



UNIVERSIDAD UTE

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA E
INDUSTRIAS
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**IMPLEMENTACIÓN DE UNA EXTRUSORA PARA
REPROCESADO DE MATERIAL PLÁSTICO**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

NOE DAVID GARZON NARANJO

DIRECTOR: ING. LUIS HIDALGO, MSc.

Quito, noviembre 2020

© Universidad UTE 2020.

Reservados todos los derechos de reproducción

FORMULARIO DE REGISTRO BIBLIOGRÁFICO

PROYECTO DE TITULACIÓN

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	172182593-1
APELLIDO Y NOMBRES:	GARZON NARANJO NOE DAVID
DIRECCIÓN:	PASAJE SAN JORGE S/N Y AVENIDA GENERAL RUMIÑAHUI
EMAIL:	ngarzon86252@hotmail.com
TELÉFONO FIJO:	02 2087 707
TELÉFONO MOVIL:	0984657505

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	IMPLEMENTACIÓN DE UNA EXTRUSORA PARA REPROCESADO DE MATERIAL PLÁSTICO
AUTOR O AUTORES:	NOE DAVID GARZON NARANJO
FECHA DE ENTREGA DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	13 de noviembre de 2020
DIRECTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	ING. LUIS HIDALGO, MSc.
PROGRAMA	PREGRADO <input checked="" type="checkbox"/> POSGRADO <input type="checkbox"/>
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO EN MECATRÓNICA
RESUMEN:	<p>Existe una gran cantidad de envases plásticos que se utiliza en el hogar a diario, desde fundas plásticas hasta portadores de diferentes líquidos consumibles o utilizables, ante esto es necesario concientizar sobre el uso de estos y las consecuencias negativas que trae al planeta el no clasificar y reciclar dichos recipientes, tanto niños como adultos, es también conocido que en las industrias ha aumentado el uso y fabricación de plásticos. La tecnología es un recurso indispensable para generar una solución parcial ante este problema siendo la misma una gran herramienta. A continuación, se detallará la</p>

implementación de una máquina extrusora para reciclar material plástico como polietileno de alta densidad (envases de suavizante o detergente líquido). Con fundamentos teóricos se realizó el diseño mecánico, además del modelo CAD que integra los componentes de la máquina extrusora. Al encender la máquina arranca el motor reductor de corriente alterna, el material ingresa en pequeñas cantidades en la tolva, que mediante el tornillo sinfín pasa el plástico y se funde con los calentadores de banda que poseen temperaturas entre 150 y 250 °C, las termocuplas miden el valor y se envía datos a los controladores de temperatura. Al final del tubo se puede colocar diferentes moldes para generar piezas de sección transversal cuadrada o circular. Las mismas que se pueden utilizar en la construcción de mesas para el hogar entre otros usos. Se utiliza la metodología de diseño mecatrónico basada en el modelo en V, el cual plantea requerimientos para el diseño, construcción y funcionamiento de la máquina. Después de realizar las pruebas, el resultado es que al retirar la pieza del molde se puede observar que tiene buena resistencia y dureza con un excelente terminado.

PALABRAS CLAVES:

envases plásticos, reciclar, máquina extrusora, calentadores de banda, metodología.

ABSTRACT:

There is a large number of plastic containers that are used in the home on a daily basis, from plastic covers to carriers of different consumable or usable liquids, before this it is necessary to raise awareness about the use of these and the negative consequences that not classifying and recycling these containers, both children and adults, is also known that in the industries the use and manufacture of plastics has increased. Technology is an indispensable resource to generate a partial solution to this problem, being itself a great tool. Next, the implementation of an extruder machine to recycle plastic material such as high-density polyethylene (softener or liquid detergent containers) will be detailed. With theoretical

KEYWORDS	<p>foundations, the mechanical design was carried out, in addition to the CAD model that integrates the components of the extrusion machine. When the machine is turned on, the alternating current reducer motor starts, the material enters the hopper in small quantities, which passes the plastic through the worm screw and melts with the band heaters that have temperatures between 150 and 250 °C, the thermocouples they measure the value and data is sent to the temperature controllers. At the end of the tube, different molds can be placed to generate pieces with a square or circular cross section. The same that can be used in the construction of tables for the home among others uses. The mechatronic design methodology based on the V model is used, which poses requirements for the design, construction and operation of the machine. After carrying out the test, the result is that when the part is removed from the mold it can be seen that it has good resistance and hardness with an excellent finish.</p>
	<p>plastic containers, recycle, extruder machine, band heaters, methodology.</p>

Se autoriza la publicación de este Proyecto de Titulación en el Repositorio Digital de la Institución.



GARZON NARANJO NOE DAVID

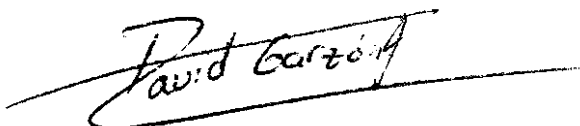
C.I. 172182593-1

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **NOE DAVID GARZON NARANJO**, CI 172182593-1 autor del proyecto titulado: **IMPLEMENTACIÓN DE UNA EXTRUSORA PARA REPROCESADO DE MATERIAL PLÁSTICO** previo a la obtención del título de **INGENIERO EN MECATRÓNICA** en la Universidad UTE.

1. Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las Instituciones de Educación Superior, de conformidad con el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.
2. Autorizo a la BIBLIOTECA de la Universidad UTE a tener una copia del referido trabajo de graduación con el propósito de generar un Repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Quito, 13 de noviembre de 2020

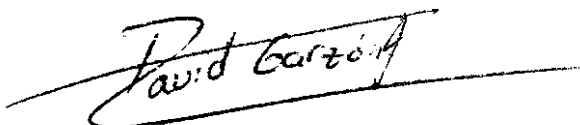


NOE DAVID GARZON NARANJO
C.I. 172182593-1

DECLARACIÓN

Yo, **NOE DAVID GARZON NARANJO**, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad UTE puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

A handwritten signature in black ink, reading "David Garzon", written over a horizontal line.

Noe David Garzon Naranjo

C.I. 172182593-1

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo que lleva por título "**IMPLEMENTACIÓN DE UNA EXTRUSORA PARA REPROCESADO DE MATERIAL PLÁSTICO**", que, para aspirar al título de **INGENIERO EN MECATRÓNICA** fue desarrollado por **NOE DAVID GARZON NARANJO**, bajo mi dirección y supervisión, en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería e Industrias; y cumple con las condiciones requeridas por el reglamento de Trabajos de Titulación artículos 19, 27 y 28.



Ing. Luis Hidalgo MSc.

DIRECTOR DEL TRABAJO

C.I. 170772143-5

DEDICATORIA

A Dios, por estar siempre en mi vida, ayudándome a cumplir todo lo que me propongo.

A mi madre Yolita, por su sacrificio y entrega cada día sin importar la hora, el clima, la situación, desde que estaba en su pancita hasta el día de hoy.

A mi hermano Fabricio, por su ayuda y apoyo incondicional desde pequeño, siendo un padre y aconsejándome para poder llegar a ser un gran profesional.

A mis hermanos Magali y Fernando, por estar ahí y enseñarme el camino, darme esa palabra de aliento para seguir.

A mis sobrinos Cristina, Juan, Omar, Mateo, Sarahí, Pol, Jarry y Grace, por llenarme de mucha felicidad.

A mi mejor amigo Ricardo, por esa mano amiga que extendiste y sigues extendiendo desde el colegio.

A mi enamorada Samantha, por su apoyo y preocupación para poder conseguir esta tesis.

A mi abuelita Isabel y mi hermana Marjorie, por ser mis ángeles que me cuidan desde el cielo.

AGRADECIMIENTOS

A mi hermano Fabricio, porque sin él esto no hubiera sido posible, gracias por ser como un padre para mí.

A mi madre Yolita, por todo su amor y siempre estar ahí acompañándome en cada día.

A mis hermanos Magali y Fernando, por todo su apoyo cuando lo he necesitado, en este camino largo y con muchos obstáculos.

A mi tutor Ingeniero Luis Hidalgo, por la ayuda, colaboración y experiencia brindada para culminar esta tesis.

A Don Carlitos, por permitirme utilizar su taller para realizar la máquina, fue de mucha ayuda.

A toda mi familia, por estar siempre preocupados y pendientes para terminar con este objetivo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	
2. METODOLOGÍA Y DISEÑO	
2.1 REQUERIMIENTOS	8
2.2 DISEÑO GENERAL DEL SISTEMA.....	9
2.3 DISEÑO ESPECÍFICO DEL SISTEMA	11
2.3.1 DISEÑO DEL HUSILLO.....	12
2.3.1.1 Flujo volumétrico del husillo.....	14
2.3.1.2 Potencia y torque.....	18
2.3.1.3 Material del husillo	19
2.3.1.4 Estudio del husillo.....	20
2.3.1.5 Dimensiones de la camisa	22
2.3.2 DISEÑO DE LA tolva	22
2.3.2.1 Estudio de la tolva	24
2.3.3 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA	26
2.3.3.1 Diseño de vigas	26
2.3.3.2 Estudio de la viga 1	28
2.3.3.3 Diseño de columnas	31
2.3.3.4 Estudio de la columna 3	32
2.3.4 DISEÑO ELECTRÓNICO	35
2.3.4.1 Etapa de control	35
2.3.4.2 Etapa de potencia.....	41
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
3.1 pruebas del proceso de extrusión	46
3.1.1 pruebas del sistema mEcÁnico.....	46
3.1.2 pruebas del sistema de control	46
3.1.3 Pruebas de extrusión	47
3.1.4 simulación de las barras	47
3.1.4.1 Estudio de la barra cuadrada.....	47
3.1.4.2 Estudio de la barra circular	49
3.2 resultados del proceso de extrusión.....	51
3.2.1 características del proceso en la extrusora.....	51
3.3 análisis de costos.....	52
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
Conclusiones.....	54
Recomendaciones	54
BIBLIOGRAFÍA	55
ANEXOS	57

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1. HDPE Pipe Extrusion Line	4
Figura 2. Extrusora de uno y doble husillo	4
Figura 3. Inyectora Toshiba EC720SX.....	5
Figura 4. Tipos de tolvas	6
Figura 5. Tornillo de una extrusora	6
Figura 6. Cabezal de la extrusora	7
Figura 7. Sistema de atemplado	7
Figura 8. Metodología	8
Figura 9. Diagrama de requerimientos Extrusora.....	9
Figura 10. Definición de elementos de la extrusora	9
Figura 11. Diagrama interno de bloques de la extrusora	10
Figura 12. Diagrama de Casos de Uso	10
Figura 13. Vista explosionada de la extrusora	11
Figura 14. Vista lateral del husillo simple	12
Figura 15. Intervalos de velocidad de cortadura	17
Figura 16. Información de modelo del husillo.....	20
Figura 17. Mallado del husillo.....	21
Figura 18. Factor de seguridad del husillo	22
Figura 19. Dimensiones de la tolva en mm	23
Figura 20. Información de modelo de la tolva	24
Figura 21. Mallado de la tolva	25
Figura 22. Factor de seguridad de la tolva	26
Figura 23. Diagrama de deflexión para viga estáticamente indeterminada.	27
Figura 24. Información de modelo de la viga	29
Figura 25. Mallado de la viga	30
Figura 26. Factor de seguridad de la viga	30
Figura 27. Información de modelo de la columna	33
Figura 28. Mallado de la columna	34
Figura 29. Factor de seguridad de la columna	35
Figura 30. Diagrama de control.....	36
Figura 31. Controlador de temperatura Camsco REX-C700	37
Figura 32. Diagrama del controlador de temperatura.....	37
Figura 33. Relé de estado sólido.....	38
Figura 34. Termocupla tipo J.....	39
Figura 35. Calentador de banda.....	39
Figura 36. Sensor capacitivo.....	40
Figura 37. Tablero de control	40
Figura 38. Conexión del motor trifásico.....	41
Figura 39. Breaker 3 polos	42
Figura 40. Contactor 3 polos	42

Figura 41. Motor reductor.....	43
Figura 42. Máquina extrusora	45
Figura 43. Información de modelo de la barra cuadrada.....	47
Figura 44. Mallado de la barra cuadrada	48
Figura 45. Factor de seguridad de la barra cuadrada	49
Figura 46. Información de modelo de la barra circular	49
Figura 47. Mallado de la barra circular.....	50
Figura 48. Factor de seguridad de la barra circular.....	51
Figura 49. Barras de plástico	51
Figura 50. Mesa de plástico	52
Figura 51. Palo de escoba plástico	52

ÍNDICE DE TABLAS

	PÁGINA
Tabla 1 Componentes de la extrusora.....	11
Tabla 2 Parámetros geométricos de los husillos	12
Tabla 3 Parámetros geométricos con otros diámetros	12
Tabla 4 Guía para el diseño de un husillo	14
Tabla 5 Materiales para husillos.....	19
Tabla 6 Propiedades volumétricas del husillo	20
Tabla 7 Propiedades del material del husillo	21
Tabla 8 Información de malla del husillo	21
Tabla 9 Fuerzas resultantes del husillo	22
Tabla 10 Propiedades volumétricas de la tolva	24
Tabla 11 Propiedades del material de la tolva.....	25
Tabla 12 Información de malla de la tolva	25
Tabla 13 Fuerzas resultantes de la tolva.....	25
Tabla 14 Propiedades volumétricas de la viga	29
Tabla 15 Propiedades del material de la viga.....	29
Tabla 16 Información de malla de la viga	29
Tabla 17 Fuerzas resultantes de la viga.....	30
Tabla 18 Propiedades volumétricas de la columna	33
Tabla 19 Propiedades del material de la columna.....	33
Tabla 20 Información de malla de la columna	34
Tabla 21 Fuerzas resultantes de la columna.....	34
Tabla 22 Características de la termocupla tipo J.....	38
Tabla 23 Especificaciones del motor reductor	42
Tabla 24 Especificaciones de la extrusora	45
Tabla 25 Pruebas del sistema mecánico.....	46
Tabla 26 Pruebas del sistema de control	46
Tabla 27 Pruebas de extrusión.....	47
Tabla 28 Propiedades volumétricas de la barra cuadrada	48
Tabla 29 Propiedades del material de la barra cuadrada	48
Tabla 30 Información de malla de la barra cuadrada	48
Tabla 31 Fuerzas resultantes de la barra cuadrada	49
Tabla 32 Propiedades volumétricas de la barra circular	50
Tabla 33 Propiedades del material de la barra circular	50
Tabla 34 Información de malla de la barra circular.....	50
Tabla 35 Fuerzas resultantes de la barra circular.....	51
Tabla 36 Costos de elementos de la extrusora	53
Tabla 37 Costos para la construcción de la extrusora.....	53
Tabla 38 Costo total de la extrusora.....	53

RESUMEN

Existe una gran cantidad de envases plásticos que se utiliza en el hogar a diario, desde fundas plásticas hasta portadores de diferentes líquidos consumibles o utilizables, ante esto es necesario concientizar sobre el uso de estos y las consecuencias negativas que trae al planeta el no clasificar y reciclar dichos recipientes, tanto niños como adultos, es también conocido que en las industrias ha aumentado el uso y fabricación de plásticos. La tecnología es un recurso indispensable para generar una solución parcial ante este problema siendo la misma una gran herramienta. A continuación, se detallará la implementación de una máquina extrusora para reciclar material plástico como polietileno de alta densidad (envases de suavizante o detergente líquido). Con fundamentos teóricos se realizó el diseño mecánico, además del modelo CAD que integra los componentes de la máquina extrusora. Al encender la máquina arranca el motor reductor de corriente alterna, el material ingresa en pequeñas cantidades en la tolva, que mediante el tornillo sinfín pasa el plástico y se funde con los calentadores de banda que poseen temperaturas entre 150 y 250 °C, las termocuplas miden el valor y se envía datos a los controladores de temperatura. Al final del tubo se puede colocar diferentes moldes para generar piezas de sección transversal cuadrada o circular. Las mismas que se pueden utilizar en la construcción de mesas para el hogar entre otros usos. Se utiliza la metodología de diseño mecatrónico basada en el modelo en V, el cual plantea requerimientos para el diseño, construcción y funcionamiento de la máquina. Después de realizar las pruebas, el resultado es que al retirar la pieza del molde se puede observar que tiene buena resistencia y dureza con un excelente terminado.

Palabras claves: envases plásticos, reciclar, máquina extrusora, calentadores de banda, metodología.

ABSTRACT

There is a large number of plastic containers that are used in the home on a daily basis, from plastic covers to carriers of different consumable or usable liquids, before this it is necessary to raise awareness about the use of these and the negative consequences that not classifying and recycling these containers, both children and adults, is also known that in the industries the use and manufacture of plastics has increased. Technology is an indispensable resource to generate a partial solution to this problem, being itself a great tool. Next, the implementation of an extruder machine to recycle plastic material such as high-density polyethylene (softener or liquid detergent containers) will be detailed. With theoretical foundations, the mechanical design was carried out, in addition to the CAD model that integrates the components of the extrusion machine. When the machine is turned on, the alternating current reducer motor starts, the material enters the hopper in small quantities, which passes the plastic through the worm screw and melts with the band heaters that have temperatures between 150 and 250 °C, the thermocouples they measure the value and data is sent to the temperature controllers. At the end of the tube, different molds can be placed to generate pieces with a square or circular cross section. The same that can be used in the construction of tables for the home among other uses. The mechatronic design methodology based on the V model is used, which poses requirements for the design, construction and operation of the machine. After carrying out the tests, the result is that when the part is removed from the mold it can be seen that it has good resistance and hardness with an excellent finish.

Keywords: plastic containers, recycle, extruder machine, band heaters, methodology.

1. INTRODUCCIÓN

Con procesos de manufactura se obtiene nuevos productos que han pasado por etapas de diseño tradicional, las cuales consisten en la concepción de ideas que parten de una necesidad hasta convertirlo en un diseño de ingeniería. Los productos elaborados por las industrias son medidos en base a parámetros como calidad, precio, tiempo de entrega, flexibilidad e innovación, que permitirán saber el nivel de producto entregado a los clientes.

Desde la aparición de los polímeros, son múltiples las aplicaciones y las facilidades para transformarlo que lo han hecho atractivo para ser utilizados en campos donde antes solo se usaba metales, maderas o cerámicos.

Las líneas de desarrollo, a nivel investigativo e industrial, están en desarrollo y utilización de nuevos materiales, especialmente en la línea de mezclas, polímeros degradables, polímeros conductores y materiales compuestos para altas exigencias que demanda el mercado (Flores Salazar, 2013).

La constante evolución e investigación sobre el PET permitió que en 1977 la industria genere nuevas alternativas de aplicación, con lo que se comenzó la fabricación de envases con base en PET. Las empresas comenzaron a generar la necesidad de dichos envases para las personas por sus diferentes ventajas de producción, con los que se ha convertido en la actualidad en los envases más utilizados por los consumidores (Naranjo, 2015).

El plástico se usa en diferentes productos, la mayoría de ellos no se los recicla y van directo a la basura, los cuales generan gran contaminación en el mundo, por lo que es necesario implementar algunos procesos de reprocesado para poder generar nuevos productos como mesas, modulares o artículos que sirvan en el hogar.

Es difícil no encontrar objetos fabricados con material plástico, se han convertido en elementos de uso diario, también se encuentran en distintas aplicaciones y se los puede reemplazar en materiales como metal, madera, caucho.

Las máquinas extrusoras que se encuentran en el mercado son las siguientes:

Línea de extrusión de tubería de HDPE

Esta línea se utiliza para fabricar tubos de HDPE con un diámetro de 16 mm a 1200 mm. Tiene una estructura única, diseño novedoso y razonable, además el rendimiento es confiable. La línea de extrusión cuenta con: cargador de material, tornillo simple, molde de tubería, tanque de calibración de vacío, tanque de enfriamiento por pulverización (los dos tanques son de acero inoxidable 304), máquina de extracción de tres orugas, cortador sin polvo y un apilador. La máquina (Figura 1) tiene un sistema de control automático de la temperatura del agua, un medidor que obtiene la longitud de la tubería durante la producción (FAYGO UNION , 2019).



Figura 1. HDPE Pipe Extrusion Line
(FAYGO UNION , 2019)

Tipos de máquinas extrusoras de plástico

Por lo general se utilizan para extruir polímeros, consiste en un prensado y moldeado de plástico, dándole la forma deseada por medio de presión y empuje, utilizando un molde. Existen extrusoras de mono y doble husillo (Figura 2), estos son una especie de tornillo con un diámetro y longitud. La diferencia entre las extrusoras de doble husillo y las de uno es que cada uno de sus husillos está formado por elementos que se pueden unir, esto nos ayuda a mezclar o transportar diferentes elementos (GESTER, 2018).



Figura 2. Extrusora de uno y doble husillo
(GESTER, 2018)

Inyectora de plástico

En la Figura 3 se muestra la inyectora que es eléctrica, cuenta con un controlador que responde a la inyección de alta velocidad y una amplia gama de necesidades de moldeo, está preparado para especificaciones especiales, cuenta con un auto ajustable de fuera de cierre y condiciones de proceso de inyección, así se previene la inestabilidad de factores externos y promete un moldeo estable (PLASTECS USA, 2020).



Figura 3. Inyectora Toshiba EC720SX
(PLASTEC USA, 2020)

Tipos de extrusión

La extrusión es un proceso de conformado por compresión, en el cual, el material de la pieza fluye a través de la abertura de una matriz con la forma de su sección transversal (Morales Iles, 2018).

Existen distintas maneras de extruir, se mencionan las siguientes:

- **Extrusión directa:** es la extrusión hacia adelante, el problema que existe es la fricción entre la superficie y la pared del recipiente. Permite elaborar secciones huecas, como tubos o semi huecas.
- **Extrusión indirecta:** la matriz se encuentra sobre el punzón, al penetrar en el material de la pieza, se fuerce a pasar en dirección opuesta del punzón, esta extrusión produce secciones huecas.
- **Extrusión en frío:** depende mucho del material y la magnitud al que se somete en el proceso.
- **Extrusión en caliente:** en esta extrusión se reduce la resistencia y aumenta la ductilidad del metal, reduce la fuerza en el punzón, tiene mayor velocidad y mejora la fibra interna del producto final.
- **Proceso de extrusión continuo:** permite la producción estable en un tiempo indefinido, las secciones largas se cortan en tramos pequeños.
- **Proceso de extrusión discreto:** se limita la producción en una sola pieza por cada ciclo que se realice.

Componentes de una extrusora

Tolva

La extrusora cuenta con distintas partes, entre ellas la tolva (Figura 4), la cual se encarga de alimentar a la máquina el material para que sea procesado, se almacena de forma temporal mientras está pasando por todo el tornillo (Morales Iles, 2018).

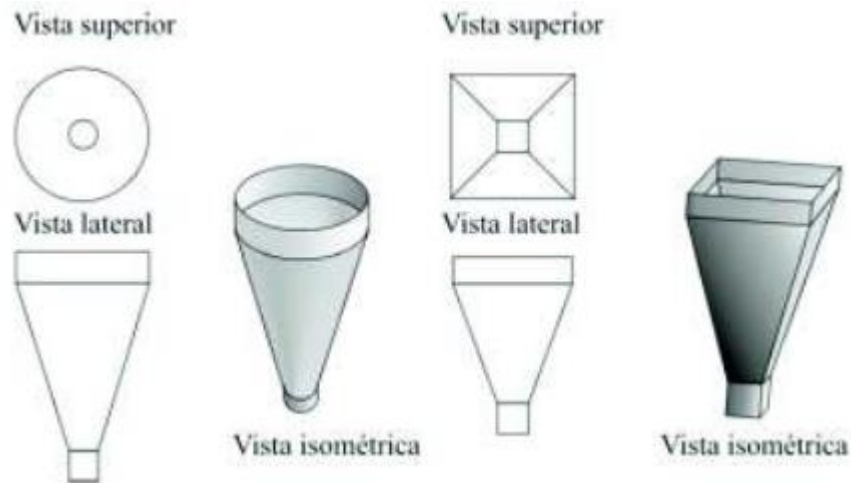


Figura 4. Tipos de tolvas
(Beltrán & Marcilla, 2012)

Husillo

También llamado tornillo se observa en la Figura 5, el cual se encuentra en la parte interna de la camisa y cumple con las funciones de transportar y compactar el material durante el proceso.

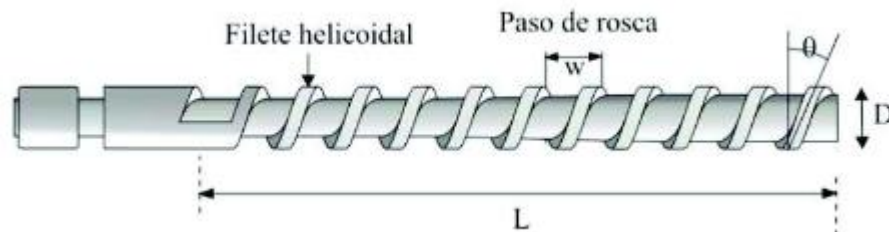


Figura 5. Tornillo de una extrusora
(Beltrán & Marcilla, 2012)

Camisa

Es la que cubre al tornillo sinfín de la extrusora, está diseñada para que se adapte al tornillo con una separación mínima para que el material procesado se compacte.

Cabezal

Este elemento (Figura 6) también llamado dado o matriz se encarga de dar la forma y dimensión al producto en el final de la extrusora, además se debe tener en cuenta que sufre una deformación por la alta temperatura que se encuentra en ese punto.

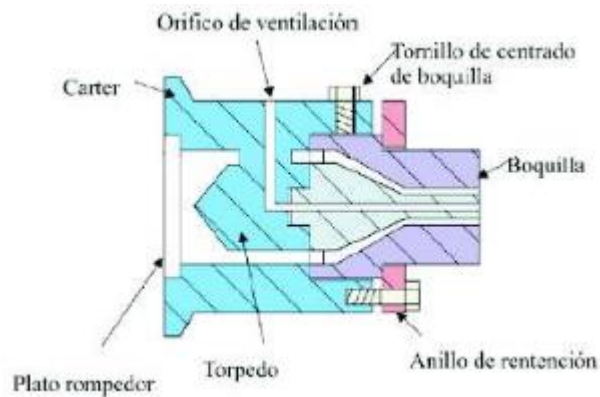


Figura 6. Cabezal de la extrusora
(Beltrán & Marcilla, 2012)

Sistema de calentamiento

Este sistema que se muestra en la Figura 7, se encarga de generar calor al material ingresado en el tornillo, donde pasa por diferentes etapas de temperatura hasta llegar a su punto de fusión en la salida del cabezal.

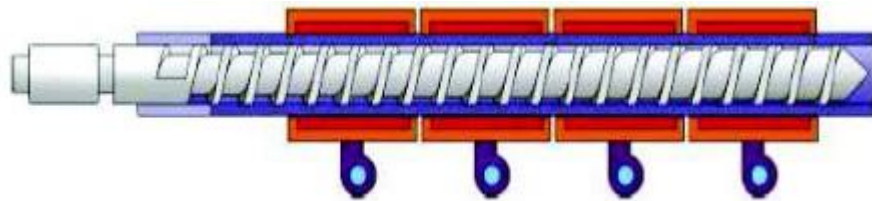


Figura 7. Sistema de atemplado
(Beltrán & Marcilla, 2012)

Objetivos del Proyecto

El objetivo general planteado es implementar una extrusora para reprocesado de material plástico. Los objetivos específicos formulados del proyecto son: diseñar cada una de las partes de la máquina extrusora, diseñar el sistema eléctrico y electrónico, diseñar un sistema de calentamiento para el material plástico y validar el sistema mediante pruebas. En el alcance se implementará una extrusora para reprocesado de botellas plásticas previamente trituradas de 2x1 cm, el material ingresado pasará por un sistema de transporte y llegará a un canal de calentamiento, en la parte final existirá una matriz, circular, cuadrada o rectangular, que permitirá obtener elementos de sección y longitud definida como (palo de escoba, basurero y mesa).

2. METODOLOGÍA Y DISEÑO

La metodología del modelo en V para el desarrollo de sistemas mecatrónicos del presente trabajo consistió en el análisis de los requerimientos planteados.

Después de haber planteado se procedió a adquirir el motor, el motorreductor, los calentadores de banda, el tornillo sinfín, la camisa, los controladores de temperatura, elementos que son necesarios para conformar la extrusora, luego se diseñó la tolva y una estructura para colocar todos los elementos que posee la máquina.

Para finalizar, se integraron los sistemas antes mencionados para realizar pruebas de funcionamiento respectivas, que actúen en conjunto, y así validar los requerimientos planteados.

La Figura 8 muestra la metodología que se utilizó en la implementación de la extrusora.

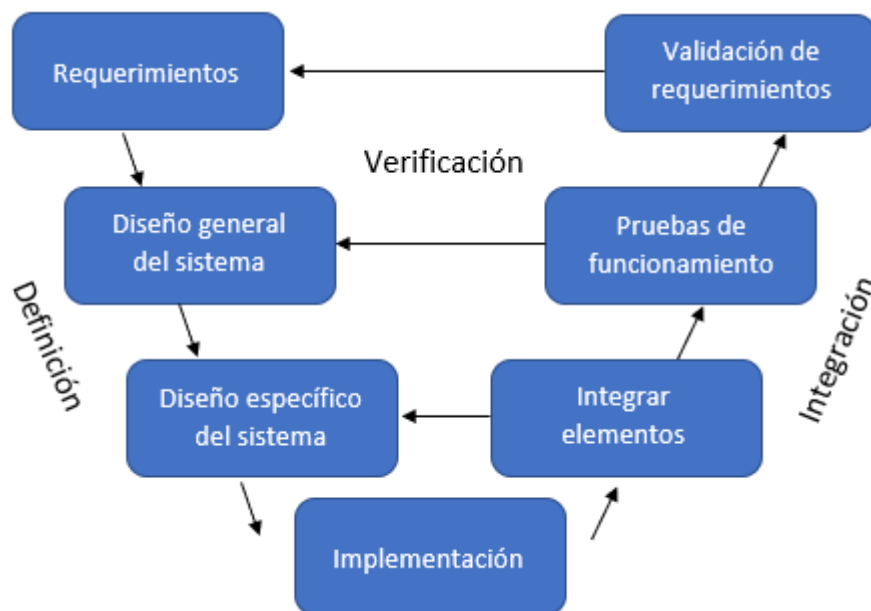


Figura 8. Metodología

2.1 REQUERIMIENTOS

Los requerimientos de la extrusora para reprocesado de material plástico se van a definir tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- El material que se va a utilizar en el proyecto debe ser de botellas de polietileno de alta densidad.
- El motor debe tener la velocidad, el torque y la potencia moderada.
- La temperatura de los calentadores de banda, deben estar entre los 100 a 400 °C.
- Es indispensable que se pueda detectar que existe material en la tolva.
- La máquina tendrá 8 horas diarias de funcionamiento.
- El tamaño que va a tener la extrusora.

En la Figura 9 se muestra el diagrama de requerimientos para la extrusora.

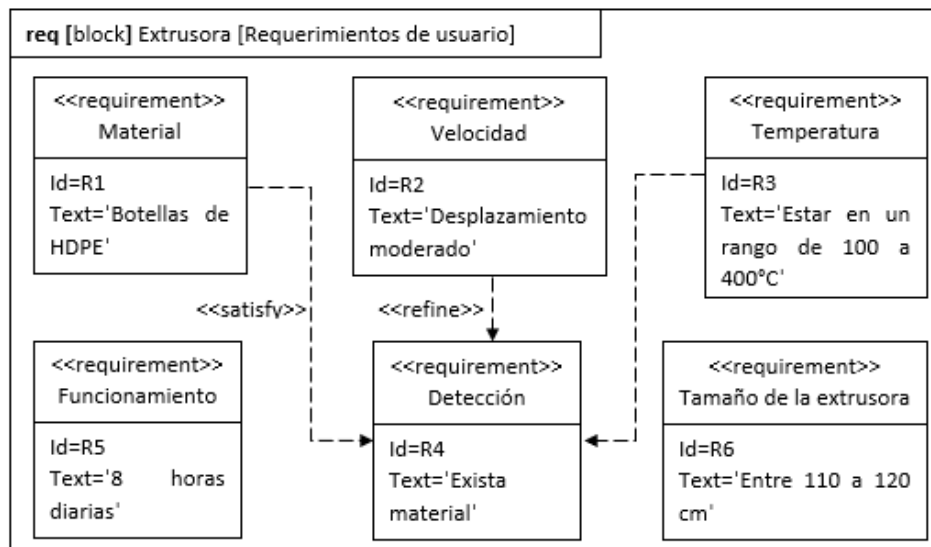


Figura 9. Diagrama de requerimientos Extrusora

2.2 DISEÑO GENERAL DEL SISTEMA

Se definen las partes que tiene el sistema como el motor, los calentadores de banda, el sensor que se encarga de detectar si existe material, la tolva, el tornillo sinfín y la estructura. También tiene la alimentación de corriente alterna que es un sistema externo, pero ayuda al funcionamiento, en la Figura 10 se presenta el diagrama de la extrusora.

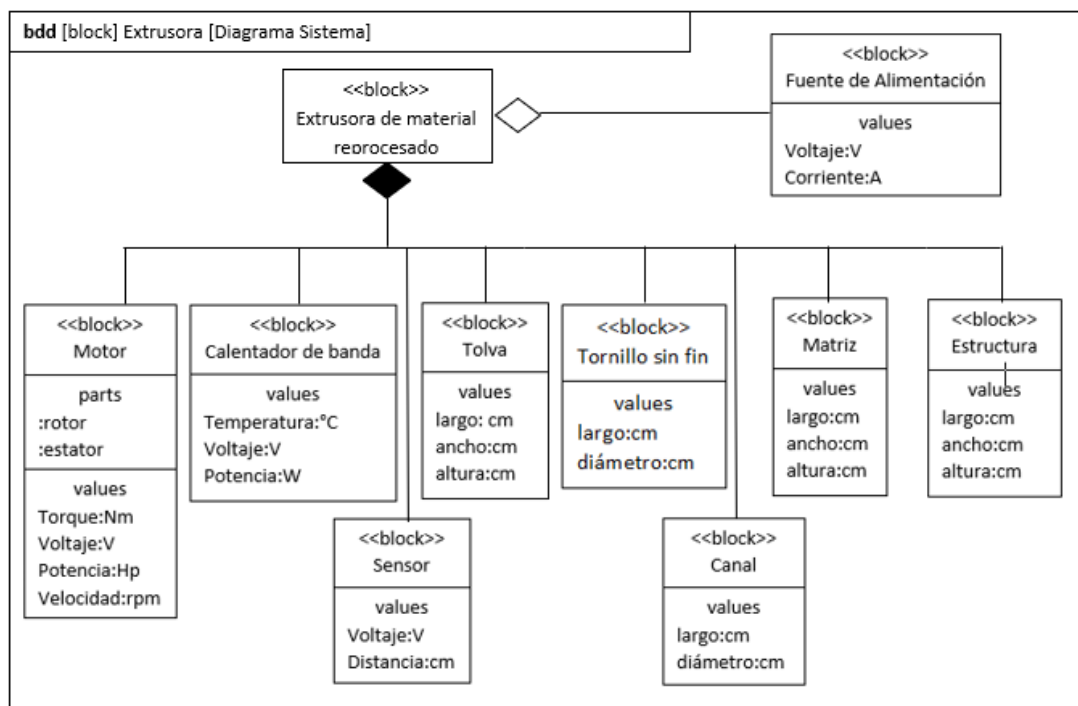


Figura 10. Definición de elementos de la extrusora

En la Figura 11 se muestra el diagrama interno de bloques, donde se indica como están conectados los elementos dentro del sistema con sus respectivos

puertos, en este caso el motor está conectado con el tornillo sinfín, la tolva con el canal de calentamiento y este con los calentadores de banda, en la estructura se encuentra todo lo mencionado anteriormente.

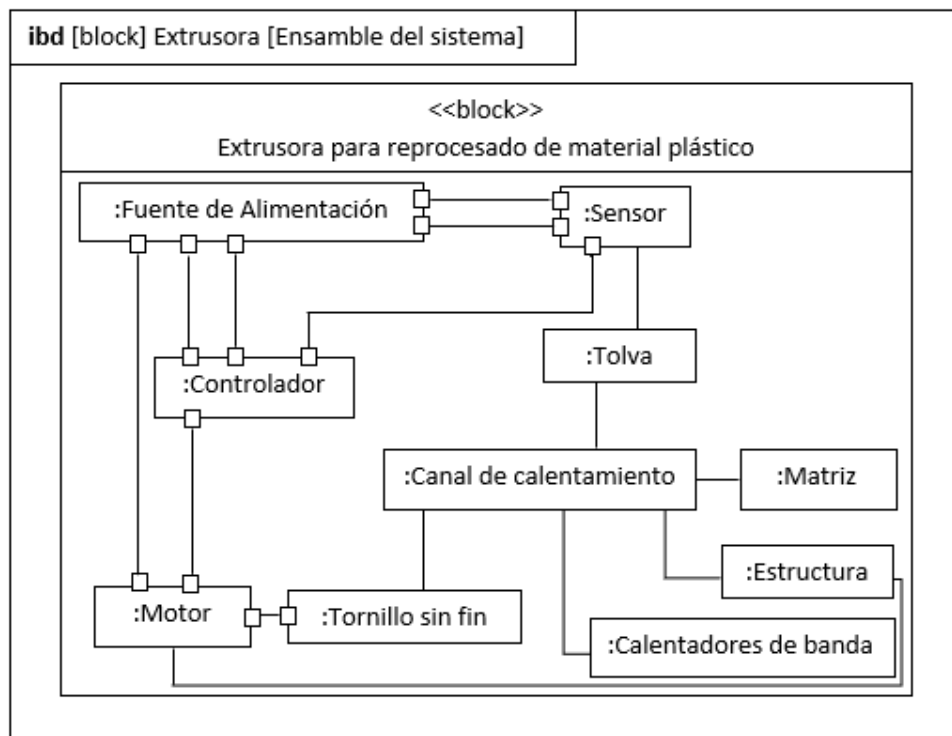


Figura 11. Diagrama interno de bloques de la extrusora

En la Figura 12 se muestra el proceso que tiene el usuario y personal de mantenimiento con la extrusora.

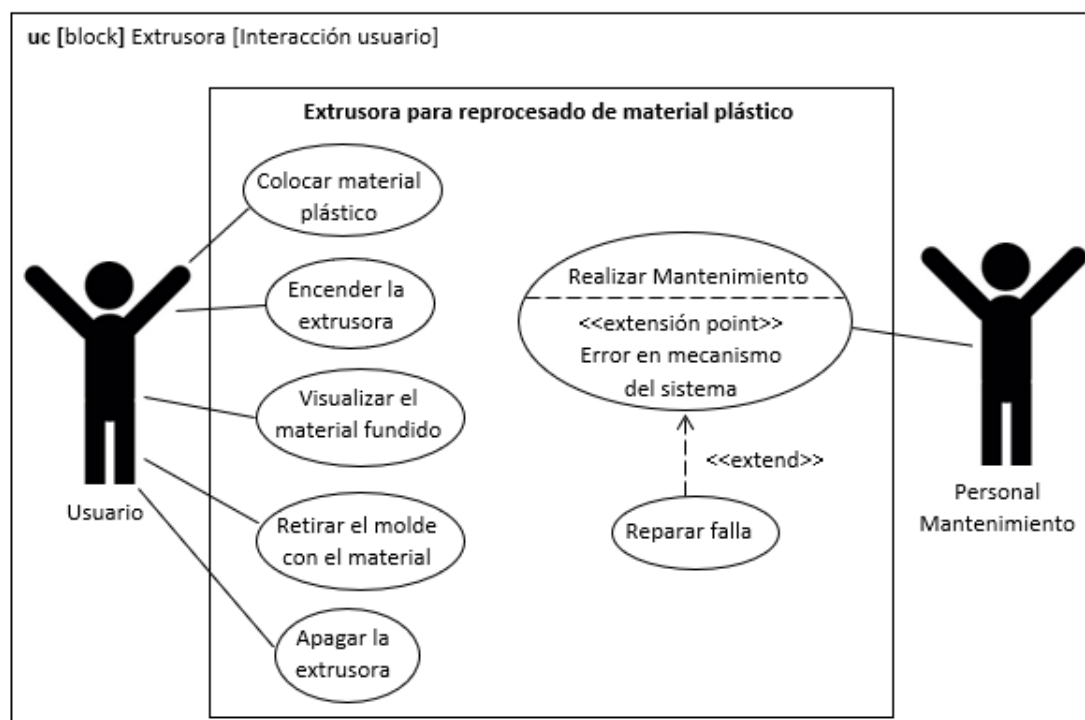


Figura 12. Diagrama de Casos de Uso

2.3 DISEÑO ESPECÍFICO DEL SISTEMA

En base lo anterior se realizó la división del trabajo en la parte mecánica, eléctrica, de control y se crea un diseño específico para cada elemento. En la Figura 13 se observa los componentes mecánicos, además el motor reductor, los calentadores de banda y el sensor que son elementos de la parte eléctrica. En la Tabla 1 se detallan los elementos de la máquina extrusora.

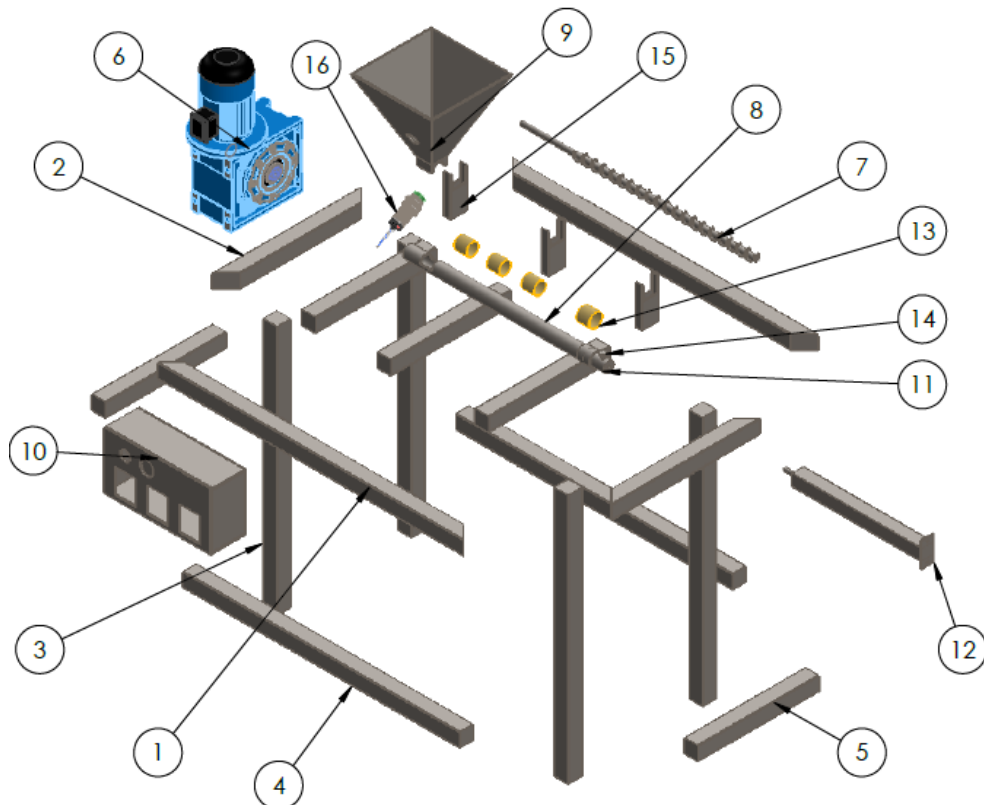


Figura 13. Vista explosionada de la extrusora

Tabla 1 Componentes de la extrusora

N°	Componente	Cantidad
1	Viga	2
2	Viga lateral	2
3	Columna	4
4	Viga inferior	2
5	Viga lateral inferior	5
6	Motor reductor	1
7	Husillo	1
8	Camisa del husillo	1
9	Tolva	1
10	Caja de control	1
11	Boquilla	1
12	Molde	1
13	Calentador de banda	4
14	Regulador salida de material	1
15	Soporte	3
16	Sensor	1

2.3.1 DISEÑO DEL HUSILLO

El husillo es el encargado de transportar el material plástico en el proceso de extrusión. En la Figura 14 se muestra el husillo simple con sus partes, es el más común en la industria para la extrusión de materiales plásticos.

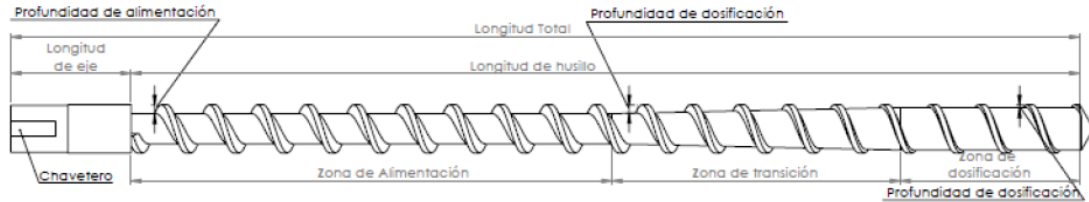


Figura 14. Vista lateral del husillo simple (Naranjo, 2015)

En la extrusión de plásticos utilizan husillos con un diámetro que va entre 9 a 580 mm. En la Tabla 2 se muestra las medidas del diámetro, el paso, la profundidad del canal en la zona de alimentación y dosificación, y el ancho de los filetes.

Tabla 2 Parámetros geométricos de los husillos

Diámetro D (mm)	Paso t (mm)	Profundidad del canal en la zona de alimentación, h1	Profundidad del canal en la zona de dosificación, h2	Ancho de los filetes, e
32	32	6	1,9	3,8
45	45	8	2,1	5
63	63	9,6	2,4	6,3
90	90	11,2	2,8	9
125	125	13,5	3,2	12
160	160	15	3,7	15

(Naranjo, 2015)

Al partir de los valores de la Tabla 2 se obtienen otros valores utilizando diámetros diferentes, en la Tabla 3 se muestran los resultados.

Tabla 3 Parámetros geométricos con otros diámetros

Diámetro D (mm)	Paso t (mm)	Profundidad del canal en la zona de alimentación, h1 (mm)	Profundidad del canal en la zona de dosificación, h2 (mm)	Ancho de los filetes, e (mm)
19,05	19,05	4,3	1,6	2,3
25,4	25,4	5,2	1,8	3
26	26	5,3	1,8	3,1

Se tomará para el diámetro del husillo el valor de 25,4 y con esto se obtiene el ancho del filete.

$$e = 0,12 * D \quad (1)$$

Donde:

D: Diámetro

Reemplazando en (1) se obtiene:

$$e = 0,12 * 25,4$$

$$e = 3mm \quad (2)$$

La longitud del husillo para extrusión de plásticos es recomendable que sea 20 veces mayor al diámetro.

$$L = 20 * D \quad (3)$$

Donde:

D: Diámetro

Reemplazando en (3) se obtiene:

$$L = 20 * 25,4$$

$$L = 508mm \quad (4)$$

El paso de los filetes es la medida que va desde el comienzo al final del filete que rodea el husillo.

$$t = \pi * D * \tan\varphi \quad (5)$$

Donde:

D: Diámetro

φ : Ángulo de hélice de canal

Reemplazando en (5) se obtiene:

$$t = \pi * 25,4 * \tan(17,65^\circ)$$

$$t = 25,4mm \quad (6)$$

Para obtener el ángulo de hélice de canal se aplica la siguiente fórmula.

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{t}{\pi * D} \quad (7)$$

Donde:

t: Paso de los filetes

D: Diámetro

Reemplazando en (7) se obtiene:

$$t = D$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{1}{\pi}$$

$$\varphi = 17,65^\circ \quad (8)$$

Para diferentes materiales plásticos se observa en la Tabla 4 el polímero de alta densidad (HDPE) que se va a utilizar, en este proyecto no necesita un husillo especial.

Tabla 4 Guía para el diseño de un husillo

Resina	Temp. Crítica °C	Densidad [g/cm ³]		Diseño del husillo basado en:		
		Sólido	Fundido	Profundidad del canal	Longitud de transición	Relación de compresión
Tereftalato de Polietileno (PET)	250 Temp. fusión	1,4	1,1	Media	Media	Media
Polímero de alta densidad (HDPE)	127 Temp. fusión	0,95	0,73	Media	Media	Media
Polímero de cristal líquido (LCP)	273 Temp. fusión	1,35	1,12	Superficial	Media	Media
Poliuretano (PEI)	215 Temp. transición	1,27	0,08	Media	Media	Media

(Naranjo, 2015)

2.3.1.1 Flujo volumétrico del husillo

El flujo volumétrico se obtiene mediante la siguiente ecuación.

$$Q = \left(\frac{\alpha k}{k + \beta + \gamma} \right) * \eta \quad (9)$$

Donde:

α : Flujo de arrastre

k : Constante total de la forma geométrica de la cabeza perfiladora

β : Flujo de presión

γ : Flujo de filtración

η : Revoluciones del husillo

Para obtener el flujo volumétrico se necesita encontrar todas las variables antes mencionadas. El flujo de arrastre es la fuerza que impide que el material se adhiera al husillo y avance a lo largo de la extrusora (Naranjo, 2015).

$$\alpha = \frac{\pi \cdot m \cdot D \cdot h_2^2 \left(\frac{t}{m} - e \right) \cos^2 \varphi}{2} \quad (10)$$

Donde:

m : Número de canales del husillo

D : Diámetro

h_2 : Profundidad del canal en la zona de dosificación

e : Ancho del filete

t: Paso de los filetes

φ : Ángulo de hélice de canal

El número de canales del husillo en la entrada de la extrusora determina el avance del material, si existen más canales, mayor es el paso, por lo tanto, si tiene un mayor avance, se tendrá un menor tiempo hasta que el material llegue hasta el final. Lo que implica colocar calentadores de banda con mayor potencia y el costo de la máquina subirá. En este caso se utilizará el canal de husillo igual a 1.

Reemplazando en (10) se obtiene:

$$\alpha = \frac{\pi \cdot 1 \cdot 2,54 \cdot 0,18 \left(\frac{2,54}{1} - 0,3 \right) \cos^2(17,65^\circ)}{2}$$
$$\alpha = 1,46 \text{ cm}^3 \quad (11)$$

Para obtener el flujo de presión se utiliza la siguiente ecuación.

$$\beta = \frac{m \cdot h_2^3 \left(\frac{t}{m} - e \right) \sin\varphi \cdot \cos\varphi}{12 \cdot L} \quad (12)$$

Donde:

m: Número de canales del husillo

h_2 : Profundidad del canal en la zona de dosificación

t: Paso de los filetes

e: Ancho del filete

φ : Ángulo de hélice de canal

L: Longitud del husillo

Reemplazando en (12) se obtiene:

$$\beta = \frac{1 \cdot 0,18^3 \left(\frac{2,54}{1} - 0,3 \right) \sin(17,65^\circ) \cdot \cos(17,65^\circ)}{12 \cdot 50,8}$$
$$\beta = 6,19 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \quad (13)$$

La holgura del filete es la medida que existe entre el diámetro interno de la camisa y el extremo del filete, si la holgura es grande el material tendrá mayor facilidad para mezclarse, pero no avanzará mucho.

$$\delta = 0,002 \cdot D \quad (14)$$

Donde:

D: Diámetro

Reemplazando en (14) se obtiene:

$$\delta = 0,002 \cdot 2,54$$

$$\delta = 0,00508 \text{ cm} \quad (15)$$

El flujo de filtración tiene importancia para determinar el desgaste de los filetes y permite controlar las pérdidas en la producción (Naranjo, 2015).

$$\gamma = \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot \delta^3 \cdot \tan\varphi}{10 \cdot e \cdot L} \quad (16)$$

Donde:

D: Diámetro

δ : Holgura del filete

φ : Ángulo de hélice de canal

e: Ancho del filete

L: Longitud del husillo

Reemplazando en (16) se obtiene:

$$\gamma = \frac{\pi^2 \cdot 2,54^2 \cdot 0,00508^3 \cdot \tan(17,65^\circ)}{10 \cdot 0,3 \cdot 50,8}$$

$$\gamma = 1,74 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 \quad (17)$$

Para calcular la constante de cabezal, primero se divide en distintas zonas dependiendo la forma geométrica de la cabeza perfiladora. En este caso sería un canal cilíndrico.

$$k1 = \frac{\pi \cdot d^4}{128 \cdot L} \quad (18)$$

Donde:

d: Diámetro del canal

L: Longitud del canal

Reemplazando en (18) se obtiene:

$$k1 = \frac{\pi \cdot 1^4}{128 \cdot 3}$$

$$k1 = 0,00818 \quad (19)$$

Ahora tendría el caso de un canal cónico.

$$k2 = \frac{3 \cdot \pi \cdot d_0^3 \cdot d_1^3}{128 \cdot L(d_0^2 + (d_0 \cdot d_1) + d_1^2)} \quad (20)$$

Donde:

d_0 : Diámetro de entrada del material en un canal anular cilíndrico

d_1 : Diámetro de salida del material en un canal anular cilíndrico

Reemplazando en (20) se obtiene:

$$k_2 = \frac{3 \cdot \pi \cdot 1^3 \cdot 2,64^3}{128 \cdot 3(1^2 + (1 \cdot 2,64) + 2,64^2)}$$

$$k_2 = 0,0425 \quad (21)$$

La constante total del cabezal se determina mediante la suma de cada una de las resistencias que experimenta en las diferentes zonas (Naranjo, 2015).

$$k = \frac{1}{\sum \frac{1}{k_1} + \sum \frac{1}{k_2} + \dots + \sum \frac{1}{k_n}} \quad (22)$$

Donde:

k_1 : Constante de un canal cilíndrico

k_2 : Constante de un canal cónico

Reemplazando en (22) se obtiene:

$$k = \frac{1}{\sum \frac{1}{0,00818} + \sum \frac{1}{0,0425}}$$

$$k = 0,00685 \quad (23)$$

El intervalo de velocidad de cortadura permite determinar el número de revoluciones que se necesita para la velocidad de corte en el proceso de extrusión (Naranjo, 2015).

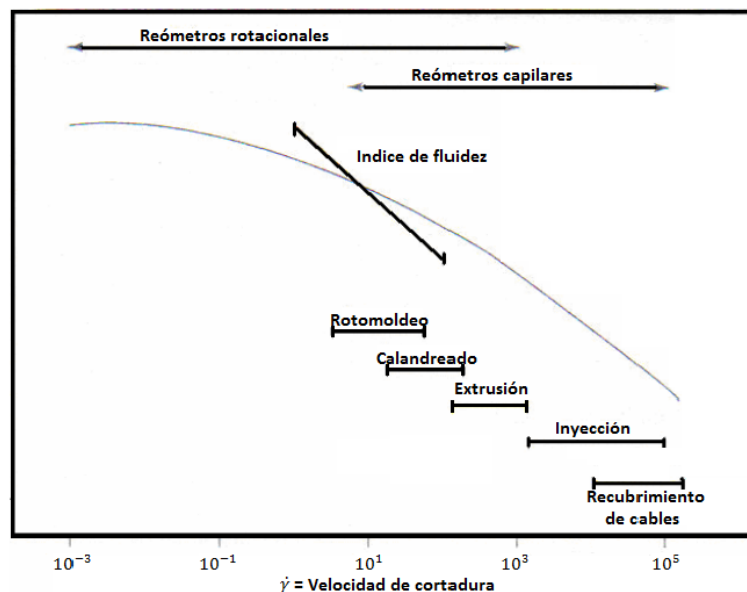


Figura 15. Intervalos de velocidad de cortadura (Naranjo, 2015)

En la Figura 15 se muestra que establece los límites de operación de los diferentes procesos de transformación de plásticos. La velocidad de cortadura en el proceso de extrusión oscila entre los límites de 100 y 1000 s⁻¹ (Naranjo, 2015).

Las revoluciones del husillo se pueden encontrar con la siguiente ecuación.

$$\eta = \frac{\dot{Y} \cdot h_2 \cdot 1s}{\pi \cdot D} \quad (24)$$

Donde:

\dot{Y} : Velocidad de cortadura

h_2 : Profundidad del canal en la zona de dosificación

D: Diámetro

Reemplazando en (24) se obtiene:

$$\eta = \frac{100 \frac{1}{s} \cdot 1,8 \cdot 1s}{\pi \cdot 25,4}$$

$$\eta = 2,25 \text{ rev/s} \rightarrow 135,34 \text{ rpm} \quad (25)$$

Ahora para el flujo volumétrico se reemplazan todos los valores en (9) y se obtiene:

$$Q = \left(\frac{1,46 \cdot 0,00685}{0,00685 + (6,19 \times 10^{-6}) + (1,74 \times 10^{-8})} \right) * 135,34$$

$$Q = 197,41 \text{ cm}^3/\text{min} \quad (26)$$

Utilizando la densidad del polímero de alta densidad (HDPE) se puede representar el valor del flujo volumétrico en kg/h o lb/h.

$$Q = 197,41 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \cdot 0,95 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}$$

$$Q = 11,25 \text{ kg/h} \rightarrow 24,75 \text{ lb/h} \quad (27)$$

2.3.1.2 Potencia y torque

La potencia que necesita el husillo se relaciona con las revoluciones, el diámetro y el factor de proporcionalidad que es k=66,7 (Naranjo, 2015).

$$P = \frac{\eta \cdot \pi \cdot D^3}{k^2} \quad (28)$$

Donde:

η : Revoluciones del husillo

D: Diámetro

k: Factor de proporcionalidad

Reemplazando en (28) se obtiene:

$$P = \frac{135,34 \cdot \pi \cdot 25,4^3}{66,7^2}$$

$$P = 1566,12W \rightarrow 1,56kW \rightarrow 2,1HP \quad (29)$$

Para el torque requerido se utilizará una constante $K=9550$ N.m según (Gómez Gómez & Gutiérrez Bedoya, 2007) además de la siguiente ecuación.

$$T = K \cdot \frac{P}{\eta} \quad (30)$$

Donde:

K: Constante

P: Potencia

η : Revoluciones del husillo

Reemplazando en (30) se obtiene:

$$T = 9550 \cdot \frac{1,56}{135,34}$$

$$T = 110 N \cdot m \quad (31)$$

2.3.1.3 Material del husillo

Para el material del husillo se puede observar en la Tabla 5 diferentes tipos de materiales que existen en el mercado, el acero 4140 puede trabajar hasta $540^{\circ}C$ ($1000^{\circ}F$) sin perder sus propiedades, se puede trabajar con polímeros por su bajo índice de adherencia. El acero 4140 no necesita tratamiento térmico para la aplicación de la extrusora (Naranjo, 2015).

Tabla 5 Materiales para husillos

Materiales base para el husillo				Condiciones de desgaste				
Material	Tratamiento	Rc	FH	Abrasivo			Corrosivo	
				Normal	Promedio	Severa	Moderada	Severa
Acero Aleado 4140	Endurecido con llama	48	no	Aceptable	Mala	No Aceptable	No Aceptable	No Aceptable
		55						
Nitr alloy 135-M	Nitruado	63	si	Buena	Aceptable	No Aceptable	Mala	No Aceptable
		70						
		56						
CPMM4	Tratado con calor	62	no	Excelente	Buena	Aceptable	Mala	No Aceptable
		64						
CPM 420	Tratado con calor	52	no	Aceptable	Buena	No Aceptable	Buena	Mala
		56						
Elmax		57	no	Buena	Aceptable		Buena	Mala

	Tratado con calor	59				No Aceptable		
Custom 450	Endurecido por tiempo	41	no	Aceptable	No Aceptable	No Aceptable	Buena	No Aceptable
		42						
		39						
Nomenclatura								
Tratamiento		Incluye cromado a 0,003"-0,005" y nitruración con gas o ion						
Rc		Dureza Rockwell C						
FH		Requiere endurecimiento en la superficie del filete						
Normal		Termoplásticos sin refuerzos						
Promedio		Termoplásticos hasta con 30% de refuerzos						
Severa		Termoplásticos con más de 30% de refuerzos						
Moderado		Incluye celuloso, acetales y otros que contiene aditivos corrosivos						

(Naranjo, 2015)

El acero escogido tiene una alta templabilidad en aceite, un alto contenido de cromo lo que proporciona un valor de dureza y excelente comportamiento con la corrosión. Tiene una respuesta a todos los tratamientos térmicos, fácil maquinabilidad aún después de ser tratado. Este acero tiene una resistencia y fuerza admirable por las características que posee, en el Anexo 2 se puede observar sus especificaciones.

2.3.1.4 Estudio del husillo

Utilizando el software SolidWorks se realizó una simulación del husillo sometida a cargas, donde se puede observar los resultados. En la Figura 16 se encuentran la sujeción y las fuerzas de 40 N que se aplicaron al husillo.

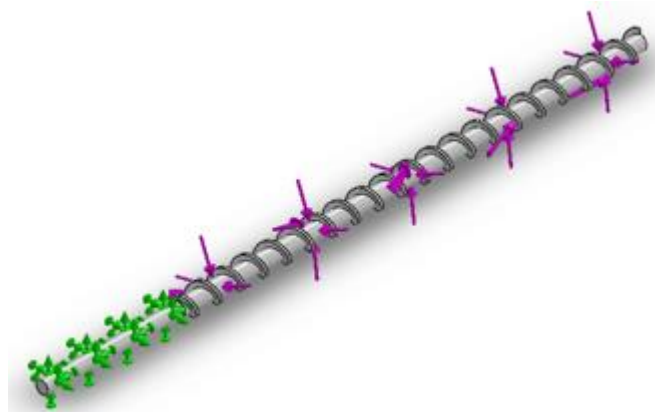


Figura 16. Información de modelo del husillo

En la Tabla 6 se observa las propiedades volumétricas del husillo, en donde se aplicó el Acero 4140 y las propiedades del material están en la Tabla 7.

Tabla 6 Propiedades volumétricas del husillo

Propiedades volumétricas	
Masa	1.00799 kg
Volumen	0.000128406 m ³
Densidad	7850 kg/m ³
Peso	9.87826 N

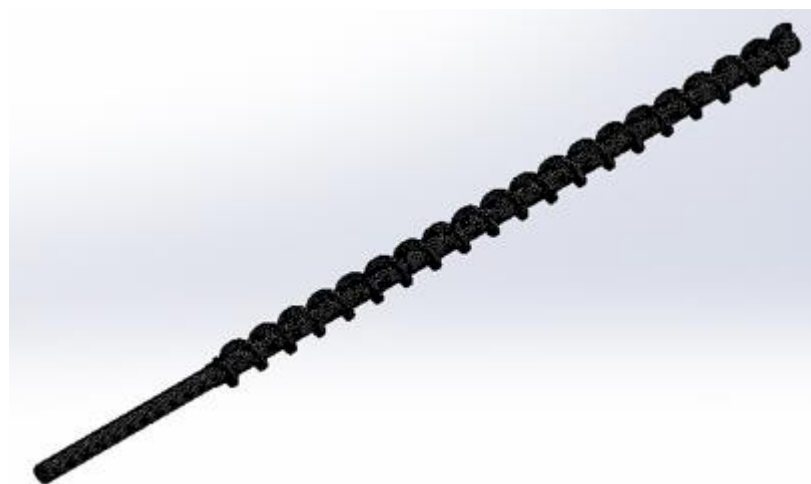
Tabla 7 Propiedades del material del husillo

Propiedades	
Nombre	Acero AISI 4140
Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
Límite elástico	415 N/mm ²
Límite de tracción	655 N/mm ²
Módulo elástico	205000 N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.29
Densidad	7850 kg/m ³
Módulo cortante	80000 N/mm ²

Después de aplicar el material, la sujeción y las cargas, se procede a colocar una malla en el elemento, en la Tabla 8 se observa la información de malla y en la Figura 17, el mallado.

Tabla 8 Información de malla del husillo

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño de elementos	2.5232 mm
Tolerancia	0.12616 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	86804
Número total de elementos	53456
Cociente máximo de aspecto	22.235
% elementos cuyo coeficiente de aspecto es <3	96.6
% elementos cuyo coeficiente de aspecto es >10	0.0206
% elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:22

**Figura 17.** Mallado del husillo

Las fuerzas resultantes se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9 Fuerzas resultantes del husillo

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	-0.00338739	0.0157883	37.10774	37.1074

Los resultados del estudio realizado se muestran a continuación, en la Figura 18 aparece el factor de seguridad en donde indica que el husillo si soporta las cargas sometidas de 40 N.

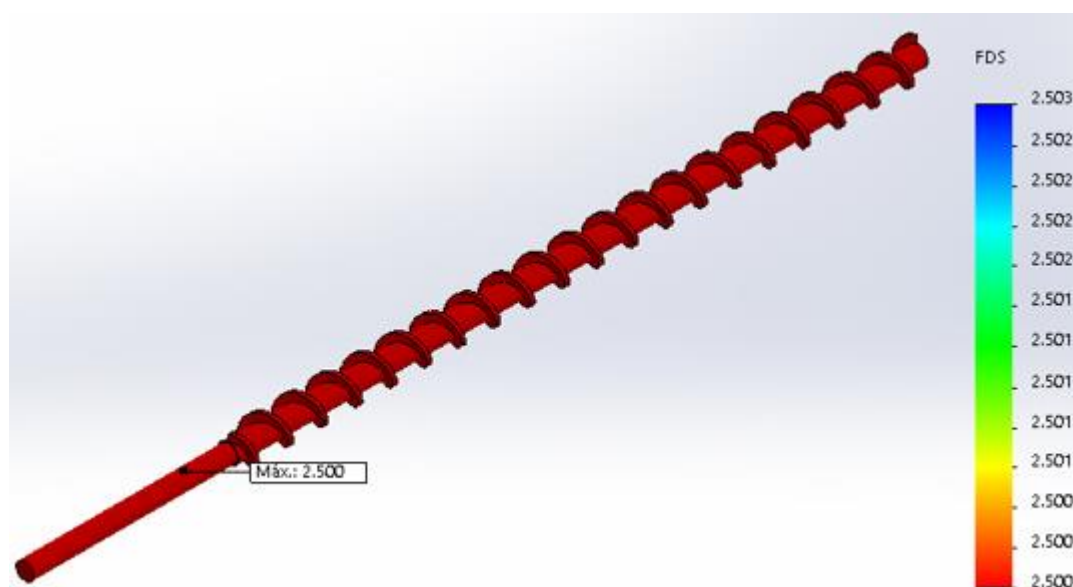


Figura 18. Factor de seguridad del husillo

2.3.1.5 Dimensiones de la camisa

Dentro de la camisa se encuentra el husillo, al unir los dos elementos realizan la fundición del material con la ayuda de los calentadores de banda, tiene una fricción que se da entre los filetes y la superficie interna de la camisa, para esto se necesita que exista una holgura, no se debe exceder para tener una buena presión de operación, el valor es de 0,00508 cm y se lo obtiene mediante la ecuación (14).

2.3.2 DISEÑO DE LA TOLVA

La tolva es la encargada de alimentar al husillo con el material plástico, sus paredes inclinadas permiten que el material este en movimiento y tenga una dosificación homogénea en todo el proceso de extrusión. En la Figura 19 se muestran las dimensiones de la tolva.

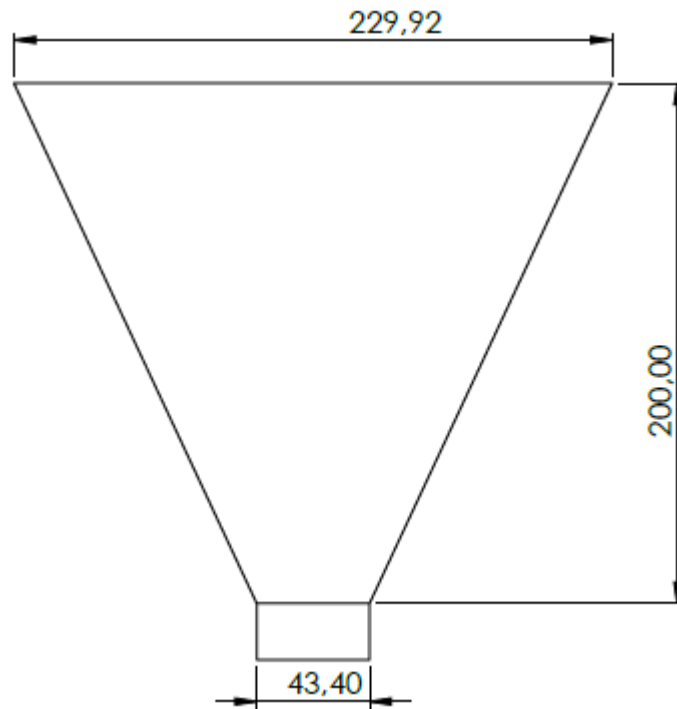


Figura 19. Dimensiones de la tolva en mm

Con estas dimensiones se puede calcular el volumen, además conociendo la densidad del material se calcula la masa que podrá almacenar la tolva.

$$V = \frac{(A_s + A_i + \sqrt{A_s * A_i}) * h}{3} \quad (32)$$

Donde:

A_s : Área superior

A_i : Área inferior

h : altura

Reemplazando en (32) se obtiene:

$$V = \frac{(L^2 + l^2 + \sqrt{L^2 * l^2}) * h}{3}$$

$$V = \frac{(229,92^2 + 43,40^2 + \sqrt{229,92^2 * 43,40^2}) * 200}{3}$$

$$V = \frac{(52863,2^2 + 1883,56^2 + \sqrt{52863,2^2 * 1883,56^2}) * 200}{3}$$

$$V = 4315020mm^3 \rightarrow 4315,02cm^3 \quad (33)$$

Para calcular la masa que almacenará, se toma en cuenta el volumen de la tolva y la densidad del material.

$$m = \delta * V \quad (34)$$

Donde:

δ : Densidad del HDPE

V: Volumen de la tolva

Reemplazando en (34) se obtiene:

$$m = 0,95 \frac{g}{cm^3} * 4315,02cm^3$$

$$m = 4099,27g \rightarrow 9,018lb \quad (35)$$

El material utilizado para la tolva es una plancha de tol, las especificaciones se muestran en el Anexo 3 y éste es fácil de conseguir en el mercado.

2.3.2.1 Estudio de la tolva

Se hizo una simulación aplicando una carga de 40 N, este valor es la masa que almacena la tolva. En la Figura 20 se observa la sujeción y las fuerzas sometidas.

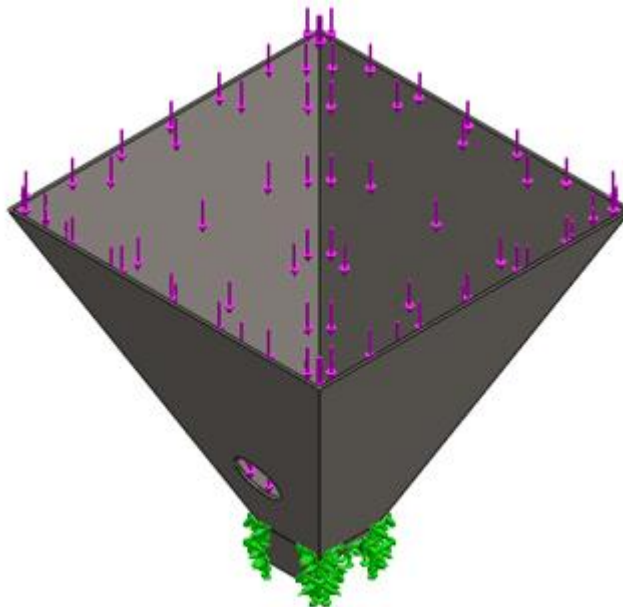


Figura 20. Información de modelo de la tolva

Las propiedades volumétricas de la tolva se muestran en la Tabla 10, además se aplica un Acero A36, donde sus propiedades se encuentran en la Tabla 11.

Tabla 10 Propiedades volumétricas de la tolva

Propiedades volumétricas	
Masa	1.72257 kg
Volumen	0.000219435 m ³
Densidad	7850 kg/m ³
Peso	16.8812 N

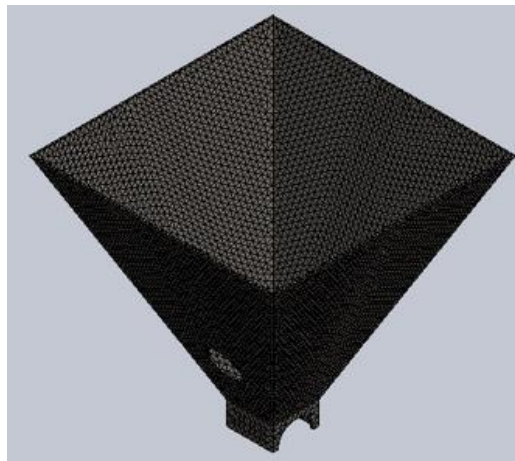
Tabla 11 Propiedades del material de la tolva

Propiedades	
Nombre	ASTM A36 Acero
Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
Límite elástico	250 N/mm ²
Límite de tracción	400 N/mm ²
Módulo elástico	200000 N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.26
Densidad	7850 kg/m ³
Módulo cortante	79300 N/mm ²

Al aplicar el material, la sujeción y las cargas, se coloca una malla en la tolva, en la Tabla 12 se observa la información de malla y en la Figura 21 el mallado.

Tabla 12 Información de malla de la tolva

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño de elementos	4.93935 mm
Tolerancia	0.246967 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	61133
Número total de elementos	30306
Cociente máximo de aspecto	7.8783
% elementos cuyo coeficiente de aspecto es <3	78.1
% elementos cuyo coeficiente de aspecto es >10	0
% elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:22

**Figura 21.** Mallado de la tolva

Las fuerzas resultantes se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13 Fuerzas resultantes de la tolva

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	-0.00628411	-40.0372	0.000348566	40.0372

El factor de seguridad se observa en la Figura 22 en donde se indica que la tolva sí soporta la carga aplicada.

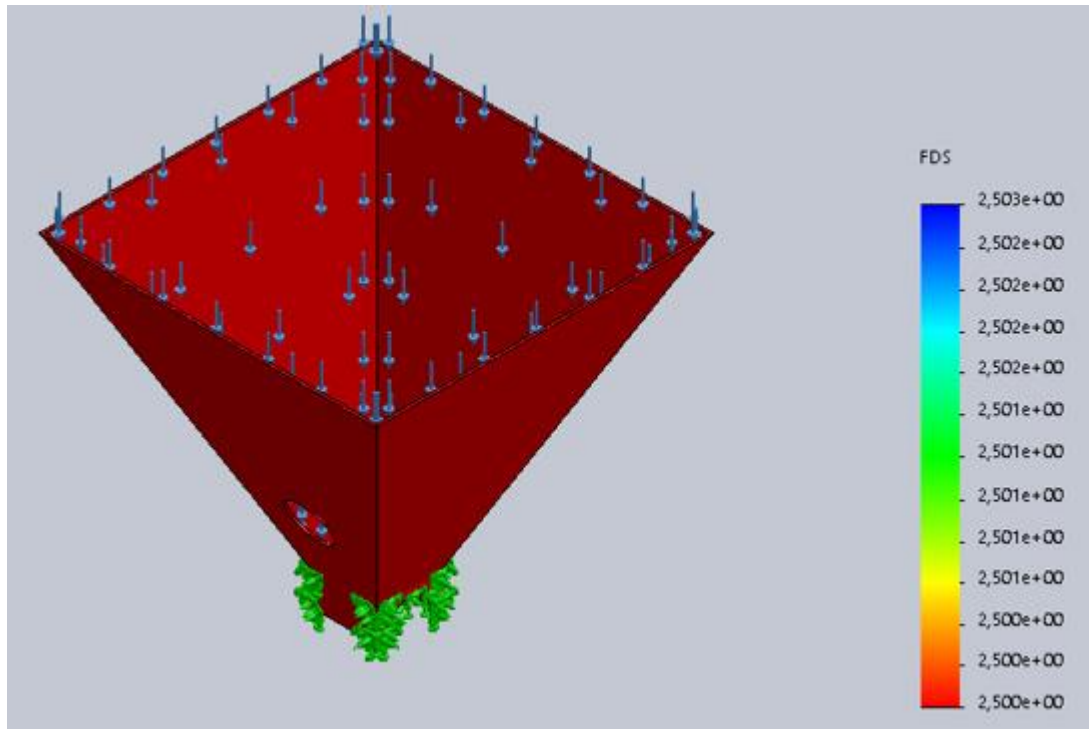


Figura 22. Factor de seguridad de la tolva

2.3.3 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

Factor de diseño

Factor de diseño, N, es una medida de la seguridad relativa de un componente bajo la acción de una carga. Para este caso se utilizará $N=2,5$ el cual indica que el diseño de elementos de máquina bajo cargas dinámicas con una confianza promedio en todos los datos de diseño (Mott, 2009).

2.3.3.1 Diseño de vigas

Para el análisis se considera el caso donde toda la carga este uniformemente distribuida sobre una sola viga, como datos se conoce la masa de los elementos de la extrusora, que son la tolva, el husillo, la camisa del husillo, los soportes, el motor reductor, el sensor, los calentadores de banda, las termocuplas, la caja con los controladores de temperatura, el molde, con una carga aproximada de 5048,2 N.

Para esto se toma una carga estática, material dúctil y esfuerzo uniaxial, el cual se emplea el método de resistencia de fluencia, caso C1 (Mott, 2009).

$$\sigma < \sigma_d = \frac{S_{yt}}{N} \quad (36)$$

Donde:

S_{yt} : Resistencia a la fluencia

N: Factor de diseño

La viga se tomará como empotrada-empotrada con carga uniformemente distribuida como se muestra en la Figura 23.

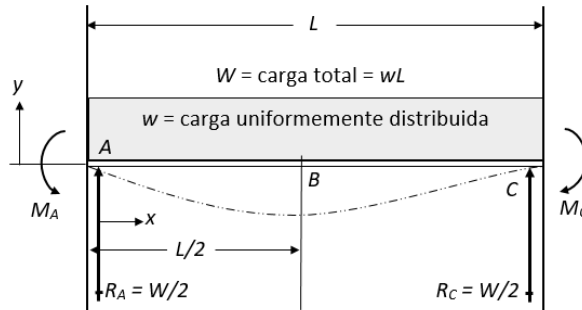


Figura 23. Diagrama de deflexión para viga estáticamente indeterminada (Mott, 2009)

Se calcula la carga total que va a existir en la viga.

$$W = w \cdot L \quad (37)$$

Donde:

w : Carga uniformemente distribuida

L : Longitud de la viga

Reemplazando en (37) se obtiene:

$$W = 5,87 \cdot 860$$

$$W = 5048,2N \quad (38)$$

Se calcula las reacciones en los extremos R_A y R_C .

$$R_A = R_C = \frac{W}{2} \quad (39)$$

Donde:

W : Carga total

Reemplazando en (39) se obtiene:

$$R_A = R_C = \frac{5048,2}{2}$$

$$R_A = R_C = 2524,1N \quad (40)$$

Después se calculará los momentos en los puntos A y C .

$$M_A = M_C = \frac{-W \cdot L}{12} \quad (41)$$

Donde:

W: Carga total
L: Longitud de la viga

Reemplazando en (41) se obtiene:

$$M_A = M_C = \frac{-5048,2 \cdot 860}{12}$$
$$M_A = M_C = -36187,66N \cdot mm \quad (42)$$

Dado que el esfuerzo es $\sigma=M/W$, entonces se iguala con (36).

$$\frac{M}{W} \leq \frac{S_{yt}}{N} \quad (43)$$

Despejando se tiene:

$$W_{xx} \geq \frac{M \cdot N}{S_{yt}} \quad (44)$$

Donde:

M: Momento

N: Factor de diseño

Syt: Resistencia a la fluencia

Se utilizará para la viga el acero ASTM A500 con Syt=344 N/mm².

Reemplazando en (44) se obtiene:

$$W_{xx} \geq \frac{361787,66 \cdot 2,5}{344}$$
$$W_{xx} \geq 2629,27mm^3 \rightarrow 2,62cm^3 \quad (45)$$

Con este valor se escoge en el manual que se encuentra en el Anexo 1, un tubo de sección cuadrada de 40x40x1,5 mm.

2.3.3.2 Estudio de la viga 1

Se aplica la carga total de 5048,2 N que representa la masa de todos los componentes de la extrusora en una sola viga. En la Figura 24 se muestran las sujeciones en los extremos con las fuerzas sometidas.

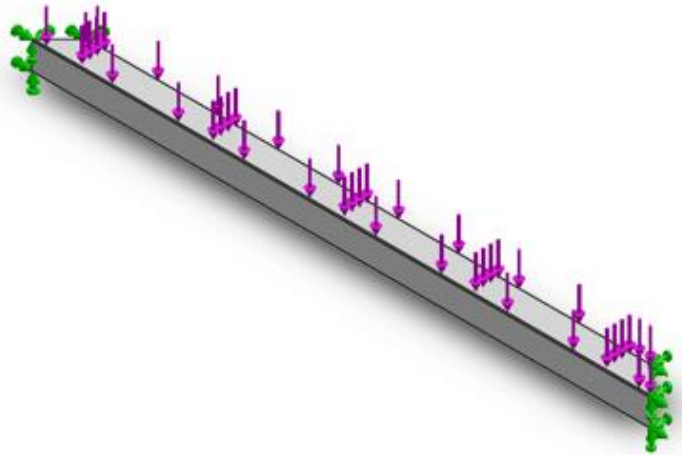


Figura 24. Información de modelo de la viga

Las propiedades volumétricas de la viga se muestran en la Tabla 14, además en la Tabla 15 están las propiedades del acero ASTM A500.

Tabla 14 Propiedades volumétricas de la viga

Propiedades volumétricas	
Masa	1.46624 kg
Volumen	0.000187841 m ³
Densidad	7805.74 kg/m ³
Peso	14.3691 N

Tabla 15 Propiedades del material de la viga

Propiedades	
Nombre	Acero ASTM A 500
Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
Límite elástico	344.7378 N/mm ²
Límite de tracción	424.7170 N/mm ²
Módulo elástico	206842.7189 N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.27
Densidad	7805.74 kg/m ³
Módulo cortante	79979.1846 N/mm ²

Después de colocar las sujeciones y fuerzas, se aplica una malla en la viga, la información de malla se observa en la Tabla 16 y el mallado en la Figura 25.

Tabla 16 Información de malla de la viga

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño de elementos	5.01096 mm
Tolerancia	0.250548 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	60489
Número total de elementos	30369
Cociente máximo de aspecto	14.425
% elementos cuyo coeficiente de aspecto es <3	2.54

% elementos cuyo coeficiente de aspecto es >10	0.352
% elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:16

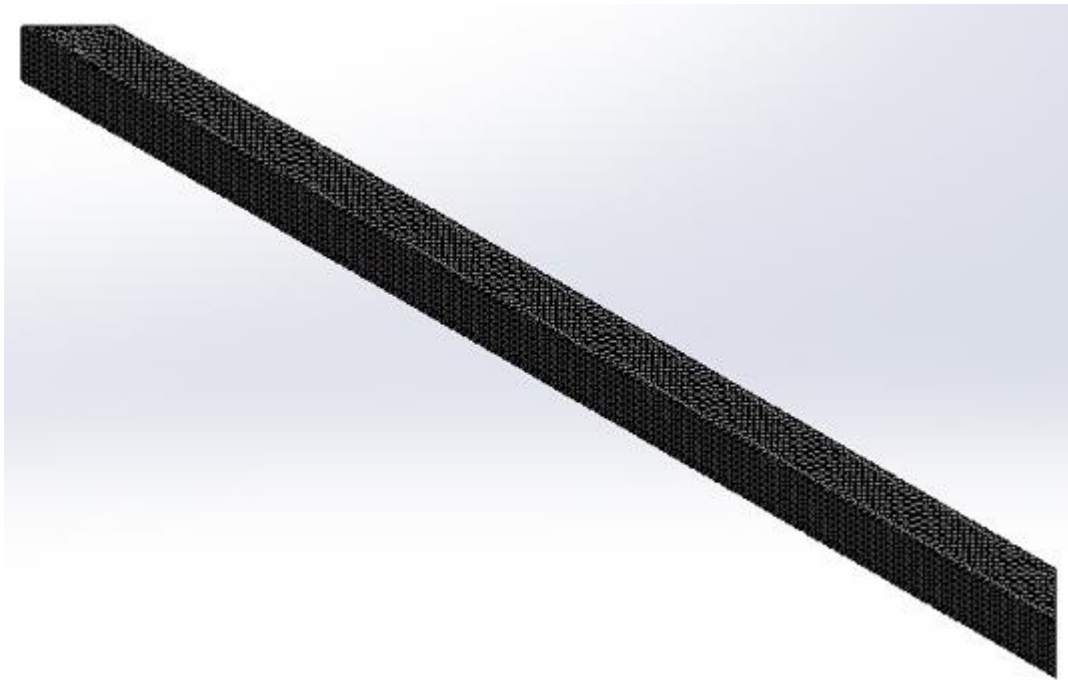


Figura 25. Mallado de la viga

Las fuerzas resultantes se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17 Fuerzas resultantes de la viga

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	0.296795	5100.39	0.101763	5100.39

El factor de seguridad se aprecia en la Figura 26, indica que si soporta la carga aplicada.

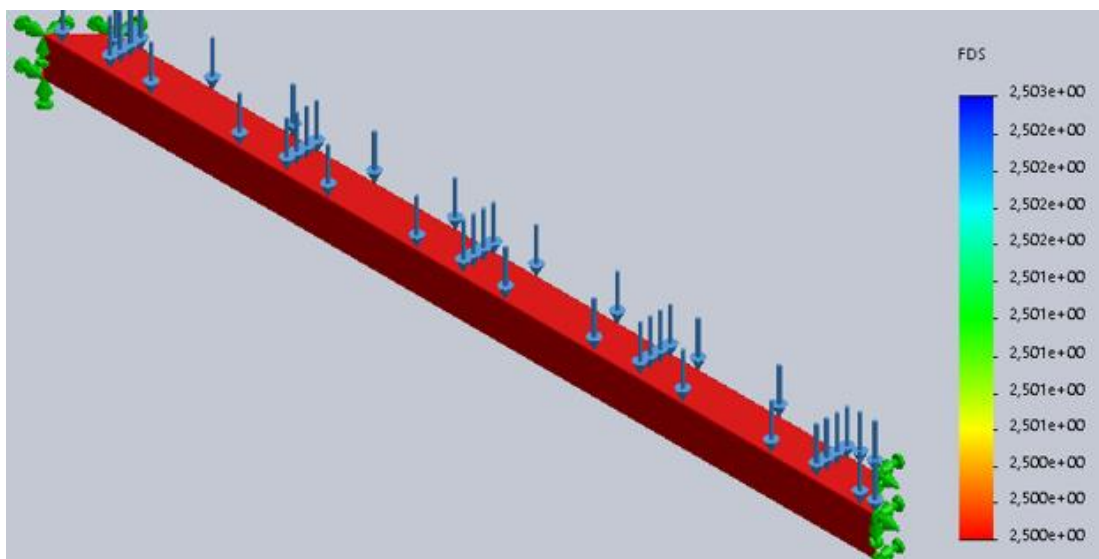


Figura 26. Factor de seguridad de la viga

2.3.3.3 Diseño de columnas

En este caso se considera una columna empotrada-libre donde se aplica la carga total sobre una sola columna. Se procede a calcular si es columna larga con la relación de esbeltez de transición.

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{S_y}} \quad (46)$$

Donde:

E: Módulo elástico

S_y: Resistencia a la fluencia

Reemplazando en (46) se obtiene:

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2(206842,71)}{344}}$$
$$C_c = 108,82 \quad (47)$$

Después se calcula la carga crítica, la cual es la que se empieza a pandear.

$$P_{crit} = P_{diseño} * N \quad (48)$$

Donde:

P_{diseño}: Carga de diseño

N: Factor de diseño

Reemplazando en (48) se obtiene:

$$P_{crit} = 5048,2 * 2,5$$
$$P_{crit} = 12620,5 N \quad (49)$$

Se asume que es columna larga y se aplica la ecuación de Euler.

$$P_{crit} \leq \frac{\pi^2 E I_{min}}{(kL)^2} \quad (50)$$

Se despeja el I_{min};

$$I_{min} \geq \frac{P_{crit}(kL)^2}{\pi^2 E} \quad (51)$$

Donde:

P_{crit}: Carga crítica

k: Constante

L: Longitud de la columna

E: Módulo elástico

Reemplazando en (51) se obtiene:

$$I_{min} \geq \frac{12620,5(2,1^2)(700^2)}{\pi^2(206842,71)}$$
$$I_{min} \geq 1,34867 \text{ cm}^4 \quad (52)$$

Con el valor calculado de la inercia se observa en el manual, el cual se encuentra en el Anexo 1, que el r mínimo es igual a 0,92 cm o 0,362 pulg, con un tubo de sección cuadrada hueca de 25x25x2 mm. A continuación, se calcula la relación de esbeltez.

$$RE = \frac{kL}{r_{min}} \quad (53)$$

Donde:

k: Constante

L: Longitud de la columna

r_{min}: Radio mínimo

Reemplazando en (53) se obtiene:

$$RE = \frac{(2,1)(70)}{0,92}$$
$$RE = 159,82 \quad (54)$$

Cuando es columna larga se utiliza:

$$RE > Cc \quad (55)$$

Donde:

RE: Relación de esbeltez

Cc: Relación de esbeltez de transición

Reemplazando en (55) se obtiene:

$$159,82 > 108,82 \quad (56)$$

Por lo tanto, si es columna larga. Debido a los cálculos de la viga también se puede utilizar el mismo tubo de sección cuadrada de 40x40x1,5 mm en la columna.

2.3.3.4 Estudio de la columna 3

Se realiza una simulación a la columna empotrada libre con una carga de 5048,2 N. En la Figura 27, se observa la sujeción fija en un extremo y la fuerza en el otro.

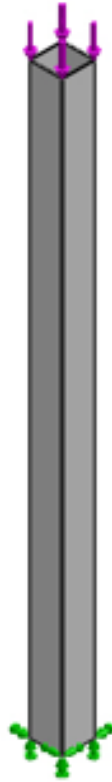


Figura 27. Información de modelo de la columna

En la Tabla 18 se muestran las propiedades volumétricas de la columna. Además, en la Tabla 19, están las propiedades del material que se aplica a la misma.

Tabla 18 Propiedades volumétricas de la columna

Propiedades volumétricas	
Masa	1.25163 kg
Volumen	0.000160348 m ³
Densidad	7805.74 kg/m ³
Peso	12.266 N

Tabla 19 Propiedades del material de la columna

Propiedades	
Nombre	Acero ASTM A500
Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
Límite elástico	344.7378 N/mm ²
Límite de tracción	424.7170 N/mm ²
Módulo elástico	206842.7189 N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.27
Densidad	7805.74 kg/m ³
Módulo cortante	79979.1846 N/mm ²

Después de esto se procede a colocar una malla en la tolva, en la Tabla 20 se observa la información de malla y en la Figura 28 el mallado.

Tabla 20 Información de malla de la columna

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño de elementos	4.62877 mm
Tolerancia	0.231439 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	65124
Número total de elementos	33180
Cociente máximo de aspecto	16.46
% elementos cuyo coeficiente de aspecto es <3	7.58
% elementos cuyo coeficiente de aspecto es >10	0.16
% elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:18



Figura 28. Mallado de la columna

Las fuerzas resultantes se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21 Fuerzas resultantes de la columna

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	-0.276438	5099.84	0.170334	5099.84

En la Figura 29 se muestra el factor de seguridad, en donde se indica que la columna si soporta la carga.

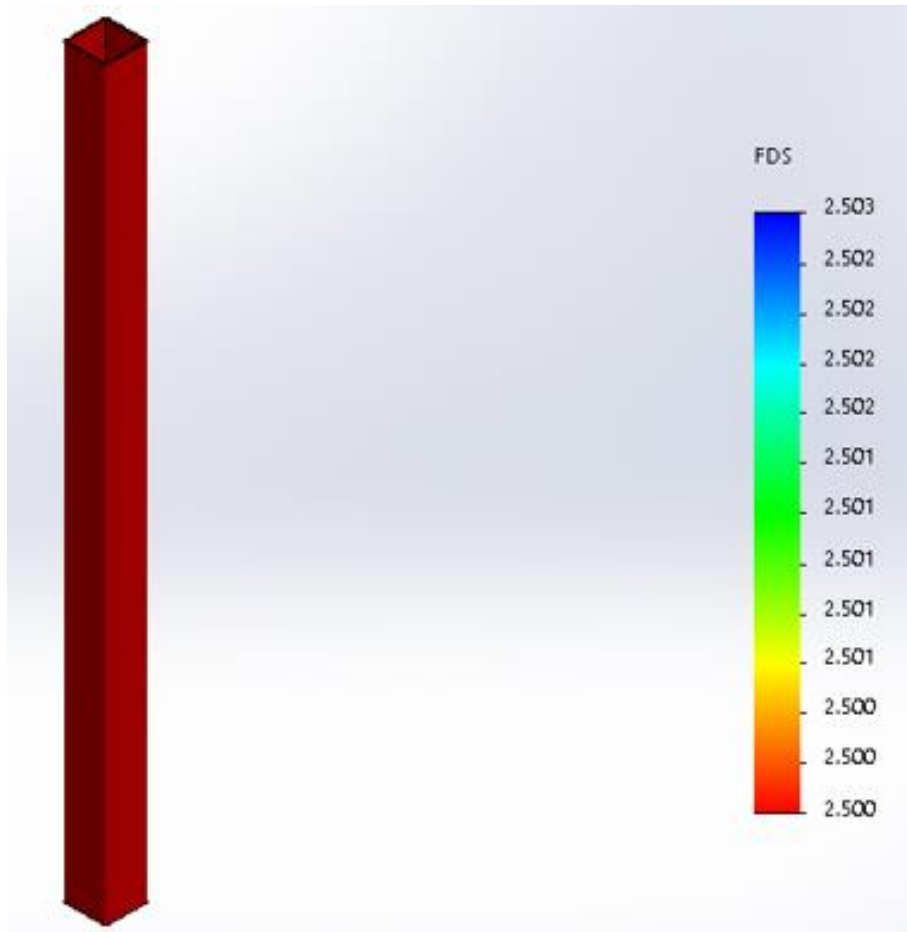


Figura 29. Factor de seguridad de la columna

Las vigas y columnas después de ser cortadas, se ensamblan mediante soldadura, para formar la estructura de la máquina.

2.3.4 DISEÑO ELECTRÓNICO

2.3.4.1 Etapa de control

Diagrama de control de la extrusora

Para la alimentación del controlador de temperatura, el calentador de banda y el sensor capacitivo, se utiliza 110 V, se acciona una señal del controlador, se activa la bobina de este, después activa el relé de estado sólido y se enciende el calentador de banda, subiendo la temperatura, para la medición se utiliza la termocupla tipo J, la cual se envía al controlador los datos que se obtuvo. En la Figura 30 se observa el diagrama de conexión.

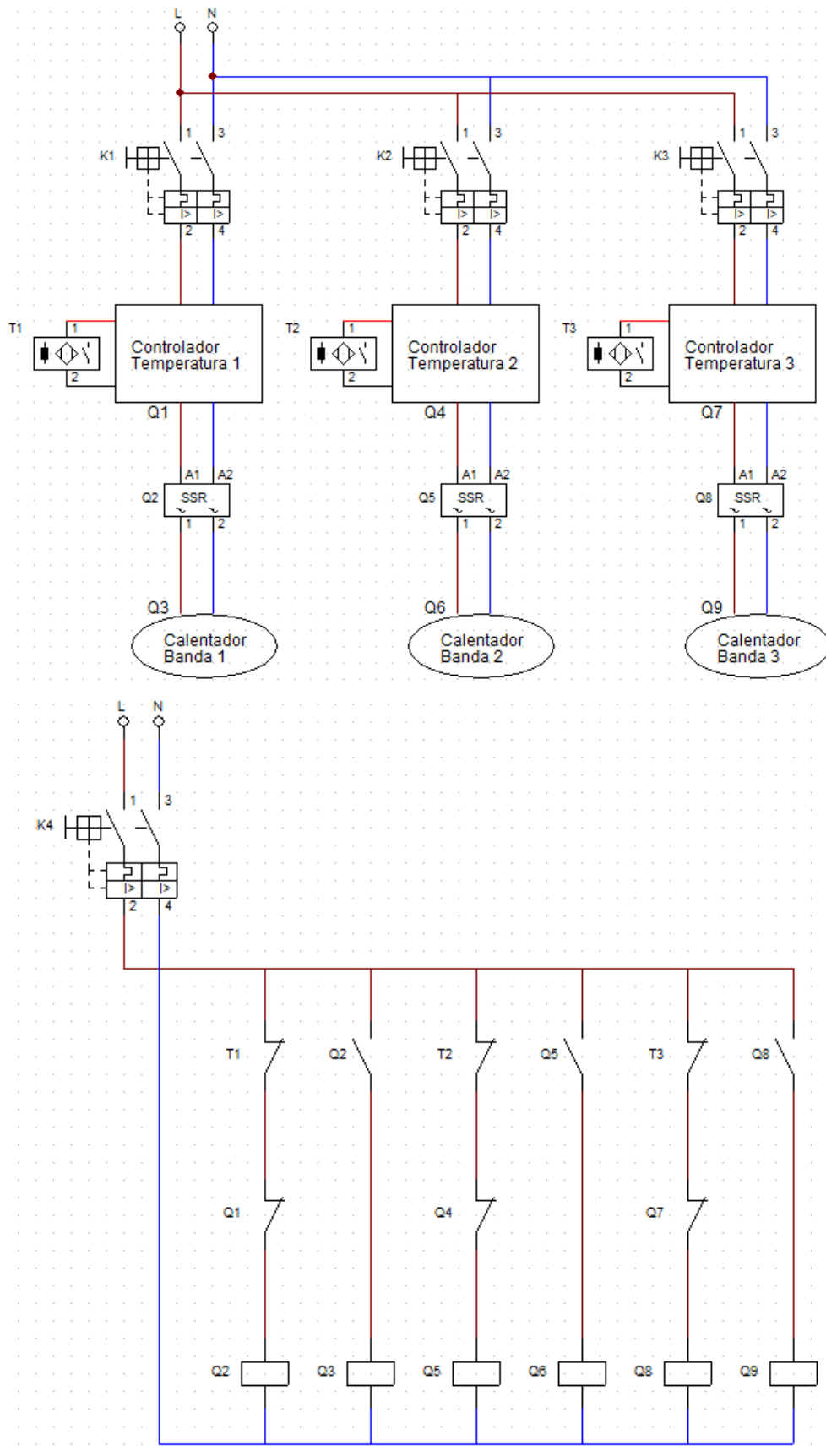


Figura 30. Diagrama de control

Controlador de temperatura

Se utilizó un controlador digital de temperatura REX-C700, el cual se muestra en la Figura 31, este cuenta con todas las funciones entre ellas está el control PID y ON-OFF, además de una entrada para la termocupla y salidas con relés para encender los calentadores de banda.



Figura 31. Controlador de temperatura Camsco REX-C700

El diagrama se aprecia en la Figura 32 y las características del controlador se pueden encontrar en el Anexo 4.

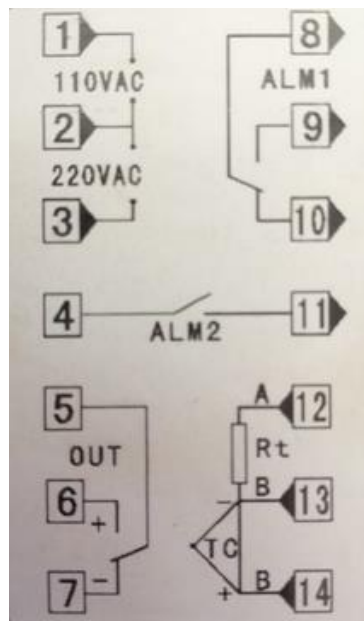


Figura 32. Diagrama del controlador de temperatura

Relé de estado sólido

Los relés de estado sólido son dispositivos ampliamente utilizados en la conmutación de cargas resistivas con señales de control en DC o AC, cuentan con TRIAC's o SCR's, a diferencia de otros que emplean bobinas y elementos mecánicos para realizar la conmutación (Naranjo, 2015).

Las ventajas de este relé es que no sufre el desgaste mecánico, ya que no tienen partes móviles, puede conmutar altas corrientes y voltajes sin producir arcos eléctricos (Naranjo, 2015), se lo puede observar en la Figura 33, el cual está conectado al calentador de banda para activarlo.



Figura 33. Relé de estado sólido

Termocupla

Es un sensor para la medición de temperatura, basado en efectos termoeléctricos, el cual permite obtener la magnitud física de la temperatura y transformarla en voltaje. En la Tabla 22 se muestran las características de la termocupla utilizada tipo J, cuenta con un circuito formado por alambre de hierro y otro de aleación de cobre y níquel, unidos en sus extremos donde existe una diferencia de temperatura.

Se genera una fuerza electromotriz como resultado de los gradientes de temperatura los cuales existe a lo largo de la longitud de los conductores. En la Figura 34 se observa la termocupla tipo J.

Tabla 22 Características de la termocupla tipo J

Características	
Tipo	J
Cable + Aleación	Hierro
Rango de Aplicación	De -200 a 700 °C
Diámetro del alambre	1 a 3 mm

(Naranjo, 2015)



Figura 34. Termocupla tipo J

Calentador de banda

Está diseñado para calentar piezas cilíndricas por conducción, es de tipo abrazadera de 35x35 mm, con un voltaje de 110 V y una potencia de 380 W. Conserva la energía con una eficiencia de calefacción mejorada de hasta 30 vatios por pulgada cuadrada, además cuenta con aislamiento especial de mica de alto grado para una conductividad térmica superior y resistencia eléctrica de la matriz. Soporta temperaturas de hasta 350°C (Detai Electrical Appliance, 2020). En la Figura 35 se muestra el calentador de banda.



Figura 35. Calentador de banda

Sensor capacitivo

Es un sensor que está formado por un oscilador cuya capacidad la forman un electrodo interno y otro externo. En algunas aplicaciones se coloca una masa fija, el cuerpo a detectar utilizado como dieléctrico se introduce entre la masa y la placa activa, modificando las características del condensador equivalente (ECURED, 2020).

Se puede emplear en la detección de objetos, funciones contadoras y control de nivel de carga de materiales sólidos o líquidos. En este caso se utilizará para detectar si existe material en la tolva, cuando el plástico penetra en el campo eléctrico que hay entre las placas sensor, varía el dieléctrico como también el calor de la capacitancia. En la Figura 36 se muestra el sensor capacitivo.



Figura 36. Sensor capacitivo

En el tablero de control se encuentran los elementos como se muestra en la Figura 37.



Figura 37. Tablero de control

2.3.4.2 Etapa de potencia

Diagrama de potencia de la extrusora

En esta etapa se usa una tensión de 330 V para la alimentación del motor reductor, mediante el accionamiento del pulsador y la detección del material utilizando el sensor capacitivo, se activa la bobina del contactor para encender el motor reductor, además existe una protección en la parte inicial. En la Figura 38 se observa el diagrama de conexión del motor trifásico.

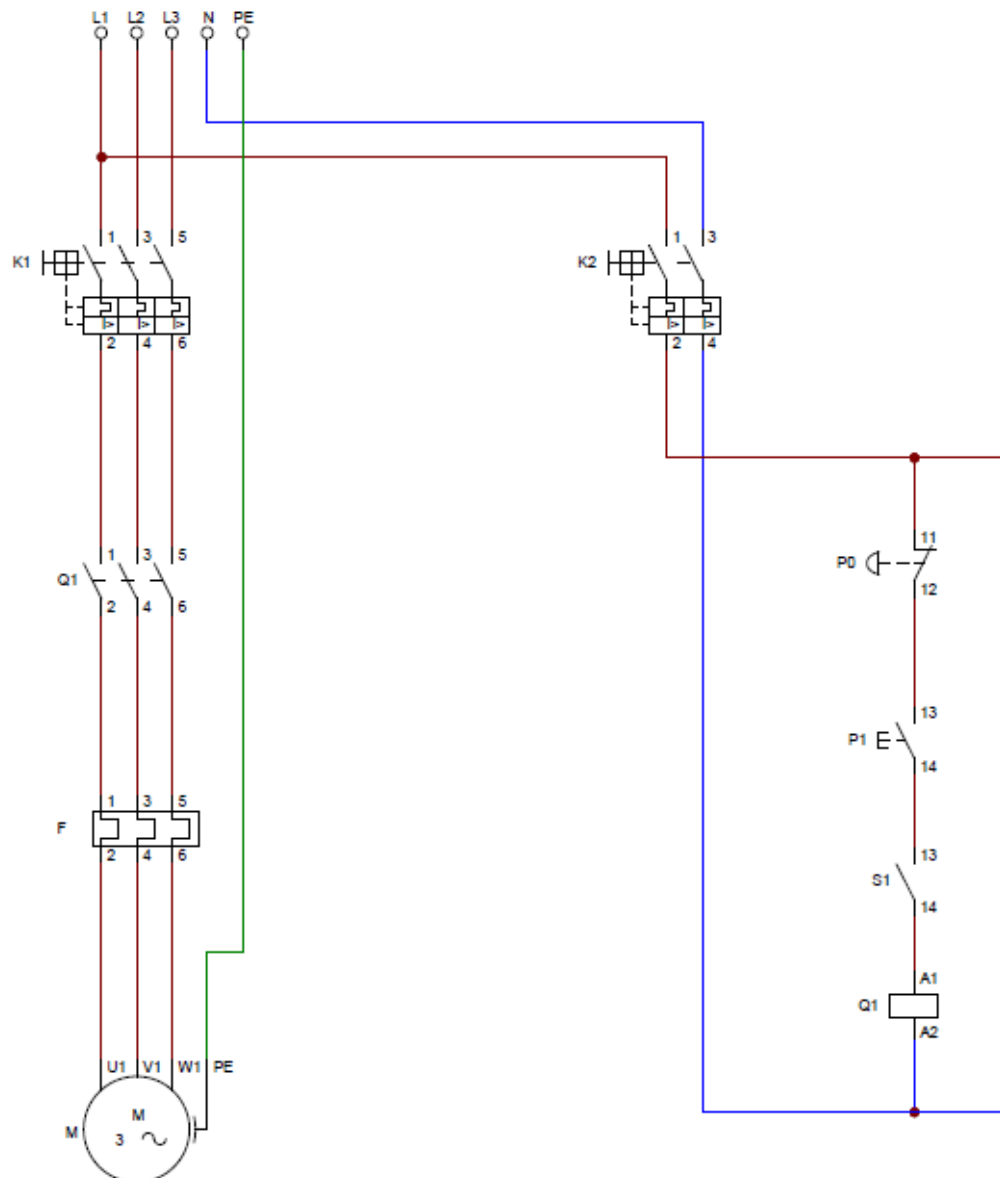


Figura 38. Conexión del motor trifásico

Breaker

Se utiliza breaker de tres polos al inicio de las conexiones para mayor seguridad, con una tensión asignada de empleo de 230 V CA 50/60 Hz hasta 400 V CA 50/60 Hz con una corriente nominal de 63 A, en la Figura 39 se puede observar el breaker, las características se encuentran en el Anexo 5.



Figura 39. Breaker 3 polos

Contactor

Para activar el motor se va a utilizar un contactor de polos normalmente abierto con una tensión de funcionamiento de ≤ 690 V AC, el mismo se observa en la Figura 40, las características se pueden encontrar en el Anexo 6.



Figura 40. Contactor 3 polos

Motor reductor

Con los valores antes calculados para las especificaciones del motor reductor que se encuentran en la Tabla 23, las dimensiones del reductor se las puede encontrar en el Anexo 7, en la Figura 41 se muestra el motor reductor utilizado.

Tabla 23 Especificaciones del motor reductor

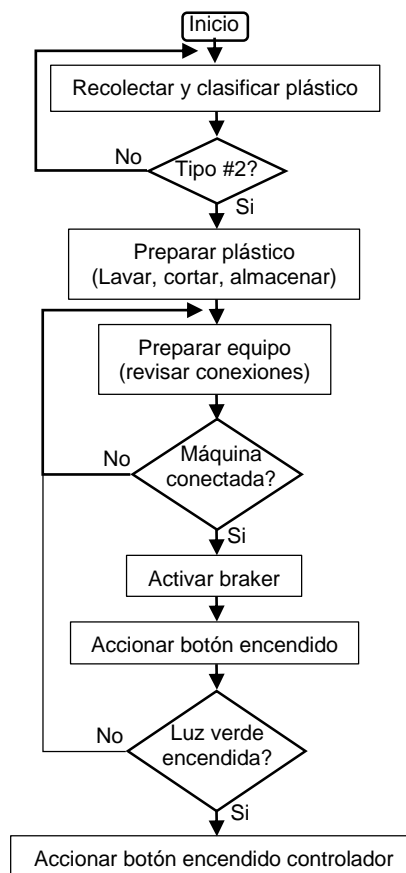
Velocidad	135 rpm
Potencia	2,1 HP
Torque	110 Nm

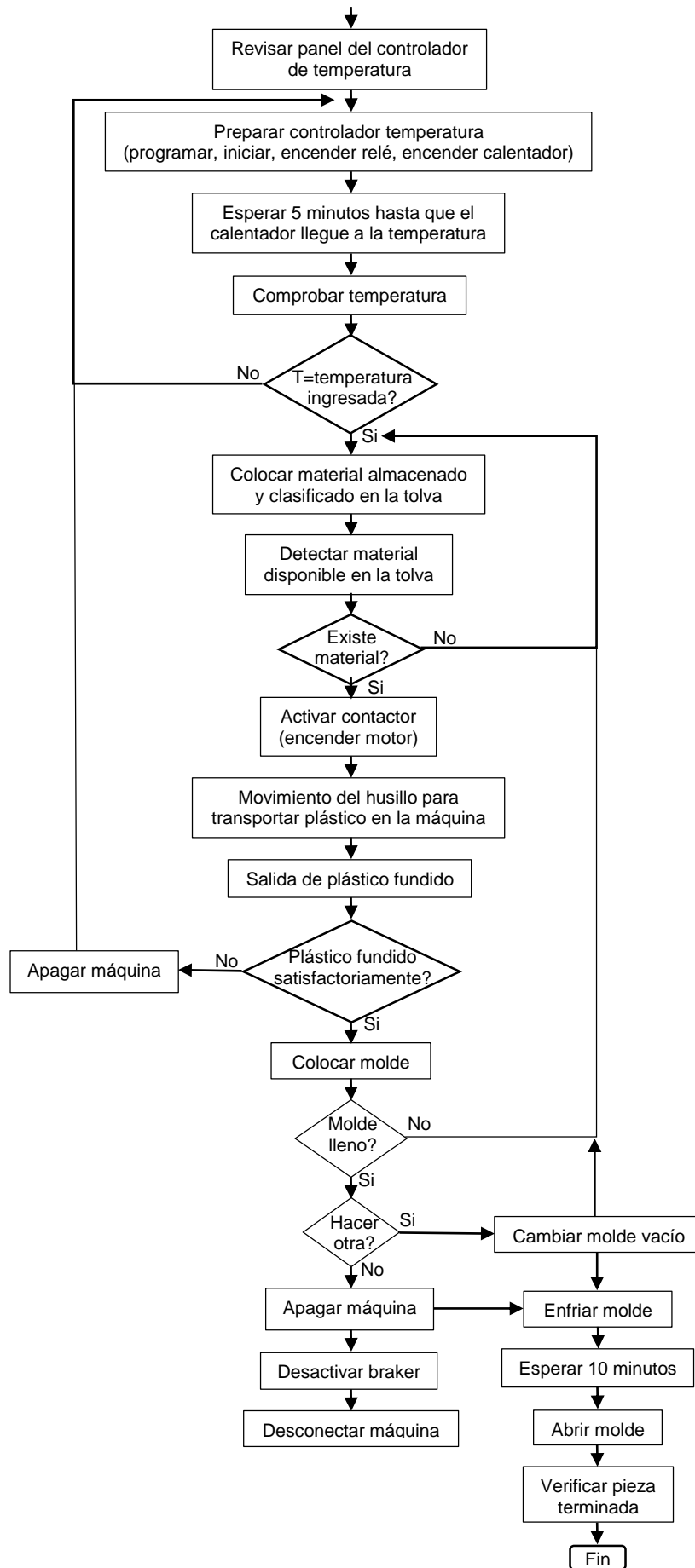


Figura 41. Motor reductor

Diagrama de flujo de la extrusora

En el siguiente flujograma se indica todo el proceso de la extrusora desde la recolección del material hasta llegar a obtener una pieza terminada.





3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al finalizar el diseño y estudio, se empezó a construir la extrusora, se obtuvo como resultado una máquina para fundir plástico en moldes, las especificaciones se observan en la Tabla 24 y en la Figura 42 se muestra la máquina extrusora.

Tabla 24 Especificaciones de la extrusora

Datos	Especificaciones
Densidad del plástico HDPE	0,95 g/cm ³
Volumen de la tolva	4315,02 cm ³
Capacidad de la tolva	4099,27 g
Dimensiones de la extrusora	Altura 1040 mm x Ancho 420 mm x Largo 900 mm
Peso neto	6000 N
Material de la máquina	Acero ASTM A500
Material del molde	Acero ASTM A500
Voltaje	110/ 330 VAC
Capacidad de producción	11,25 kg/h
Calentador de banda	3
Controlador de temperatura	3
Termocupla	3
Relé de estado sólido	3
Sensor capacitivo	1
Selector de encendido	1
Paro de emergencia	1
Luz indicadora	1
Moldes	Cuadrado, circular
Motor reductor	Trifásico
Tiempo de trabajo	8 horas



Figura 42. Máquina extrusora

3.1 PRUEBAS DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN

3.1.1 PRUEBAS DEL SISTEMA MECÁNICO

Las pruebas que se realizan son para verificar el correcto funcionamiento de los elementos mecánicos de la máquina, así se asegura que el proceso de extrusión sea el adecuado. En la Tabla 25 se observa los resultados.

Tabla 25 Pruebas del sistema mecánico

Elemento	Función	Estado
Sistema de alimentación	Sistema que entrega el material plástico, con una capacidad de 4kg.	Ok
Camisa	Sirve para cubrir el husillo.	Ok
Husillo	Se encarga del transporte del plástico durante las etapas de calentamiento.	Ok
Boquilla	Se encuentra al final y es por donde pasa el plástico fundido.	Ok
Molde	Recibe el material fundido para después entregar la pieza.	Ok

3.1.2 PRUEBAS DEL SISTEMA DE CONTROL

Con estas pruebas se debe comprobar el correcto funcionamiento de los elementos de control, como la medición de temperatura de la termocupla, los rangos de temperatura en el controlador se encuentren establecidos, el sensor capacitivo detecte la presencia del material, de tal manera que el proceso de extrusión sea el adecuado. Los resultados se encuentran en la Tabla 26.

Tabla 26 Pruebas del sistema de control

Elemento	Función	Estado
Luz piloto	Indicador de encendido de la máquina. Luz verde: máquina encendida.	Ok
Sensor capacitivo	Indica si existe material en la tolva.	Ok
Termocuplas	Mide la temperatura que tiene el calentador de banda.	Ok
Relés de estado sólido	Activa los calentadores de banda.	Ok
Calentadores de banda	Se encargan de calentar la camisa para que se pueda fundir el plástico.	Ok
Controladores de temperatura	Indican la temperatura programada y la que tienen los calentadores de banda.	Ok
Motor	Mueve el husillo para que el plástico fundido llegue hasta el molde.	Ok

3.1.3 PRUEBAS DE EXTRUSIÓN

Se realizaron 10 pruebas con un molde circular y moldes cuadrados, las cuales se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27 Pruebas de extrusión

Prueba	Molde	Masa	Tiempo de llenado	Calidad
1	Cuadrado	310 gr	7 s	Muy buena
2	Cuadrado	308 gr	6.57 s	Excelente
3	Cuadrado	304 gr	6.53 s	Excelente
4	Cuadrado	305 gr	6.53 s	Muy buena
5	Cuadrado	311 gr	7 s	Buena
6	Cuadrado	310 gr	7 s	Buena
7	Cuadrado	312 gr	7.1 s	Excelente
8	Cuadrado	309 gr	7 s	Excelente
9	Cuadrado	310 gr	7 s	Muy buena
10	Circular	350 gr	11 s	Buena

Después de realizar las pruebas se hicieron cortes en los moldes y se pudo verificar que no existe burbujas en la parte interna, además que se nota que el molde es muy resistente.

3.1.4 SIMULACIÓN DE LAS BARRAS

3.1.4.1 Estudio de la barra cuadrada

Se aplica una carga de 490 N que el peso de una persona promedio. Se muestra en la Figura 43 las sujeciones y cargas sometidas.

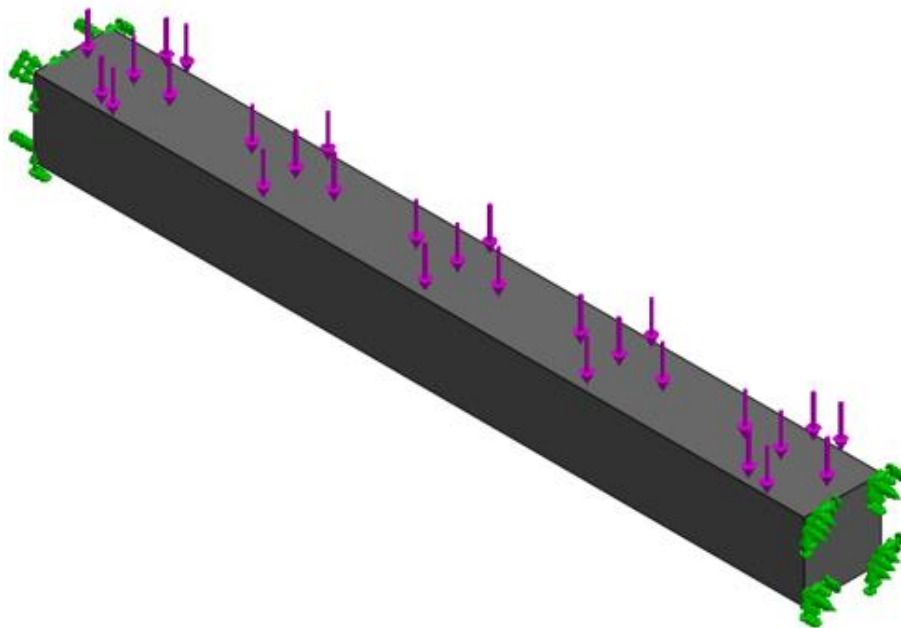


Figura 43. Información de modelo de la barra cuadrada

Las propiedades volumétricas de la barra cuadrada se muestran en la Tabla 28 y en la Tabla 29 se encuentran las propiedades del HDPE.

Tabla 28 Propiedades volumétricas de la barra cuadrada

Propiedades volumétricas	
Masa	0.25704 kg
Volumen	0.00027 m ³
Densidad	952 kg/m ³
Peso	2.51899 N

Tabla 29 Propiedades del material de la barra cuadrada

Propiedades	
Nombre	PE Alta densidad
Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
Límite de tracción	22.1 N/mm ²
Módulo elástico	1070 N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.4101
Densidad	952 kg/m ³
Módulo cortante	377.2 N/mm ²

Después se aplica una malla en la barra cuadrada, la información de la malla se encuentra en la Tabla 30 y el mallado en la Figura 44.

Tabla 30 Información de malla de la barra cuadrada

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño de elementos	3.23254 mm
Tolerancia	0.161627 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	69868
Número total de elementos	47093
Cociente máximo de aspecto	4.4473
% elementos cuyo coeficiente de aspecto es <3	99.9
% elementos cuyo coeficiente de aspecto es >10	0
% elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:05

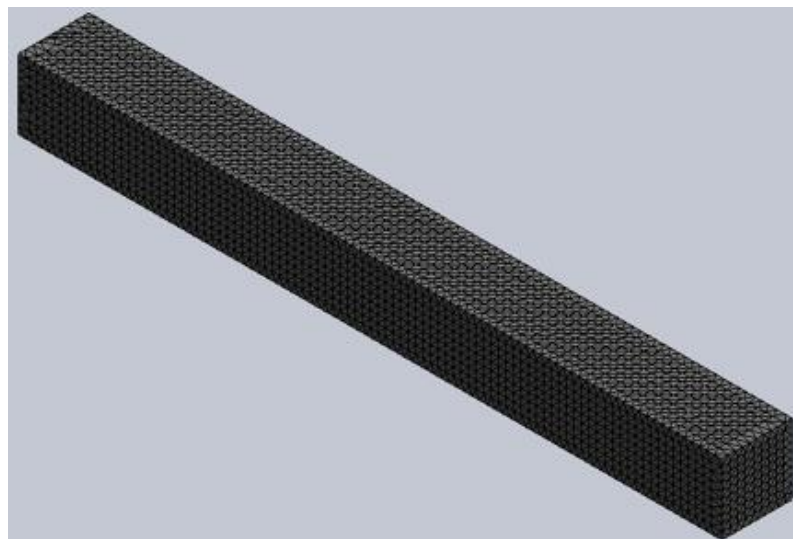


Figura 44. Mallado de la barra cuadrada

En la Tabla 31 se observan las fuerzas resultantes.

Tabla 31 Fuerzas resultantes de la barra cuadrada

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	-0.0049262	489.998	-0.00734711	489.998

El factor de seguridad se muestra en la Figura 45, donde se indica que si soporta las cargas aplicadas.

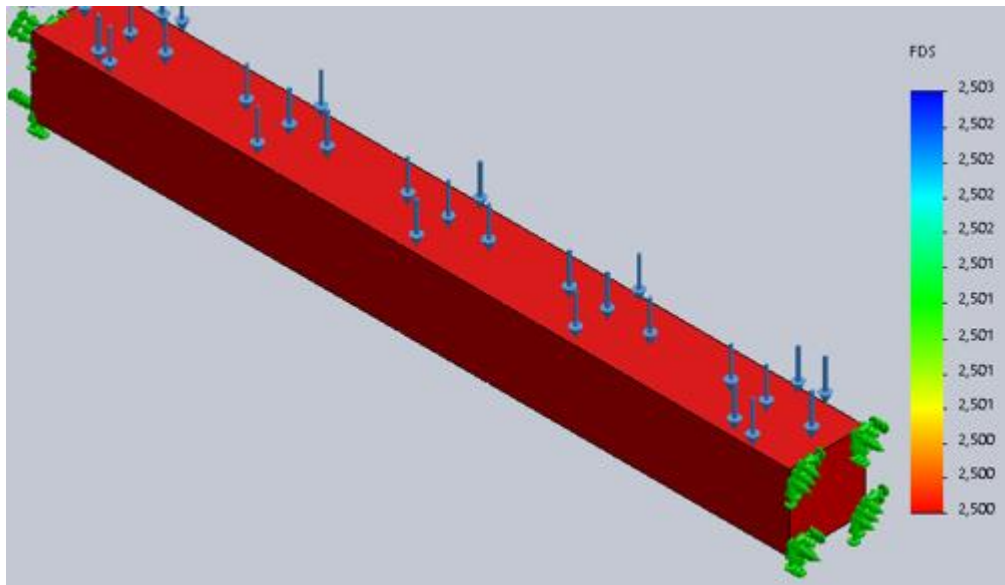


Figura 45. Factor de seguridad de la barra cuadrada

3.1.4.2 Estudio de la barra circular

Para esta barra se colocó una carga de 490 N. En la Figura 46 se observa las sujeciones en los extremos con las fuerzas.

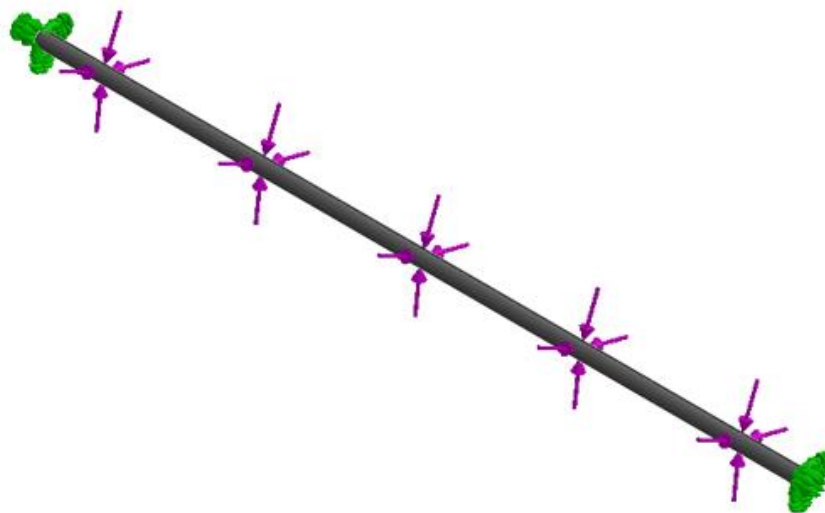


Figura 46. Información de modelo de la barra circular

En la Tabla 32 se muestran las propiedades volumétricas de la barra circular y en la Tabla 33 se observan las propiedades del HDPE.

Tabla 32 Propiedades volumétricas de la barra circular

Propiedades volumétricas	
Masa	0.352914 kg
Volumen	0.000370708 m ³
Densidad	952 kg/m ³
Peso	3.45856 N

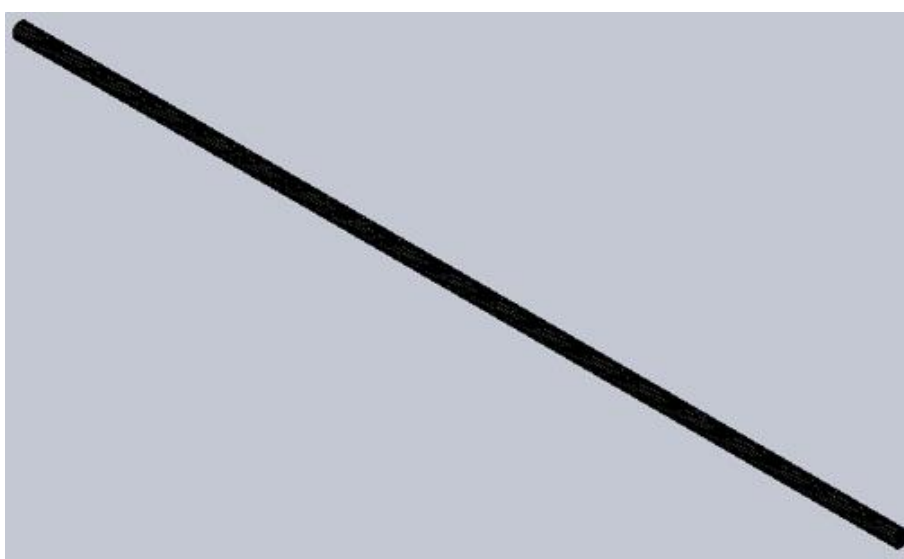
Tabla 33 Propiedades del material de la barra circular

Propiedades	
Nombre	PE Alta densidad
Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
Límite de tracción	22.1 N/mm ²
Módulo elástico	1070 N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.4101
Densidad	952 kg/m ³
Módulo cortante	377.2 N/mm ²

Después se procede a colocar una malla en la barra circular, la información se encuentra en la Tabla 34 y el mallado en la Figura 47.

Tabla 34 Información de malla de la barra circular

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño de elementos	3.59276 mm
Tolerancia	0.179638 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	85146
Número total de elementos	54602
Cociente máximo de aspecto	3.6349
% elementos cuyo coeficiente de aspecto es <3	100
% elementos cuyo coeficiente de aspecto es >10	0
% elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:05

**Figura 47.** Mallado de la barra circular

Las fuerzas resultantes se muestran en la Tabla 35 y en la Figura 48 el factor de seguridad, lo que indica es que si soporta la carga aplicada.

Tabla 35 Fuerzas resultantes de la barra circular

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	-8.8219e-07	7.0589e-06	8.2519e-06	1.0895e-05

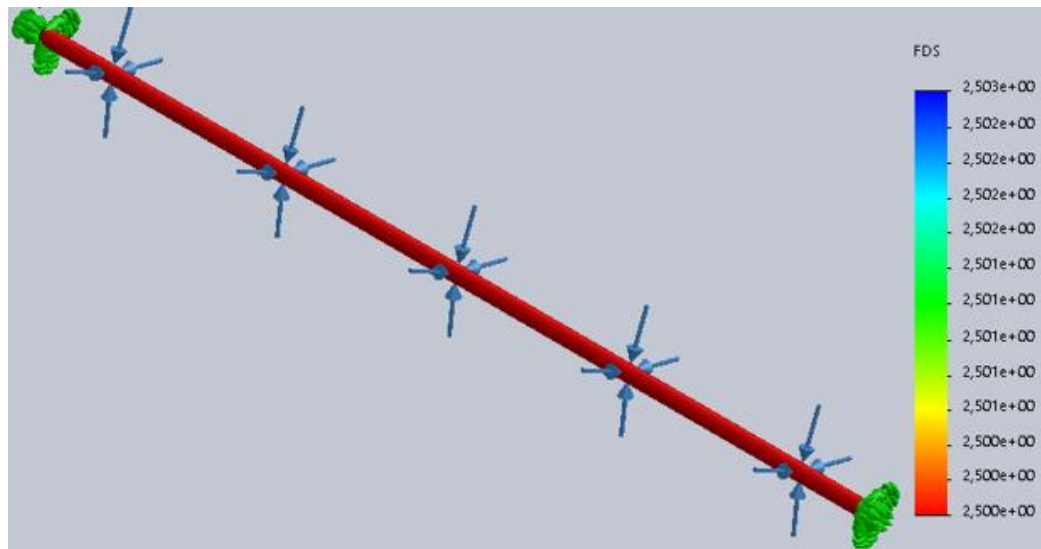


Figura 48. Factor de seguridad de la barra circular

3.2 RESULTADOS DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN

3.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO EN LA EXTRUSORA

En la Figura 49 las barras de plástico, obtenidas en las pruebas se pueden realizar cortes para construir una mesa como se observa en la Figura 50, además de un palo de escoba, el cual se encuentra en la Figura 51.



Figura 49. Barras de plástico



Figura 50. Mesa de plástico



Figura 51. Palo de escoba plástico

3.3 ANÁLISIS DE COSTOS

En este análisis se determina los costos de la máquina, además de los procesos que intervienen en el desarrollo. Los costos totales de la extrusora, entre los cuales se encuentran los elementos electrónicos, de control, mecánicos y procesos para la construcción se observan en las Tablas 36, 37 y 38.

Tabla 36 Costos de elementos de la extrusora

Cantidad	Elemento	V. Unitario	V. Total
1	Sensor capacitivo	\$ 15.00	\$ 15.00
3	Relé de estado sólido	\$ 10.00	\$ 30.00
3	Calentador de banda	\$ 20.00	\$ 60.00
3	Termocupla tipo J	\$ 7.00	\$ 21.00
1	Luz piloto	\$ 1.50	\$ 1.50
1	Pulsador de emergencia	\$ 3.15	\$ 3.15
1	Selector	\$ 2.57	\$ 2.57
3	Controlador de temperatura	\$ 31.20	\$ 93.60
1	Breaker	\$ 10.35	\$ 10.35
1	Contactador	\$ 13.10	\$ 13.10
1	Caja reductora	\$ 272.00	\$ 272.00
1	Motor trifásico	\$ 350.00	\$ 350.00
		Total	\$ 872.27

Tabla 37 Costos para la construcción de la extrusora

Cantidad	Elemento	Material	Costo total
1	Tolva	Plancha de tol Acero ASTM A 36	\$ 25.00
1	Caja de distribución	Plancha de tol Acero ASTM A 36	\$ 30.00
1	Husillo	Acero Aleado 4140	\$130.00
1	Camisa	Acero Aleado 4140	\$ 50.00
1	Boquilla	Acero Aleado 4140	\$ 20.00
3	Molde	Tubo estructural rectangular Acero ASTM A500	\$ 70.00
1	Bancada	Tubo estructural rectangular Acero ASTM A500	\$ 85.00
	Pernos y tuercas		\$ 5.00
	Ensamble		\$ 150.00
		Subtotal	\$ 565.00
		10% Imprevistos	\$ 56.50
		Total	\$ 621.50

Tabla 38 Costo total de la extrusora

Características	Costo
Costos de elementos	\$ 872.27
Costos para la construcción	\$ 621.50
Total	\$ 1493.77

Es costo aproximado de la máquina extrusora es de \$ 1500,00.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- Fue posible obtener una máquina extrusora para reprocesar material plástico HDPE a un costo aproximado de \$1500,00 y así cumplir con el objetivo.
- Con base en las simulaciones realizadas se observa que las barras plásticas soportan las cargas dado a las propiedades del material y pueden ser de sección cuadrada y redonda.
- Se puede realizar en cualquier tipo de molde, pero por costos se obtuvo para barras de sección transversal cuadrada de ancho 30 mm x profundidad 30 mm x largo 360 mm, y barra de sección transversal redonda de diámetro 20mm x largo 1180mm.
- Se pueden utilizar las barras de plástico obtenidas en la realización de muebles, como una mesa o también colocarlo en una escoba, será de gran utilidad en la casa.
- El costo para la fabricación de una barra de plástico en kW-h es de 7,6 centavos de dólar, ya que el kW-h hora cuesta 15 centavos y la pieza tarda en llenarse 7 minutos.

RECOMENDACIONES

- Apagar la máquina extrusora después de limpiar el exceso de material, aprovechando que se encuentra caliente, para poder remover todo.
- Para evitar lesiones o accidentes, utilizar implementos de seguridad como gafas y guantes ya que el molde sale caliente.
- Limpiar las rebabas y dejar enfriar bien el molde para poder sacar la pieza sin ningún inconveniente.
- Se puede colocar un recubrimiento en la parte de los calentadores de banda para evitar quemaduras.
- En la máquina deben ingresar plásticos secos y limpios, sin ninguna basura, grasa o aceite.

BIBLIOGRAFÍA

- Avilés Muñoz, C. A. (2017). Desarrollo de un sistema de extrusión de filamento para impresión 3d de bajo costo. (Tesis de Ingeniería). ESPOL, Guayaquil.
- Beltrán, M., & Marcilla, A. (2012). Tecnología de polímeros. Procesado y Propiedades. España: Diazotec. S.A.
- Detai Electrical Appliance. (2020). Calentador de banda de latón eléctrico. Obtenido de DETAI: <http://es.tubularheating.com/band-heaters/brass-nozzle-band-heater/electric-brass-band-heater.html>
- ECURED. (2020). Sensor capacitivo. Obtenido de ECURED: https://www.ecured.cu/Sensor_capacitivo
- FAYGO UNION . (2019). HDPE Pipe Extrusion Line. Obtenido de <https://faygoplast.com/Products/hdpe-pipe-extrusion-line/>
- Flores Salazar, L. I. (2013). MÁQUINA EXTRUSORA PARA RECICLAJE DE PLÁSTICO. (Tesis de Ingeniería). UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE, Ibarra.
- GESTER. (2018). Tipos De Máquinas Extrusoras De Plástico. Obtenido de <https://www.gester.es/tipos-de-maquinas-extrusoras-de-plastico/>
- Gómez Gómez, J., & Gutiérrez Bedoya, J. E. (2007). Diseño de una extrusora para plásticos. (Tesis de Tecnología). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.
- Gutiérrez Paredes, C. A., & Vargas Ayala, L. E. (2017). Diseño y fabricación de una máquina extrusora para crear el filamento de la impresora 3D a partir de material plástico. (Tesis de Ingeniería). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba.
- Morales Iles, R. X. (2018). Diseño y construcción de una máquina recicladora y extrusora de plástico PLA para el observatorio astronómico de Quito de la EPN. Tesis de Ingeniería. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Mott, R. L. (2009). Diseño de elementos de máquinas (CUARTA EDICIÓN E-BOOK ed.). México: PEARSON EDUCACIÓN.
- Naranjo, C. (2015). Diseño y construcción de una máquina elaboradora de hilo PET. (Tesis de Ingeniería). Universidad Internacional del Ecuador, Quito.
- Ortiz Abata, C. F. (2018). Diseño y construcción de una máquina extrusora de filamentos de 1.75 mm y 3 mm para impresoras 3D, a partir de polímero

reciclado. (Tesis de Ingeniería). Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Latacunga.

PLASTEC USA. (2020). EC720SX. Obtenido de <https://www.plastecusa.com/collections/electrica-1/products/ec720sx>

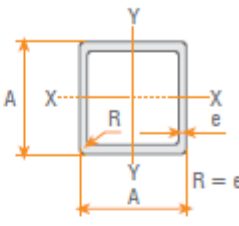
ANEXOS

ANEXO 1

Perfiles para usos estructurales

Perfiles cuadrados ASTM A500

Especificaciones Generales	
Largo normal:	6 mts. Otros largos previa consulta.
Recubrimiento:	Negro.
Extremos:	Lisos de máquina.
Calidades normales:	A270ES • A240ES SAE 1010 • SAE 1008
Otras dimensiones:	A pedido, previa consulta a CINTAC.



Dimensiones nominales		Peso teórico	Área A	Ejes X-X e Y-Y		
A	Espesor			I	W	i
mm	mm	Kgf/m	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm
15	1,0	0,42	0,53	0,17	0,23	0,56
	1,5	0,59	0,75	0,22	0,29	0,54
20	1,0	0,58	0,73	0,43	0,43	0,77
	1,5	0,83	1,05	0,58	0,58	0,74
	2,0	1,05	1,34	0,69	0,69	0,72
25	1,0	0,73	0,93	0,88	0,71	0,97
	1,5	1,06	1,35	1,21	0,97	0,95
	2,0	1,36	1,74	1,48	1,18	0,92
30	1,0	0,89	1,13	1,57	1,05	1,18
	1,5	1,30	1,65	2,19	1,46	1,15
	2,0	1,68	2,14	2,71	1,81	1,13
40	1,0	1,20	1,53	3,85	1,93	1,59
	1,5	1,77	2,25	5,48	2,74	1,56
	2,0	2,31	2,94	6,93	3,46	1,54
	3,0	3,30	4,21	9,28	4,64	1,48

ANEXO 2

Especificaciones del material para el husillo

Estado de suministro

Negro - Bonificado, tolerancia DIN 1013

Laminado con tratamiento térmico de bonificado, tolerancia DIN 1013 (Torneado - Calibrado)

Premaquinado

Forjado

Formas y color:



Composición química (% en peso)

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo
0.38	0.15	0.75	-	-	0.80	0.15
0.43	0.35	1.00	0.035	0.040	1.10	0.25

Densidad: 7.87 g/cm³ (0.284 lb/in³)

Propiedades mecánicas mínimas estimadas SAE J1397

Tipo de proceso y acabado	Resistencia a la tracción		Límite de Fluencia		Alarga/ en 2" (%)	Reducción de área (%)	Dureza (HB)	Relación de maquinabilidad 1212 EF =100%
	MPa	PSI	MPa	PSI				
Caliente y maquinado	614	89000	427	62000	26	57	187	70
Estirado en frío	703	102000	620	90000	18	50	223	
Templado y revenido*	1172	170000	1096	159000	16	50	341	-

* Sólo como guía, pues dependen de variables como composición química real, temperaturas de tratamiento, diámetro de la barra.

Tratamientos térmicos recomendados (Valores en °C)

Forjado	Normalizado	Recocido		Templado	Revenido	°T Crítica aproximada	
		Ablanda/.	Regeneración			Ac1	Ac3
1050-1200	870 - 900	680 - 720	815 - 850 Enfriar en horno	830-850 Agua/Aceite	500 - 650	750	790

Características

Acero de baja aleación al Cromo Molibdeno. Se suministra con o sin tratamiento de bonificado (temple y revenido). Se utiliza en forma general en la fabricación de piezas de medianas dimensiones que requieran alta resistencia mecánica y tenacidad. Buena resistencia a torsión y fatiga. Buena maquinabilidad y baja soldabilidad.

Aplicaciones

Es utilizado en piezas de medianas dimensiones que exigen elevada dureza, resistencia mecánica y tenacidad, tales como ejes, pasadores, cigüeñales, barras de torsión, engranajes de baja velocidad, tuercas y pernos sometidos a grandes esfuerzos, árboles de transmisión, émbolos, bielas y rotores.

ANEXO 3

Especificaciones de plancha de tol



Laminado Al Caliente (Estándar)

Especificaciones Generales +

Norma	ASTM A 36 - S1 37.2
pesores	0,20mm a 8mm
Rolls	X 1219
lanchas	4 X 8
	Medidas y calidades especiales bajo pedido.

APLICACIONES

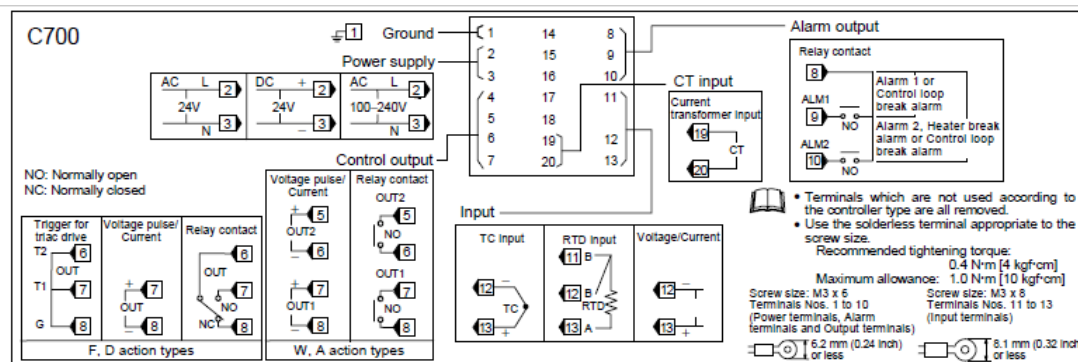
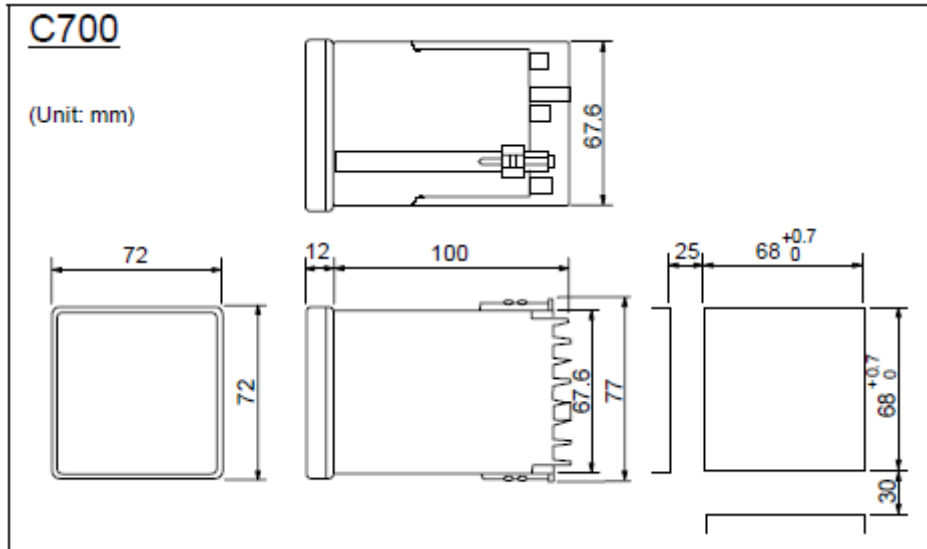
Tablas de grandes dimensiones.
Cajones.
Muebles.
Carpintería de obra.
Barras.
Escaleras.
Caminos de yerro.
Estructuras de acero.
Cimentación de puentes.
Fabricación de tanques.
Conformación de estructuras en grandes elementos de obra.



Ancho	Largo	Espesor	Peso Aprox.
mm	mm	mm	kg.
1220	2440	1,50	35,05
1220	2440	2,00	46,74
1220	2440	3,00	70,10
1220	2440	4,00	93,47
1220	2440	5,00	116,84
1220	2440	6,00	140,21
1220	2440	8,00	186,94
1220	2440	9,00	210,31
1220	2440	10,00	233,68
1220	2440	12,00	280,41

ANEXO 4

Especificaciones del controlador de temperatura CAMSCO REX-C700



Specifications

Input:
Input type: K, J, R, S, B, E, T, N, PLII, W5Re/W26Re, U, L
 Thermocouple: Input impedance: Approx. 1 MΩ
 RTD: Pt100, JPt100
 Voltage: 0 to 5 V DC; 1 to 5 V DC
 Input impedance: 250 kΩ or more
 Current: 0 to 20 mA DC; 4 to 20 mA DC
 Input impedance: Approx. 250 Ω
Sampling cycle: 0.5 seconds
Input range: See Input range table
Control method: PID control
 ON/OFF, P, PI, or PD actions is available

Control output:
 Relay contact output: 250 V AC, 3A (Resistive load)
 Electrical life: 300,000 times or more (Rated load)
 Voltage pulse output: 0/12 V DC
 (Load resistance 600 Ω or more)
 Current output: 4 to 20 mA DC
 (Load resistance 600 Ω or less)
 Trigger output (for triac driving):
 Zero cross method for medium capacity triac driving (100 A or less)
 Load voltage used: 100 V AC line, 200 V AC line
 Load used: Resistive load

Alarm output:
 Relay contact output:
 250 V AC, 1A (Resistive load)
 Electrical life: 50,000 times or more (Rated load)

Heater break alarm function:
 Measured current:
 0 to 30 A (CTL-6-P-N)
 0 to 100 A (CTL-12-S56-10L-N)
 Input rating: Maximum current rating: 120 mA
 Input impedance: Approx. 2.5 Ω

Performance:
Display accuracy (at the ambient temperature 23 °C ± 2 °C):
 Thermocouple:
 ± (0.5 % of display value + 1 digit) or ± 3 °C [6 °F]
 Whichever is greater
 R and S input: 0 to 399 °C [0 to 799 °F]:
 ± 6 °C [12 °F]
 B input: 0 to 399 °C [0 to 799 °F]:
 Accuracy is not guaranteed.
 RTD: ± (0.5 % of display value + 1 digit) or ± 0.8 °C [1.6 °F] whichever is greater
 Voltage/Current: ± (0.5 % of span + 1 digit)

Memory backup:
 Backed up by Nonvolatile Memory
 Number of write times: Approx. 100,000 times
 Data storage period: Approx. 10 years

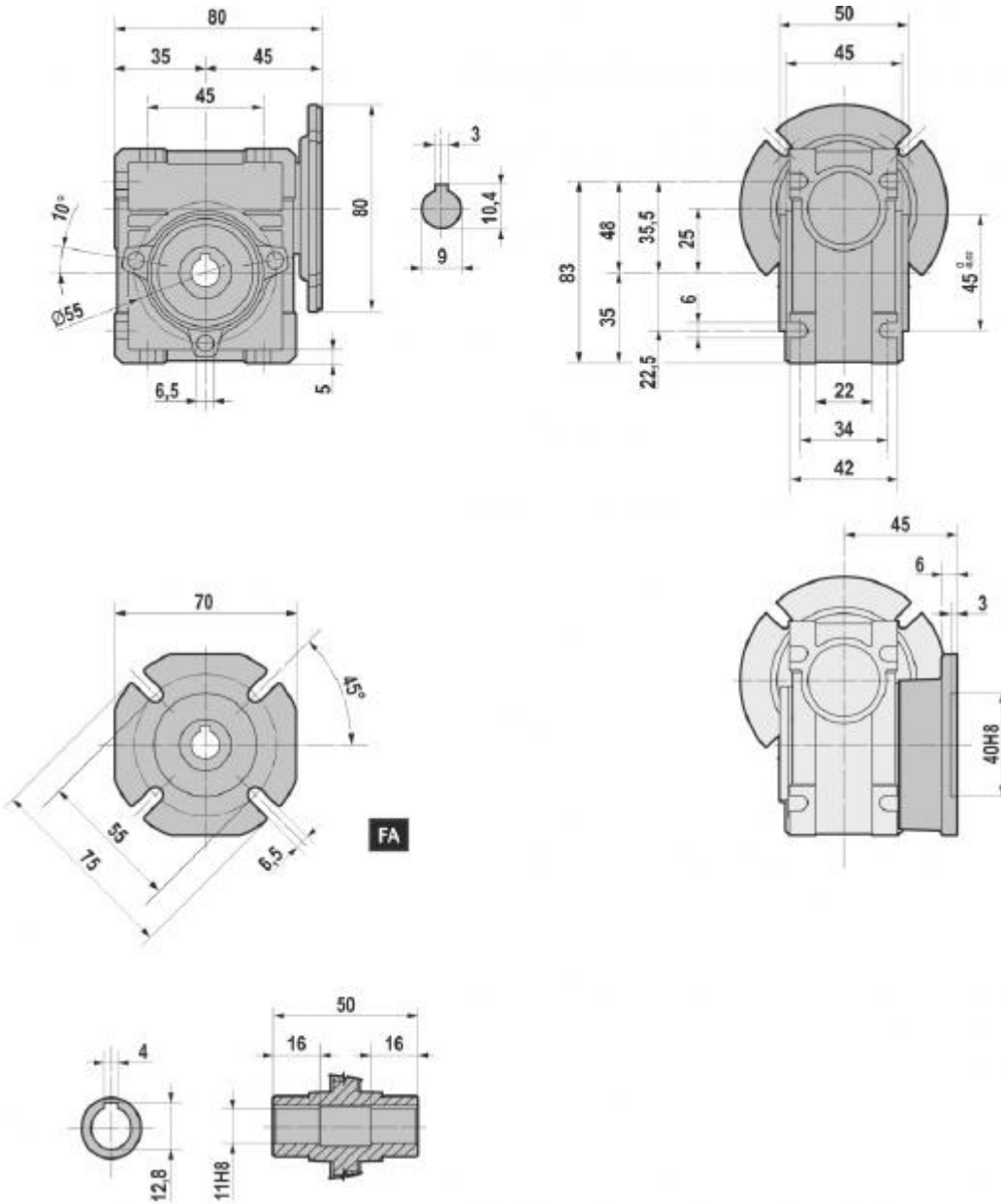
Power:
Power supply voltage:
 85 to 264 V AC (Power supply voltage range), 50/60 Hz
 Rating: 100 to 240 V AC
 21.6 to 26.4 V AC (Power supply voltage range), 50/60 Hz
 Rating: 24 V AC
 21.6 to 26.4 V DC (Power supply voltage range)
 Rating: 24 V DC

Power consumption:
 6 VA max. (at 100 V AC)
 9 VA max. (at 240 V AC)
 6 VA max. (at 24 V AC)
 145 mA max. (at 24 V DC)

Weight:
 C100: Approx. 170 g
 C700: Approx. 250 g
 C400/C410: Approx. 260 g
 C900: Approx. 340 g

ANEXO 5

Dimensiones del reductor



ANEXO 6

Planos de la extrusora

Plano 1.- Tolva

Plano 2.- Husillo

Plano 3.- Camisa

Plano 4.- Mesa

Plano 5.- Vista Isométrica

1

2

3

4

5

6

7

8

A

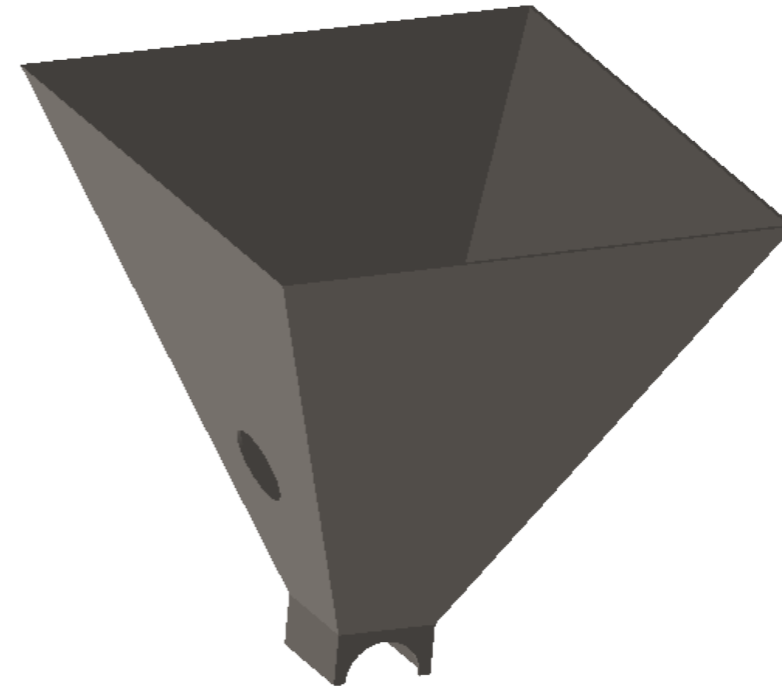
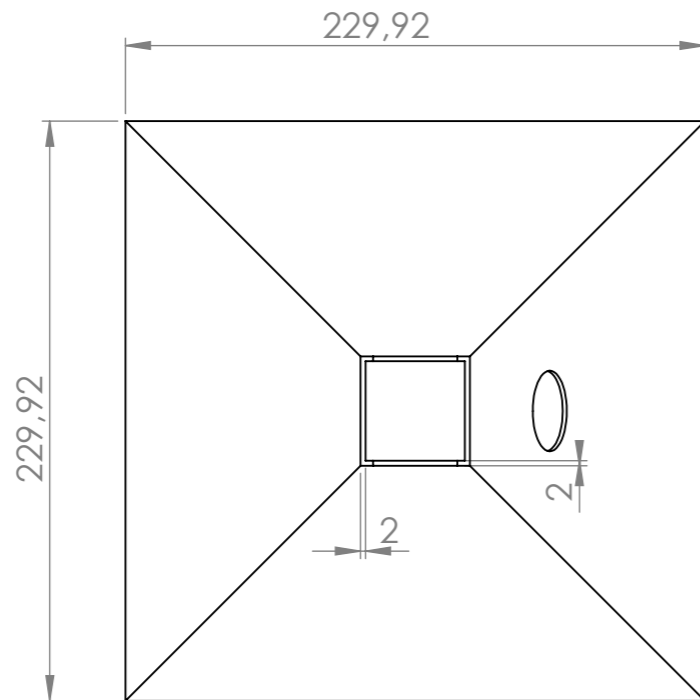
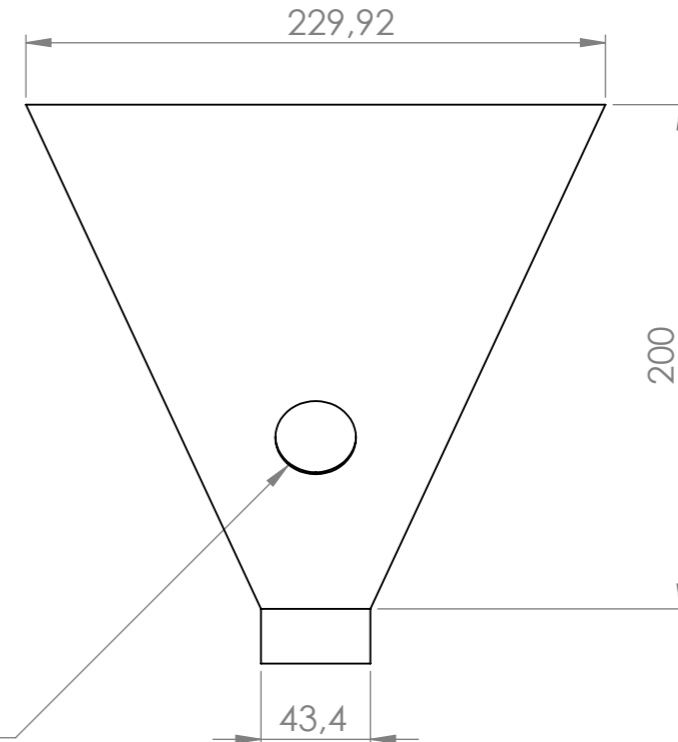
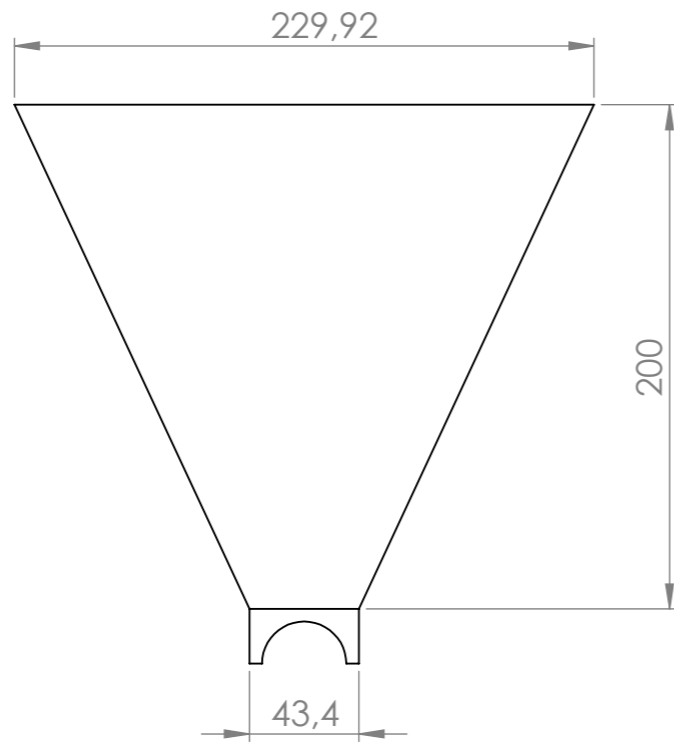
B

C

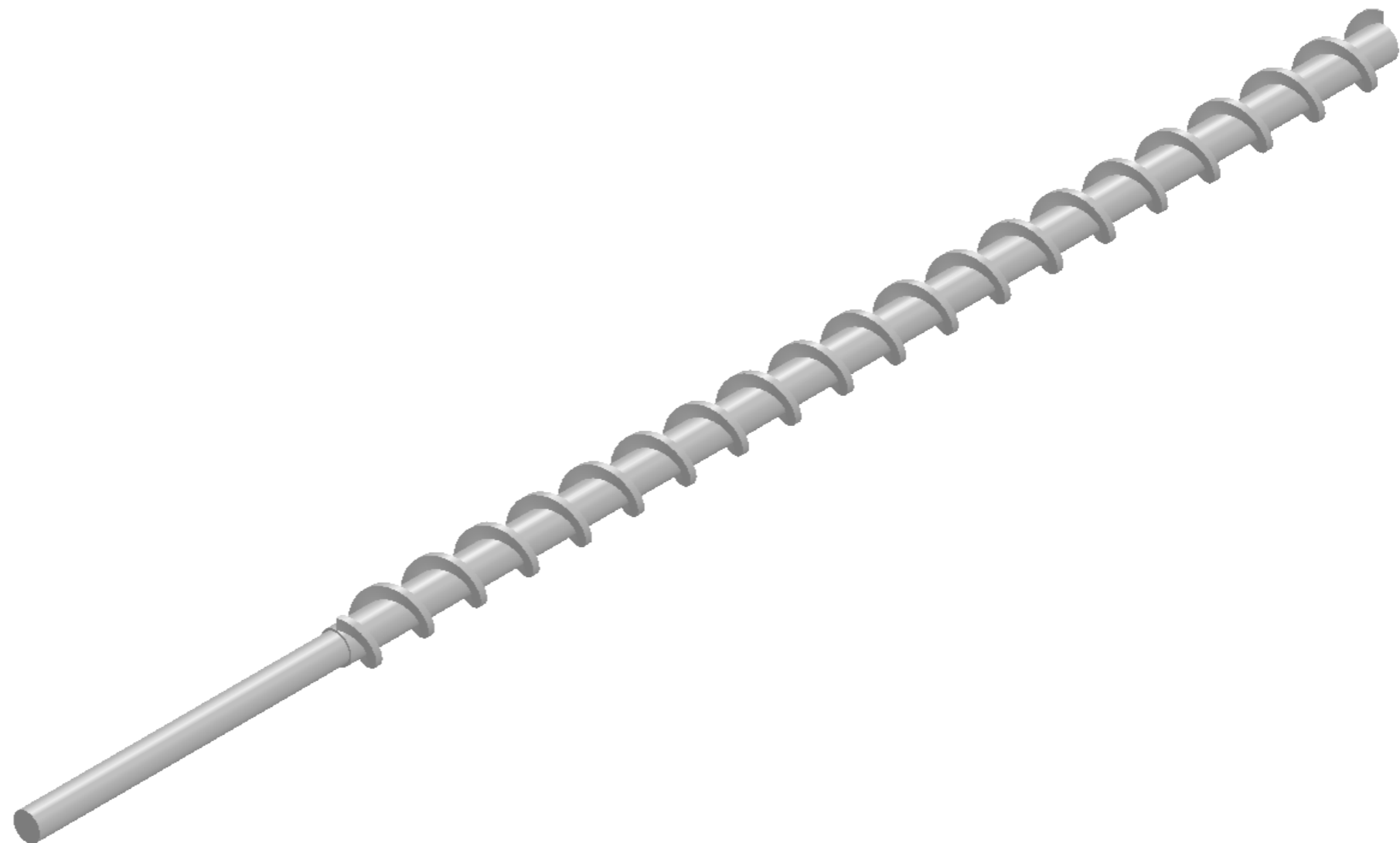
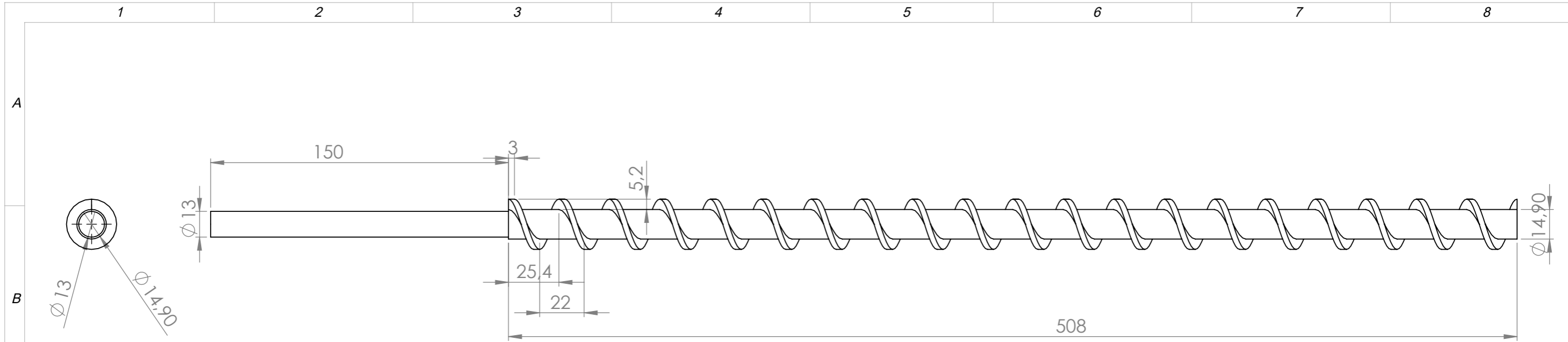
D

E

F



				TOLERANCIA:	PESO [Kg]:	MATERIAL:	
				± 0.1	1.72	Tol	
					Fecha	Nombre	ESCALA:
				Dibujado	19/06/2020	Noe Garzón	
				Revisado	14/07/2020	Ing. Luis Hidalgo	
				Aprobado	26/07/2020	Ing. Luis Hidalgo	HOJA:
				FIRMA / EMPRESA:		DIBUJO N°:	
				Universidad UTE Ingeniería Mecatrónica		1	A3
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				



				TOLERANCIA:	PESO [Kg]:	MATERIAL:	
				± 0.1	1.008	AISI 4140 Acero recocido	
				Fecha	Nombre	Husillo	
				Dibujado 19/06/2020	Noe Garzón		
				Revisado 14/04/2020	Ing. Luis Hidalgo		
				Aprobado 26/07/2020	Ing. Luis Hidalgo	ESCALA:	
				FIRMA / EMPRESA:		DIBUJO Nº:	1:2:5
				Universidad UTE Ingeniería Mecatrónica		2	HOJA:
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				A3

1

2

3

4

5

6

7

8

A

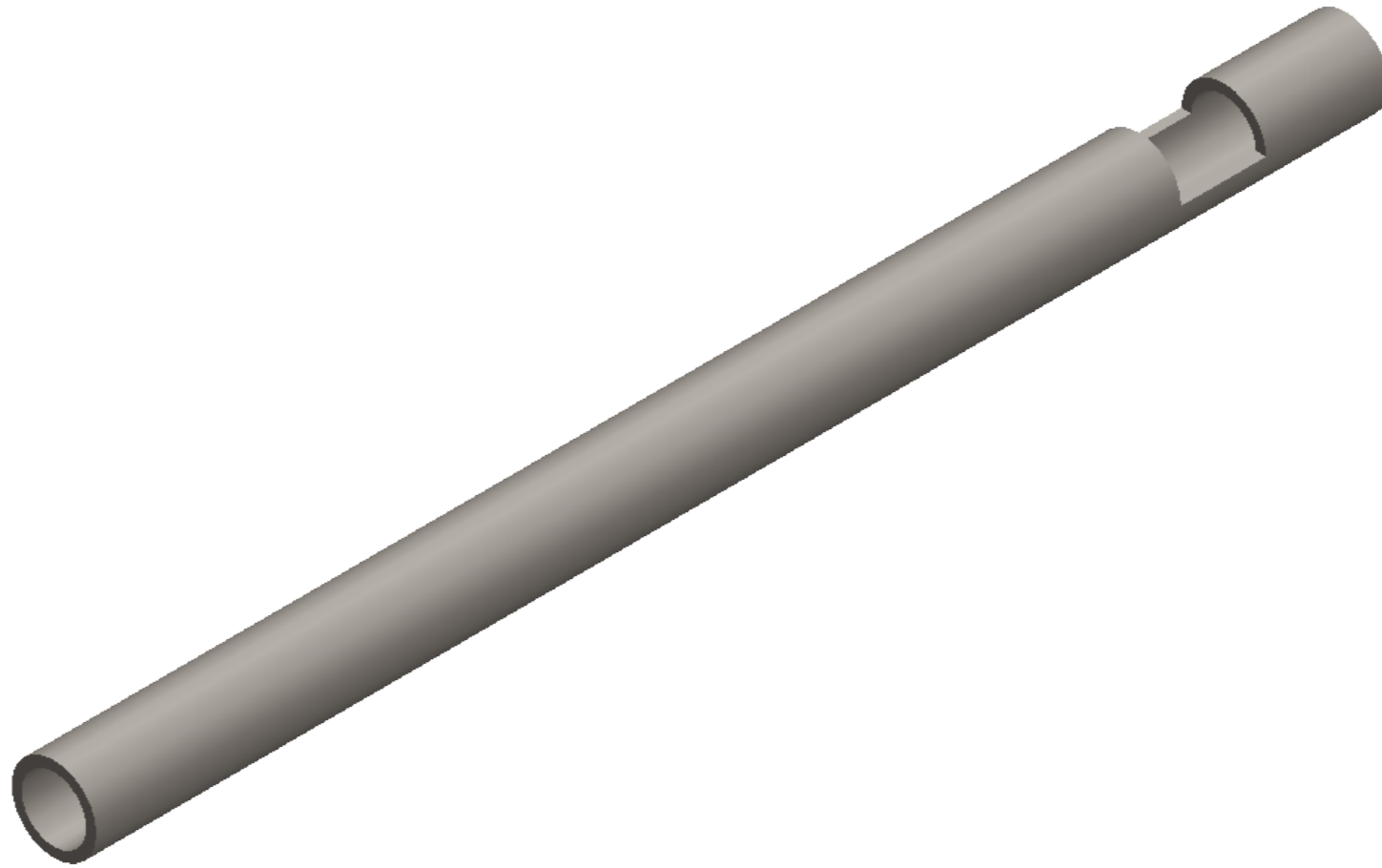
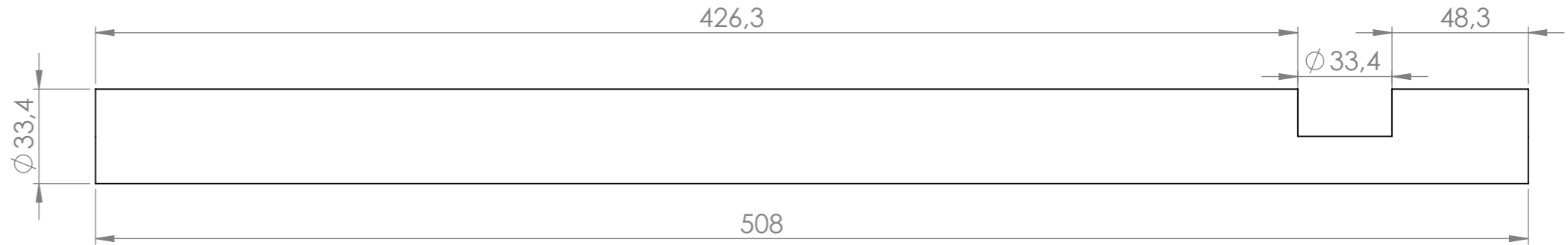
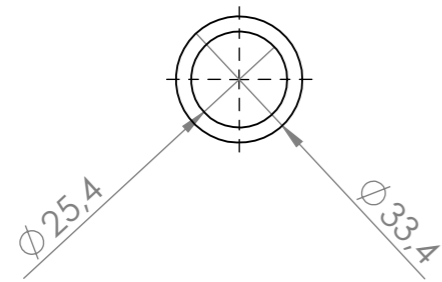
B

C

D

E

F



				TOLERANCIA:	PESO [Kg]:	MATERIAL:	
				± 0.1	1.42	AISI 4140 Acero recocido	
					Fecha	Nombre	<h1>Camisa</h1>
				Dibujado	19/06/2020	Noe Garzón	
				Revisado	14/07/2020	Ing. Luis Hidalgo	
				Aprobado	26/07/2020	Ing. Luis Hidalgo	ESCALA:
				FIRMA / EMPRESA:		DIBUJO N°:	1:2:5
				Universidad Ute Ingeniería Mecatrónica		3	HOJA:
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				A3

1

2

3

4

5

6

7

8

A

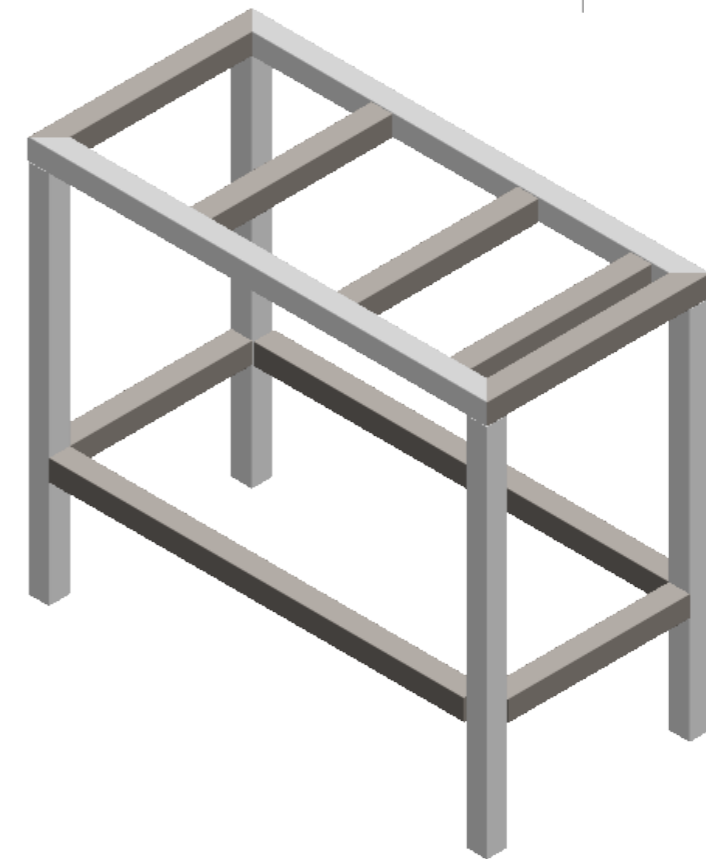
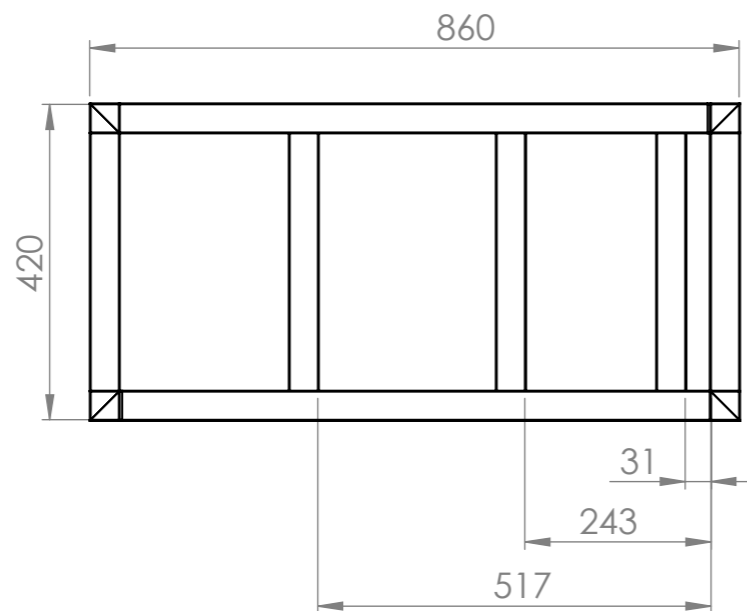
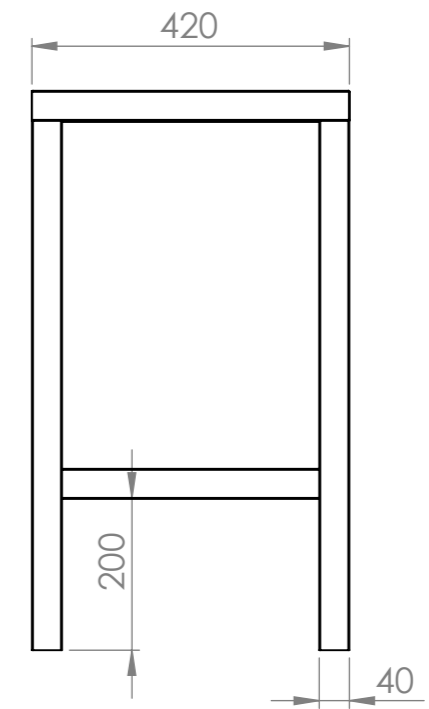
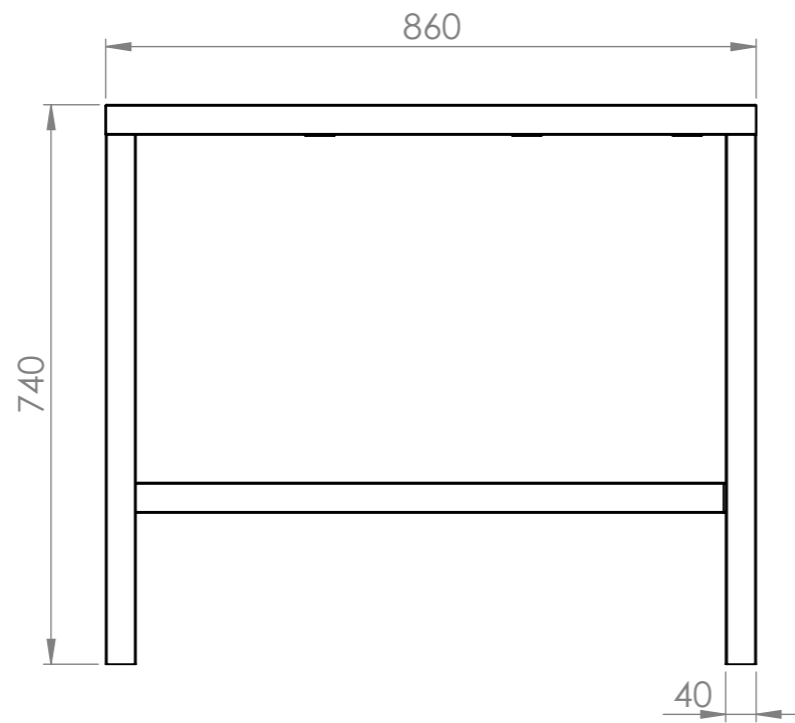
B


C

D

E

F



				TOLERANCIA:	PESO [Kg]:	MATERIAL:	
				± 0.1	58.3	Acero ASTM A500	
					Fecha	Nombre	Mesa
				Dibujado	16/06/2020	Noe Garzón	
				Revisado	14/07/2020	Ing. Luis Hidalgo	
				Aprobado	26/07/2020	Ing. Luis Hidalgo	ESCALA:
				FIRMA / EMPRESA:		DIBUJO N°:	1:9
				Universidad UTE Ingeniería Mecatrónica		4	HOJA:
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				A3

A

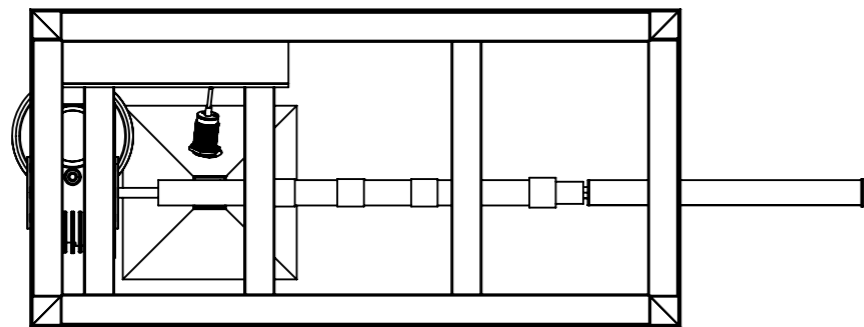
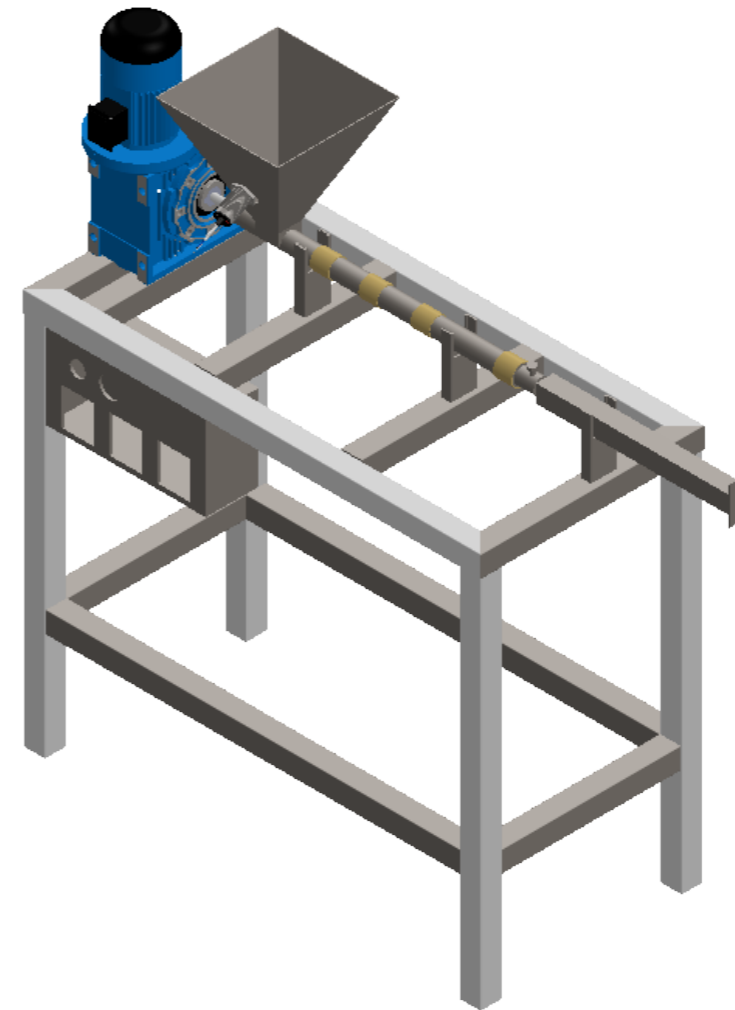
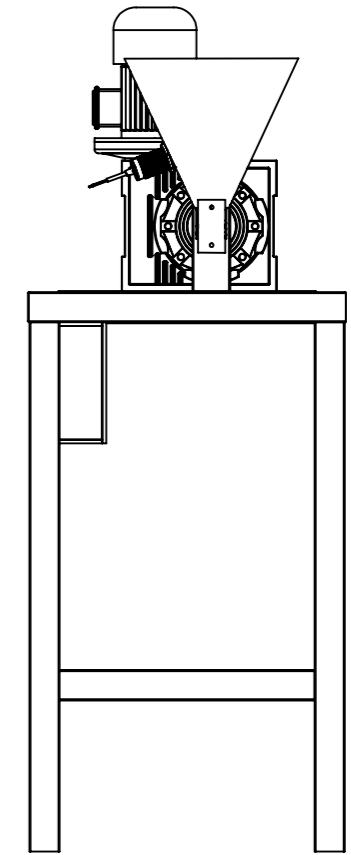
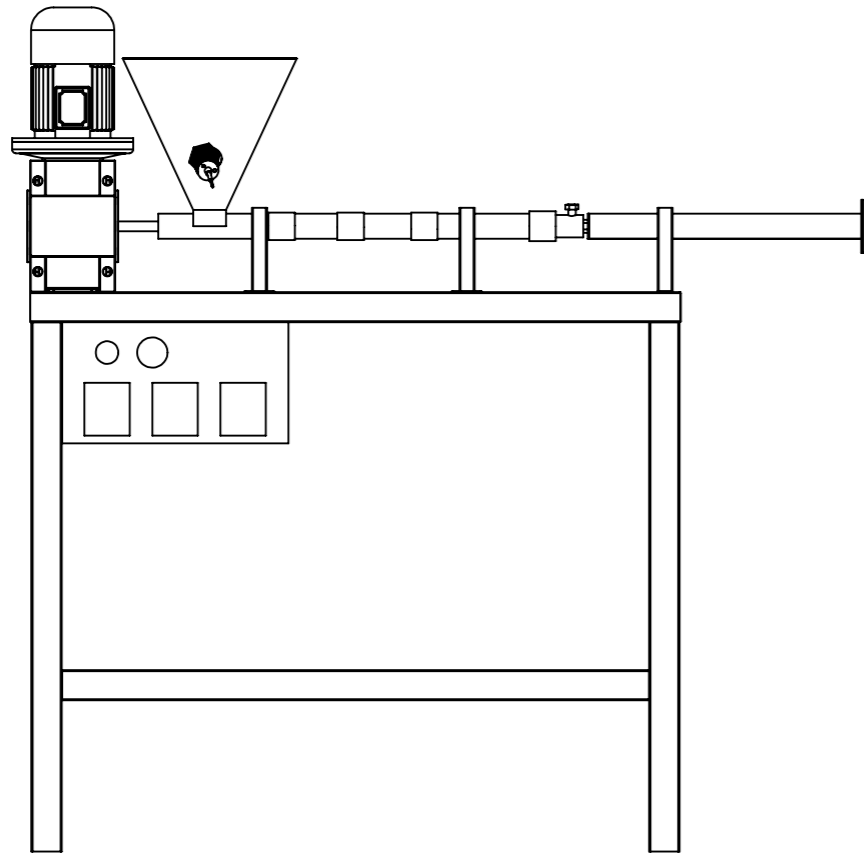
B


C

D

E

F



				TOLERANCIA:	PESO [Kg]:	MATERIAL:	
				± 0.1	76.08	Varios	
					Fecha	Nombre	Extrusora ESCALA: 1:10
				Dibujado	19/06/2020	Noe Garzón	
				Revisado	14/07/2020	Ing. Luis Hidalgo	
				Aprobado	26/07/2020	Ing. Luis Hidalgo	DIBUJO Nº: 5 HOJA: A3
				FIRMA / EMPRESA:			
				Universidad UTE Ingeniería Mecatrónica			
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				