

**FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y
URBANISMO**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
ELÉCTRICA**

TESIS

**DISEÑO DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA DE
PELLETS DE PET PARA OBTENER FILAMENTO
DE IMPRESORAS 3D DE 1.75MM EN LA
UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPÁN**

**PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
MECÁNICO ELECTRICISTA**

Autor:

Bach. Rios Mendoza Yony Joel
<https://orcid.org/0000-0001-5025-3637>

Docente:

Mg. Ing. Vives Garnique Juan Carlos
<https://orcid.org/0000-0003-0988-9881>

Línea de investigación:

Infraestructura, Tecnología y Medio Ambiente

Pimentel – Perú

2021

DISEÑO DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA DE PELLETS DE PET PARA OBTENER FILAMENTOS DE IMPRESORAS 3D DE 1.75 MM EN LA UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPÁN

Aprobacion del Jurado

MG. VIVES GARNIQUE JUAN CARLOS

Asesor

MG. ALVARADO SILVA CARLOS ALEXIS

Presidente Del Jurado De Tesis

MG. GASTIABURÚ MORALES SILVIA YVONE

Secretario

DEDICATORIA

Lleno de regocijo, dedico con todo mi corazón esta tesis a mis padres, esposa e hija, pues sin ellos no había logrado alcanzar una de mis tantas metas, quienes sentaron las bases de responsabilidad y deseos de superación día a día.

AGRADECIMIENTO

Mi eterno agradecimiento en primer lugar a Dios por la vida prestada y su constante compañía.

A mi familia por su apoyo incondicional, en especial a mi madre y padre por ser el pilar más importante y por demostrarme en cada momento su cariño, amor y apoyo incondicional sin importar los obstáculos presentados en el camino de la vida.

Mis sinceros agradecimientos a la Facultad, en especial a la carrera de ingeniería mecánica eléctrica por los sólidos conocimientos establecidos en mi persona en esta etapa de mi vida.

A los docentes de mencionada carrera por haber compartido sus conocimientos y su experiencia, en especial a mi asesor de tesis

DISEÑO DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA DE PELLETS DE PET PARA OBTENER FILAMENTO DE IMPRESORAS 3D DE 1.75MM EN LA UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPÁN

DESIGN OF A PET PELLET EXTRUDER MACHINE TO OBTAIN FILAMENT FROM 1.75MM 3D PRINTERS AT UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPÁN

Rios Mendoza Yony Joel¹

RESUMEN

En esta investigación se propone el diseño de un prototipo para extruir RPET (recycled Polyethylene terephthalate) con la finalidad de obtener filamentos de 1,75 mm para el uso en impresoras 3D; para ello se realizó un diseño conceptual del sistema de extrusión utilizando una matriz morfológica y matriz de ponderados. El diseño se centró en el dimensionamiento del cañón, husillo extrusor y resistencias termicas que mediante un análisis de flujo de material, presiones internas y potencias absorbidas en cada zona de trabajo del eje extrusor se obtuvieron las dimensiones del diámetro y longitud de 1,75 cm y 42 cm respectivamente para una velocidad de 105rpm y potencia mecánica de 2524.1 W para una capacidad de 12.6kg/h. Considerando una temperatura de 260° para la fusión del polimero a extruir se determinó mediante el análisis de transferencia de calor cilíndrica (convección y conducción) una potencia termica de 3kW. La validación de la Resistencia, deformación y presiones en el interior del sistema extrusor fueron validados utilizando software CAE (Ingeniería Asistida por Coputador), obteniendo resultados favorables para el buen desempeño de la propuesta.

Palabras claves: RPET, potencia calorífica, potencia mecánica, CAE.

¹Adscrito a la escuela profesional de ingeniería mecánica eléctrica, pregrado, Universidad señor de sipán, Pimentel, peru, rmendozayony@crece.uss.edu.pe y código ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5025-3637>

ABSTRACT

This research proposes the design of a prototype to extrude RPET (recycled Polyethylene terephthalate) in order to obtain 1.75 mm filaments for use in 3D printers; For this, a conceptual design of the extrusion system was carried out using a morphological matrix and weighted matrix. The design focused on the sizing of the barrel, extruder screw and thermal resistances that by means of an analysis of material flow, internal pressures and absorbed powers in each working area of the extruder shaft, the dimensions of diameter and length of 1.75 cm were obtained and 42 cm respectively for a speed of 105rpm and mechanical power of 2524.1 W for a capacity of 12.6kg / h. Considering a temperature of 260° for the fusion of the polymer to be extruded, a thermal power of 3kW was determined by means of the analysis of cylindrical heat transfer (convection and conduction). The validation of the resistance, deformation and pressures inside the extruder system were validated using CAE software (Computer Assisted Engineering), obtaining favorable results for the good performance of the proposal.

Key words: RPET, calorific power, mechanical power, CAE.

Indice

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
DISEÑO DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA DE PELLETS DE PET PARA OBTENER FILAMENTO DE IMPRESORAS 3D DE 1.75MM EN LA UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPÁN	v
RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
I. INTRODUCCIÓN	11
1.1 Realidad Problemática.	11
1.2 Trabajos Previos.	12
1.3 Teorías Relacionadas al Tema.....	15
1.3.1 Termoplasticos.	15
1.3.2. Peletizado de polímeros.....	16
1.3.2 Filamentos de termoplasticos.	17
1.3.3 Diseño de Máquinas.....	18
1.3.4 Sistema de Transmisión.	18
1.3.5. Transferencia de calor multicapa en un cilindro.....	19
1.4 Formulación del Problema.	19
1.5 Justificación.....	20
1.6 Hipótesis.....	20
1.7 Objetivos.	20
1.7.1 Objetivo General.....	20
1.7.2 Objetivos Específicos.....	21
II. MATERIAL Y MÉTODO	21
2.1 Tipo y diseño de Investigación.....	21
2.2 Población y Muestra.	21
2.3 Variable, Operacionalización.	21
2.3.1 Variable.....	21
2.4 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Dato, Validez y Confiabilidad.	24
2.4.1 Técnicas.....	24
2.4.2 Instrumentos.	24
2.2.3 Validez y Confiabilidad.	24
2.5 Procedimiento de Análisis de Datos.	25
2.6 Aspectos Éticos.....	25
2.6.1 Código de Ética del Colegio de ingenieros (CIP).....	25
2.6.2 Código de Ética de Investigación de la Universidad Señor de Sipán (USS) .	26

2.7	Criterios de Rigor Científico.	26
2.7.1	Veracidad.	26
2.7.2	Aplicabilidad.	26
2.7.3	Consistencia.....	26
2.7.4	Neutralidad.	26
III.	RESULTADOS	26
3.1	Características del RPET.....	26
3.2	Determinar el diseño conceptual óptimo:	28
3.3	Diseño paramétrico de acuerdo a las cargas aplicadas y análisis estructural de las partes más críticas de la máquina.	42
3.3.1	Parámetros de diseño:	42
3.3.2.	Geometría del tornillo	43
3.1.3.	Análisis del movimiento del polímero en la extrusora.....	45
3.4.	Discusiones de resultados	62
	Conclusiones:	63
	Recomendaciones:	63
	Referencias:	64

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalizacion de variables	22
Tabla 2 - Datos técnicos del PET.....	27
Tabla 3 – Análisis de criterios técnicos.....	40
Tabla 4 – Análisis de criterios económicos.....	41
Tabla 5 – Resultados de ponderados para cada solución o diseño conceptual.....	41
Tabla 6- Valores dimensionales de una máquina extrusora de plástico de laboratorio convencional.....	42
Tabla 7 Datos iniciales recomendados para el diseño.....	43
Tabla 8 - Distribución de los flujos de corte en cada zona del tornillo.....	47
Tabla 9: Diferentes radios de la imagen 17.....	52
Tabla 10: Selección del variador de frecuencia.....	61
Tabla 11: Selección de las resistencias para cada zona.....	61

INDICE DE IMAGENES

Imagen 1 Esquema de la geometría del cilindro multicapa: (a) Cilindro sólido, (b) Cilindro anular.....	19
Imagen 2 – Caja negra	28
Imagen 3– Control del proceso de extrusión.....	29
Imagen 4 – Estructura de funciones del proceso de extrusión	30
Imagen 5 – Estructura de funciones del proceso de extrusión	31
Imagen 6 – Estructura de funciones del proceso de extrusión	32
Imagen 7 – Diseño conceptual 01.....	33
Imagen 8 – Diseño Conceptual 02.....	34
Imagen 9 – Diseño Conceptual 03.....	35
Imagen 10 – Diseño Conceptual 04.....	37
Imagen 11 – Diseño Conceptual 05.....	38
Imagen 12 – Diseño Conceptual 06.....	39
Imagen 13 - Diferentes zonas de una extrusora.....	43
Imagen 14 - Nomenclatura y sistema de coordenadas.....	45
Imagen 15 - Geometría y velocidades de la trayectoria.....	45
Imagen 16 - Flujo cortante	46
Imagen 17 - Secciones cilíndricas compuestas del cañón de la extrusora	51
Imagen 18 - Flujo de calor unidimensional a través de las secciones circulares cilíndricas	52
Imagen 19 - Tensión de Von Mises del tornillo extrusor.....	54
Imagen 20 - Factor de seguridad del tornillo extrusor.....	55
Imagen 21 Transferencia de calor de la sección del cañón	56
Imagen 22 - Deformación total del tornillo por temperatura y carga	56
Imagen 23 - Factor de seguridad del tornillo por cargas y temperatura	56
Imagen 24 - Tensión de Von Mises del eje del cabezal.....	57
Imagen 25 - Factor de seguridad del eje del cabezal	58
Imagen 26 - Deformación del eje del cabezal por la temperatura	58
Imagen 27 - Tensión de Von Mises del eje del cabezal con temperatura	58
Imagen 28 - Tensión de Von Mises del soporte de la extrusora	59
Imagen 29 - Factor de seguridad del soporte de la extrusora.....	59
Imagen 30 - Deformaciones en el análisis modal.....	60
Imagen 31 - Tensión de Von Mises de la base a una frecuencia de 500 Hz	60
Imagen 32 - Deformación de la base a una frecuencia de 500 Hz	61
Imagen 33 - Tolva de sección circular	62

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Realidad Problemática.

La demanda de materiales alternativos novedosos y sostenibles para los filamentos de impresoras 3D ha ido aumentando a sabiendas. Una fuente alternativa para el filamento es reutilizar y reciclar productos de plástico postconsumo, que también es un enfoque convincente para conservar energía y mantener el medio ambiente. (Mark Keanu James E. Exconde, 2019)

El plástico es probablemente la fracción de residuos de equipos eléctricos y electrónicos más difícil de gestionar y el mercado de plásticos reciclados se limita a unos pocos casos. (Mark Keanu James E. Exconde, 2019)

El modelado de deposición fundida (MDF) o la fabricación de filamento fundido (FFF), que se basa en la fusión y extrusión de polímeros, en la que se ofrece un método de fabricación único para manufacturar objetos con geometrías complejas debido a un proceso sencillo para la deformación del polímero mediante fusión y solidificación y capa por fabricación aditiva. Debido a estas ventajas, este tipo de manufactura ha atraído una atención considerable durante las últimas décadas en una variedad de campos que incluyen la electrónica, la ingeniería biomecánica y los materiales sostenibles. A medida que aumenta la demanda de materiales funcionales, los compuestos poliméricos con diversos refuerzos, como nanomateriales de carbono, metales, biomateriales y cerámicas, se han adaptado como materias primas para MFD. La fabricación e impresión con filamentos compuestos poliméricos requieren un conocimiento de las propiedades físicas y químicas, así como del comportamiento de la reología térmica de los sistemas poliméricos, que son cruciales para avanzar en el desarrollo de la AM. (Soyeon Park, 2021)

Los desechos plásticos son uno de los mayores problemas ambientales en todo el mundo, incluso en Indonesia. Muchos consideran que una iniciativa comunitaria, como el banco de desechos, es un actor potencial que contribuye a aliviar el problema. Sin embargo, su sostenibilidad en funcionamiento depende en gran medida del precio de venta del plástico, que fluctúa constantemente. La conversión de desechos plásticos, como el tereftalato de polietileno (PET) en un producto de mayor valor mediante el uso de una trituradora y una extrusora, puede ayudar en este asunto. Una extrusora es una máquina que puede producir filamentos de plástico aplicando calor a los desechos plásticos triturados introducidos. (Daniel Meino Soedira, 2020).

Una extrusora de tornillo se usa generalmente en procesos de extrusión como en la industria alimentaria, moldeo por inyección y producción de plástico. Se utiliza debido a su geometría simple, control efectivo de la calidad del producto y otras aplicaciones; en el proceso de extrusión de termoplásticos se puede lograr una mezcla eficaz de material biopolimérico con nanopartículas orgánicas o inorgánicas utilizando una extrusora de uno o dos tornillos. La extrusión de termoplásticos es un proceso en el que el material se funde mediante calor externo o calor por fricción y se transporta mediante un tornillo hasta la abertura de una matriz, que da la forma del producto requerido. El proceso de extrusión es un proceso continuo mediante el cual se pueden fabricar muchos productos como películas, cintas de rafia, tubos, láminas, monofilamentos, fibras y filamentos (Jiang, 2019).

La elección de una extrusora de tornillo depende en gran medida de la capacidad de flujo del material a granel alimentado a través del equipo. La mayoría de las extrusoras de tornillo están diseñadas para un tipo específico de material sólido a granel (Jiang y Bi, 2009).

Dependiendo de las características de tamaño de partícula de los sólidos a granel, los diseños de extrusoras se hacen cuidadosamente para evitar posibles problemas de flujo asociados con el manejo de materiales (Fadeyibi, 2019, págs. 38-46). Para un material más cohesivo como el almidón termoplástico, se puede formar un arco o una ratonera si se alimentan en extrusoras de tornillo diseñadas para acomodar materiales termoplásticos menos cohesivos. Otros problemas de flujo relacionados con la densidad del sólido a granel, como también pueden ocurrir inundaciones durante la descarga de material (Prescott, 2019)

1.2 Trabajos Previos.

(Mark Keanu James E. Exconde, 2019), “selección de materiales del filamento de impresión 3D y utilización de tereftalato de polietileno reciclado (PET) en una placa de pruebas rediseñada”, este estudio se centra en la selección de materiales de resinas poliméricas vírgenes y plásticos reciclados postconsumo para su uso en filamentos de impresoras 3D. Se utilizó un método de decisión multicriterio de eliminación y elección que expresa la realidad (ELECTRE) para determinar los mejores materiales para los filamentos de impresoras 3D. El estudio ha demostrado que el polietileno virgen de baja densidad (LDPE) y el tereftalato de polietileno reciclado (PET) son materiales óptimos como filamento alternativo entre otras opciones como polietileno virgen de alta densidad (HDPE), PET virgen, polipropileno virgen (PP) y HDPE reciclado. Aparte de las diferentes opciones del tipo de materiales, las diversas propiedades consideradas en el cálculo incluyen la resistencia a la tracción, el punto

de fusión, la temperatura de transición vítrea, el índice de fluidez, el coeficiente de expansión térmica y el costo. Además, se produjo una placa de pruebas rediseñada mediante impresión 3D utilizando un PET reciclado como fuente de filamento.

(L. Cafiero, 2021) “caracterización de plásticos RAEE y su potencial valorización mediante la producción de filamentos de impresión 3D”, en este estudio, se analizaron veinte muestras de plástico RAEE recogidas en dos instalaciones de recuperación de materiales (MRF) de carcasas y componentes clasificados manualmente y entre algunos dispositivos desechados almacenados en el Centro de Investigación Casaccia mediante identificación infrarroja y caracterización químico-física. Los análisis se llevaron a cabo con el fin de seleccionar las muestras adecuadas para el reciclaje mecánico en filamentos de impresora 3D. Se encontraron once polímeros o mezclas diferentes en las muestras de RAEE y la mayoría de los recogidos en los MRF resultaron como mezclas de diferentes plásticos, aunque a menudo de naturaleza a base de estireno. Por otro lado, muchas muestras de RAEE mostraron una buena similitud con los correspondientes polímeros vírgenes con un contenido de halógenos y cargas inorgánicas inferior al 0,2 y 5% en peso, respectivamente. Las trece muestras de plástico RAEE seleccionadas se lavaron, se redujeron a <4 mm y se extruyeron en filamentos con el diámetro adecuado. La heterogeneidad polimérica y la presencia de materiales extraños en algunas muestras fueron los principales problemas críticos que se destacaron durante la extrusión. Los filamentos adecuados se utilizaron para imprimir objetos de prueba con diferentes geometrías. El control de calidad de los objetos escaneados, a través de un escáner 3D de luz estructurada, mostró que las muestras impresas con filamentos de plástico RAEE no tenían una desviación significativamente mayor del diseño del modelo en comparación con el mismo objeto producido con los filamentos comerciales.

(S Nithya Priya, 2021), “diseño y fabricación de extrusora de filamentos con spooler”, en este documento el autor muestra el diseño y la fabricación de extrusoras de filamentos que se utilizan para reciclar piezas impresas en 3D usadas o desechadas. Depende completamente del proceso de extracción de plástico. Esto puede reducir la cantidad que se gasta en comprar filamento nuevo. Alternativamente podemos utilizar pellets de plástico para este proceso de extrusión. El calentador de banda a lo largo del termopar se utiliza para calentar el plástico.

(Wang, 2021), “construcción y procesamiento discreto de extrusora de tornillo basada en modelo espiral tridimensional”, un método utilizado para crear productos formando una forma extruida o forzando material a través de una matriz u orificio que usa una extrusora para producir un producto semiacabado o terminado. El modelo Spiral 3D de la extrusora de tornillo provoca una producción inestable en el aislamiento de cables. Esta inestabilidad de la productividad es causada por el gradiente de presión pulsante del polímero fundido en la herramienta de fusión en la extrusora. La frecuencia de la pulsación de presión del polímero fundido en la zona de dosificación se basa en los límites del procesamiento estadístico y la velocidad del tornillo. Este sistema proporciona estabilidad de producción instantánea entre aplicaciones de aislamiento, aumenta la regularidad del diámetro del núcleo del aislamiento y garantiza el rendimiento de los parámetros de calidad de servicio predefinidos del cable fabricado final.

(Attila Gyárfás, 2019), “diseño de un extruidor plástico a pequeña escala máquina”, en este artículo analiza los pasos de diseño, el principio de funcionamiento y la estructura de una máquina de extrusión de termoplástico a pequeña escala que se utilizará en un laboratorio de la Universidad de Sapiencia. El objetivo del laboratorio es presentar las tecnologías de procesamiento de polímeros mediante máquinas construidas por los estudiantes y enfatizar la importancia del reciclaje de plástico.

Para reciclar las piezas de plástico es necesario un proceso de molienda, seguido de extrusión. Durante el proceso, la máquina funde el polímero y extruye un filamento que se puede convertir en granulados o usado tal cual. La estructura de la máquina de extrusión es bastante similar a la de un commercial uno, sin embargo, se centra en presentar los principios de fabricación y la rentabilidad.

(Daniel Meino Soedira, 2020) “desarrollo de un prototipo de bajo costo de extrusora para residuos plásticos”, en este trabajo se desarrolla una extrusora simple y de bajo costo diseñada para adecuarse a la condición de los países en desarrollo. Se aplica un sistema de control simple al sistema para una mejor salida de temperatura. El filamento producido se evalúa para determinar la consistencia de la densidad y el diámetro a diferentes temperaturas. La temperatura óptima encontrada es de 200 grados centígrados y se observa que el filamento producido se encuentra dentro de un grado razonable de consistencia en términos de diámetro con un error en el rango del 20%.

(A. Fadeyibi, 2016), “diseño de extrusora de un solo husillo para homogeneizar sólidos a granel”, esta investigación se llevó a cabo para diseñar una extrusora de un solo tornillo a partir de materiales disponibles localmente para la mezcla y homogeneización de sólidos a granel, como los compuestos de yuca y almidón de ñame-glicerol con nanopartículas. El diseño se realizó calculando empíricamente el tamaño de la salida de la tolva, el diámetro del eje, la geometría del tornillo, el volumen del barril y la capacidad del transportador. También se evaluaron las tensiones en la sección cónica de la tolva para evaluar su requerimiento de carga, evitando así cualquier problema asociado con el flujo de materiales a través de la abertura de la tolva. La extrusora se simuló dinámicamente para evaluar su rendimiento en las zonas de alimentación, compresión y medición. Esto se hizo investigando el efecto dinámico del tiempo de operación, con respecto al desplazamiento lineal, velocidad y potencia, a partir del movimiento práctico de la barrena móvil por el método de Dinámica de Fluidos Computacional. Los resultados mostraron que la presión vertical que actúa hacia abajo y el esfuerzo cortante dentro de la sección fueron 37.02 y 6.44 kPa. El diámetro del eje y la geometría del tornillo, que incluye el paso y el ángulo del tornillo, fueron de 20 y 56mm y 16,54mm. La capacidad del transportador de extrusión y su requerimiento de potencia fueron, respectivamente, 18,46 toneladas / hora y 2,04 kW. El desplazamiento lineal y la velocidad máximos ocurren en la zona de compresión a cada 3.03 rev/s, lo que hace que los materiales sólidos a granel se fundan y sean empujados por la presión resultante hacia la zona de dosificación. La relación entre el desplazamiento lineal y el tiempo de operación obedece a la ley de potencia.

En consecuencia, se seleccionó un motor eléctrico de 5 hp para impulsar la extrusora de un solo equipo.

1.3 Teorías Relacionadas al Tema.

1.3.1 Termoplásticos.

RPET.

El tereftalato de polietileno (PET) es una resina plástica altamente reciclable y una forma de poliéster. Es un polímero creado por la combinación de dos monómeros: etilenglicol modificado y ácido tereftálico purificado. Fue sintetizado por primera vez en América del Norte por los químicos de Dupont durante la década de 1940.

Etiquetado con el código # 1 en o cerca del fondo de botellas y contenedores, el PET se usa con frecuencia para envasar una variedad de productos que incluyen bebidas, mantequilla de maní, productos de panadería, frutas y verduras, alimentos congelados, aderezos para ensaladas, cosméticos y limpiadores domésticos. Valorado por su resistencia, termoestabilidad y transparencia, el PET es una opción popular para el envasado. El PET también es económico, liviano, resellable, resistente a roturas y reciclable.

El tereftalato de polietileno reciclado se conoce como RPET y es el plástico más reciclado del mundo. Según PETRA, la Asociación de Resinas de PET, la tasa de reciclaje de EE. UU. Es de alrededor del 31% en 2012, mientras que es del 52% en la Unión Europea. En 2016, la tasa de reciclaje de EE. UU. Había caído por debajo del 29%. En 2015 se reciclaron casi 1.800 millones de libras de PET, que se utilizaron para fabricar una variedad de productos finales. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) estima que el 1% de los desechos sólidos urbanos en los Estados Unidos se atribuye a los envases de PET.

RPET se emplea para nuevos productos como:

Fibra de alfombra de poliéster

Tejido para camisetas

Ropa interior larga

Zapatos atléticos

Equipaje, tapicería

Jerseys y relleno de fibra para sacos de dormir y abrigos de invierno

Flejado industrial

Hoja y película

Piezas de automóviles

Nuevos envases de PET

El uso de PET reciclado en lugar de resina virgen generalmente resulta en un consumo de energía reducido, un costo más bajo y un impacto ambiental reducido.

1.3.2. Peletizado de polímeros

Es un proceso que consiste en la elaboración de material reciclado, en forma de gránulos. Para reciclar plástico, primero hay que clasificarlo de acuerdo con la resina. Es decir, en siete clases distintas PET, PEAD, PVC, PEBD, PP, PS, y una séptima categoría denominada “otros”.

Existen 4 tipos de reciclaje de plásticos: primario, secundario, terciario y cuaternario. El conocer cual de estos tipos se debe usar depende de factores tales como la limpieza y homogeneidad del material y el valor del material de desecho y de la aplicación final.

Reciclado primario

- Consiste en la conversión del desecho plástico en artículos con propiedades físicas y químicas idénticas a las del material original. El reciclaje primario se hace con termoplásticos como PET (Polietileno Tereftalato), PEAD (Polietileno de Alta densidad=, PEBD (Polietileno de baja densidad), PP (Polipropileno), PS (Poliestireno) y PVC (Cloruro de Polivinilo). Los procesos del reciclaje primario son:

- Separación: Los métodos de separación pueden ser clasificados en separación macro, micro y molecular. La macro separación se hace sobre el producto completo usando el reconocimiento óptico del color o la forma. La micro separación puede hacerse por una propiedad física específica: tamaño, peso, densidad, etc.

- Granulado: Por medio de un proceso compactación/trituración, el plástico se convierte en gránulos parecidos a las hojuelas del cereal.

- Limpieza: Los plásticos granulados están generalmente contaminados con comida, papel, piedras, polvo, pegamento, de ahí deben limpiarse primero.

- Peletizado: Para esto, el plástico granulado debe fundirse y posteriormente se deja enfriar para ser cortado en pedacitos llamados pellets.

1.3.2 Filamentos de termoplásticos.

En los últimos tiempos, el tema del reciclaje de plástico se ha convertido en uno de los principales problemas de la protección del medio ambiente y la gestión de residuos. Se ha encontrado que los materiales poliméricos tienen una aplicación en muchas áreas de la vida diaria y la industria. Junto con su uso extendido, apareció el problema de los desechos plásticos porque, después de dejar de usarse, se convirtieron en desechos persistentes y nocivos. La posibilidad de reutilizar materiales poliméricos brinda la posibilidad de valorización —una segunda vida— y permite una utilización eficaz de los residuos para obtener productos consumibles. El mercado de la impresión 3D es un sector en pleno crecimiento. Los filamentos imprimibles se pueden fabricar a partir de una variedad de materiales termoplásticos, incluidos los del reciclaje. Este artículo se centra en una revisión de la literatura disponible sobre la producción de filamentos para impresoras 3D a partir de polímeros reciclados como alternativa al enfoque actual de recogida selectiva centralizada de plásticos. Se verificó la posibilidad de reciclaje de materiales termoplásticos básicos y el

impacto del procesamiento en sus propiedades físico-químicas y mecánicas (Lanzotti et al.2019). Además, se revisaron los filamentos disponibles comercialmente producidos a partir de materiales reciclados y dispositivos que permiten la autoproducción de filamentos para la impresión 3D a partir de residuos plásticos.

1.3.3 Diseño de Máquinas.

Se define como el proceso de aplicar métodos y procedimientos científicos para definir un mecanismo, proceso o sistema con detalle para permitir su realización.

Se tiene que tener en cuenta que para el diseño de máquinas es necesario conocer el funcionamiento de un componente y sus relaciones con otros componentes para la formación de un sistema, poniendo en énfasis el uso de materiales y procesos fácilmente asequibles. (Mott, 2006)

1.3.4 Sistema de Transmisión.

Se define como el mecanismo encargado de transmitir la potencia desde el origen que puede ser la energía de un motor a alguna parte. Generalmente la transmisión se realiza a través de elementos rotantes porque ocupa menos espacio, la transmisión se clasifica en:

Transmisión por Faja y Polea.

Es un conjunto de poleas acopladas por medio de una faja con el propósito de transmitir fuerza y velocidad entre árboles paralelos separados a una distancia considerable, dicha fuerza es transmitida por el alto índice de rozamiento que ejerce la faja sobre la polea (Dunlop, 2018)

Transmisión por Piñón y Cadena.

Es un conjunto de mecanismos acoplados por medio de piñones y una cadena, el cual está diseñado para transmitir grandes pares de fuerza. Además, tiene como característica que trabaja en alta temperaturas y climas adversos, aunque necesita de lubricación para su mantenimiento y durabilidad. (Juvinall & M. Marshek, 2013)

Transmisión por Engrane.

Se define como mecanismos formados por dos ruedas dentadas acopladas entre sus dientes donde una ejerce energía motriz y la otra conducida. La transmisión por engrane se clasifica en Engranajes helicoidales, engranes cónicos y engranes de tornillo sin fin. (Budynas & Keith Nisbett, 2011)

1.3.5. Transferencia de calor multicapa en un cilindro.

La transferencia de calor en un cilindro multicapa es un problema de importancia interés de ingeniería. El uso de una combinación de materiales con las propiedades térmicas-mecánicas variables a menudo ayudan a proporcionar características de rendimiento para estructuras y sistemas de ingeniería. Por ejemplo, la conducción térmica en un cilindro multicapa es relevante incluyen almacenamiento de hidrógeno comprimido, cables superconductores, piezoeléctricos transductores y estructuras de ingeniería civil. (Ali Keifari Kheibari, 2020)

En cada uno de estos escenarios, la generación de calor en uno o más concéntricos cilindros conduce al aumento de temperatura y al desarrollo de tensiones. Comprender la naturaleza de la conducción térmica en el cilindro multicapa es importante para garantizar el rendimiento, la seguridad y la fiabilidad de tales sistemas. (David W. Hahn, 2012)

Ya existe un importante cuerpo de literatura sobre el análisis de conducción térmica en cilindros multicapa. Si bien las simulaciones numéricas ofrecen la capacidad de calcular rápidamente la distribución de temperaturas en un cilindro multicapa. Se han presentado varios métodos teóricos para este propósito. Se ha utilizado el método de separación de variables (SOV) para modelar la conducción térmica en composite cilíndrico y esférico laminados la imagen muestra el esquema de transferencia de calor de un cilindro multicapa. (Bingen Yang, 2017)

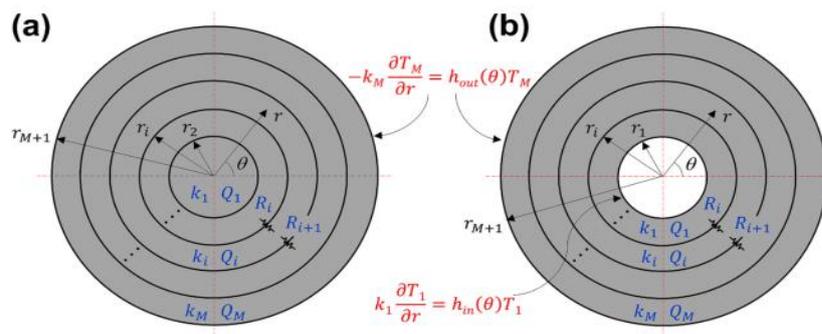


Imagen 1 Esquema de la geometría del cilindro multicapa: (a) Cilindro sólido, (b) Cilindro anular.

Fuente: (Long Zhou, 2021)

1.4 Formulación del Problema.

¿Cuál será la configuración geométrica de la máquina extrusora de RPET, para producir filamentos para impresoras 3D?

1.5 Justificación.

Con la investigación se pretende contribuir con el conocimiento científico de la realidad existente en cuanto a la percepción que se tiene de la propuesta de diseño de una máquina extrusora de PET pelletizado para producir filamentos para impresoras 3D.

Posee relevancia social porque al aplicar el procedimiento de diseño de un product tomando como materia prima los requerimientos técnicos basados en las necesidades de utilizar material reciclado (termoplásticos) para elaborar filamentos utilizados en impresoras 3D. Los profesionales y estudiosos de la ingeniería mecánica y eléctrica optarán por tomar en cuenta el diseño de la maquinaria propuesta aportando conceptos y bases teóricas dando lugar a nuevas hipótesis e investigaciones que enriquezcan el conocimiento aportado.

El sector de producción de manufactura aditiva tendrá una opción tecnológica que contará con los planos del diseño de la máquina que se compone de un sistema de extrusión y un sistema de calefactor para la producción de filamentos a partir del PET reciclado.

En cuanto a la relevancia económica, el proyecto de investigación, propone, que, al implementarse la máquina extrusora de termoplástico PET reciclado, abaratará costos de producción de piezas mediante la manufactura aditiva.

En cuanto a la relevancia ambiental, «La conciencia ambiental es el conocimiento y la actitud positiva hacia los asuntos ambientales; en el sentido de que constituyen variables centrales que definen la existencia de las sociedades humanas y determinan sus posibilidades de desarrollo materia, social y tecnológico» (Bravo Alarcón, 2004) , el diseño de la máquina se presenta como una opción amigable con el medio ambiente, puesto que produce filamentos con PET reciclado, no genera desechos y el mantenimiento de la máquina, si la empresa lo requiere, puede ser con biolubricantes.

Finalmente, los resultados obtenidos en la investigación servirán como referente para estudios similares.

1.6 Hipótesis.

No Aplica.

1.7 Objetivos.

1.7.1 Objetivo General.

Diseñar una máquina extrusora para la obtención de filamentos de material termoplástico RPET usados en impresoras 3D.

1.7.2 Objetivos Específicos.

- Caracterizar las propiedades físicas del material RPET peletizado.
- Diseñar el sistema de transporte y extrusión de RPET.
- Analizar los componentes mecánicos críticos usando software FEA o CAE.

II. MATERIAL Y MÉTODO

2.1 Tipo y diseño de Investigación.

La investigación es de tipo tecnológico, intenta solucionar una necesidad en el proceso de elaboración de piezas a través de la manufactura aditiva que necesita termoplásticos PET reciclados en forma de pellets para su fabricación generando así bajo costos en la fabricación de piezas.

La investigación es de diseño cuasi experimental porque no presenta hipótesis, no presenta muestra al azar, solo una pregunta donde se observará sus cambios al aplicar la investigación cumpliendo los objetivos trazados.

2.2 Población y Muestra.

No aplica.

2.3 Variable, Operacionalización.

2.3.1 Variable.

2.3.1.1 Variable Independiente.

- Producción de filamento
- Propiedades termo mecánicas

2.3.1.2 Variable Dependiente.

- Diseño de Máquina

2.3.2 Operacionalización.

Tabla 1 Operacionalizacion de variables

VARIABLES INDEPENDIENTES	DIMENSIÓN	INDICADORES	SUBINDICADORES	ÍNDICE	TÉCNICA / INSTRUMENTO
Tiempo de Producción	Velocidad de la Máquina	Capacidad de Producción	$Cap_{prod} = \frac{Cantidad\ Producto}{tiempo}$	$\frac{Kg}{h}$	Revisión Bibliográfica, Entrevista / Guía de Análisis Bibliográfico, Cuestionario
Flujo volumetrico	Flujo de arrastre de maetrial	Volumen de arrastre en un tiempo determinado	$Q_D = \frac{W}{2} * b * h_1$	m3/s	Revisión Bibliográfica / Guía de Análisis Bibliográfico
RPET	Propiedades Físicas del PET reciclado	densidad	$\rho = \frac{m}{V}$	Kg/m3	Observación / Dinamómetro
		Viscosidad Cinemática	$\tau = \frac{\mu}{\rho}$	Ns/m2	Revisión Bibliográfica/ Guía de Análisis Bibliográfico

VARIABLES DEPENDIENTES	DIMENSIÓN	INDICADORES	SUBINDICADORES	ÍNDICE	TÉCNICA / INSTRUMENTO
Diseño de Máquina	Potencia de capacidad Dimensionada	Transmisión de la Máquina	$Pot = \omega.T$	Hp	Revisión Bibliográfica / Guía de Análisis Bibliográfico
		Capacidad de la Tolva	$Cap_{tolva} = \frac{Cant. de RPET}{Tiempo}$	$\frac{kg}{h}$	Revisión Bibliográfica / Guía de Análisis Bibliográfico
		Capacidad de Transferencia de calor	$q = \frac{T_{rest} - T_{proc}}{\frac{\ln(r_3/r_m)}{2 * \pi * k_{RPET} * L} + \frac{\ln(r_4/r_{m3})}{2 * \pi * k_{AC} * L}}$	$\frac{J}{s}$	Revisión Bibliográfica / Guía de Análisis Bibliográfico
	Diseño del Eje o husillo	Diámetro de husillo	$D = L/30$	mm	Revisión Bibliográfica / Guía de Análisis Bibliográfico
		Factor de Seguridad	$n = \frac{Sy}{\sigma}$	Adimensional	Revisión Bibliográfica / Guía de Análisis Bibliográfico

2.4 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Dato, Validez y Confiabilidad.

2.4.1 Técnicas.

2.4.1.1 Revisión Bibliográfica.

Técnica utilizada para recopilar información detallada sobre un tema para su luego análisis interpretativo y crítica.

Se realizará la revisión de bibliografía, papers y otros documentos sobre máquinas de empaques en general, diseños de máquinas, fórmulas de diseño

2.4.1.2 Observación.

Técnica que consiste en observar el objeto a estudiar para registrar algún cambio o fenómeno que pueda presentar. El paso para realizar correctamente la técnica es: determinar el objeto a estudiar, los objetivos del estudio, realizar la observación, para luego registrar, interpretar, analizar y elaborar conclusiones de la observación.

Se realizará trabajos de observación para obtener información de las propiedades físicas del papel para el diseño de la máquina empacadora de sustrato.

2.4.2 Instrumentos.

2.4.2.1 Guía de Análisis.

Es un instrumento de contenido que se plasma las preguntas de evaluación para referenciar la investigación de la revisión bibliográfica realizada a un documento.

Se realizará una guía bibliográfica conteniendo preguntas puntuales necesarias de la investigación, con la finalidad de registrar las revisiones bibliográficas detalladamente.

2.2.3 Validez y Confiabilidad.

2.2.3.1 Validez

(Albarrán & Vivas, 2014) define, «La validez es la mayor aproximación a la verdad que puede tener una proposición, una inferencia o conclusión».

Mediante los instrumentos ya señalados en el punto anterior medirán de manera correcta y precisa las variables propuestas. Además de la experiencia investigativa de nuestro asesor.

2.2.3.2 Confiabilidad

(Albarrán & Vivas, 2014) define, «La confiabilidad de un instrumento es el grado de precisión o exactitud de la medida, en el sentido que, si se aplica la medida repetitivamente al mismo objeto se obtiene los resultados de manera uniforme».

Los instrumentos de medición serán aprobados y certificados por nuestro asesor para realizar las medidas correspondientes a las variables de manera estable y consistente.

2.5 Procedimiento de Análisis de Datos.

Para el diseño de la máquina empacadora de sustrato, se realizarán los siguientes procedimientos:

Se recopilará información bibliográfica sobre porcentajes de humedad del sustrato. Para conocer las propiedades físicas del papel se evaluará la elasticidad, resistencia y dimensión; y, para la obtención de información de la capacidad de producción de la máquina será a través de una entrevista.

Luego con los datos obtenidos de los porcentajes de humedad de sustrato y propiedades físicas del o los tipos de papel a utilizar, se tabulará y promediará los datos a bien de dar inicio al diseño de nuestra máquina, asimismo con la capacidad de producción.

2.6 Aspectos Éticos

Los principios éticos para nuestro proyecto de investigación, estará basado por el Código de Ética del Colegio de Ingenieros (CIP, 1999) y el Código de Ética de Investigación de la Universidad Señor de Sipán (USS, 2017).

2.6.1 Código de Ética del Colegio de ingenieros (CIP).

Aprobado en la III Sesión Ordinaria del Congreso Nacional de Consejos Departamentales del Periodo 1998 – 1999 en la Ciudad de Tacna 22, 23, 24 abril 1999.

(Colegio de Ingenieros del Perú, 1999) según los artículos 2 y 5, «Los ingenieros deben promover y defender la integridad, el honor y la dignidad de su profesión», asimismo el ingeniero debe ser ejemplo en la sociedad y contribuir a ella no sólo con su trabajo, sino con su honradez y ejemplo de buen ciudadano. Además de cuidar los recursos, ser racional y preservar el medio ambiente.

2.6.2 Código de Ética de Investigación de la Universidad Señor de Sipán (USS) Ratificado por Acuerdo de Consejo universitario con Resolución Rectoral N° 0851-2017/USS.

(Universidad Señor de Sipán, 2017) según en los artículos 2 y 3, tiene por objetivo definir, orientar y cumplir los principios éticos en el desarrollo de las investigaciones académicas por los investigadores.

2.7 Criterios de Rigor Científico.

2.7.1 Veracidad.

Los resultados de la investigación es producto de la validez interna entre la realidad y datos obtenidos.

2.7.2 Aplicabilidad.

Los resultados de la investigación pueden aplicarse a otros estudios contribuyendo con el conocimiento científico.

2.7.3 Consistencia.

El resultado obtenido en nuestra investigación es consistente porque al ser medido una o más veces, las variables repetirá el mismo patrón de resultados

2.7.4 Neutralidad.

Los autores trabajarán de manera imparcial a lo largo de la investigación a fin de resguardar la información que es adquirida tal y como lo indican los instrumentos de medición.

III. RESULTADOS

3.1 Características del RPET.

El RPET en general se caracteriza por su elevada pureza, alta resistencia y tenacidad. De acuerdo a su orientación presenta propiedades de transparencia y resistencia química. Existen diferentes grados de PET, los cuales se diferencian por su peso molecular y cristalinidad. Los que presentan menor peso molecular se denominan grado fibra, los de peso molecular medio, grado película y los de mayor peso molecular, grado ingeniería.

Este polímero no se estira y no es afectado por ácidos ni gases atmosféricos, es resistente al calor y absorbe poca cantidad de agua, forma fibras fuertes y flexibles, también películas. Su punto de fusión es alto, lo que facilita su planchado, es resistente al ataque de polillas, bacterias y hongos.

El PET presenta las siguientes propiedades:

- Procesable por soplado, inyección y extrusión.
- Apto para producir botellas, películas, láminas, planchas y piezas.
- Transparencia (aunque admite cargas de colorantes) y brillo con efecto lupa.
- Alta resistencia al desgaste.
- Muy buen coeficiente de deslizamiento.
- Buena resistencia química y térmica.
- Muy buena barrera a CO₂, aceptable barrera a O₂ y humedad.
- Compatible con otros materiales barrera que mejoran en su conjunto la calidad barrera de los envases y por lo tanto permiten su uso en mercados específicos.
- Reciclable, aunque tiende a disminuir su viscosidad con la historia térmica.
- Aprobado para su uso en productos que deban estar en contacto con productos alimentarios.
- Excelentes propiedades mecánicas.
- Biorientable -
- Cristalizable.
- Esterilizable por rayos gamma y óxido de etileno.
- Buena relación costo / performance.
- Se encuentra ranqueado como No.1 en reciclado.
- Liviano.
- Cuenta con los siguientes datos técnicos:

Tabla 2 - Datos técnicos del PET

<i>Propiedad</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor</i>
<i>Densidad</i>	g/cm ³	1,34 – 1.39
<i>Resistencia a la tensión</i>	MPa	59 – 72
<i>Resistencia a la compresión</i>	MPa	76 – 128
<i>Resistencia al impacto, Izod</i>	J/mm	0.01 – 0.04
<i>Dureza</i>	--	Rockwell M94 – M101

<i>Dilatación térmica</i>	10 ⁻⁴ / °C	15.2 – 24
<i>Resistencia al calor</i>	°C	80 – 120
<i>Resistencia dieléctrica</i>	V/mm	13780 – 15750
<i>Constante dieléctrica (60 Hz)</i>	--	3.65
<i>Absorción de agua (24 h)</i>	%	0.02
<i>Velocidad de combustión</i>	mm/min	Consumo lento
<i>Efecto luz solar</i>	--	Se decolora ligeramente
<i>Calidad de mecanizado</i>	--	Excelente
<i>Calidad óptica</i>	--	Transparente a opaco
<i>Temperatura de fusión</i>	°C	244 - 254

Fuente: Industria del Plástico. Plástico Industrial. Richardson & Lokensgard, 2011.

3.2 Determinar el diseño conceptual óptimo:

3.2.1. Desarrollo de la estructura de funciones.

La determinación de las funciones de la máquina nos ayudará a elaborar la matriz morfológica, para ello inicialmente utilizaremos la caja negra que nos permitirá encontrar de manera general las entradas y salidas, en las que para nuestro caso se tienen en cuenta tres magnitudes de entrada y de salida (ver en la imagen N°2)



Imagen 2 – Caja negra

Fuente: “Propia”

Se define el ingreso y salida de: la materia, energía y señales

Ingreso:

Material: Pellets de RPET

Energía: Fuerza humana o mecánica

Señales: Señal de algún controlador electrónico para el inicio del proceso

Salida:

Material: Hilo PET

Energía: Calor, vibraciones, sonidos

Señales: Señal de algún controlador electrónico para el fin del proceso

Descripción de funciones: La imagen N°3 muestra la descripción de las funciones de manera general que nos ayudará a establecer la secuencia del proceso de extrusión de los pellets de RPET.

- Preparar: Se prepara el material para introducirlo en la máquina. Esto consiste en retirar de la botella picos y partes muy dura de compactar.
- Alimentar: Se introduce la botella ya preparada en la máquina
- Compactar: Se compacta la botella desde su forma original hasta un tamaño prudente y fácil para calentarlo.
- Calentar: Se elevará la temperatura de las botellas ya compactadas y transformadas en pellets mediante el efecto joule, producto del uso de resistencias.
- Extruir: Una vez que ya se tenga los pellets y la materia prima ya a una temperatura elevada, mediante un proceso de compresión y posterior extrusión, se obtendrá los hilos de material termoplástico.
- Almacenar: el material obtenido se traslada hasta un depósito donde se deja enfriar a temperatura ambiente.

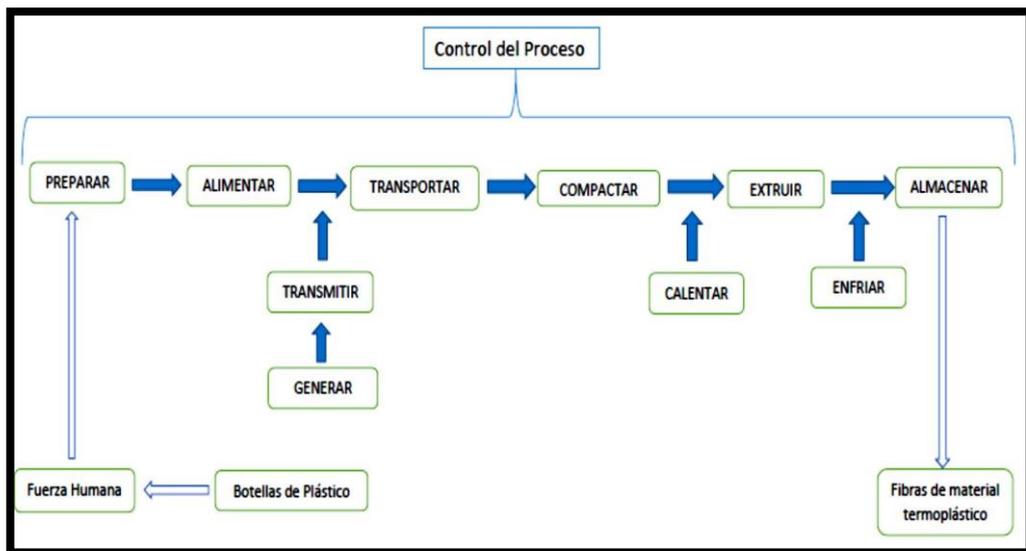


Imagen 3– Control del proceso de extrusión

Fuente: “Propia”

La estructura de funciones (imagen N°4) se encuentra conimagenda según las funciones establecidas en la “caja blanca” para cumplir con el procedimiento de obtencion de los filamentos que se fabricarán a partir del RPET.

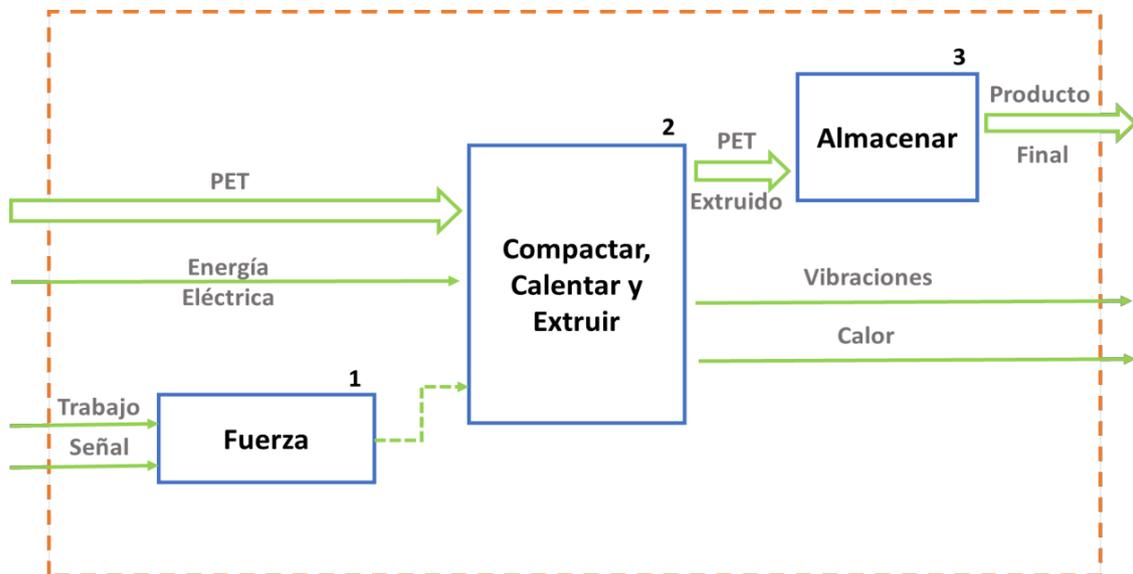


Imagen 4 – Estructura de funciones del proceso de extrusión

Fuente: “Propia”

3.2.2. Desarrollo de los diseños de solución.

Para obtener diferentes soluciones se ordena las funciones en la matriz morfológica de Zwicky. Las mejores formas de realizar una solución están unidas por flechas del mismo tipo. En la imagen N°5 se muestra la matriz morfológica y la imagen N° 6 muestra el número soluciones obtenidas usando el método descrito.

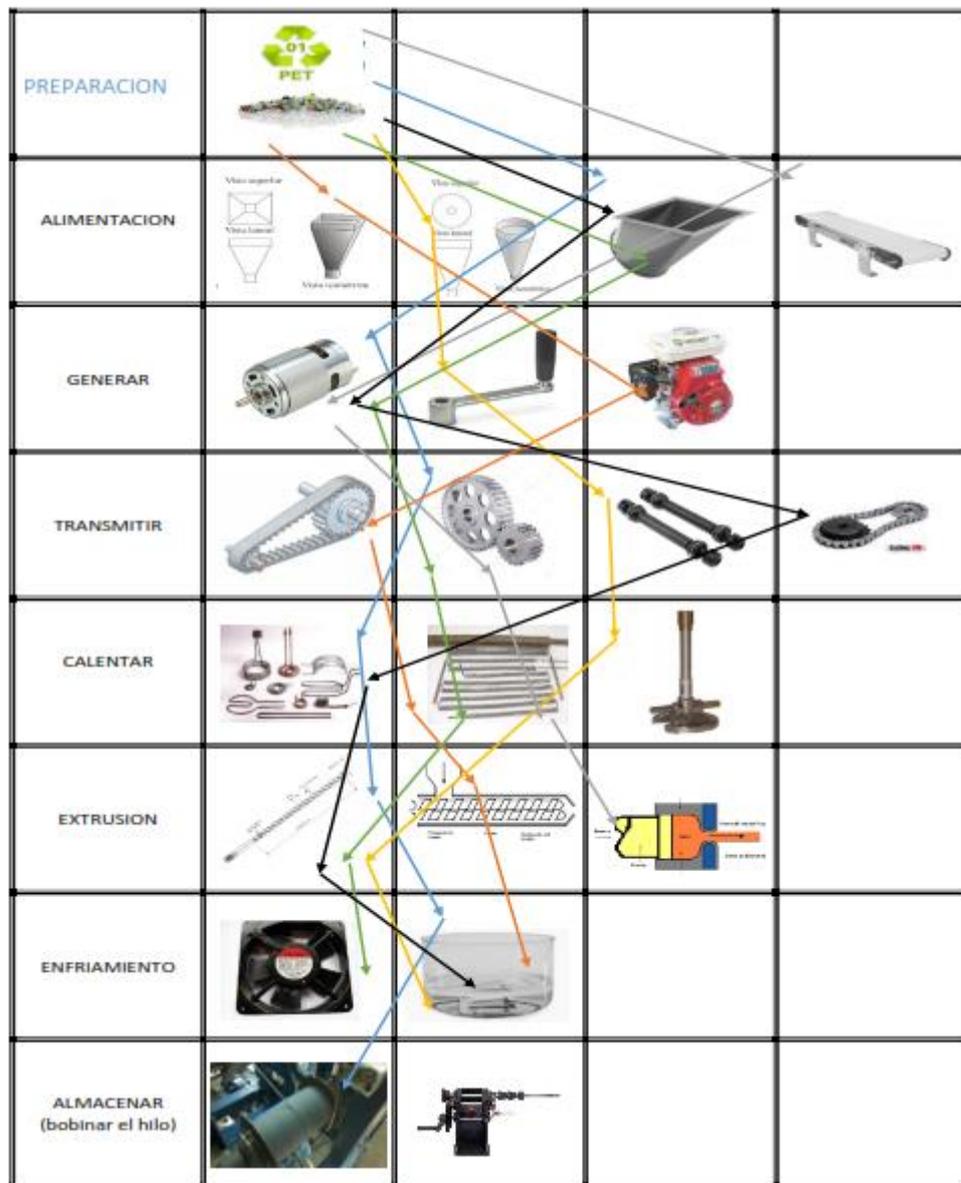


Imagen 5 – Estructura de funciones del proceso de extrusión

Fuente: "Propia"

Concepto de Solución	Tipo de Línea
1	
2	
3	
4	
5	
6	

Imagen 6 – Estructura de funciones del proceso de extrusión

Fuente: “Propia”

A. Diseño Conceptual 01.

Descripción:

- Los pellets producidos anteriormente ingresan por la tolva inclinada rectangular.
- El motor CC será utilizado para generar la potencia.
- Se usarán engranes para la transmisión de potencia al tornillo sinfín
- Para el proceso de transporte de los pellets, compresión y extrusión se usará un tornillo sinfín o “mono husillo”.
- El proceso de calentamiento de los pellets será mediante calefactores tubulares.
- Un recipiente con agua que estará justo a la boquilla extrusora del hilo será la manera de enfriamiento utilizada.
- Una maquina embobinadora estará junto al recipiente para embobinar el hilo de esta manera será almacenado.

Ventajas:

- Proceso automatizable.
- No es necesaria mucha intervención humana en el proceso.
- Mayor rapidez de producción.

Desventajas:

- La máquina ocuparía mucho espacio debido al recipiente con agua para el enfriamiento.

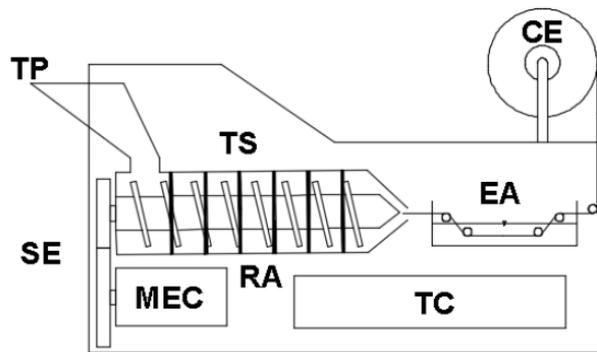


Imagen 7 – Diseño conceptual 01

Fuente: “Propia”

- ✓ TP: Tolva de pared
- ✓ SE: Sist. de engranajes
- ✓ MEC: Motor eléctrico DC
- ✓ TS: Tornillo sin fin simple
- ✓ EA: Enfriamiento por agua
- ✓ CE: Carrete eléctrico
- ✓ TC: Tablero de control
- ✓ RA: Resistencia de anillo

B. Diseño conceptual 02.

Descripción:

- Los pellets producidos anteriormente ingresan por la tolva rectangular.
- El motor AC será utilizado para generar la potencia.
- Se usará una faja para la transmisión de potencia a los tornillos sinfín
- Para el proceso de transporte de los pellets, compresión y extrusión se usarán dos tornillos sinfín o “doble husillo” con filetes engranados.
- El proceso de calentamiento de los pellets será mediante resistencias.
- Un recipiente con agua que estará junto a la boquilla extrusora del hilo será la manera de enfriamiento utilizada.
- Una manivela se usará para embobinar el hilo manualmente.

Ventajas:

- El motor AC permite una mayor producción.

Desventajas:

- El motor AC y los tornillos sinfín con filete engranado aumenta el peso a la máquina.

- Los tornillos sinfín con filete engranado es un elemento muy caro.
- Se necesita de una mayor seguridad por riesgo eléctrico debido al uso del motor AC.

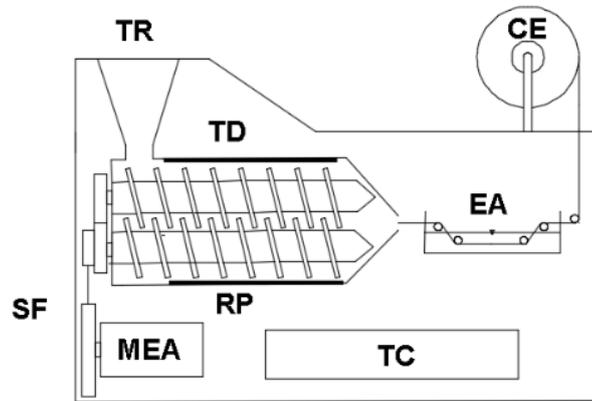


Imagen 8 – Diseño Conceptual 02

Fuente: Propia

- ✓ TR: Tolva de rectangular
- ✓ SF: Sist. de fajas
- ✓ MEA: Motor electric AC
- ✓ TD: Tornillo sin fin doble
- ✓ EA: Enfriamiento por agua
- ✓ CE: Carrete eléctrico
- ✓ TC: Tablero de control
- ✓ RP: Resistencia paralela al eje

C. Diseño conceptual 03.

Descripción:

- Los pellets producidos anteriormente ingresan por la tolva circular.
- Una manivela será utilizada para generar la potencia.
- Se usará un eje para la transmisión de potencia al tornillo sinfín
- Para el proceso de transporte de los pellets, compresión y extrusión se usará un tornillo sinfín o “mono husillo”.
- El proceso de calentamiento de los pellets será mediante un mechero que estará en la parte externa del conducto por donde se comprime el material.

- Un recipiente con agua que estará justo a la boquilla extrusora del hilo será la manera de enfriamiento utilizada.
- Una manivela se usará para embobinar el hilo manualmente.

Ventajas:

- El montaje es muy fácil
- El costo es relativamente bajo
- Es fácil de usar

Desventajas:

- Se necesita de varios operadores todo el tiempo que se quiera producir
- No es posible de automatizar
- La producción es lenta

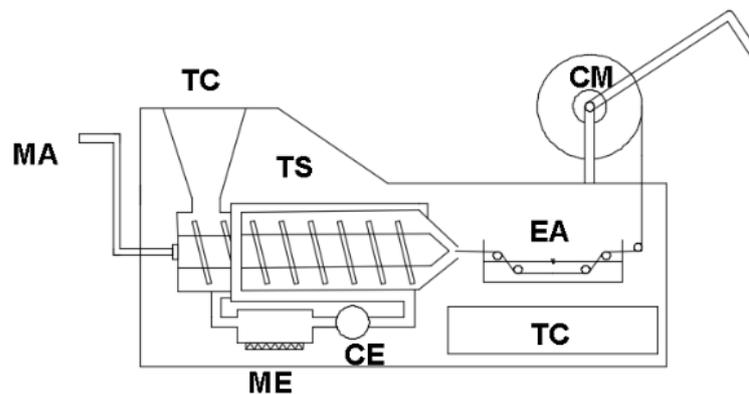


Imagen 9 – Diseño Conceptual 03

Fuente: Propia

- ✓ TC: Tolva cónica
- ✓ MA: Manivela
- ✓ ME: Mechero
- ✓ CE: Compresor eléctrico
- ✓ TS: Tornillo sin fin simple
- ✓ EA: Enfriamiento por agua
- ✓ CM: Carrete manual
- ✓ TC: Tablero de control

D. Diseño conceptual 04.

Descripción:

- Los pellets producidos anteriormente ingresan por la tolva inclinada rectangular.
- El motor CC será utilizado para generar la potencia.
- Se usarán engranes para la transmisión de potencia al tornillo sinfín
- Para el proceso de transporte de los pellets, compresión y extrusión se usará un tornillo sinfín o “mono husillo”.
- El proceso de calentamiento de los pellets será mediante resistencias.
- Un ventilador que estará junto a la boquilla de extrusión será la manera de enfriamiento utilizada.
- Una maquina embobinadora estará junto al recipiente para embobinar el hilo de esta manera será almacenado.

Ventajas:

- El costo para producir esta solución es barata.
- Se puede automatizar el proceso por ende se reduciría el posible riesgo al personal.
- Se lograría una mayor producción
- Facilidad de manejo

Desventajas:

- Costo de los materiales relativamente alto.
- El costo de la automatización debido a los equipos electrónicos que se deberían usar es relativamente caro.

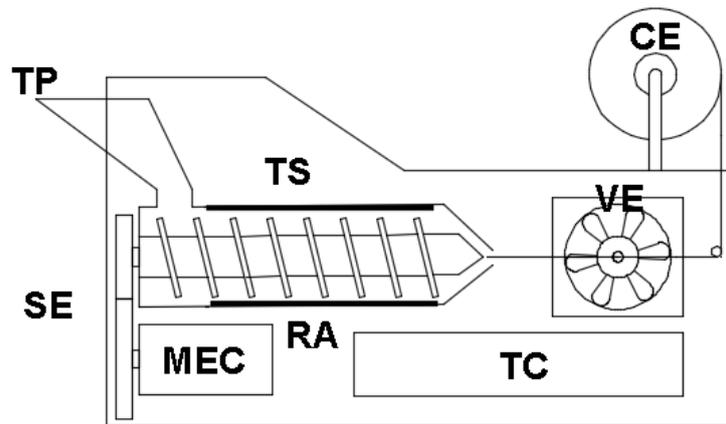


Imagen 10 – Diseño Conceptual 04

Fuente: Propia

- ✓ TP: Tolva de pared
- ✓ SE: Sist. de engranajes
- ✓ MEC: Motor eléctrico DC
- ✓ TS: Tornillo sin fin simple
- ✓ VE: Ventilador electrico
- ✓ CE: Carrete eléctrico
- ✓ TC: Tablero de control
- ✓ RA: Resistencia paralela al eje

E. Diseño conceptual 05.

Descripción:

- Los pellets producidos anteriormente ingresan por la faja transportadora usada en el caso de producción en masa.
- El motor CC será utilizado para generar la potencia.
- Se usarán engranes para la transmisión de potencia al tornillo sinfín
- Para el proceso de transporte de los pellets, compresión y extrusión se usará un pistón.
- El proceso de calentamiento de los pellets será mediante resistencias.
- Un ventilador que estará junto a la boquilla de extrusión será la manera de enfriamiento utilizada.
- Una maquina embobinadora estará junto al recipiente para embobinar el hilo de esta manera será almacenado.

Ventajas:

- Debido a la faja transportadora como alimentación se podría usar para generar en masa.

Desventajas:

- Debido al uso del pistón se requeriría más tiempo para su producción.
- El costo de los materiales para la maquina es alto.
- El costo para la operación también es alto.
- El montaje de la maquina es tedioso.

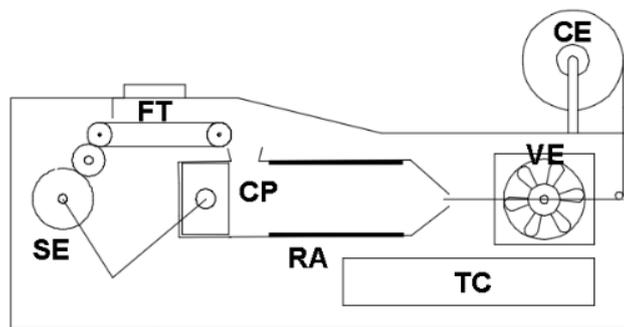


Imagen 11 – Diseño Conceptual 05

Fuente: Propia

- ✓ FT: Faja transportadora
- ✓ SE: Sist. de engranajes
- ✓ CP: Compresor por pistón
- ✓ VE: Ventilador eléctrico
- ✓ CE: Carrete eléctrico
- ✓ TC: Tablero de control
- ✓ RA: Resistencia paralela al eje

F. Diseño conceptual 06.

Descripción:

- Los pellets producidos anteriormente ingresan por la tolva inclinada rectangular.
- El motor CC será utilizado para generar la potencia.
- Se usará una cadena para la transmisión de potencia al tornillo sinfín
- Para el proceso de transporte de los pellets, compresión y extrusión se usará un tornillo sinfín o “mono husillo”.
- El proceso de calentamiento de los pellets será calefactores tubulares.

- Un recipiente con agua que estará justo a la boquilla extrusora del hilo será la manera de enfriamiento utilizada.
- Una manivela se usará para embobinar el hilo manualmente.

Ventajas:

- Los calefactores tubulares permiten un rango mayor de temperaturas
- Facilidad de manejo

Desventajas:

- Se necesita de un operario para embobinar el hilo, lo que lo hace no lo hace un proceso automatizable.
- Hay una cierta dificultad en el montaje.

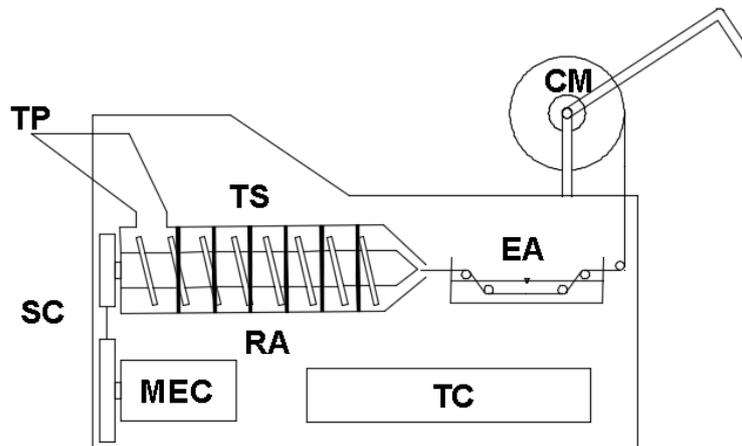


Imagen 12 – Diseño Conceptual 06

Fuente: Propia

- ✓ TP: Tolva de pared
- ✓ SC: Sist. por cadena
- ✓ MEC: Motor eléctrico DC
- ✓ TS: Tornillo sin fin simple
- ✓ EA: Enfriamiento por agua
- ✓ CM: Carrete manual
- ✓ TC: Tablero de control
- ✓ RA: Resistencia de anillo

3.2.2. Selección del diseño conceptual óptimo:

Utilizando los resultados de las combinaciones realizadas en la matriz morfológica se obtuvieron los diseños conceptuales graficados con sus descripciones técnicamente considerando sus ventajas y desventajas. Utilizando

una matriz de ponderados con el que se analizarán los conceptos de solución con criterios técnicos y económicos para seleccionar el mejor diseño conceptual que satisfaga a los requerimientos de la necesidad; la tabla 4 y table 5 muestran los criterios utilizados en la evaluación.

	CRITERIO	PESO RELATIVO(PJ)	ALTERNATIVA (AJ)						
			S1	S2	S3	S4	S5	S6	Ideal
1	Estabilidad	3	3	3	2	4	3	4	4
2	Confiabilidad	4	4	3	3	4	4	3	4
3	Facilidad de manejo	2	4	4	3	4	4	4	4
4	Buen uso de la fuerza	3	3	3	2	4	2	4	4
5	Costo de tecnología	3	3	1	4	2	1	3	4
6	Costo de operación	3	2	2	4	2	1	3	4
7	Seguridad	4	3	3	2	4	4	3	4
8	Rapidez	4	4	3	1	4	3	2	4
9	Facilidad de montaje	4	3	2	4	3	1	2	4
10	Posibilidad de automatización	3	4	4	1	4	4	1	4
PT: PUNTAJE TOTAL=Σ(PJ*AJ)			109	91	85	116	89	93	132
CT: COEFICIENTE TECNICO (%)=PT*100/IDEAL			83%	69%	64%	88%	67%	70%	100%

Tabla 3 – Análisis de criterios técnicos

Fuente: Propia

	CRITERIO	PESO RELATIVO(PJ)	ALTERNATIVA (AJ)						
			S1	S2	S3	S4	S5	S6	Ideal
1	Mantenimiento	3	3	2	3	2	2	3	4
2	Fabricación	3	2	2	4	2	2	3	4
3	Uso	3	3	3	2	3	2	2	4
4	Materiales	1	3	2	4	3	2	3	4
5	Manufacturabilidad	3	3	3	4	3	2	3	4
6	Transporte	1	3	2	2	3	2	2	4

7	Consumo de energía	2	3	2	4	2	2	3	4
PT: PUNTAJE TOTAL=Σ(PJ*AJ)			45	38	53	40	32	44	64
CT: COEFICIENTE TECNICO (%)=PT*100/IDEAL			70%	59%	83%	63%	50%	69%	100%

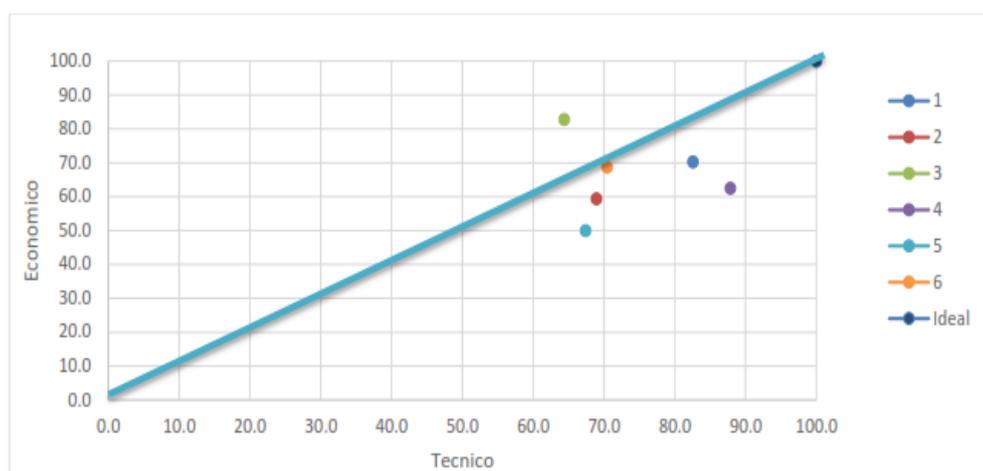
Tabla 4 – Análisis de criterios económicos

Fuente: Propia

ALTERNATIVAS	CT	CE
SOLUCIÓN 1	83%	70%
SOLUCIÓN 2	69%	59%
SOLUCIÓN 3	64%	83%
SOLUCIÓN 4	88%	63%
SOLUCIÓN 5	67%	50%
SOLUCIÓN 6	70%	69%

Tabla 5 – Resultados de ponderados para cada solución o diseño conceptual

Fuente: Propia



Gráfica 1 – Resultados de ponderados para cada solución o diseño conceptual

Fuente: Propia

3.3 Diseño paramétrico de acuerdo a las cargas aplicadas y análisis estructural de las partes más críticas de la máquina.

3.3.1 Parámetros de diseño:

De acuerdo a los requerimientos del taller de mecánica en el que los insumos de filamentos de RPET son necesarios para fabricar piezas mecánicas mediante el proceso de manufactura aditiva utilizando impresoras 3D y considerando las dimensiones típicas para las extrusoras de plástico recomendadas por (Askeland, 2017) mostrados en la tabla 7.

Tabla 6- Valores dimensionales de una máquina extrusora de plástico de laboratorio convencional.

Descripción	Valor Mín.	Valor Máx.	Valor convencional
Longitud total (L)	20D	30D	24D
Diámetro de tornillo (D)	2cm	90 cm	
Paso del tornillo (p)			1D
Longitud de la zona de alimentación (L_a)	4D	8D	4D
Longitud de la zona de transición (L_t)	6D	10D	10D
Longitud de la zona de dosificación (L_d)	6D	10D	10D
Ancho del filete de tornillo (t)	0,1D	0,15D	0,1D
Ángulo del filete de la vertical (φ)	15°	30°	
Profundidad zona de alimentación (h_1)	0,1D	0,2D	
Profundidad de la zona de dosificación (h_2)	0,05D	0,1D	
Relación de compresión (h_1/h_2)	2	4	
Holgura entre el cañón y el filete (δ)	0,00025D	0,0035D	
Revoluciones del tornillo - RPM (N)	50	150	
Flujo másico de producción (mD)	10kg/h	1000kg/h	

Fuente: (Askeland, 2017)

Los parámetros influyentes en el diseño de la máquina extrusora de RPET se muestran en la tabla 8 considerando a las imágenes 13 y 14 como guías para ubicar cada nomenclatura. El diámetro de 1.75 cm para el tornillo extrusor fue seleccionado de catálogo Nordson (ver anexo).

Tabla 7 Datos iniciales recomendados para el diseño

Descripción	Datos típicos	Datos de entrada
Temperatura ambiente (T_{amb})		20°C
Material para extruir		PET - Reciclado
Viscosidad cinemática (η)		750 N s/m ²
Longitud total - cm (L)	24D	42
Diámetro del cañón - cm (D_c)		1,79375
Diámetro de tornillo (D)		1,75
Paso del tornillo (p)	1D	1,75
Longitud de la zona de alimentación (L_a)	4D	7
Longitud de la zona de transición (L_t)	10D	17,5
Longitud de la zona de dosificación (L_d)	10D	17,5
Ancho del filete de tornillo (t)	0,1D	0,175
Ángulo del filete de la vertical (φ)		17,66
Profundidad zona de alimentación (h_1)	0,15D	0,2625
Profundidad de la zona de dosificación (h_2)	0,05D	0,105
Relación de compresión	h_1/h_2	2,5
Holgura entre el cañón y el filete (δ)	0,03D	0,0053
Velocidad de giro - RPM (N)		105

Fuente: Propia

3.3.2. Geometría del tornillo

El PET reciclado pasa por tres etapas de proceso dentro de la extrusora y estos se denominan: alimentación, transición y dosificación como se muestra en la image 5.

Para este estudio se a tomado en cuenta que las longitudes sean el 16.66%, 41.66% y 41.66% respectivamente de la longitud total del husillo.

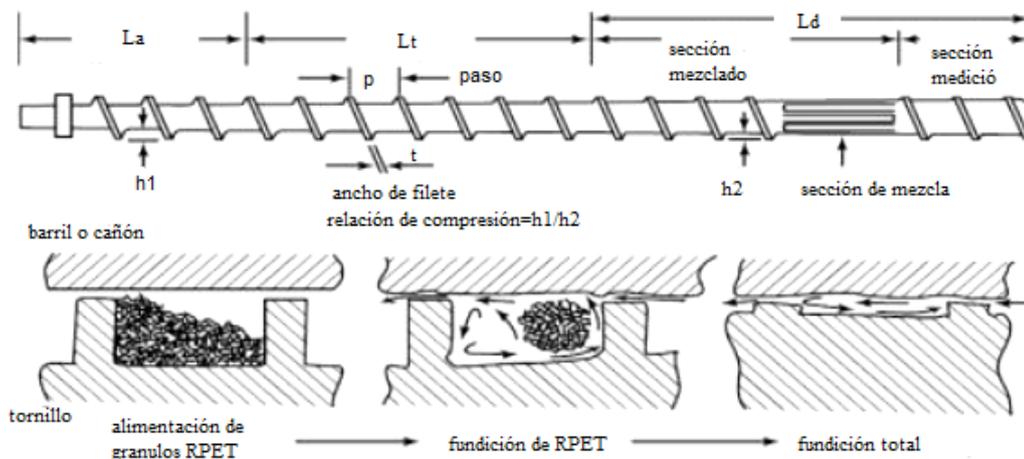


Imagen 13 - Diferentes zonas de una extrusora

Fuente: (Lafleur Pierre, 2018)

La longitud total (L), el diámetro de tornillo (D), el ángulo del filete (φ) y el paso de rosca (p) son parámetros de diseño de suma importancia y se calculará usando como referencia la imagen 6.

Para el cálculo de φ , se usará la siguiente ecuación [Stevens & Covas, 1995]:

$$tg(\varphi) = \frac{p}{\pi * D} \dots \text{Ec. 1.}$$

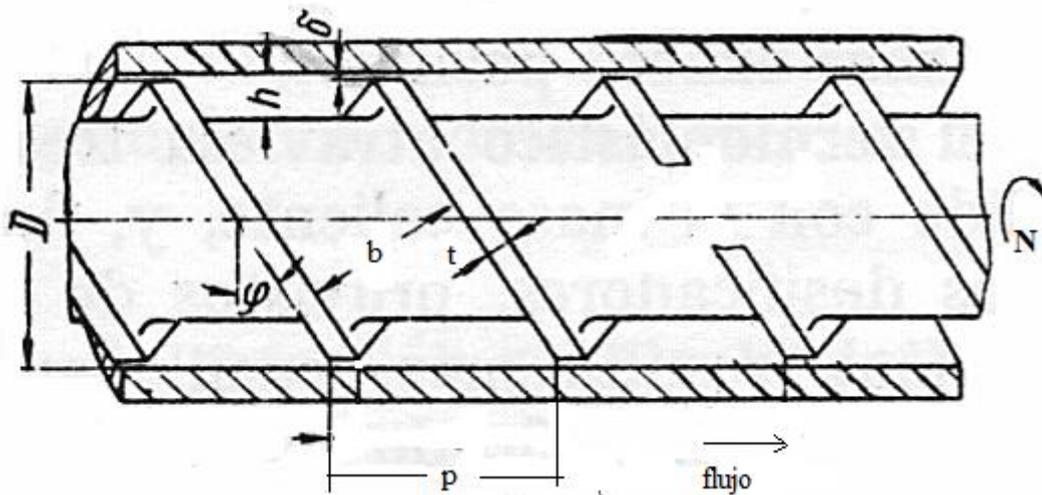
De acuerdo al filete del tornillo, se hallará el ancho del canal (b) con la siguiente ecuación: $b = (p - t) * \cos\varphi \dots \text{Ec. 2.}$

Para la longitud total del canal (z) usaremos la siguiente ecuación:

$$z = \frac{L}{\sin(\varphi)} \dots \text{Ec. 3}$$

Resultados:

φ	b	z
17.66°	1.5cm	138.45 cm



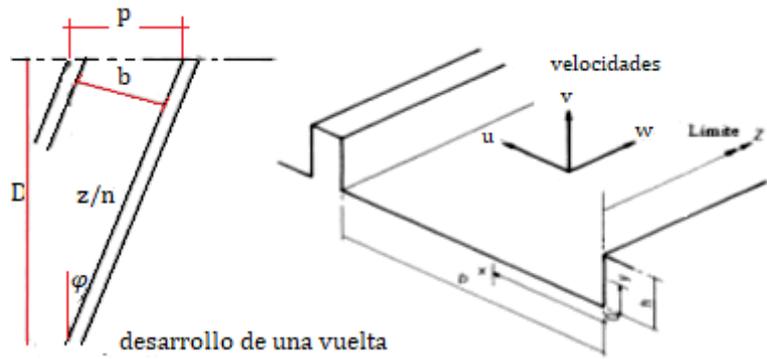


Imagen 14 - Nomenclatura y sistema de coordenadas

Fuente: (Stevens, 1995)

3.1.3. Análisis del movimiento del polímero en la extrusora

Las componentes geométricas y la velocidad de desplazamiento (descomposición de cada componente) nos permitirá realizar el análisis del movimiento del del RPET (polímero) en el proceso de extrusión. (Stevens, 1995)

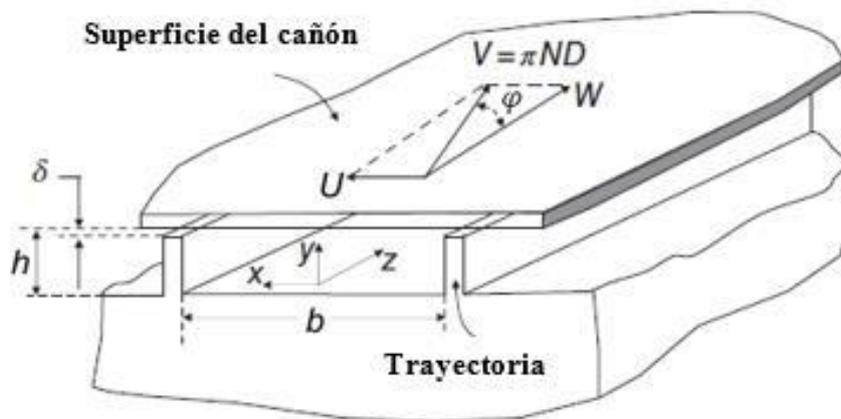


Imagen 15 - Geometría y velocidades de la trayectoria

Fuente: (Lafleur Pierre, 2018)

El flujo neto del RPET en la superficie interior a lo largo del cañón de la extrusora es provocado por la componente longitudinal de la velocidad (w).

$$w = \pi * D * N * \cos\varphi \dots \text{Ec. 4}$$

Reemplazando según los datos de la tabla ... tenemos:

$$w = \pi * 0.0175 * 1.75 * \cos(17.66) = 0.092 \frac{m}{s}$$

El flujo lateral del RPET en la superficie interior a lo largo del cañon de la extrusora es provocado por la componente transversal de la velocidad (u).

$$u = \pi * D * N * \sin(\varphi) \dots \text{Ec. 5}$$

$$u = \pi * 0.0175 * 1.75 * \sin(17.66) = 0.029 m/s$$

3.1.4. Flujo másico de RPET extruido

En este tipo de transportador predomina el arrastre del sólido dejando de estar controlado por la gravedad por lo que en la fig. 8 se muestra la componente de la fuerza de cizallamiento.

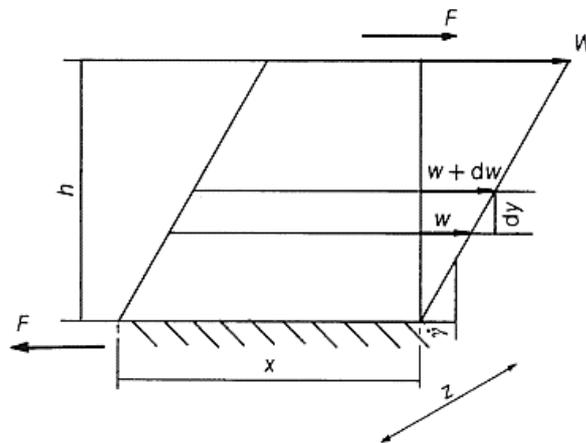


Imagen 16 - Flujo cortante

Fuente: (Stevens, 1995)

Cuando una capa de polímero a temperatura uniforme y espesor \$h_1\$, es cortado por una fuerza \$F\$ que actúa en las caras opuestas (imagen 8), se genera un movimiento relativo que produce en el polímero un flujo de corte (\$\gamma\$).

La imagen 8 representa el movimiento relativo del RPET que tiene espesor \$h_1\$ y se encuentra a temperatura constante; se puede notar que una fuerza de cizallamiento \$F\$ actúa en las caras opuestas en el interior de las paredes del cañon de la extrusora; este fenómeno produce un flujo de corte (\$\gamma\$) en el polímero.

Tabla 8 - Distribución de los flujos de corte en cada zona del tornillo

Z. de Alimentación	Z. de Transición	Zona de Dosificación
$\dot{\gamma}_A = \frac{w}{h_1} \dots \text{Ec. 6}$	$\dot{\gamma}_T = \frac{w}{h_3} \dots \text{Ec. 7}$	$\dot{\gamma}_D = \frac{w}{h_2} \dots \text{Ec. 8}$
$\dot{\gamma}_A = \frac{0.092m/s}{0.002625m} = 35.04m^{-1}$	$h_3 = \frac{h_1 + h_2}{2} = \frac{0.002625 + 0.00105}{2} = 0.001837 m$	$\dot{\gamma}_D = \frac{0.092m/s}{0.00105m} = 87.61s^{-1}$
	$\dot{\gamma}_T = \frac{0.092m/s}{0.001837} = 50.08s^{-1}$	

Fuente:

El principal responsable del movimiento del RPET desde el ingreso a la extrusora a través de la tolva de alimentación hasta llegar a la zona de transición es el flujo de arrastre (Q_d), esta variable es el flujo volumétrico del material debido al movimiento relativo del husillo y las paredes interiores y es hallada con la siguiente ecuación (Stevens, 1995):

$$Q_D = \frac{w}{2} * b * h_1 \dots \text{Ec.9}$$

Reemplazando se tiene:

$$Q_D = \frac{0.092}{2} * 0.015 * 0.002625 = 18.11 * 10^{-6} m^3/s$$

Para hallar el flujo másico (\dot{m}) del material a extruir, RPET, se determinará conociendo la densidad (ρ) de éste según [Stevens & Covas, 1995]:

$$\dot{m}_D = \rho * Q_D \dots \text{Ec. 10}$$

$$\dot{m}_D = \frac{1370kg}{m^3} * 18.11 * \frac{10^{-6}m^3}{s} = \frac{0.0248kg}{s} = 31.32kg/h$$

Flujo de retroceso

También denominado flujo de presión (Q_p), éste se genera debido a la diferencia de presión entre el cabezal y la tolva de la máquina, es opuesto al flujo de arrastre (Q_D). La presión es originada por la oposición que impone la boquilla (Stevens, 1995)

$$Q_p = \frac{bxh_1^3}{12xn} x \frac{P}{Z} \dots \text{Ec.11} ; Q_p = \frac{Wxbxh_1}{3} \dots \text{Ec. 12}$$

Al igualar las ecuaciones 11 y 12 debido a que se considera para los husillos un diseño óptimo, se tiene la siguiente relación para obtener la presión:

$$P = \frac{4 * w * n * z}{h_1^2} = \frac{4 * \frac{0.029m}{s} * 750 \frac{N}{m^2} * 1.38 m}{0.002625^2 m^2} = 17.42 \text{ MPa}$$

h_1 = profundidad en la zona de alimentación

η = viscosidad

P = Presión

De los resultados anteriores y utilizando la ecuación 11, se obtiene el flujo volumétrico de presión (QP):

$$Q_p = \frac{bxh_1^3}{12xn} \times \frac{P}{Z} = \frac{0.015 * 0.002625^3 m^3}{12 * 750 \frac{N}{m^2}} * \frac{17.42 * 10^6 \frac{N}{m^2}}{1.38 m} = 3.8 * 10^{-6} m^3/s$$

Flujo másico de presión (\dot{m}_p):

Donde ρ = Densidad del rPET [kg/m³]

$$\dot{m}_p = \rho * Q_D$$

$$\dot{m}_p = \frac{1370kg}{m^3} * 3.8 * 10^{-6} m^3/s = \frac{0.0052kg}{s} = 18.72kg/h$$

Flujo másico total (\dot{m}_{tot}):

Para determinar el flujo masico total, éste se obtendrá aplicando la diferencia del flujo másico de polímero extruido \dot{m}_D y el flujo másico de presión \dot{m}_p .

$$\dot{m}_{tot} = \dot{m}_D - \dot{m}_p = \frac{31.32kg}{h} - \frac{18.72kg}{h} = 12.6kg/h$$

Presión máxima del material a extruir ($P_{m\acute{a}x}$)

Para este tipo de máquinas se debe tener en cuenta en el diseño un caso extremo, en el que el cañon de la extrusora tiende a obstruirse por diversas razones, en tanto el polímero no tendrá salida; por lo tanto se considera (QP= 0). Esta peculiaridad genera una presión alta denominada Presión máxima (Pmax) (Crawford, 1998)

Donde h_3 = profundidad promedio de la zona de transición.

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{6 * \pi * D * L * N * n}{h_3^2 * \tan \varphi} = \frac{6 * \pi * 0.0175m * 0.042m * 1,75rev/s * 750N.s/m^2}{0.001837^2 m^2 * \tan(17.66)} = 169.3MPa$$

Potencia requerida por el tornillo extrusor

En cada vuelta dada de la hélice del tornillo extrusor se necesitará una potencia mecánica absorbida, para obtener la magnitud requerimos sumar las energías de cada zona del tornillo (zona de alimentación, zona de transición y zona de dosificación).

Energía en la zona de alimentación (E_A)

La energía o potencia total en la zona de alimentación será determinada con la suma de la potencia absorbida en el canal E_{dzA} y la potencia de arrastre E_{stA} . (Stevens, 1995)

$$E_A = 4 * (E_{dzA} + E_{stA})w/vuelta \dots \text{Ec. 13}$$

Potencia absorbida:

$$E_{dzA} = \frac{n*w^2*b*z}{h_1} \left[4 * (1 + \tan^2(\varphi)) - \frac{6*Q_p}{w*b*h_1} \right] + \frac{n*w^2*t*z}{\delta*cos\varphi} \dots \text{Ec.14}$$

$$E_{dzA} = 169.56w/vuelta$$

Potencia de arrastre:

$$E_{stA} = n * \dot{\gamma}_A^2 * \pi * p * b = 750 \frac{Ns}{m^2} * 35.04^2 s^{-2} * \pi * 0.0175 * 0.015 * 0.002625$$

$$E_{stA} = 3.99 w/vuelta$$

$$E_A = 4 * \left(\frac{169.56w}{vuelta} + 3.99 \frac{w}{vuelta} \right)$$

$$E_A = 694.2 w$$

Energía en la zona de transición (E_T)

La energía total en la zona de transición se determinará mediante la suma de la potencia absorbida por el canal E_{dzT} y la potencia de arrastre E_{stT} (Stevens, 1995)

$$E_T = 10 * (E_{dzT} + E_{stT})w/vuelta \dots \text{Ec. 15}$$

Potencia absorbida:

$$E_{dzT} = \frac{n*w^2*b*z}{h_3} \left[4 * (1 + \tan^2(\varphi)) - \frac{6*Q_p}{w*b*h_3} \right] + \frac{n*w^2*t*z}{\delta*cos\varphi} \dots \text{Ec.16}$$

$$E_{dzT} = 153.38w/vuelta$$

Potencia de arrastre:

$$E_{stA} = n * \dot{\gamma}_T^2 * \pi * p * b = 750 \frac{Ns}{m^2} * 50.08^2 s^{-2} * \pi * 0.0175 * 0.015 * 0.001837$$

$$E_{stA} = 7.89 w/vuelta$$

$$E_T = 10 * \left(\frac{153.38w}{\text{vuelta}} + 7.89 \frac{w}{\text{vuelta}} \right)$$

$$E_T = 1612.7 w$$

Energía en la zona de dosificación (E_D)

La energía total en la zona de dosificación es determinada al sumar la potencia absorbida por el canal E_{dzD} y la potencia de arrastre E_{stD} . (Stevens, 1995)

$$E_T = 10 * (E_{dzD} + E_{stD})w/\text{vuelta} \dots \text{Ec. 17}$$

Potencia absorbida:

$$E_{dzD} = \frac{n*w^2*b*z}{h_2} \left[4 * (1 + \tan^2(\varphi)) - \frac{6*Q_p}{w*b*h_2} \right] + \frac{n*w^2*t*z}{\delta*\cos\varphi} \dots \text{Ec.18}$$

$$E_{dzD} = 7.58w/\text{vuelta}$$

Potencia de arrastre:

$$E_{stD} = n * \dot{Y}_D^2 * \pi * p * b = 750 \frac{Ns}{m^2} * 87.61^2 s^{-2} * \pi * 0.0175 * 0.015 * 0.00105$$

$$E_{stD} = 14.14 w/\text{vuelta}$$

$$E_D = 10 * \left(\frac{7.58w}{\text{vuelta}} + 14.14 \frac{w}{\text{vuelta}} \right)$$

$$E_D = 217.2 w$$

Potencia total absorbida en el tornillo

Viene dado por la suma de la potencia en cada zona del tornillo. (Stevens, 1995)

$$E_{Tot} = E_A + E_T + E_D \dots \text{Ec. 19}$$

$$E_{Tot} = 694.2 w + 1612.7 w + 217.2 w = 2524.1 w$$

Selección del motor eléctrico

La potencia mínima requerida para accionar el movimiento de giro del tornillo extrusor es 2524.1 W, se selecciona un motor eléctrico de torque normal con una velocidad de giro nominal de 1750 rpm. Para determinar el torque necesario en el eje del motor aplicará la siguiente ecuación:

$$P_{motor} = T_{motor} * \omega_{motor} \dots \text{Ec. 20}$$

$$\omega_{motor} = \frac{1750 \text{rev}}{\text{min}} = 183.26 \text{ rad/s}$$

$$T_{motor} = \frac{2524.1 Nm/s}{183.26 rad/s} = 13,77 N.m$$

La potencia calculada de 2524.1 W corresponde a la potencia requerida por la extrusora para procesar el RPET, sin tomar en cuenta las pérdidas en el motor, la transmisión y el reductor de velocidad, se considera para ello una eficiencia del 70% para el sistema con la finalidad de contemplar pérdidas eléctricas y mecánicas debido a la transmisión, por tanto se usa la siguiente ecuación:

$$Pot_{rectificada} = \frac{2524.1W}{0.7} = 3605,86W$$

Por lo tanto, se selecciona un motor eléctrico de corriente alterna de 3,61 kW, sin embargo un motor de 4 kW estandarizado con, 1750 rpm con torque mínimo de 13,77 Nm.

Calor requerido para fundir el RPET (\dot{Q}_{req})

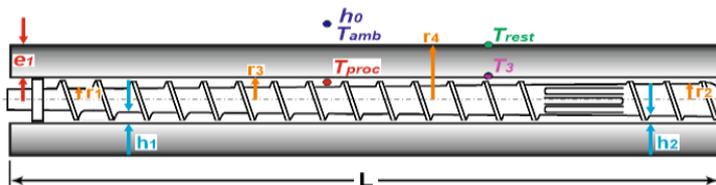
El flujo de calor máximo requerido para calentar el RPET desde la temperatura ambiente (20°C) hasta la máxima temperatura del intervalo de procesamiento (260°C), se calcula en función del flujo másico total de polímero a ser extruido. (Frank Kreith, 2012) y (Yunus Cengel, 2011)

$$\dot{Q}_{req} = m_{tot} * Cp_{RPET} * (T_{proc} - T_{amb}) \dots Ec. 21$$

$$\dot{Q}_{req} = 12.6 \frac{kg}{h} * 2.2 \frac{kJ}{kg^{\circ}K} * (533 - 293)^{\circ}K = 1,85kw$$

Flujo de calor a través del cañón de la extrusora

La transmisión del flujo de calor se realizará mediante la transmisión calor por conducción a través de las paredes del cañón desde los calentadores eléctricos ubicados en el exterior hasta el flujo de RPET en contacto con el tornillo extrusor. Para el cálculo del flujo de calor en la extrusora analizará las paredes cilíndricas compuestas mostradas en la imagen 9.



Donde:

- r3=radio parte final,
- r2=radio zona transición,
- r1=radio zona alimentación,
- r4=radio zona dosificación,
- Dc= diámetro del cañón,
- rm=radio medio del tornillo,
- e1= espesor del cañón 0,0195 m

Imagen 17 - Secciones cilíndricas compuestas del cañón de la extrusora

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9: Diferentes radios de la imagen 17

$r_3 = \frac{D_c}{2}$	$r_1 = r_3 - h_1$
$r_3 = \frac{0,018m}{2} = 0,009m$	$r_1 = 0,009 - 0,002625 = 0,0064m$
$r_2 = r_3 - h_2$	$r_4 = r_3 + e_1$
$r_2 = 0,009 - 0,00105 = 0,00795m$	$r_4 = 0,0155 + 0,0195 = 0,0297m$
$r_m = \frac{r_1 + r_2}{2}$	
$r_m = \frac{0,0064 + 0,00795}{2} = 0,007175m$	

Fuente: Elaboración propia

El proceso de transferencia de calor a través de las paredes compuestas de la extrusora (imagen 9) puede expresarse en forma análoga a un circuito eléctrico mediante la serie de resistencias térmicas mostradas en la imagen 10.

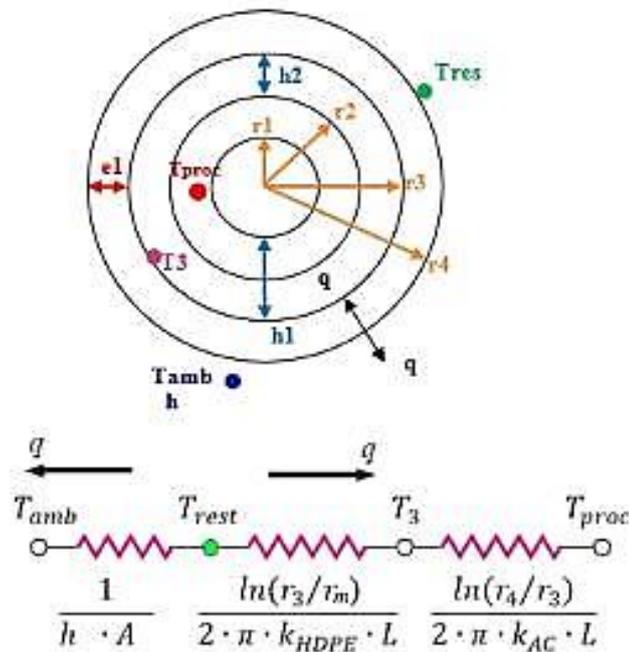


Imagen 18 - Flujo de calor unidimensional a través de las secciones circulares cilíndricas

Fuente: Modificado de (Yunus Cengel, 2011)

El flujo de calor total del sistema se calcula como la razón de la diferencia de temperatura total a la suma de las resistencias térmicas [Holman, 1986]. Donde k_{RPET} = conductividad térmica del RPET (0,25 W/m°C), k_{AC} =conductividad térmica del acero (45 W/m °C), T_{rest} =temperatura resistencias, T_{proc} = temperatura de procesamiento.

$$q = \frac{T_{rest} - T_{proc}}{\frac{\ln(r_3/r_m)}{2 \cdot \pi \cdot k_{RPET} \cdot L} + \frac{\ln(r_4/r_m)}{2 \cdot \pi \cdot k_{AC} \cdot L}} \dots \text{Ec. 22}$$

Reemplazando se tiene:

$$q = \frac{T_{rest} - 260^\circ}{0,2541}$$

$$q = 3,935 \cdot T_{rest} - 1023,09 \dots \text{Ec.23}$$

Perdidas de calor en la extrusora

Estas pérdidas se producen como resultado del movimiento del flujo de aire sobre las resistencias eléctricas. La velocidad de circulación del aire contenido entre el cañón y la cubierta es mínima, por lo que se toma el valor más bajo del rango de coeficientes de transferencia de calor por convección para gases en convección libre (Yunus Cengel, 2011), es decir:

$$h = 2 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \dots \text{Ec.24}$$

En base a la imagen 10, se determina que las pérdidas de calor por convección $q_{convección}$ en la superficie exterior del cañón de la extrusora. Donde T_{amb} = temperatura ambiente, A = área

$$q_{convección} = \frac{T_{rest} - T_{amb}}{\frac{1}{h \cdot A}} \dots \text{Ec. 25}$$

$$q_{convección} = h \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_4 \cdot L \cdot (T_{rest} - T_{amb}) \dots \text{Ec. 26}$$

$$q_{convección} = 2 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,030m \cdot 0,42m \cdot (T_{rest} - 20)^\circ C$$

$$q_{convección} = 0,322 \cdot T_{rest} - 4,83 \dots \text{Ec. 27}$$

La temperatura requerida en los calentadores eléctricos se obtiene igualando las ecuaciones 23 y 27 debido a la cantidad de calor que entra, igual a la cantidad de calor que sale:

$$3,935 \cdot T_{rest} - 1023,09 = 0,322 \cdot T_{rest} - 4,83$$

$$3,935 \cdot T_{rest} - 0,322 \cdot T_{rest} = 1023,09 - 4,83$$

$$T_{rest} = 278,6^\circ C$$

Por lo tanto, a partir de la ecuación 27 se obtienen las pérdidas por convección extrusora:

$$q_{convección} = 0.322 * 281,3 - 4.83$$

$$q_{convección} = 86 \text{ W} = 0,086 \text{ kW}$$

Cálculo de la potencia de calentamiento

La potencia total requerida para mantener el RPET a la temperatura máxima de procesamiento de 260°C, se obtiene sumando al calor requerido para fundir el RPET, las pérdidas de calor en la extrusora, por lo tanto se tiene:

$$Pot_{termica} = \dot{Q}_{req} + q_{convección}$$

$$Pot_{termica} = (2,1 + 0,086) \text{ kW} = 2,19 \text{ kW}$$

El valor de referencia del sobredimensionamiento fue tomado de (S Nithya Priya, 2021). Con el objeto de contemplar situaciones particulares adversas así como la unión entre los calentadores y el cañón, se considera un factor de sobredimensionamiento entre 1,2 y 1.4 por el tiempo de envejecimiento de los mismos

$$Pot_{calor} = 1,3 * Pot_{termica} = 2,85 \text{ kW} \approx 3,0 \text{ kW}$$

Análisis estático del tornillo extrusor

Para determinar la integridad estructural del tornillo extrusor para una carga torsional de 186 N.m sometido. Con la ayuda del software CAE (Ingeniería Asistida por Computador) se optó por seleccionar un acero AISI 4140 para resistir a la carga externa.

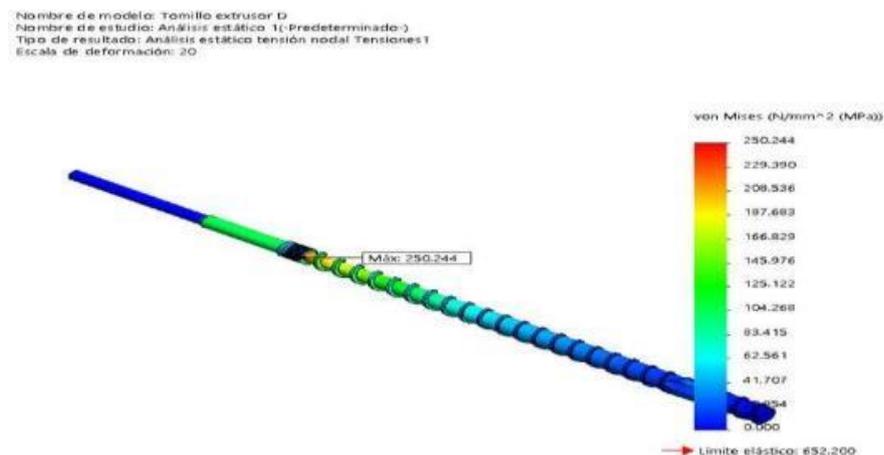


Imagen 19 - Tensión de Von Mises del tornillo extrusor

Los resultados del análisis determinaron un esfuerzo equivalente de Von Mises de 250.244 MPa, valor que se encuentra por debajo del límite elástico de 652.2 MPa del acero seleccionado. El factor de seguridad obtenido del análisis respectivo mostrado en la imagen 12 es de 2,61, valor que se encuentran dentro del rango permitido.

Nombre de modelo: Tornillo extrusor D
 Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado)
 Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1
 Criterio: Automático
 Distribución de factor de seguridad: FDS min = 2,61

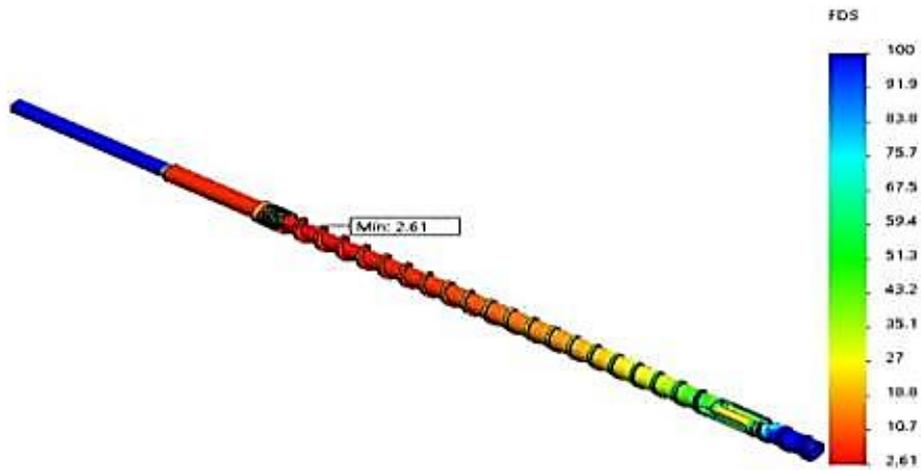


Imagen 20 - Factor de seguridad del tornillo extrusor

I. Análisis térmico del tornillo extrusor

Utilizando un análisis térmico con el software CAE para evaluar el comportamiento del husillo de la estrusora se obtuvo una temperatura de trabajo de máxima de 281° como se observa en la imagen 13.

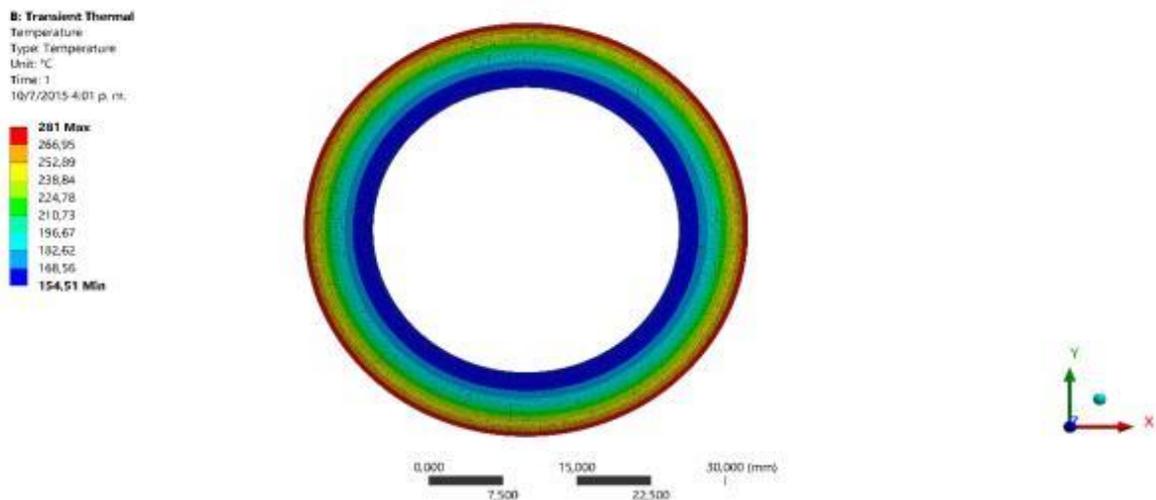


Imagen 21 Transferencia de calor de la sección del cañón

Utilizando los datos de las temperaturas de trabajo se analizan las deformaciones, obteniendo como resultado una deformación máxima de 0,157 mm como se observa en la imagen 14, magnitud que se encuentra dentro del límite permitido.

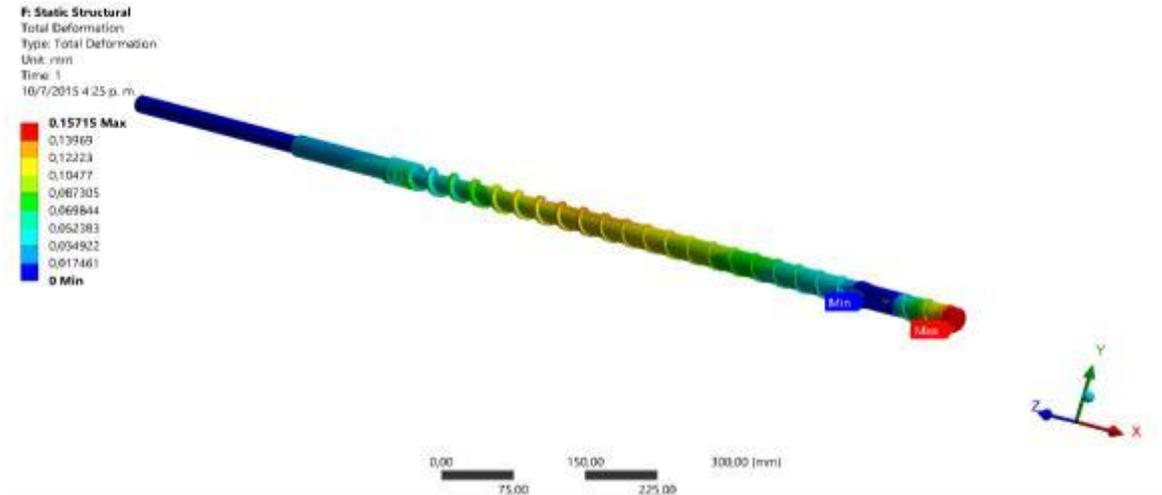


Imagen 22 - Deformación total del tornillo por temperatura y carga

A través de un análisis térmico en CAE se obtuvo como resultado un factor de seguridad de mínimo 1.3 en la parte final del tornillo que es el más crítico como se observa en la imagen 15, resultado que se encuentra dentro del rango mínimo permitido que indica que el elemento en cuestión resiste a las cargas externas.

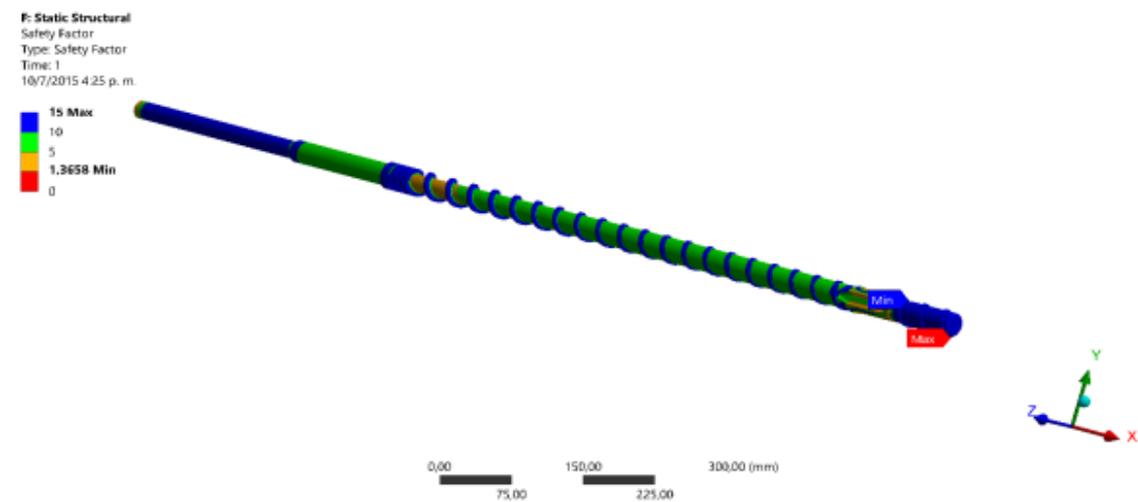


Imagen 23 - Factor de seguridad del tornillo por cargas y temperatura

Análisis estático del eje del cabezal

El eje del cabezal se encuentra expuesto a la presión de obstrucción $P= 169,3 \text{ MPa}$. El análisis estático a la tensión de Von Mises obtenido como resultado fue 324.81 MPa , valor que se encuentra por debajo del límite elástico del material 652.2 MPa .

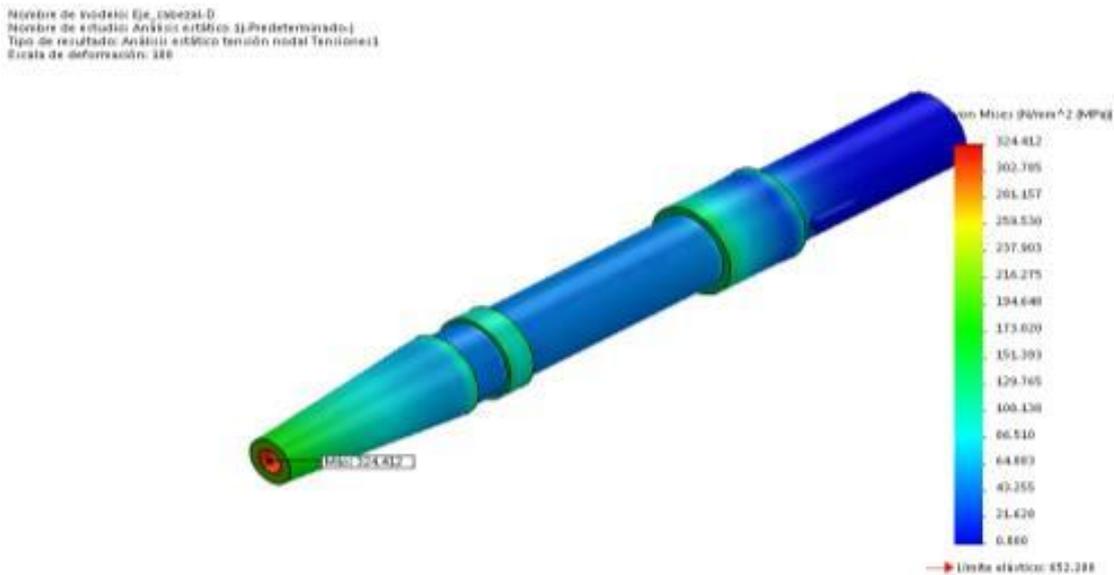


Imagen 24 - Tensión de Von Mises del eje del cabezal

Al culminar el análisis además se obtiene un factor de seguridad en el eje del cabezal de $2,01$ como se observa en la imagen 17.

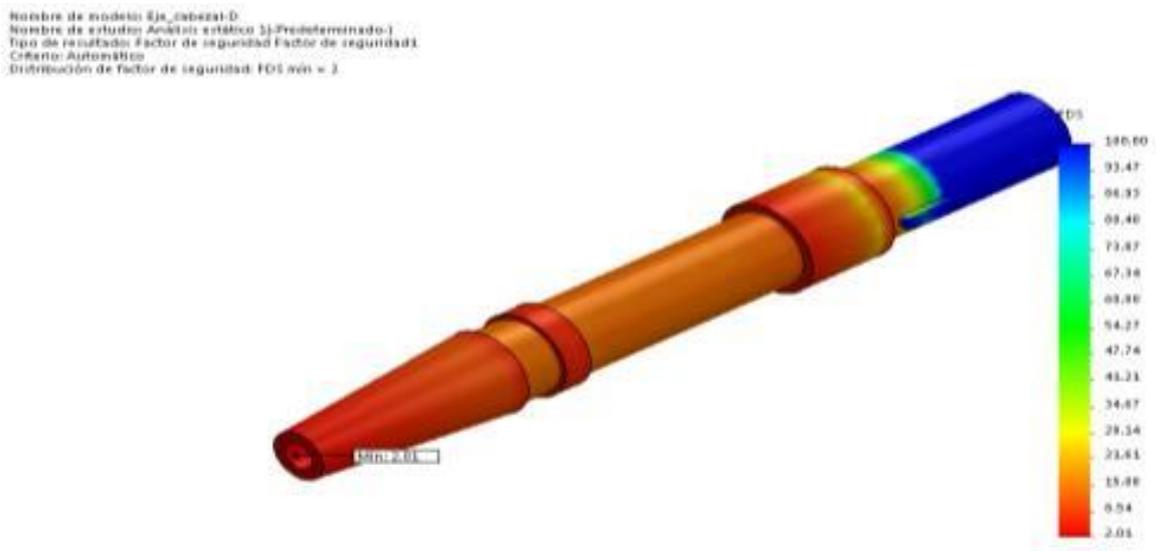


Imagen 25 - Factor de seguridad del eje del cabezal

Análisis térmico del eje de cabezal

Con ayuda del software CAE se realizó el análisis térmico del eje del cabezal tomando como dato la temperatura de 199 °C que llegara las resistencias. Las soluciones que se han obtenido son la deformación por la temperatura y la tensión de Von Mises.

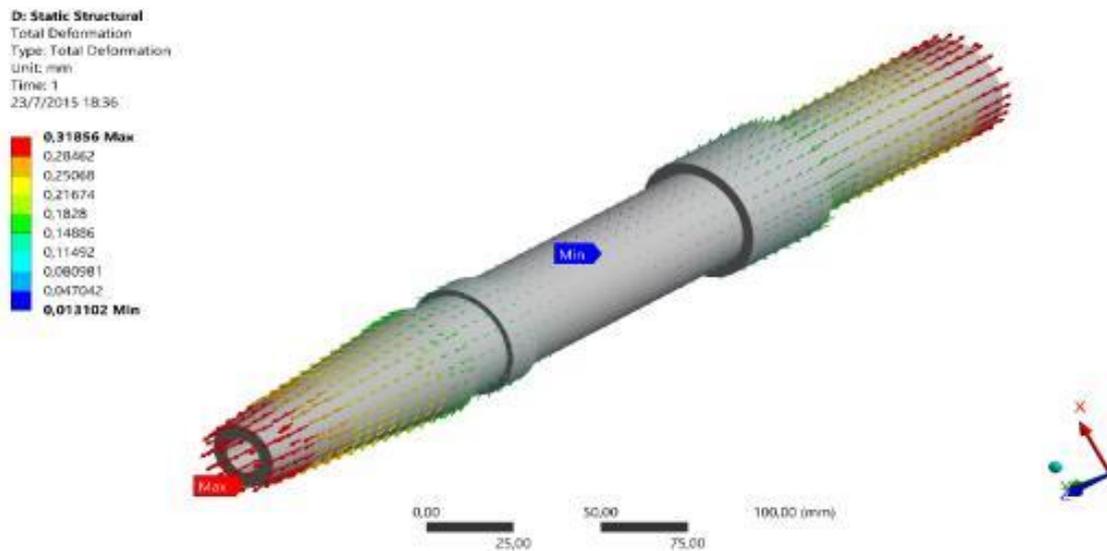


Imagen 26 - Deformación del eje del cabezal por la temperatura

El resultado obtenido por CAE al Análisis térmico dio como resultado una deformación de 0,31 mm como se ve en la imagen 26.

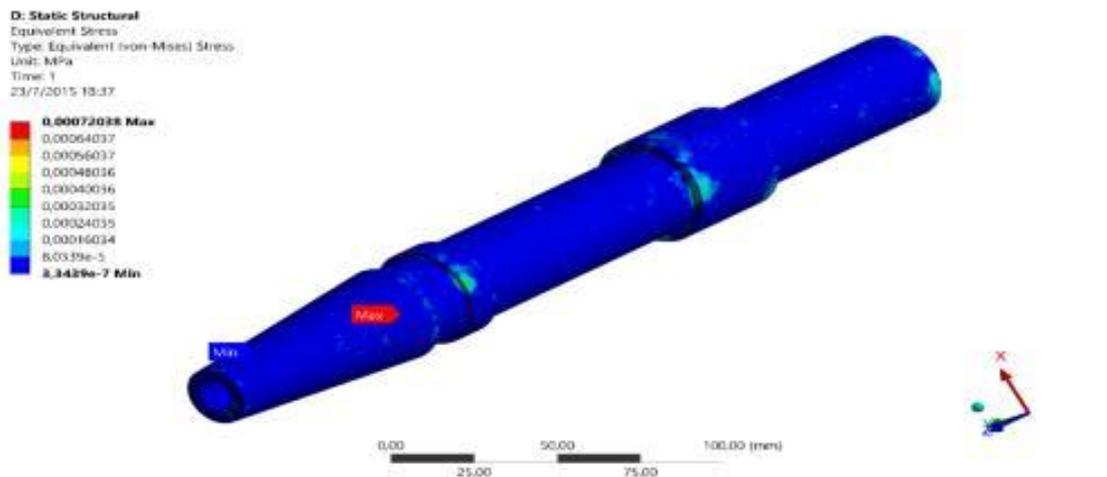


Imagen 27 - Tensión de Von Mises del eje del cabezal con temperatura

El resultado obtenido por CAE al análisis térmico dio como resultado una tensión de Von Mises de 0,0072 MPa, como se ve en la imagen 27.

Análisis estático del soporte de la extrusora

La carga que está sometida es de 2394 N. Las soluciones que se han obtenido al realizar el análisis estático son la tensión de Von Mises y el factor de seguridad.

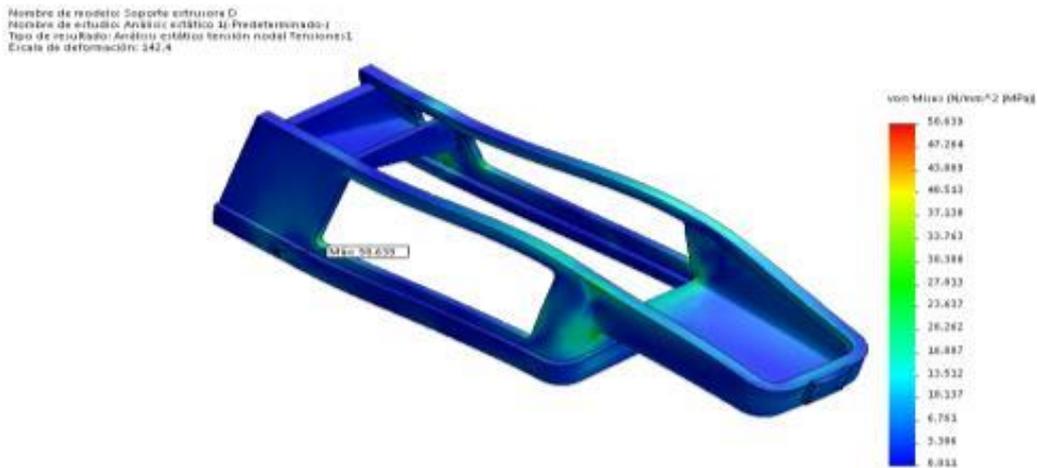


Imagen 28 - Tensión de Von Mises del soporte de la extrusora

Al culminar el análisis se obtiene un factor de seguridad en el eje del cabezal de 2,44 como se observa en la imagen 28.

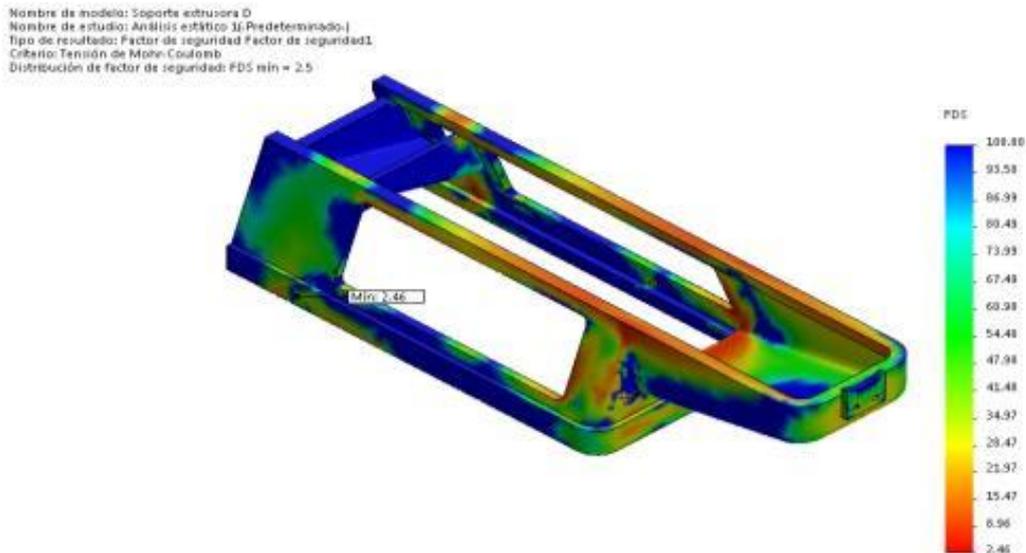


Imagen 29 - Factor de seguridad del soporte de la extrusora

Análisis vibratorio del soporte de la extrusora

Con ayuda del software CAE se realizó el estudio modal que permite ver las diferentes formas de deformación a una frecuencia máxima de 500 Hz como se observa en la imagen 30.

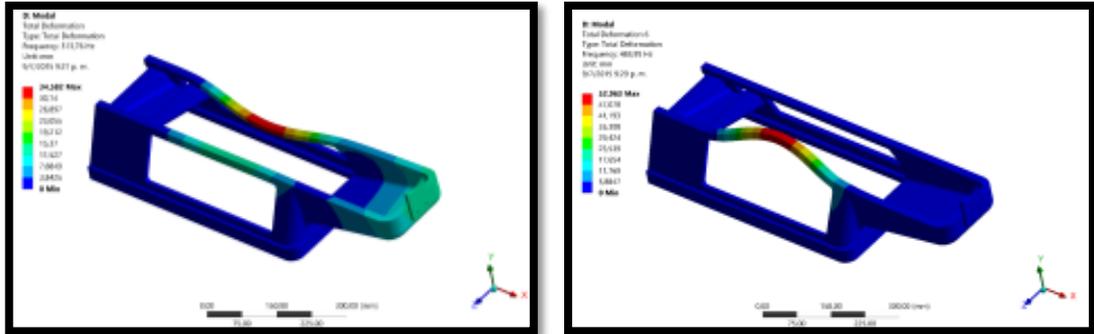


Imagen 30 - Deformaciones en el análisis modal

El resultado obtenido por CAE a la respuesta transitoria a una frecuencia de 500 Hz y la carga sometida de 2394 N dio como resultado una tensión de Von Mises y una deformación.

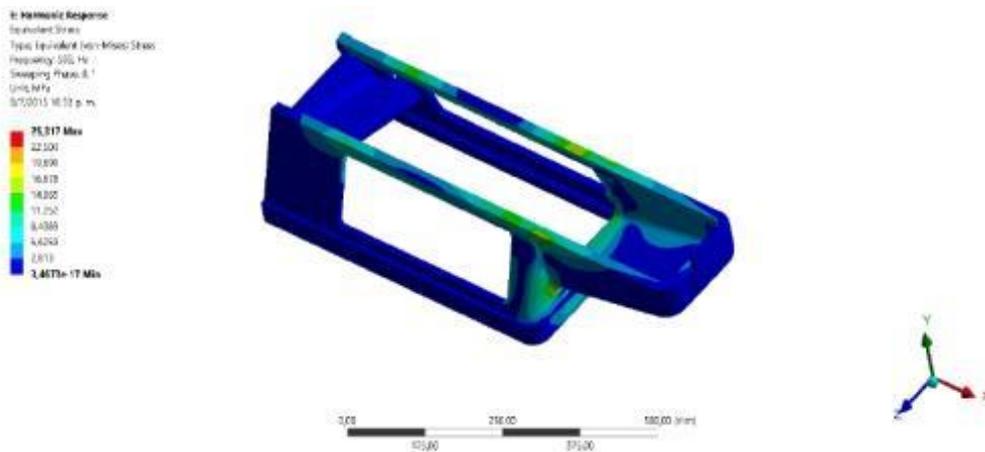


Imagen 31 - Tensión de Von Mises de la base a una frecuencia de 500 Hz

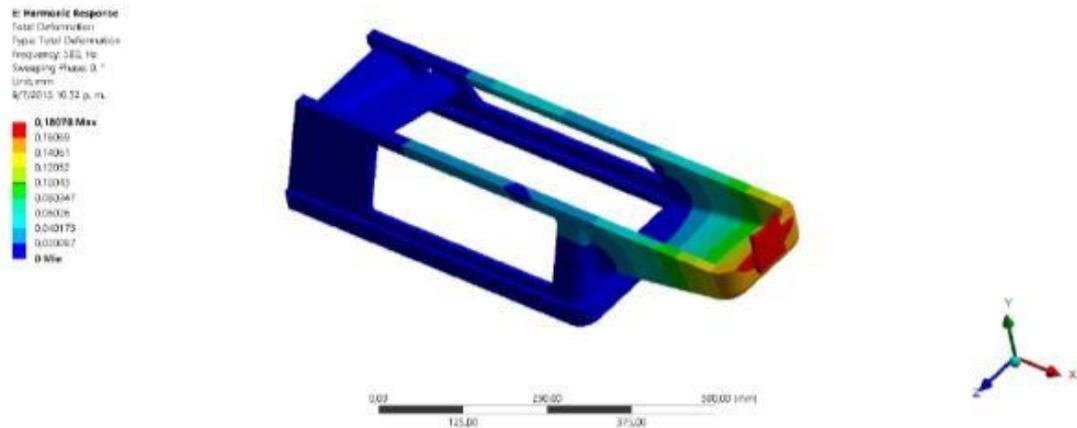


Imagen 32 - Deformación de la base a una frecuencia de 500 Hz

Selección del variador

Para seleccionar el variador de frecuencia hay que tomar en cuenta lo siguiente:
 Potencia del motor, corriente nominal del motor y voltaje de alimentación.

Tabla 10: Selección del variador de frecuencia

Potencia motor	3 KWatts	Variador Siemens G110
Corriente	13 A	
Voltaje	220 V	
Fase	Trifásico	

Selección de las resistencias calefactoras

En la siguiente tabla se muestran las resistencias calefactoras para la extrusora de plástico.

Descripción	# Resistencias	Potencia	Diámetro mm	Ancho mm	Voltaje
Cañón	Zona 1= 6	275 Watts	70	35	220 V
	Zona 2= 6				
Cabezal	Zona 3= 2	1000 y 500 Watts	110	100	220 V
Boquilla	Zona 4=1	300 Watts	130	40	220 V

Nota: Todas las resistencias son tipo suncho

Tabla 11: Selección de las resistencias para cada zona

Diseño de la Tolva.

La tolva tendrá un diámetro superior de 20 cm y un diámetro inferior de 3cm con las dimensiones especificadas se calcula la altura según la imagen 33. El material recomendado para la tolva según (Askeland, 2017) será un acero AISI 1020 CD de calibrer 12

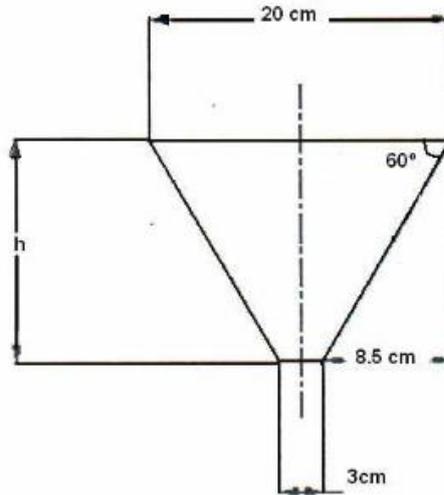


Imagen 33 - Tolva de sección circular

$$\tan 60^\circ = \frac{h}{8,5\text{cm}}$$

$$h = 14,52\text{cm}$$

3.4. Discusiones de resultados

Luego de especificar los resultados se procedió al análisis y discusión de los mismos.

Para lograr obtener la potencia de la máquina se analizó la potencia absorbida en cada zona a lo largo del husillo (zona de alimentación, zona de transición y zona de dosificación), considerando variables de arrastre y oposición al avance del material a extruir. La potencia necesaria para que el husillo rote en condiciones extremas en la que no hay flujo de salida del polímero ($Q_p = 0$) fue de 2524.1 W, resultado similar bajo las mismas condiciones según (Daniel Meino Soedira, 2020) que fue de 2112W.

Conclusiones:

Las propiedades físico-mecánicas del RPET se determinaron mediante una recopilación de información en artículos de investigación resaltando la densidad y viscosidad cinemática como las propiedades necesarias para determinar el flujo volumétrico del material y la temperatura de fundición del mismo para lograr su proceso de extrusión.

Variables como el flujo, presión y temperatura fueron determinantes para el dimensionamiento del sistema de transporte de un husillo de diámetro y longitud de 1,75 cm y 42 cm respectivamente para una velocidad de 105rpm. Un análisis de potencia absorbida para las zonas de alimentación, zona de transición y zona de dosificación, permitió obtener la potencia necesaria de 2524.1 W para permitir el giro del husillo en condiciones extremas.

El análisis mediante el software de simulación de condiciones de carga externa para Resistencia y temperatura fue utilizado para validar las dimensiones del husillo o tornillo de extrusión, encontrando valores de factor de seguridad, deformaciones y temperaturas de trabajo dentro de los rangos permitidos, concluyendo que el sistema funcionará bajo las cargas externas mencionadas.

Recomendaciones:

El estudio paramétrico que pudiera implementarse a esta investigación permitirá realizar un análisis de eficiencias termomecánicas manipulando las variables geométricas, velocidad de rotación y temperatura.

Referencias:

- A. Fadeyibi, Z. D. (2016). Design of single screw extruder for homogenizing bulk solids. *Agricultural Engineering International : The CIGR e-journal*, 18(4).
- Ali Keifari Kheibari, M. J. (2020). Propagation of heat wave in composite cylinder using Cattaneo- Vernotte theory. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
- Askeland, D. R. (2017). *The Science and Engineering of Materials*.
- Attila Gyárfás, A. G. (2019). design of a small-scale plastic extruder machine . *Sciendo*.
- Bingen Yang, S. L. (2017). Closed-form analytical solutions of transient heat conduction in hollow composite cylinders with any number of layers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
- Crawford, R. (1998). *Plastics Engineering* (Vol. 3rd Edition). Butterworth-Heinemann.
- Daniel Meino Soedira, D. K. (2020). Development of a low-cost prototype of an. *AIP Conference Proceedings* .
- David W. Hahn, M. N. (2012). *Heat Conduction*.
- Fadeyibi, A. Z. (2019). Flow and strength properties of cassava and yam starch-glycerol composites essential in the design of handling equipment for granular solids. *Journal of Food Engineering*, 129, 38-46.
- Frank Kreith, M. S. (2012). *Principios de Transferencia de Calor*. (2. CENGAGE Learning, Ed.) CENGAGE LEARNING.
- Jiang, B. a. (2019). Study of residence time distribution in a reciprocating single screw pin-barrel extruder. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 4147-4153.
- L. Cafiero, D. D. (2021). Characterization of WEEE plastics and their potential valorisation through the production of 3D printing filaments. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9.
- Lafleur Pierre, G. &. (2018). Polymer Extrusion. *Materials Science Series*.
- Long Zhou, M. P. (2021). Temperature distribution in a multi-layer cylinder with circumferentially-varying convective heat transfer boundary conditions. *International Journal of Thermal Sciences*.
- Mark Keanu James E. Exconde, J. A. (2019). Materials Selection of 3D Printing Filament and Utilization of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) in a Redesigned Breadboard. *Procedia CIRP*, 84, 28-32.
- Prescott, J. K. (2019). On Powder Flowability. *Pharmaceutical Technology. Technology Drive, Wesford*, 60-84.
- S Nithya Priya, S. N. (2021). Design and fabrication of filament extruder with spooler. *Materials Today: Proceedings*.
- Soyeon Park, K. (. (2021). Polymer-based filament feedstock for additive manufacturing. *Composites Science and Technology*, 213.
- Stevens, M. C. (1995). *Extruder Principles and Operation*. Springer.
- Wang, H. (2021). Construction and discrete processing of screw extruder based on three-dimensional spiral model. *Microprocessors and Microsystems*, 82.
- Yunus Cengel, A. G. (2011). *Transferencia de calor y masa, fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill Interamericana de España S.L.

Anexo N° 01
CÓDIGO DE ÉTICA DEL COLEGIO DE INGENIEROS DEL PERÚ (CIP).



CÓDIGO DE ETICA DEL CIP

**APROBADO EN LA III SESIÓN ORDINARIA DEL CONGRESO NACIONAL DE CONSEJOS
DEPARTAMENTALES DEL PERÍODO 1998 - 1999
EN LA CIUDAD DE TACNA 22, 23 Y 24 ABRIL 1999**

Fuente: Fuente especificada no válida.

Anexo N° 02
CÓDIGO DE ÉTICA DE INVESTIGACIÓN DE LA UNIVERSIDAD SEÑOR
DE SIPÁN (USS).



Fuente: Fuente especificada no válida.

Anexo N° 03: Normas usadas

AN AMERICAN NATIONAL STANDARD

Design of Transmission Shafting

ANSI/ASME B106.1M - 1985

(SECOND PRINTING)

SPONSORED AND PUBLISHED BY

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS

United Engineering Center 345 East 47th Street New York, N. Y. 10017

Anexo N° 04: Selección de husillo extrusor

RESINA	TIPO MOLECULAR	TEMP. CRITICA °F (a)	DENSIDAD g/cm ³		DISEÑO DL HUSILLO BASADO EN			NOMBRES COMERCIALES RELACIONADOS
			SÓLIDO	FUNDIDO	PROF. DEL CANAL (b)	LONG. DE TRANSICION (c)	RELACION DE COMPRESION (d)	
PP	C-	48 Tm	0,9	0,75	Media	Media	Media	Marlex, Hifax, Escorene, Nortuff
ABS	A	228 Tg	1,08	0,97	Profunda	Larga	Baja	Cyclocac, Magnum, Lustran
CA	C*	NA	1,22	1,14	Profunda	Media	Baja	Tenite
CAB	C*	NA	1,15	0,08	Profunda	Media	Baja	Tenite
CAP	C*	NA	1,17	1,1	Profunda	Media	Baja	Tenite
FEP	C	527 Tm	2,12	1,49	Media	Corta	Media	Teflon
HDPE	C	278 Tm	0,95	0,73	Media	Media	Media	Dowlax, Marlex, Pothrotone, Alathon
HIPS	A	210 Tg	1,05	0,97	Profunda	Larga	Baja	Styron, Lustrex, RTP
LCP	C	525 Tm	1,35	Unk	Superficial	Media	Media	Vectra, Xydar, Ekkcel
LDPE	C	221 Tm	0,92	0,76	Media	Media	Media	Petrothene, Tenite, Escorene
LLDPE	C	250 Tm	0,93	0,7	Media	Media	Media	Petrothene, Dowlax, Escorene, Atlane
PA6/6	C	500 Tm	1,14	0,97	Superficial	Media	Alta	Zytel, Ultramid, wollamid, Vydyno
PBT	C*	470 Tm	1,34	1,11	Media	Media	Baja	Valox, Celanex
PC	A	302 Tg	1,2	1,02	Profunda	Larga	Baja	Lexan, Nacrolon
PEI	A	420 Tg	1,27	0,08	Media	Media	Media	Ultrem
PET	C**	460 Tm	1,4	1,1	Media	Media	Media	Kodapak, Petlon, Rynite

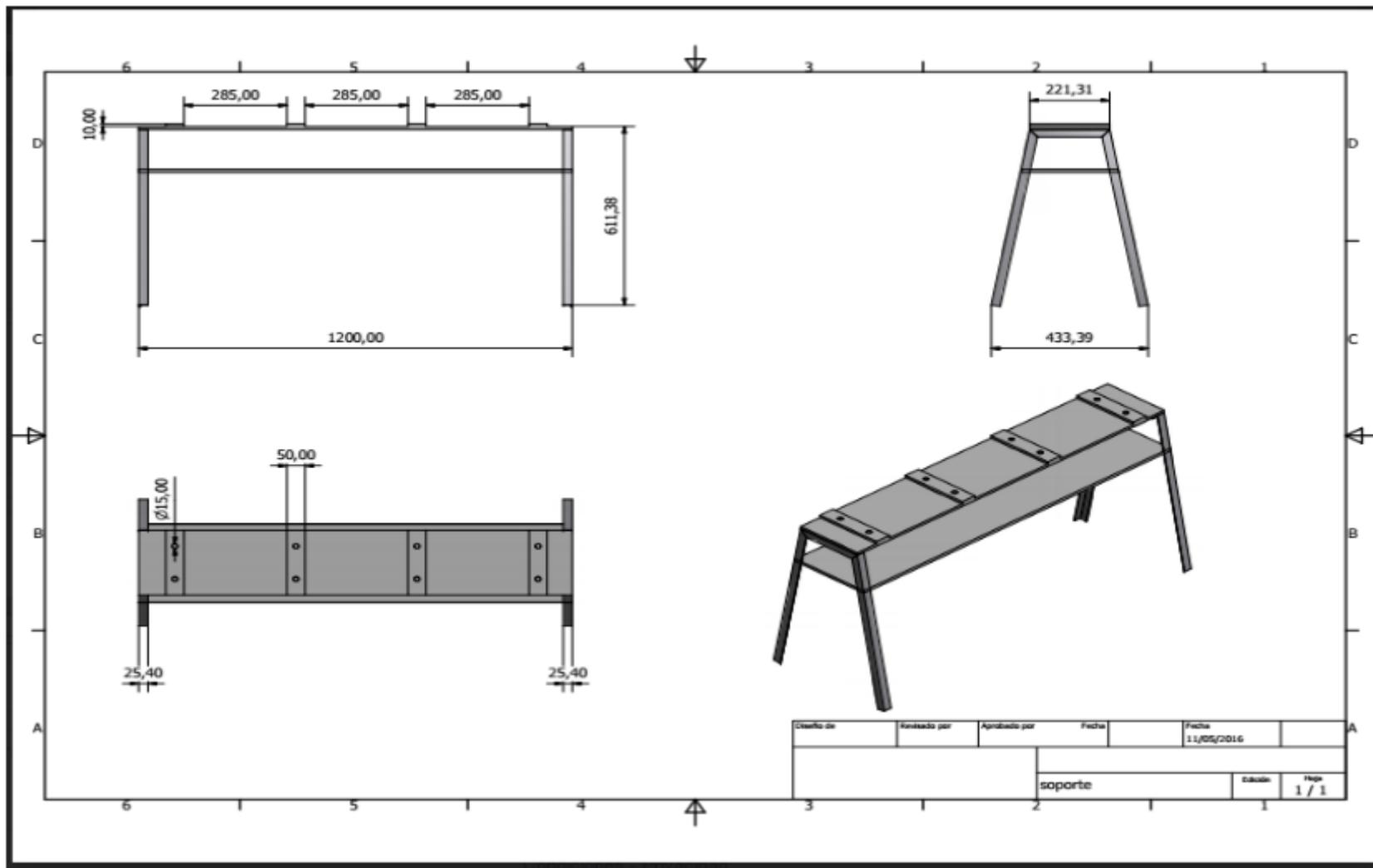
Anexo N° 05: Selección del maerial para el husillo extrusor

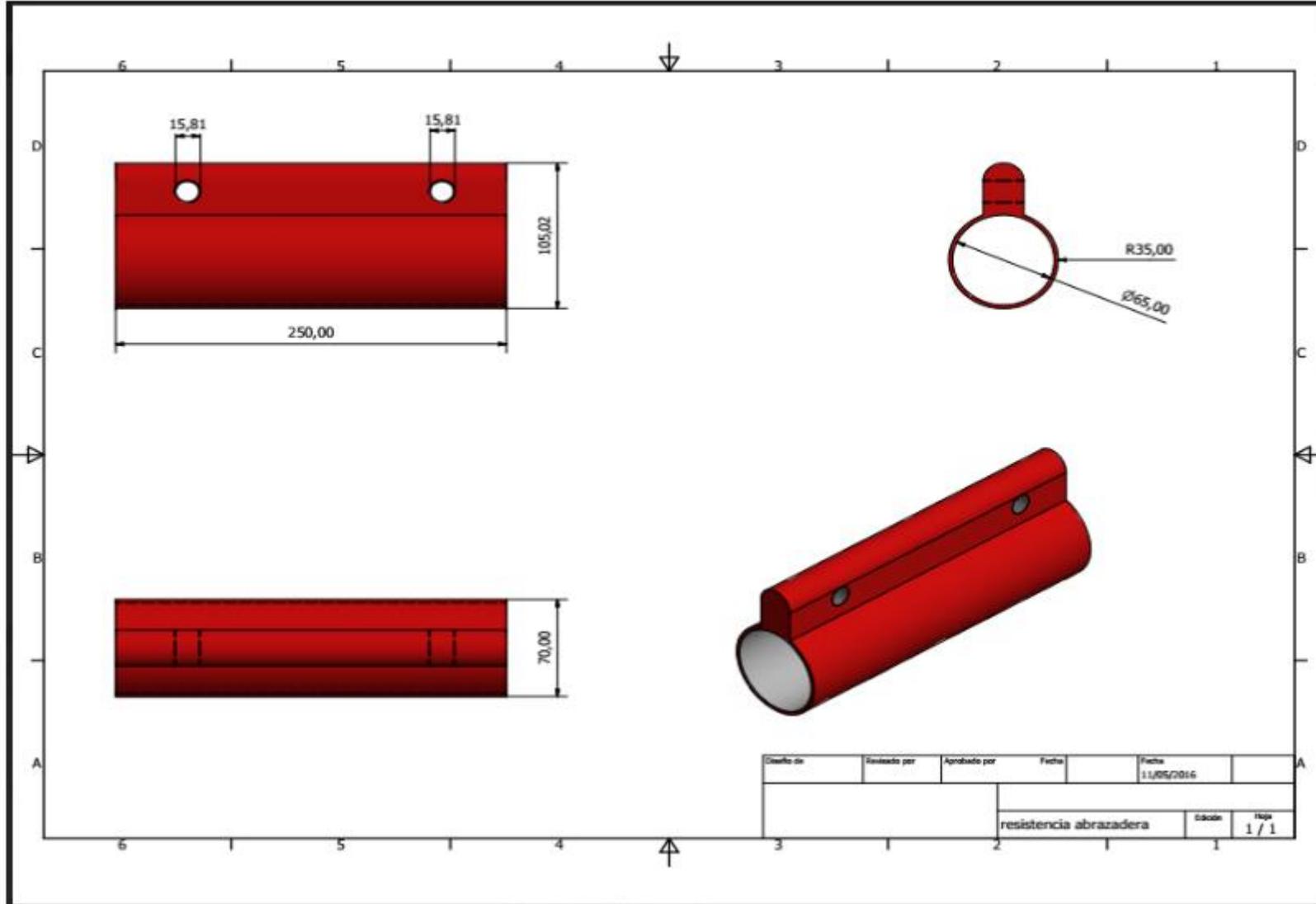
Corte por cizalla- miento del material	Resistencia al desgaste Tenacidad	Indeformabilidad Resistencia al choque térmico (en el temple)	Material de espesor fino pequeñas series (corte en frío)	3-6	1-7	-	$\frac{W210 - 01 - (A2) - L7}{F112}$
			Material de espesor fino pequeñas series (corte en caliente)	3-6	1-7	4	$C4 \cdot (H13)$
			Material de espesor fino grandes series (corte en frío)	4-9	1-7	-	$(01) - A2 - 02 - (03) - (06) - H2 - H7$
			Material de espesor fino grandes series (corte en caliente)	4-9	1-7	4-6	$(C4) \cdot H13$
			Material de espesor grueso (corte en frío)	2-4	7-9	-	$(W210) - S1 - S4 - F112$
			Material de espesor grueso (corte en caliente)	3-5	7-9	6-8	$H13 \cdot (H21)$
Forjado en caliente	Resistencia al desgaste Dureza en caliente	Tenacidad Maquinabilidad Resistencia al choque térmico	Pequeñas series	3-6	6-9	4-7	$(C1) - (C2) - C4 - (H11) - H13$
			Grandes series	4-6	6-9	7-9	$(C4) \cdot H13 \cdot H21$
Estampado en frío	Resistencia al desgaste	Maquinabilidad Tenacidad Indeformabilidad	Pequeñas series	4-6	1-7	-	$\frac{W210 - F112 - 01}{(A2)}$
			Grandes series	7-9	1-4	-	$02 - 03 - 06 - H2 - H7$
Embutido profundo	Resistencia al desgaste	Indeformabilidad	Pequeñas series	4-6	1-7	-	$(W210) \cdot (F112) - 01 - A2$
			Grandes series	7-9	1-4	-	$02 - 03 - 06 - H2 - H7$
Extrusión	Resistencia al desgaste Tenacidad		En frío	4-9	1-7	-	$\frac{L7 - 01 - A2 - 02 - 03 - 06}{H2 - H7}$
	Dureza en caliente Tenacidad	Resistencia al desgaste	En caliente	3-6	6-9	5-7	$(C3) - (C4) - (H11) - H13$ $H21$

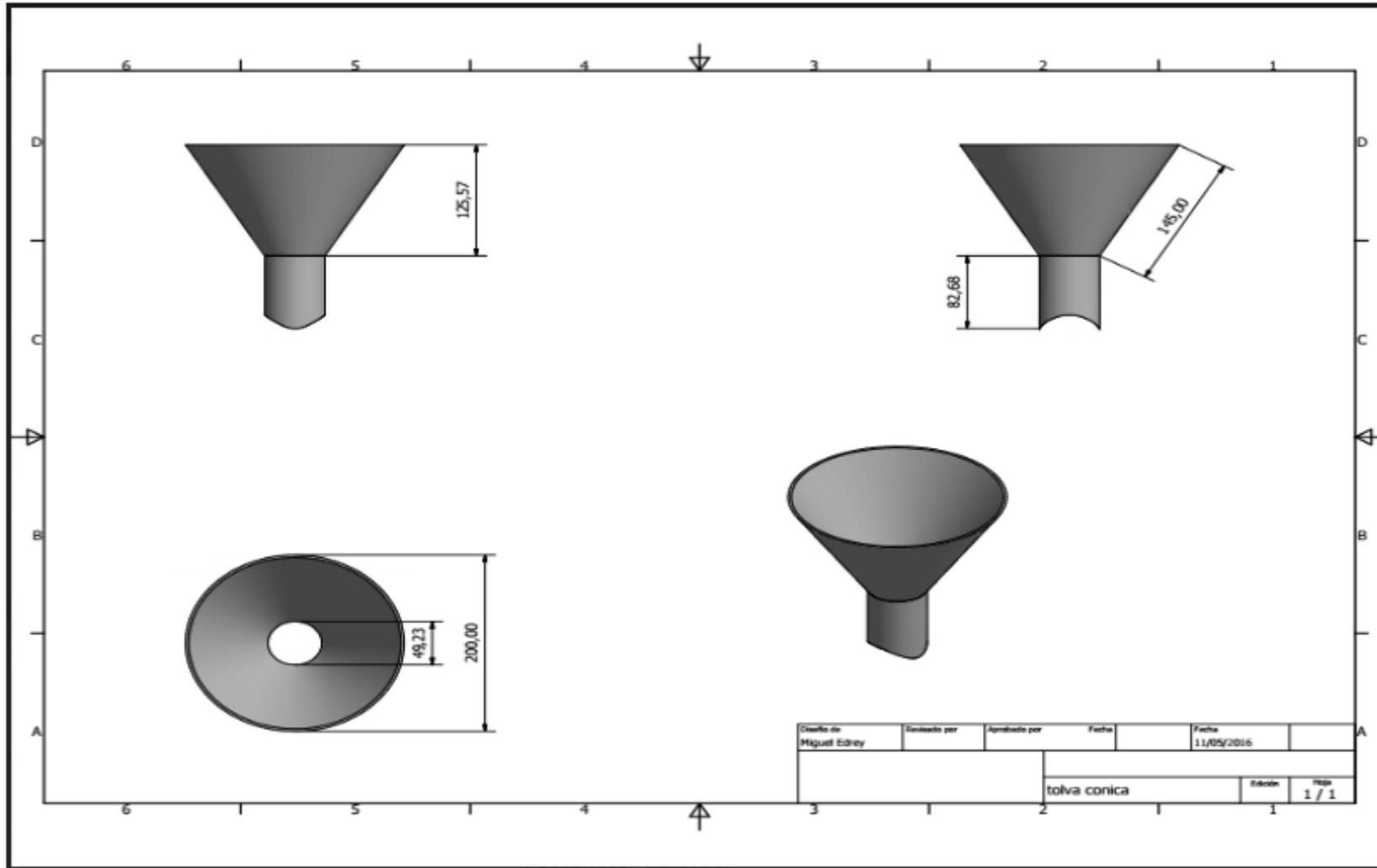
Anexo N° 06: Planos

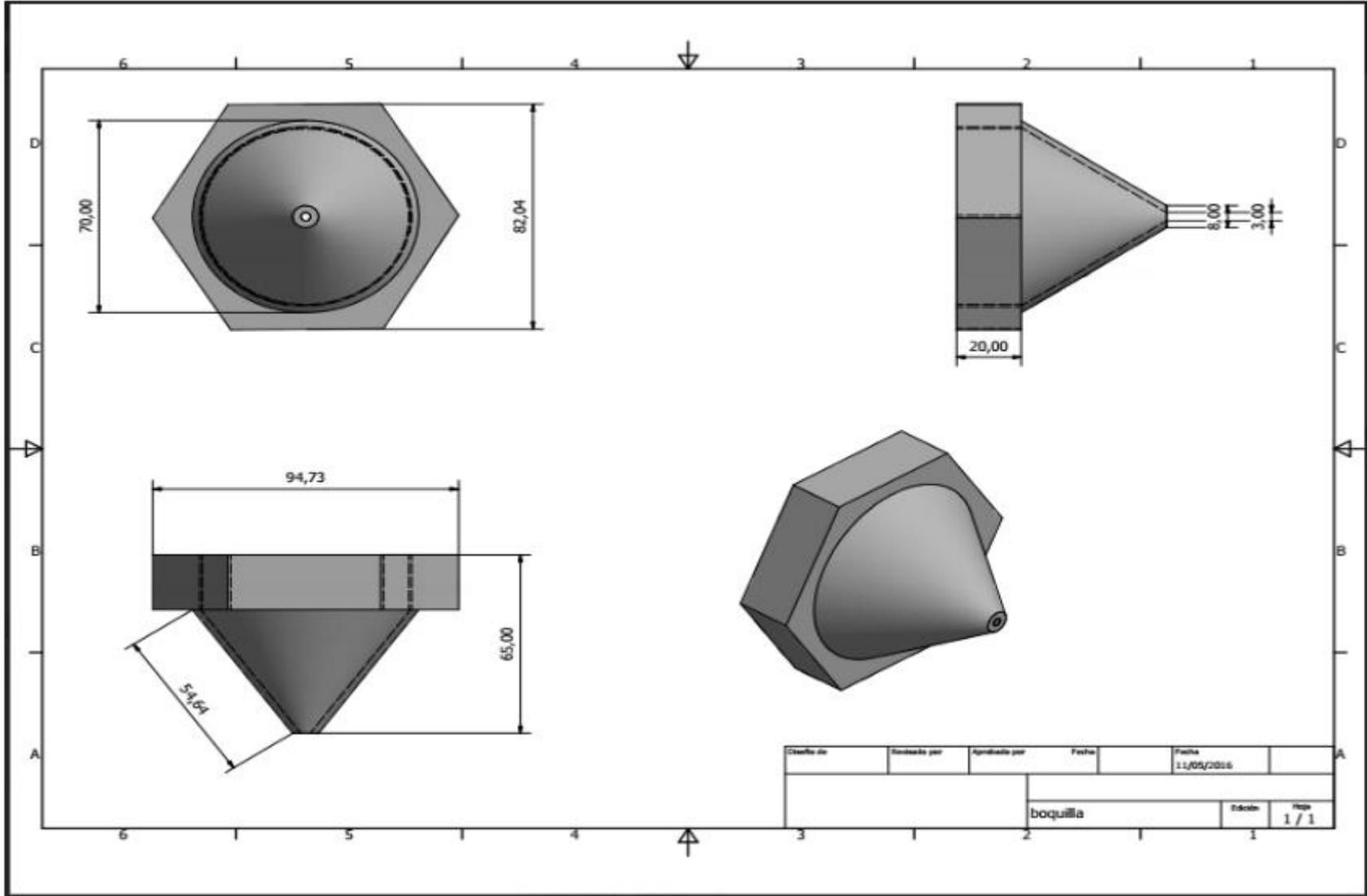
LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	barril 1	
2	1	boca tolva	
3	1	tolva	
4	1	husillo 1	
5	1	mallá	
6	1	soporte	
7	4	abrasadera barril	
8	14	Pieza3	
9	3	resistencia abrazadera	
10	6	tuerca	
11	1	boquilla	
12	1	assembly motor	
13	1	tablero de control	

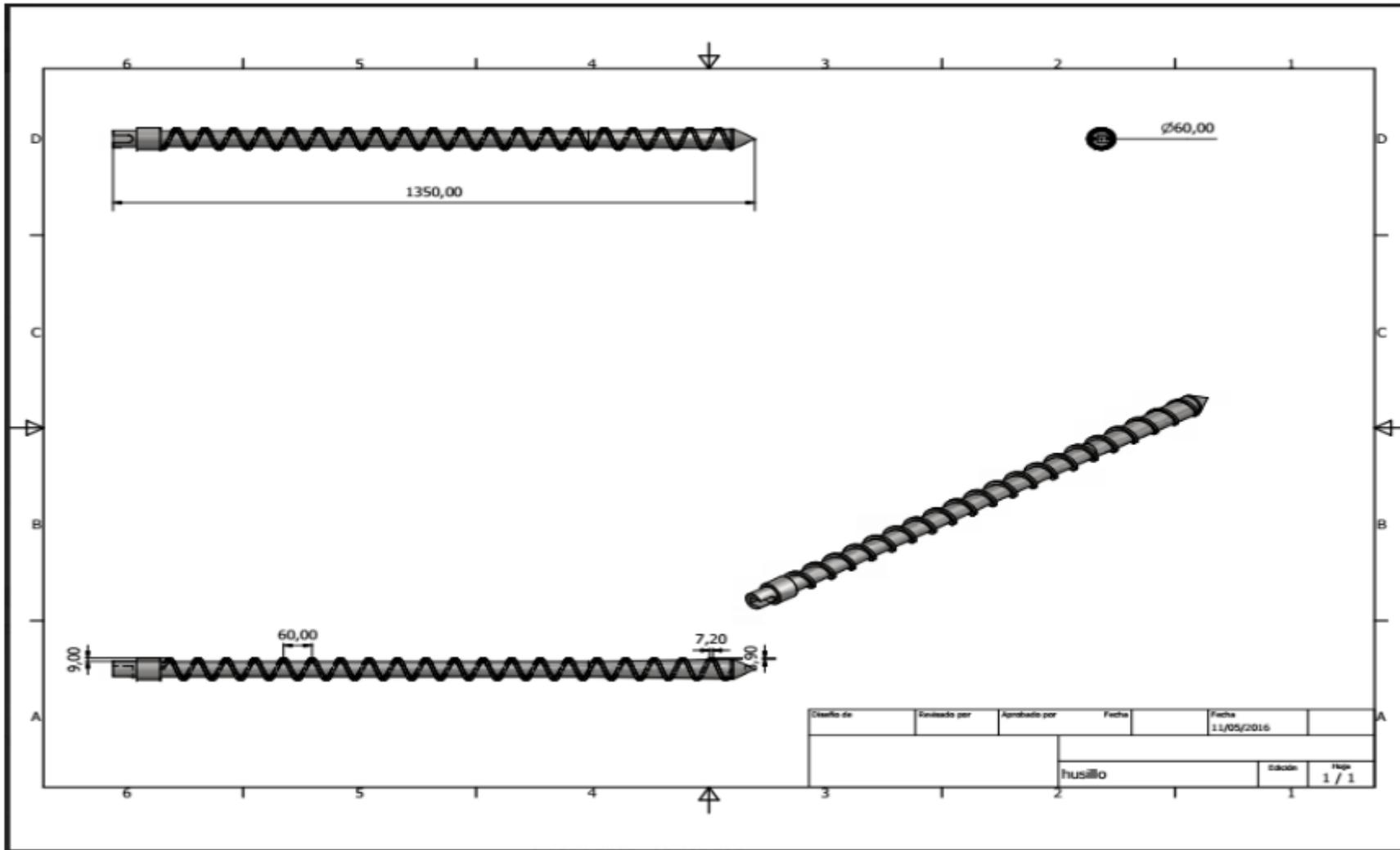
Diseño de	Elaborado por	Aprobado por	Fecha	Fecha
				11/05/2016
			extrusora final explosion-1	Edición
				Página
				1 / 1











Anexo N° 06: Costos de fabricación

Item	Rubro	Cantidad	Costo Unit S/.	Costo Parcial S/.
1	Tornillo Extrusor	1	850	850
2	Motor Eléctrico	1	350	350
3	Reistencial eléctricas	5	100	500
4	Panel de control	1	350	350
5	Tolva de aluminio	1	150	150
6	Estructura	1	450	450
7	Cubierta de seguridad	1	50	50
8	Camiseta	1	25	25
9	Boquillas	2	150	300
10	Chumaceras	2	80	160
TOTAL				3185.00