Figura 5.31 Acople de camisa, caja reductora, motor y husillo a la estructura .....	56
Figura 5.32 Correcta alineación del husillo y la camisa.....	57
Figura 5.33 Esfuerzos cortantes en la extrusora .....	58
Figura 5.34 Factor de seguridad en la extrusora.....	58
Figura 5.35 Factor de seguridad del diseño de la estructura. ....	59
Figura 5.36 Estructura del prototipo.....	60
Figura 5.37 Sistema de calefacción .....	62
Figura 5.38 Tolva de la extrusora .....	63
Figura 5.39 Poleas de la segunda prueba.....	64
Figura 5.40 Esfuerzos obtenidos .....	65
Figura 5.41 Posible deformación.....	65
Figura 5.42 Análisis del factor de seguridad .....	66
Figura 5.43 Salida del material extrusado .....	67
Figura 5.44 Análisis funcional de la extrusora para plástico reciclado .....	67
Figura 5.45 Relación entre kg de entrada (10 kg) y salida con índice de humedad .....	68
Figura 5.46 Relación entre kg de entrada (100 kg) y salida con índice de humedad .....	69
Figura 5.47 Factor de seguridad optimizado .....	70
Figura 5.48 Referencia de Precio para Extrusor.....	73
Figura 5.49 Comparación de Costos de la Extrusora .....	74

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

## FACULTAD DE INGENIERÍA Y APLICADAS

**TÍTULO:** “Elaboración de una extrusora para plástico húmedo para aumentar la producción de la empresa RECIPLAS en el cantón Latacunga”

**Autores:**

Padilla Toapanta Richard Alexander

Rodríguez Berrezueta José Luis

### RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo el diseño y evaluación de una extrusora para plástico húmedo con el fin de optimizar la producción en la empresa Reciplas. La extrusión de plásticos reciclados representa un desafío en términos de eficiencia y calidad del producto final, por lo que se ha desarrollado un sistema mejorado que optimiza el proceso de peletización y aumenta la capacidad de procesamiento del material.

La metodología aplicada incluye el diseño del sistema de alimentación, calentamiento y extrusión, así como la implementación de modelos matemáticos para el análisis térmico, mecánico y de flujo del material. Se realizaron simulaciones computacionales del funcionamiento de la extrusora para prever su desempeño bajo diferentes condiciones operativas. Además, se llevaron a cabo pruebas experimentales para evaluar su rendimiento en condiciones reales de operación, permitiendo ajustar parámetros clave para mejorar la eficiencia del sistema.

El análisis de variables operativas como temperatura, velocidad de extrusión, consumo energético y presión permitió validar el rendimiento del sistema y determinar los parámetros óptimos para su funcionamiento. Asimismo, se realizaron pruebas de funcionamiento para evaluar la calidad del material extruido, asegurando una adecuada homogeneización y estabilidad del proceso.

Los resultados obtenidos demuestran que la extrusora diseñada es viable y mejora significativamente la eficiencia del proceso productivo, contribuyendo a la optimización del reciclaje de plásticos y la reducción de desperdicios. Este estudio aporta al desarrollo de tecnologías más sostenibles, fomentando la economía circular y minimizando el impacto ambiental de la producción de plásticos. Además, se establecen bases para futuras mejoras en la automatización y eficiencia energética del sistema, promoviendo la innovación en el procesamiento de materiales reciclados.

Palabras clave: extrusora, optimización, reciclaje, eficiencia

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

## FACULTAD DE INGENIERÍA Y APLICADAS

**THEME:** “DEVELOPMENT OF A WET PLASTIC EXTRUDER TO INCREASE THE PRODUCTION OF THE RECIPLAS COMPANY IN THE LATACUNGA CANTON”.

**Authors:**

Padilla Toapanta Richard Alexander  
Rodríguez Berrezueta José Luis

### ABSTRACT

This work aims to design and evaluate a wet plastic extruder to optimize production at Reciplas. The extrusion of recycled plastics represents a challenge in terms of efficiency and quality of the final product, so an improved system has been developed to optimize the palletization process and increase the processing capacity of the material. The applied methodology includes the design of the feeding, heating and extrusion system, as well as the implementation of mathematical models for the thermal, mechanical and flow analysis of the material. Computational simulations of the extruder operation were carried out to predict its performance under different operating conditions. In addition, experimental tests were carried out to evaluate its performance under real operating conditions, allowing the adjustment of key parameters to improve the efficiency of the system. The analysis of operational variables such as temperature, extrusion speed, energy consumption and pressure allowed validation of the system's performance and determination of the optimal parameters for its operation. Likewise, operational tests were carried out to evaluate the quality of the extruded material, ensuring adequate homogenization and stability of the process. The results obtained show that the designed extruder is viable and significantly improves the efficiency of the production process, contributing to the optimization of plastic recycling and the reduction of waste. This study contributes to the development of more sustainable technologies, promoting the circular economy and minimizing the environmental impact of plastics production. It also lays the foundations for future improvements in the automation and energy efficiency of the system, promoting innovation in the processing of recycled materials.

**KEYWORDS:** Extruder, Optimization, Recycling, Efficiency.

## 1. INFORMACIÓN GENERAL

**Título del proyecto:**

“Elaboración de una extrusora para plástico húmedo para aumentar la producción de la empresa RECIPLAS en el cantón Latacunga.”

**Fecha de inicio:**

Octubre 2024

**Fecha de finalización:**

Febrero 2025

**Lugar de ejecución:**

**Región:** Sierra

**Provincia:** Cotopaxi

**Parroquia:** Eloy Alfaro

**Sector:** San Felipe

**Facultad que auspicia:** Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas (CIYA)

**Carreara que auspicia:** Ingeniería Electromecánica

**Modalidad de Titulación:**

Propuestas Tecnológicas

Proyectos de Investigación

**Equipo de Trabajo:** Padilla Toapanta Richard Alexander – Rodríguez Berrezueta José Luis

**Tutor de Titulación:** Ing. Ms.C. Navarrete López Luis Miguel

**Área de Conocimiento:** Ingeniería, industria y construcción.

**Sub-área:** Ingeniería y profesiones afines.

**Línea de investigación:** Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental

**Sublíneas de investigación de la Carrera:** Energía en sistemas electromecánicos y uso de fuentes renovables de energía

## **2. INTRODUCCIÓN**

El reciclaje de plástico se ha convertido en una práctica fundamental en la gestión de residuos sólidos, ya que su eliminación inadecuada puede impactar negativamente al medio ambiente. [1] En este contexto, RECIPLAS, una empresa situada en el cantón Latacunga, se dedica al reciclaje de plástico (LDPE) con el objetivo de reducir la contaminación y fomentar la reutilización de materiales. Sin embargo, la producción que tiene la empresa es baja a comparación de la cantidad de materia prima que tiene en stock.

El propósito de este estudio es desarrollar y fabricar una extrusora similar que complemente la producción de la empresa con el fin de aumentar la productividad y optimizar el uso de la materia prima en RECIPLAS. Para lograrlo, se analizarán los principios de extrusión, las propiedades del plástico húmedo y los parámetros operativos que influyen en el desempeño del proceso.

La extrusión es un proceso clave en la industria del reciclaje de plásticos, ya que permite transformar materiales reciclados en productos reutilizables. Sin embargo, la presencia de humedad en el plástico puede generar problemas como la formación de burbujas y la reducción de las propiedades mecánicas del producto final. Estudios previos han demostrado que la humedad residual en el plástico reciclado afecta negativamente la calidad del proceso de extrusión y, en consecuencia, del producto resultante.[2]

### **2.1. Situación problemática**

RECIPLAS es una empresa con más de 15 años de trayectoria en el mercado, dedicada al reciclaje de plástico tipo LDPE. Actualmente, cuenta con una extrusora para procesar el material, pero su capacidad de producción es limitada en comparación con la demanda de sus clientes.

La empresa produce aproximadamente 30 toneladas mensuales de pellets de LDPE, cantidad que no es suficiente para satisfacer los requerimientos de sus clientes, quienes exigen un mayor volumen de producción. Mientras tanto, RECIPLAS recibe alrededor de 65 toneladas mensuales de materia prima (LDPE sin procesar), suministrada de manera continua por sus proveedores. Este exceso de material sin procesar genera un problema de almacenamiento, ya que ocupa un gran volumen en comparación con el plástico procesado, cuyo tamaño se reduce significativamente tras la extrusión.

## **2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

La empresa RECIPLAS, en el cantón Latacunga, enfrenta limitaciones productivas al contar con una sola extrusora para plástico reciclado, lo que dificulta satisfacer la demanda y optimizar el proceso de peletización.

### **2.2.1. Objeto de investigación**

Diseño y desarrollo de una extrusora para plástico húmedo para mejorar la producción y optimizar el proceso de peletización en Reciplas.

### **2.2.2. Campo de acción**

330000 ciencias tecnológicas / 3313 Tecnologías E Ingenierías Mecánicas / 3313.12 Equipo y Maquinaria Industrial

## **2.1. BENEFICIARIOS**

### **2.1.1. Directos**

**RECIPLAS** se beneficiará en su producción ya que al implementar una segunda extrusora su producción se duplicará.

**Los trabajadores** de RECIPLAS contarán con un equipo más fácil de utilizar, ya que podrán visualizar la temperatura de operación de la extrusora.

### **2.1.2. Indirectos**

**Los clientes** de RECIPLAS se beneficiarán al tener mayor materia prima para sus procesos industriales ya que RECIPLAS les proveerá material de manera continua.

Los estudiantes

## **2.2. JUSTIFICACIÓN**

La elaboración de una extrusora para plástico húmedo para la empresa RECIPLAS nace de la necesidad de que en el mercado no existen extrusoras con las características específicas para la empresa, por este motivo RECIPLAS los últimos años se ha dedicado a fabricar y/o modificar las máquinas a sus necesidades. Por consecuencia de esto la empresa cuenta con la mayoría de piezas para la construcción, piezas ya modificadas para sus necesidades específicas. Este prototipo busca satisfacer las necesidades de la empresa ya que exige tener una visualización

de la temperatura en el proceso de extrusión, así como también mejorar su diseño estructural. Con la implementación de una segunda extrusora solventaremos la demanda que tiene la empresa ya que su producción aumentará

RECIPLAS al contar con una sola extrusora en su línea de peletización se ve limitada en su producción y con baja probabilidad de crecimiento empresarial. Teniendo en cuenta que la empresa cuenta con suficiente materia prima para aumentar su producción. Es allí donde nace la necesidad de aumentar la producción de la empresa por lo menos al doble para tener un balance en cuanto a la entrada y salida de material.

RECIPLAS al trabajar con plástico reciclado de distintos lugares tiene variedad de contaminación en su materia prima así mismo como también le llega un 50% de plástico 100% limpio sin ninguna contaminación y también plástico que necesita un proceso más sencillo de lavado, pero al tener una sola línea de peletización todo este plástico tiene que ser ingresado a la misma línea que el material sucio o contaminado. Por consecuencia de esto la empresa no puede aprovechar este plástico limpio o semi limpio (Húmedo) que no necesita el mismo proceso que el resto de materia prima (Contaminada).

Por estos factores al implementar una segunda extrusora que se encargue del plástico limpio y semi limpio (Húmedo), estaríamos aprovechando estos recursos de mejor manera y aumentando la producción de la empresa. Brindándole a la empresa una estabilidad económica ya que la empresa al depender en un 80 % de energía eléctrica se vio afectada por los conocidos cortes de energía eléctrica que arrasaron con el Ecuador, dejándola desestabilizada económicamente.

## **2.3. OBJETIVOS**

### **2.3.1. Objetivo general**

Construir una extrusora de plástico húmedo aprovechando los recursos de la empresa RECIPLAS consiguiendo con esto el aumento en la producción de la empresa.

### **2.3.2. Objetivos específicos**

- Realizar un diagnóstico operativo de las necesidades actuales de la empresa RECIPLAS, mediante la recopilación y análisis de datos y recursos, para establecer las especificaciones requeridas en el diseño de la extrusora para plástico húmedo.

- Diseñar una extrusora para plástico húmedo en 3D en el software FUSION 360, aplicando principios de ingeniería mecánica y considerando el uso de materiales proporcionados, con el fin de evaluar su viabilidad técnica y económica mediante simulaciones y análisis de factibilidad.
- Realizar pruebas de funcionamiento del prototipo de la extrusora mediante la evaluación de su eficiencia, capacidad de producción.

### 2.3.3. Sistemas de tareas

Tabla 2.1. Sistemas de tareas

Objetivos Específicos	Actividades (tareas)	Resultados Esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Realizar un diagnóstico operativo de las necesidades actuales de la empresa RECIPLAS.	Recopilación de datos sobre la capacidad actual de la extrusora y recursos existentes en la empresa.	Identificación de requerimientos y recursos para la construcción de la extrusora.	Asesoría por parte del propietario de la empresa, observación directa de la extrusora existente
	Identificación de requerimientos técnicos y operativos para la nueva extrusora.	Tiempos y cantidad de producción.	
Diseñar un prototipo funcional de extrusora para plástico húmedo.	Desarrollo de planos técnicos mediante software CAD.	Planos y especificaciones técnicas que nos ayuden a la construcción de la extrusora	Software CAD (FUSION 360, CFD)
	Simulación virtual del funcionamiento del diseño propuesto.		
	Comparación de datos del antes y después mediante gráficas		
Realizar pruebas de funcionamiento del prototipo de la extrusora	Ejecutar pruebas iniciales para verificar la operatividad del prototipo.	Prototipo en funcionamiento con parámetros ajustados para mejorar la eficiencia y calidad del material extruido.	Equipos de medición (termocuplas, básculas)
	Medir la capacidad de producción en kg/h y la eficiencia del sistema.		
	Ajustar parámetros de operación para optimizar el rendimiento.		

### 3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

#### 3.1. ANTECEDENTES

En la Universidad Autónoma de Occidente de la ciudad de Cali, en Colombia, se desarrolló un proyecto de titulación denominado “REDISEÑO DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA DE PLÁSTICO” donde se manifiesta que se realizó un modelado 3D de la extrusora el cual se realizó para visualizar y optimizar su rediseño antes de la implementación. Se calcularon las dimensiones del husillo y la potencia del motor principal, y se utilizó software CAD para representar la máquina con sus nuevas modificaciones. [3]

En la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) de la ciudad de Guayaquil, en Ecuador, se desarrolló proyecto de titulación denominado “REINGENIERÍA DE UNA EXTRUSORA DE TORNILLO SIMPLE PARA EL DESARROLLO DE COMPUESTOS DE POLIOLEFINAS CON ALTAS CONCENTRACIONES DE CARBONATO DE CALCIO” donde en el estudio se rediseñó una extrusora de tornillo simple para mejorar la dispersión de materiales en polímeros. Se optimizó el tornillo de extrusión con mezcladores especializados y se modificó el cabezal para producir pellets en lugar de tuberías. Se realizaron pruebas con diferentes mezclas de polímeros y carbonato de calcio, evidenciando mejoras en las propiedades mecánicas del material. El proyecto demostró que es posible repotenciar extrusoras con tecnología de bajo costo, aumentando la eficiencia y calidad del proceso. [4]

En la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) de la ciudad de Riobamba, en Ecuador, se desarrolló proyecto de titulación denominado “REPOTENCIACIÓN Y MANTENIMIENTO MEJORATIVO DE LA MÁQUINA EXTRUSORA DE POLIETILENOS DE LA EMPRESA EDUPLASTIC” donde en el estudio se optimizó la extrusora de polietilenos de EDUPLASTIC mediante repotenciación y mantenimiento preventivo, mejorando su sistema eléctrico y mecánico. Se redujeron paros imprevistos, aumentando la disponibilidad y eficiencia de la máquina. La implementación de un plan de mantenimiento preventivo y la actualización de los circuitos eléctricos permitieron prolongar la vida útil de la extrusora, reduciendo costos operativos y optimizando la producción. Esto demuestra que la modernización de equipos existentes es una alternativa viable frente a la adquisición de maquinaria nueva. [5]

En la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de la ciudad de Bogotá, en Colombia, se desarrolló un proyecto de titulación denominado “REDISEÑO DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA PARA RECICLAJE DE

PLÁSTICO PRODUCIDO EN LA FACULTAD TECNOLÓGICA DE LA UD” que tiene como objetivo optimizar una extrusora basada en el proyecto PRECIOUS PLASTIC, con el fin de transformar los residuos plásticos generados en la universidad en productos reutilizables.

Se analizó el diseño actual de la máquina, se identificaron mejoras en componentes como el tornillo de extrusión, sistema de calefacción y boquilla, y se realizaron cálculos para mejorar su eficiencia. Finalmente, se presentó un análisis de costos para su implementación, demostrando la viabilidad del proyecto para fomentar el reciclaje en la institución. [6]

### **3.2. HISTORIA DE LA EXTRUSIÓN DE PLÁSTICOS**

El proceso de extrusión de plásticos ha progresado desde el final del siglo XIX, posibilitando la producción de artículos plásticos en varias industrias, desde envases hasta elementos industriales. En la industria del caucho, los primeros esfuerzos de extrusión tuvieron lugar en el siglo XIX. No obstante, el crecimiento de los polímeros artificiales en el siglo XX fomentó la creación de extrusoras diseñadas específicamente para materiales plásticos. Durante los años 1930, ICI (Imperial Chemical Industries) halló el polietileno, lo que condujo a la creación del polietileno de baja densidad (LDPE), un elemento esencial en la industria del reciclaje contemporánea. [7]

#### **3.2.1. Origen y desarrollo histórico del LDPE**

El polietileno de baja densidad (LDPE) fue descubierto en 1933 por los científicos Eric Fawcett y Reginald Gibson de la Imperial Chemical Industries (ICI) de Gran Bretaña. Su descubrimiento se produjo por casualidad mientras se realizaban experimentos de polimerización de etileno a alta presión. Sin embargo, el proceso no se replicaría hasta 1935, cuando Michael Perrin perfeccionó la polimerización a alta presión, lo que permitió la producción industrial de LDPE en 1939.

Durante la Segunda Guerra Mundial, el LDPE se utilizó principalmente en la industria militar, especialmente para el aislamiento de cables y radares, debido a su alta resistencia y flexibilidad. En las décadas siguientes, la producción se expandió a usos más comerciales, incluidos envases flexibles, películas de plástico, botellas y artículos de uso diario. Hoy en día, el LDPE sigue siendo un material clave en la industria del plástico y cada vez se presta más atención a su reciclaje para reducir su impacto ambiental. Mediante el procesamiento de extrusión, se pueden reciclar grandes cantidades de plástico posconsumo, contribuyendo así a la economía circular. [8]

### **3.3. PARTES DE UNA EXTRUSORA**

Una extrusora de plástico consta de varios componentes básicos que trabajan juntos para transformar el material desde un estado sólido a su forma extruida final. [9]

Ver plano 1, anexo IX.

#### **3.3.1. Componentes principales de una extrusora**

- Tolva de alimentación
- Tornillo de extrusión
- Barril de extrusión
- Zonas de calentamiento
- Sistema de desgasificación
- Cabezal de extrusión
- Sistema de enfriamiento
- Sistemas de corte

#### **3.3.2. Tolva de Alimentación**

Tiene una estructura simple y un precio bajo, y se utiliza principalmente para alimentar barriles de extrusoras pequeñas. El método de alimentación de este tanque se basa en el peso de las partículas que caen libremente en el tanque. Por lo tanto, se debe tener cuidado para garantizar que no haya "tráfico" de materias primas en el tanque durante la operación, lo que afectaría la alimentación continua de la extrusora. [10]

#### **3.3.3. Tornillo de Extrusión**

Un elemento helicoidal que gira en el interior del cañón, encargado de transportar, fundir y mezclar el material plástico a medida que avanza hacia la boquilla de salida.

El tornillo del extrusor puede considerarse el componente principal del extrusor, ya que debe transportar el material no fundido desde la garganta de alimentación hasta la matriz de extrusión a una velocidad de salida constante, a la temperatura correcta y de manera completamente uniforme. [11]

Para lograr esta función, los tornillos tienen diferentes diseños con propiedades específicas dependiendo del tipo de material a extruir y del tipo de operación a realizar con él (preparación

del material, mezcla, extrusión de perfiles). Sin embargo, cada construcción de tornillo requiere tres partes principales:

- Lugar de alimentación
- Zona de transición
- Área de ingredientes

La figura 3.2 representa un tornillo de extrusión, compuesto por tres secciones funcionales: alimentación, transición y dosificación, encargadas de transportar, comprimir y homogenizar el material polimérico. Se destacan parámetros de diseño críticos como el diámetro del tornillo, paso, profundidad del canal, ángulo de hélice y ancho del filete, los cuales influyen en la eficiencia del proceso de extrusión y en la calidad del material extruido.

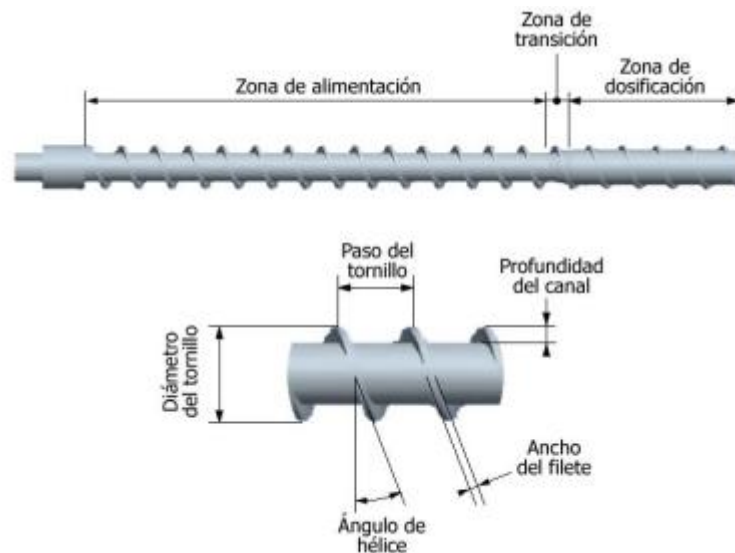


Figura 3.1 Tornillo de una extrusora [11]

#### 3.3.4. Barril de extrusión

El barril de extrusión juega un papel crucial en este proceso, ya que crea cizallamiento del material y facilita la transferencia de calor. La relación  $L/D$  más común es de 20:1 a 24:1, prefiriéndose los cañones más largos para mejorar la fusión y homogeneización del polímero. Está hecho de materiales duraderos y resistentes a la corrosión para garantizar la durabilidad y la eficiencia. Además, cuenta con un sistema de calefacción y refrigeración que regula la temperatura en diferentes zonas para optimizar el procesamiento del material. [12]

### 3.3.5. Zonas de calentamiento

Secciones del barril con controles de temperatura independientes que permiten un calentamiento gradual y controlado del material plástico durante su avance. Una extrusora de plástico consta de tres zonas principales, cada una de las cuales tiene una función específica en el proceso de conversión del material.[8]

La figura 3.3 muestra las zonas de calentamiento en una extrusora, divididas en alimentación, compresión y dosificación. En la zona de alimentación, el material sólido es introducido y transportado. En la zona de compresión, se reduce el volumen del canal, aumentando la presión y temperatura para fundir el material. Finalmente, en la zona de dosificación, el polímero fundido se homogeneiza y se estabiliza antes de ser extruido a través del troquel. Estas etapas garantizan un procesamiento eficiente del material termoplástico.

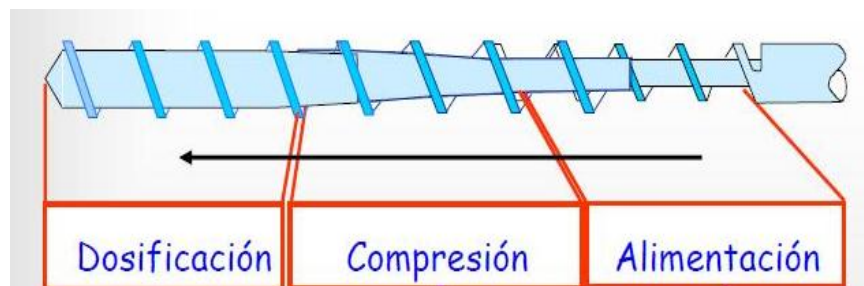


Figura 3.2 Zonas de calentamiento

- **Zona de alimentación.**

Es la etapa inicial donde el material plástico (normalmente pellets o polvo) se introduce en la extrusora a través de una tolva. En esta zona, el tornillo transporta el material hacia adelante sin ejercer una presión significativa, provocando que el material comience a calentarse ligeramente debido a la fricción y al calor del cañón. [13]

- **Zona de compresión.**

También conocida como zona de transición, donde la profundidad del canal del tornillo disminuye gradualmente, lo que produce la compresión del material. Esta compresión, combinada con un aumento controlado de la temperatura, ayuda a eliminar el aire atrapado y prepara el material para la fusión completa. [13]

- **Zona de dosificación.**

En la etapa final, el material fundido es homogeneizado y sometido a presión, y es extruido a través de una matriz o molde de moldeo. El tornillo tiene una profundidad de canal constante y baja en esta área, lo que garantiza un flujo suave y una presión suficiente para formar el material según las especificaciones deseadas. [13]

### 3.3.6. Sistema de desgasificación

Un sistema de desgasificación de extrusora es un mecanismo utilizado para eliminar gases del plástico fundido durante el proceso de extrusión. Estos gases pueden surgir de la humedad residual en el material, la degradación térmica del polímero o la presencia de aditivos volátiles. La eliminación efectiva de estos gases es esencial para garantizar que el producto final sea uniforme y consistente, libre de defectos estructurales como burbujas, porosidad o debilitamiento de la extrusión.

Para ello, el sistema desgasificador se coloca estratégicamente en la sección de compresión o dosificación de la extrusora, donde el material ya está fundido y la presión es suficiente para extraer el gas sin afectar la calidad del flujo extruido. Dependiendo de la aplicación y el tipo de material a procesar, los sistemas de desgasificación pueden ser con ventilación atmosférica o asistidos por vacío, siendo estos últimos más efectivos para la extracción de gas en el reciclaje o en materiales con altos niveles de humedad. [14]

La figura 3.4 ilustra el sistema de desgasificación en una extrusora, destacando un área de alivio (Relief Area) donde se liberan los gases atrapados en el material fundido. Este mecanismo es crucial para eliminar humedad, volátiles y aire ocluido, mejorando la calidad del polímero extruido y evitando defectos en el producto final. La rotación del husillo favorece la evacuación de los gases a través de una zona de vacío o ventilación.

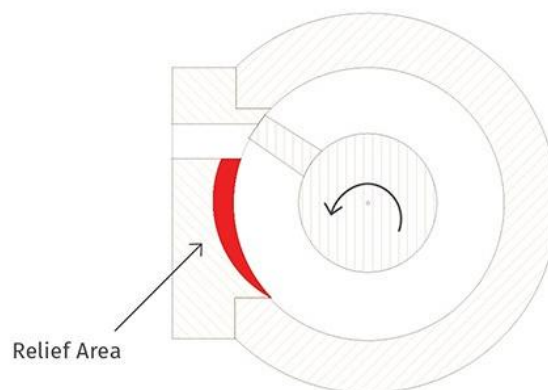


Figura 3.3 Desgasificación de una extrusora

### 3.3.7. Cabezal o matriz de extrusión

El cabezal es un componente esencial en el proceso de extrusión, ya que se encuentra ubicado entre el cilindro y la matriz y tiene la función de conectar ambos elementos, permitir el cambio de matrices y filtrar el material extruido. Además, contribuye a mejorar la calidad del producto final, asegurando una extrusión uniforme y libre de impurezas.

El diseño del sistema de ensamblaje del cabezal debe facilitar su apertura y cierre, lo que permite el reemplazo rápido de la matriz, el mantenimiento de los componentes internos y la limpieza del cilindro. Esto garantiza un proceso eficiente y continuo, reduciendo tiempos de inactividad y optimizando la producción. [15]

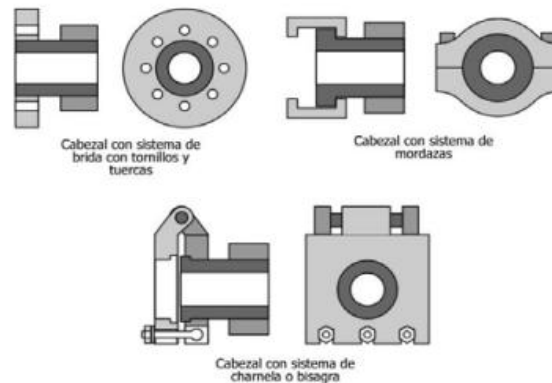


Figura 3.4 Cabezal de una extrusora

Asimismo, el ángulo de salida del cabezal debe estar diseñado para garantizar un flujo uniforme y estable del material extruido. Como regla general, a mayor viscosidad del material, más agudo debe ser el ángulo de salida, lo que ayuda a mantener la calidad y homogeneidad del extruido. [15]

### 3.3.8. Sistema de enfriamiento

El sistema de enfriamiento en el proceso de extrusión permite que el material extruido se solidifique y mantenga su estabilidad dimensional, asegurando que conserve su forma sin deformaciones. Este proceso es fundamental para garantizar la calidad del producto final y prevenir defectos estructurales.

Los métodos más utilizados incluyen baños de agua, empleados para el enfriamiento rápido de tuberías y perfiles, aire forzado, que utiliza ventiladores para reducir gradualmente la temperatura, y rodillos de enfriamiento, ideales para controlar la temperatura en láminas o

películas plásticas. La elección del sistema dependerá del tipo de material y la velocidad de extrusión, asegurando un proceso eficiente y uniforme. [13]

### 3.3.9. Tipo de husillo de extrusor

El tornillo de extrusión, también conocido como tornillo de avance, es uno de los componentes más importantes de una extrusora porque determina la eficiencia del proceso de fusión y transporte de material. Hay muchos tipos de tornillos, cada uno diseñado para optimizar el procesamiento de diferentes tipos de plásticos. [16]

- Husillo de presión constante

Tiene la misma profundidad de canal a lo largo de toda su longitud. Es adecuado para materiales que no requieren alta compresión, como el polietileno de baja densidad (LDPE). Se utiliza en procesos donde la homogeneidad del material fundido es crítica.

- Husillo de compresión gradual (convencional o de tres zonas)

Se divide en tres áreas principales: alimentación, compresión y dosificación. La profundidad del canal disminuye gradualmente desde la zona de alimentación hasta la zona de dosificación, lo que aumenta la presión y mejora la fusión del material. Se utiliza en la mayoría de extrusoras de un solo tornillo para procesar plásticos reciclados.

- Husillo barrera

Hay un segundo orificio dentro del tornillo principal para mejorar la separación entre los materiales fundidos y no fundidos. Mejora la eficiencia del proceso de extrusión, garantizando una mejor homogeneización del plástico. Es ideal para procesar materiales reciclados que contienen impurezas o mezclas de polímeros. [9]

- Husillo de mezcla o dispersión

Diseñado con ranuras o elementos especiales para facilitar la mezcla de aditivos y pigmentos en el plástico fundido. Mejora la calidad de los materiales extruidos y garantiza una distribución uniforme de los ingredientes. Se utiliza en áreas donde se requiere plástico con cargas minerales o colores específicos.

- Husillo con desgasificación

Tiene una zona adicional para eliminar los gases y la humedad atrapados en el plástico reciclado. Esto es importante para la extrusión de LDPE reciclado que contiene humedad. Reducir defectos como burbujas y porosidad en el producto final. Cada tipo de tornillo se selecciona en función del material que se procesa y las propiedades deseadas del producto final. [17]

### **3.4. TIPOS DE EXTRUSORAS**

Las extrusoras se pueden dividir en varias categorías según su diseño y aplicación. Dependiendo del diseño y la aplicación específica, las extrusoras se pueden clasificar en diferentes tipos. A continuación, se detallan los tipos más comunes, sus características y aplicaciones:

#### **3.4.1. Extrusora de husillo simple:**

Es la máquina más utilizada en la industria y consta de un solo tornillo dentro de un barril. Se utilizan principalmente en la producción de películas, tubos y perfiles de plástico. Las extrusoras de un solo tornillo son las más comunes en la industria del plástico. Consisten en un único tornillo que gira dentro de un barril que transporta, mezcla, funde y da forma al material plástico en la geometría deseada. Este tipo de extrusora es ampliamente utilizado en la producción de productos como láminas, películas, tubos y perfiles de plástico. [18]

#### **3.4.2. Extrusora de doble husillo:**

Utiliza dos tornillos que pueden girar en la misma dirección (co-rotación) o en direcciones opuestas (contra-rotación). Debido a que son capaces de procesar materiales con mayor contenido de humedad, son ideales para la mezcla y el reciclaje intensivo de plástico. Las extrusoras de doble tornillo utilizan dos tornillos que giran en la misma dirección (corrotativos) o en direcciones opuestas (contra rotativos). Este diseño ofrece varias ventajas sobre las extrusoras de un solo tornillo, especialmente en la mezcla de materiales y la extrusión de mezclas plásticas. [18]

#### **3.4.3. Extrusora desgasificadora:**

Diseñada para eliminar sustancias volátiles y humedad del plástico reciclado, lo que la hace especialmente adecuada para procesar LDPE reciclado. Este tipo de extrusora está especialmente diseñada para procesar materiales plásticos que contienen impurezas, humedad

o sustancias volátiles. Los sistemas de desgasificación pueden eliminar estos componentes antes de que el material salga de la extrusora, mejorando la calidad del producto final. [18]

#### **3.4.4. Extrusora de husillo cónico:**

Se utiliza para extruir materiales sensibles al calor como el PVC, proporcionando una mejor compresión y fusión. Las extrusoras de tornillo cónico son un tipo especial de extrusora de doble tornillo. Están diseñados con dos ejes principales que se aproximan formando un ángulo (cono), lo que proporciona una mayor compresión del material. [18]

#### **3.4.5. Extrusora Multicomponentes**

Este tipo de extrusora está diseñado para procesar dos o más materiales simultáneamente, combinándolos durante la extrusión para producir productos de materiales mixtos. Este tipo de extrusora se usa en la fabricación de compuestos plásticos, como plásticos reforzados con fibra, o para la producción de productos multicapa.

La selección de la extrusora adecuada depende de las propiedades del material plástico y del tipo de producto final deseado. Cada tipo de extrusora tiene ventajas específicas dependiendo del material a procesar, los requisitos del producto final y la eficiencia del proceso. Las extrusoras de doble husillo con sistemas de desgasificación son especialmente útiles para procesar plásticos como el LDPE, ya que son capaces de procesar materiales que contienen impurezas o humedad, optimizando así la calidad del producto final. [19]

### **3.5. SISTEMAS DE CALEFACCIÓN EN EXTRUSORAS DE PLÁSTICO**

El proceso de extrusión de plásticos requiere una fuente de calor eficiente para fundir el material y garantizar su fluidez durante el transporte a través del husillo. Existen diferentes métodos de calefacción empleados en la industria de extrusión, cada uno con sus ventajas y desventajas dependiendo del tipo de material procesado y la eficiencia energética deseada.

#### **3.5.1. Calefacción por Resistencias Eléctricas**

Las resistencias eléctricas son el método más común para la calefacción de extrusoras de plástico. Se utilizan bandas calefactoras o resistencias tipo cartucho que se instalan alrededor del cilindro de la extrusora. Estas resistencias generan calor mediante el efecto Joule y permiten un control preciso de la temperatura en distintas zonas del cilindro.

**Ventajas:**

Control preciso de la temperatura.

Fácil instalación y mantenimiento.

No genera emisiones contaminantes.

**Desventajas:**

Alto consumo energético en comparación con otros métodos.

Posible deterioro de las resistencias con el tiempo.



Figura 3.5 Resistencia Eléctrica

**3.5.2. Calefacción por Gas Licuado de Petróleo (GLP)**

El uso de sopletes de GLP es una alternativa eficiente para calentar la extrusora, especialmente en aplicaciones donde se busca reducir costos energéticos. Estos sistemas consisten en quemadores estratégicamente ubicados alrededor del cilindro, generando calor por combustión directa. En la figura 3.10 se observa la calefacción por GLP.



Figura 3.6 Calefacción por GLP

- **Ventajas:**

Bajo costo operativo en comparación con resistencias eléctricas.

Rápido calentamiento del cilindro de extrusión.

Disponibilidad de GLP en diversas regiones.

- **Desventajas:**

Menor precisión en el control de temperatura.

Riesgo de seguridad debido al manejo de gases inflamables.

Necesidad de sistemas de ventilación adecuados.

### **3.6. Influencia del Método de Calefacción en la Extrusión de Plástico**

El sistema de calefacción seleccionado impacta directamente en la calidad del proceso de extrusión. Factores como la estabilidad térmica, el consumo energético y la velocidad de calentamiento influyen en la eficiencia de producción y en las propiedades del material extruido. Para la extrusora diseñada en este proyecto, se ha optado por la calefacción mediante **sopletes de GLP**, debido a su menor costo y facilidad de implementación en la planta de RECIPLAS.

En las siguientes secciones, se abordará la relación entre la temperatura de extrusión y las propiedades del plástico, así como la importancia del control térmico en el diseño de extrusoras industriales.

## 4. METODOS Y PROCEDIMIENTOS

### 4.1. DESCRIPCION DEL PROYECTO

El proyecto está enfocado netamente al aumento de la producción y a la optimización del uso de la materia prima. Implementando una segunda extrusora a la línea de peletización ya existente, construiremos una extrusora que sea capaz de trabajar también con plástico húmedo. La problemática actual radica en la baja capacidad del proceso de extrusión existente, el cual opera con un rendimiento de 80 kg/h aproximadamente. La nueva máquina busca duplicar dicha capacidad, optimizando el proceso de extrusión.

Como primer punto, recopilaremos datos necesarios para la elaboración de la máquina, como sus dimensiones tales como altura, ancho, largo, capacidad de carga, temperaturas de funcionamiento, kg/h de producción, porcentaje de humedad, parámetros eléctricos como potencia del motor, calibre del conductor, protecciones eléctricas, etc. Una vez obtenidos todos los datos necesarios, procederemos al diseño en software de modelado y simulación, como FUSION 360, donde nos guiaremos en los materiales estructurales de otras máquinas, los datos obtenidos y todas las partes ya existentes para la extrusora.

Una vez diseñada la máquina con los materiales proporcionados por la empresa y los seleccionados por nosotros, procederemos a los análisis respectivos en el software, como análisis de cargas, térmico y estructural. Una vez validados y aprobados los materiales, procederemos a la construcción de la extrusora. Empezando por la estructura, ya que en ella reposarán los elementos más importantes de la máquina. Con la estructura elaborada, procederemos al ensamble general de la extrusora. Posteriormente, realizaremos pruebas de funcionamiento y análisis de rendimiento.

### 4.2. VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN

#### 4.2.1. Variables Independientes

**Cantidad de material** que ingresa a la extrusora (**kg**): Es indispensable tener en cuenta la cantidad de material que ingresa a la extrusora ya que con este dato podemos analizar el rendimiento de nuestra extrusora.

**Humedad** en el plástico (**%-kg**): Para tener un análisis exacto de la cantidad de material que ingresa en comparación de lo que sale tenemos que tener en cuenta la humedad presente en el plástico.

**Temperatura** de extrusión (°C): La temperatura suministrada va a estar anclada a la cantidad de plástico húmedo ingresado.

#### 4.2.2. Variable Dependiente

**Cantidad de material** que sale de la extrusora (**Kg**): Dependiendo el índice de humedad del material que ingresa a la extrusora se determinará la cantidad entregada por la extrusora.

En la Tabla 4.2 se presentan las variables del proceso de extrusión. Como son la cantidad de material no extruido (entrada), el contenido de humedad del plástico, la temperatura de extrusión y la cantidad de material extruido (salida). Estos parámetros permiten evaluar la influencia de las variables independientes (cantidad de material introducido, humedad y temperatura) sobre la variable dependiente (cantidad de material extruido), asegurando un control preciso del proceso y optimizando su eficiencia.

Tabla 4.2 Proceso de extrusión

Definición	Variable	Instrumento	Categoría	Unidad de Medida	Técnica
Proceso en el cual el plástico se comprime y se funde a las necesidades deseadas	Plástico sin extrusar (Entrada)	Balanza	Masa	Kg	Medición
	Humedad	Balanza	Masa	%(kg)	Medición
	Control de temperatura	Termocupla	Temperatura	°C	Medición
	Plástico extrusado (Salida)	Balanza	Masa	Kg	Medición

### 4.3. IDENTIFICACIÓN DE COMPONENTES DE LA EXTRUSORA

Para este proyecto RESIPLAS nos proporcionará las piezas fundamentales para la construcción de la extrusora como lo detallamos en la tabla 4.3 por lo tanto no se debe seleccionar ninguna de estas piezas o partes, por consecuencia de esto se deberá comprobar que las piezas proporcionadas por la empresa encajen y se acoplen perfectamente la una a la otra.

El análisis de cada componente se llevará a cabo mediante distintos métodos según su disponibilidad y función dentro del sistema. Para los elementos suministrados por la empresa, se verificará su compatibilidad a través de inspecciones técnicas y pruebas de rendimiento en condiciones reales de operación. En el caso de las piezas a fabricar, se realizarán diseños en FUSION 360, seguidos de simulaciones para evaluar su comportamiento antes del proceso de manufactura. Este enfoque permitirá optimizar el diseño, minimizar errores en la fabricación y garantizar un ensamblaje eficiente de la extrusora.

En la Tabla 4.2 se presenta la identificación de los principales componentes del sistema de extrusión, detallando su disponibilidad, el método de análisis empleado y los criterios de validación utilizados en el desarrollo del proyecto. Ver planos en Anexo IX.

Tabla 4.3 Análisis de Componentes de la Extrusora

Partes de la extrusora	Disponibilidad	Descripción	Comprobación
Tornillo	Empresa	Se analizará las características del tornillo como tipo de material, longitud, diámetro	Todas las piezas serán simuladas en el software FUSION 360 para posteriormente realizar sus pruebas y análisis necesarios para corroborar que los materiales seleccionados y elaborados sean adecuados para el funcionamiento de la extrusora.
Camisa	Empresa	Se analizará las características de la camisa como	
Caja reductora	Empresa	Se analizará las características de la caja reductora como relación de reducción, rpm, torque	
Motor	Empresa	Se analizará los datos de placa del motor.	
Poleas	Empresa	Se analizará las rpm requeridas para el dimensionamiento de las poleas	
Estructura	Por fabricar	El material será seleccionado acorde a maquinas similares	
Boquilla	Por fabricar	Se analizará la extrusora existente para elaborar la boquilla	
Sistema de calefacción	Por fabricar	Se calculará la energía necesaria para dimensionar el sistema de calefacción	
Recubrimiento térmico	Por fabricar	Nos guiaremos en la extrusora existente para menorar pérdidas	

#### **4.4. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE**

La estructura de soporte de la tolva es un componente fundamental dentro del sistema de extrusión, ya que proporciona estabilidad y resistencia mecánica a la tolva, garantizando un funcionamiento seguro y eficiente. A continuación, se detallan los pasos metodológicos para su diseño y fabricación.

La estructura de soporte cumple la función de proporcionar estabilidad y resistencia a la tolva durante la operación del sistema de extrusión. Su diseño debe garantizar una distribución uniforme de las cargas, evitando deformaciones o inestabilidad que puedan comprometer el rendimiento del proceso. Se considerarán parámetros como la capacidad de carga, resistencia a vibraciones y facilidad de montaje y desmontaje.

##### **4.4.1. Diseño de la Estructura en FUSION 360**

El diseño de la estructura se realizará en FUSION 360, definiendo una geometría robusta y eficiente que soporte el peso de las partes de la extrusora y el material procesado. Se establecerán refuerzos estratégicos en puntos críticos para mejorar la estabilidad y reducir el riesgo de deformaciones. La estructura se diseñará con un sistema de anclaje que permita una instalación firme y segura.

La Figura 4.7 muestra el modelo tridimensional de la estructura diseñado en FUSION 360, donde se pueden observar sus dimensiones, puntos de refuerzo y sistema de anclaje.

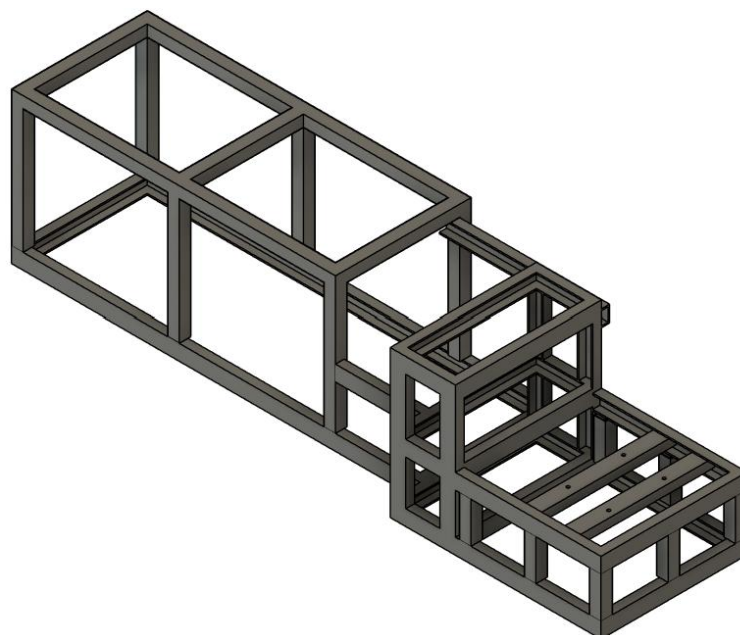


Figura 4.7 Modelo 3D de la Estructura en FUSION 360

#### 4.4.2. Cálculo de Carga y Resistencia de la Estructura

Para garantizar la integridad estructural, se calculará la carga total que debe soportar la estructura, considerando el peso de la tolva, la extrusora y otros elementos del sistema. Se realizarán análisis de esfuerzos mecánicos para asegurar que la estructura pueda resistir fuerzas externas sin comprometer su estabilidad o funcionalidad.

Ecuación utilizada:

$$F = m * g \quad (1)$$

Donde:

$F$  = Fuerza total aplicada sobre la estructura [ $N$ ]

$m$  = Masa total de los componentes soportados [ $kg$ ]

$g$  = Aceleración gravitacional [ $9.81 \frac{m}{s^2}$ ]

#### 4.4.3. Análisis y elección del material para la construcción de la estructura

Para la fabricación de la estructura de soporte del extrusor se seleccionaron materiales que proporcionen la adecuada resistencia mecánica, estabilidad estructural y facilidad de montaje. Se eligieron canales en U de acero galvanizado y tubos estructurales cuadrados A500 Grado C debido a sus propiedades mecánicas y disponibilidad en el mercado.

Los materiales seleccionados cumplen con los siguientes criterios:

- **Alta resistencia mecánica**, asegurando estabilidad y capacidad para soportar cargas sin deformaciones importantes.
- **Facilidad de soldadura y ensamblaje**, permitiendo una fabricación eficiente y un montaje preciso.
- **Protección contra la corrosión**, gracias al recubrimiento galvanizado del perfil en U, lo que prolonga la vida útil de la estructura en ambientes de trabajo con humedad.
- **Disponibilidad en el mercado**, optimizando la viabilidad del proyecto sin comprometer la calidad estructural.

Los materiales seleccionados para la estructura de la extrusora garantizan una óptima estabilidad estructural, resistencia a la corrosión y facilidad de fabricación. La combinación de

perfiles en U galvanizados con tubos estructurales A500 permite construir una estructura robusta y duradera, adaptada a los requerimientos del proceso de extrusión.

Tabla 4.4 Elección de materiales

Tipo de material	Material	Resistencia a la tracción (MPa)	Límite elástico (MPa)	Recubrimiento/espesor (mm)
Perfil en U	Acero A36 galvanizado bajo en carbono	$\geq 270$	$\geq 140$	Zinc ( $140 \text{ g/m}^2$ )
Tubo estructural cuadrado (100x100x4 mm)	ASTM A500 Grado C	$\geq 400$	$\geq 350$	4 mm

Para características más detalladas ver anexo III y IV.

#### 4.4.4. Fabricación e Instalación de la Estructura

La estructura se fabricará mediante procesos de corte por plasma, asegurando la precisión de las piezas y minimizando el desperdicio de material. Posteriormente, se podrá realizar el proceso de taladrado y soldadura para ensamblar los distintos elementos estructurales. Integrar uniones atornilladas en algunos tramos para permitir el ajuste y facilitar la extracción de piezas específicas en caso de mantenimiento.

Durante la fase de instalación, verificar la alineación precisa de la estructura con los distintos componentes del sistema de extrusión. Utilizar puntos de anclaje reforzados y mecanismos de nivelación para asegurar un montaje firme y estable, minimizando vibraciones y ajustes.

## 4.5. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL HUSILLO

### 4.5.1. Descripción de las variables del husillo

Debido a la ausencia de especificaciones técnicas proporcionadas por la empresa, se realizaron mediciones directas del husillo utilizando instrumentos de precisión para determinar sus dimensiones y características principales.

Tabla 4.5 Descripción de variables del husillo

Variable	Unidad	Método de verificación
Diámetro del husillo	mm	Medición con calibrador vernier
Longitud Total	mm	Medición con cinta métrica
Paso de rosca	mm	Medición con calibrador de paso
Profundidad de canal	mm	Medición con micrómetro
Material de fabricación	--	Proporcionado por la empresa (Ficha Técnica)
Zona de alimentación, compresión y dosificación	--	Inspección visual y comparación con planos

### 4.5.2. Procedimiento para la evaluación del husillo

Ante la falta de especificaciones técnicas del husillo por parte de la empresa, se realizó una caracterización experimental. A través de mediciones directas, se determinaron sus dimensiones y se evaluó su integración en la extrusora, asegurando su operatividad y adaptación al proceso de extrusión.

Medición de dimensiones físicas:

- Uso de herramientas como calibrador vernier, micrómetro y cinta métrica.
- Identificación de zonas funcionales del husillo (alimentación, compresión y dosificación).

En la Figura 4.8 se observa la geometría del husillo, donde se detallan parámetros como el paso, la profundidad del canal y el ancho del filete, los cuales fueron medidos para garantizar su compatibilidad con la extrusora.

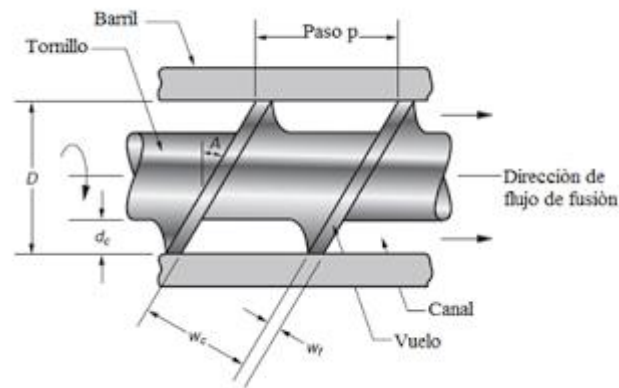


Figura 4.8 Paso y Perfil del Filete en el Husillo

Verificación del material de fabricación:

- Inspección visual del husillo para identificar signos de desgaste o recubrimientos.
- Posible prueba de dureza para estimar su resistencia mecánica.

La Figura 4.9 representa el diagrama de cargas y deformaciones del husillo, permitiendo evaluar los esfuerzos mecánicos a los que está sometido durante el proceso de extrusión.

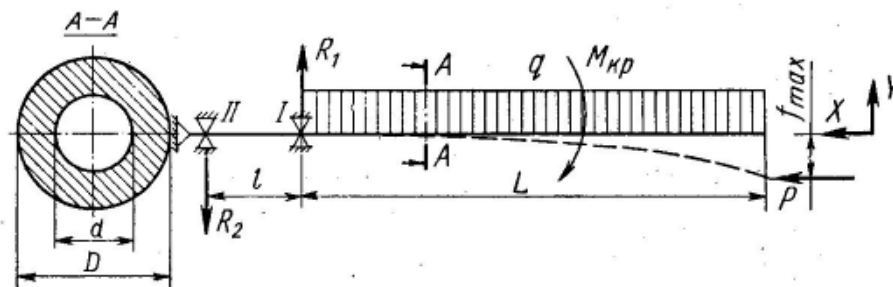


Figura 4.9 Diagrama de Cargas y Deformación en el Husillo

Pruebas de compatibilidad con la extrusora:

- Instalación del husillo en la extrusora y verificación de su ajuste en el cilindro.
- Pruebas preliminares con material plástico para evaluar su desempeño en la alimentación y transporte del material.

## 4.6. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA CAMISA

### 4.6.1. Descripción de las variables de la camisa

Debido a la ausencia de especificaciones técnicas proporcionadas por la empresa, se realizaron mediciones directas de la camisa utilizando herramientas de precisión para determinar sus dimensiones y características principales.

La Figura 4.10 muestra el cilindro de la extrusora, fabricado en acero AISI/SAE 1080 421 austenítico, un material seleccionado por su resistencia a altas temperaturas, desgaste y corrosión, características esenciales para garantizar la durabilidad y eficiencia del sistema de extrusión.



Figura 4.10 Cilindro acero AISI/SAE 1080 421 austenítico.

La Tabla 4.6 presenta las dimensiones clave de la camisa de la extrusora, las cuales son fundamentales para su correcto ajuste con el husillo y el alineamiento en el sistema de extrusión. Las mediciones fueron realizadas con instrumentos de precisión, garantizando la exactitud de los valores obtenidos.

Tabla 4.6 Descripción de variables de la camisa

Variable	Unidad	Método de verificación
Diámetro interno	mm	Medición con calibrador vernier
Diámetro Externo	mm	Medición con micrómetro
Longitud Total	mm	Medición con cinta métrica
Espesor de pared	mm	Diferencias entre diámetros internos y externos
Material de fabricación	--	Inspección visual

#### 4.6.2. Procedimiento para la evaluación de la camisa

Ante la falta de especificaciones técnicas de la caja reductora, se realizará una caracterización experimental basada en mediciones directas y observación del sistema en funcionamiento. Se analizarán sus dimensiones, tipo de engranajes y lubricación para garantizar su compatibilidad con la extrusora y su correcto desempeño en la transmisión de potencia.

Medición de dimensiones físicas:

- Uso de herramientas como calibrador vernier, micrómetro y cinta métrica.
- Determinación del espesor de la pared como la diferencia entre el diámetro externo e interno.
- Identificación de zonas de desgaste o irregularidades en la superficie interna.

Verificación del material de fabricación:

- Inspección visual de la camisa para identificar signos de desgaste o corrosión.
- Posible prueba de dureza para estimar la resistencia mecánica del material.

Pruebas de compatibilidad con el husillo:

- Verificación del ajuste del husillo dentro de la camisa.
- Pruebas preliminares con material plástico para evaluar el calentamiento y el transporte del material en la extrusora.

#### 4.7. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA CAJA REDUCTORA

Dado que no se proporcionaron datos técnicos detallados sobre la caja reductora, se realizará una evaluación experimental mediante mediciones directas y observación del funcionamiento. Se determinaron sus dimensiones, tipo de engranajes y sistema de lubricación para verificar su compatibilidad con la extrusora.

Tabla 4.7 Descripción de variables de la caja reductora

Variable	Unidad	Método de verificación
Relación de reducción	mm	Proporcionada por la empresa
Dimensiones de la carcasa	mm	Medición con cinta métrica y calibrador vernier
Tipo de engranajes	mm	Inspección visual

Material de la carcasa	mm	Inspección visual
Tipo de lubricación	--	Revisión del sistema de sellado y tipo de aceite usado
Sentido de giro	--	Observación en funcionamiento

#### 4.7.1. Procedimiento para la Evaluación de la Caja Reductora

Ante la falta de especificaciones técnicas de la caja reductora, se realizará una caracterización experimental basada en mediciones directas y observación del sistema en funcionamiento. Se analizarán sus dimensiones, tipo de engranajes y lubricación para garantizar su compatibilidad con la extrusora y su correcto desempeño en la transmisión de potencia.

Medición de dimensiones físicas:

- Uso de herramientas como cinta métrica y calibrador vernier para medir la carcasa y los ejes.
- Determinación del diámetro del eje de salida para verificar su compatibilidad con el sistema de transmisión.

Identificación del tipo de engranajes:

- Inspección visual de la caja para determinar si los engranajes son helicoidales, rectos o planetarios.
- Análisis del mecanismo de reducción y confirmación de la relación de 20:1 mediante el conteo de giros del eje de entrada y salida.

Verificación del material y lubricación:

- Identificación del material de la carcasa mediante inspección visual y comparación con referencias técnicas.
- Revisión del tipo de lubricación (aceite o grasa) y del estado de los sellos para garantizar un adecuado funcionamiento.

Pruebas de compatibilidad con la extrusora:

- Instalación de la caja reductora en la extrusora y verificación de su acoplamiento con el motor y el husillo.
- Pruebas preliminares para evaluar su desempeño en la transmisión de potencia.

#### 4.8. METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN Y EVALUACIÓN DEL MOTOR

Según el torque requerido del husillo se analizarán las características para la selección del motor.

Para el cálculo de la potencia del motor se utiliza la fórmula:

$$P = \frac{T*N}{9550} \quad (1)$$

Donde:

$P$  = potencia requerida del motor (kW)

$T_{in}$  = torque de entrada

$N$  = velocidad del motor (RPM)

9550 = Constante para convertir Nm y RPM a kW.

Para calcular el torque de entrada se utiliza la fórmula:

$$T_{in} = \frac{T_{out}}{RD} \quad (2)$$

Donde:

$T_{out}$  = torque requerido (4290 Nm)

RD = relación de reducción (20: 1)

$T_{in}$  = torque de entrada

Con estas fórmulas se puede obtener la potencia requerida del motor para el satisfacer el torque requerido para el proceso de extrusión del LDPE.

La empresa cuenta con motor que tiene una potencia de 50 HP y opera a una velocidad nominal de 1765 RPM. Se verificarán sus características eléctricas mediante la inspección de la placa de datos, asegurando que cumpla con la potencia necesaria para el proceso de extrusión. Como se muestra la placa de características en la figura 4.11.

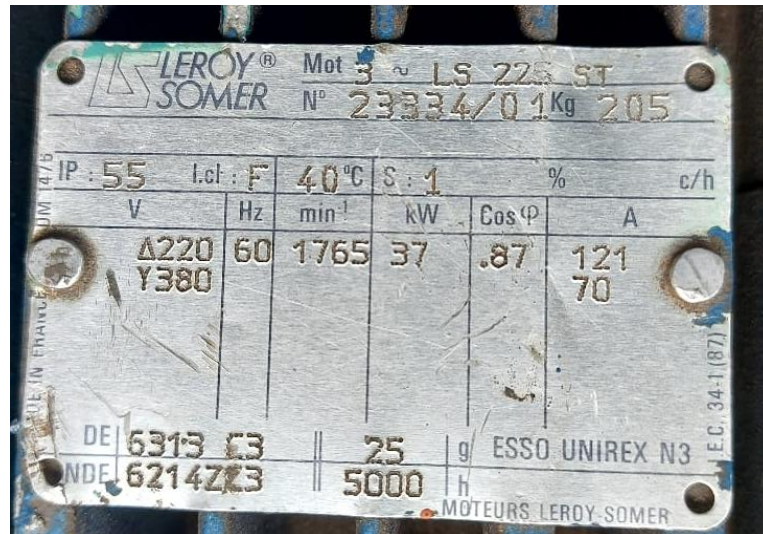


Figura 4.11 Placa de características del motor

La Tabla 4.7 presenta las principales características operativas del motor utilizado en el sistema de extrusión. Los valores mostrados fueron obtenidos a partir de la placa de características del motor, garantizando precisión en los parámetros eléctricos y mecánicos que rigen su funcionamiento.

Tabla 4.8 Descripción de variables del motor

Variable	Unidad	Valor	Método de obtención
Potencia	HP	50	Placa de características
Velocidad nominal	RPM	1765	Placa de características
Corriente nominal	A	121/70	Placa de características
Voltaje de operación	V	Δ 220/Y 380	Placa de características
Frecuencia	Hz	60	Placa de características
Factor de potencia	--	0.87	Placa de características
Grado de protección	IP	55	Placa de características

#### 4.8.1. Procedimiento para la Evaluación del Motor

El motor será evaluado a través de la inspección de su placa de características, mediciones eléctricas y pruebas operativas. Se verificó su compatibilidad con la caja reductora y la extrusora, asegurando un correcto desempeño en el sistema de transmisión de potencia.

Verificación de especificaciones técnicas:

- Inspección de la placa de características para obtener datos de potencia, voltaje, corriente y velocidad.
- Comparación con los requisitos de la extrusora para garantizar compatibilidad.

Inspección física y mecánica:

- Revisión del estado del motor, conexiones eléctricas y estado del bobinado.
- Evaluación del grado de protección IP55 y su resistencia a polvo y humedad.

Pruebas de funcionamiento:

- Medición de voltaje y corriente en operación.
- Evaluación de vibraciones y alineación con la caja reductora.
- Prueba de carga para verificar el rendimiento bajo condiciones reales de trabajo.

#### 4.9. METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE LAS POLEAS

Dado que la empresa no proporcionó información sobre las poleas de transmisión, se realizará un cálculo para determinar su dimensionamiento con base en la velocidad de operación del motor y la reducción necesaria para alcanzar una velocidad del husillo en un rango de 65 a 70 RPM.

Tabla 4.9 Variables de las poleas

Variable	Unidad	Método de obtención
Velocidad del motor	RPM	Placa de características (1765 RPM)
Velocidad del husillo	RPM	Parámetro de diseño ( $\approx$ 66 RPM)
Relación de transmisión	--	Cálculo con fórmula de transmisión por poleas
Diámetro polea motriz	mm	A determinar
Diámetro polea conducida	mm	A determinar

#### 4.9.1. Procedimiento para el Dimensionamiento de las Poleas

El cálculo de las poleas se realizó considerando la velocidad del motor y la reducción necesaria para alcanzar las 66 RPM en el husillo. Se determinó la relación de transmisión y se seleccionaron los diámetros adecuados para su fabricación e instalación en la extrusora.

- Determinación de la relación de transmisión

Se utiliza la ecuación de transmisión por poleas:

$$\frac{N_m}{N_h} = \frac{D_h}{D_m} \quad (2)$$

Donde:

$N_m$  = velocidad del motor

$N_h$  = velocidad del husillo

$D_m$  = diámetro de la polea motriz (8")

$D_h$  = diámetro de la polea conducida (6")

La relación de transmisión requerida se obtiene como:

$$RT = \frac{N_m}{N_h} \quad (3)$$

- Selección de diámetros de poleas:

Se elige un **diámetro de referencia** para la polea del motor  $D_m$  con base en estándares comerciales.

Se calcula el diámetro de la polea conducida  $D_h$  usando la relación de transmisión:

- Verificación de compatibilidad mecánica:

Se revisa que el espacio disponible en la estructura de la extrusora permita la instalación de las poleas seleccionadas.

Se evalúa el tipo de banda a utilizar para garantizar una transmisión eficiente de potencia.

- Pruebas de funcionamiento:

Instalación del sistema de poleas en la extrusora.

Medición de la velocidad del husillo para verificar que se alcanza el valor deseado de 62 RPM.

Ajustes en el diámetro de las poleas si es necesario.

#### 4.10. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LA BOQUILLA DE LA EXTRUSORA

El diseño de la boquilla se basará en la estructura y funcionalidad de una extrusora previamente fabricada, adaptando sus dimensiones y optimizando su desempeño para garantizar un flujo uniforme del material extruido. Se utilizará FUSION 360 para modelar la boquilla, ajustar sus dimensiones y realizar simulaciones de su comportamiento en el proceso de extrusión.

Tabla 4.10 Parámetros de Diseño de la Boquilla de la Extrusora

Variable	Unidad	Método de obtención
Diámetro de entrada	mm	Diseño en FUSION 360, basado en la extrusora de referencia
Diámetro de salida	mm	Diseño en FUSION 360, basado en la extrusora de referencia
Longitud total	mm	Diseño en FUSION 360, basado en la extrusora de referencia
Ángulo de inclinación	°	Determinado en el plano, ajustado para optimizar el flujo
Radio de curvatura	mm	Diseño en FUSION 360, basado en la extrusora de referencia
Espesor del material	mm	Definido según resistencia térmica y mecánica
Material de fabricación	--	Seleccionado según los requisitos térmicos y mecánicos

##### 4.10.1. Procedimiento para el Diseño y Fabricación de la Boquilla

Se describirán los pasos seguidos desde la concepción del diseño hasta la fabricación de la boquilla. En la Figura 4.12 se presenta el diagrama geométrico de la boquilla, en el cual se observa la transición del polímero fundido desde la entrada hasta la salida de filamento. La sección cónica permite una distribución homogénea del material, reduciendo esfuerzos internos y asegurando un flujo constante en el proceso de extrusión.

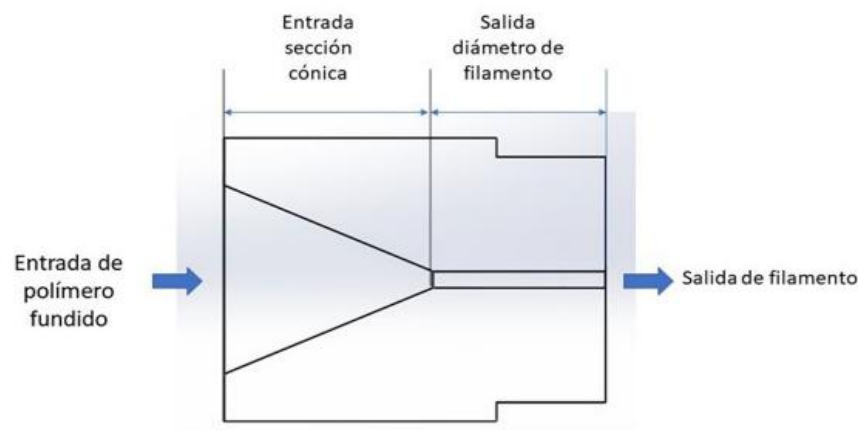


Figura 4.12 Diagrama geométrico de la boquilla

#### 4.10.1.1. Diseño en FUSION 360

- **Análisis del modelo de referencia:**

Se estudiará la boquilla de una extrusora ya fabricada, identificando sus dimensiones y características estructurales.

Se determinarán mejoras en su diseño para optimizar la estabilidad del flujo de material y la eficiencia térmica.

- **Modelado 3D de la boquilla:**

Se creará un modelo en **FUSION 360** ajustando dimensiones y geometría para mejorar el rendimiento.

Se definirán las bridas de sujeción y las tolerancias de fabricación.

- **Simulación del flujo de material:**

Se realizará una simulación computacional del comportamiento del flujo dentro de la boquilla.

Se identificarán posibles puntos de obstrucción o pérdidas de presión para optimizar el diseño.

- **Generación de planos técnicos:**

Se elaborarán los planos detallados con cotas, tolerancias y especificaciones técnicas.

Se exportarán los archivos en formatos compatibles con los procesos de manufactura.

#### 4.10.1.2. Fabricación de la Boquilla

El diseño de la boquilla tomará como referencia la estructura de una extrusora previamente fabricada, implementando mejoras en FUSION 360 para optimizar su eficiencia y desempeño. Posteriormente, se llevará a cabo su fabricación mediante procesos de corte, conformado, soldadura y mecanizado, asegurando que cumpla con las especificaciones de diseño de ingeniería y los requerimientos operativos del proceso de extrusión.

- **Selección del material:**

El material fue seleccionado y otorgado por la empresa, el cual es AISI 1080 421 Austenítico.

Para la ficha técnica ver Anexo II.

- **Corte y conformado de la pieza:**

Se procederá con el corte del material según las dimensiones establecidas en los planos técnicos.

Se utilizarán procesos de corte como oxicorte y amoladora.

- **Soldadura y ensamblaje:**

Se realizarán uniones soldadas para garantizar hermeticidad y resistencia estructural.

Se aplicarán pruebas de calidad en las soldaduras para verificar su integridad.

- **Mecanizado de bridas y ajustes finales:**

Se fabricarán las bridas de fijación considerando las tolerancias de montaje.

Se realizarán ajustes en las dimensiones finales mediante mecanizado o esmerilado.

- **Pruebas de compatibilidad con la extrusora:**

Se instalará la boquilla en la extrusora y se verificará su alineación con el cilindro de extrusión.

Se efectuarán pruebas preliminares de flujo de material para evaluar la resistencia y la distribución de presión.

#### 4.11. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO Y EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN

El sistema de calefacción de la extrusora es fundamental para lograr la fusión del plástico y garantizar su fluidez a través del husillo y la boquilla. Para este proyecto, se optó por el uso de sopletes de GLP, los cuales proporcionan un calentamiento directo y uniforme a la superficie del cilindro. Este método fue seleccionado debido a su disponibilidad, facilidad de

implementación y capacidad para alcanzar las temperaturas necesarias en el proceso de extrusión.

#### 4.11.1. Selección y diseño del sistema de calefacción

Dado que la empresa no proporcionó un sistema de calefacción para la extrusora, se seleccionarán el sistema adecuado como fuente de calor. Como se puede evidenciar en la fundamentación teórica detalla las ventajas y desventajas entre calefacción por resistencias eléctricas y sopletes de GLP, donde la opción de sopletes de GLP ofrece bajos costos de inversión de instalación, también es muy común en el mercado y accesible lo que ofrece una rápida adquisición de los componentes del sistema. Esta elección se basa en su capacidad para proporcionar un calentamiento rápido y uniforme en la superficie del cilindro. Las dimensiones de los sopletes de igual manera se elegirán los más comunes ya que si a futuro se ven en la necesidad de sustituir por nuevos no tendrían que modificar nada simplemente comprarlos y cambiarlos.

#### 4.11.2. Cálculo de potencia térmica requerida

La potencia requerida para el sistema de calefacción se determina considerando la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura del material desde su estado inicial hasta la temperatura de extrusión. Se emplea la siguiente ecuación para el cálculo:

$$Q = Q_{fundir} + Q_{latente} + Q_{pérdidas} \quad (4)$$

Donde:

$Q_{fundir}$  = Potencia necesaria para calentar LDPE hasta su temperatura de fusión.

$Q_{latente}$  = Calor necesario para el cambio de fase del material.

$Q_{pérdidas}$  = Potencia disipada debido a convección y radiación en la superficie.

Para determinar  $Q_{fundir}$  se usa la ecuación:

$$Q_{fundir} = \dot{m} * C_p * \Delta T \quad (5)$$

Donde:

$\dot{m}$  = Flujo másico del material  $\left[ \frac{kg}{s} \right]$

$C_p$  = Calor específico del LDPE  $\left[ \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right]$ .

$\Delta T =$  Diferencia de temperatura entre el estado inicial y final del material [ $^{\circ}\text{C}$ ]

El calor latente se calcula como:

$$Q_{\text{latente}} = \dot{m} * L_f \quad (6)$$

Donde:

$L_f =$  Calor latente de fusión del LDPE [J/kg].

Las pérdidas de calor se calculan considerando la **convección y radiación térmica**, utilizando la ecuación:

$$Q_{\text{perdidas}} = h * A * (T_{\text{cilindro}} - T_{\text{ambiente}}) \quad (7)$$

Donde:

$h =$  Coeficiente de transferencia de calor por convección  $\left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right]$ .

$A =$  Área superficial del cilindro [ $\text{m}^2$ ].

$T_{\text{cilindro}} =$  Temperatura de operación del cilindro [ $^{\circ}\text{C}$ ].

$T_{\text{ambiente}} =$  Temperatura ambiente [ $^{\circ}\text{C}$ ].

En la Figura 4.18 se presenta el modelo térmico del cilindro y el sistema de calefacción, ilustrando la distribución de temperaturas en la superficie y el interior del cilindro, así como las pérdidas de calor por convección y radiación. Este modelo permite analizar el flujo de calor en el proceso de extrusión y calcular la energía térmica necesaria para alcanzar la temperatura óptima de fusión del material.

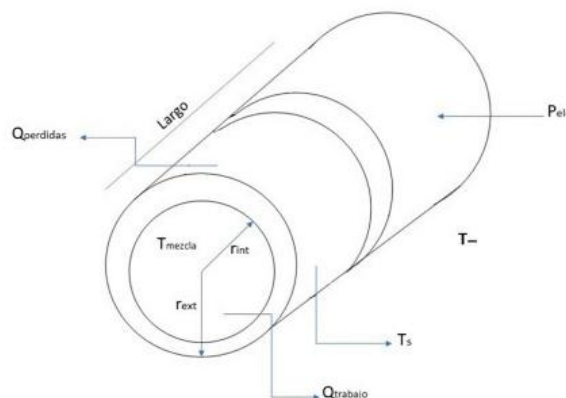


Figura 4.13 Modelo del cilindro y sistema de calefacción.

### **4.11.3. Adquisición y Montaje de los Sopletes**

Con base en los cálculos térmicos, se procederá con la adquisición de sopletes de GLP con la potencia necesaria para la extrusora. Se instalarán estratégicamente alrededor del cilindro para proporcionar un calentamiento homogéneo. Se garantizará un montaje seguro, evitando fugas de gas y optimizando la eficiencia del sistema.

## **4.12. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL RECUBRIMIENTO TÉRMICO**

En el caso del diseño del recubrimiento térmico se tomará como referencia el recubrimiento térmico ya existen en la empresa, para garantizar su funcionamiento y operación se realizar distintos análisis y cálculos que se detalla a continuación.

Para optimizar la eficiencia térmica del sistema de extrusión, se diseñará y construirá un recubrimiento térmico que contenga y distribuya uniformemente el calor generado por los sopletes de GLP. La inclusión del recubrimiento térmico permitirá mejorar la estabilidad térmica, reducir las pérdidas de calor y garantizar una temperatura uniforme en el cilindro de la extrusora. Se seleccionará un diseño que minimice la disipación de energía y maximice la eficiencia del proceso.

### **4.12.1. Diseño del Recubrimiento en FUSION 360**

El diseño del recubrimiento térmico se realizará en **FUSION 360**, asegurando que su geometría se adapte a la extrusora y que proporcione un aislamiento térmico eficiente. Se definirán las dimensiones necesarias para cubrir completamente el cilindro de la extrusora y se incorporarán aberturas estratégicas para la salida de gases y la manipulación de los sopletes. Se seleccionarán materiales resistentes a altas temperaturas para evitar deformaciones y garantizar la durabilidad del sistema.

La Figura 4.19 presenta el modelo tridimensional del recubrimiento térmico diseñado en FUSION 360, donde se aprecia su estructura principal y la disposición de los ductos para las antorchas de GLP. Este diseño fue optimizado para garantizar una distribución uniforme del calor en el cilindro de la extrusora, reduciendo las pérdidas térmicas y mejorando la eficiencia del sistema de calefacción.

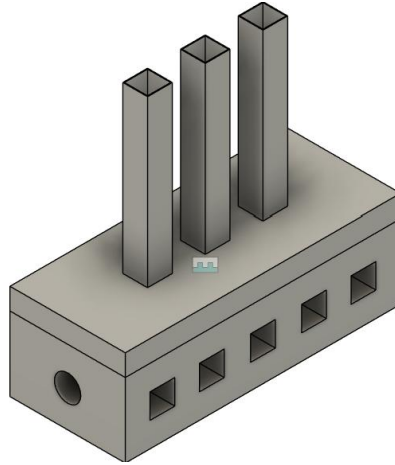


Figura 4.14 Diseño del Recubrimiento térmico de Calefacción

Para la salida de gases del recubrimiento térmico se analizará el flujo de gases generado por los 5 sopletes de GLP y con esto se obtendrá el volumen requerido para la evacuación de gases.

Datos Claves del GLP y de los Sopletes:

- Poder calorífico del GLP: 46 MJ/kg
- Densidad del GLP (a 15°C y 1 atm): 2.2 kg/m<sup>3</sup>
- Consumo estimado por soplete: 1 kg/h a 3 kg/h (*según el tamaño y regulación del soplete*)

Para el cálculo del flujo de gases generados se ocupa la siguiente formula:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (8)$$

Donde:

$$V = \text{Volumen de gases generados} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right)$$

$$m = \text{Masa de GLP consumida} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)$$

$$\rho = \text{Densidad del GLP} \left( 2.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

Ver ecuación 8 en Anexo VII.

#### 4.12.2. Cálculo de la Eficiencia Térmica del Recubrimiento térmico

Para evaluar la eficiencia térmica del recubrimiento térmico, se calculará la cantidad de calor retenido y su distribución en el cuerpo de la extrusora. Además, se analizarán las pérdidas térmicas por conducción y convección, garantizando que el diseño del recubrimiento térmico optimice la retención de energía, minimice la disipación de calor y mejore la estabilidad térmica del proceso de extrusión. Para el respectivo cálculo se lo realizará mediante la siguiente ecuación:

$$Q = Q_{suministrado} - Q_{perdidas} \quad (9)$$

Donde:

$Q_{suministrado}$  = Potencia térmica generada por los sopletes de GLP.

$Q_{perdidas}$  = Energía disipada por conducción y convección.

#### 4.12.3. Selección de material para la construcción

Para la construcción del recubrimiento térmico de extrusión se consideró el uso de ladrillos normales, ya que ofrecen buena resistencia mecánica y estabilidad estructural a un costo reducido. Este tipo de ladrillo tiene una resistencia a la compresión de 7 a 14 MPa, una densidad de 1600 a 1900 kg/m<sup>3</sup> y una conductividad térmica de 0,6 a 1,0 W/m·K, lo que le permite retener moderadamente el calor y contribuir a la eficiencia del sistema.

Aunque el **ladrillo normal** no tiene la misma resistencia térmica que un ladrillo refractario, puede utilizarse en la construcción del recubrimiento térmico con un diseño adecuado, siempre y cuando se implemente un **aislamiento térmico adicional** para optimizar la retención de calor y mejorar su durabilidad en el proceso de extrusión.

Tabla 4.11 Características del ladrillo simple

Propiedades	Valor
Dimension estándar	240x115x75 (mm)
Densidad	1600 – 1900 (kg/m <sup>3</sup> )
Resistencia a la compresión	7 – 14 MPa
Conductividad térmica	0.6 – 1.0 (W/m*K)
Resistencia al fuego	Alta

Peso Promedio	2.5 – 3.5 (kg)
---------------	----------------

En el aislamiento térmico se usará ladrillo simple por su conductividad térmica y su alta resistencia al fuego, valores que se puede visualizar en la tabla 4.11.

#### 4.12.4. Fabricación e Instalación del Recubrimiento térmico

El recubrimiento térmico será fabricado con materiales de alta resistencia térmica, como acero inoxidable y aislantes refractarios, con el objetivo de minimizar las pérdidas de calor y optimizar la eficiencia del sistema de calefacción. Su construcción incluirá procesos de corte, ensamble y soldadura, garantizando una estructura robusta y duradera. Finalmente, se instalará alrededor del cilindro extrusor, asegurando una cobertura completa de la zona de calentamiento y facilitando el funcionamiento óptimo de los sopletes de GLP para una distribución uniforme del calor.

La Figura 4.20 ilustra el proceso de fabricación del recubrimiento térmico de calentamiento para la extrusora. En la imagen se observa la estructura metálica de soporte, junto con la disposición estratégica de los ladrillos refractarios, diseñados para minimizar las pérdidas de calor y maximizar la eficiencia térmica del sistema. Este diseño garantiza una distribución uniforme del calor en el cilindro de la extrusora, asegurando una fusión óptima y estable del material durante el proceso de extrusión.



Figura 4.15 Fabricación del recubrimiento térmico

#### 4.12.5. Pruebas de funcionamiento y validación

Una vez instalado el recubrimiento térmico, se realizarán pruebas experimentales para evaluar su rendimiento. Se tomarán mediciones de temperatura en distintos puntos del cilindro para verificar la distribución uniforme del calor. Asimismo, se analizará el consumo de gas de los

sopletes de GLP para determinar la eficiencia energética del sistema. Se realizarán ajustes en la estructura del recubrimiento térmico si es necesario, con el fin de optimizar su desempeño y minimizar las pérdidas térmicas.

### **4.13. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LA TOLVA DE ALIMENTACIÓN**

#### **4.13.1. Justificación y Función de la Tolva**

La tolva de alimentación es un componente esencial en el sistema de extrusión, ya que permite la dosificación controlada del material triturado hacia el husillo. Su diseño debe garantizar un flujo continuo y uniforme, evitando atascos o acumulaciones de material que puedan afectar la eficiencia del proceso. Se considerarán parámetros como la capacidad de almacenamiento, el ángulo de caída del material y la resistencia del material de fabricación.

#### **4.13.2. Diseño de la Tolva en FUSION 360**

El diseño de la tolva se desarrollará en FUSION 360, garantizando una geometría óptima para mejorar el flujo de material hacia la extrusora. Se determinará un ángulo de inclinación adecuado para prevenir acumulaciones y optimizar la fluidez del plástico triturado. Además, se integrarán refuerzos estructurales que permitan soportar la carga del material sin riesgo de deformaciones, asegurando su resistencia mecánica y estabilidad operativa.

La Figura 4.21 presenta el modelo tridimensional de la tolva de alimentación, diseñada en FUSION 360, la cual se acopla al barril de la extrusora mediante una brida de fijación. Su diseño permite una dosificación controlada del material triturado, garantizando un flujo continuo y uniforme hacia el tornillo sin fin. La geometría ha sido optimizada para evitar bloqueos y mejorar la eficiencia del proceso de extrusión, asegurando una alimentación constante y sin interrupciones.

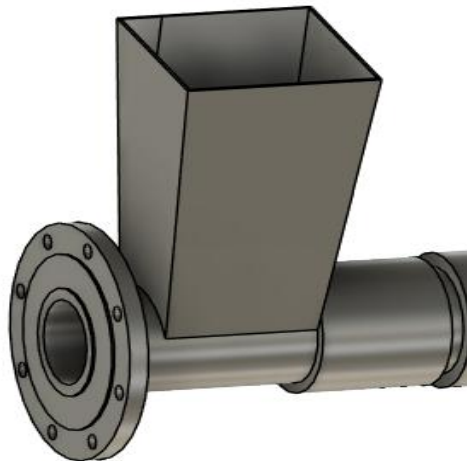


Figura 4.16 Modelo 3D de la Tolva de Alimentación Acoplada a la Extrusora

#### 4.13.3. Cálculo de la Capacidad Volumétrica de la Tolva

El diseño de la tolva de alimentación se basa en la necesidad de garantizar un flujo continuo y controlado del LDPE húmedo hacia la extrusora. Para ello, se adoptó una geometría de prisma rectangular con dimensiones optimizadas para facilitar el ingreso del material reciclado y evitar posibles atascos durante la alimentación.

La capacidad volumétrica de la tolva se determinará con base en sus dimensiones físicas, asegurando que pueda contener el material suficiente para garantizar una alimentación estable en la extrusora. Un diseño adecuado permitirá reducir la frecuencia de recarga y mejorar la autonomía del sistema.

La capacidad volumétrica de la tolva se determina mediante la ecuación:

$$V_{tolva} = a * b * h \quad (10)$$

Donde:

$a$  = Ancho de la base [mm].

$b$  = Longitud de la base [mm].

$h$  = Altura de la tolva [mm].

La tolva fue dimensionada para garantizar un tiempo de autonomía suficiente, evitando la necesidad de recargas constantes y asegurando una alimentación estable en el proceso de extrusión.

#### 4.13.4. Cálculo del peso del LDPE en la tolva

Para asegurar la estabilidad estructural de la tolva se calculará el peso total del material que contendrá. Este cálculo es fundamental para dimensionar los refuerzos necesarios y evitar fallos mecánicos de la estructura portante.

El peso del material contenido en la tolva se calcula como:

$$Peso_{LDPE} = \rho * V_{tolva} \quad (11)$$

Donde:

$\rho =$  Densidad del LDPE húmedo ( $950 \text{ kg/m}^3$ ).

$V_{tolva} =$  Volumen total de la tolva [ $\text{m}^3$ ].

Este cálculo permite determinar el peso total del material en la tolva, asegurando que la estructura soporte las cargas generadas sin comprometer la estabilidad.

#### 4.13.5. Cálculo de la autonomía de la tolva

La autonomía de la tolva se encuentra en función del flujo volumétrico del material:

$$Autonomia = \frac{V_{tolva}}{Q_{LDPE}} \quad (12)$$

Donde:

$Q_{LDPE} =$  Flujo volumétrico del LDPE en la extrusora, definido como:

$$Q_{LDPE} = \frac{m}{\rho} \quad (13)$$

$m =$  Masa del material procesado ( $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$ )

$\rho =$  Densidad del LDPE ( $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ )

#### 4.13.6. Fabricación e instalación de la tolva

La tolva será fabricada en hierro común, un material seleccionado por su resistencia mecánica, facilidad de conformado y bajo costo, lo que permite una construcción eficiente y económica. Aunque el hierro es susceptible a la corrosión, se aplicará un tratamiento de pintura anticorrosiva o recubrimiento protector para aumentar su durabilidad y resistencia en ambientes de trabajo exigentes. Para su fabricación, se emplearán procesos de corte por plasma, garantizando cortes precisos y optimizando el uso del material.

Posteriormente, se realizarán operaciones de plegado para conformar las piezas estructurales de la tolva, asegurando un diseño ergonómico que favorezca un flujo de material eficiente. Finalmente, se aplicará soldadura de alta resistencia, permitiendo una unión robusta entre los componentes y evitando puntos débiles que puedan comprometer la integridad de la estructura con el tiempo.

Durante la fase de instalación, se comprobará la alineación exacta de la tolva con la extrusora para garantizar un acoplamiento firme y estable, minimizando vibraciones y desajustes que podrían afectar el proceso de alimentación del material. Se incorporarán elementos de fijación diseñados para proporcionar una sujeción segura, permitiendo al mismo tiempo un desmontaje rápido para facilitar labores de mantenimiento o limpieza. Además, se evaluará la necesidad de refuerzos estructurales en zonas clave, con el objetivo de mejorar la estabilidad y prolongar la vida útil del sistema.

Gracias a este diseño optimizado y su construcción bajo estándares de calidad, la tolva ofrecerá un rendimiento confiable y eficiente dentro del sistema de extrusión, asegurando una alimentación constante del material y contribuyendo a la estabilidad del proceso productivo.

#### **4.13.7. Análisis y selección del material para la fabricación de la tolva**

Para la fabricación de la tolva se seleccionó acero laminado en caliente (LAC) ASTM A36, debido a sus propiedades mecánicas y facilidad de fabricación. Este material es ampliamente utilizado en aplicaciones estructurales e industriales gracias a los siguientes criterios:

- Buena resistencia mecánica, lo que garantiza la estabilidad estructural y la capacidad de soportar cargas sin deformaciones importantes.
- Facilidad de soldadura, corte y conformado, que permite una fabricación eficiente y un montaje preciso.
- Costo asequible y amplia disponibilidad en el mercado, que optimiza la viabilidad del proyecto sin comprometer la calidad estructural.
- Durabilidad y estabilidad mecánica, asegurando que la tolva pueda soportar las vibraciones y tensiones generadas durante el proceso de extrusión.

La tolva ha sido diseñada con una inclinación adecuada para facilitar el flujo gravitacional del material, minimizando la posibilidad de compactación y mejorando la alimentación por sinfin. De ser necesario se considerará la implementación de un sistema vibratorio para evitar obstrucciones y garantizar el flujo continuo.

Para su fabricación se utilizará una placa de acero ASTM A36 con unas dimensiones de 1,22 m × 2,44 m y un espesor de 3 mm, con acabado natural. Aunque el acero A36 no tiene una alta resistencia a la corrosión, se aplicará un tratamiento superficial anticorrosión para alargar su vida útil en ambientes de trabajo con presencia de humedad o materiales reciclados húmedos. Este material permite la construcción de una estructura robusta adaptada a los requerimientos del proceso de extrusión.

Tabla 4.11 Propiedades mecánicas del acero ASTM A36

Tipo de Material	Resistencia a la tensión (Fluencia MPa)	Esfuerzo máximo (MPa)	Espesor (mm)
ASTM A36 (LAC)	250	400	3

#### 4.14. SELECCIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD PARA EL DISEÑO DE LA EXTRUSORA

Para garantizar la resistencia estructural de la extrusora, se tomó como referencia el libro "**Diseño de Elementos de Máquinas**" de **Robert L. Mott**, el cual establece criterios de diseño en función del tipo de carga que soporta una estructura.

Dado que la extrusora opera de manera continua bajo esfuerzos repetitivos, se considera que su tipo de carga es **repetitiva**, lo que implica que el factor de seguridad debe ser mayor que en sistemas con carga estática. Para materiales dúctiles, como los utilizados en la construcción de la extrusora, el criterio recomendado es un **factor de seguridad cercano a 8**.

Este valor se tomará como referencia para evaluar la resistencia de la estructura en la simulación de esfuerzos, asegurando que el diseño cumpla con los estándares de seguridad y durabilidad requeridos para su funcionamiento continuo. [20]

El factor de seguridad debe seleccionarse según el tipo de carga aplicada al sistema. En condiciones de carga repetitiva, como en la extrusora, es recomendable un factor de seguridad de aproximadamente 8. Además, es importante considerar normativas específicas y, en algunos casos, aplicar criterios de diseño más conservadores para garantizar la seguridad y durabilidad del equipo. Ver anexo VI.

#### 4.15. DISEÑO CONTROL ELÉCTRICO

El diseño del control eléctrico de la extrusora es fundamental para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente del sistema. Se implementa un circuito de arranque estrella-triángulo para el motor trifásico de 50 HP y 1765 RPM, con protecciones y dispositivos de control para evitar sobrecargas y fallos en la operación.

##### 4.15.1. Diagrama del sistema eléctrico

El diseño del sistema eléctrico incluye dos diagramas principales, control y potencia, Ambos diagramas trabajan en conjunto para garantizar un arranque progresivo y una operación estable de la extrusora. La interacción de estos elementos se ilustra en la Figura 4.17 y la Figura 4.18.

Diagrama de control: Representa la lógica de encendido, operación y seguridad del motor. Incluye los pulsadores de encendido (START), paro de emergencia (EMERG), los contactores de arranque en estrella (KMY) y de operación en triángulo (KMT), así como el temporizador (T1) que regula la transición de estrella a triángulo.

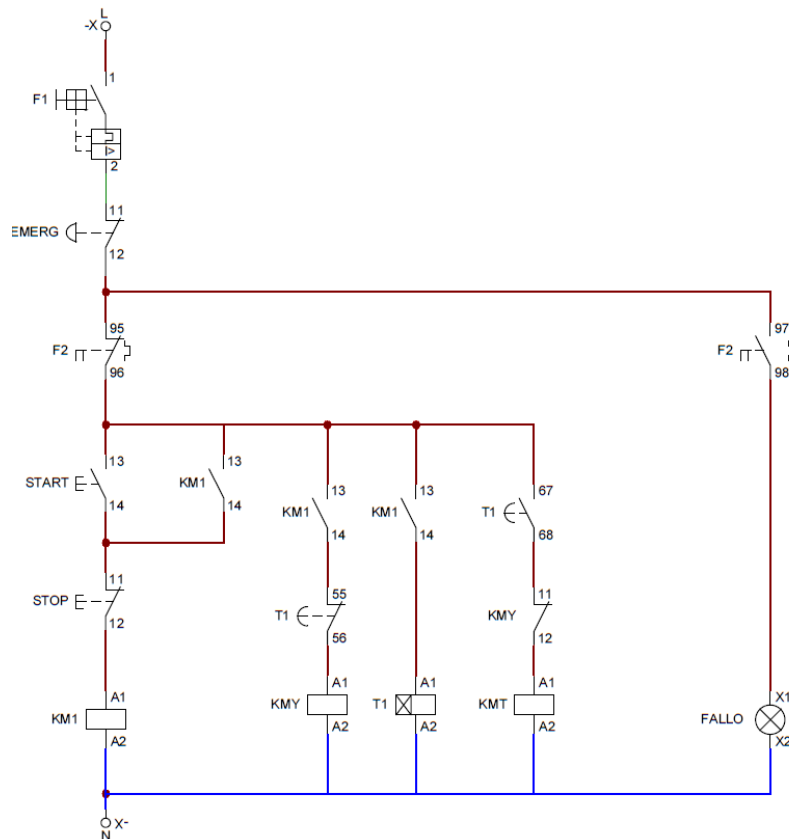


Figura 4.17 Diagrama de control arranque estrella – triángulo

Diagrama de potencia: Muestra la conexión del motor trifásico a la red eléctrica, con fusibles de protección, interruptores termomagnéticos y los contactores responsables de la conmutación de estrella a triángulo. Este circuito asegura la correcta alimentación del motor y su protección ante sobrecargas o fallos eléctricos.

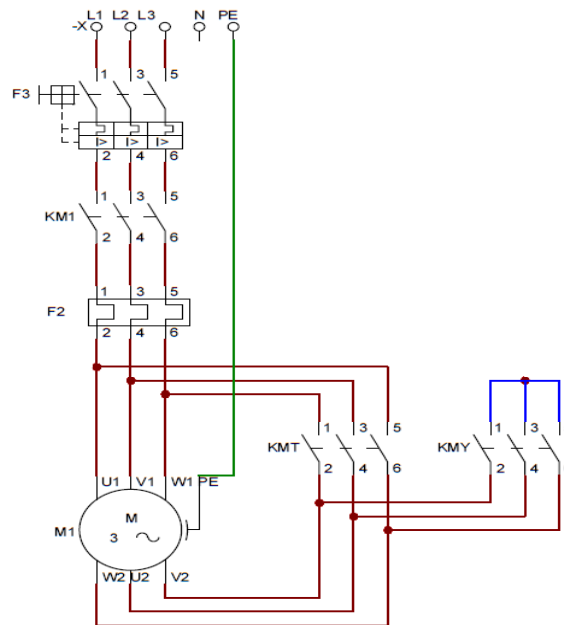


Figura 4.18 Diagrama de potencia arranque estrella – triángulo

#### 4.15.2. Organigrama del Sistema de Control Eléctrico

A continuación, se presenta el organigrama que describe el flujo de operación del sistema eléctrico, desde el arranque hasta su apagado, considerando las condiciones de seguridad y monitoreo continuo:

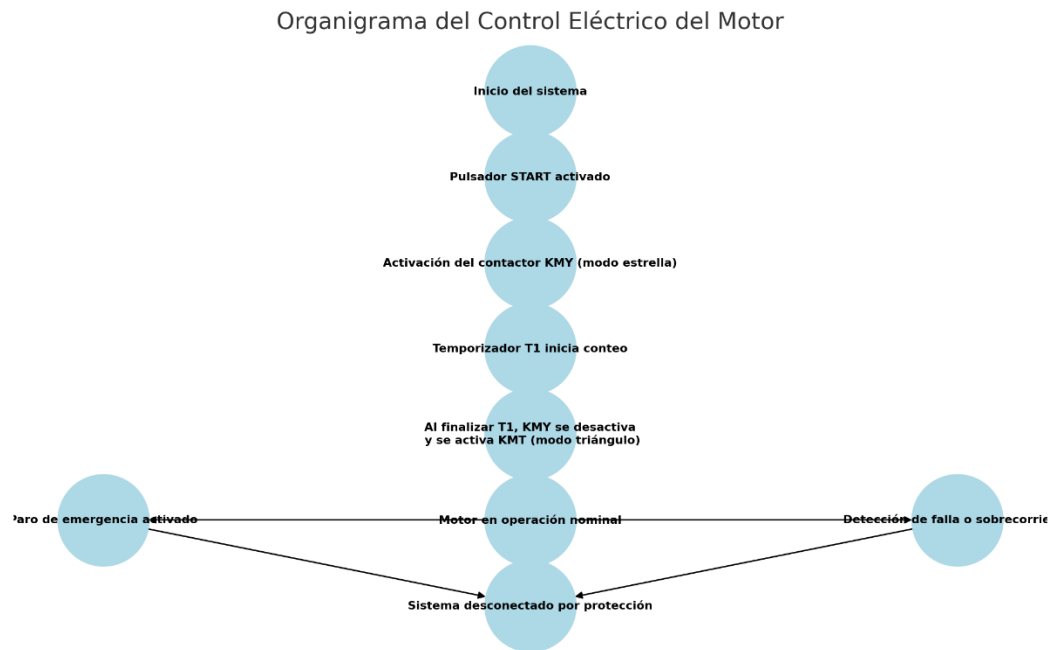


Figura 4.19 Organigrama del Sistema de Control Eléctrico

### 4.15.3. Simulación y Seguridad del Sistema de Control

Para verificar el correcto funcionamiento del circuito, se realizó una simulación en Cade Simu, donde se validaron los siguientes aspectos:

Arranque del motor en estrella.

Transición a triángulo tras el tiempo programado.

Accionamiento de protecciones en caso de fallo.

La Figura 4.16 muestra la simulación realizada, donde se observa la interacción de los contactores y el temporizador en el proceso de arranque del motor.

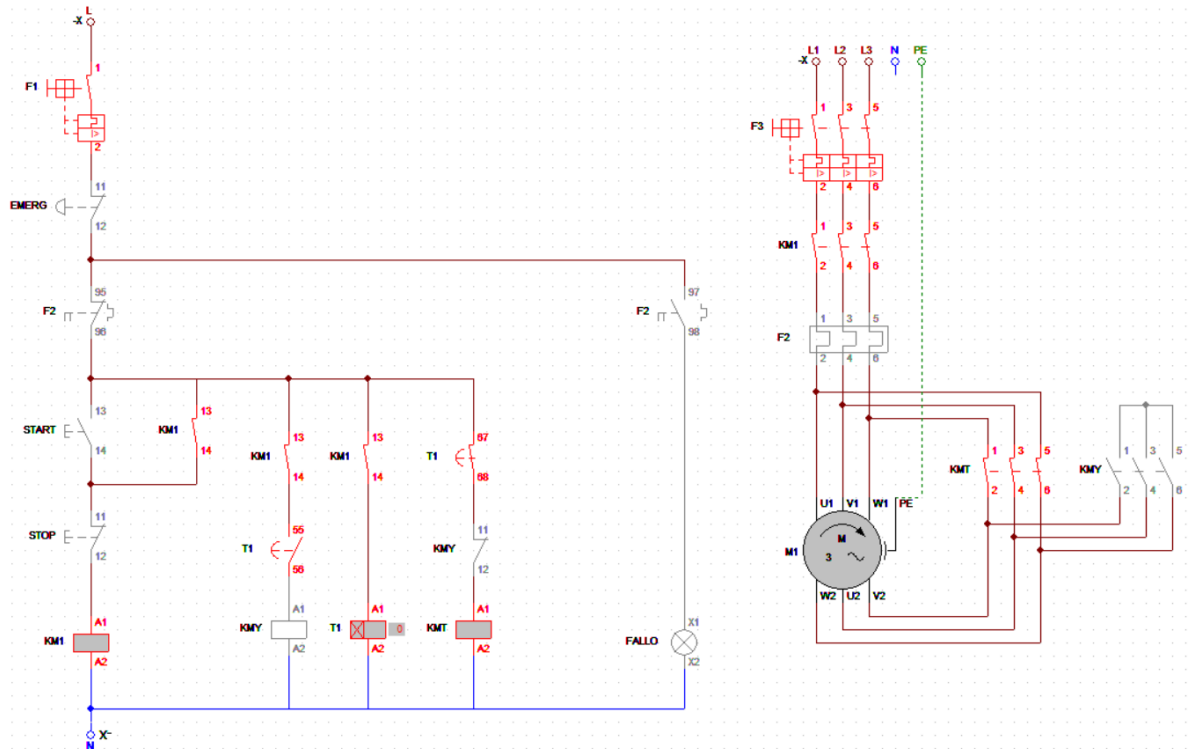


Figura 4.20 Simulación realizada en el software CadeSimu

Además, para evitar daños en el motor y el sistema eléctrico, se implementan las siguientes medidas de seguridad:

Fusibles de protección para sobrecarga y cortocircuito.

Pulsador de emergencia para detener el sistema inmediatamente en caso de fallo.

Monitoreo de temperatura y corriente para evitar sobrecalentamientos y daños eléctricos.

Interruptor diferencial para detectar fugas de corriente y evitar descargas eléctricas.

Sistema de ventilación y disipación de calor en el motor para mejorar la eficiencia térmica.

Este diseño de control eléctrico permite una operación confiable y segura del motor de la extrusora, garantizando su eficiencia y prolongando la vida útil del equipo.

#### 4.16. METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE CABLE

Se calculará la **corriente nominal** del motor y se elegirá el calibre del cable adecuado para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente.

#### 4.16.1. Cálculo de la corriente nominal

Para un sistema **trifásico**, la corriente se determina con:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} * V * \cos \theta * \eta} \quad (13)$$

Verificar la caída de tensión con la ecuación:

$$V_d = \frac{2 * I * L * R}{1000} \quad (14)$$

Donde L es la longitud del cable y R es la resistencia por metro.

## 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

### 5.1. CONSTRUCCIÓN DE LA EXTRUSORA

La construcción de la extrusora comprende diversas etapas, desde la fabricación de los soportes estructurales hasta la instalación del cilindro, el sistema de transmisión y el recubrimiento térmico de calefacción. Cada una de estas fases se detalla a continuación.

#### 5.1.1. Fabricación del bastidor y soporte de la extrusora

El bastidor es la estructura base que soportará la extrusora y los demás componentes mecánicos. Se fabricó a partir de perfiles de acero estructural ASTM A36, los cuales fueron cortados, ensamblados y soldados para garantizar rigidez y estabilidad.

Las imágenes muestran el proceso de alineación y soldadura de los perfiles, así como la preparación de las uniones mediante pulido para lograr una correcta adhesión del material de aporte.



Figura 5.21 Proceso de fabricación del soporte estructural



Figura 5.22 Proceso de fabricación del bastidor

En esta fase, se completó la soldadura y ensamblaje de la estructura base, garantizando la estabilidad y resistencia necesarias para soportar los componentes del sistema de extrusión. Una vez finalizada esta etapa, la estructura quedó preparada para la instalación del sistema de transmisión y el cilindro de extrusión.



Figura 5.23 Estructura base completa

### **5.1.2. Ensamblaje del soporte para la caja reductora**

La caja reductora, encargada de disminuir la velocidad de giro del motor y aumentar el torque, requiere una base sólida. Se fabricó un soporte específico utilizando placas de acero, las cuales fueron cortadas y soldadas a la estructura principal.

En la imagen correspondiente, se aprecia el refuerzo estructural realizado para soportar las vibraciones y cargas transmitidas por el motor.



Figura 5.24 Fabricación del soporte para la caja reductora

En la última etapa del ensamblaje, la caja reductora fue instalada sobre su soporte, asegurando una alineación precisa con el eje del motor



Figura 5.25 Instalación de la caja reductora sobre su soporte

### **5.1.3. Construcción del recubrimiento térmico de Calefacción**

El sistema de calefacción se basa en el uso de sopletes de GLP industrial, por lo que se diseñó un recubrimiento térmico de ladrillo refractario alrededor del cilindro para contener el calor y minimizar pérdidas. La fabricación del recubrimiento térmico consistió en la colocación de ladrillos y su recubrimiento con una mezcla de mortero resistente a altas temperaturas.

El cilindro, elemento clave del sistema de extrusión, fue instalado sobre la estructura base y alineado con la caja reductora. Su fijación se realizó mediante pernos y soldaduras estratégicas, asegurando una correcta distribución de esfuerzos.



Figura 5.26 Instalación del cilindro

Para la calefacción del cilindro, se optó por la construcción de un recubrimiento térmico de ladrillo, el cual permite un mejor aislamiento térmico y optimización del consumo energético.

Las imágenes muestran las diferentes fases de construcción del recubrimiento térmico, incluyendo la disposición de los ladrillos y la aplicación de la mezcla de sellado.



Figura 5.27 Construcción del recubrimiento térmico con ladrillos refractarios

#### **5.1.4. Fabricación de la tapa del recubrimiento térmico**

Para facilitar el mantenimiento y limpieza del sistema, se diseñó una tapa removible para el recubrimiento térmico, fabricada en acero estructural y reforzada con ladrillo refractario.



Figura 4.28 Fabricación de la tapa del recubrimiento térmico con material refractario

En las imágenes, se observa el proceso de ensamblaje de la tapa con la disposición de los materiales y las soldaduras realizadas para fijar los componentes.

#### **5.1.5. Instalación del motor y transmisión**

La instalación del motor es una de las fases críticas en el ensamblaje de la extrusora, ya que debe garantizar una correcta alineación con la caja reductora para evitar vibraciones y pérdidas de potencia. El procedimiento seguido fue el siguiente:

Fijación del motor a la base estructural: Se instaló un motor trifásico de 50 HP y 1765 RPM, asegurando su fijación con pernos de alta resistencia.

Alineación del motor con la caja reductora: Se utilizó un reloj comparador para garantizar la correcta alineación del eje del motor con la entrada de la caja reductora.



Figura 5.29 Montaje de la caja reductora

Acople del eje del motor con el sistema de transmisión: Se emplearon acoples mecánicos de tipo flexible para absorber posibles desalineaciones mínimas.

Instalación de soportes antivibración: Se añadieron bases de goma en los puntos de apoyo del motor para reducir el impacto de vibraciones en la estructura.

#### **5.1.6. Montaje del Husillo de Extrusión**

El husillo es la pieza que transporta y compacta el material dentro del cilindro, por lo que su instalación debe garantizar un ajuste preciso dentro del cilindro de extrusión. Para su montaje se siguieron los siguientes pasos:

Verificación dimensional del husillo: Se comprobaron tolerancias en el diámetro del husillo y su ajuste con el interior del cilindro.

Inserción del husillo en el cilindro: Se colocó con un alineamiento cuidadoso para evitar fricción excesiva o desajustes.

Lubricación del sistema: Se aplicó grasa de alta temperatura en los puntos de contacto para minimizar el desgaste.

Prueba de giro manual: Se giró el husillo manualmente para asegurar que se mueve sin restricciones dentro del cilindro.

#### **5.1.7. Implementación de los sopletes**

En la imagen se observa la implementación del sistema de calentamiento por sopletes de gas en la extrusora. Se han instalado cinco sopletes lineales, acoplados a la carcasa del cilindro de extrusión a través de aberturas estratégicamente dispuestas. Estos dispositivos generan una combustión controlada, proporcionando el calor necesario para la fusión del material termoplástico dentro de la cámara de procesamiento.



Figura 5.30 Sistema de calentamiento por sopletes en la extrusora

## **5.2. EVALUACIÓN DE LOS MATERIALES PROPORCIONADOS POR LA EMPRESA**

Aunque estos elementos no se modificaron, se realizaron verificaciones dimensionales, modelado en FUSION 360 y pruebas de compatibilidad para garantizar que funcionarían correctamente en el sistema diseñado.

### **5.2.1. Husillo, Camisa, Caja Reductora y Motor**

Como se observa en la Figura 5.31, se presenta el ensamble general en 3D de las piezas proporcionadas por la empresa, mientras que en la Figura 5.32 se muestra la implementación real del ensamble con los componentes ensamblados en la extrusora.

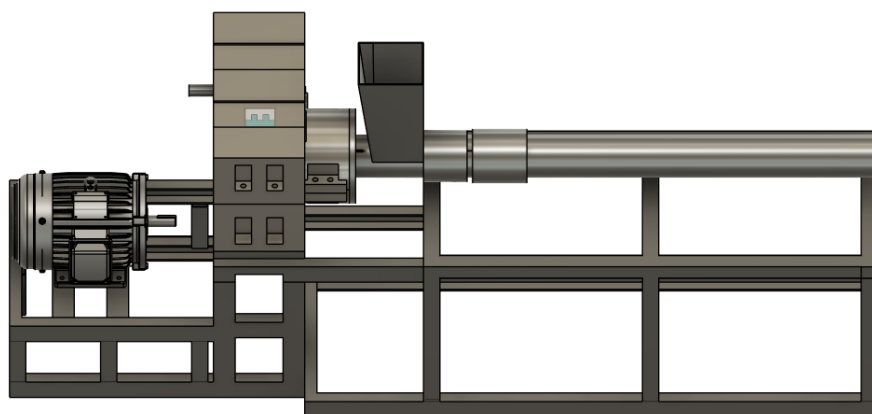


Figura 5.31 Acople de camisa, caja reductora, motor y husillo a la estructura



Figura 5.32 Correcta alineación del husillo y la camisa

### Resultados Obtenidos

El correcto acople de cada componente confirma que los materiales seleccionados y los procesos de fabricación empleados cumplieron con los estándares requeridos.

La extrusora ensamblada mantiene la alineación precisa entre el husillo y la camisa, lo que reduce el desgaste y optimiza el flujo del material.

El husillo y la camisa proporcionados por la empresa cumplieron con los requerimientos dimensionales y de funcionamiento del sistema. Se realizaron ajustes menores en la instalación para garantizar un correcto acople, permitiendo una extrusión eficiente y estable.

La imagen muestra un análisis de los esfuerzos de von Mises aplicados al sistema de extrusión, modelado en un software de simulación de elementos finitos (FEA). Se evaluó la distribución de esfuerzos en la estructura bajo condiciones de carga operacional, incluyendo la acción del material dentro de la tolva, la transmisión de potencia del tornillo y las restricciones mecánicas en los soportes.

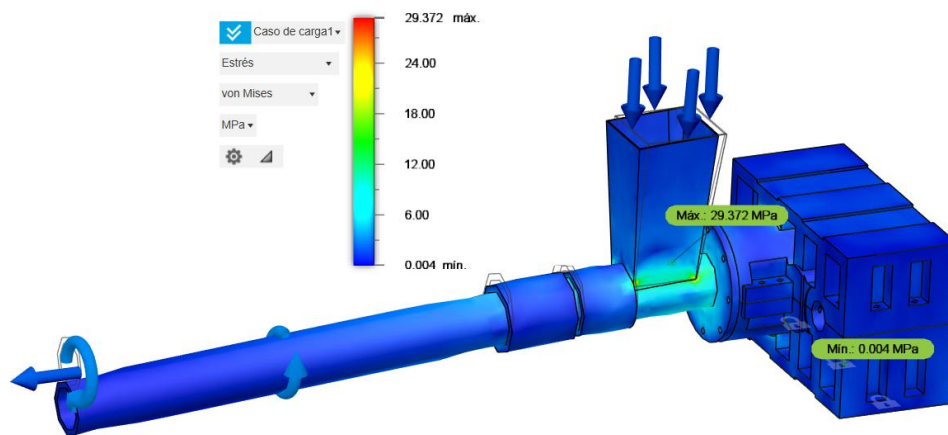


Figura 5.33 Esfuerzos cortantes en la extrusora

Resultados obtenidos:

- Esfuerzo máximo registrado: 29.372 MPa, ubicado en la zona de conexión entre la tolva y el cilindro extrusor. Esta zona está sujeta a cargas de compresión y esfuerzos de corte debido al peso del material y la presión generada en el proceso de extrusión.
- Esfuerzo mínimo registrado: 0,004 MPa, presente en la base de la caja reductora, donde los esfuerzos son insignificantes debido a la buena distribución de carga y al apriete mecánico.

La Figura 5.34 muestra un análisis del factor de seguridad aplicado al extrusor utilizando un software de simulación de elementos finitos (FEA). Este estudio es esencial para determinar la capacidad del diseño estructural para soportar las cargas aplicadas sin riesgo de falla mecánica.

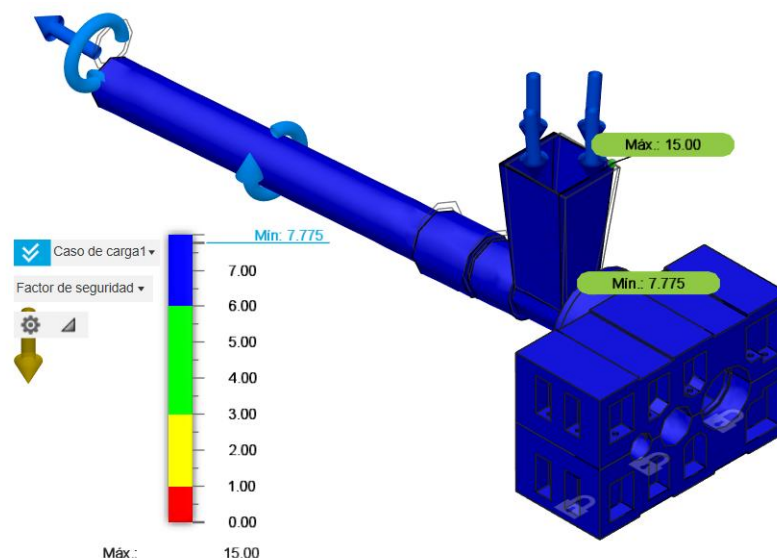


Figura 5.34 Factor de seguridad en la extrusora.

El análisis del factor de seguridad demuestra que la extrusora tiene un margen estructural muy alto, con valores que oscilan entre **7.775** y **15**, lo que indica una resistencia muy superior a las cargas operativas. Esto asegura que el diseño es estable, confiable y puede operar sin riesgo de falla mecánica bajo condiciones normales de trabajo.

### 5.2.2. Validación del factor de seguridad en la extrusora

Los resultados obtenidos en la simulación estructural indican un factor de seguridad mínimo de **7,775**, que se encuentra dentro del rango recomendado por Robert L. Mott para cargas repetitivas en materiales dúctiles ( $\approx 8$ ).

El valor máximo registrado de **15** sugiere que algunas zonas presentan sobrecapacidad estructural, lo que proporciona un margen de seguridad adicional. Esto confirma que el diseño cumple con los criterios establecidos y que la extrusora puede operar con seguridad bajo las condiciones de carga establecidas.

Ver anexo VI.

### 5.3. EVALUACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Se confirmó que es resistente, estable y correctamente alineada, soportando las cargas operativas sin deformaciones ni vibraciones excesivas.

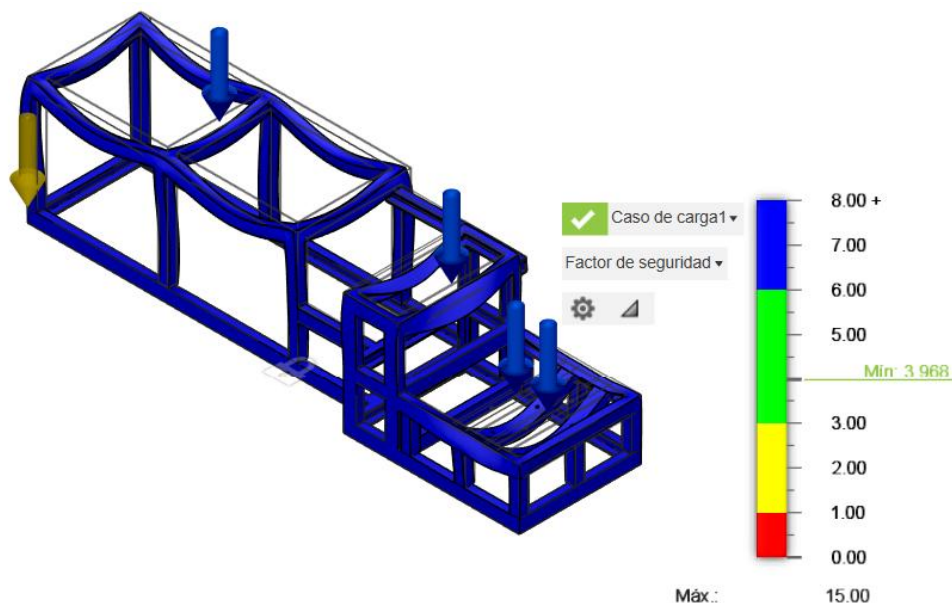


Figura 5.35 Factor de seguridad del diseño de la estructura.

Como se puede observar en la figura 5.35 el factor de seguridad mínimo es de 3.968, esto quiere decir que la estructura es apta para el ensamble de los componentes

Un factor de seguridad mínimo de 3.968 indica que la estructura puede soportar casi cuatro veces la carga máxima de trabajo antes de alcanzar su límite de falla, lo que garantiza un margen de seguridad óptimo.



Figura 5.36 Estructura del prototipo

Para validar la resistencia estructural de la extrusora, se realizó el cálculo de la fuerza total aplicada sobre la estructura, considerando el peso de todos los componentes montados. Se utilizó la ecuación 1. Ver anexo VII.

El cálculo de la fuerza aplicada a la estructura permitió verificar que la carga total soportada es de 10,594.8 N, confirmando que la estructura está diseñada para resistir las exigencias operativas de la extrusora. El análisis de seguridad determinó un factor de 3.968, asegurando que la estructura tiene un margen óptimo de resistencia y estabilidad.

### 5.3.1. Validación del Factor de Seguridad

El análisis del factor de seguridad basado en los criterios de diseño de Robert L. Mott confirma que la estructura de la extrusora es segura bajo condiciones de carga estática. El valor mínimo obtenido de **3.968** supera el umbral recomendado de **3**, garantizando que la estructura puede soportar la carga aplicada sin riesgo de falla. Además, la presencia de valores altos de seguridad

en algunas áreas sugiere que podrían optimizarse ciertos elementos para mejorar la eficiencia del diseño sin comprometer la resistencia estructural.

#### **5.4. RESULTADOS DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN**

El sistema de calefacción cumplió con la potencia requerida ya que el calor necesario en la zona de alimentación y compresión es de 8.86 kW y los sopletes entregan una potencia de 4.5 kW cada uno, donde en esta sección es suficiente dos sopletes que trabajaron a  $\frac{3}{4}$  de su capacidad total.

El control de temperatura es manual mediante la visualización de la temperatura en el indicador de temperatura de la caja de control como se observa en la figura 5.37. Se lo realiza de esta manera ya que puede tener un rango de  $\pm 30$  °C.



Figura 5.37 Indicador de temperatura.

Los cálculos se obtuvieron de la ecuación 4 que se encuentra en el anexo VII.



Figura 5.37 Sistema de calefacción

Como se puede observar en la figura 5.37 se ubicaron 5 sopletes, contando de derecha a izquierda, los dos primeros son los encargados de fundir el material ya que se encuentran en la zona de alimentación y compresión, los tres restantes son simplemente para conservar el calor a lo largo de la camisa y husillo.

Para la salida de gases emitido por los 5 sopletes se dimensionó 3 salidas con las siguientes dimensiones:

Tabla 5.12 Dimensiones de las salidas de gases

Variable	Dimensión (cm)
Ancho	15
Largo	14
Altura	4

Dando un volumen de salida de  $2520 \text{ cm}^3$ , volumen que se distribuirá en 3 salidas de gases de manera proporcional.

### 5.5. RESULTADOS DE LA TOLVA DE ALIMENTACIÓN

El diseño de la tolva permitió una alimentación uniforme ya que sus dimensiones permiten el ingreso adecuado de material. Sus dimensiones las podemos conocer visualizando la tabla 5.12

Tabla 5.12 Dimensiones de la tolva

Partes de la tolva	Dimensiones
Ancho de la base	219.37 mm
Largo de la base	240 mm
Altura de la tolva	443.73 mm
Volumen total	$0.0234 \text{ m}^3$



Figura 5.38 Tolva de la extrusora

Como se puede apreciar en la figura 5.38 la tolva cuenta con el volumen necesario para abastecer a la extrusora.

### 5.6. EVALUACIÓN DE LAS POLEAS Y CORREA DE TRANSMISIÓN

Mediante el dimensionamiento de las poleas se pudo determinar la velocidad necesaria para el husillo. Realizamos dos pruebas con 4 poleas diferentes para obtener la velocidad requerida.

Tabla 5.13 Pruebas de poleas

Número de pruebas	Diámetro de polea motriz	Diámetro de polea del motor	Velocidad del husillo
1	8.5 (in)	7 (in)	73 rpm
2	8 (in)	6 (in)	66 rpm

De acuerdo a nuestro análisis de la velocidad del husillo tiene un rango de 65 a 75 rpm para trabajar con plástico LDPE, entonces en las dos pruebas mostradas en la tabla 5.13 las dos cumplen con la velocidad, sin embargo, por sugerencia del propietario de la empresa se optó la segunda prueba ya que nos manifestó que de esta manera se conservaría mucho más la vida útil de la caja reductora.



Figura 5.39 Poleas de la segunda prueba

Como mencionamos anteriormente se seleccionó las poleas de la segunda prueba como se observa en la figura 5.39.

## 5.7. EVALUACIÓN DE LA BOQUILLA DE EXTRUSIÓN

El acople roscado de la boquilla a la extrusora funcionó perfectamente ya que en las pruebas realizadas no se presentaron fugas de material por los laterales de la boquilla, dando un excelente sello entre la boquilla y la camisa de la extrusora.

### 5.7.1. Esfuerzos

La imagen 5.40 muestra un análisis de **esfuerzo de Von Mises** en una pieza mecánica sometida a cargas externas. Se observa un mapa de esfuerzos con una escala de colores que representa la distribución de tensiones en la estructura.

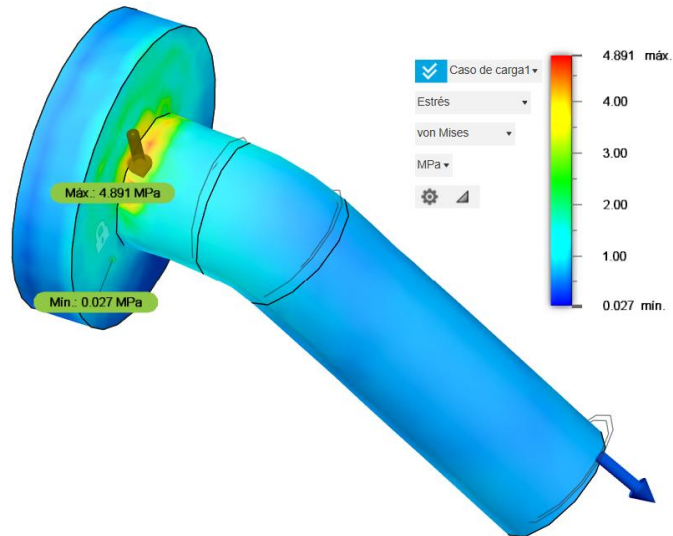


Figura 5.40 Esfuerzos obtenidos

Resultados obtenidos

- **Esfuerzo máximo: 4.891 MPa**, localizado en la zona de unión con la brida, donde la geometría presenta un cambio brusco y es propensa a concentraciones de tensión.
- **Esfuerzo mínimo: 0.027 MPa**, en la zona más alejada de la carga aplicada, donde prácticamente no hay esfuerzos significativos.

### 5.7.2. Deformación

La imagen 5.41 muestra un análisis de **deformación equivalente** en la misma pieza mecánica evaluada anteriormente. La escala de colores representa la magnitud de la deformación en diferentes zonas de la estructura.

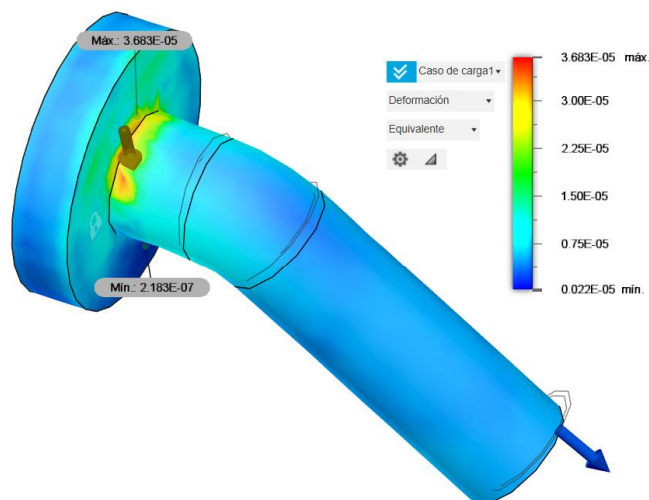


Figura 5.41 Posible deformación

- Deformación máxima:  $3.683E-05$  ( $\approx 0.00003683$  m o  $36.83$   $\mu\text{m}$ ), localizada en la zona de fijación de la brida.
- Deformación mínima:  $2.183E-07$  ( $\approx 0.0000002183$  m o  $0.2183$   $\mu\text{m}$ ), en las zonas con menor carga aplicada.

### 5.7.3. Factor de seguridad

Una vez obtenidos los resultados del análisis de la boquilla, se verifica en el software el **factor de seguridad** para evaluar si el diseño y la fabricación garantizan la resistencia adecuada ante las cargas aplicadas. Este análisis, mostrado en la **Figura 5.42**, permite confirmar que la pieza cumple con los requisitos estructurales y operativos, asegurando su óptimo desempeño en la extrusora.

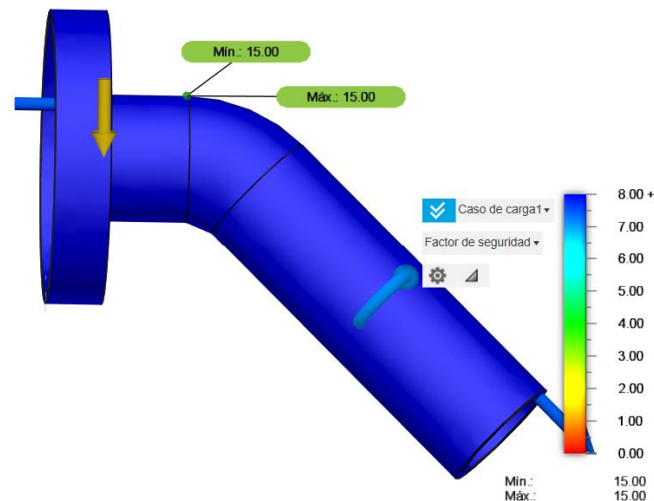


Figura 5.42 Análisis del factor de seguridad

**Un FS óptimo para esta aplicación debería estar entre 3 y 5**, garantizando seguridad y eficiencia en la fabricación.

El diámetro interno de 75 mm de la boquilla permitió una extrusión uniforme del material, asegurando un flujo constante y sin irregularidades en el producto final, como se observa en la Figura 5.38. Esta característica es fundamental para garantizar la calidad y estabilidad del material extruido, optimizando el rendimiento del proceso.



Figura 5.43 Salida del material extrusado

## 5.8. EVALUACIÓN DE LA SELECCIÓN DEL CABLE

Seleccionar el calibre del cable según la capacidad de corriente soportada, considerando:

- Aislamiento del cable (THHN/XHHW-2).
- Distancia de instalación para evitar caídas de tensión superiores al 3%.

Según NEC e IEC, los calibres recomendados son, ver anexo V:

- Para 108.7 A (220V): 2/0 AWG (70 mm<sup>2</sup>)
- Para 63 A (380V): 4 AWG (25 mm<sup>2</sup>)

## 5.9. PRUEBAS EXPERIMENTALES DEL PROTOTIPO



Figura 5.44 Análisis funcional de la extrusora para plástico reciclado

En base a nuestras variables realizamos las siguientes pruebas

Tabla 5.14 Pruebas experimentales con 10kg

Pruebas	Masa de material húmedo (kg)	% de humedad	Temperatura interna (°C)	Temperatura externa (°C) Rango ± 20° C	Tiempo de entrada vs salida (seg)	Masa de Material extruido (kg)	Pérdidas (kg)
1	10	10.2	120	430	188	5.71	4.29
2	10	10.2	120	430	123	8.25	1.75
3	10	0.3	110	410	118	9.24	0.76
4	10	0.1	110	410	115	9.26	0.74

Como se muestra en la tabla 5.14 la primera prueba tiene casi un 43% de pérdida, ya que se realizó con la extrusora vacía, al comparar con la segunda prueba en las mismas condiciones tenemos ya solo un 17.5 % de pérdidas las cuales son pérdidas internas y pérdidas por humedad. En la tercera y cuarta prueba solo tenemos pérdidas internas ya que se realizaron con plástico casi 100% seco.

Para una mejor comprensión de las pruebas se detalla en la figura 5.45.

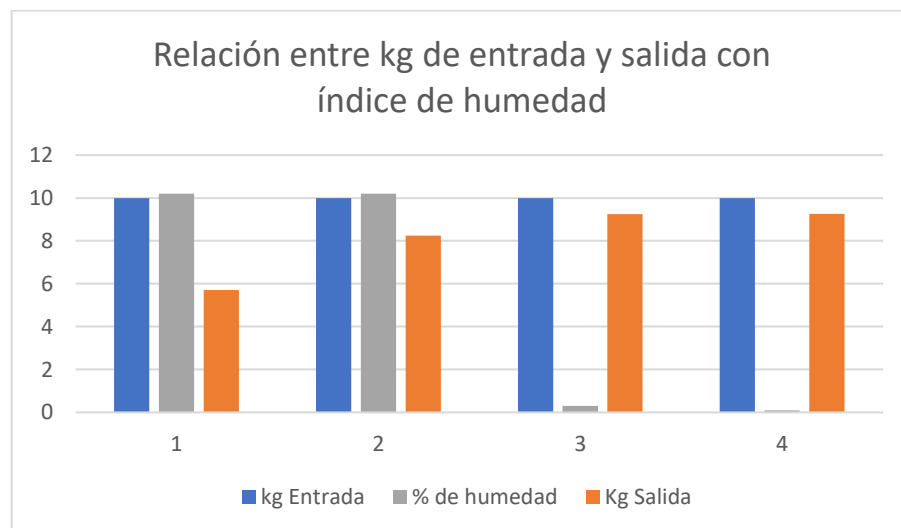


Figura 5.45 Relación entre kg de entrada (10 kg) y salida con índice de humedad

Tabla 5.15 Pruebas experimentales con 100 kg

Pruebas	Masa de material	% de humedad	Temperatura interna (°C)	Temperatura externa (°C) Rango ± 20° C	Tiempo de extrusión (min)	Masa de Material	Pérdidas (kg)
1	100	10.2	120	430	188	5.71	4.29
2	100	10.2	120	430	123	8.25	1.75
3	100	0.3	110	410	118	9.24	0.76
4	100	0.1	110	410	115	9.26	0.74

	húmedo (kg)					extruido (kg)	
5	100	10.2	120	450	63	89.07	10.93
6	100	7.5	120	440	65	91.77	8.23
7	100	0.1	110	420	70	99.17	0.83
8	100	0.1	110	420	71	99.37	0.63

Mediante el análisis de la tabla 5.15 podemos deducir que el prototipo produce alrededor de 85 kg/h en cualquier condición.

Para una mejor comprensión de las pruebas se detalla en la figura 5.41.

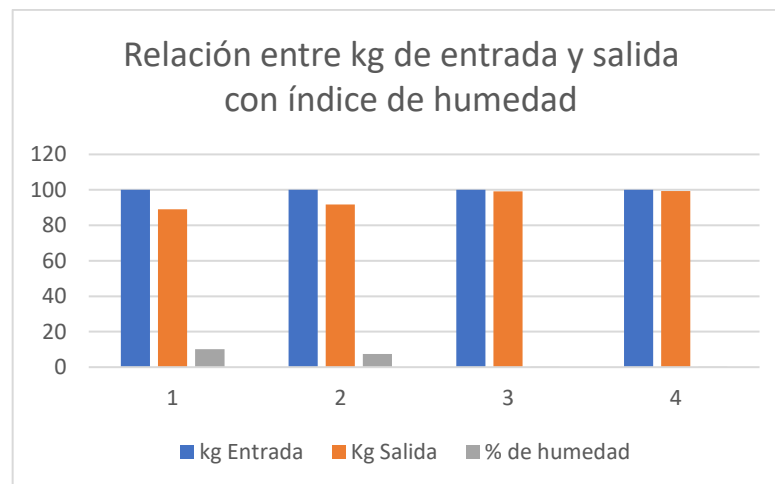


Figura 5.46 Relación entre kg de entrada (100 kg) y salida con índice de humedad

## 5.10. EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN

En la actualidad, la empresa RECIPLAS opera con una extrusora que tiene una capacidad de procesamiento de **80 kg/h** de plástico reciclado. La implementación de la nueva extrusora ha permitido alcanzar una capacidad de **85 kg/h**, representando un incremento del **6,25%** en comparación con la extrusora existente.

El objetivo del proyecto es lograr que ambas extrusoras trabajen de manera conjunta, permitiendo **duplicar la capacidad de producción de la empresa**. Con los valores obtenidos en las pruebas operativas, se estima que la producción combinada alcanzará entre **165 y 170 kg/h**, cumpliendo con las necesidades de optimización del proceso.

Tabla 5.16 Comparación entre la Extrusora en Funcionamiento y la Nueva Extrusora

Parámetro	Extrusora existente	Nueva extrusora	Aumento de producción
Producción (kg/h)	80	85	106.25 %
Consumo de GLP (cilindros)	6	5	Reducción del 16.7 %
Distribución de temperatura	Irregular	Homogénea	Mayor estabilidad

## 5.1. COMPARATIVA DEL DISEÑO Y SELECCIÓN DE MATERIAL PARA LA EXTRUSORA

Los análisis estructurales realizados sobre la boquilla de la extrusora permitieron evaluar su resistencia mecánica bajo las condiciones de operación. Inicialmente, el factor de seguridad obtenido en la simulación fue de **15**, lo que indicaba que la estructura estaba sobredimensionada en relación con las cargas aplicadas. Posteriormente, tras realizar ajustes en el diseño y las condiciones de análisis, se logró reducir el factor de seguridad mínimo a **8.965**, como se muestra en la figura 5.49.

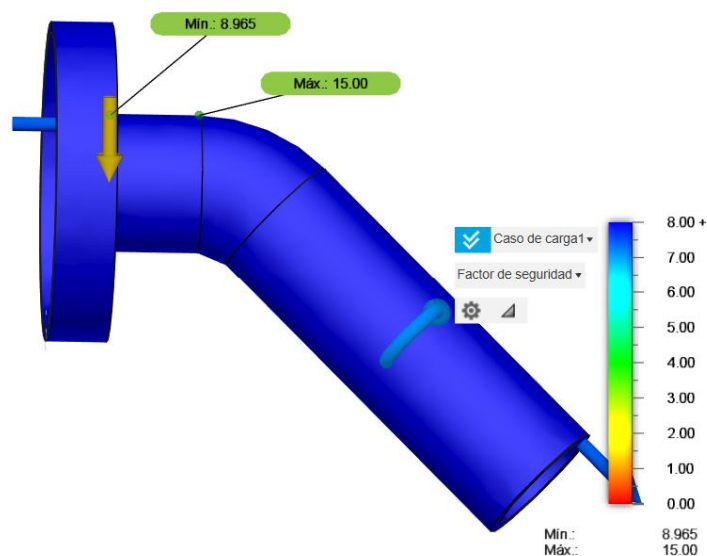


Figura 5.47 Factor de seguridad optimizado

### 5.1.1. Comparación del factor de seguridad

La siguiente tabla muestra la diferencia en los factores de seguridad obtenidos en ambas simulaciones:

Tabla 5.17 Diferencia en los factores de seguridad

Simulación	Factor de seguridad Mínimo	Factor de Seguridad Máximo
1	15	15
2	8.965	15

Este resultado confirma que, aunque el material sigue ofreciendo una resistencia superior a las cargas aplicadas, **aún existe margen de optimización** para reducir costos sin comprometer la seguridad estructural de la extrusora.

Dado que el diseño original del extrusor utiliza acero austenítico AISI 1080 421, se evaluó la posibilidad de reemplazarlo por un material menos costoso y que mantenga una adecuada resistencia mecánica. La siguiente tabla muestra la comparación entre AISI 1080 421 y ASTM A36, una alternativa más económica:

Tabla 5.18 Comparación de materiales

Propiedad	AISI 1080 421	ASTM A36
Resistencia a la tracción (MPa)	550	400 – 550
Temperatura máxima de trabajo (°C)	870	600
Dureza Brinell (HB)	200 – 250	133 – 180
Resistencia a la corrosión	Alta	Media
Costo estimado (USD/tonelada)	\$600 - \$800	\$450 - \$800

Los datos indican que **el ASTM A36 es una alternativa viable para reducir costos**, ya que su resistencia mecánica es suficiente para las condiciones operativas de la extrusora. Su costo puede ser hasta **30% menor**, lo que representa un ahorro significativo en la fabricación sin comprometer la integridad estructural.

## 5.2. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO

Para la construcción de la extrusora de plástico húmedo se analizaron los costos de materiales y componentes necesarios, así como la inversión en mano de obra y procesos de fabricación.

La evaluación de costos se basa en referencias de mercado actualizadas y cotizaciones de proveedores especializados en materiales y sistemas de control eléctrico y mecánico.

A continuación, se detallan los costos asociados a la fabricación de la extrusora, abarcando tanto materiales estructurales como componentes eléctricos y costos de ensamblaje. Se incluyen también costos directos e indirectos relacionados con el proceso de fabricación y montaje del sistema.

### 5.2.1. Costos directos de fabricación

Se determina el costo del proyecto en función de los valores de mercado de los materiales utilizados en la construcción de la extrusora. Para ello, se han considerado los siguientes rubros:

- **Materiales estructurales:** Incluyen aceros, soportes, y demás elementos para la estructura de la extrusora.
- **Componentes eléctricos y de control:** Sección destinada a la adquisición de elementos eléctricos necesarios para la operación del sistema.
- **Costos de fabricación y ensamblaje:** Se incluyen gastos asociados a los procesos de corte, soldadura, montaje y ajuste de los componentes.
- **Mano de obra técnica:** Consideración de costos por el trabajo realizado en la fabricación y ensamblaje de la extrusora.

A continuación, se presenta la tabla detallada con los costos de fabricación.

Tabla 5.19 Costos varios

CANTIDAD	ELEMENTOS	PRECIO UNIT.	COSTO
1	Husillo	1500.00	1500.00
1	Camisa	1500.00	1500.00
1	Caja reductora	2300.00	2500.00
1	Motor	1500.00	1500.00
2	Poleas	100.00	200.00
1	Boquilla	250.00	250.00
5	Sopletes	10.00	50.00

1	Recubrimiento térmico	200.00	200.00
1	Estructura	200.00	200.00
1	Procesos mecanizados	300.00	300.00
1	Sistema eléctrico	1514.09	1514.09
	Gastos Varios	200.00	200.00
2	Mano de obra	150.00	300.00
<b>TOTAL</b>			<b>10014.09</b>
<b>TOTAL, SIN PIEZAS PROPORCIONADAS</b>			<b>3014.09</b>

El **costo total de la extrusora** asciende a **\$10,014.09**, considerando todos los componentes y recursos incluidos. Excluyendo los elementos proporcionados, el **costo neto de consumo** es de **\$3,014.09**. Estos valores se presentan en la tabla junto con su respectiva **gráfica de costos** para una mejor visualización. En la figura 5.42 Se muestra el costo real de una extrusora para plástico:

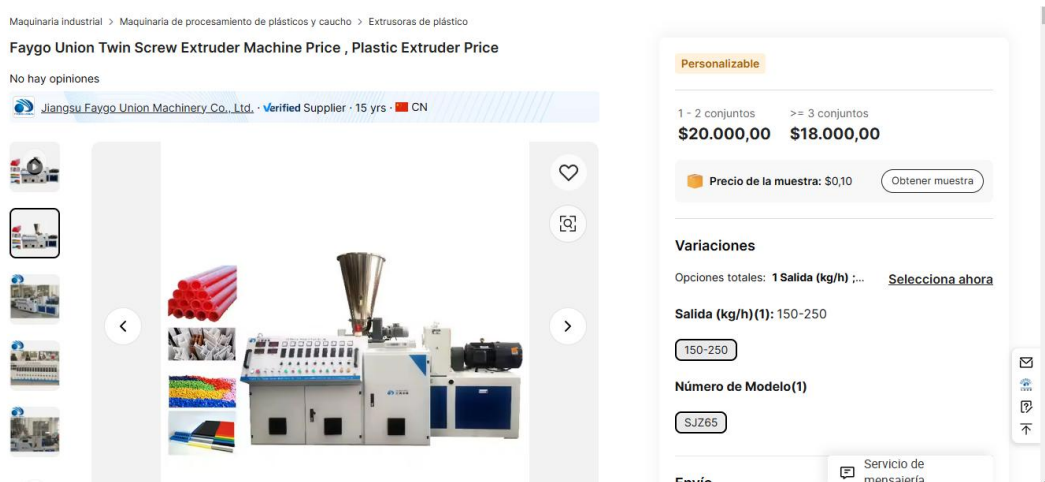


Figura 5.48 Referencia de Precio para Extrusor

Tabla 5.20 Comparación de costos de la extrusora

Valor extrusor		
De venta	Fabricado	Costo real de inversión
\$ 20000	\$ 10014,09	\$3014,09

El siguiente gráfico muestra la **comparación de costos** entre adquirir una extrusora comercial, fabricar una propia y la inversión real considerando solo los costos adicionales. Se evidencia que la fabricación representa un ahorro significativo en comparación con la compra de una extrusora en el mercado.

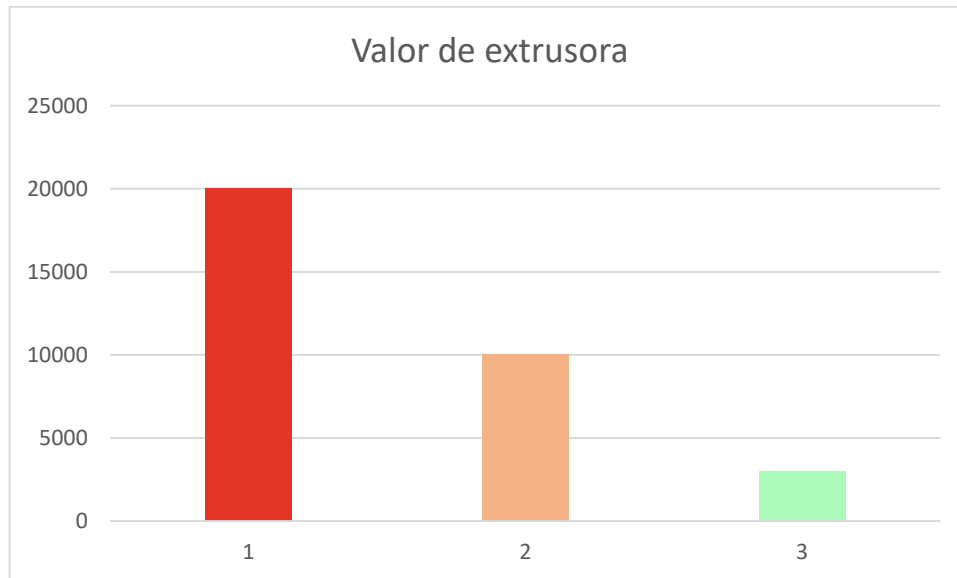


Figura 5.49 Comparación de Costos de la Extrusora

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. CONCLUSIONES

- Los análisis de datos de material de la empresa indican que cuenta con 60 toneladas mensuales de materia prima de las cuales el 50% es material que no necesita ser sometido al proceso de lavado, material que será utilizado en la extrusora implementada.
- Mediante la simulación del diseño en 3D, en el prototipo se obtuvo un factor de seguridad entre 7.78 y 8.97, lo que indica que la estructura se encuentra dentro del margen adecuado de 7 a 9. Sin embargo, en la boquilla, el factor de seguridad es de 15 muestra un sobredimensionamiento para el trabajo que va a soportar.
- En la primera prueba de extrusión, se registró una pérdida del 42.9 % del material húmedo introducido en el proceso, ya que se alimentaron 10 kg de material y la salida fue de 5.71 kg de material extruido. Esta pérdida inicial se debió a que el husillo y la camisa estaban completamente vacíos, lo que afectó la estabilidad del flujo en la primera fase del proceso. En contraste, en las pruebas posteriores, las pérdidas se redujeron significativamente a solo 10.93% (incluyendo pérdidas del 10.2 % por humedad), una

vez que el sistema alcanzó su condición estable de operación y el flujo del material se normalizó dentro de la extrusora. En cuanto a la temperatura del proceso, esta se mantuvo dentro de un rango de 420 a 450°C, asegurando una fusión adecuada del material y evitando degradaciones térmicas que pudieran afectar la calidad del producto extruido.

## 6.2. RECOMENDACIONES

- Es muy importante tener en cuenta el índice de humedad, a pesar que este índice está controlado por los procesos de lavado debemos constantemente verificar que tengamos el índice adecuado, pues el proceso de extrusión podría verse afectado en cuanto a temperatura con el consumo de GLP.
- Se recomienda que, durante la operación, el sistema de alimentación del material en la tolva se realice de manera constante y sin interrupciones para evitar cambios bruscos en la presión y temperatura de extrusión. Esto contribuirá a mantener la homogeneidad en la producción de pellets reciclados.
- Para futuras mejoras en el diseño de la extrusora, se sugiere evaluar la implementación de un sistema automatizado de control de temperatura para optimizar la fusión del LDPE. Esto permitiría reducir la variabilidad en la calidad del material extruido y mejorar la eficiencia energética del sistema.
- Para la fabricación de la boquilla de extrusión se recomienda utilizar el acero AISI A36 para el proceso, ya que el material que nos aporta para la máquina está sobredimensionado en cuanto a resistencia, lo que inevitablemente aumentará los costes de inversión. Elegir un acero con propiedades mecánicas y térmicas suficientes para la aplicación que permita reducir los costes sin comprometer la eficiencia ni la durabilidad del componente.

## 7. REFERENCIAS

- [1] J. Hopewell, R. Dvorak, y E. Kosior, «Plastics recycling: challenges and opportunities», *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.*, jul. 2009, doi: 10.1098/rstb.2008.0311.
- [2] I. B. Noguera, «Proceso industrial de extrusión de plásticos», *Ingeniería Química Reviews*. Accedido: 30 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2023/05/proceso-industrial-de-extrusion-de-plastico.html>
- [3] A. F. G. Saldarriaga, «REDISEÑO DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA DE PLÁSTICO», 2019.
- [4] C. Correa, B. Zambrano, y A. Rigail-Cedeño, «Reingeniería de una Extrusora de Tornillo Simple para el Desarrollo de Compuestos de Poliolefinas con Altas Concentraciones de Carbonato de Calcio», *Rev. Tecnológica - ESPOL*, vol. 20, n.º 1, Art. n.º 1, 2007, Accedido: 20 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://rte.espol.edu.ec>
- [5] «ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO».
- [6] C. E. P. Trujillo y B. S. A. Gutierrez, «REDISEÑO DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA PARA RECICLAJE DE PLÁSTICO PRODUCIDO EN LA FACULTAD TECNOLÓGICA DE LA UD».
- [7] R. Wang, P. V. Klaine, O. Onireti, Y. Sun, M. A. Imran, y L. Zhang, «Deep Learning Enabled Beam Tracking for Non-Line of Sight Millimeter Wave Communications», *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 2, pp. 1710-1720, 2021, doi: 10.1109/OJCOMS.2021.3096118.
- [8] A. Peacock, *Handbook of Polyethylene: Structures: Properties, and Applications*. CRC Press, 2000.
- [9] J. F. Barbosa Paredes, «Diseño de una máquina extrusora de plástico para los productores de manguera de Ocaña», ago. 2017, Accedido: 1 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorioinstitucional.ufpso.edu.co/xmlui/handle/20.500.14167/1149>

- [10] «Diversos métodos de alimentación y diseños de tolvas para extrusoras - Cowin Extrusion». Accedido: 1 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.cowinextrusion.com/es/diverse-feeding-methods-and-hopper-designs-for-extruders/>
- [11] «Tipos de diseño de los tornillos para la extrusión de plásticos | Bausano», Bausano & Figli. Accedido: 1 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.bausano.com/es/noticias-y-nota-de-prensa/tipos-de-dise%C3%B1o-de-los-tornillos-para-la-extrusi%C3%B3n-de-pl%C3%A1sticos>
- [12] «(PDF) Diseño de Máquina Extrusora Avanzada para Transformar el PET», *ResearchGate*, ene. 2025, doi: 10.37811/cl\_rcm.v9i1.15521.
- [13] «TEMA\_4\_extrusion.pdf». Accedido: 1 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA\\_4\\_extrusion.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf?utm_source=chatgpt.com)
- [14] «Desgasificación por vacío | Busch Global», Desgasificación por vacío | Busch Global. Accedido: 1 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.buschvacuum.com/global/es/applications/degassing/>
- [15] D. Tamayo y A. Felipe, «Desarrollo de un cabezal extrusor de material cerámico para la máquina pegasus lite del prodilab de la universidad Católica de Pereira», 2021, Accedido: 1 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucp.edu.co/entities/publication/0927a986-f6c0-4882-9fd9-a6af9df0be69>
- [16] M. Natividad Pérez-Camacho, R. Curry, y T. Cromie, «Life cycle environmental impacts of biogas production and utilisation substituting for grid electricity, natural gas grid and transport fuels», *Waste Manag.*, vol. 95, pp. 90-101, jul. 2019, doi: 10.1016/j.wasman.2019.05.045.
- [17] M. Gärtner, C. Brecher, S. Neus, H.-M. Eckel, A. Strachkov, y R. Klimaschka, «Stiffness increase in main spindles by using tapered roller bearings for aluminum cutting tests», *Prod. Eng.*, vol. 18, n.º 6, pp. 1023-1033, dic. 2024, doi: 10.1007/s11740-024-01291-1.
- [18] K. F. B. Villacreses y D. S. H. Castro, «Implementación de una Metodología con la Técnica 5S para Mejorar el Área de Matricería de una Empresa Extrusora de Aluminio», *Rev.*

*Tecnológica - ESPOL*, vol. 18, n.º 1, Art. n.º 1, 2005, Accedido: 1 de febrero de 2025. [En línea].  
Disponible en: <https://rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/view/226>

[19] M. Hyvärinen, R. Jabeen, y T. Kärki, «The Modelling of Extrusion Processes for Polymers—A Review», *Polymers*, vol. 12, n.º 6, Art. n.º 6, jun. 2020, doi: 10.3390/polym12061306.

[20] Robert Mott, *RESISTENCIA DE MATERIALES MOTT Op.* 1999. Accedido: 27 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://archive.org/details/RESISTENCIADEMATERIALESMOTTOp>

[21] «Chuquilin Zoto Amarante.pdf». Accedido: 1 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12802/9229/Chuquilin%20Zoto%20Amarante.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[22] O. A. Shingón Collahuazo y G. J. Uvillus Tipan, «Construcción de una máquina extrusora para plástico.», jul. 2019, Accedido: 30 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/5537>

[23] «content.pdf». Accedido: 24 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utc.edu.ec/server/api/core/bitstreams/3283c6a6-a301-49de-9d66-0b71b43ccbbd/content>

[24] «REVISTA-INTEGRA-EDICION-76-PDF-PARA-WEB\_compressed.pdf». Accedido: 30 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://aseplas.ec/wp-content/uploads/2024/09/REVISTA-INTEGRA-EDICION-76-PDF-PARA-WEB\\_compressed.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://aseplas.ec/wp-content/uploads/2024/09/REVISTA-INTEGRA-EDICION-76-PDF-PARA-WEB_compressed.pdf?utm_source=chatgpt.com)