



UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Proyecto de Investigación
previo a la obtención del
título de Ingeniero Mecánico.

Título del Proyecto de Investigación:

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO TRITURADOR-EXTRUSOR DE
MATERIAL PLÁSTICO REUTILIZABLE TIPO TEREFTALATO DE
POLIETILENO (PET) PARA LA ELABORACIÓN DE FILAMENTO PARA
IMPRESORAS 3D.**

Autores:

Darwin Gustavo Sandoya Lara
Christopher Michell Macias Coello

Director del Proyecto de Investigación:

Ing. Méc. Diego Javier Punina Guerrero, M.Sc.

Quevedo- Los Ríos- Ecuador

2021



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, **Darwin Gustavo Sandoya Lara**, declaro que la investigación aquí descrita es de mi autoría; **que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional**; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Técnica Estatal de Quevedo, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este documento, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

f. _____

Darwin Gustavo Sandoya Lara

C.I.: 0954348587



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, **Christopher Michell Macias Coello**, declaro que la investigación aquí descrita es de mi autoría; **que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional**; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Técnica Estatal de Quevedo, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este documento, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

f. _____

Christopher Michell Macias Coello

C.I.: 1206317107



CERTIFICADO DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

El suscrito, **Ing. Diego Javier Punina Guerrero MSc.**, Docente de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, certifica que los estudiantes **Christopher Michell Macias Coello y Darwin Gustavo Sandoya Lara**, realizaron el Proyecto de Investigación de grado titulado “**Diseño y construcción de un equipo triturador-extrusor de material plástico reutilizable tipo tereftalato de polietileno (PET) para la elaboración de filamento para impresoras 3D.**”, previo a la obtención del título de Ingeniería Mecánica, bajo mi dirección, habiendo cumplido con las disposiciones reglamentarias establecidas para el efecto.

Ing. Diego Javier Punina Guerrero MSc

DIRECTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN



CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO

Ing. **Punina Guerrero Diego Javier MSc.** En calidad de director de Proyecto de Investigación titulado “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO TRITURADOR-EXTRUSOR DE MATERIAL PLÁSTICO REUTILIZABLE TIPO TEREF TALATO DE POLIETILENO (PET) PARA LA ELABORACIÓN DE FILAMENTO PARA IMPRESORAS 3D**”, me permito manifestar a usted y por intermedio al Consejo Directivo de Facultad lo siguiente:

Que, los estudiantes **Christopher Michell Macias Coello y Darwin Gustavo Sandoya Lara** egresados de la Facultad Ciencias de la Ingeniería, de la carrera de Ingeniería Mecánica han cumplido con las correcciones pertinentes, e ingresado su Proyecto de Investigación al sistema URKUND, tengo a bien certificar la siguiente información sobre el informe del sistema antiplagio con un porcentaje de 7%.

URKUND	
Documento	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO TRITURADOR-EXTRUSOR DE MATERIAL PLÁSTICO REUTILIZABLE TIPO TEREF TALATO DE POLIETILENO (PET) PARA LA ELABORACIÓN DE FILAMENTO PARA IMPRESORAS 3D.docx (D99813642)
Presentado	2021-03-26 10:34 (-05:00)
Presentado por	darwin.sandoya2015@uteq.edu.ec
Recibido	dpuninag2.uteq@analysis.arkund.com
Mensaje	[DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO TRITURADOR-EXTRUSOR DE MATERIAL PLÁSTICO REUTILIZABLE TIPO TEREF Mostrar el mensaje completo
7% de estas 53 páginas, se componen de texto presente en 12 fuentes.	

Ing. **Punina Guerrero Diego Javier Msc.**

DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

CERTIFICACIÓN DE APROBACIÓN DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN POR TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO FACULTAD CIENCIA DE LA INGENIERÍA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TÍTULO:

Diseño y construcción de un equipo triturador-extrusor de material plástico reutilizable tipo tereftalato de polietileno (PET) para la elaboración de filamento para impresoras 3D.

Presentado al Consejo Directivo como requisito previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Aprobado por:



Firmado electrónicamente por:
**DANIEL ROBERTO
ZAPATA HIDALGO**

Ing. Daniel Roberto Zapata Hidalgo

Presidente del Tribunal



Firmado electrónicamente por:
**OMAR ARTURO
CEVALLOS MUNOZ**

Ing. Omar Arturo Cevallos Muñoz

Miembro del Tribunal



Firmado electrónicamente por:
**CRISTIAN PAUL
TOPA
CHUQUITARCO**

Ing. Cristian Paul Topa Chuquitarco

Miembro del Tribunal

QUEVEDO – LOS RIOS – ECUADOR

AÑO 2021

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por brindarme sabiduría y guiarme siempre por el buen camino, por permitirme llegar a una de mis metas de ser Ingeniero Mecánico, a mi padre Darwin Sandoya, a mi madre Lanndy Lara, a mis hermanos, a mi abuela y a mis tíos, por su apoyo incondicional y siempre inculcarme buenos valores para ser una persona de bien.

A mis compañeros con los cuales pude avanzar en cada etapa de esta carrera, en especial a Yerlit, Eduardo, Charly, Jeremy, Josencka, Tito, Jair, Cristofer, con los que pude compartir, estudiar y trabajar.

A la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, a la carrera de Ingeniería Mecánica, a todos y cada uno de los docentes de esta prestigiosa institución que nos brindaron conocimientos en las diferentes áreas académicas, entre ellos el Ing. Jorge Guadalupe, Ing. Diego Punina y el Ing. Patricio Alcocer, quienes me proporcionaron una guía de superación día a día y me motivaron a seguir creciendo como persona y como profesional.

Darwin Gustavo Sandoya Lara

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico a Dios por brindarme la salud necesaria para llegar a cumplir este objetivo, a mi padre Darwin y mi madre Lanndy, por sus esfuerzo, consejos, apoyo y amor incondicional para completar esta meta.

A mis hermanos, familiares, amigos y a todos aquellos con los que he podido colaborar profesionalmente, los cuales fueron un apoyo en cada decisión tomada para seguir adelante.

Darwin Gustavo Sandoya Lara

AGRADECIMIENTO

Mediante este trabajo investigativo agradezco a Dios, quien fue la guía primordial para saber hacer lo correcto y no dejarme vencer por las circunstancias adversas de la vida diaria, y permitirme ser parte de una familia maravillosa.

A mi madre por su amor incondicional e inigualable que, junto a mi familia, me han inculcado valores y motivado a luchar por alcanzar metas, son quienes han estado apoyándome siempre y muy pendientes de cada paso que he dado como ser humano y como estudiante, enseñándome a ser resiliente, a dar siempre el cien por ciento de lo mejor de mí.

A mi mejor amigo y hermano, Dr. Carlos Macias Coello, quien está pendiente de mí siempre, el que me ha aconsejado y orientado a identificar y elegir lo correcto en la vida.

A mis amigos que indirectamente han sido participe en mi trayecto universitario.

A la universidad Técnica Estatal de Quevedo, a la majestuosa carrera de Ingeniería Mecánica, al cuerpo de docentes que forman parte de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, en especial a mi tutor, Ing. Punina Guerrero Diego Javier MSc., que con sus sabios conocimientos nos prepararon para el presente y futuro como profesionales.

Christopher Michell Macias Coello

DEDICATORIA

Este tema y trabajo investigativo está dedicado a Dios, mamá, mejor amigo-hermano, madrina-mamá, tía-hermana, prima-hermana, novia, demás familiares y amigos quienes han sido de gran ayuda en este periodo de estudio universitario.

Christopher Michell Macias Coello

RESUMEN

El diseño de una trituradora–extrusora de material plástico reutilizable (en este caso el tereftalato de polietileno PET) para la elaboración del filamento ha sido el objetivo principal de esta investigación, con el fin de reducir la contaminación causada por el excesivo consumo de productos envasados en botellas plásticas.

Por tal razón el estudio para el diseño del equipo para material reciclado y elaboración de filamento, se usó la metodología de diseño y desarrollo de productos de Ulrich y Eppinger, diseño mecánico y análisis numéricos (para el estudio de elementos sustanciales). Para ejecutar el diseño del equipo triturador-extrusor se elaboraron diversas alternativas, las cuales se evaluaron en diferentes requerimientos para su elección, entre estos, la facilidad de diseño y manipulación, automática o semiautomática, costos, tamaño del equipo, facilidad de traslación y más, así también se realizaron diferentes cálculos para el diseño detallado de las partes que conforman el equipo y el tipo de resistencias que se usarían para fundir el plástico, los cuales comienzan a transferir calor, todo esto con la finalidad de tener un producto eficiente. En base a la investigación se determinó las diferentes fases que deben de pasar los envases para ser procesados entre ellos la trituración y extrusión, para la elaboración del equipo se realizó un estudio de alternativas eligiendo la alternativa “C” siendo la más óptima, comprobando mediante el paquete computacional SolidWorks, para luego elaborarlo. En el desarrollo del equipo se determinó que puede procesar 1Kg de plástico en 30 min aproximadamente desde su trituración hasta la extrusión.

Palabras claves: Filamento, husillo, resistencias, reciclaje, pellet.

ABSTRACT

The design of a reusable plastic material extruder-crusher (in this case PET polyethylene terephthalate) for the production of the filament has been the main objective of this research, in order to reduce the contamination caused by the excessive consumption of packaged products in plastic bottles. For this reason, the study for the design of the equipment for recycled material and production of filament, the methodology of design and development of products of Ulrich and Eppinger, mechanical design and numerical analysis (for the study of substantial elements) were used. To execute the design of the crusher-extruder equipment, various alternatives were developed, which were evaluated in different requirements for their choice, among these, the ease of design and handling, automatic or semi-automatic, costs, size of the equipment, ease of translation and more, also the different calculations were also carried out for the detailed design of the parts that make up the equipment and the type of resistors that would be used to melt the plastic, which begin to transfer heat, all with the purpose of having an efficient product. Based on the research, the different phases that the containers must go through to be processed, including crushing and extrusion, were determined for the elaboration of the equipment, a study of alternatives was carried out, choosing alternative "C" being the most optimal, checking by the SolidWorks computational package, and then build it. In the development of the equipment, it was determined that it can process 1 Kg of plastic in approximately 30 minutes from its crushing to extrusion.

Keywords: Filament, spindle, resistors, recycling, pellet.

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS	iii
CERTIFICADO DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	iv
CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO	v
CERTIFICACIÓN DE APROBACIÓN DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN POR TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	vi
AGRADECIMIENTO	vii
DEDICATORIA.....	viii
AGRADECIMIENTO	ix
DEDICATORIA.....	x
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	2
CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	2
1.1. Problema de la investigación.....	3
1.1.1. Planteamiento del problema.....	3
1.2. Objetivos.....	5
1.2.1. Objetivo general.....	5
1.2.2. Objetivos específicos.....	5
1.3. Justificación.....	6
CAPÍTULO II.....	7
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN	7
2.1. Marco conceptual.....	8
2.1.1. Diseño.....	8
2.1.2. Arquitectura y sus modalidades	8
2.1.3. Máquina.....	8
2.1.4. Mecanismo.....	8
2.1.5. Triturar.....	8
2.1.6. Extruir.....	9
2.1.7. Polímeros.....	9
2.1.7.1. Tipos de polímeros.....	9
2.2. Procesamiento de materiales plásticos.....	13
2.2.1. Proceso de triturado de plásticos.....	13

2.2.2.	Tipos de trituradoras de plástico	13
2.2.2.1.	De eje simple	13
2.2.2.2.	De doble eje	21
2.2.2.3.	De cuatro ejes.....	22
2.2.3.	Relación de transmisión	23
2.2.4.	Proceso de extrusión de plásticos.....	23
2.2.5.	Extrusora de fricción viscosa	24
2.2.6.	Componentes de extrusora de fricción viscosa	25
2.2.6.1.	Husillo.....	25
2.2.6.2.	Tolva	37
2.2.6.3.	Cabezal.....	38
2.2.7.	Defectos generales en el proceso de extrusión.....	38
2.2.8.	Propiedades mecánicas de los polímeros.	40
2.2.9.	Propiedades térmicas de materiales en el proceso de extrusión.....	41
2.2.9.1.	Punto de transición vítrea (T_g).	41
2.2.9.2.	Punto de fusión (T_m).	41
2.2.9.3.	Temperatura de fusión en procesamiento de polímeros.	42
2.2.10.	Transferencia de calor	43
2.2.10.1.	Transferencia de calor por conducción	43
2.2.10.2.	Transferencia de calor por convección	43
2.2.10.3.	Transferencia de calor por radiación.....	44
2.2.11.	Sistema de calefacción	45
2.2.11.1.	Potencia de los calefactores	45
2.2.11.2.	Balance energético en el estado temporal.....	45
2.2.11.3.	Coeficiente de transferencia de calor	48
2.2.11.4.	Coeficiente de convección	49
2.2.11.5.	Coeficiente de radiación	50
2.2.12.	Evaluación de las pérdidas de calor	51
2.2.12.1.	Pérdida por conducción	51
2.2.12.2.	Pérdida por radiación	51
2.2.12.3.	Pérdida por convección.....	51
2.2.13.	Incremento de la energía interna del polímero.....	52
2.3.	Tornillo transportador.....	52

2.3.1.	Funcionamiento general	53
2.3.2.	Características de las partes de un tornillo transportador.....	54
2.3.2.1.	Grupo motriz o accionamiento	54
2.3.2.2.	Carcasa o canalón	55
2.3.2.3.	Tornillo	55
2.3.3.	Aplicaciones	58
2.3.4.	Capacidad del transportador de tornillo	59
2.3.4.1.	Parámetros iniciales para el diseño del tornillo transportador	59
2.4.	Sistema de refrigeración	62
2.4.1.	Sistema de bobinado.....	64
2.5.	Marco Referencial.	68
2.5.1.	Historia del plástico.....	68
2.5.2.	Reciclaje de materiales plásticos.....	68
2.6.	Máquinas disponibles en el mercado.....	69
2.6.1.	Máquinas trituradoras.....	70
2.6.1.1.	“Desfibradora” de Precious Plastic.....	70
2.6.1.2.	Filabot Industrial.....	71
2.6.2.	Máquinas extrusoras.....	71
2.6.2.1.	Filabot EX2.....	71
2.6.2.2.	FILASTRUDER.	72
2.7.	Manufactura aditiva.....	73
2.8.	Aceros empleados en la construcción de maquinaria.	74
2.8.1.	Acero al carbono.	74
2.8.2.	Acero inoxidable.	74
2.8.3.	Acero AISI 1015	75
2.8.4.	Acero AISI 1018.	75
2.8.5.	Acero AISI 1045.	76
2.9.	Metodología de diseño y desarrollo de productos	77
2.10.	Modelos del proceso de diseño OTTO y WOOD.....	78
CAPÍTULO III		80
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....		80
3.1	Localización.....	81
3.2.	Tipo de investigación.	82

3.2.1.	Investigación exploratoria.....	82
3.2.2.	Investigación de campo.....	82
3.3.	Métodos de investigación.....	82
3.3.1.	Método analítico.....	82
3.3.2.	Método bibliográfico.....	82
3.4.	Fuentes de recopilación de información.....	83
3.5.	Diseño de investigación.....	83
3.5.1.	Diseño experimental.....	83
3.6.	Instrumentos de investigación.....	83
3.7.	Recursos humanos y materiales.....	83
CAPÍTULO IV		84
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		84
4.1.	Diseño conceptual.....	85
4.2.	Requerimientos del equipo triturador-extrusor	85
4.2.1.	Listado de atributos	86
4.2.2.	Objetivos, restricciones y funciones.....	87
4.2.3.	Categorización de los objetos de diseño	88
4.2.4.	Jerarquización de objetivos	88
4.2.5.	Lista de objetivos con pesos ponderados	89
4.3.	Análisis funcional (Black-Box “Caja negra”)	92
4.3.1.	Representación de la estructura de funciones	94
4.4.	Matriz QFD para el análisis del equipo triturador-extrusor	95
4.5.	Generación de alternativas de diseño del equipo Triturador-extrusor.....	100
4.5.1.	Alternativa “A”	100
4.5.2.	Alternativa “B”	102
4.5.3.	Alternativa “C”	104
4.6.	Selección de la alternativa	106
4.7.	Diseño detallado.	108
4.7.1.	Sistema de trituración.....	108
4.7.1.1.	Diseño asistido por paquetes computacionales.....	108
4.7.2.	Sistema de transporte	126
4.7.2.1.	Diseño asistido por paquetes computacionales.....	130
4.7.3.	Sistema de extrusión.....	135

4.7.3.1.	Sistema de calefacción.....	146
4.7.3.2.	Sistema de transmisión de velocidad	151
4.7.3.3.	Cálculo de almacenamiento en la extrusora.....	151
4.7.3.4.	Diseño asistido por paquetes computacionales.....	153
4.7.4.	Sistema de bobinado.....	157
4.7.5.	Sistema de refrigeración.....	159
4.7.6.	Sistema de control para el sistema de calefacción	163
4.7.7.	Análisis económico.....	167
4.7.7.1.	Costos de materiales	167
4.7.7.2.	Costos de fabricación y operaciones con máquinas	168
4.8.	Plan de validación.....	170
4.9.	Discusión de resultados	174
CAPÍTULO V		177
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		177
5.1.	Conclusiones.....	178
5.2.	Recomendaciones	179
CAPÍTULO VI		180
BIBLIOGRAFÍA		180
CAPÍTULO VII.....		185
ANEXOS.....		185
CAPÍTULO VIII		202
PLANOS.....		202

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1:	Códigos recomendados para la identificación de plásticos.....	10
Figura 2:	Pellets de plástico (triturado)	13
Figura 3:	Trituradora de eje simple	14
Figura 4:	Partes de un molino de cuchillas.....	15
Figura 5:	Partes de un molino de cuchillas.....	15
Figura 6:	Esquema de corte de las cuchillas sobre el PET	17
Figura 7:	Trituradora de doble eje	22
Figura 8:	Triturador de cuatro ejes	22
Figura 9:	(a) Esquema de un extrusor de tornillo característico, (b) Geometría de un tornillo de extrusión.....	24
Figura 10:	Extrusora de husillo	25

Figura 11: Parámetros del husillo	26
Figura 12 : Parámetros del husillo (sección transversal)	26
Figura 13: Diagrama de tensiones	33
Figura 14: Cabezal o boquilla.....	38
Figura 15: Defecto de fractura de fusión	39
Figura 16: Defecto corrugado.....	39
Figura 17: Defecto tallo de bambú	40
Figura 18: Puntos de transición de algunos polímeros	41
Figura 19: Puntos de fusión.....	42
Figura 20 : Conducción de calor a través de una placa plana.....	43
Figura 21: Transportador de tornillo	54
Figura 22: Tornillo de un transportador	55
Figura 23: Paso estándar.....	56
Figura 24: Paso corto.....	56
Figura 25: Paso medio	57
Figura 26: Paso largo.....	57
Figura 27: Paso variable	58
Figura 28: Diseño del sistema de bobinado.....	65
Figura 29: DCL del carrete del sistema de bobinado	66
Figura 30: Esquema representativo de los parámetros del sistema de bobinado.....	67
Figura 31: Proceso para el reciclaje físico del PET	68
Figura 32: Trituradora de plásticos, Precious Plastics Shredder. (Desfibradora).....	70
Figura 33: Trituradora de plásticos, Filabot Industrial Reclaimer	71
Figura 34: Extrusora de filamento, Filabot EX2	72
Figura 35: Extrusora de filamento, FILASTRUDER.....	73
Figura 36: Resistencia a la tensión y dureza, como función del contenido de carbono en un acero al carbono simple.	74
Figura 37: Fases del proceso de diseño en un enfoque multidisciplinar	77
Figura 38 : Ubicación de la ciudad de Ventanas	81
Figura 39: Caja negra del sistema	93
Figura 40: Conexiones de las funciones de los procesos mecánicos, eléctricos y control que realiza el equipo triturador-extrusor.	95
Figura 41: Relación entre criterios	97
Figura 42: Análisis entre consumidor y requerimientos funcionales	98
Figura 43: Correlaciones técnicas.....	99
Figura 44: Equipo triturador-extrusor vertical.....	101
Figura 45: Equipo triturador-extrusor horizontal	103
Figura 46: Equipo triturador-extrusor horizontal con tornillo transportador	105
Figura 47: Modelado del eje de trituradora.	108
Figura 48: Cuchillas giratorias 1, 2, 3.	109
Figura 49: Separador de cuchillas giratorias.	109
Figura 50: Ensamble de cuchilla 1 en el eje.	109
Figura 51: Ensamble de separador de cuchilla giratoria en el eje.	110
Figura 52: Ensamble de separadores y cuchillas giratorias.....	110

Figura 53: Tapa laterales de la caja.	110
Figura 54: Ensamble de tapas laterales.....	111
Figura 55: Ensamble de cuchillas fijas (pequeñas y grandes).	111
Figura 56: Ensamble de cajas laterales.....	111
Figura 57: Ensamble de la trituradora	112
Figura 58: Diagrama de fuerza y torque que actúan sobre la cuchilla.	114
Figura 59: Elementos que componen el eje de la trituradora	117
Figura 60: Diagrama de cuerpo libre del eje de la trituradora.....	117
Figura 61: Esquema de cargas en la cuchilla.....	118
Figura 62: Resultado de deformación en análisis de esfuerzos en la cuchilla (AISI 304).	119
Figura 63: Resultado de deformación en análisis de esfuerzos en la cuchilla (ASTM A36).	119
Figura 64: Resultado de la tensión de von Mises en análisis de esfuerzos en la cuchilla (AISI 304).....	120
Figura 65: Resultado de la tensión de von Mises en análisis de esfuerzos en la cuchilla (ASTM A36 Acero).....	120
Figura 66: Esquema de cargas en las cuchillas fijas del equipo triturador.....	122
Figura 67: Esquema de cargas en la cuchilla fija pequeña.	122
Figura 68: Resultado de deformación en análisis de esfuerzos en la cuchilla fija pequeña	123
Figura 69: Resultado de deformación en análisis de esfuerzos en la cuchilla fija pequeña (ASTM A36)	124
Figura 70: Resultado de la tensión de von Mises en análisis de esfuerzos en la cuchilla fija pequeña (AISI 304).	124
Figura 71: Resultado de la tensión de von Mises en análisis de esfuerzos en la cuchilla fija pequeña (ASTM A36).	125
Figura 72: Eje	130
Figura 73: Eje motriz.....	130
Figura 74: Tornillo transportador	131
Figura 75: Unión de eje con tornillo transportador	131
Figura 76: Acople de tubos de salida y, de entrada	131
Figura 77: Tubo de ingreso de transportador	132
Figura 78: Unión de tubo de ingreso con acople de tubo	132
Figura 79: Tubo de salida del transportador.....	132
Figura 80: Unión de tubo de salida con acople de tubo.....	133
Figura 81: Unión base	133
Figura 82: Cuerpo del tornillo	133
Figura 83: Acople entre unión base y cuerpo del tornillo	134
Figura 84: Carcasa del tornillo transportador	134
Figura 85: Ensamble del transportador.....	134
Figura 86: Tolda de alimentación.....	153
Figura 87: Cilindro o camisa	154
Figura 88: Unión de camisa y boquilla.....	154

Figura 89: Rompedor.....	154
Figura 90: Ensamble de camisa, rompedor y unión de camisa	155
Figura 91: Cabezal de extrusión	155
Figura 92: Eje sin fin	155
Figura 93: Estructura- soporte	156
Figura 94: Ensamble del extrusor.....	156
Figura 95: Ensamble del extrusor.....	156
Figura 96: Estructura del equipo triturador extrusor	161
Figura 97: Ensamble del extrusor.....	162
Figura 98: Ensamble del equipo triturador-extrusor.....	162
Figura 99: Ensamble del equipo triturador-extrusor.....	163
Figura 100: Controlador de temperatura REX-C100	164
Figura 101: Sensor termopar tipo K	165
Figura 102: Resistencias tipo abrazadera	166
Figura 103: Relé de estado sólido	166
Figura 104: Resultado de trituración PET	172
Figura 105: Control de temperaturas	172
Figura 106: Resultados de la extrusión sin boquilla.....	173
Figura 107: Resultado de extrusión de PET	174
Figura 108: Tamaño del pellet.....	174
Figura 109: Parámetros de transferencia de calor por conducción y convección	175
Figura 110: Estudio térmico del cilindro o camisa.....	175
Figura 111: Parámetros de transferencia de calor por conducción y convección	176
Figura 112: Estudio térmico del cilindro o camisa junto a la boquilla.....	176

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparación de material PET virgen y material RPET	11
Tabla 2. Propiedades del Tereftalato de Polietileno (PET).	20
Tabla 3: Simbología de los parámetros del husillo	27
Tabla 4: Características mecánicas a temperatura ambiente de algunos polímeros. [27] .40	
Tabla 5: Temperaturas de fusión y de transición vítrea de algunos de los materiales poliméricos más comunes.....	42
Tabla 6: Calores específicos de algunos materiales plásticos.	44
Tabla 7: Sistema de análisis para el balance energético	45
Tabla 8: Coeficiente de relleno.....	60
Tabla 9: Coeficiente debido a la inclinación	61
Tabla 10: Propiedades Acero AISI 1015	75
Tabla 11: Propiedades Acero AISI 1018.....	76
Tabla 12: Propiedades Acero AISI 1045.....	76
Tabla 13: Metodologías actuales de diseño de producto	78
Tabla 14: Requerimientos según sus categorías	85
Tabla 15: Objetivos, restricciones y funciones.....	87

Tabla 16: Categorización de los objetos de diseños	88
Tabla 17: Jerarquización de los objetivos de diseño	89
Tabla 18: Evaluación del peso relativo de cada categoría.....	89
Tabla 19: Evaluación del peso relativo de la categoría operación	90
Tabla 20: Evaluación del peso relativo de la categoría control de operación	90
Tabla 21: Evaluación del peso relativo de la categoría seguridad.....	91
Tabla 22: Evaluación del peso relativo de la categoría costo.....	91
Tabla 23: Lista de objetivos con pesos ponderados	92
Tabla 24: Ventajas y desventajas de alternativa “A”	102
Tabla 25: Ventajas y desventajas de alternativa “B”.....	104
Tabla 26: Ventajas y desventajas de alternativa “C”.....	106
Tabla 27: Selección de alternativas	106
Tabla 28: Resultados del análisis de las cuchillas giratorias	121
Tabla 29: Resultado del análisis de las cuchillas fijas pequeñas.	125
Tabla 30: Estado transitorio.....	146
Tabla 31: Tipos de termocuplas.....	164
Tabla 32: Costos de materiales.....	167
Tabla 33: Costos de fabricación y operaciones con máquinas	168
Tabla 34: Costos de mano de obra.....	168
Tabla 35: Costos de ingeniería y diseño	169
Tabla 36: Costo final de la máquina	169
Tabla 37: Tabulación de datos de triturado de botellas plásticas.	170
Tabla 38: Tiempo promedio de trituración de botellas de 25 g.....	171

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Efectuó de la ruptura del material.....	16
Ecuación 2: Reducción de la ecuación del trabajo óptimo.....	16
Ecuación 3: Fuerza de corte.....	17
Ecuación 4: Fuerza de impacto.....	18
Ecuación 5: Fuerza normal de corte	18
Ecuación 6: Desplazamiento del material	18
Ecuación 7: Área de desplazamiento.....	19
Ecuación 8: Fuerza de arrastre de las cuchillas giratorias	19
Ecuación 9: Esfuerzo cortante máximo	20
Ecuación 10: Momento existente en las cuchillas	20
Ecuación 11: Potencia	20
Ecuación 12: Potencia consumida	21
Ecuación 13: Paso del husillo.....	28
Ecuación 14: Área de la sección transversal del husillo.....	28
Ecuación 15: Longitud de trabajo.....	28
Ecuación 16: Holgura entre la cresta y el filete y el cilindro del husillo.....	28
Ecuación 17: Número de filetes del husillo.....	29
Ecuación 18: Ancho del filete	29

Ecuación 19: Ángulo de la hélice del husillo	29
Ecuación 20: Producción del husillo	29
Ecuación 21: Flujo de arrastre	30
Ecuación 22: Flujo de presión	30
Ecuación 23: Flujo de filtración	30
Ecuación 24: Canal cónico	31
Ecuación 25: Canal cilíndrico.....	31
Ecuación 26: Constante común del cabezal	31
Ecuación 27: Potencia requerida	32
Ecuación 28: Presión máxima en el husillo.....	33
Ecuación 29: Momento torsor	34
Ecuación 30: Fuerza axial que se ejerce sobre el Husillo.....	34
Ecuación 31: Sección transversal	34
Ecuación 32: Esfuerzo de corte sobre la superficie del husillo	35
Ecuación 33: Momento polar de inercia.....	35
Ecuación 34: tensiones normales en el husillo	35
Ecuación 35: Momento de inercia respecto al eje neutro	36
Ecuación 36: Momento flector máximo	36
Ecuación 37: Tensión resultante.....	36
Ecuación 38: Diámetro interior del cilindro	37
Ecuación 39: Espesor requerido del cilindro	37
Ecuación 40: Áreas de la tolva	37
Ecuación 41: Balance energético del cilindro	45
Ecuación 42: Balance energético del husillo	45
Ecuación 43: Contacto térmico ideal.....	46
Ecuación 44: Energía almacenada por el cilindro	46
Ecuación 45: Energía que sale del cilindro	46
Ecuación 46: Energía almacenada por el husillo.....	47
Ecuación 47: Combinación las ecuaciones.....	47
Ecuación 48: Reducción de la ecuación de energía almacenada en el husillo	48
Ecuación 49: Ecuación diferencial resuelta.....	48
Ecuación 50: Ecuación 49 considerando $T_0 = T_{\infty}$	48
Ecuación 51: Coeficiente de transferencia de calor.....	48
Ecuación 52: Temperatura media de película.....	49
Ecuación 53: Número de Grashof	49
Ecuación 54: Número de Nusselt	49
Ecuación 55: Número de Nusselt para convección libre.....	50
Ecuación 56: Despejando h_c del número de Nusselt.....	50
Ecuación 57: Coeficiente de radiación	50
Ecuación 58: Coeficiente de pérdida	50
Ecuación 59: Despejando las ecuaciones 57 y 58	50
Ecuación 60: Pérdida por radiación.....	51
Ecuación 61: Perdida por convección	51
Ecuación 62: Incremento de la energía interna del polímero	52

Ecuación 63: Área de relleno del canalón	59
Ecuación 64: Velocidad de desplazamiento del transportador	60
Ecuación 65: Determinación del flujo de material	61
Ecuación 66: Número de Reynolds	62
Ecuación 67: Número de Nusselt	63
Ecuación 68: Coeficiente de transferencia de calor por convección	63
Ecuación 69: Temperatura final del filamento	63
Ecuación 70: Velocidad de salida del filamento	64
Ecuación 71: Revoluciones del carrete de bobinado	64
Ecuación 72: Torque máximo	67

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Propiedades térmicas de materiales específicos	186
Anexo 2: Propiedades térmicas del aire a presión atmosféricas.....	187
Anexo 3: Constantes de cilindro largo horizontal	188
Anexo 4: Dimensiones y características de chumaceras	189
Anexo 5: Dimensiones y características de piñones.....	190
Anexo 6: Dimensiones y características de cadenas	191
Anexo 7: Partes y montaje del equipo	192
Anexo 8: Manual de uso de operación del equipo triturador-extrusor	196

Código Dublín

Título	Diseño y construcción de un equipo triturador-extrusor de material plástico reutilizable tipo tereftalato de polietileno (PET) para la elaboración de filamento para impresoras 3d.				
Autores:	Sandoya Lara, Darwin Gustavo Macias Coello, Christopher Michell				
Palabras clave:	Filamento	Husillo	Resistencias	Reciclaje	Pellet
F. de publicación					
Editorial	Quevedo: UTEQ, 2021				
Resumen:	Resumen. -El diseño de una trituradora–extrusora de material plástico reutilizable (en este caso el tereftalato de polietileno PET) para la elaboración del filamento ha sido el objetivo principal de esta investigación, con el fin de reducir la contaminación causada por el excesivo consumo de productos envasados en botellas plásticas. Por tal razón el estudio para el diseño del equipo para material reciclado y elaboración de filamento, se usó la metodología de diseño y desarrollo de productos de Ulrich y Eppinger, diseño mecánico y análisis numéricos (para el estudio de elementos sustanciales). Para ejecutar el diseño del equipo triturador-extrusor se elaboraron diversas alternativas, las cuales se evaluaron en diferentes requerimientos para su elección, entre estos, la facilidad de diseño y manipulación, automática o semiautomática, costos, tamaño del equipo, facilidad de traslación y más, así también se realizaron diferentes cálculos para el diseño detallado de las partes que conforman el equipo y el tipo de resistencias que se usarían para fundir el plástico, los cuales comienzan a transferir calor, todo esto con la finalidad de tener un producto eficiente. En base a la investigación se determinó las diferentes fases que deben de pasar los envases para ser procesados entre ellos la trituración y extrusión, para la elaboración del equipo se realizó un estudio de alternativas eligiendo la alternativa “C” siendo la más óptima, comprobando mediante el paquete computacional SolidWorks, para luego elaborarlo. En el desarrollo del equipo se determinó que puede procesar 1Kg de plástico en 30 min aproximadamente desde su trituración hasta la extrusión.				

	Abstract. -The design of a reusable plastic material extruder-crusher (in this case PET polyethylene terephthalate) for the production of the filament has been the main objective of this research, in order to reduce the contamination caused by the excessive consumption of packaged products in plastic bottles. For this reason, the study for the design of the equipment for recycled material and production of filament, the methodology of design and development of products of Ulrich and Eppinger, mechanical design and numerical analysis (for the study of substantial elements) were used. To execute the design of the crusher-extruder equipment, various alternatives were developed, which were evaluated in different requirements for their choice, among these, the ease of design and handling, automatic or semi-automatic, costs, size of the equipment, ease of translation and more, also the different calculations were also carried out for the detailed design of the parts that make up the equipment and the type of resistors that would be used to melt the plastic, which begin to transfer heat, all with the purpose of having an efficient product. Based on the research, the different phases that the containers must go through to be processed, including crushing and extrusion, were determined for the elaboration of the equipment, a study of alternatives was carried out, choosing alternative "C" being the most optimal, checking by the SolidWorks computational package, and then build it. In the development of the equipment, it was determined that it can process 1 Kg of plastic in approximately 30 minutes from its crushing to extrusion. Keywords: Filament, spindle, resistors, recycling, pellet.
Descripción	2xx hojas: Dimensionadas 29x21 cm
URI:	

INTRODUCCIÓN.

El proyecto “Diseño y construcción de un equipo triturador-extrusor de material plástico reutilizable tipo tereftalato de polietileno (PET) para la elaboración de filamento para impresoras 3D.” nace como idea para reducir la problemática de la contaminación ambiental por el excesivo consumo de plásticos, además de la falta de fabricante de filamento 3D en el país por lo que existe un incremento de precio por esta materia prima.

El diseño y construcción de un equipo triturador-extrusor permitirá transformar recipientes plásticos en insumo para impresoras 3D, se busca tener una máquina trituradora compacta tratando de reducir los separadores y las cuchillas del equipo, en paridad con similares máquinas, con el fin de tener como resultado de la trituración reducidas partículas de plásticos, las cuales se emplearán en el equipo extrusor del PET, también se requiere reducir la dimensión del área de la extrusión, comparando con equipos de igual función, sin que esto influya en la analogía geométrica y el diámetro del filamento obtenido.

Para poder realizar el diseño del equipo triturador-extrusor se debe recopilar información relevante sobre proyectos similares, artículos, revistas, cálculos matemáticos, analíticos, el diseño se basará en la metodología de diseño concurrente.

Se plantea utilizar los recipientes de plásticos PET para la elaboración de materia prima para impresoras 3D para la aplicación de manufactura aditiva específicamente el proceso de Modelado por Deposición Fundida (FDM).

CAPÍTULO I

CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Problema de la investigación.

1.1.1. Planteamiento del problema.

Hoy en día la producción desmedida de material plástico para la fabricación de recipientes y las grandes cantidades de desechos que se generan y terminan en el ambiente se ha convertido en uno de los principales problemas ambientales en el mundo.

En Ecuador el reciclaje de botellas plásticas no es un tema muy común, de acuerdo a los datos que presentó el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), a través de ENEMDU 2017, dice que solo el 47,47% de los hogares realizan la clasificación de los residuos (plásticos, orgánicos, papel-cartón, y vidrio), siendo el plástico el principal residuo clasificado con el 32,98%.

El excesivo consumo de productos envasados en botellas plásticas (Tereftalato de polietileno “PET”), junto con la falta de cultura e información de los ciudadanos, ocasiona que los envases no sean depositados en los lugares correctos, por lo que en su mayoría no son recogidos.

Por otro lado, el uso de plástico se vuelve aliado a las nuevas tecnologías desarrolladas, como la manufactura aditiva y el uso de impresoras 3D, en el que este material plástico se convierte en la sustancia principal de este tipo de proceso, por ello resulta interesante un equipo capaz de transformar los recipientes plásticos en insumos para la impresión 3D a un bajo costo.

- Diagnóstico.

Debido a la falta de tratamientos a los desechos no utilizados, se pretende realizar el diseño y construcción de un equipo triturador-extrusor mediante se pueda reutilizar los envases plásticos desechados de tipo Tereftalato de polietileno (PET) y con ello minimizar el impacto en el medio ambiente, a su vez generar materia prima para usar en impresiones 3D.

- Pronóstico.

Al investigar, proponer y diseñar un equipo triturador-extrusor para generar filamento, se busca tener un diseño compacto el cual permitirá que el proceso de elaboración sea más óptimo y eficiente, disminuyendo tiempos de producción en realizar la materia prima para impresoras 3D.

- Formulación del problema.

¿Por qué es importante contar con un equipo triturador-extrusor para la elaboración de filamento 3D?

- Sistematización del problema.

La siguiente investigación estudia el diseño y la selección de materiales para la construcción de un equipo triturador-extrusor que elabore filamento a partir de envases plásticos de tipo PET. Se analiza el mecanismo y su funcionamiento.

- ¿Cómo se realizará la transformación del plástico PET?
- ¿Qué tipo de mecanismo tendrá el equipo triturador-extrusor?
- ¿Qué especificaciones se debe tener en cuenta al diseñar un equipo triturador-extrusora de plástico?
- ¿Qué beneficios traerá la elaboración del equipo triturador-extrusor?

1.2. Objetivos.

1.2.1. Objetivo general.

Diseñar y construir un equipo triturador-extrusor de material plástico reutilizable tipo tereftalato de polietileno (PET) para la elaboración de filamento para impresoras 3D.

1.2.2. Objetivos específicos.

- Analizar los procesos involucrados para la transformación de botellas plásticas de tipo Tereftalato de polietileno (PET) en filamento para impresión 3D.
- Diseñar el sistema de trituración capaz de transformar envases plásticos en pellet.
- Diseñar el sistema de extrusión de filamento a partir de pellet.
- Proponer distintos diseños combinando los sistemas de trituración y extrusión en un solo mecanismo
- Fabricar la mejor propuesta de diseño del equipo triturador-extrusor.

1.3. Justificación.

El mundo está en constante cambio sobre todo en el ámbito del reciclaje, la innovación, la tecnología, la cual permite mejorar el estilo de vida de las personas.

Hoy en día el exceso de contaminación causado por los envases plásticos mal administrados es un problema que aumenta día a día, el consumo excesivo de la sociedad en que vivimos y la falta de conciencia en las personas, además de que el material es muy duradero, debido a que un envase PET puede tardar en degradarse 150 años a 1000 años para que este pueda desaparecer, lo que genera perjuicios a la sociedad como el aumento de plagas, alta cantidad de basura, además que el material plástico puede acabar en el mar.

La idea de construcción del equipo triturador-extrusor se propone con el fin de que se reduzca el impacto de contaminación ambiental reutilizando envases plásticos desechados de tipo Tereftalato de polietileno (PET).

En la actualidad la economía circular está cada vez más presente ya que se interrelaciona con la sostenibilidad, por esta razón se plantea implementar un mecanismo automatizado para la obtención de filamentos mediante el reciclaje de botellas plásticas desechadas para la creación de filamento 3D, esperando que permita atraer la atención de las personas y genere una disminución en el volumen de desechos plásticos.

Finalmente, el diseño y construcción de un equipo triturador-extrusor para la elaboración de filamento 3D, permitirá recuperar, transformar y reutilizar el plástico desecho en insumo para impresoras 3D, logrando así reducir el impacto ambiental y la mala administración de este recurso.

CAPÍTULO II
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Marco conceptual.

2.1.1. Diseño.

El diseño involucra la representación mental de una idea para posteriormente plasmarla de manera visual, llevándola desde algo no tangible a algo tangible, para lograrlo se puede usar recursos como diseño por computadora. [1].

2.1.2. Arquitectura y sus modalidades

La arquitectura es el plan de diseño básico del producto, que consiste en dividirlo en diferentes partes asignándoles distintas funciones y decidiendo cómo se conectan. Existen dos modalidades de arquitectura: la integral y la modular. En ambas, el productor o ensamblador enfrenta dos alternativas para conducir el desarrollo de componentes y la producción de los mismos: realizar las actividades internamente (in house) u optar por la proveeduría externa.

2.1.3. Máquina.

Es un sistema que se usa para una tarea específica que comprende la presencia de fuerza y movimientos para la realizar un trabajo determinado. [2].

2.1.4. Mecanismo.

Es un conjunto de elementos mecánicos que cumplen una función específica en una máquina. [2].

2.1.5. Triturar.

Consiste en la reducción del tamaño de algún elemento, gracias a esto es posible reutilizar ciertos materiales como, plásticos, cartones, etc. [3].

Con la trituración se consiguen gránulos de diferentes tamaños dependiendo de las etapas que estuviesen expuesta. [4].

2.1.6. Extruir.

Consiste en moldear un material a través de compresión. [5]

2.1.7. Polímeros.

Un polímero es una cadena de unidades de repetición o monómeros (del griego mono=uno, unidad) que se unen y repiten formando una macromolécula (decenas de millones de unidades repetidas) o polímero. Sin embargo, antes de entender un polímero es importante entender cómo se forma y esto es a partir de moléculas. [6]

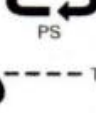
Los átomos más comunes formando resinas plásticas son 3: carbono, cuyo símbolo químico es C con 4 enlaces, Hidrógeno, cuyo símbolo químico es H y tiene un enlace y Oxígeno, cuyo símbolo químico es O con 2 enlaces. Existen otros átomos menos comunes como el cloro (Cl) que es un elemento importante en la molécula del PVC. [6].

El carbono es posiblemente el átomo más importante en la formación de las resinas plásticas ya que forma lo que viene siendo la columna vertebral tomando 2 enlaces para unirse un carbón con otro y dejando 2 enlaces para unirse a otros átomos. [6]

2.1.7.1. Tipos de polímeros

La variedad de polímeros que están presentes en el mercado es muy amplia, lo que genera residuos, en 1988 el Bottle Institut de la Society of the Plastics Industry, crea un sistema de códigos para identificar los recipientes de plástico. Cada código tiene un número dentro de un símbolo triangular y una abreviatura debajo a fin de identificarlos correctamente para un eventual reciclaje. [7].

Figura 1: Códigos recomendados para la identificación de plásticos.

CÓDIGO	MATERIAL
 1 PETE	----- POLIETILEN TEREF TALATO (PET)*
 2 HDP	----- POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD
 3 V	----- POLICLORURO DE VINILO (PVC)*
 4 LDPE	----- POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD
 5 PP	----- POLIPROPILENO
 6 PS	----- POLIESTIRENO
 7 OTROS	----- TODAS LAS RESTANTES RESINAS

FUENTE: PLASTICS BOTTLE INSTITUTE.

➤ Tereftalato de Polietileno (PET)

Es un termoplástico, esto quiere decir que es un material que se deforma a temperaturas altas hasta convertirse en un líquido viscoso y al enfriarse se endurece en su punto de transición vítrea sin presentar un cambio químico. [8].

Este material es la combinación del ácido terftálico y el etilenglicol. Entre los usos más comunes de este polímero son envases para la industria de bebidas gaseosas y agua mineral, aceites, y frascos de todo tipo. [9].

Este producto presenta las siguientes características:

- Alta transparencia.
- Alta resistencia al desgaste y a la corrosión.
- Buena resistencia química y térmica.
- Reciclable

Puede usarse para contener productos alimenticios [10].

Para poder reciclar este material se posee un tratamiento especial, debido a las exposiciones térmicas en la vida útil del material, la empresa OHL Apparatebau & Verfahrenstechnik GmbH de Alemania desarrolló el proceso de reciclaje de PET Stenning para combatir problema con la adición de aditivos.

Las etapas del proceso utilizadas son:

- Lavado y separación del desperdicio de PET
- Separación de PET transparente y de color.
- Remoción de contaminantes como metales y PVC.
- Molienda, lavado y secado.
- Extrusión reactiva con aditivos y filtración de material fundido.
- Post-condensación de materiales reciclaje. [11].

El tereftalato de polietileno (PET) al ser reutilizado sus propiedades cambian en comparación al PET virgen. [12]

Tabla 1: Comparación de material PET virgen y material RPET

Propiedad (unidad)	PET (virgen)	PET Reciclado (RPET)
Módulo - Young (MPa)	1890	1630
Resistencia - rotura (MPa)	47	24
Resistencia de impacto (Jm ⁻¹)	12	20
Viscosidad intrínseca (dl g ⁻¹)	0.72 – 0.84	0.46 – 0.76
Temperatura - fusión (°C)	244 – 254	247 – 253
Masa molecular (g mol ⁻¹)	81,600	58,400

FUENTE: MATERIALES SUSTENTABLES Y RECICLADOS EN LA CONSTRUCCIÓN.

ELABORADO: GONZALO MARTÍNEZ BARRERA

➤ **Polietileno de alta densidad (HDPE)**

El polietileno de alta densidad es un polímero termoplástico formado por múltiples unidades de etileno. También conocido por sus siglas en inglés (HDPE, o High Density Polyethylene) y en español (PEAD, o polietileno de alta densidad), este polietileno es impermeable y de baja reactividad, es un material muy rígido debido a su densidad. [13].

Los usos más comunes de polietileno de alta densidad se encuentran envases de detergentes, shampoo, envases de pintura, tambores, macetas, etc. [9].

➤ **Polipropileno (PP)**

El polipropileno es un termoplástico que es moldeado por calefacción el cual se produce por la polimerización del propileno. Los usos más comunes del polipropileno se encuentran en los vasos desechables, tapas de botellas, juguetes, envases de yogurt, embalaje, ropa interior térmica, etc.

Este material puede ser transformado mediante inyección, soplado, termoformado, extruido. [14].

➤ **Poliestireno (PS)**

El poliestireno no reacciona con otros materiales debido a que es un polímero vinílico inerte, este material es económico y duradero, una de sus características principales es su fácil esterilización y su transparencia.

Este material se obtiene de la reacción química entre etileno y el benceno que forman el monómero de estireno que al polimerizar se obtiene el poliestireno. [9].

Los usos más comunes del poliestireno se encuentran en las refrigeradoras, aires acondicionados, autopartes, carcasas, tubos de ensayos, etc. [9].

2.2. Procesamiento de materiales plásticos.

Existe una gran dificultad en el proceso de reciclar materiales plásticos, por lo tanto, se aplica un proceso óptimo el cual consiste en separar los plásticos por categorías y luego proceder a la trituración y posterior a aquello la extrusión para la reutilización del mismo.

2.2.1. Proceso de triturado de plásticos.

El triturado de plásticos es uno de los mecanismos más comunes al momento de reciclar el plástico (PET), consiste en la disminución dimensional del material de la pieza inicial denominados pellets, este proceso proporciona un material homogéneo. [15]

Figura 2: *Pellets de plástico (triturado)*



FUENTE: PLÁSTICO

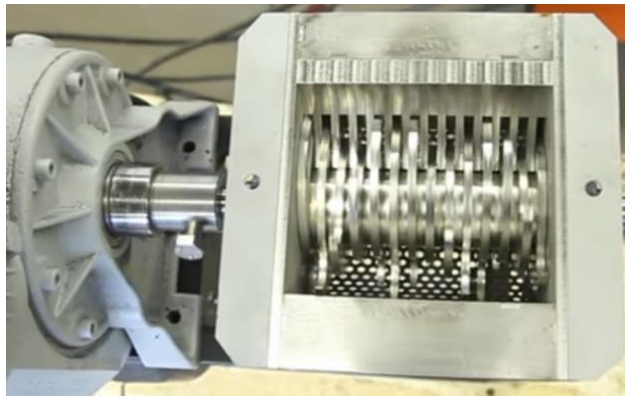
2.2.2. Tipos de trituradoras de plástico

Existen distintos tipos de configuración de acuerdo al tamaño del material a triturar. Por ejemplo, se tiene las de eje simple, eje doble y de cuatro ejes.

2.2.2.1. De eje simple

Este sistema tiene la ventaja de que requiere un solo acople para la transmisión de movimiento hacia el eje. Este tipo de configuración permite triturar plásticos en general.

Figura 3: *Trituradora de eje simple*



FUENTE: PRECIOUS PLASTIC

ELABORADO: DAVE HAKKENS

La trituradora está compuesta por una cámara de molienda rodeada de una malla interna cuya función es análoga a la descrita en el caso del molino de martillos.

La cámara de molienda está constituida por un rotor con cuchillas que efectúan la acción de corte. Estas cuchillas son menos afiladas que en el caso de las astilladoras para conseguir una mayor resistencia a los elementos contaminantes (piedras, elementos metálicos, etc. que puedan acompañar al material. [16]

Las Trituradoras se encargan de triturar y moler los desechos de plásticos con la ayuda de sus cuchillas. Este triturador cuenta con la capacidad de variar la velocidad de giro de los órganos de corte, esto con el fin de variar la velocidad de molienda, lo cual ofrece la ventaja de aumentar la capacidad de desechos triturados en menos tiempo, acelerar el proceso y dar resultados óptimos [17].

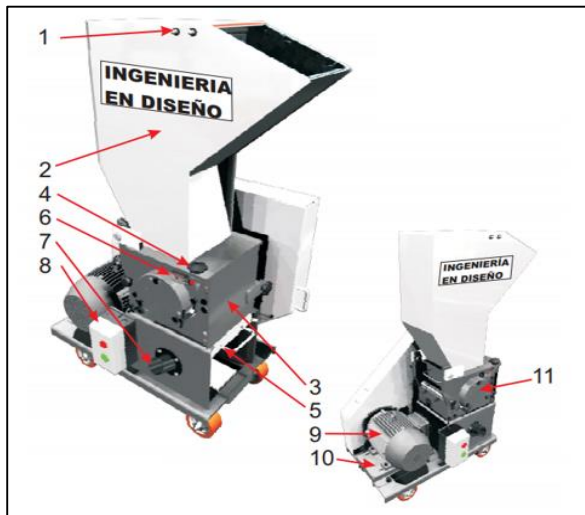
En su cámara de molienda, que es el lugar donde se lleva a cabo todo el proceso, el giro constante de las cuchillas mezcla, tritura y muele los residuos de plástico. De esta manera se obtienen mezclas homogéneas que facilitan el proceso de reciclaje de plástico [17].

➤ Componentes de una Trituradora.

Los componentes de una trituradora se pueden identificar por los siguientes:

Partes externas de una Trituradora

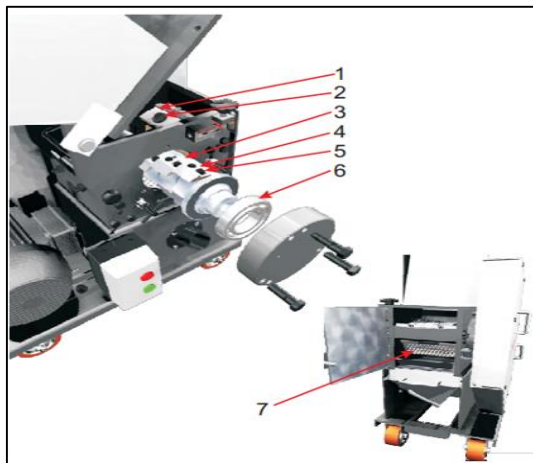
Figura 4: *Partes de un molino de cuchillas*



1. Perno cortinero
2. Tolva.
3. Puerta frontal.
4. Perilla de retardo y seguro de la tolva.
5. Embudo colector.
6. Micro Switch de seguridad.
7. Cople tubo pescador.
8. Arrancador.
9. Motor eléctrico.
10. Base textcraft.
11. Cámara de molienda. [18]

Partes de internas de una trituradora

Figura 5: *Partes de un molino de cuchillas*



1. Cuchilla de caja
2. Tornillo cuchilla de caja.
3. Rotor.
4. Cuchilla de rotor.
5. Tornillo cuchilla rotor.
6. Balero FAG.
7. Criba. [18]

FUENTE: ANÁLISIS DE CUCHILLAS DE MOLINO PARA TERMOPLÁSTICOS MOD. 2650 y DISEÑO PARA UNA MAYOR DURACIÓN.

ELABORADO: LEÓN, DANIEL CÁRDENAS

En el desarrollo de la investigación para el proceso del producto se parte de las revoluciones que debe tener el motor para obtener un trabajo óptimo.

Para la trituradora se usará como guía el diseño de la cuchilla presentada por la compañía Precious Plastic.

- **Fórmula para comprobar el trabajo óptimo para efectuar la ruptura del material**

$$\partial W = \partial W_{el} + G_c \cdot l \cdot \partial a \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

∂W : Trabajo necesario para realizar la ruptura del material (Joule)

∂W_{el} : Cambio de energía elástica (Joule)

G_c : Energía absorbida por unidad de área (Joule/m²)

l : Longitud de material cortador por la cuchilla (m)

∂a : Avance de la fractura durante el impacto (m/seg)

La Ecuación 1. nos da como solución, el necesario trabajo que se debe emplear, para que el material llegue a su punto de rompimiento, este tiende a ser superior a la variación de en el punto elástico más la energía que absorbe el material en su rompimiento, para nuestro estudio por el uso del termoplástico de PET el cambio de energía elástica ∂W_{el} es intrascendente en comparación con el trabajo que existe en la cuchilla cuando efectúa el corte, entonces, la ecuación se reduce a:

$$\partial W = G_c \cdot l \cdot \partial a \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

∂W : Trabajo necesario para realizar la ruptura del material (Joule)

G_c : Energía absorbida por unidad de área (Joule/m²)

l : Longitud de material cortador por la cuchilla (m)

∂a : Avance de la fractura durante el impacto (m/seg)

- **Fórmula para calcular la fuerza que se necesita para romper el PET.**

$$F_c = 0.5 \cdot \sigma_R \cdot \frac{e_p^2}{\tan(\gamma_a)} \quad (\text{Ec. 3}) [19]$$

Donde:

F_c : Fuerza de corte (N)

σ_R Carga de rotura por tracción (MPa)

e_p : Espesor del PET (mm)

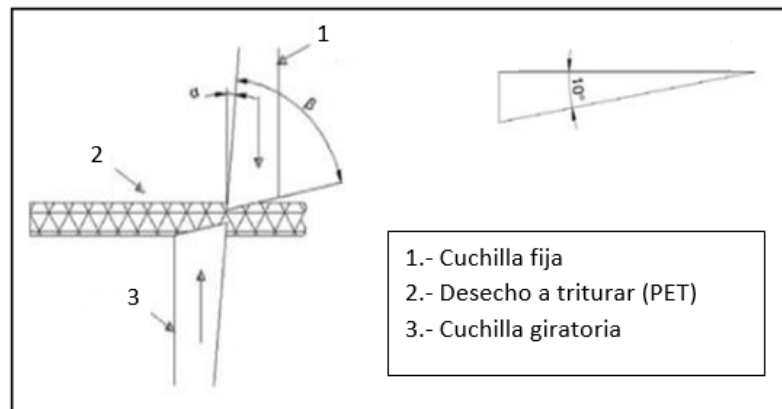
γ_a : Ángulo de abertura entre los filos cortantes (°)

Luego de obtener la ecuación de trabajo se pasa a determinar la fuerza que se necesita para provocar la fractura del PET.

La definición de trabajo mecánico parte de que es el producto de la fuerza que se aplica en un cierto desplazamiento, por ende, el desplazamiento en este caso se presenta cuando la grieta trasciende a través del material mientras se da el impacto. [19]

Para provocar lo que se denomina cizallamiento, las cuchillas deben tener una ubicación para que sus filos de corte puedan desgarrar el plástico de tipo PET. [19]

Figura 6. Esquema de corte de las cuchillas sobre el PET



FUENTE: DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN MOLINO TRITURADOR PARA PRODUCIR 50 A 100 KG/H DE ESCAMA DE HASTA 20 mm PARA PROCESAR PET

ELABORADO: ALEJANDRO MUÑOZ; GUILLERMO SANUNGA

- **Fórmula para el cálculo de la fuerza de impacto.**

$$F_i = 1.5 \cdot G_c \cdot t \quad (\text{Ec. 4}) [19]$$

Donde:

F_i : Fuerza de impacto (N)

G_c : Energía absorbida por unidad de área (J/m^2)

t : Longitud del material cortado por la cuchilla (mm)

En la prueba realizada por Alejandro Muñoz, la energía absorbida por unidad de área es de $G_c = 7563 J/m^2$ calculada mediante un ensayo de laboratorio. [19]

- **Fórmula de la fuerza normal de corte de las cuchillas giratorias**

$$F_N = \frac{(\delta_1 \cdot A_{\delta 1} \cdot E)}{L_1} \quad (\text{Ec. 5}) [19]$$

Donde:

F_N : Fuerza normal de corte (N)

δ_1 : Desplazamiento del material (mm)

$A_{\delta 1}$: Área de desplazamiento (mm^2)

E : Módulo de Young del PET (MPa)

L_1 : Longitud de la cuchilla (mm)

Para esto se debe conocer el valor del desplazamiento del material el cual se obtiene mediante la siguiente ecuación. [19]

$$\delta_1 = h_{\text{arrastre}} - h_{\text{holgura}} \quad (\text{Ec. 6}) [19]$$

Donde:

h_{arrastre} : Alto de material de arrastre (mm)

h_{holgura} : Holgura entre la cuchilla y la criba (mm)

Y a su vez mediante la ecuación 7 se obtiene el valor del área de desplazamiento. [19]

$$A_{\delta 1} = L_1 \cdot e_{\text{cuchilla}} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

e_{cuchilla}: Espesor de la punta de la cuchilla (mm)

- **Fórmula de la fuerza de arrastre de las cuchillas giratorias**

En este caso podemos usar la ecuación 8 para obtener el valor de la fuerza de arrastre existente en las cuchillas giratorias. [19]

$$F_r = \mu \cdot F_N \quad (\text{Ec. 8}) [19]$$

Donde:

F_r: Fuerza de arrastre de las cuchillas giratorias (N)

μ: Coeficiente de rozamiento dinámico del PET sobre el acero

- **Fórmula para calcular el torque y potencia necesaria que debe de poseer el motor**

Para poder lograr que la trituradora desgarre el material plástico es necesario que la fuerza en la punta de la cuchilla(*F*) y el área transversal (*A*) del objeto sea igual o mayor al esfuerzo cortante (shear stress τ_{max}) del polímero en este caso el tereftalato de polietileno (PET). El valor del esfuerzo cortante tiende a ser el 50% del valor de la resistencia a la tracción (límite elástico).

En la siguiente tabla 2 se presentan valores de resistencia a la tracción y esfuerzo cortante del tereftalato de polietileno (PET).

El valor del área transversal de corte se define a 300mm² considerando que los envases que en su mayoría tienen un espesor de pared de 2mm. [20]

Tabla 2. *Propiedades del Tereftalato de Polietileno (PET).*

Material	PET [21]
$\sigma_{\max}$	50 MPa
$\tau_{\max}$	25MPa

FUENTE: SOFTWARE CES EDUPACK

- **Ecuación de la resistencia a la tracción**

$$\tau_{\max} = F/A \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde:

F : Fuerza (N)

A : Área (mm^2)

$\tau_{\max}$: Esfuerzo cortante máximo (Pa)

- **Ecuación de Momento**

Para el cálculo del momento que existe en las cuchillas se usa la ecuación 10

$$M = F \cdot r \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:

F : Fuerza (N)

r : Radio (mm)

- **Ecuación de la potencia**

Usando la ecuación 10, se obtiene el valor de la potencia necesaria para que el equipo triturador funcione de manera eficiente y logre el objetivo de desfibrar el PET.

$$\text{Potencia}(\text{hp}) = \frac{\text{Torque}(\text{libra} - \text{pie}) \cdot \text{velocidad motor (r. p. m.)}}{5252} \quad (\text{Ec. 11})$$

- **Ecuación para el cálculo de la potencia eléctrica**

Para el cálculo de la potencia eléctrica es necesario la utilización de la siguiente ecuación 12 teniendo presente el desgaste mecánico.

$$\text{Pot}_{\text{eléctrica}} = \frac{\text{Pot}_{\text{Consumida}} \cdot F_s}{\eta_{\text{fuente}} \cdot \eta_{\text{transmitida}}} \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde:

$Pot_{\text{Consumida}}$: Potencia calculada a la salida del eje (HP)

F_s : Factor de servicio, se recomienda $F_s > 1$, se usará el valor de 1.5

η_{fuente} : Eficiencia de la fuente, definida al 98%

$\eta_{\text{transmitida}}$: Eficiencia de transmisión

La eficiencia de transmisión depende del tipo de sistema, para engranajes se define por el 90% y para ejes el 99% debido a la fricción en los cojinetes y elasticidad torsional.

2.2.2.2. De doble eje

Este sistema requiere de engranajes para la transmisión del movimiento hacia los dos ejes esta máquina también permite tener un tamaño de pellet uniforme si se le agrega una malla metálica debajo de los dos ejes trituradores.

Para su implementación se requiere una mayor cantidad de piezas que en la de eje simple. Sin embargo, posee la ventaja de ser más robusto, ya que puede triturar piezas de mayor espesor que el de la configuración anterior. [22].

Figura 7: *Trituradora de doble eje*



FUENTE: INTEREMPRESAS

ELABORADO: GRUPO NOVAÁGORA

2.2.2.3. De cuatro ejes

Este tipo de configuración emplea cuatro ejes con cuchillas para trituración. Esta distribución es aún más robusta que la de doble eje ya que puede triturar materiales de mucho mayor espesor. Sin embargo, su implementación es mucho más costosa que los otros dos tipos, ya que requiere de más elementos. Usualmente no es usado para triturar plástico, sino materiales como llantas o desechos electrónicos.

Figura 8: *Triturador de cuatro ejes*



FUENTE: INTEREMPRESAS

ELABORADO: GRUPO NOVAÁGORA

2.2.3. Relación de transmisión

“La relación de transmisión de engranajes es fundamental para que se pueda generar el movimiento y el engranaje pueda soportar el par sin dar error” [23].

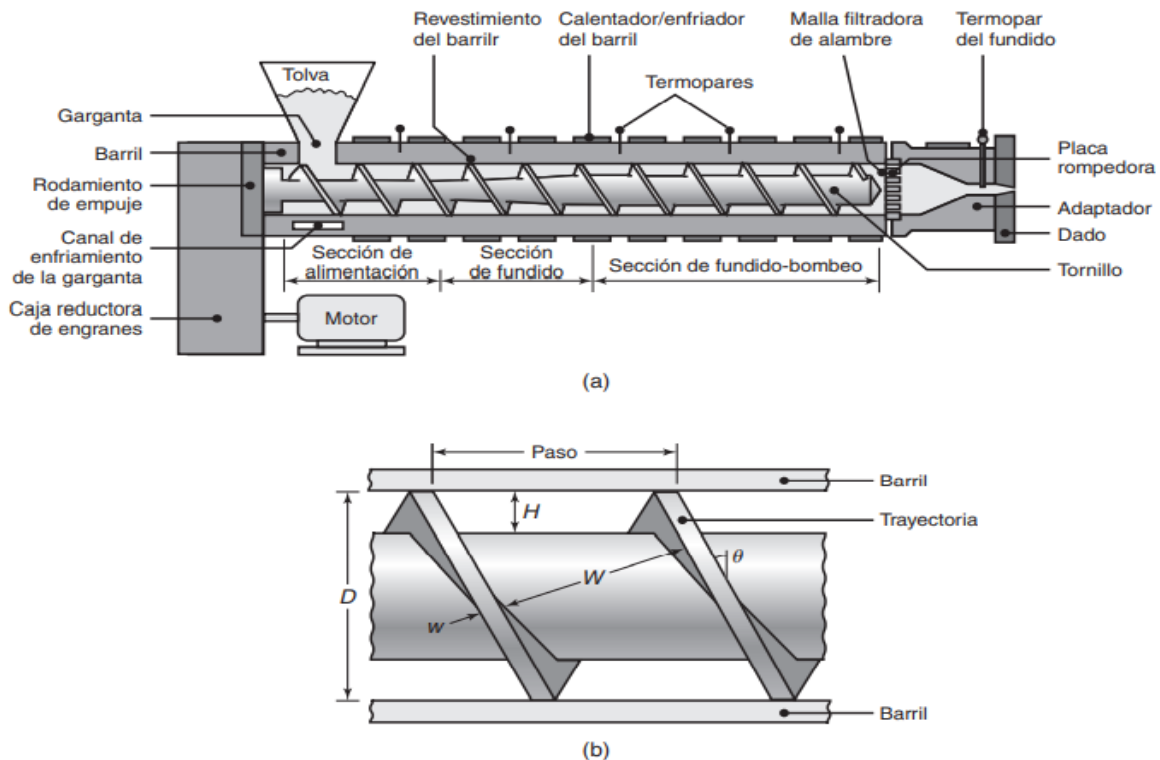
“La relación de transmisión de movimiento es la relación entre las velocidades de rotación de dos engranajes que se encuentran conectados entre sí” [23].

Habitualmente el engranaje más grande se lo denomina rueda, mientras que al engranaje pequeño se lo denomina piñón. Para esto la relación de transmisión de engranajes se calcula dividiendo la velocidad de salida por la velocidad de entrada ($i = \omega_s / \omega_e$) o dividiendo el número de dientes de las ruedas conductoras por el número de dientes de las ruedas conducidas ($i = Z_e / Z_s$) [23].

2.2.4. Proceso de extrusión de plásticos.

En este proceso, que compone el volumen más grande de plásticos derivados, las materias primas en diferentes formas como: gránulos, polvo termoplástico o pellets se ubican en una tolva la cual alimenta un barril que tiene en su interior un tornillo extrusor. Este tornillo es helicoidal que mezcla los pellets y los trasladan hacia la boquilla (extremo por donde sale el material fundido). La fricción que se produce en el interior en consecuencia de la mecánica del tornillo hace que este se caliente y funde los pellets. El tornillo por su acción giratoria también aumenta la presión dentro del barril. [24].

Figura 9: (a) Esquema de un extrusor de tornillo característico, (b) Geometría de un tornillo de extrusión.



FUENTE: MANUFACTURA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

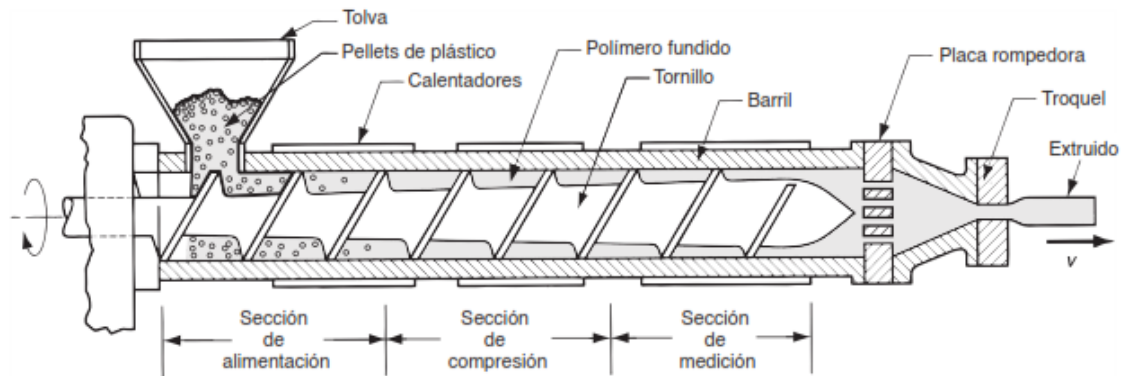
ELABORADO: KALPAKJIAN, SEROPE; R. SCHMID, STEVEN

2.2.5. Extrusora de fricción viscosa

Mediante esta técnica, la fricción generada sobre el material eleva su temperatura, con lo cual lo convierte en un fluido viscoso capaz de ser extruido.

Las extrusoras de tornillo son conocidas también como extrusoras de husillo. Posee un tornillo helicoidal que transporta los gránulos de plástico hacia un extremo de la máquina.

Figura 10: Extrusora de husillo



FUENTE: TECNOLOGÍA INFORMÁTICA

ELABORADO: J.C. PAREJO

2.2.6. Componentes de extrusora de fricción viscosa

Los componentes de una extrusora se pueden identificar por los siguientes:

2.2.6.1. Husillo

Esta parte es considerada como el mecanismo primordial del equipo extrusor, debido a que mediante este mecanismo se cumple la obligación de trasladar, elevar temperatura, liquidar y fusionar a una calentura apropiada el elemento principal a tratar.

La calidad del producto depende de los parámetros del husillo los cuales son: longitud (L), diámetro (D), ángulo de filete y el paso de la rosca (w). [25]

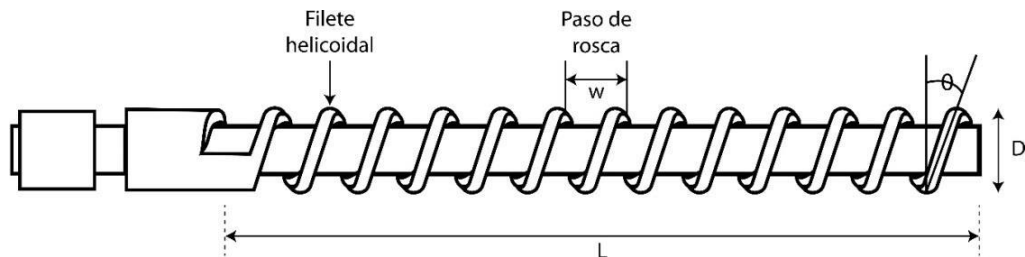
➤ Parámetros iniciales para el diseño del husillo

- **Concepto de correlación de la distancia del husillo.**

En este componente se puede derretir y combinar a una rapidez, esta aumenta al agrandar su distancia (L). Para establecer una distancia adecuada del husillo deberá estar directamente en relación con el diámetro (D) del mismo. La cuál se puede interpretar

como (L/D) por ende, esta puede aumentar o disminuir, teniendo sus ventajas y desventajas acorde a la aplicación designada.

Figura 11: *Parámetros del husillo*



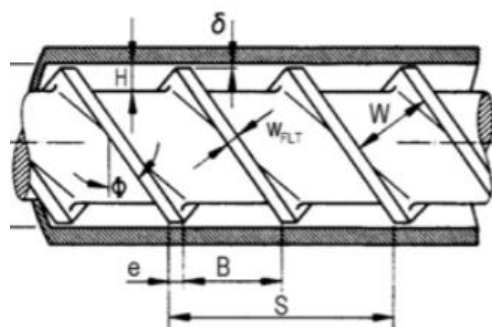
FUENTE: TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS.

ELABORADO: SAVGORODNY, V. K.

- **Ventaja de la relación (L/D) corta**

Teniendo una dimensión corta del cilindro, la materia prima se encontrará a una calentura de fundición por un tiempo mínimo, el cual disminuye los medios de adulación. Sus espacios, potencia y torque del motor serán pequeños, lo que acorta elocuentemente el precio de producción y proporciona la reciprocidad de suministros.

Figura 12 : *Parámetros del husillo (sección transversal)*



FUENTE: TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS.

ELABORADO: SAVGORODNY, V. K.

En la siguiente tabla se muestran los significados de la simbología empleada en la figura anterior:

Tabla 3: Simbología de los parámetros del husillo

Simbología	Significado
D	Diámetro exterior del tornillo (mm)
“S” o “t”	Paso del husillo (mm)
E	Anchura de la cresta del filete
ϕ	Ángulo del filete del tornillo con la vertical (°)
W	Ancho del canal (mm)
W_{ft}	Ancho de filete
H	Profundidad del canal
Δ	Holgura entre el cilindro y el filete

FUENTE: TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS.

ELABORADO: SAVGORODNY, V. K.

Savgorodny [26] nos dice que “una de las medidas primordiales del husillo es la relación de distancia, su tamaño influirá claramente en el dimensionamiento de otros elementos que conforman la extrusora”.

- **Relación de longitud del husillo.**

Savgorodny [26] explica que “Generalmente, para transformar el plástico se usan extrusoras con husillos de diámetros que van desde (9 a 500) mm y relaciones de distancia de [(60 a 40): 1]”.

- **Formulación y nomenclatura de parámetros básicos presentes en el husillo.**

Según Savgorodny [26] indica “para el cálculo del husillo se recomienda emplear las ecuaciones empíricas mostradas en la siguiente tabla”:

- **Fórmulas para el cálculo de las medidas básicas del husillo**

Paso del husillo (t)

$$(0.8 - 1.6) D \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde:

D: Diámetro del husillo (m)

- **Área de la sección transversal del husillo (Au)**

$$A_u = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (D)^2 \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde:

D: Diámetro del husillo (m)

- **Longitud de trabajo (l)**

$$(0.5 - 0.7) L \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde:

L: Longitud total del husillo (m)

- **Holgura entre la cresta y el filete y el cilindro del husillo (δ)**

$$(0.002 - 0.003) D \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde:

D: Diámetro del husillo (m)

- **Número de filetes del husillo (#)**

$$1/D \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde:

D: Diámetro del husillo (m)

- **Ancho del filete (W_{flt})**

$$e = (0.06 - 0.1) \cdot D \quad (\text{Ec. 18}) [26]$$

Donde:

D: Diámetro del husillo (m)

- **Fórmula para calcular el ángulo de la hélice del husillo.**

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{t}{\pi \cdot D} \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde:

D: Diámetro del husillo (m)

t: Paso (m)

- **Elaboración del husillo**

La fabricación mencionada como flujo volumétrico, es la consecuencia de tres flujos desiguales dentro del conducto. El primero, el flujo de arrastre (α), es el estimulado por el giro del tornillo. El segundo, el flujo de presión (β), es el mecanismo que se opone al flujo en el procedimiento. Por último, el flujo de filtración (γ), el cual disminuye la obtención debido a pérdidas de material entre la holgura del husillo-cilindro. [26]

$$Q = \left(\frac{\alpha \cdot K}{K + \beta + \gamma} \right) \cdot N \cdot \rho \quad (\text{Ec. 20}) [26]$$

Donde:

α : Volumen unitario del flujo de arrastre (mm^3)

β : Volumen unitario del flujo de presión (mm^3)

γ : Volumen unitario del flujo de filtración (mm³)

K : Constante total de la forma geométrica de cabezal (mm³)

ρ : Densidad de material (Kg/mm³)

N : Revoluciones del husillo (r.p.m.)

Según Savgorodny [26] menciona “para el cálculo de los flujos presentes en el husillo se recomienda emplear las ecuaciones empíricas mostradas a continuación”:

- **Flujo de arrastre**

$$\alpha = \frac{\pi \cdot m \cdot D \cdot H \cdot \left(\frac{t}{m} - e\right) \cdot \cos^2 \varphi}{2} \quad (\text{Ec. 21}) [26]$$

Donde:

m : Número de conductores del husillo, profundidad del canal (m)

- **Flujo de presión**

$$\beta = \frac{m \cdot h^3 \left(\frac{t}{m} - e\right) \sin \varphi \cos \varphi}{12(L)} \quad (\text{Ec. 22})$$

Donde:

L : Longitud de trabajo (m)

- **Flujo de filtración**

$$\gamma = \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot \delta \cdot \tan \varphi}{10 \cdot e \cdot L} \quad (\text{Ec. 23}) [26]$$

Donde:

δ : Holgura del husillo/cilindro (mm)

- **Fórmula para calcular la Constante total de la forma geométrica del cabezal**

Esta constante simboliza el coeficiente de la forma correcta del cabezal, por lo que dependerá de las diferentes disposiciones en él. Las geometrías existentes en el cabezal serán un conducto cónico en el ingreso del cabezal y un canal cilíndrico en la boquilla, para dar representación al material a extruir.

- **Constante según la forma del cabezal**

- **Conducto cónico**

$$k_1 = \frac{3 \cdot \pi \cdot d_0^3 \cdot d_1^3}{128 \cdot l_{\text{canal}} \cdot (d_0^2 + d_0 \cdot d_1 + d_1^2)} \quad (\text{Ec. 24})$$

Donde:

d₀: Diámetro de ingreso del material en un conducto cónico (mm)

d₁: Diámetro de salida del material en un conducto cónico (mm)

- **Conducto cilíndrico**

$$k_2 = \frac{\pi \cdot d^4}{128 \cdot l_{\text{canal}}} \quad (\text{Ec. 25})[26]$$

Donde:

d₀: Diámetro del conducto cilíndrico (mm)

- **La constante común del cabezal**

$$K = \frac{1}{\sum \frac{1}{K_1} + \sum \frac{1}{K_2} + \dots + \sum \frac{1}{K_i}} \quad (\text{Ec. 26})$$

- **Fórmula para calcular la Potencia Solicitada**

La potencia de activación para el husillo es la requerida para hacer funcionar al husillo a la velocidad solicitada para causar el material extruido. Esta dependerá de la potencia requerida para trasladar el material y la energía extenuada por la holgura del cilindro, la cual queda ajustada por:

$$N = \left(\frac{\pi^3 \cdot D^3 \cdot N_{rev}^2}{h_1} \right) \cdot L \cdot \mu + \frac{(\alpha \cdot \Delta P)}{\cos^2 \varphi} + \left(\frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot N_{rev}^2 \cdot e}{\delta \cdot \tan \varphi} \right) \cdot L \cdot \mu \text{ [W]} \quad (\text{Ec. 27})$$

Donde:

η : Revolución del husillo (rev/s)

D : Diámetro del husillo (m)

L : Longitud del husillo (m)

μ : Viscosidad efectiva del material (Pas)

h_1 : Profundidad del conducto en la zona de alimentación (m)

α : Volumen unitario del Flujo de arrastre (m³)

ΔP : Diferencia de presión en el husillo (Pa)

φ : Ángulo de Hélice (°)

e : Ancho del filete (m)

δ : Holgura del husillo/cilindro (m)

- **Fórmula para calcular la presión en el equipo extrusor.**

- **Presión máxima en el husillo**

En la parte de salida del extrusor en la que se crea presión, efectuando un papel significativo en el proceso y el terminado del material, de la misma manera es trascendental porque de ella se proceden diferentes cálculos para el diseño del equipo.

Se procede a calcular la presión máxima en el equipo extrusor.

$$P_{Max} = \frac{6 \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot N \cdot \mu}{h^2 \tan \phi} \quad (\text{Ec. 28})$$

Donde:

P_{Max} : Presión máxima en la extrusora (MPa)

D : Diámetro del husillo (m)

μ : Viscosidad efectiva (N/m²s)

N : Revolución por minuto del husillo (r.p.m.)

H : Profundidad del canal (m)

L : Longitud de trabajo del husillo (m)

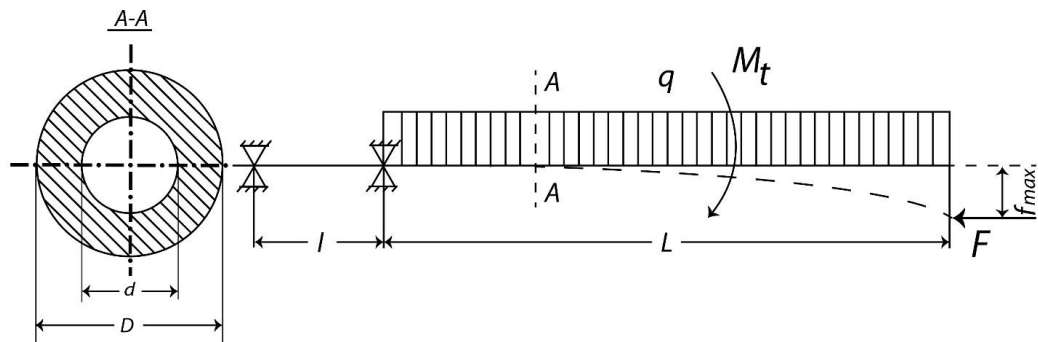
ϕ : Ángulo de hélice del husillo (rad)

- **Fórmula para calcular las Fuerzas en el husillo**

Debido a las dimensiones anticipadamente fijadas para el husillo, es preciso evidenciar y establecer la fuerza máxima admisible.

En la Figura, se considera un esquema de las tensiones que se originan en el husillo. Sobre esto resulta una fuerza axial, el momento de giro y una carga dispersa debido a la carga del peso.

Figura 13: Diagrama de tensiones



- **Fórmula para el cálculo del momento Torsor**

Se deduce el momento torsor originado por el motor sobre el husillo, mediante la siguiente ecuación:

$$M_t = 9550 \cdot \frac{N}{\eta} \quad (\text{Ec. 29})$$

Donde:

N: Potencia del Motor (kW)

η : Revolución del husillo (r.p.m.)

- **Fórmula para calcular la fuerza axial que es ejercida en el Husillo**

Se tiene en consideración la zona de la sección perpendicular del husillo y la presión del material en el fragmento delantero, debido que será la máxima presión sobre el husillo. De acuerdo a la ecuación:

$$F = S \cdot p \quad (\text{Ec. 30})$$

Donde:

S: Sección transversal del husillo (m²)

p: Presión en la parte delantera del husillo (N/m²)

- **Fórmula para calcular la sección transversal**

$$S = \pi \cdot \frac{d^2(1 - u^2)}{4} \quad (\text{Ec. 31})$$

Donde:

u: Relación entre los diámetros del husillo

- **Fórmula para el cálculo del esfuerzo de corte sobre la superficie del husillo**

$$\tau = \frac{M_t}{W_p} \quad (\text{Ec. 32})$$

Donde:

M_t : Momento torsor (Nm)

W_p : Momento polar de inercia (m³)

- **Fórmula para el cálculo del momento polar de inercia.**

$$W_p = \frac{\pi \cdot D^3}{16} (1 - u^4) \quad (\text{Ec. 33})$$

Donde:

D : Diámetro (m³)

W_p : Momento polar de inercia (m³)

- **Formulación para el cálculo de tensiones normales en el husillo**

Estas serán causadas por la fuerza axial F y la carga uniformemente dispersa basado en el peso del husillo.

$$\sigma = \frac{F}{S} + \frac{M_f}{W_o} \quad (\text{Ec. 34})$$

Donde:

F : Fuerza axial (N)

S : Sección transversal del husillo (m²)

M_f : Momento flector máximo (Kgm)

W_o : Momento inercia proporcional al eje Neutro (m³)

- **Fórmula para calcular el momento de inercia proporcional al eje neutro:**

$$W_o = \frac{\pi \cdot D^3}{32} (1 - u^4) \quad (\text{Ec. 35})$$

Donde:

D: Diámetro (m³)

W_o: Momento inercia proporcional al eje Neutro (m³)

- **Fórmula para calcular el momento flector máximo**

(Ec. 36)

Donde:

ρ: Densidad del material del husillo (Kg/m³)

L: Largo del husillo (m)

D: Diámetro del husillo (m)

u: Relación entre diámetros del husillo

g: Aceleración de gravedad (m/s²)

$$M_f = \frac{\rho \cdot L^2}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} (1 - u^3) \cdot g$$

- **Fórmula para el cálculo de tensión resultante**

Para ello los esfuerzos semejantes se ajustan, entre un esfuerzo tangencial y tensor.

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma^2 + 4 + \tau^4} \quad (\text{Ec. 37})$$

Donde:

σ_r: Tensión resultante (MPa)

σ: Tensión máxima (MPa)

τ: Tensión tangencial (MPa)

- **Parámetros iniciales para el diseño del cilindro**

Para el bosquejo del cilindro, se deben considerar una sucesión de elementos, entre ellos: la holgura entre el filete helicoidal y el barril, y el diámetro del husillo.

- **Fórmula para calcular el diámetro interior del cilindro**

$$D_i = D + 2 \cdot \delta \quad (\text{Ec. 38})$$

Donde:

D : Diámetro del husillo (mm)

δ : Holgura (mm)

- **Fórmula para calcular el espesor requerido que tener el cilindro**

$$e_{\min} = \frac{P \cdot r}{\sigma_{\text{adm}}} \quad (\text{Ec. 39})$$

Donde:

P : Presión máxima de trabajo (MPa)

r : Radio interior cilindro (mm)

σ_{adm} : Esfuerzo admisible del material (mm)

2.2.6.2.Tolva

- **Dimensionamiento**

Se esboza una tolva que se adecua a la superficie del extrusor para poder ser desmontada con facilidad.

$$A = A_{\text{base}} + A_{\text{tapa}} + 2A_{\text{Trapecio}} + 2A_{\text{Trapecio}_L} \quad (\text{Ec. 40})$$

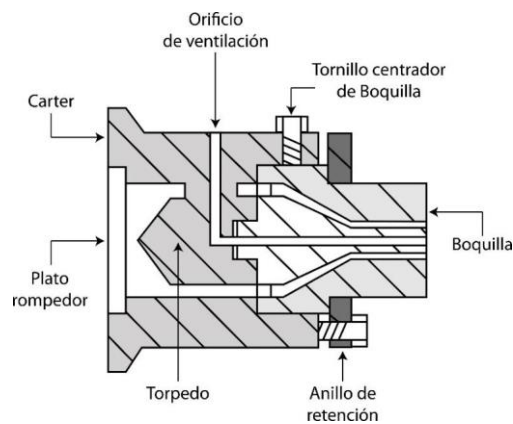
FÓRMULAS

CUADRADO	$A = a^2$
RECTÁNGULO	$A = b \cdot a$
TRAPECIO	$A = \frac{(B + b) \cdot h}{2}$
CILINDRO	$V = \pi \cdot r^2 \cdot h$
TOLVA	$V = \frac{(A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 \cdot A_2}) \cdot h}{3}$

2.2.6.3. Cabezal

El cabezal es la pieza final del cilindro, el cual sujeta la punta de la boquilla y conserva a la placa que rompe y evita que fluya el material de una manera directa con partículas innecesarias.

Figura 14: *Cabezal o boquilla*



FUENTE: TECNOLOGÍA INFORMÁTICA.

ELABORADO: J.C. PAREJO

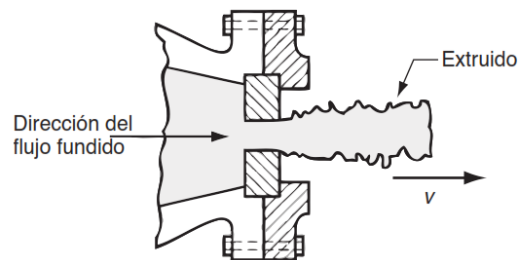
2.2.7. Defectos generales en el proceso de extrusión

Al realizar la extrusión el material sufre defectos los cuales son:

2.2.7.1. Fractura de fusión

Esto es que los esfuerzos que actúan sobre el material fundido, antes y después del flujo a través de la boquilla, lo cual provoca que exista irregularidades en la superficie.

Figura 15: Defecto de fractura de fusión



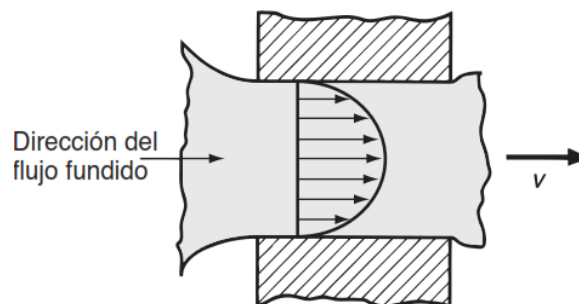
FUENTE: TECNOLOGÍA INFORMÁTICA.

ELABORADO: J.C. PAREJO

2.2.7.2. Corrugado o piel de tiburón

Esta se da cuando la superficie se arruga al salir de la boquilla.

Figura 16: Defecto corrugado



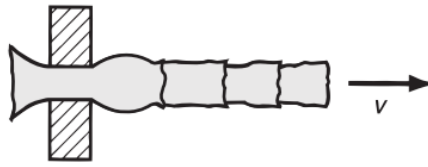
FUENTE: TECNOLOGÍA INFORMÁTICA.

ELABORADO: J.C. PAREJO

2.2.7.3. Tallo de bambú

Esto se genera debido al gradiente de velocidades.

Figura 17: Defecto tallo de bambú



FUENTE: TECNOLOGÍA INFORMÁTICA.

ELABORADO: J.C. PAREJO

2.2.8. Propiedades mecánicas de los polímeros.

En la siguiente tabla se muestran los valores de las características mecánicas a temperatura ambiente de los polímeros más comunes.

Tabla 4: Características mecánicas a temperatura ambiente de algunos polímeros. [27]

Material	Densidad [g/cm ³]	Módulo elástico [psi·10 ⁵ (MPa·10 ²)]	Resistencia a la tracción [psi·10 ³ (MPa)]	Resistencia al impacto (ft-lbf/in)
Polietileno de baja densidad)	0.917-0.932	0.25-0.41 (1.7-2.8)	1.2-4.6 (8.3-31.7)	No se rompe
Polietileno (alta densidad)	0.952-0.965	1.55-1.58 (10.6-10.9)	3.2-4.5 (22-31)	0.4-4.0
Politetrafluoroetileno	2.14-2.20	0.58-0.8 (4.0-5.5)	2.0-5.0 (14-34)	3
Polipropileno	0.90-0.91	1.6-2.3 (11-16)	4.5-6.0 (31-41)	0.4-1.2
Poliestireno	1.04-1.05	3.4-4.8 (23-33)	5.2-7.5 (36-52)	0.35-0.45
Tereftalato de polietileno (PET)	1.29-1.40	4.0-6.0 (28-41)	7.0-10.5 (48-72)	0.25-0.70

NOTA: Espesor de la probeta: 3.2 mm = 1/8 pulgada

FUENTE: INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES. II

ELABORADO: CALLISTER, WILLIAM D.

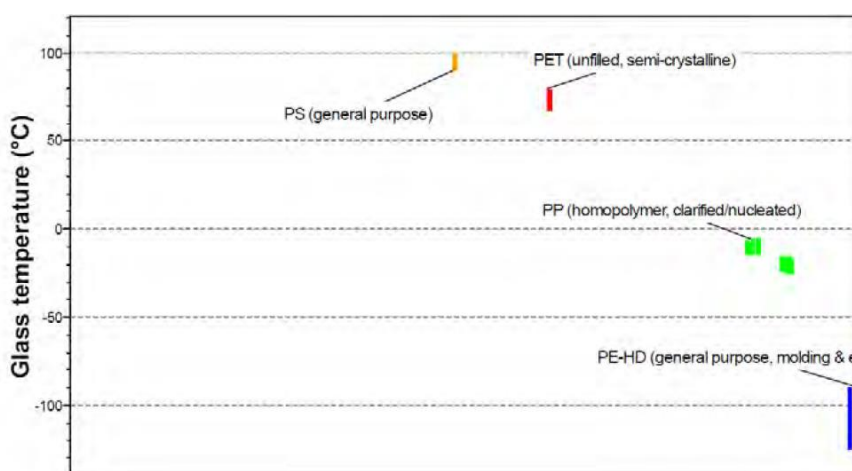
2.2.9. Propiedades térmicas de materiales en el proceso de extrusión

2.2.9.1. Punto de transición vítrea (T_g).

La flexibilidad de los polímeros amorfos se reduce drásticamente cuando su temperatura disminuye por debajo de una temperatura de transición característica denominada temperatura de transición vítrea (T_g). A temperaturas por debajo de T_g , no hay movimiento de los segmentos siendo cualquier cambio dimensional de la cadena de polímero el resultado de distorsiones temporales de los enlaces de valencia primarios. Los plásticos amorfos dan mejor resultado por debajo de su T_g , pero los elastómeros deben utilizarse por encima de su punto de fragilidad, o T_g . [28]

En la siguiente imagen se pueden observar los puntos de transición vítrea para algunos polímeros, donde el PET se encuentra en un rango de 70 a 80° C.

Figura 18: *Puntos de transición de algunos polímeros*



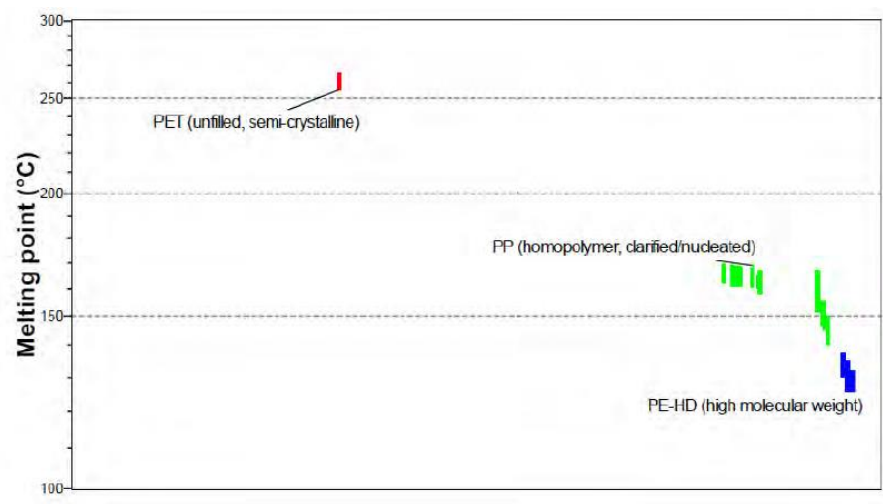
FUENTE: SOFTWARE CES EDUPACK

2.2.9.2. Punto de fusión (T_m).

Esto ocurre a una temperatura constante y es una propiedad intensiva de la materia, lo cual significa que no depende de su masa o de su tamaño. El punto de fusión es la temperatura a la cual un sólido se transforma en líquido y durante esta transición coexisten el sólido y el líquido.

Seymour-Carraher (1995). Manifiesta que los valores de T_m son normalmente de un 33 a 100% superiores a los de T_g . En la siguiente imagen se pueden observar los puntos de fusión para algunos polímeros, donde el PET se encuentra en un rango de 260 a 280° C.

Figura 19: *Puntos de fusión*



FUENTE: SOFTWARE CES EDUPACK

2.2.9.3. Temperatura de fusión en procesamiento de polímeros.

Tabla 5: *Temperaturas de fusión y de transición vítrea de algunos de los materiales poliméricos más comunes.*

Material	Temperatura de transición vítrea [°C(°F)]	Temperatura de fusión [°C(°F)]
Polietileno (baja densidad)	-110 (-166)	115 (239)
Polietileno (alta densidad)	-90 (-130)	137 (279)
Politetrafluoroetileno	-90 (-130)	327 (621)
Polipropileno	-20 (-4)	175 (347)
Tereftalato de polietileno (PET)	75 (165)	260(504)

FUENTE: INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES 2

ELABORADO: WILLIAM D., CALLISTER, JR.

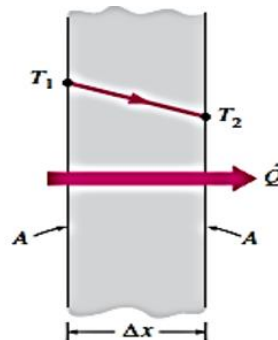
2.2.10. Transferencia de calor

La transferencia de calor es un proceso entre 2 o más cuerpos que presentan una diferencia de temperatura entre ellos, cumpliendo las leyes de la termodinámica. [29]

2.2.10.1. Transferencia de calor por conducción

Este mecanismo de transferencia de calor se produce por cuerpos que se encuentran en contacto con un gradiente o delta de temperatura. El cual conduciría el calor del lado más energético al lado menos energético, la velocidad de transferencia de calor por este mecanismo depende del coeficiente de conductividad térmica para cada material (k) y la difusividad térmica, siendo proporcional al calor transmitido por el sistema. Como se aprecia en la figura una pared plana sometida a un flujo de calor constante. [30]

Figura 20 : *Conducción de calor a través de una placa plana*



FUENTE: TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA

ELABORADO: CENGEL, YUNUS

2.2.10.2. Transferencia de calor por convección

La transferencia de calor por convección ocurre cuando una superficie es afectada por un gas o fluido en movimiento con diferente temperatura, el movimiento puede ser natural o forzado. [30]

2.2.10.3. Transferencia de calor por radiación

La transferencia de calor por radiación ocurre cuando existe un cuerpo que emite calor hacia a otro en forma de ondas electromagnéticas, no es afectada por el contacto entre cuerpos o el movimiento de un fluido o gas. La radiación depende de la Emisividad, de la constante de Stefan-Boltzmann y de las temperaturas del ambiente y alrededores que son las principales causas del calor que se emite en forma electromagnética [30]

Tabla 6: Calores específicos de algunos materiales plásticos.

- **Calor específico de algunos materiales plásticos**

Material plástico	$c_p (\frac{cal}{g} ^\circ C)$
ABS	0.30-0.40
Polietileno (baja)	0.50-0.55
Polietileno (alta)	0.55-0.60
Polipropileno	0.45-0.50
Poliestireno	0.32-0.35
PVC rígido	0.20-0.28
PVC flexible	0.30-0.50
Tereftalato de polietileno	0.238 – 0.28

- **Viscosidad de los materiales plásticos**

La viscosidad de un polímero tiene mucho que ver con el peso molecular del mismo y el peso molecular tiene una relación directa con sus propiedades, por tanto, la medición de la viscosidad se convierte en importante para determinar las propiedades de un plástico, la viscosidad se reduce al desarrollar calentura y cuando se eleva la velocidad de corte (es decir, la velocidad del fluido). Por lo tanto, es muy significativo conservar un correcto control de la temperatura. [31]

2.2.11. Sistema de calefacción

El calor requerido al arrancar la extrusora, es la energía máxima que se debe transmitir al polímero PET a través de la temperatura de operación del cilindro, y el cabezal, para alcanzar la temperatura de transición vítrea.

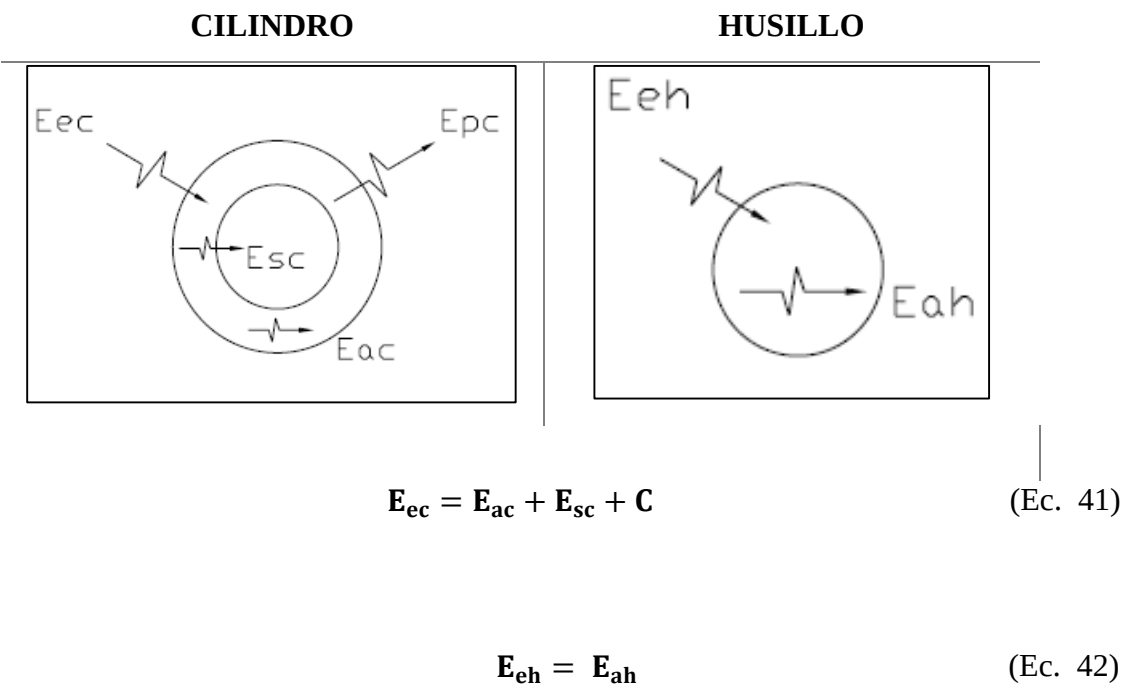
2.2.11.1. Potencia de los calefactores

La potencia que proveerán las zonas calefactoras para alcanzar la calentura del cilindro y del husillo, está en ocupación del calor obligatorio que se origina en el estado temporal. Se debe estimar este estado, puesto que el cilindro debe ser calentado hasta conseguir la calentura de trabajo antes de empezar a extruir el material plástico.

2.2.11.2. Balance energético en el estado temporal

Esta comprobación se hace, considerando el cilindro y el husillo como dos regímenes, el husillo no gira y el aire no se toma en cuenta debido a que se halla dentro de los mismos.

Tabla 7: Sistema de análisis para el balance energético



Donde:

E_{ec} : energía que ingresa al cilindro, proviene de los calefactores eléctricos (W)

E_{ac} : energía almacenada por el cilindro (W)

E_{pc} : energía que surge del cilindro hacia el exterior (W)

E_{sc} : energía que emerge del cilindro hacia el husillo (W)

E_{eh} : energía que ingresa al husillo, proviene del cilindro (W)

E_{ah} : energía almacenada por el husillo (W)

Considerando que existe un trato térmico ideal entre el cilindro y el husillo, se tiene:

$$E_{sc} = E_{eh} \quad (\text{Ec. 43})$$

La energía acumulada por el cilindro es:

$$E_{ac} = m_c \cdot C_{p_c} \cdot \frac{\partial T_c}{\partial t} \quad (\text{Ec. 44})$$

Donde:

m_c : Masa del cilindro

C_{p_c} : Calor específico del material (0.11 Kcal/Kg °C, hierro, acero) ver Anexo_1

$\frac{\partial T_c}{\partial t}$: Variable de la temperatura respecto al tiempo

La energía que surge del cilindro hacia el exterior es:

$$E_{pc} = h \cdot A \cdot [T_{(t)} - T_{\infty}] \quad (\text{Ec. 45})$$

Donde:

h : Coeficiente de transferencia de calor (W/m² °C)

A : Área de transferencia de calor (m²)

$T_{(t)}$: Temperatura del cilindro, variable con el tiempo (°C)

T_{∞} : Temperatura del medio ambiente (°C)

La energía acumulada por el husillo es:

$$E_{ah} = m_h \cdot C_{p_h} \cdot \frac{\partial T_h}{\partial t} \quad (\text{Ec. 46})$$

Donde:

m_h : Masa del husillo

C_{p_h} : Calor específico del material del husillo (0.11 Kcal/Kg °C, acero)

$\frac{\partial T_h}{\partial t}$: Variación de la temperatura respecto al tiempo

Para lograr la solución de las ecuaciones, se considera que el husillo y el cilindro contienen temperaturas similares conforme altera el tiempo, esto debida a que la termocupla se la coloca lo más cerca posible al polímero, en los alrededores del husillo, y dicho sensor muestra la calentura de la parte interna del cilindro y de la parte externa del husillo. Al ajustar las ecuaciones se llega a la siguiente expresión:

$$E_{ec} = (m_c \cdot C_{p_c} + m_h \cdot C_{p_h}) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + h \cdot A \cdot [T_{(t)} - T_{\infty}] \quad (\text{Ec. 47})$$

Reemplazando:

$$Q = E_{ec}$$

$$\phi(t) = T_{(t)} - T_{\infty}$$

$$\partial \phi(t) = \partial T_{(t)}$$

$$M = \frac{h \cdot A}{m_c \cdot C_{p_c} + m_h \cdot C_{p_h}}$$

$$P = \frac{Q}{m_c \cdot C_{p_c} + m_h \cdot C_{p_h}}$$

La ecuación se comprime a:

$$\frac{\partial \phi(t)}{\partial t} + M \cdot \phi(t) = P \quad (\text{Ec. 48})$$

Resolviendo la ecuación diferencial se obtiene:

$$\phi(t) = \phi_{(0)} \cdot e^{(-M \cdot t)} + [1 - e^{(-M \cdot t)}] \cdot \frac{P}{M} \quad (\text{Ec. 49})$$

Reemplazando los valores anteriores, y recordando que $T_{(0)} = T_{\infty}$, la ecuación queda de la siguiente forma:

$$T_{(t)} = \left[1 - e^{\left(\frac{h \cdot A}{m_c \cdot C p_c + m_h \cdot C p_h} \right)} \right] \cdot \frac{Q}{h \cdot A} + T_{\infty} \quad (\text{Ec. 50})$$

En esta ecuación entra el coeficiente de transferencia de calor por convección, el cual se lo valora en el subsiguiente apartado.

2.2.11.3. Coeficiente de transferencia de calor

Este coeficiente es igual a la adición del coeficiente de convección y del coeficiente de radiación:

$$h = hc + hr \quad (\text{Ec. 51})$$

Dónde:

hc: Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m²·°C)

hr: Coeficiente de transferencia de calor por radiación (W/m²·°C)

2.2.11.4. Coeficiente de convección

La transferencia de calor por convección, se muestra siempre que un cuerpo sólido está situado en el dominio de un fluido que está a diferente calentura que el área superficial de dicho cuerpo.

- La Temperatura media de película

$$T_f = \frac{(T_s + T_a)}{2} \quad (\text{Ec. 52})$$

Donde:

T_s : Temperatura de la superficie del cuerpo sólido

Las propiedades del aire deben ser evaluadas a la temperatura T_f .

La distancia característica en el número de Grashof, del cilindro horizontal grande, es su diámetro; por lo tanto:

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot \Delta T \cdot D^3}{\nu^2} \quad (\text{Ec. 53})$$

Donde:

g : Gravedad

D : diámetro del cilindro

ΔT : variación de temperatura

El producto $Pr \cdot Gr$, consiste en hallar las invariables c y a , para flujo laminar. Dichas invariables se manejan para evaluar el número de Nusselt, así:

$$Nu = c \cdot (Pr \cdot Gr)^a \quad (\text{Ec. 54})$$

El número de Nusselt para convección libre es:

$$Nu = \frac{hc \cdot D}{k} \quad (\text{Ec. 55})$$

Despejando hc y reemplazando valores se obtiene:

$$hc = Nud \cdot \frac{k}{D} (\text{W/m}^2 \cdot \text{k}) \quad (\text{Ec. 56})$$

2.2.11.5. Coeficiente de radiación

Las superficies metálicas oxidadas normales, son buenos calefactores, las pérdidas que se comprueban dependen de la calentura incondicional, del área de la superficie y de la emisividad de la misma.

Las pérdidas por radiación, se las determina aplicando la ecuación:

$$q = A \cdot \epsilon_1 \cdot \sigma \cdot (Ts^4 - T\alpha^4) \quad (\text{Ec. 57})$$

Donde:

A: Área de transferencia de calor (m^2)

ϵ_1 : Emisividad de la superficie = 0.61

σ : Constante de Stefan-Boltzmann = $5.67 \cdot 10^{-8} (\text{W/m}^2 \cdot \text{k})$

Ts : Temperatura absoluta de la superficie (K)

$T\alpha$: Temperatura absoluta ambiental (K)

El calor de pérdidas por radiación, causan un coeficiente de pérdidas es: 9/8+

$$q = A \cdot hr \cdot (Ts - T\alpha) \quad (\text{Ec. 58})$$

De las ecuaciones (57 y 58), se determina:

$$hr = \frac{\epsilon_1 \cdot \sigma \cdot (Ts^4 - T\alpha^4)}{Ts - T\alpha} \quad (\text{Ec. 59})$$

2.2.12. Evaluación de las pérdidas de calor

2.2.12.1. Pérdida por conducción

El cilindro cede calor a la garganta y a los soportes con los cuales entra en contacto. En el bosquejo de estos compendios del equipo extrusor se ha tratado de menguar la conducción de calor entre las superficies, comprimiendo al mínimo el contacto físico de la superficie del cilindro con los soportes y con la garganta, estas pérdidas se desprecian.

2.2.12.2. Pérdida por radiación

Las pérdidas por radiación, se las establece aplicando la ecuación:

$$Q_r = S \cdot \epsilon_1 \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_a^4) \quad (\text{Ec. 60})$$

Donde:

S: Área de cada zona (m^2)

ϵ_1 : Emisividad de la superficie

σ : Constante de Stefan-Boltzmann = $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ (W/m}^2 \cdot \text{k)}$

T_s : Temperatura absoluta de la superficie (K)

T_a : Temperatura absoluta ambiental (K)

2.2.12.3. Pérdida por convección

El aire caliente se encuentra en relación con la superficie lateral del cilindro tiende a engrandecer a causa de su menor densidad comparada con el aire más frío. Este proceso instituye un flujo de corriente de aire que se eleva al techo, transportando consigo una cantidad significativa de calor desde las partes calientes del extrusor.

Aplicando la ley de enfriamiento de Newton, se tiene que:

$$Q_c = h \cdot \Delta T \cdot S \quad (\text{Ec. 61})$$

Donde:

h: Coeficiente de convección

ΔT : Variación de Temperatura

S: Entropía

Las pérdidas calóricas por convección, se las establece manipulando el coeficiente de convección calculado para el sistema

2.2.13. Incremento de la energía interna del polímero

La siguiente relación, permite establecer la suma teórica de calor preciso para engrandecer una masa de material a explícita calentura:

$$Esp = \frac{\delta m}{\delta t} \cdot Cp \cdot (Ts - Te) \quad (Ec. 62)$$

Donde:

Esp: Cantidad de calor agregada al polímero (kcal/h)

$\frac{\delta m}{\delta t}$: Flujo másico de polímero en la zona (Kg/h)

Cp: Calor específico del polímero (cal/gr°C)

Ts: Temperatura del polímero a la salida (°C)

Te: Temperatura del polímero a la entrada (°C)

2.3. Tornillo transportador

Los transportadores de tornillo sinfín son dispositivos de transporte muy efectivos para sólidos a granel de flujo libre o relativamente libre, que brindan un buen control del rendimiento y soluciones ambientalmente limpias a los problemas de manejo de procesos, debido a su estructura simple, alta eficiencia, bajo costo y requisitos de mantenimiento [32]

Según [33], expresa que los tornillos transportadores “Se emplean para el desplazamiento de materiales pulverulentos de grano fino, cargas moderadamente pastosas, o para cargas a elevada temperatura y/o que emanen gases nocivos”.

Los transportadores de tornillo son mecanismos de transporte de funcionamiento continuo diseñados para transportar materiales a granel que implican el uso de un tornillo en espiral que gira dentro de un canal estable que mueve el material a lo largo del canal [34]

2.3.1. Funcionamiento general

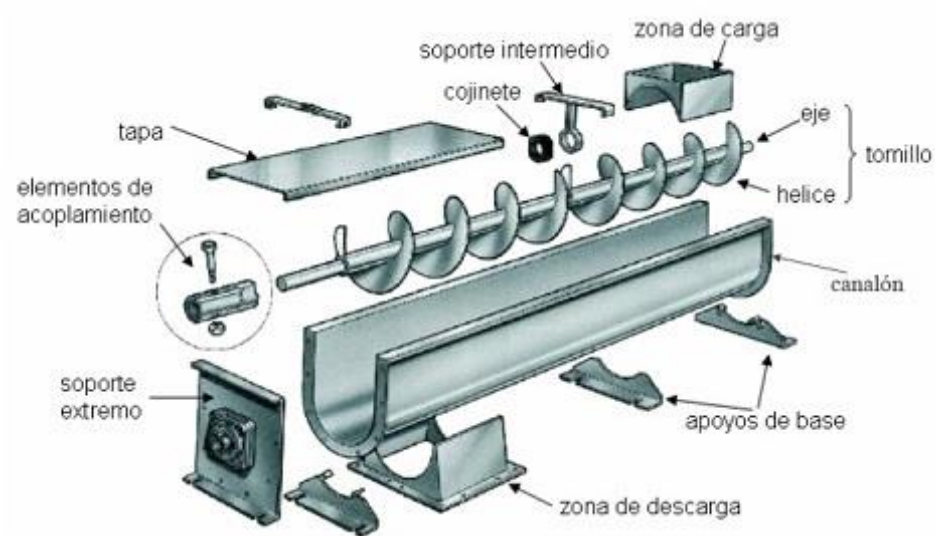
El funcionamiento se basa en el principio de tornillo de Arquímedes, que consta de un tornillo (superficie helicoidal que rodea a un cilindro), dentro de un tubo, el tornillo gira por medio de un motor, lo que provoca el desplazamiento del material.

Los transportadores de tornillo son instalaciones que se utilizan en la industria para hacer transporte de materiales a granel contruidos para distancias cortas, tiene la ventaja que puede ser instalado en diferentes posiciones de ángulos, que pueden ir desde la horizontal hasta la vertical [35]

El transportador se pone funcionamiento a través del sistema motor que consta de un reductor y le suministra el movimiento al tornillo sin fin de alas helicoidales el cual va montado en cojinetes y chumaceras, en dependencia de la longitud del mismo hasta 50 m máxima tendrá cojinetes intermedios que funcionarán como puntos a apoyo para evitar flexiones o la distorsión de la espiral [36]

Estos tornillos transportadores también se pueden adaptar en diferentes ángulos, siempre y cuando sea apropiado para tal fin.

Figura 21: *Transportador de tornillo*



FUENTE: INGEMECÁNICA

ELABORADO: GALBARRO, HERMENEGILDO RODRÍGUEZ

2.3.2. Características de las partes de un tornillo transportador.

2.3.2.1. Grupo motriz o accionamiento

Un componente fundamental de la máquina es el grupo motriz o accionamiento, el cual, está formado por un motorreductor, este es el encargado de hacer girar el tornillo a una velocidad deseada [35]

Generalmente los motorreductores son montados en la base o en el eje. El accionamiento se puede montar en el lado de la entrada o la salida, sin embargo, depende de la situación de montaje prevista. Para la transmisión de la fuerza se utilizan tanto engranajes y transmisión por cadena. En el último caso el número de revoluciones se puede ajustar mediante modificación de la transmisión. No obstante, frecuentemente es importante poder adaptar el número de revoluciones del tornillo durante el funcionamiento. En el pasado se utilizaban para ello engranajes de regulación, actualmente se utilizan cada vez más los convertidores de frecuencia [35]

2.3.2.2. Carcasa o canalón

En la siguiente figura 21 se aprecia la carcasa de un transportador de tornillo, la forman paredes metálicas que envuelven el tornillo que, a su vez, cumplen la función de mantener el material en el interior de la máquina. Generalmente se fabrican en chapa de acero al carbono [35]

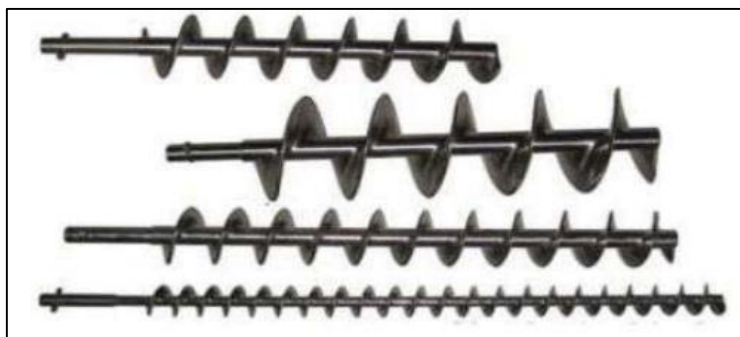
Las paredes metálicas que cierran y envuelven al transportador forman la carcasa del tornillo, y sirve para contener el material y separarlo del ambiente exterior. Normalmente, los elementos que componen la carcasa de los transportadores de tornillo están fabricadas en chapa de acero al carbono de 3 a 6 mm de espesor [17].

Dependiendo del tipo de material que se quiera transportar, se fabrican en forma tubular con un tubo o varias secciones de este, unidas por tornillos y si es de canal estará formado por una canal en forma de U, para este último tipo de fabricación, se contará con tapas generalmente de segmentos planos que se apoyan sobre el borde de la canal [37]

2.3.2.3. Tornillo

Es el encargado de realizar el desplazamiento de material a transportar a lo largo del tubo o canal. [35]

Figura 22: *Tornillo de un transportador*



FUENTE: INGEMECÁNICA

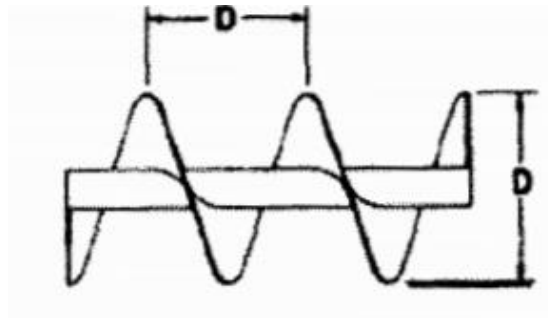
ELABORADO: GALBARRO, HERMENEGILDO RODRÍGUEZ

➤ **Clasificación de los transportadores según el paso**

○ **Transportador de paso estándar**

Este tipo de transportador se caracteriza por tener un paso igual al del diámetro y se denomina estándar debido a que realiza transportes continuos de material al granel.

Figura 23: *Paso estándar*



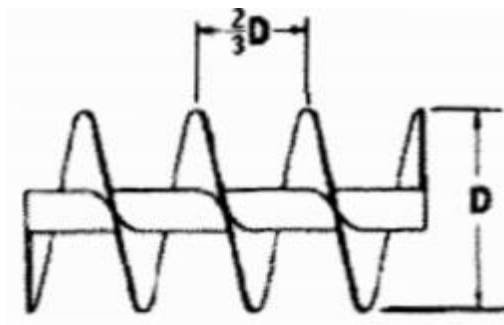
FUENTE: INGEMECÁNICA

ELABORADO: GALBARRO, HERMENEGILDO RODRÍGUEZ

○ **Transportador de paso corto**

Este tipo de transportador helicoidal de paso corto son de construcción regular excepto que el paso es reducido a $\frac{2}{3}$ del diámetro del Sinfín.

Figura 24: *Paso corto*



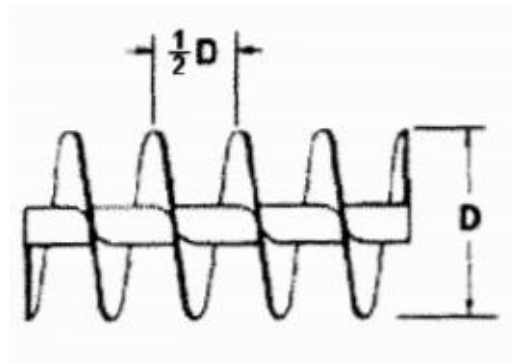
FUENTE: INGEMECÁNICA

ELABORADO: GALBARRO, HERMENEGILDO RODRÍGUEZ

- **Transportador de paso medio**

Estos transportadores son similares a los de paso corto excepto que el paso es reducido a $\frac{1}{2}$ de diámetro del Sinfín, normalmente son utilizados en aplicaciones inclinadas, verticales, alimentadores etc.

Figura 25: *Paso medio*



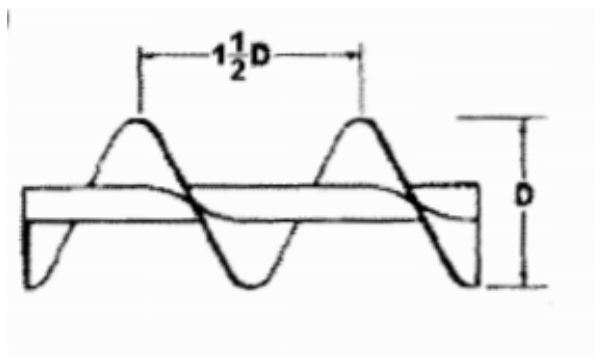
FUENTE: INGEMECÁNICA

ELABORADO: GALBARRO, HERMENEGILDO RODRÍGUEZ

- **Transportador de paso largo**

En este caso el paso es $1 \frac{1}{2}$ veces el diámetro y son usados para agitar materiales fluidos o para mover materiales de flujo muy libre.

Figura 26: *Paso largo*



FUENTE: INGEMECÁNICA

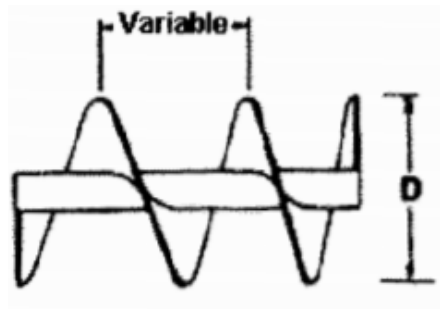
ELABORADO: GALBARRO, HERMENEGILDO RODRÍGUEZ

- **Transportador de paso variable**

Estos transportadores consisten de helicoidales sencillos subsiguientes o en grupos que incrementan el paso.

Se suelen utilizar como alimentadores para mover uniformemente materiales de flujo libre a través de toda la longitud de la abertura de entrada de alimentación.

Figura 27: *Paso variable*



FUENTE: INGEMECÁNICA

ELABORADO: GALBARRO, HERMENEGILDO RODRÍGUEZ

2.3.3. Aplicaciones

Los transportadores de tornillo tienen la cualidad de trabajar en distintas posiciones, ya que, posee la licencia de ser instalado sobre un plano completamente horizontal o inclinado llegando a transportar el material en forma vertical, con múltiples entradas y salidas. Con lo anterior es posible el transporte de una gran gama de materiales, entre los cuales se puede encontrar, granos, polvos, pellets e inclusive algunas variedades de líquidos [35]

Alguno de los sectores donde es ampliamente utilizado es:

- Industria agrícola y producción de alimentos.
- Industrias químicas.
- Minería.
- Industria de áridos y/o cemento.
- Industria de incineración [35]

2.3.4. Capacidad del transportador de tornillo

Se debe tener en cuenta al momento del cálculo de la capacidad de transporte de material, la configuración del transportador, lo que implica saber el número de puntos de carga y descarga de material [35]

Se suelen considerar cuatro configuraciones básicas de transportadores de tornillos que pueden ser:

- Tornillo horizontal, 1 entrada y N salidas.
- Tornillo horizontal, 1 entrada 1 salida.
- Tornillo horizontal, 1 entrada y 1 salida.
- Tornillo inclinado, 1 entrada y 1 salida [35]

2.3.4.1. Parámetros iniciales para el diseño del tornillo transportador

Para la elaboración del tornillo transportador se definen los siguientes conceptos:

- **Área de relleno del canalón (S):**

El área de relleno (S) del canalón que ocupa el material que mueve el transportador, se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$S = \lambda \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (\text{Ec. 63})$$

Donde:

S: Área de relleno del transportador (m²)

D: Diámetro del canalón del transportador (m)

λ: Coeficiente de relleno de la sección.

Este coeficiente de relleno (λ) deberá ser menor que la unidad con objeto de evitar que se produzca amontonamiento del material que dificultará su correcto flujo a lo largo del canalón.

En la siguiente tabla se indican los valores del coeficiente de relleno (λ) en función del tipo de carga que transporta el tornillo

Tabla 8: Coeficiente de relleno

Tipo de carga	Coeficiente de relleno (λ)
Pesada y abrasiva	0.125
Pesada y poco abrasiva	0.25
Ligera y poco abrasiva	0.32
Ligera y no abrasiva	0.4

FUENTE: INGEMECÁNICA

ELABORADO: [38]

- **Velocidad de desplazamiento del transportador (v):**

La velocidad de desplazamiento (v) del transportador es la velocidad con la que desplaza el material en la dirección longitudinal del eje del tornillo. Depende tanto del paso del tornillo como de su velocidad de giro.

La expresión que permite conocer la velocidad de desplazamiento en un transportador de tornillo es la siguiente:

$$v = \frac{p \cdot n}{60} \quad (\text{Ec. 64})$$

Donde:

v: Velocidad de desplazamiento del transportador (m/s)

p: Paso del tornillo o paso de hélice (m)

n: Velocidad de giro del eje del tornillo (r.p.m.)

- **Determinación del flujo de material**

La capacidad de transporte de un transportador de tornillo sin fin viene determinada por la siguiente expresión que calcula el flujo de material transportado:

$$Q = 3600 \cdot S \cdot v \cdot \rho \cdot i \quad (\text{Ec. 65})$$

Donde:

Q: Flujo de material transportado (t/h)

S: Área de relleno del transportador (m^2)

v: Velocidad de desplazamiento del transportador, en (m/s)

ρ : Densidad del material transportado (t/m^3)

i: Coeficiente de disminución del flujo de material debido a la inclinación del transportador.

En la siguiente tabla se muestran los valores de este coeficiente (i) de disminución de flujo que indica la reducción de capacidad de transporte debida a la inclinación:

Tabla 9: Coeficiente debido a la inclinación

Inclinación del canalón	0°	5°	10°	15°	20°
I	1	0.9	0.8	0.7	0.6

FUENTE: INGEMECÁNICA

ELABORADO: GALBARRO, HERMENEGILDO RODRÍGUEZ

2.4. Sistema de refrigeración

Para el sistema de refrigeración del PET extruido se usará un ventilador por medio de la convección forzada, disipar el calor existente en el filamento. Este proceso se lo realiza con el fin de evitar la dilatación extra en el filamento, evitando también que el diámetro varíe y así obtener una calidad mayor de material extruido (PET).

Es trascendental lograr una calentura por encima de la temperatura de transición vítrea del PET, en vista de que por debajo de ella este polímero será delicado y rígido, por otro lado, por arriba de esta temperatura el material es maleable y suave, características indispensables para el sistema de puller de la extrusión trabaje adecuadamente.

- **Fórmula para calcular temperatura de salida del filamento.**

Para obtener la temperatura final del filamento a la salida de la boquilla lo primero que se hace es calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección forzada, para ello tenemos que calcular el número de Reynolds, número de Nusselt y número de Prandtl.

- **Número de Reynolds**

$$R = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (\text{Ec. 66})$$

Donde:

V: Flujo de aire del ventilador (m/s)

D: Diámetro del filamento (m)

ν: Viscosidad cinemática del aire (m^2/s)

- **Número de Nusselt**

$$Nu = 0.3 + \frac{0.62 \cdot Re^{\frac{1}{2}} + Pr^{\frac{1}{3}}}{\left(1 + \left(\frac{0.4}{Pr}\right)^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{1}{4}}} \left[1 + \left(\frac{Re}{28200}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}} \quad (\text{Ec. 67})$$

Donde:

Re: Número de Reynolds

Pr: Número de Prandtl

- **Coeficiente de transferencia de calor por convección**

$$h = Nu \cdot \frac{k}{D} \quad (\text{Ec. 68})$$

Donde:

Nu: Número de Nusselt

k: Conductividad térmica del aire (W/mK)

D: Diámetro filamento (m)

- **Temperatura final del filamento después de pasar por el ventilador.**

$$T = T_{\infty} + (T_0 + T_{\infty}) e^{-\frac{4hx}{\rho V_e D C_p}} \quad (\text{Ec. 69})$$

Donde:

T_∞: Temperatura ambiente

T₀: Temperatura de salida del filamento (W/mK)

h : Coeficiente de convección (W/m^2K)

ρ : Densidad del material (Kg/m^3)

V_e : Velocidad de salida del filamento de la boquilla (m/s)

D : Diámetro filamento (m)

Cp : Calor específico material ($J/Kg\ ^\circ C$)

2.4.1. Sistema de bobinado

- **Fórmula para calcular la velocidad de salida del filamento.**

El proceso de diseño del sistema de bobinado comienza por saber la rapidez de salida del material en el extrusor, y así establecer los demás puntos. Para la velocidad de salida, teniendo en cuenta el diámetro por donde sale el filamento que es de 1.75 mm se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$v = \frac{Q}{S} \text{ (m/seg)} \quad (\text{Ec. 70})$$

Donde:

V : Velocidad de salida del filamento (m/seg)

Q : Flujo volumétrico de material (m^3/seg)

S : Sección Transversal de la boquilla (m^2)

- **Fórmula para calcular las revoluciones del carrete de bobinado.**

A partir de la rapidez de salida del filamento, se deduce las revoluciones a las que debe rotar el carrete, con la ecuación:

$$\eta = \frac{V}{\pi \cdot D} \text{ (r. p. m.)} \quad (\text{Ec. 71})$$

Donde:

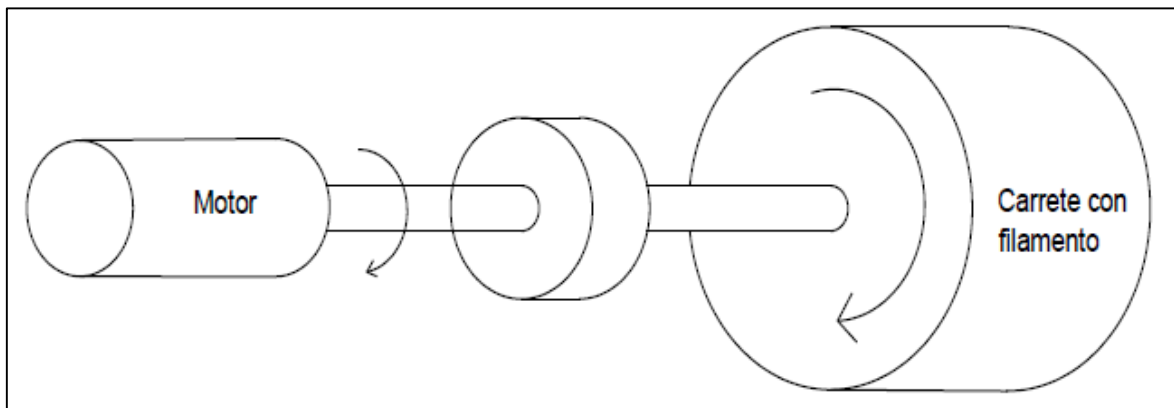
η : Velocidad de giro (r. p. m.)

V : Velocidad de salida del filamento (mm/min)

D : Diámetro interior del carrete (mm)

Para la selección del motor adecuado que cumpla con el par necesario para que el carrete se mueva, es imprescindible calcular el torque máximo que existe en el sistema. En la figura 28 se representa el bosquejo del sistema de enrollado, el cual el motor establece un giro mediante un ajuste directo y alcanzar girar la carga.

Figura 28: *Diseño del sistema de bobinado*

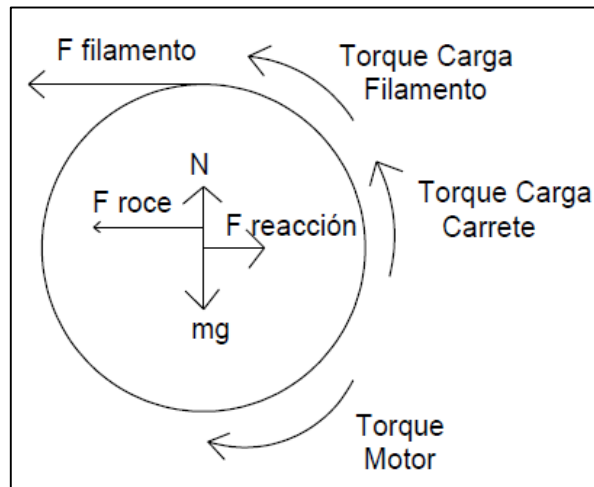


ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

El máximo torque que debe realizar el motor y esto dependerá de tres factores importantes: el primero es el torque por el peso a girar, el segundo es el peso del carrete y filamento y por último el torque que se crea por la rapidez de la inercia de las partes del sistema (lo cual pende de cada una de sus geometrías).

En la siguiente figura 29 se muestra el DCL del carrete y se puede observar el torque.

Figura 29: DCL del carrete del sistema de bobinado



ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

Donde:

$F_{filamento}$: Fuerza ejercida en el filamento al bobinar. (N)

N : Fuerza normal producida por el peso del carrete y filamento. (N)

mg : Fuerza del peso del carrete y filamento. (N)

F_{roce} : Fuerza de roce generada en el eje del carrete. (N)

$F_{reacción}$: Fuerza que se genera debido al movimiento del carrete horizontalmente por el soporte de éste. (N)

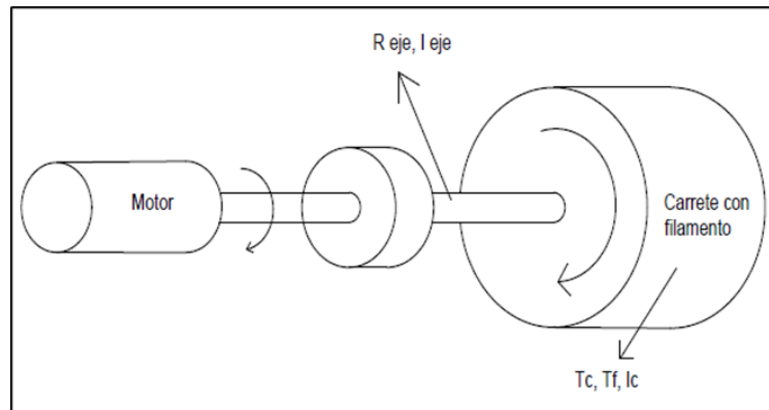
$T_{carga-filamento}$: Torque de carga del filamento (Nm)

$T_{carga-carrete}$: Torque de carga del carrete (Nm)

T_{motor} : Torque generado por el motor (Nm)

Cabe recalcar que, en este punto, la fuerza que se precisa para bobinar el filamento es igual a cero, debido a que el filamento tiene una velocidad que viene desde el sistema de la extrusora. A continuación, se presentan los parámetros descritos mediante un esquema, como lo es: torque de carga, torque formado por el roce y la rapidez de inercia por los mecanismos del sistema, simbolizado cuando éste parta del reposo hasta rapidez

Figura 30: Esquema representativo de los parámetros del sistema de bobinado



ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

Donde:

T_c : Torque por carga (Nm)

T_f : Torque por roce (Nm)

I_c : Inercia de la carga (kgm^2)

R_{eje} : Radio del eje (m)

I_{eje} : Inercia del eje (Nm)

En efecto, el torque máximo se lo calcula mediante la ecuación

$$T_m = T_c + T_f + T_I \quad (\text{Ec. 72})$$

Donde:

T_I : Torque generado por la aceleración de inercia (Nm)

2.5. Marco Referencial.

2.5.1. Historia del plástico.

El plástico es un material orgánico, igual que la madera o la lana. [39].

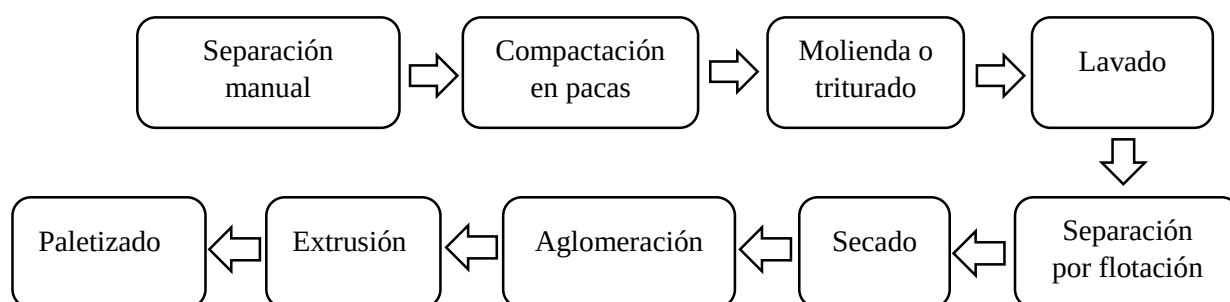
Alrededor del año 1860 Alexander Parkes fabricó el primer polímero natural modificado en bruto. En 1859 el descubrimiento de grandes cantidades de petróleo en los EE.UU. condujo a que los polímeros comenzaran a sintetizarse a partir de las sustancias obtenidas en el refinado de petróleo. [40].

Hoy en día los plásticos en la sociedad se han vuelto cruciales pues han contribuido a facilitar nuestro día a día. [7].

2.5.2. Reciclaje de materiales plásticos.

Los plásticos exhiben opciones que favorecen el desempeño de su fase de vida y que constituyen parte de la última etapa del producto. Lo cual concierne a: “Reciclaje físico o mecánico: en este caso puede ser clasificado y limpiado para proceder a la disminución de su tamaño original, posterior a aquello se le dé un tratamiento térmico” [41].

Figura 31: *Proceso para el reciclaje físico del PET*



FUENTE: Materiales sustentables y reciclados en la construcción.

ELABORADO: Gonzalo Martínez, Juan Bosco, Teresa López Lara, Carmina Menchaca

“Reciclaje químico o terciario: este proceso tiene un costo elevado y no se lo puede aplicar a una variedad de productos por la presencia de la cantidad de aditivos que lo componen” [41].

“Reciclaje energético o cuaternario: es el proceso mediante el cual se usa el plástico para obtener energía mediante la combustión de volúmenes de residuos, transformando el plástico en gases, cenizas y escorias” [12].

La base del proyecto se encuentra en la transformación de plástico desde recipiente, envases a filamento extruido, esencialmente se centra en el tereftalato de polietileno (PET).

En el área de reciclaje existen cuatro métodos para el plástico llamados primario, secundario, terciario y cuaternario. El primario tiene que ver con el uso de las partes plásticas en diferentes aplicaciones este se obtiene por recorte del material original.

El secundario es uno de los más empleados ya que estos se fusionan de los desechos y se convierten en nuevos productos de diferentes formas y con mayor aplicación. El terciario conlleva un proceso químico el cual consiste en aprovechar los componentes del plástico.

El cuaternario consiste en la incineración para recuperar energía. [9].

2.6. Máquinas disponibles en el mercado.

Para la fabricación de filamento para impresoras 3D a partir Tereftalato de polietileno (PET) reutilizando dicho material, es necesario la utilización de máquinas que realicen el proceso de trituración y extrusión del plástico reciclado. A continuación, en este apartado se exhiben varias máquinas trituradoras y extrusoras.

2.6.1. Máquinas trituradoras.

En la actualidad existe una diversidad de trituradoras de plástico, unas de las marcas o nombres más reconocidas en el mercado son: FILABOT INDUSTRIAL, “Desfibradora” perteneciente a la empresa PRECIOUS PLASTIC, entre otras.

2.6.1.1. “Desfibradora” de Precious Plastic.

Esta máquina presenta una dimensión de 280 x 600 x 1142 mm y un peso de 90 kg, es la principal de PRECIOUS PLASTIC, con esta máquina se puede triturar plásticos en pequeñas dimensiones, a su vez puede lavar y almacenar con facilidad el producto triturado y transportarlo a otros espacios dentro del área de trabajo de PRECIOUS PLASTIC, para posterior transformarlo en diversos productos. [42]

“Se puede triturar variedad de plásticos como: HDPE, LDPE, PP, PS; con un espesor máximo de 4 mm” [42].

Figura 32: Trituradora de plásticos, Precious Plastics Shredder. (Desfibradora)



FUENTE: PRECIOUS PLASTIC

ELABORADO: DAVE HAKKENS

2.6.1.2. Filabot Industrial.

Esta máquina es capaz de granular los desechos producidos a partir de la impresión 3D a un ritmo de 170 lb/h. Tiene una dimensión de aproximadamente 1300 mm de alto, con una alimentación de 343 x 160 mm de garganta. [43]

Figura 33: Trituradora de plásticos, Filabot Industrial Reclaimer



FUENTE: FILABOT

ELABORADO: KICKSTARTER

2.6.2. Máquinas extrusoras.

Hay varios tipos de máquinas extrusoras de plástico idóneas para la fabricación de filamentos de una sección transversal con un 0.1 mm de tolerancia. A partir de aquello se pueden encontrar diversas máquinas como: FILABOT EX2, FILASTRUDER.

2.6.2.1. Filabot EX2.

Esta máquina está diseñada para hacer más fácil y práctico el trabajo de fabricar filamento. Cuenta con un tornillo de extrusión compacto con tres fases de acero inoxidable con un elevado contenido de carbono endurecido y pulido. Además, cuenta

con un controlador de velocidad para la extrusión, por otra parte, contiene una placa de control automático de voltaje variable, para que sea más precisa la regulación de las RPM's del tornillo en consecuencia de que las fuerzas oscilan cuando está en el proceso de extrusión. [44]

Filabot HQ. indica que tiene una dimensión de: 45.75 x 17.78 x 22.86 cm y un peso de 28 Lb, puede extruir plásticos como el ABS, PLA, PETG y polímeros de flujo de fusión más bajo.

Figura 34: *Extrusora de filamento, Filabot EX2*



FUENTE: FILABOT

ELABORADO: KICKSTARTER

2.6.2.2. FILASTRUDER.

Filastruder es una máquina capaz de producir 36 pulg/min, dependiendo del diámetro, material y la temperatura a la que se desee trabajar.

Tiene una dimensión aproximadamente de 45 x 15 x 10 cm, es bastante silenciosa y liviana; trabaja muy bien con los diferentes tipos de plásticos como por ejemplo el ABS, TPE, Acrílico, LDPE, entre otros, sin perder la tolerancia adecuada para el uso final de estos plásticos. [45]

Figura 35: Extrusora de filamento, FILASTRUDER



FUENTE: FILABOT

ELABORADO: KICKSTARTER

2.7. Manufactura aditiva.

Actualmente concurren varias tecnologías de manufactura aditiva con sus propias características, ventajas y desventajas con respecto a los demás métodos. El método más conocido es el de Fused Deposition Modeling *FDM* (Deposición de Material Fundido).

Este proceso exhibe un bajo costo en equipos y material comparado con los demás procesos de manufactura aditiva. En el proceso de *FDM* se deposita un hilo de polímero fundido el cual va formando sucesivas capas de filamentos entrelazados formando diferentes patrones.

Para realizar este y otros métodos de manufactura aditiva se debe tener con antelación un procedimiento de prototipado rápido y un proceso de fabricación que consiente obtener piezas prácticas.

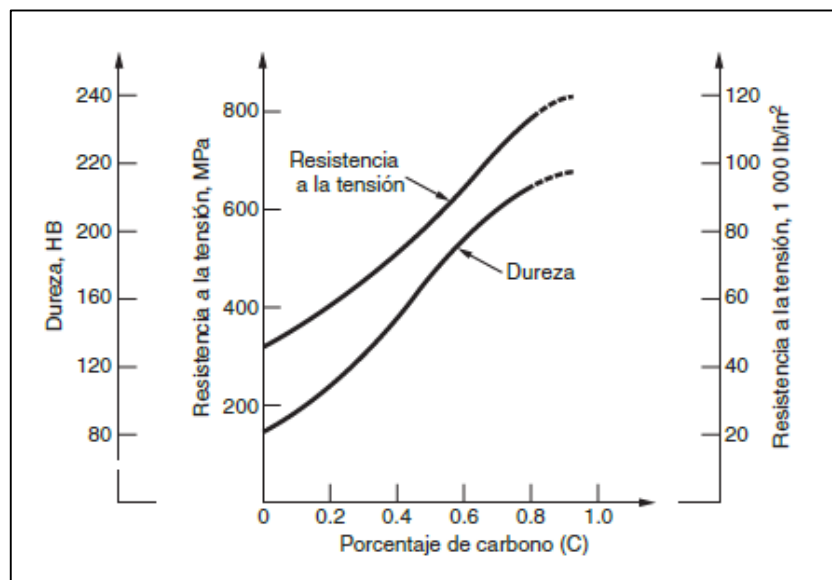
Para conseguirlo es necesario estudiar el proceder mecánico de las partes considerando las propiedades mecánicas de la materia prima y el resultado de los parámetros del proceso. [46]

2.8. Aceros empleados en la construcción de maquinaria.

2.8.1. Acero al carbono.

La composición de estos aceros se basa principalmente en hierro y carbono y sólo pequeñas cantidades de otros elementos. El aumento del contenido de carbono eleva su resistencia. [47]

Figura 36: Resistencia a la tensión y dureza, como función del contenido de carbono en un acero al carbono simple.



FUENTE: FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA.

ELABORADO: GROOVER, M. P.

2.8.2. Acero inoxidable.

El acero inoxidable es un material resistente a la corrosión debido a su contenido de cromo ($\text{Cr} \geq 12\%$) en el acero, esta forma una capa protectora de óxido en la aleación hierro-cromo para protegerse de los agentes oxidantes.

De estos aceros se conocen cuatro tipos de aceros y son: ferrítico, martensítico, austenítico y endurecido por precipitación. [48]

Materiales empleados en la construcción del equipo triturador-extrusor

2.8.3. Acero AISI 1015

El acero AISI 1015 es un acero al carbono simple de uso general que puede endurecerse por cementación y otros métodos, este puede mecanizarse y soldarse fácilmente. Este material es utilizado en ejes de motores forjados, ejes hidráulicos y ejes de bombas, engranajes, así como partes de maquinaria. [49]

En la siguiente tabla se muestra las primordiales propiedades del acero AISI 1015

Tabla 10: *Propiedades Acero AISI 1015*

Propiedades mecánicas	
Dureza	111 HB
Esfuerzo de fluencia	320 MPa (47 Ksi)
Esfuerzo máximo	390 MPa (56 Ksi)
Módulo de elasticidad	205 GPa (29700 Ksi)

FUENTE: DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA DE SHIGLEY

ELABORADO: NISBETT, R. G. BUDYNAS Y J. K.

2.8.4. Acero AISI 1018.

El acero AISI 1018 es un acero al carbono bajo – medio, este puede maquinarse y soldarse fácilmente. Este material es usado en remachado, componentes de maquinaria y para conformado. [49]

En la siguiente tabla 5 se muestra las propiedades primordiales del acero AISI 1018

Tabla 11: *Propiedades Acero AISI 1018*

Propiedades mecánicas	
Dureza	126 HB
Esfuerzo de fluencia	370 MPa (54 Ksi)
Esfuerzo máximo	440 MPa (64 Ksi)
Módulo de elasticidad	205 GPa (29700 Ksi)

FUENTE: DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA DE SHIGLEY

ELABORADO: NISBETT, R. G. BUDYNAS Y J. K

2.8.5. Acero AISI 1045.

Según Nisbett, R. G. Budynas y J. K. [49] “El acero AISI 1045 es manipulado cuando la resistencia y dureza son necesarias. Este material responde al tratamiento térmico y endurecimiento por inducción, no es favorecido para cementación.

Por su dureza y tenacidad es conveniente para la elaboración de dispositivos de maquinaria”.

En la siguiente tabla 6 se muestra las principales propiedades del acero AISI 1045

Tabla 12: *Propiedades Acero AISI 1045*

Propiedades mecánicas	
Dureza	179 HB
Esfuerzo de fluencia	530 MPa (77 Ksi)
Esfuerzo máximo	630 MPa (91 Ksi)
Módulo de elasticidad	205 GPa (29700 Ksi)

FUENTE: DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA DE SHIGLEY

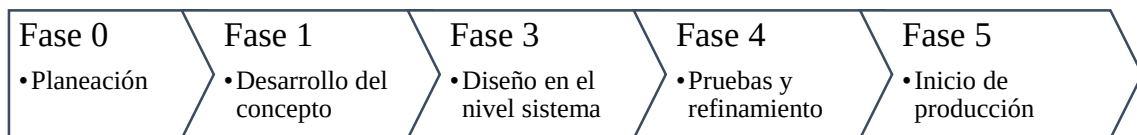
ELABORADO: NISBETT, R. G. BUDYNAS Y J.

2.9. Metodología de diseño y desarrollo de productos

Hoy en día las industrias han experimentado una gran transformación la cual está influenciada por las tecnologías de la información y de la comunicación (TIC), esto abarca diferentes puntos como nuevas herramientas, nuevas metodologías y nuevas formas organizativas. Unos de los aspectos más destacables es la importancia que adquiere las etapas de diseño y desarrollo de nuevos productos y servicios. [50]

Los procesos de diseño de producto a nivel conceptual y diseño detallado basado en la metodología generada por Ulrich y Eppinger, determinan una serie de procesos teniendo mayor relevancia las cuatro primeras fases. [51]

Figura 37: Fases del proceso de diseño en un enfoque multidisciplinar



FUENTE: DISEÑO Y DESARROLLO DE PRODUCTOS

ELABORADO: EPPINGER, STEVEN D.

El desarrollo conceptual es una de las primeras fases del proyecto y la que mayor creatividad demanda, en esta fase es donde se buscan las necesidades, se definen las características técnicas y se generan conceptos que pueden dar solución al problema.

Dentro de estas etapas se encuentran:

- Identificación de necesidades
- Análisis de métricas
- Análisis de la competencia
- Análisis de Casa de las cualidades QFD “Quality Function Deployment”
- Especificaciones preliminares
- Análisis de funcionalidades

- Generación de conceptos
- Selección de alternativas

La fase de diseño en el nivel del sistema se basa en el desarrollo de alternativas de arquitectura del producto sea modular o integral. En cuanto al diseño detallado se define geometría de las partes, se realiza la selección de materiales y se especifica el diseño industrial, eléctrico, mecánico y computacional.

En la fase cuatro de prueba y refinamiento se comprueba que el diseño cumpla los objetivos para lo cual fue realizado y se implementan cambios necesarios o recomendaciones futuras resumiendo los datos obtenidos.

2.10. Modelos del proceso de diseño OTTO y WOOD

Se han desarrollado modelos para el proceso de diseño, la diferencia entre los modelos clásicos con esta metodología se puede observar en la integración de herramientas que permiten ofrecer un valor agregado al producto.

El proceso de diseño ha sido un motivo de estudio de varios investigadores a nivel mundial con el objetivo fundamental de realizar una sistematización que facilite la optimización y enfoque tecnológico orientándose al desarrollo de metodologías de diseño [52].

Tabla 13: *Metodologías actuales de diseño de producto*

Fase		Otto y Wood [2001]
Ideación		Ingeniería inversa (Investigación, Predicción e Hipótesis)
Desarrollo Básicos	Conceptual y	Modelado y Análisis (Modelos del diseño y análisis del diseño)
Desarrollo avanzado		
Lanzamiento		Rediseño (Paramétrico Adaptativo y Original)

FUENTE: FLUJO DE INFORMACIÓN EN EL PROCESO DE DISEÑO

ELABORADO: FERRER, INÉS

Además de las teorías de diseño mencionadas anteriormente, las empresas han definido sus propios procesos de desarrollo de productos en los cuales se enfatiza en los aspectos claves de cada compañía para su éxito en el mercado y en la naturaleza de sus productos [53].

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Localización.

La presente investigación y construcción se ejecutó en la ciudad de Ventanas, provincia de Los Ríos de la región costa de la república del Ecuador.

Tiene una población aproximada de 38.168 habitantes según encuesta realizada en el año 2010, cuenta con un área de 9.61 km².

Figura 38 : *Ubicación de la ciudad de Ventanas*



FUENTE: GOOGLE MAPS, [2020]

Características principales del Cantón Ventanas.

Latitud: 1°27'0''S, 79°28'0''W

Temperatura media frecuente: 26.3 °C

Altitud sobre el nivel del mar: 24 m

3.2. Tipo de investigación.

3.2.1. Investigación exploratoria.

Durante la búsqueda de información pertinente al tema de investigación, en el área de influencia no existe una máquina que involucre a la reutilización de plásticos de tipo PET. Mucho menos existe una máquina capaz de triturar y extruir material plástico para materia prima de impresoras 3D.

3.2.2. Investigación de campo.

El estudio de los equipos existentes en nuestro entorno nos facilita llegar a la conclusión de que la creación de un equipo triturador-extrusor de filamento 3D reutilizando material plástico de tipo PET es de gran importancia tanto para el reciclaje como para proveer de materia prima a las impresoras 3D.

3.3. Métodos de investigación.

3.3.1. Método analítico.

Basándose en este método se usará para dividir y establecer las relaciones causa y efecto del caso de estudio como es la creación de un equipo triturador-extrusor.

Basándose en este método se analizará los diversos datos e información que se obtuvieron de la investigación y análisis del parámetro del plástico PET, con el objetivo de diseñar y construir un equipo triturador-extrusor para que pueda ser óptimo y cumpla con la calidad para poder desarrollar un filamento con buena calidad.

3.3.2. Método bibliográfico.

En base a este método se logra el análisis de varios estudios previamente realizados de características de materiales plásticos para su reciclaje, de máquinas trituradoras y de extrusoras, para concluir con un diseño óptimo y compacto que cumpla las dos funciones en una.

3.4. Fuentes de recopilación de información.

Esta investigación se desarrolla con la ayuda de información existente en:

Fuentes secundarias: libros, proyectos de investigación y evidencia asequible.

3.5. Diseño de investigación.

3.5.1. Diseño experimental.

Para el perfeccionamiento de este proyecto investigativo se considera experimental ya que se debe adaptar a las insuficiencias de reciclar y de proveer de materia prima a las impresoras 3D.

3.6. Instrumentos de investigación.

Se crea un estudio y análisis de la máquina por medio del Software de ingeniería SolidWorks para comprobar el funcionamiento y poder obtener la respectiva guía (Planos) para la construcción de la misma.

3.7. Recursos humanos y materiales.

- Recursos humanos.
- Ingenieros mecánicos (FCI de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo)
- Autores (Macias Coello Christopher; Sandoya Lara Darwin)
- Recursos materiales.
- Con la ayuda de los siguientes materiales se desarrolla este trabajo de investigación:
- Computadoras
- Impresora 3D
- Artículos científicos
- Hojas
- Calculadoras
- Cuadernos
- Esferos
- Gráficos

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Diseño conceptual

En el siguiente capítulo se exponen los requerimientos del sistema del equipo, el cual comprende la trituración, extrusión. También se elaboran diferentes alternativas para luego elegir la alternativa óptima.

4.2. Requerimientos del equipo triturador-extrusor

Tabla 14: *Requerimientos según sus categorías*

Categorías	Requerimientos
Función principal	• Creación de filamentos de plástico PET de cualquier tipo de diámetro comercial menor a los 3 mm con una tolerancia de $\pm 0.5\text{mm}$. • Enrollamiento del material extruido alrededor de un carrete para su futuro uso en la impresión 3D.
Materia prima	• Envases de plástico PET
Geometría	• La máquina deberá ser Ergonómica
Materiales	• Materiales livianos, resistentes y anticorrosivos
Señales	• Interfaz para controlar o monitorear cada proceso de la máquina.
Seguridad	• Conmutador mecánico de encendido y apagado • Conmutador mecánico de emergencia
Ergonomía	• Acceso visible hacia los controles de la máquina • Evitar que el usuario introduzca partes de su cuerpo dentro de la estación de triturado.
Fabricación	• Característica modular de la máquina • Fabricado en taller local
Montaje	• Ensamblado por estaciones y acoplado de cada una de éstas en la máquina general.
Uso	• El usuario deberá conocer como operar cada estación de la máquina, así como ésta en general.

ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

4.2.1. Listado de atributos

En función al problema se han definido atributos para satisfacer el equipo a diseñar.

Dichos atributos son los siguientes:

1. Fundir el material
2. Extruir el material
3. Trabajar con PET
4. Reciclar envases plásticos
5. Triturar envases a un tamaño definido
6. Trabajar con plástico triturado
7. Filamento producto de la extrusión debe ser utilizable por una impresora 3D
8. Filamento continuo sin aire interior
9. Permitir enrollar el filamento en carretes
10. Que requiera sólo un operario para su funcionamiento
11. Bajo costo operación
12. Bajo costo Mantenición
13. Mantenibilidad
14. Materiales de fabricación de alta resistencia al desgaste y corrosión
15. Resistencias a temperaturas de hasta 300 [°C]
16. Generar poco ruido
17. Bajo costo de equipo
18. Fácil de limpiar
19. Permitir reemplazo de piezas
20. Impedir atrapamientos
21. Seguridad en todo el proceso de operación
22. Incluir un sistema de detención rápida en caso de emergencia
23. Sistema de calentamiento eléctrico
24. Controlar la temperatura del proceso
25. Almacenar materia prima
26. Permitir visualizar temperaturas
27. Extrusora con distintas zonas de calefacción

4.2.2. Objetivos, restricciones y funciones

Todos los atributos que se nombraron previamente se clasifican de acuerdo a objetivos restricciones y funciones de diseño estos objetivos son metas que se pretende llegar a cumplir por ello se debe tomar en cuenta las restricciones las cuales son limitaciones que se debe considerar al momento de diseñar el equipo debe satisfacer las necesidades del cliente por último se tiene las funciones de diseño que son parte esencial para que el producto funcione.

Tabla 15: *Objetivos, restricciones y funciones*

Objetivos	Restricciones
• Reciclar envases plásticos • Trabajar con plástico triturado • Filamento producto de la extrusión debe ser utilizable por una impresora 3D • Filamento continuo sin aire en el interior • Permitir enrollar el filamento en carretes • Bajo costo operación • Bajo costo Mantenición • Fácil Mantenimiento • Materiales de fabricación de alta resistencia al desgaste y corrosión • Resistencias a temperaturas de hasta 300 [°C] • Generar poco ruido • Bajo costo de equipo • Fácil de limpiar • Larga vida útil • Permitir reemplazo de piezas • Impedir atrapamientos • Seguridad en todo el proceso de operación • Incluir un sistema de detención rápida en caso de emergencia • Sistema de calentamiento eléctrico • Controlar la temperatura del proceso • Permitir visualizar temperaturas • Extrusora con distintas zonas de calefacción	• Trabajar con PET • Almacenar materia prima • Que se requiera solo un operario para su funcionamiento
	Funciones
	• Fundir el material • Extruir el material

ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

4.2.3. Categorización de los objetos de diseño

En este punto, se organizan los objetivos de diseños por categorías de acuerdo a la similitud entre sí. Estas categorías son: Operación, Seguridad, Costos y Control de operación

Tabla 16: *Categorización de los objetos de diseños*

Operación • Filamento continuo sin aire en el interior • Permitir enrollar el filamento • Resistencia a temperaturas hasta 300[°C] • Fácil de limpiar	Costos • Bajo costo de operación • Bajo costo de mantención • Bajo costo de equipo
Seguridad • Materiales de fabricación de alta resistencia al desgaste y corrosión. • Generar poco ruido • Incluir un sistema de detención rápida en caso de emergencia • Seguridad en todo el proceso de operación	Control de operación • Sistema de calentamiento eléctrico • Controlar la temperatura del proceso • Permitir visualizar temperaturas • Extrusora con distintas zonas de calefacción

ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

4.2.4. Jerarquización de objetivos

A continuación, los objetivos de diseño son ordenados según el nivel de importancia que le entrega el diseñador, ordenando de acuerdo a su apreciación, para así encontrar los objetivos más relevantes entre categorías

Tabla 17: Jerarquización de los objetivos de diseño

1.Operación	2.Control de Operación
• Resistencia a temperaturas hasta 300 [°C] • Filamento continuo y sin aire • Permitir enrollar filamento • Fácil de limpiar	• Controlar la temperatura del proceso • Sistema de calentamiento eléctrico • Extrusora con distintas zonas de calefacción • Permitir visualizar temperaturas
3.Seguridad	4.Costo
• Incluir un sistema de detención rápida en caso de emergencia • Seguridad en todo el proceso de operación • Materiales de fabricación de alta resistencia al desgaste y corrosión. • Generar poco ruido	• Bajo costo de operación • Bajo costo de equipo • Bajo costo de mantención

ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

4.2.5. Lista de objetivos con pesos ponderados

Para establecer los objetivos según la categoría en base a una metodología de escalas relativas o también conocido como AHP la cual organiza la importancia entre los elementos en diferentes objetivos generando un valor mostrando cual es más importante.

Tabla 18: Evaluación del peso relativo de cada categoría

Peso relativo entre categorías						
Criterio	Operación	Control de Operación	Seguridad	Costo	Total	Peso
Operación	1	4	3	8	16.00	0.41
Control de Operación	0.25	1	5	7	13.25	0.34
Seguridad	0.33	0.20	1	7	8.53	0.22
Costo	0.125	0.14	0.14	1	1.41	0.04
Total					39.194	1.00

ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Tabla 19: Evaluación del peso relativo de la categoría operación

Peso relativo Operación							
Criterio	1.1. Resistencia a temperaturas hasta 300 [°C]	1.2. Filamento continuo y sin aire	1.3. Permitir enrollar filamento	1.4. Fácil de limpiar	Total	Peso	Peso Relativo
1.1 Resistencia a temperaturas hasta 300 [°C]	1	3	4	6	14.00	0.45	0.18
1.2 Filamento continuo y sin aire	0.25	1	3	6	10.25	0.33	0.13
1.3 Permitir enrollar filamento	0.25	0.33	1	4	5.58	0.18	0.07
1.4 Fácil de limpiar	0.167	0.17	0.25	1	1.58	0.05	0.02
Total					31.417	1.00	0.41

ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Tabla 20: Evaluación del peso relativo de la categoría control de operación

Peso relativo Control de Operación							
Criterio	2.1. Controlar la temperatura del proceso	2.2. Sistema de calentamiento eléctrico	2.3. Extrusora con distintas zonas de calefacción	2.4. Permitir visualizar temperaturas	Total	Peso	Peso Relativo
2.1 Controlar la temperatura del proceso	1	3	4	7	15.00	0.45	0.15
2.2 Sistema de calentamiento eléctrico	0.25	1	4	5	10.25	0.31	0.10
2.3 Extrusora con distintas zonas de calefacción	0.25	0.25	1	5	6.50	0.20	0.07
2.4 Permitir visualizar temperaturas	0.143	0.20	0.20	1	1.54	0.05	0.02
Total					33.293	1.00	0.34

ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Tabla 21: Evaluación del peso relativo de la categoría seguridad

Criterio	Peso relativo Seguridad				Total	Peso	Peso Relativo
	3.1. Incluir un sistema de detención rápida en caso de emergencia	3.2. Seguridad en todo el proceso de operación	3.3. Materiales de fabricación de alta resistencia al desgaste y corrosión.	3.4. Generar poco ruido			
3.1 Incluir un sistema de detención rápida en caso de emergencia	1	6	7	8	22.00	0.59	0.13
3.2 Seguridad en todo el proceso de operación	0.25	1	3	4	8.25	0.22	0.05
3.3 Materiales de fabricación de alta resistencia al desgaste y corrosión.	0.14	0.33	1	4	5.48	0.15	0.03
3.4 Generar poco ruido	0.125	0.25	0.25	1	1.63	0.04	0.01
Total					37.351	1.00	0.22

ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Tabla 22: Evaluación del peso relativo de la categoría costo

Criterio	Peso relativo Costo			Total	Peso	Peso Relativo
	4.1. Bajo costo de operación	4.2. Bajo costo de equipo	4.3. Bajo costo de mantención			
4.1 Bajo costo de operación	1	4	5	10.00	0.60	0.02
4.2 Bajo costo de equipo	0.25	1	4	5.25	0.31	0.01
4.3 Bajo costo de mantención	0.20	0.25	1	1.45	0.09	0.003
Total				16.70	1.00	0.04

ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Tabla 23: *Lista de objetivos con pesos ponderados*

1. Operación (0.41)	2. Control de Operación (0.34)
1.1. Resistencia a temperaturas (0.18)	2.1. Controlar la temperatura del proceso (0.15)
1.2. Filamento continuo y sin aire (0.13)	2.2. Sistema de calentamiento eléctrico (0.10)
1.3. Permitir enrollar filamento (0.07)	2.3. Extrusora con distintas zonas de calefacción (0.07)
1.4. Fácil de limpiar (0.02)	2.4. Permitir visualizar temperaturas (0.02)
3. Seguridad (0.22)	4. Costo (0.033)
3.1. Incluir un sistema de detención rápida en caso de emergencia (0.13)	4.1. Bajo costo de operación (0.02)
3.2. Seguridad en todo el proceso de operación (0.05)	4.2. Bajo costo de equipo (0.01)
3.3. Materiales de fabricación de alta resistencia al desgaste y corrosión. (0.03)	4.3. Bajo costo de mantención (0.003)
3.4. Generar poco ruido (0.01)	

ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

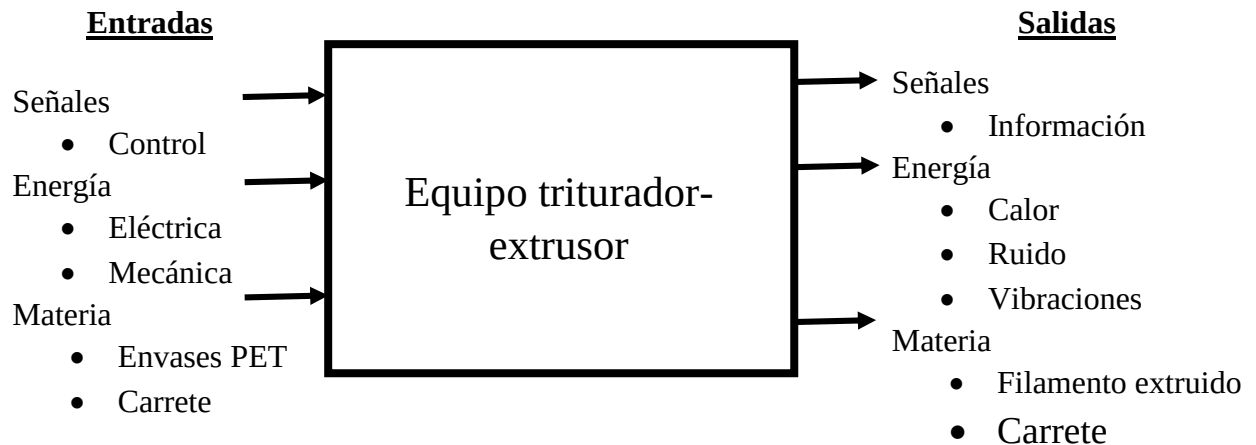
Se indica en la tabla 23 la clasificación de los objetivos a través de la evaluación de pesos ponderados la clase más fundamental de acuerdo con ello la operación es uno de los valores más alto esto se debe a que es oportuno una buena guía del equipo.

El segundo objetivo con mayor valor es el control de operación ya que este es el encargado de procesar la materia prima y asegurar el proceso de extrusión para obtener un óptimo resultado.

4.3. Análisis funcional (Black-Box “Caja negra”)

En esta sección se definirán las funciones que tendrá el producto a diseñar teniendo en consideración las entradas y salidas del sistema Por lo cual se realiza la Black Box la cual representa las funciones totales o parciales de un proceso.

Figura 39: *Caja negra del sistema*



ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

En base a la transformación de magnitudes de entrada de la caja negra del sistema, es necesario fijar procesos técnicos. Para ello tenemos las siguientes fases:

Preparación, ejecución, control y fase final.

- Preparación:

A continuación, se especifican las condiciones iniciales del proceso:

- Energizar controlador
- Energizar los componentes.
- Colocar carrete en la estación de enrollado.
- Encender máquina en general.

- Ejecución:

El proceso a realizar por el equipo triturador-extrusor se describe en la siguiente lista.

- Colocar la pieza en la estación de triturado.
- Triturar los envases plásticos PET
- Dosificar los gránulos triturados de plástico hacia la estación de extrusión.

- Extruir filamentos de plástico PET.
 - Enfriar el filamento extruido.
 - Colocar la parte inicial del filamento en el carrete.
 - Enrollar filamento alrededor del carrete seleccionado.
- Control:

Los procesos de control que el sistema realiza son los siguientes:

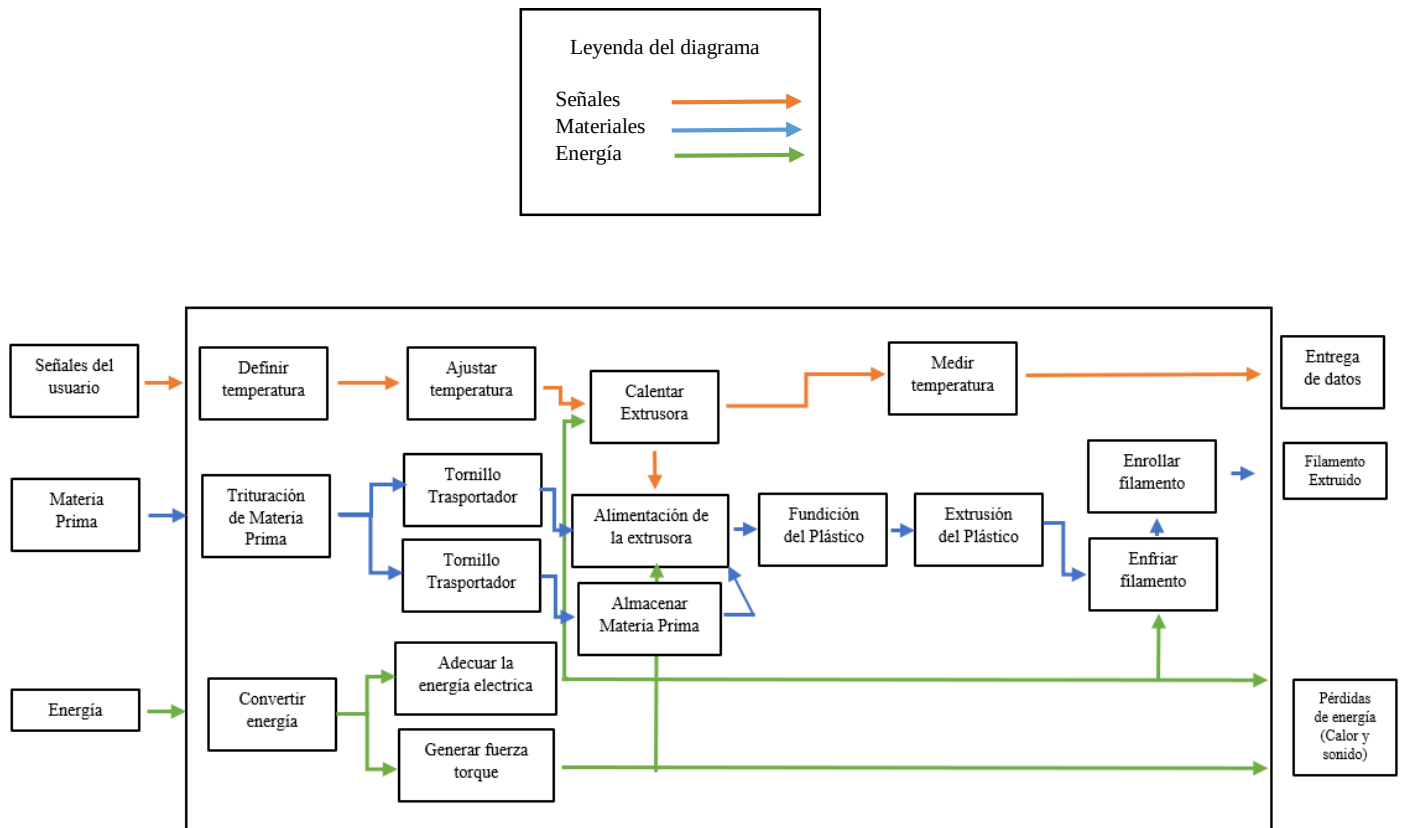
- Verificar el atasco de material a reciclar en la estación de triturado.
 - Censado de la temperatura de la cámara de extrusión de la máquina.
 - Control de la velocidad de extrusión.
 - Control del diámetro del filamento extruido.
 - Control de la velocidad de enrollado del filamento.
- Fase Final:

En la fase final de la máquina se obtendrá el filamento de plástico PET enrollado en un carrete para su uso en la impresión 3D por FDM (Deposición de Material Fundido).

4.3.1. Representación de la estructura de funciones

En la siguiente visualización del proceso se observarán las interrelaciones entre las señales de entrada y salida.

Figura 40: Conexiones de las funciones de los procesos mecánicos, eléctricos y control que realiza el equipo triturador-extrusor.



ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

4.4. Matriz QFD para el análisis del equipo triturador-extrusor

- **Calidad Demandada – Características del consumidor**

1. Resistencia a temperaturas hasta 300 [°C]
2. Filamento continuo y sin aire
3. Permitir enrollar filamento
4. Fácil de limpiar
5. Controlar la temperatura del proceso
6. Sistema de calentamiento eléctrico
7. Extrusora con distintas zonas de calefacción

8. Permitir visualizar temperaturas
9. Incluir un sistema de detención rápida en caso de emergencia
10. Seguridad en todo el proceso de operación
11. Materiales de fabricación de alta resistencia al desgaste y corrosión.
12. Generar poco ruido
13. Bajo costo de operación
14. Bajo costo de equipo
15. Bajo costo de mantención

- **Requerimientos funcionales**

1. Dimensionamiento de la máquina
2. Geometría de la Máquina
3. Costos de Máquina
4. Material de fabricación
5. Número de operadores
6. Tiempo de preparación del equipo
7. Ergonomía
8. Peso
9. Tamaño del pellet
10. Diámetro de extrusión
11. Torque

- **Relación entre los criterios de las características del consumidor con los requerimientos funcionales.**

- | | |
|-------------------------------------|---|
| ➤ Relación fuerte (Valoración: 9) | ● |
| ➤ Relación moderada (Valoración: 3) | ○ |
| ➤ Relación débil (Valoración: 1) | ▽ |

Figura 41: Relación entre criterios

					Column #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
					Direction of Improvement	▼	▼	◇	◇	◇	▼	▲	◇	◇	▼	▲
Row #	Weight Chart	Relative Weight	Customer Importance	Maximum Relationship	Customer Requirements (Explicit and Implicit) / Functional Requirements	Dimensiones de la máquina	Geometría de la Máquina	Costos de Máquina	Material de fabricación	Número de operadores	Tiempo de preparación del equipo	Ergonomía	Peso	Tamaño del Pellet	Diametro de extrusión	Torque
1		10%	4	3	Resistencia a temperaturas hasta 300 [°C]		○	▽	▽		○			○		
2		10%	4	3	Filamento continuo y sin aire			○	▽						▽	
3		7%	3	9	Permitir enrollar filamento	○	○	○							●	
4		5%	2	9	Fácil de limpiar	●	●				○	●				
5		12%	5	9	Controlar la temperatura del proceso			●	○		●				▽	○
6		10%	4	9	Sistema de calentamiento eléctrico			○	●							
7		7%	3	9	Extrusora con distintas zonas de calefacción	●	▽	○								
8		5%	2	9	Permitir visualizar temperaturas		▽	●								
9		10%	4	3	Incluir un sistema de detención rápida en caso de emergencia			○		▽		○				
10		7%	3	3	Seguridad en todo el proceso de operación			○		▽			○			
11		5%	2	9	Materiales de fabricación de alta resistencia al desgaste y corrosión			○	●				▽			
12		2%	1	1	Generar poco ruido											▽
13		5%	2	9	Bajo costo de operación			●								
14		5%	2	9	Bajo costo de equipo			●	●							
15		2%	1	9	Bajo costo de mantención			○	●							

ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

- **Análisis entre características del consumidor con los requerimientos funcionales.**

A partir de la relación de cada uno de los criterios seleccionados y mediante un sistema de cálculo se presentan los valores ponderados para las características de calidad/requerimientos funcionales, obtenemos los siguientes valores:

Figura 42: *Análisis entre consumidor y requerimientos funcionales*

:

	Dimensiones de la máquina	Geometría de la Máquina	Costos de Máquina	Material de fabricación	Número de operadores	Tiempo de preparación del equipo	Ergonomía	Peso	Tamaño del Pellet	Diámetro de extrusión	Torque
Technical Importance Rating	128,6	104,8	416,7	247,6	16,67	150	71	26,19	28,57	85,71	38,1
Relative Weight	10%	8%	32%	19%	1%	11%	5%	2,0%	2%	7%	3%
Weight Chart											

ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Una vez obtenido los resultados, estos se colocan de mayor a menor valor basado en los requerimientos funcionales del producto:

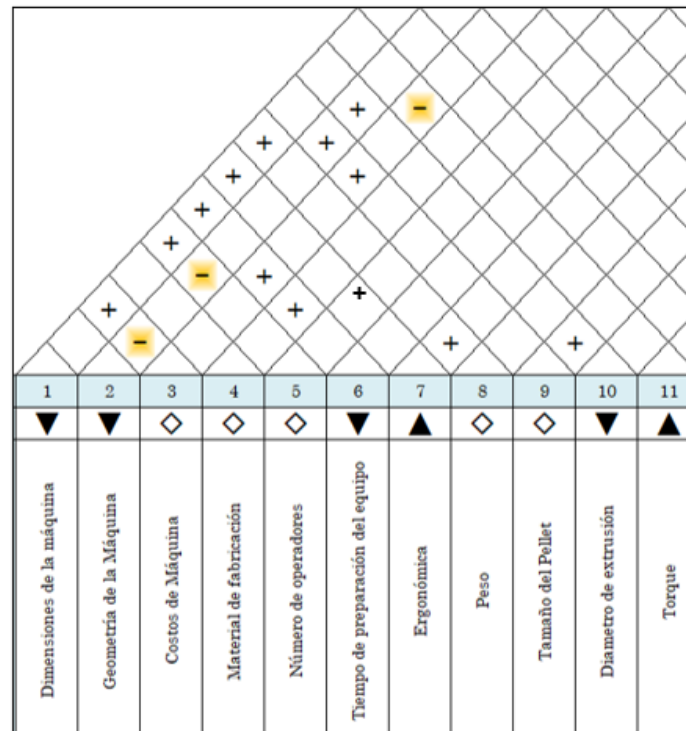
1. Costo de la máquina: 32%
2. Material de fabricación: 19%
3. Tiempo de lavar del equipo (a ser usado) 11%
4. Dimensiones de la máquina 10%
5. Peso: 11.5%
6. Geometría de la máquina: 8%
7. Diámetro de extrusión 7%
8. Ergonomía: 5%
9. Torque 3%
10. Tamaño del pellet 2%
11. Peso 2%

Se puede evidenciar en los resultados obtenidos que se debe tener como prioridad el costo del equipo material de fabricación y tiempo de que demora en prepararse el equipo son los requerimientos que tienen amplias relaciones con las necesidades del cliente Los requerimientos de menor importancia son el tamaño del pellet el torque entre otros.

- **Correlaciones técnicas**

- Relación positiva +
- Relación negativa -
- Ninguna relación

Figura 43: *Correlaciones técnicas*



ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Una columna de correlaciones técnicas con demasiadas relaciones indica que realmente las dimensiones y los costos, confiabilidad o seguridad que siempre deben ser considerados independientemente de su clasificación. Por lo tanto, la característica técnica principal a tener en consideración para la fabricación del equipo triturador-extrusor es el dimensionamiento de la máquina, seguido por los materiales en las que se fabricará y el mecanismo de la máquina.

4.5. Generación de alternativas de diseño del equipo Triturador-extrusor

El estudio y análisis de los criterios ponderados permiten determinar e identificar las ventajas, desventajas y bondades que brinda una propuesta, en base a varios parámetros que se consideran en el diseño de una máquina como son: la facilidad de diseño y manipulación, automática o semiautomática, peso, costos de obtención, tamaño del equipo, facilidad de traslación entre otras, para elegir la mejor opción que satisfaga las necesidades del usuario.

Alternativas de diseño previo a la selección de la mejor opción.

Para elaborar la investigación se han propuesto tres alternativas de diseño que satisfagan las necesidades de los usuarios en la fabricación de filamento.

Por este motivo se plantean los siguientes modelos:

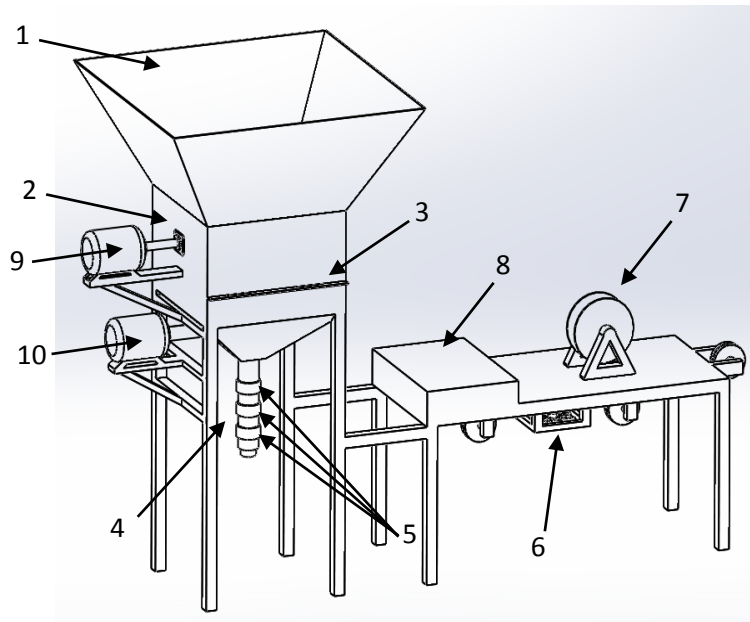
4.5.1. Alternativa “A”

- **Descripción.**

- En la figura número 44 se aprecia la alternativa de construcción “A”. El cual presenta como partes principales: el triturador, el extrusor, las resistencias, tolva de alimentación, filtro, el ventilador, el bobinado y la caja de mando.
- Para obtener el filamento de plástico reciclado de tipo PET, se inserta los envases de plástico previamente limpiados.
- El equipo funciona con un motor que transfiere la fuerza a las cuchillas del triturador, el cual genera pellet, el cual ingresa a la extrusora.

- El equipo tiene como funcionalidad triturar los envases, mediante el filtro evitar que el plástico de gran tamaño ingrese al eje del extrusor, el cual mediante las resistencias calientan el pellet y lo funden, en consecuencia, debido al motor dos hace que el eje dentro de la carcasa extruye el filamento, que pasa por el ventilador para enfriar y posterior proceder a bobinarlo.

Figura 44: Equipo triturador-extrusor vertical



ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

- **Elementos que componen el equipo.**

- | | |
|---------------------------------|-------------------------|
| 1. Tolva de alimentación | 6. Ventilador |
| 2. Triturador | 7. Bobinado |
| 3. Filtro | 8. Caja de mando |
| 4. Extrusor | 9. Motor 1 |
| 5. Resistencias | 10. Motor 2 |

Tabla 24: *Ventajas y desventajas de alternativa “A”*

Ventajas	Desventajas
Semiautomática (su proceso de trituración y extrusión de filamentos ya que solo se coloca los envases y el equipo realiza el triturado y el extruido).	Dificultad del diseño (la adquisición de componentes no se encuentra)
Fácil manipulación	Peso (el equipo por la manera estructural es de peso elevado).
Compacta (debido a que el extrusor se encuentra de manera vertical no ocupa mucho espacio)	Precio (el equipo por sus piezas y estructura es de costo elevado)

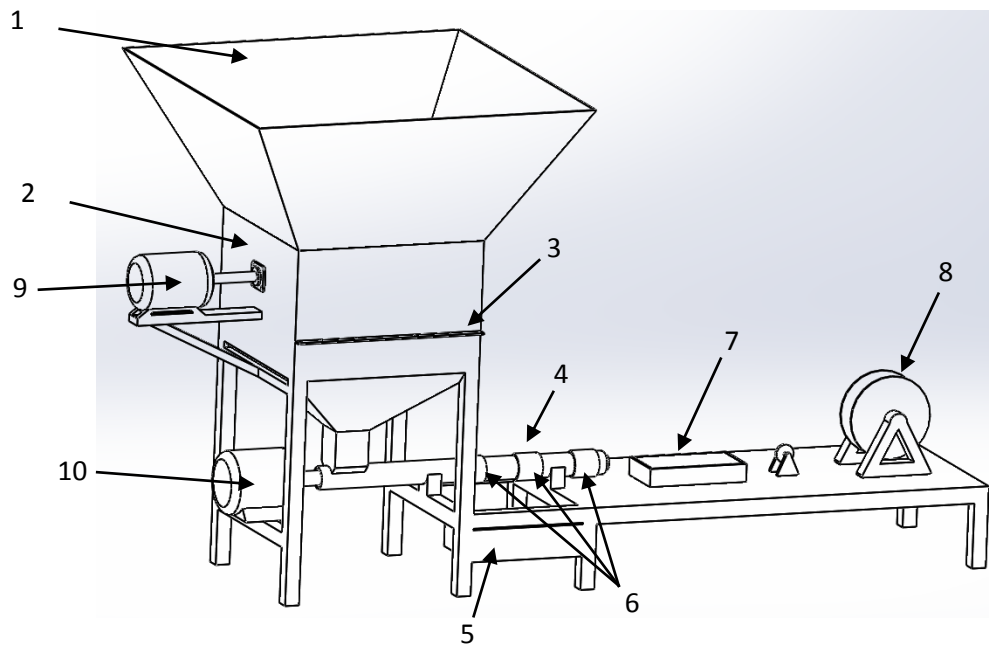
ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

4.5.2. Alternativa “B”

- **Descripción.**

- En el bosquejo de la figura 45, se aprecia su estructura compacta, con un sistema de enfriamiento mediante agua para el filamento extruido. Este equipo cuenta con una tolva alimentación, un triturador, un filtro, una extrusora, resistencias, una caja de mando, un recipiente de agua y el bobinado.
- El funcionamiento de este equipo comienza por alimentar la trituradora con botellas de tipo PET, previamente limpiadas, el tornillo lleva el material extruido hacia la boquilla, que debido a las resistencias funden el material de tipo PET, luego se enfría gracias a el agua que se encuentra en el recipiente, y posterior a aquello se hace el bobinado.

Figura 45: *Equipo triturador-extrusor horizontal*



ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

- **Elementos que componen el equipo.**

- | | |
|--------------------------|------------------------|
| 1. Tolva de alimentación | 7. Recipiente con agua |
| 2. Triturador | 8. Bobinado |
| 3. Filtro | 9. Motor 1 |
| 4. Extrusor | 10. Motor 2 |
| 5. Caja de mando | |
| 6. Resistencias | |

Tabla 25: *Ventajas y desventajas de alternativa “B”*

Ventajas	Desventajas
Tamaño (el equipo por su estructura horizontal tiene un tamaño muy relativo)	Dificultad del diseño (la adquisición de componentes no se encuentra)
Precio (por su estructura compacta tiene un costo bajo)	Peso (el equipo por toda su estructura tiene un peso poco adaptable)
Fácil diseño (el diseño es muy viable)	Sistema de enfriamiento del material extruido
Fácil manipulación	

ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

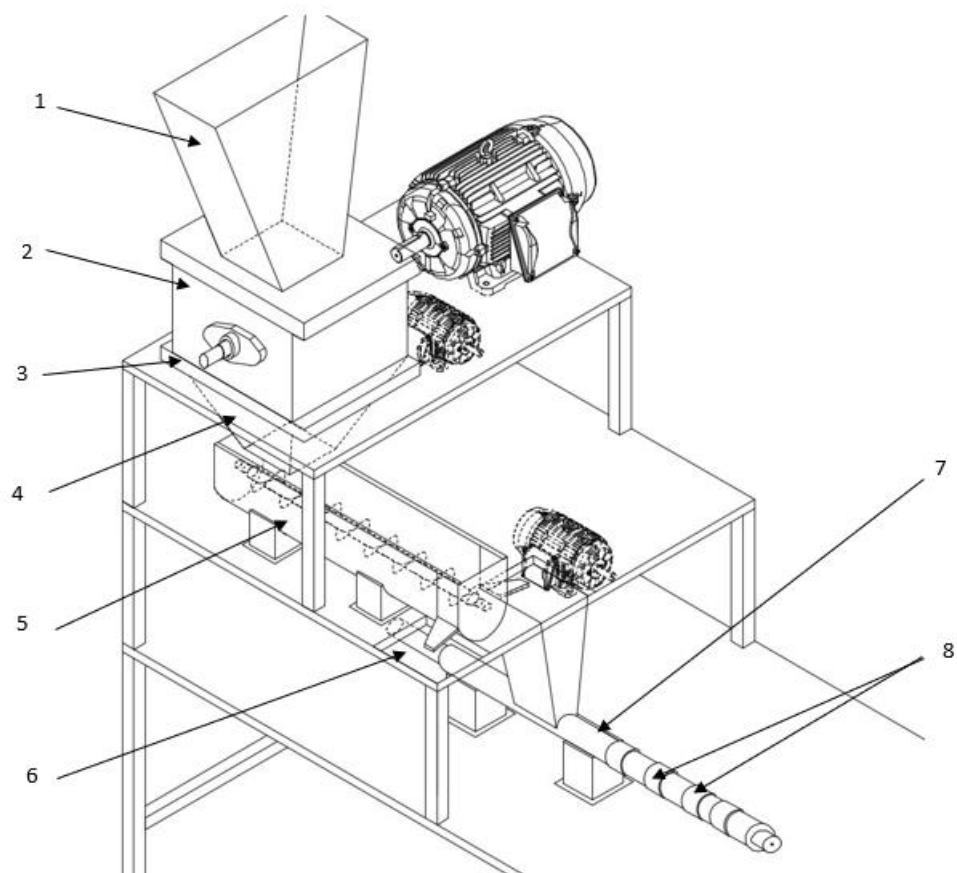
4.5.3. Alternativa “C”

- **Descripción.**

En la figura 46 se aprecia su estructura con diferentes niveles. Este equipo cuenta con una tolva alimentación, un triturador, un filtro, un tornillo transportador, una extrusora, resistencias, una caja de mando.

El funcionamiento de este equipo comienza por alimentar la trituradora con envases de tipo PET, previamente preparadas, una vez triturados pasan al tornillo transportador el cual regula el flujo del material triturado, además permite almacenar el pellet triturado o depositar en la extrusora para generar el hilo plástico el cual luego pasa a ser enrollado.

Figura 46: *Equipo triturador-extrusor horizontal con tornillo transportador*



ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

- **Elementos que componen el equipo.**

1. Tolva de alimentación del triturador
2. Triturador
3. Filtro
4. Tolva de alimentación del tornillo transportador
5. Transportador
6. Almacenamiento
7. Extrusor
8. Resistencias

Tabla 26: *Ventajas y desventajas de alternativa “C”*

Ventajas	Desventajas
Semiautomática (se coloca los envases plásticos y el equipo realiza el triturado y el extruido)	Peso (debido a los componentes del equipo)
Fácil mantenimiento (la actividad del trabajo consiste en insertar los envases luego la máquina realiza el trabajo, bajo la supervisión de un usuario.	Mayor número de componentes
Mayor producción (al tener la opción de poder almacenar el material triturado)	Facilidad de diseño (el mecanismo planteado la mayor parte de componentes no se los consigue en la ferretería)
Ergonomía en la operación	Precio (el equipo al no ser de fácil diseño y al contar con varios elementos su costo es elevado)
Permite almacenar el material triturado	

4.6. Selección de la alternativa

A continuación, se muestra las diferentes alternativas de las cuales se seleccionará una la cual cumplirá mejor los requerimientos.

Debido a ello el criterio de selección será en base a los objetivos de diseño con los cuales se emplea ponderados como técnica para seleccionar Por ello se da una escala de 1 a 5 para poder interpretar siendo 5 Muy bueno y 1 Muy malo para así evaluar cada alternativa

Tabla 27: *Selección de alternativas*

Alternativas								
Objetivo Equipo	Peso Objetivo	Alternativa A		Alternativa B		Alternativa C		
		Puntaje	Peso	Puntaje	Peso	Puntaje	Peso	
Resistencia a temperaturas hasta 300 [°C]	18%	3	0.54	5	0.9	5	0.9	
Filamento continuo y sin aire	13%	3	0.39	4	0.52	5	0.65	
Permitir enrollar filamento	7%	3	0.21	3	0.21	3	0.21	
Fácil de limpiar	2%	1	0.02	5	0.1	3	0.06	
Controlar la temperatura del proceso	15%	3	0.45	4	0.6	4	0.6	
Sistema de calentamiento eléctrico	10%	3	0.3	3	0.3	3	0.3	
Extrusora con distintas zonas de calefacción	7%	1	0.07	3	0.21	4	0.28	
Permitir visualizar temperaturas	2%	4	0.08	4	0.08	4	0.08	
Incluir un sistema de detención	13%	3	0.39	4	0.52	4	0.52	
Seguridad en todo el proceso de operación	5%	3	0.15	4	0.2	4	0.2	
Materiales de fabricación de alta resistencia	3%	4	0.12	4	0.12	4	0.12	
Generar poco ruido	1%	5	0.05	4	0.04	3	0.03	
Bajo costo de operación	2%	4	0.08	4	0.08	3	0.06	
Bajo costo de equipo	1%	4	0.04	5	0.05	3	0.03	
Bajo costo de mantención	0,30%	3	0.009	5	0.015	3	0.009	
		2.899		3.945		4.049		
Elección		3		2		1		

ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Según los resultados obtenidos se puede apreciar que la mejor alternativa es la número 3. Esta alternativa de diseño tiene ventajas debido a su configuración la cual nos brinda una excelente seguridad en el proceso además de ofrecer al operario una buena ergonomía a su vez permite almacenar pellet.

4.7. Diseño detallado.

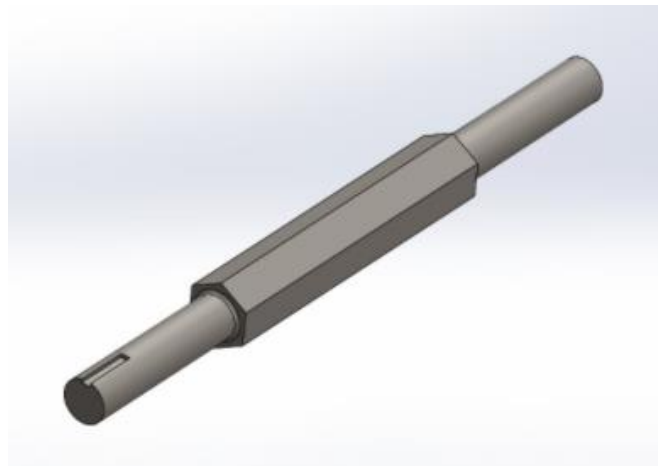
El diseño detallado se realiza de manera integral el proceso de diseño, mecánico, electrónico y computacional requerido.

4.7.1. Sistema de trituración

4.7.1.1. Diseño asistido por paquetes computacionales

Con la ayuda del Software de Ingeniería "SolidWorks" se realizó los diferentes componentes del equipo triturador, a continuación, se muestran los modelos 3D.

Figura 47: *Modelado del eje de trituradora.*



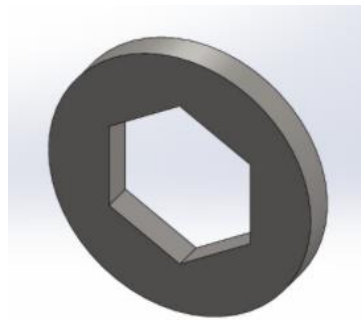
ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

Figura 48: *Cuchillas giratorias 1, 2, 3.*



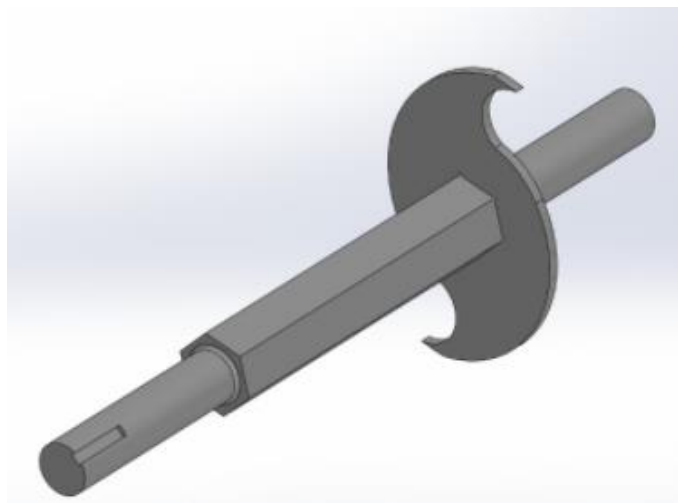
ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

Figura 49: *Separador de cuchillas giratorias.*



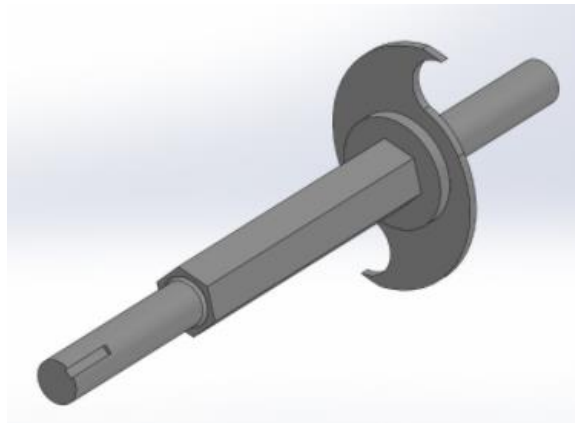
ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

Figura 50: *Ensamble de cuchilla 1 en el eje.*



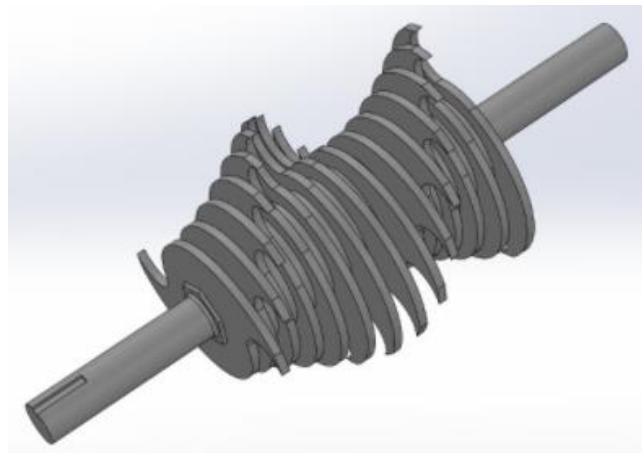
ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

Figura 51: *Ensamble de separador de cuchilla giratoria en el eje.*



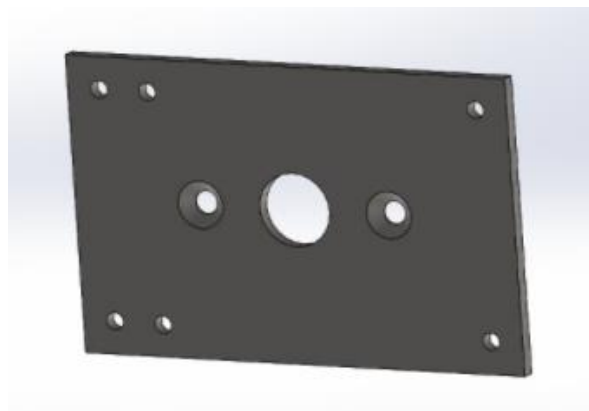
ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

Figura 52: *Ensamble de separadores y cuchillas giratorias*



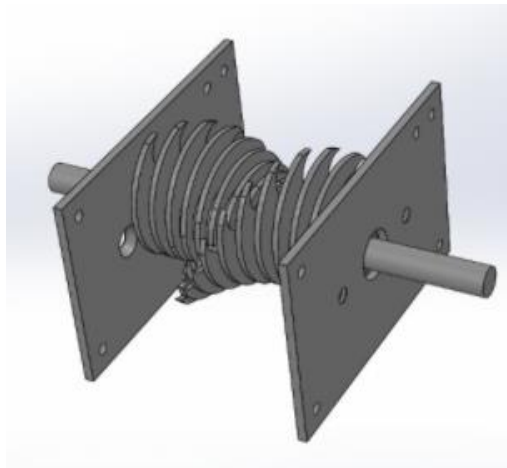
ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

Figura 53: *Tapa laterales de la caja.*



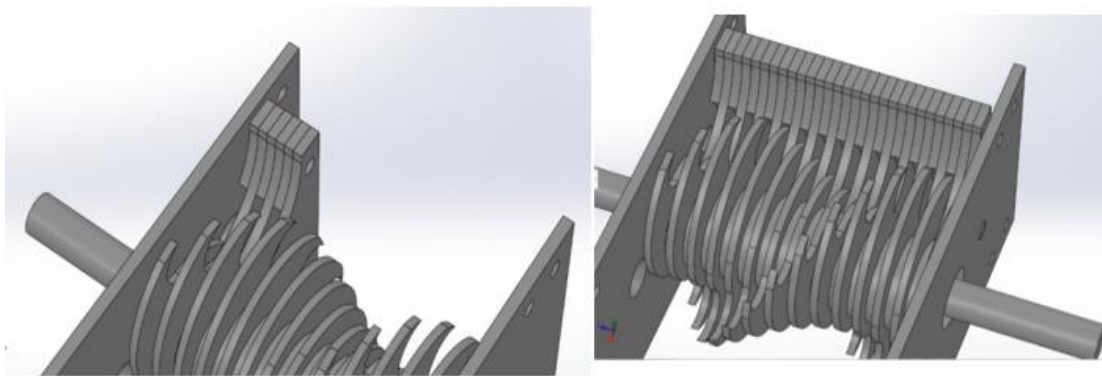
ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

Figura 54: *Ensamble de tapas laterales.*



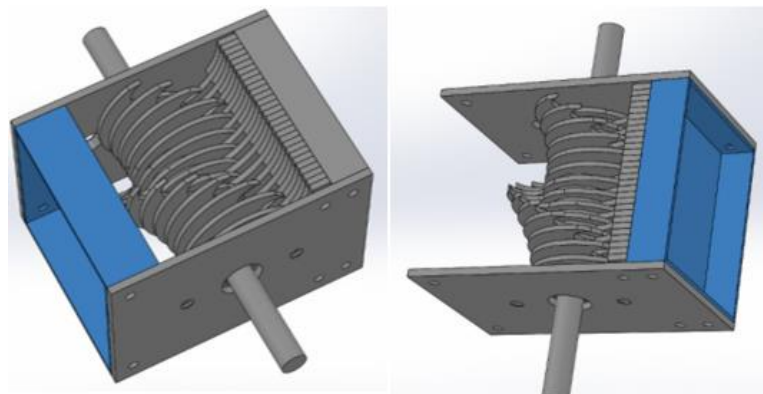
ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

Figura 55: *Ensamble de cuchillas fijas (pequeñas y grandes).*



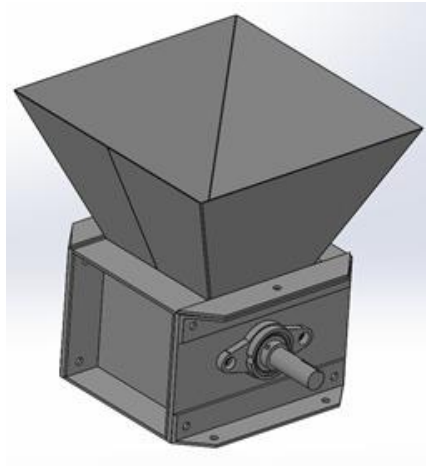
ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

Figura 56: *Ensamble de cajas laterales*



ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

Figura 57: *Ensamble de la trituradora*



ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

- **Cálculo la fuerza que se necesita para romper el PET.**

Usando la Ecuación 3, citada anteriormente se calcula la fuerza de corte para el PET.

Datos:

ep : $1\text{ mm} \approx 0.001\text{ m}$

σ_R : $88,26\text{ MPa}$

γ_a : 10°

$$F_c = 0,5 \cdot \sigma_R \cdot \frac{ep^2}{\tan(\gamma_a)} = 0.5 * 88.26 \cdot 10^6 Pa \cdot \frac{(0.001\text{ m})^2}{\tan(10^\circ)} = 250.3\text{ N}$$

- **Cálculo de la fuerza de impacto.**

Para calcular la fuerza de impacto se usa la siguiente Ecuación 4.

Datos:

t : $50\text{ mm} \approx 0.05\text{ m}$

G_c : 7563 J/m^2

$$F_i = 1.5 \cdot G_c \cdot t = 1.5 * 7563 \frac{\text{J}}{\text{m}^2} * 0.05\text{ m} = 576,2\text{ N}$$

- **Cálculo de la fuerza normal de corte de las cuchillas giratorias**

Para el cálculo de la fuerza normal de corte de las cuchillas se debe calcular en primer lugar el valor del desplazamiento del material y el área del desplazamiento a desfibrar, partiendo por la ecuación 6 y 7, para poder calcular mediante la ecuación 5 la fuerza normal de corte.

Datos:

$$e_{cuchilla}: 1 \text{ mm} \approx 0.001 \text{ m}$$

$$L1: 120 \text{ mm} \approx 0.12 \text{ m}$$

$$h_{holgura}: 0.28 \text{ mm} \approx 0.00028 \text{ m}$$

$$h_{arrastra}: 0.56 \text{ mm} \approx 0.00056 \text{ m}$$

$$E: 3628.46 \text{ MPa}$$

$$\delta 1 = h_{arrastra} - h_{holgura} = 0.00056 \text{ m} - 0.00028 \text{ m} = 0.00028 \text{ m}$$

$$A\delta 1 = L1 \cdot e_{cuchilla} = 0.12 \text{ m} \cdot 0.001 \text{ m} = 0.00012 \text{ m}$$

$$F_N = \frac{(\delta 1 \cdot A\delta 1 \cdot E)}{L1} = \frac{(0.00028 \text{ m} \cdot 0.00012 \cdot 3628.46 \cdot 10^6 \text{ Pa})}{0.12 \text{ m}} = 1015.9 \text{ N}$$

- **Cálculo de la fuerza de arrastre de las cuchillas giratorias**

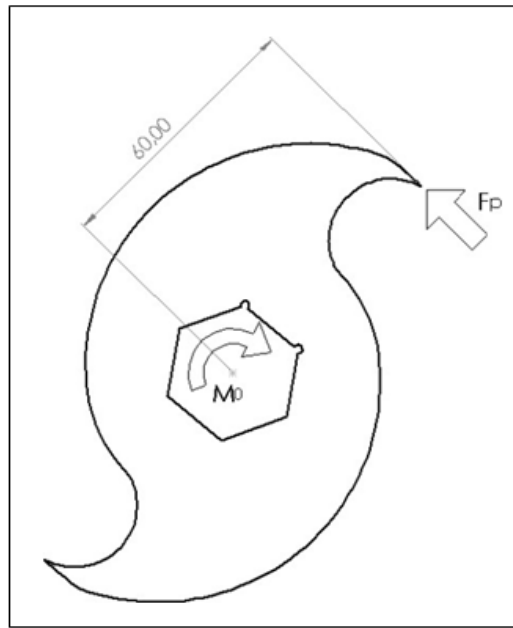
Usando la ecuación 8 citada anteriormente se puede calcular la fuerza de arrastre de las cuchillas móviles o giratorias.

Datos:

$$\mu: 0.2$$

$$F_r = \mu \cdot F_N = 0.2 \cdot 1015.9 \text{ N} = 203.2 \text{ N}$$

Figura 58: Diagrama de fuerza y torque que actúan sobre la cuchilla.



ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

El cual usa una dimensión de cuchillas de 60 mm del centro del eje donde se encuentra el punto de aplicación del torque (M_o) hasta el extremo de la cuchilla (punta), donde se sitúa la fuerza que efectuara los materiales de corte (M_p).

Para la ejecución de los cálculos se escoge el valor del esfuerzo cortante máximo de $\tau_{max} = 25 \text{ MPa}$ presente en la tabla 2, despejando la fuerza de la ecuación 9 se obtiene:

$$F = \tau_{max} \cdot A$$

$$F = (25 \text{ MPa}) \cdot (300 \text{ mm}^2) = 7500 \text{ N}$$

- **Cálculo del momento torsor.**

Usando la ecuación 10 obtenemos el valor del momento torsor que el equipo triturador debe alcanzar.

$$M = (7500 \text{ N}) \cdot (60 \text{ mm}) = 450 \text{ Nm} = 331.9 \text{ lb} - \text{f}$$

Para el funcionamiento de la trituradora se desea una velocidad nominal de 20 a 30 r.p.m. con el fin de que el impacto generado por la fuerza de corte no produzca un momento muy grande donde las partículas producidas salgan.

- **Cálculo de la potencia para seleccionar el motor adecuado para el sistema de trituración**

Para conocer y entender el tipo de motor que se necesita para que cumpla con los parámetros de funcionamiento del sistema de trituración se calcula la potencia del motor mediante la ecuación 11.

Datos:

T: 331.9 lb-f

V: 20 r.p.m.

$$Potencia(hp) = \frac{Torque(libra - pie) \cdot velocidad\ motor\ (r.p.m.)}{5252}$$

$$Potencia(hp) = \frac{331.9lb - f \cdot 20r.p.m.}{5252} = 1.26hp$$

Debido al cálculo previamente realizado de la potencia se obtiene un valor de 1.26 hp que define que el uso de una potencia requerida de 2 hp aproximadamente para poder cumplir con los parámetros de velocidad igual a 20 r.p.m. y un torque igual a 332 lb-f o 450 Nm.

- **Cálculo de la potencia eléctrica.**

Se calcula la potencia eléctrica necesaria para el funcionamiento óptimo del equipo triturador con la ecuación 12.

$$Pot_{eléctrica} = \frac{1.26hp \cdot 1.5}{0.98 \cdot (0.90 \cdot 0.99)} = 2.16\ hp = 1.6\ kW$$

Para un funcionamiento óptimo es preciso usar un motor con una potencia de 1.6 kW que supere el desgaste mecánico producido por la caja reductora y la transmisión por ejes.

Luego de realizar estos cálculos se procede al análisis mediante elementos finitos en un Software de Ingeniería en este caso se usa SolidWorks, con los datos anteriormente mencionados del momento y la fuerza máxima.

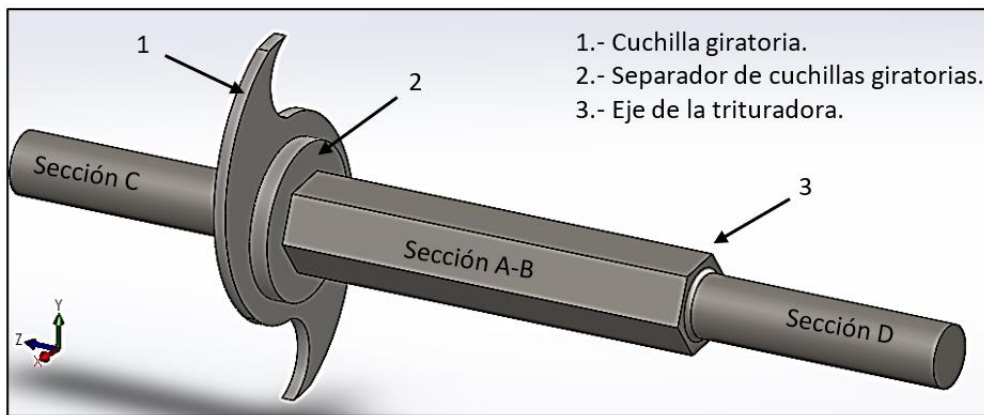
En primer lugar, se realiza un estudio estático para la cuchilla en la cual se aplica una fuerza en la sección cóncava de la punta (la que debe realizar el corte), con el valor de 7500 N, y el torque de 450 Nm que trasmite el motor mediante el eje a la cuchilla.

- **Análisis en eje de la trituradora.**

El eje de transmisión de la trituradora está sujeto a cargas de torsión y flexión, ya que este está sometido a la potencia de transmisión que es generada por el motor y en este eje van las herramientas de corte como lo son las cuchillas giratorias, como se puede apreciar en la Figura 48., en los extremos (Sección A y C) del eje de la trituradora existe una chumacera de cada extremo, y adicional a un solo extremo presenta un piñón que transmite la potencia del motor hacia el eje y debido a esto hace que las cuchillas desfibren el plástico PET.

El eje está compuesto por 3 secciones, definidos en Sección C y D de diámetro 20 mm y un largo de 85 mm cada una y la sección A-B está diseñada con un mecanismo hexagonal (diseñada así por temas de transmisión de la potencia del motor a las cuchillas y que existe una inercia mayor que la de un mecanismo cuadrado), tiene una longitud de 148 mm, en esta sección se encuentran 15 cuchillas giratorias de 4 mm de espesor y 14 espaciadores de 6 mm de espesor, por lo tanto el eje presenta una longitud total de 318 mm.

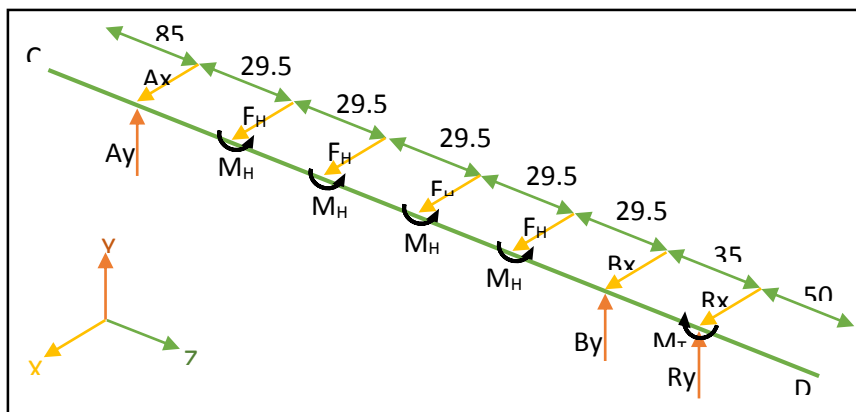
Figura 59. Elementos que componen el eje de la trituradora



ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

Para el análisis se procede a realizar un DCL del eje como se observa en la Figura 60., donde las reacciones de los rodamientos están definidas como A_x, A_y, B_x, B_y .

Figura 60: Diagrama de cuerpo libre del eje de la trituradora



ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

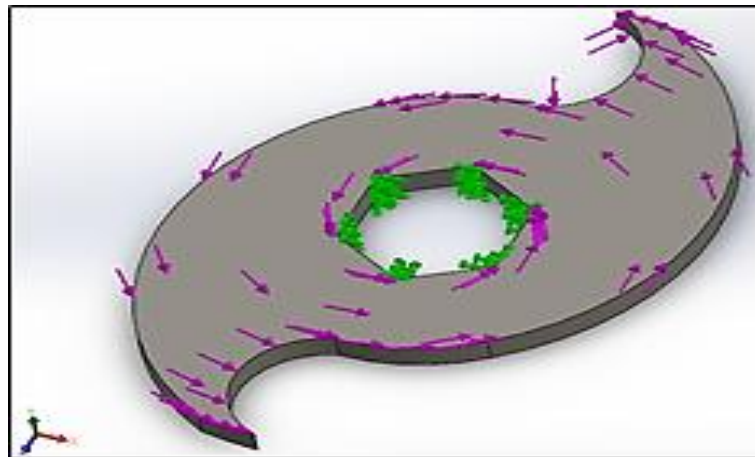
La reacción A_x y A_y se encuentran ubicadas a una distancia de 85 mm desde el punto C hasta D y la reacción B_x y B_y se encuentra ubicada a 85 mm desde el punto D hasta C. A su vez se observa las fuerzas generadas por el piñón ubicadas a 50 mm desde el punto D hasta C y por último tenemos la reacción F_h que representa a la fuerza ejercida por un conjunto de cuatro cuchillas sobre el eje, como también se observa el momento M_h el cual es el momento generado por las cuchillas que cortan el PET.

El término M_t tiene un valor de 450 Nm el cual es el momento torsor que el equipo triturador va a generar.

- **Análisis en las cuchillas giratorias.**

Para un mejor entendimiento de la funcionalidad de estos materiales con propiedades relativamente distintas, se realiza un breve análisis de 2 componentes de la trituradora. En el Software de Ingeniería se procede a realizar el análisis, el primer paso que se ejecuta es definir las partes fijas y cargas externas al componente a analizar, lo cual en la Figura 61 se muestra cómo se aplican las cargas en el componente de la trituradora (cuchilla).

Figura 61: Esquema de cargas en la cuchilla.



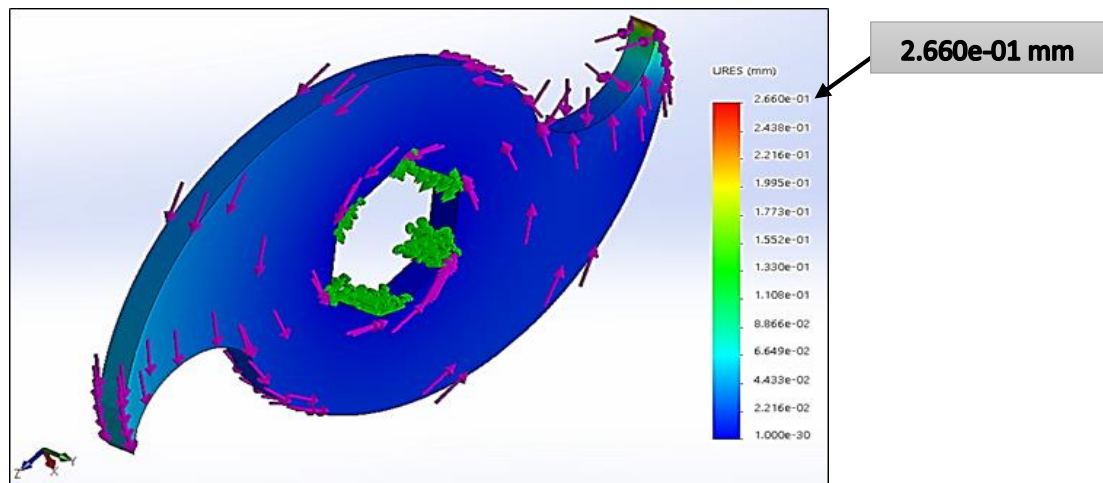
ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

Seguido de seleccionar las cargas correspondientes se designa el material del componente y se ejecuta el estudio.

En este caso los materiales a ser estudiados son seleccionados debido a los costos y la facilidad en su adquisición por ende se usa para el análisis el acero ASTM A36 y el acero AISI 304.

Los resultados en la siguiente Figura 62 se obtienen del análisis realizado previamente designando como material AISI 304 a la cuchilla, y a su vez aplicando las cargas antes mencionadas, lo cual se puede apreciar que es justo en la punta de la cuchilla donde se presenta la mayor deformación con un valor de 0.266 mm.

Figura 62: Resultado de deformación en análisis de esfuerzos en la cuchilla (AISI 304).

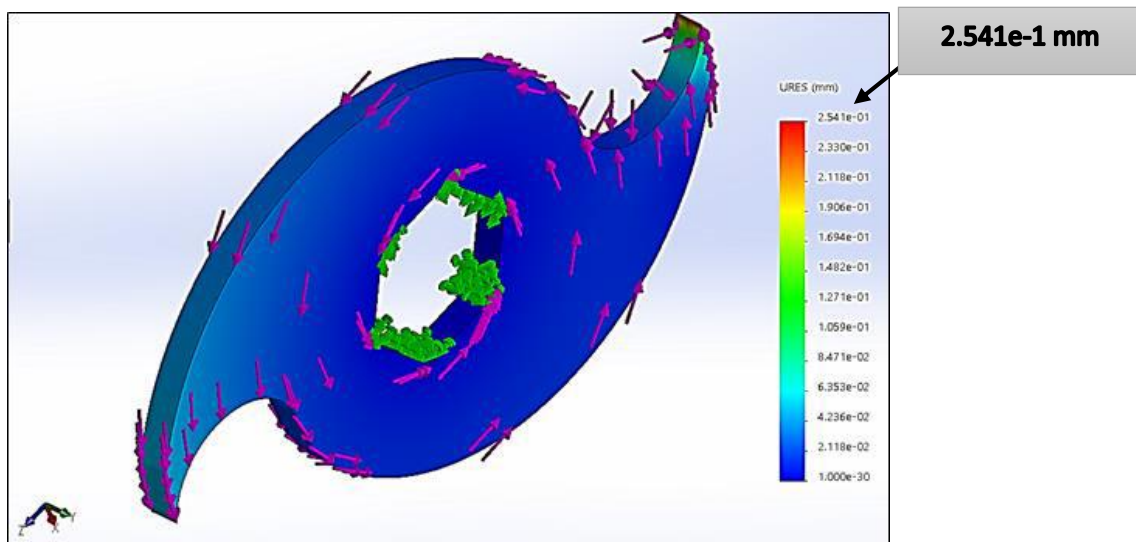


ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

En consecuencia, se realizó un análisis con el material ASTM A36 Acero para tener un entendimiento más claro de la resistencia entre los 2 diferentes materiales.

Y en este resultado se pudo evidenciar que también la mayor deformación se presenta en la punta de la cuchilla con un valor de 0.254 mm presente en la figura 63.

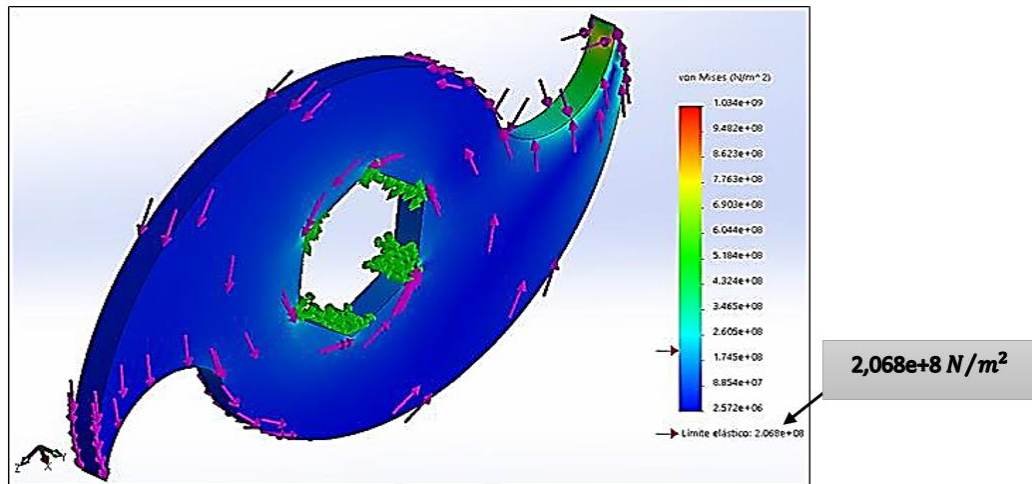
Figura 63: Resultado de deformación en análisis de esfuerzos en la cuchilla (ASTM A36).



ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

En la Figura 64 podemos observar que el límite elástico de la cuchilla con el material de AISI 304, tiene un valor de $2.068 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ esto es tensión de von Mises.

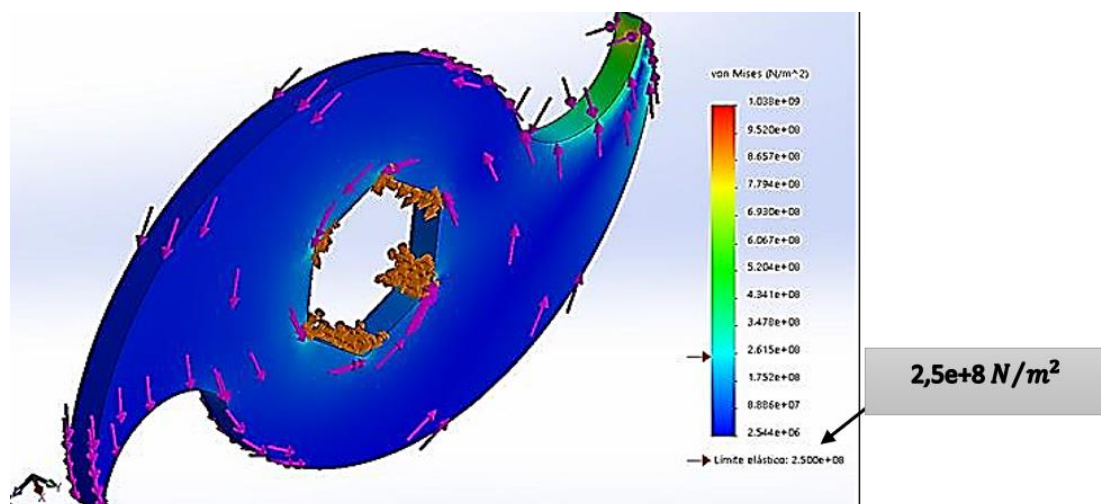
Figura 64: Resultado de la tensión de von Mises en análisis de esfuerzos en la cuchilla (AISI 304).



ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

Por último, observamos en la Figura 65 el límite elástico de la cuchilla tiene un valor de $2.5 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ esto es tensión de von Mises.

Figura 65: Resultado de la tensión de von Mises en análisis de esfuerzos en la cuchilla (ASTM A36 Acero).



ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

A continuación, se detalla en la Tabla 29 con brevedad el análisis de los 2 tipos de materiales, AISI 304 y ASTM A36 Acero, en las cuchillas giratorias, lo cual se puede observar que existe una diferencia relativa de los resultados de la deformación y la tensión de von Mises.

Tabla 28: Resultados del análisis de las cuchillas giratorias

Resultado del análisis de cuchillas Rotatorias		
Material	Deformación [mm]	Tensión (Von mises) [N/m ²]
AISI 304 (acero inox.)	0.266	$2.5 \cdot 10^8$
ASTM A36 (acero negro)	0.254	$2.068 \cdot 10^8$

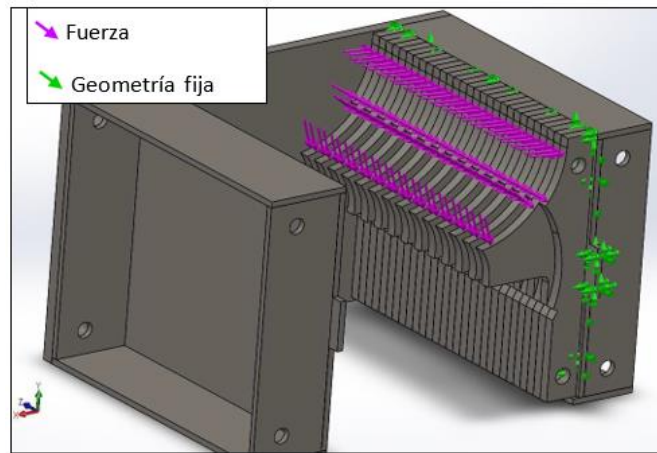
ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

- **Análisis en las cuchillas fijas.**

Una vez realizados los análisis de las cuchillas giratorias con los 2 materiales se continúa haciendo un breve análisis de la estructura del equipo triturador con las cuchillas fijas de la trituradora.

Se debe tomar en cuenta que para este análisis se usa la fuerza neta de 7500 N anteriormente calculada, aunque en la cuchilla fija no afecta el valor neto de la fuerza por que se disipa en las diferentes partes de la trituradora.

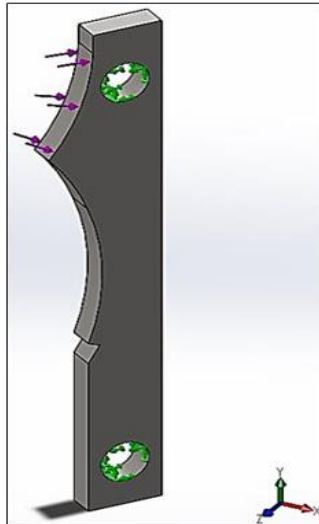
Figura 66: Esquema de cargas en las cuchillas fijas del equipo triturador.



ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

En este análisis se realiza el estudio en las cuchillas fijas pequeñas debido a que son las que en principio de funcionamiento serán las encargadas de desfibrar el plástico PET.

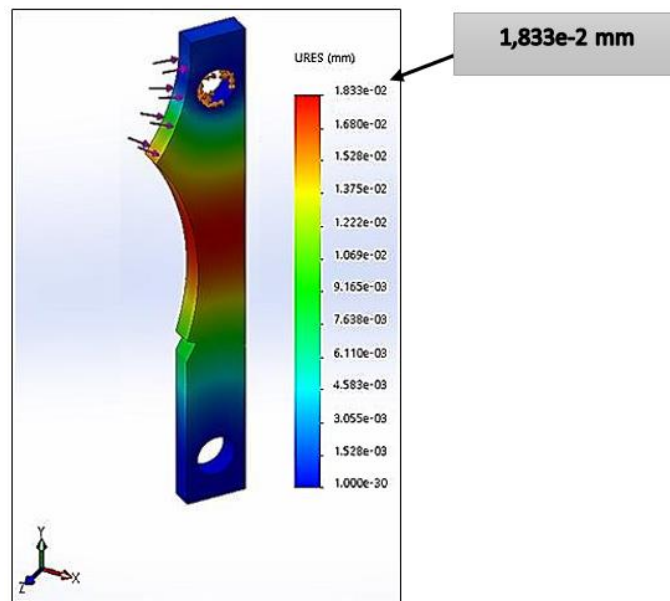
Figura 67: Esquema de cargas en la cuchilla fija pequeña.



ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

El primer análisis de la cuchilla fija pequeña, con el material de AISI 304, se obtiene como resultado una deformación de 0.018 mm como se muestra en la Figura 60, que se aprecia puntualmente que esa deformación se encuentra en la parte media de la cuchilla.

Figura 68: Resultado de deformación en análisis de esfuerzos en la cuchilla fija pequeña (AISI 304).

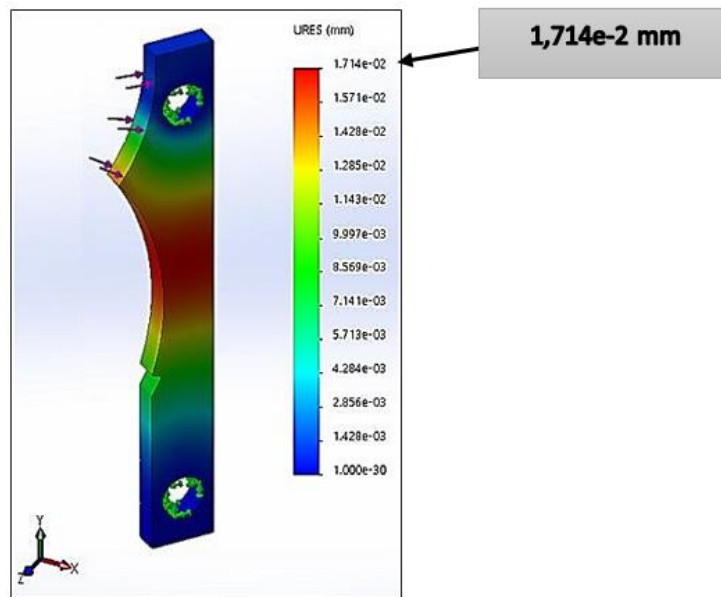


ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

En consecuencia, se procede a realizar un análisis de la cuchilla fija pequeña con un material diferente, es decir, con el Acero ASTM A36, para entender la diferencia de propiedades mecánicas y a su vez considerar costos entre estos dos materiales para la respectiva elaboración del equipo.

El análisis presente en la Figura 61 se aprecia el valor de la deformación de 0.071 mm en la cuchilla fija pequeña con material de Acero A36, un poco más elevado que el valor antes obtenido en el análisis de la cuchilla fija pequeña con el material de AISI 304.

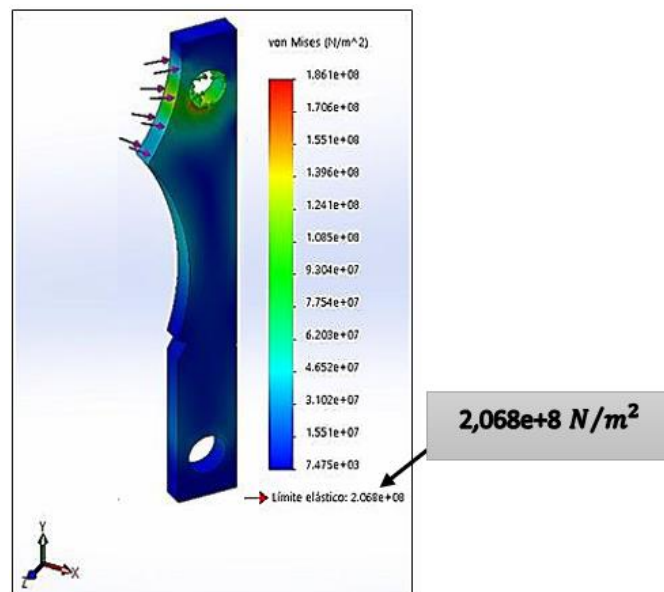
Figura 69: Resultado de deformación en análisis de esfuerzos en la cuchilla fija pequeña (ASTM A36)



ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

La siguiente Figura 70 nos muestra como resultado del análisis, la tensión de von Mises con un valor del límite elástico de $2.068 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$.

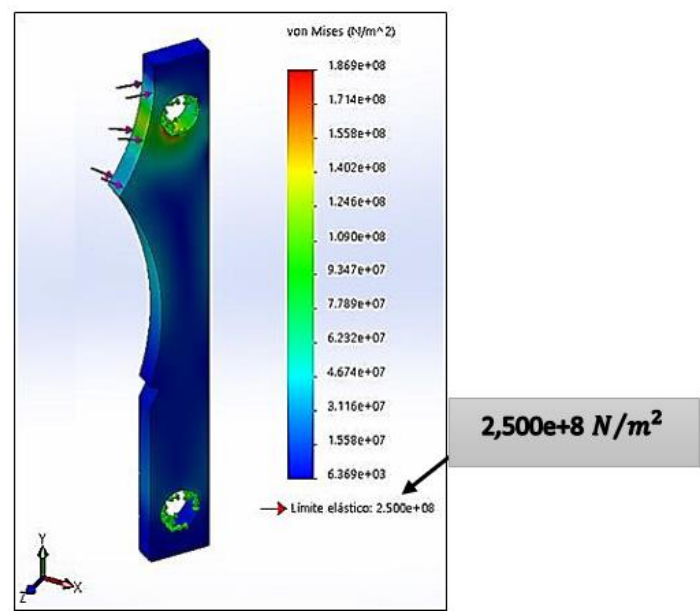
Figura 70: Resultado de la tensión de von Mises en análisis de esfuerzos en la cuchilla fija pequeña (AISI 304).



ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

En el análisis siguiente se obtiene como resultado del límite elástico de $2.5 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ el valor de la tensión de von Mises

Figura 71: Resultado de la tensión de von Mises en análisis de esfuerzos en la cuchilla fija pequeña (ASTM A36).



ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

Tabla 29: Resultado del análisis de las cuchillas fijas pequeñas.

Material	Deformación [mm]	Tensión (von mises) [N/m^2]
AISI 304 (acero inox.)	0.018	$2.068 \cdot 10^8$
ASTM A36 (acero negro)	0.071	$2.5 \cdot 10^8$

ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

En base a los resultados obtenidos de los análisis de los 2 materiales de ambas cuchillas podemos asegurar que no existen diferencia muy relativa con respecto a los valores de tensión, desplazamiento y factor de seguridad, la diferencia estará en la aplicación de estos materiales, debido a que para triturar alimentos es esencial usar el acero de tipo AISI 304 por su alta resistencia a la corrosión, por lo que el acero ASTM A36 se corroe con más facilidad, otra de las diferencias que se debe tener en cuenta son los valores de costos

de los materiales si existe una gran diferencia ya que al tratarse de Acero AISI 304 tiene un costo muy elevado con respecto a el Acero ASTM A36.

Otro punto primordial que el tratarse del acero AISI 304, el costo de producción de los componentes, es también elevado ya que para cortar y darle la geometría de las piezas que forman parte del equipo triturador se necesita herramientas de corte con un alto contenido de carbono y el proceso de manufactura es más elevado, en efecto el Acero ASTM A36 tiene costos relativamente accesibles.

4.7.2. Sistema de transporte

En el desarrollo de la investigación para el traslado del producto se parte de qué tipo de tornillo Sinfín se usará.

Para ello se usará un transportador de paso corto ya que este se caracteriza por tener un flujo constante además de que se utilizan de alimentadores.

Para ello se debe tener en cuenta los siguientes datos:

Datos	
Peso específico del material triturado	0.7 t/m ³
Velocidad de giro del tornillo	Material pesado n=50 r.p.m. Material ligero n<150 r.p.m.
Área de relleno del canalón	$S = \lambda \frac{\pi \cdot D^2}{4}$
Coefficiente de relleno λ	$\lambda = 0.32$
Velocidad del desplazamiento del transportador	$V = \frac{p \cdot n}{60}$
Flujo del material	$Q = 3600 \cdot s \cdot v \cdot \rho \cdot i$
Inclinación del cañón	$I = 0^\circ = 1$

ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Los parámetros para elaborar el tornillo son los siguientes:

$$\text{Diámetro exterior} = \phi_{Ext} = 75mm$$

$$\text{Diámetro interior} = \phi_{Int} = 26.9mm$$

$$\text{Longitud} = L = 600mm$$

$$\text{Paso} = p = 50mm$$

A continuación, se procederá a encontrar el flujo del material:

- Área de relleno del canalón (S)

Coeficiente de relleno λ : 0.32

Diámetro D: 0.1 m

$$S = \lambda \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$S = 0.32 \frac{\pi \cdot 0.075^2}{4} = 0.00142m^2$$

- Velocidad de desplazamiento del transportar (V)

P: paso: 0.05m

N: número de revoluciones: 120 r.p.m.

$$V = \frac{p \cdot n}{60}$$

$$V = \frac{0.05 \cdot 120}{60} = 0.1m/seg$$

- Flujo del material (Q)

Donde:

$$\rho = 700 \frac{kg}{m^3} = 0,7 \frac{t}{m^3}$$

$$i = 1$$

$$Q = 3600 \cdot s \cdot V \cdot \rho \cdot i$$

$$Q = 3600 \cdot 0.00142 \cdot 0.1 \cdot 0.7 \cdot 1$$

$$Q = 0.35 \frac{t}{h} = 5.83 \frac{kg}{min}$$

Cálculos para la fabricación del tornillo de paso medio

Los parámetros para elaborar el tornillo son los siguientes:

$$\text{Diámetro exterior} = \phi Ext = 75mm$$

$$\text{Diámetro interior} = \phi Int = 26.9mm$$

$$\text{Longitud} = L = 600mm$$

$$\text{Paso} = p = 50mm$$

- Distancia de corte “A”

$$A = \frac{\phi Ext - \phi Int}{2}$$

$$A = \frac{75 - 26.9}{2} = 24.05$$

- Longitud de circunferencia exterior “LE o R-U”

$$LE = \sqrt{\phi Ext^2 \cdot \pi^2 + p^2}$$

$$LE = \sqrt{75^2 \cdot \pi^2 + 50^2} = 240.86$$

- Longitud de circunferencia interior “LI o R-E”

$$LI = \sqrt{\phi Int^2 \cdot \pi^2 + p^2}$$

$$LI = \sqrt{26.9^2 \cdot \pi^2 + 50^2} = 90.19$$

- Radio de corte interior

$$r = \frac{A \cdot LI}{LE - LI}$$

$$r = \frac{24.05 \cdot 98.19}{240.86 - 98.19} = 16.55$$

- Radio de corte exterior

$$R = r + A$$

$$R = 16.55 + 24.05 = 40.6$$

- DELTA

$$\Delta = 2 \cdot R \cdot \pi$$

$$\Delta = 2 \cdot 40.6 \cdot \pi = 255.09 \approx 255$$

- BETA

$$\beta = \frac{LE \cdot 360}{\Delta}$$

$$\beta = \frac{240.86 \cdot 360}{255} = 340.03$$

- Ángulo de corte (x)

$$x = 360^\circ - \beta$$

$$x = 360^\circ - 340.33 = 19.97^\circ$$

- Distancia del vértice L

$$L = \Delta - LE$$

$$L = 255 - 240.86 = 14.14 \text{ mm}$$

4.7.2.1. Diseño asistido por paquetes computacionales

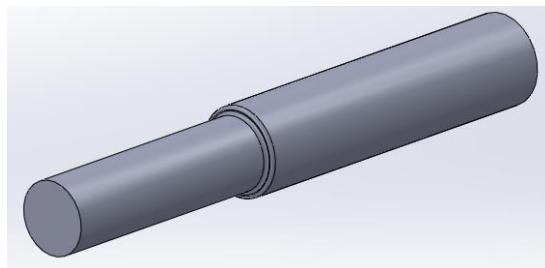
Para realizar los diferentes elementos que componen al transportador, se usó el paquete computacional SolidWorks. A continuación, se presenta el modelo 3D de los elementos:

Transportador

Para poder ensamblar de una manera correcta los diferentes componentes vinculados al transportador se deben de tener en cuenta el siguiente orden de las figuras y detalles

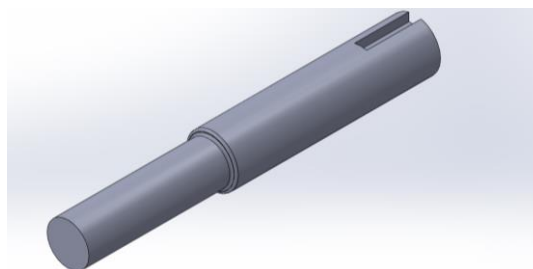
- **Tornillo transportador**

Figura 72: *Eje*



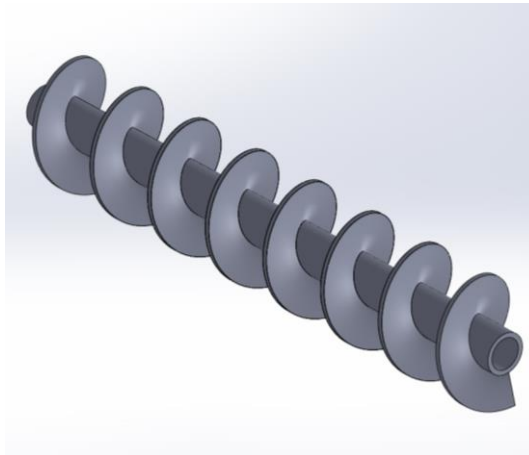
ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Figura 73: *Eje motriz*



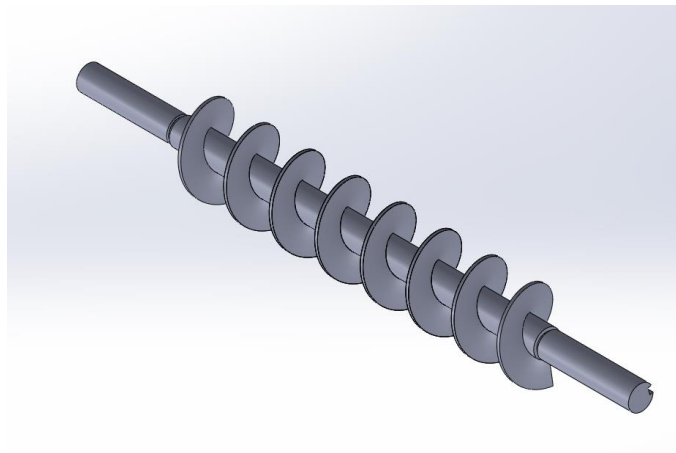
ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Figura 74: *Tornillo transportador*



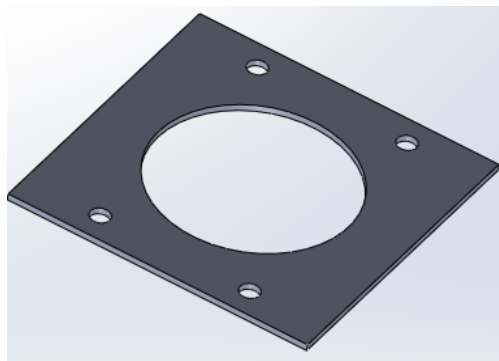
ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Figura 75: *Unión de eje con tornillo transportador*



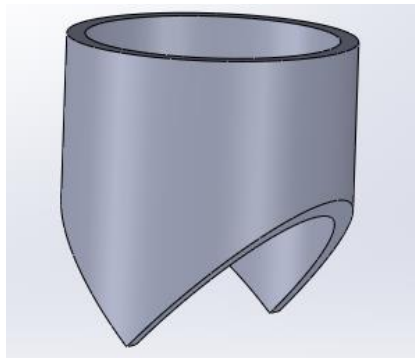
- **Carcasa de Tornillo transportador**

Figura 76: *Acople de tubos de salida y, de entrada*



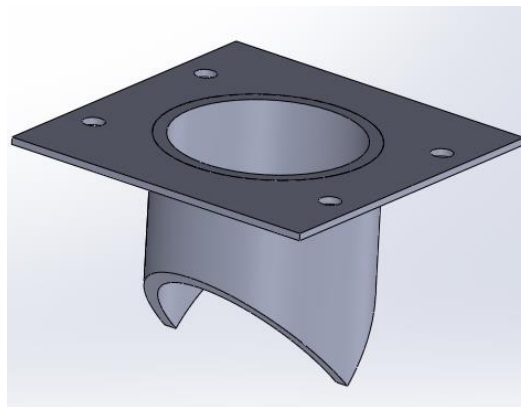
ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Figura 77: *Tubo de ingreso de transportador*



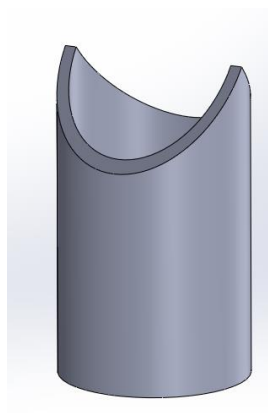
ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Figura 78: *Unión de tubo de ingreso con acople de tubo*



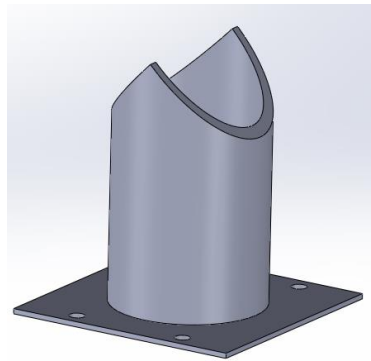
ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Figura 79: *Tubo de salida del transportador*



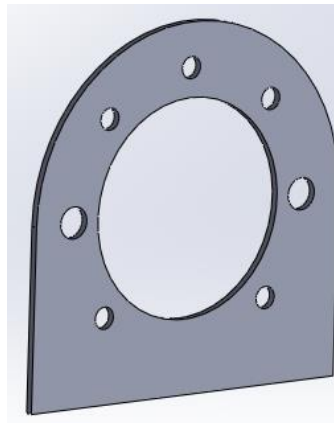
ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Figura 80: *Unión de tubo de salida con acople de tubo*



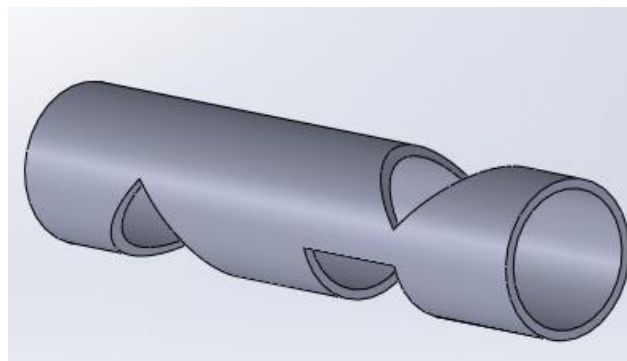
ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Figura 81: *Unión base*



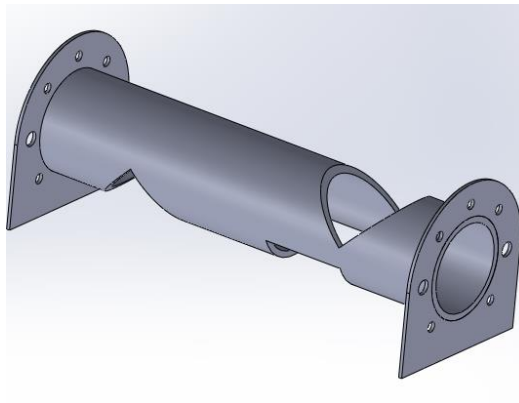
ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Figura 82: *Cuerpo del tornillo*



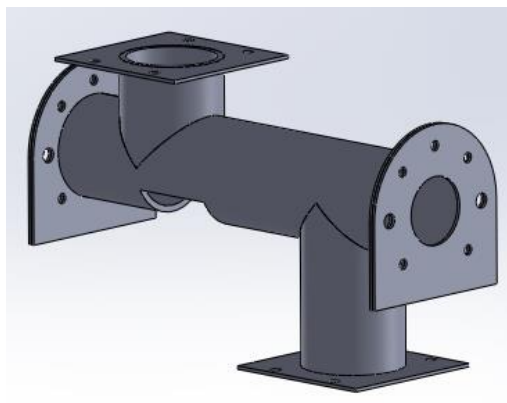
ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Figura 83: *Acople entre unión base y cuerpo del tornillo*



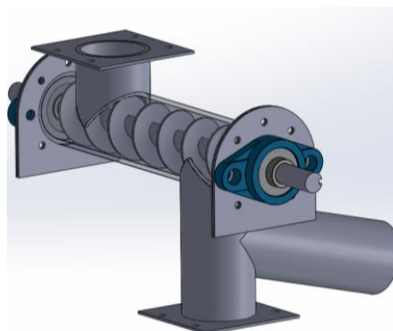
ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Figura 84: *Carcasa del tornillo transportador*



ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Figura 85: *Ensamble del transportador*

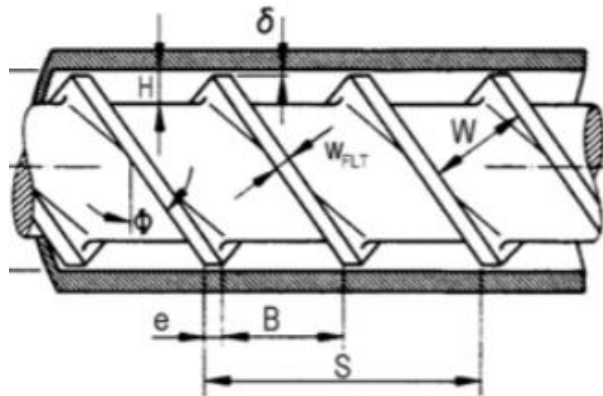


ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

La chumaceras usadas son de la serie UCFL 300 este tipo de chumaceras son usadas normalmente en la industria para trabajar con cargas pesadas, en el equipo triturador extrusor se usó las chumaceras UCFL 305 cuyo índice de carga es de 10.9kN (2450lb) además de tener un tamaño de 150mm de longitud estas se acomodaban a la necesidades de nuestro equipo las característica de esta chumacera se pueden apreciar en el anexo 4, además se tomó en cuenta que las reacciones que se generan en el cuerpo mientras gira pasan como una reacción hacia las chumaceras, cabe recalcar que las cargas axiales son mínimas por lo tanto se pueden despreciar.

4.7.3. Sistema de extrusión

En el desarrollo del proyecto se debe considerar que el dispositivo trabaje a temperatura de extrusión teórica de los envases reciclado de tipo PET a 245°C, para esta propuesta apoyada en los siguientes requerimientos como baja producción y limitación de espacio se seleccionó una relación corta se usará un husillo de paso y diámetro constante debido a la función que realizará la cual es arrastrara material con el fin de reducir costos de fabricación



Donde:

D: Diámetro del tornillo (mm)

“S” o “t”: Paso del husillo (mm)

e: Anchura de la cresta del filete

ϕ : Ángulo del filete del tornillo con la vertical (°)

W: Espesor del canal (mm)

W_{FLT} : Espesor de filete

H: Profundidad del canal (mm)

δ : Holgura (mm)

N: Revoluciones por minuto (r.p.m.).

- **Parámetros iniciales del husillo**

Para determinar los parámetros se tomará un valor aproximado el cual será de guía para los diferentes elementos del equipo. Se estima una capacidad de alimentación de 1.5 kg/h como referencia a una boquilla de impresora 3D.

- Capacidad en libras por hora

$$\text{Producción} = 2.2 \text{ lb/h}$$

- Capacidad en kilogramos por segundo

$$\text{Producción} = 0.00055 \text{ kg/seg}$$

Para poder realizar los principales parámetros del husillo o tornillo extrusor se debe tener en cuenta el tamaño del pellet el cual tiene un promedio de 125 mm³, para poder transportar el material triturado “pellet” la altura del filete y el paso del husillo debe permitir ingresar dicho material para que avance sin problemas el husillo solo funciona como transportador el cual arrastrará el material debido al incremento de temperatura en el material debido a la resistencia eléctrica el polímero avanzara por aplastamiento.

- **Longitud total del husillo**

Para la longitud total se pretende que sea de 0.43 m, en esta dimensión se considera el vástago donde ira los soportes y la transmisión de movimiento.

$$L = 430 \text{ mm} = 0.43 \text{ m}$$

- **Longitud de trabajo del husillo**

$$L = 0.65(430)$$

$$L = 300 \text{ mm} = 0.30 \text{ m}$$

- **Longitud de eje del husillo**

$$L_e = 130 \text{ mm} = 0.13 \text{ m}$$

- **Diámetro del husillo**

Normalmente los diámetros de los cilindros se encuentran en su gran mayoría de 20mm en la industria normalmente en equipos de laboratorios que son utilizados para grandes producciones estos cilindros son de 300mm por ello se pretende tomar un husillo de 22.23mm “7/8 pulg” de diámetro a su vez se realizará un husillo con un paso invariable ya que se requiere una extrusora lo más compacta posible, a su vez reduciendo costos de fabricación.

$$D = 22.23 \text{ mm} = 0.022 \text{ m}$$

- **Número de hélices o filetes del husillo**

El número de filetes es determinado por la relación L/D en la Ecuación 5

$$\text{número de filetes} = \frac{300}{22.2}$$

$$\text{número de filetes} = 13.63 \cong 14$$

- **Paso del husillo**

$$t = 1 (22.2)$$

$$t = 22.2 \text{ mm} = 0.022 \text{ m}$$

- **Ancho del canal del husillo (w o “e”)**

Se pretende tener el espacio para 3 partículas de material triturado de PET por cada paso o giro del husillo.

$$\text{Ancho del canal} = 20 \text{ mm} = 0.02 \text{ m}$$

- **Cálculo del ancho del filete W_{ft} “e”**

$$e = 0.1 \cdot 22.2 = 2.2 \text{ mm}$$

- **Profundidad del canal (H)**

La altura promedio del pellet es 3 mm por lo tanto la profundidad del canal debe ser mayor para garantizar que las partículas no se atasquen en el husillo.

$$\text{Profundidad} = 6 \text{ mm} = 0.006 \text{ m}$$

- **Diámetro del alma**

$$d = 0.6 \cdot 0.022$$

$$d = 13.2 \text{ mm} = 0.0132 \text{ m}$$

- **Ángulo de la hélice**

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{0.022}{\pi \cdot 0.022}$$

$$\varphi = 17.65^\circ \cong 18^\circ$$

- **Cálculo hipotético de zona las 3 distintas zonas a lo largo del husillo.**

Se determina que la longitud de la zona de alimentación es la mitad de la longitud del tornillo, la de compresión y dosificación son la cuarta parte de cada uno. Por lo tanto, se obtiene:

- Longitud total de trabajo del husillo

$$L = 300\text{mm}$$

- Longitud de zona de alimentación

$$L_a = 150\text{mm}$$

- Longitud de zona de transición

$$L_T = 75\text{mm}$$

- Longitud de zona de dosificación

$$L_D = 75\text{mm}$$

- **Holgura del husillo/ cilindro**

$$\delta = 0,003 \cdot 22.2$$

$$\delta = 0.06 \text{ mm}$$

Producción del husillo “Análisis de flujos presentes en la extrusora”

$$Q = \frac{\alpha \cdot K}{k + \beta + \gamma} \cdot N$$

- **Cálculo del flujo de arrastre.**

$$\alpha = \frac{\pi \cdot 1 \cdot 22.2 \cdot 8 \left(\frac{2.22}{1} - e \right) \cos^2 18}{2}$$

$$\alpha = 5046 \text{ mm}^3$$

- **Cálculo del flujo de presión**

$$\beta = \frac{1 \cdot 8^3 \left(\frac{22.2}{1} - 2.22 \right) \sin 18 \cos 18}{12(300)}$$

$$\beta = 0.835 \text{ mm}^3$$

- **Cálculo del flujo de filtración**

$$\gamma = \frac{\pi^2 \cdot 22.2^2 \cdot 0.06 \cdot \tan 18}{10 \cdot 2.2 \cdot 300}$$

$$\gamma = 5.17 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3$$

Generalmente el volumen unitario solo se usa para comprobar la pérdida de volumen en los filos y también comprobar el desgaste en ellos.

- **Forma geométrica del cabezal**

Se requiere una salida de 1.75 mm

- **Canal Cónico**

$$k1 = \frac{3 \cdot \pi \cdot 22.2^3 1.75^3}{128 \cdot 10 \cdot (22.2^2 + 22.2 \cdot 1.75 + 1.75^2)}$$

$$k1 = 0.80 \text{ mm}^3$$

- **Canal Cilíndrico**

$$k2 = \frac{\pi \cdot 1.75^4}{128 \cdot 10}$$

$$k2 = 0.023 \text{ mm}^3$$

- **La constante común del cabezal**

$$K = \frac{1}{\frac{1}{0.80} + \frac{1}{0.023}} = 0.223 \text{ mm}^3$$

- **Producción del husillo**

Se sabe que la densidad del PET es de 1.455 g/cm³ 0.0000001455 kg/mm³

Al reemplazar los parámetros conocidos en la ecuación 8 se obtendrá

$$Q = \left(\frac{\alpha \cdot K}{K + \beta + \gamma} \right) \cdot N \cdot \rho$$

PLÁSTICO PET - BOQUILLA DE 1.75 (mm)

r.p.m.	Flujo Volumétrico kg/h
10	0.11
15	0.17
20	0.23
25	0.28

ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Debido a la reducción de la salida, se seleccionará 20 r.p.m. o 25 r.p.m. ya que estos valores se aproximan a los requerimientos de 0.25 kg/h

- **Potencia Requerida**

$$N = \left(\frac{\pi^3 \cdot 0.022^3 \cdot 20_{rev}^2}{0.008} \right) \cdot 0.300 \cdot 2100 + \frac{(5046 \cdot 10^{-9}) \cdot 13342665}{\cos^2 18} \\ + \left(\frac{\pi^2 \cdot 0.022^2 \cdot 20^2 \cdot 0.0022}{0.00006 \cdot \tan 18} \right) \cdot 0.300 \cdot 2100 \\ N = 33.11W$$

- **Presión máxima en el husillo**

$$P_{\text{Max}} = \frac{6 \cdot \pi \cdot 0.022 \cdot 0.30 \cdot \frac{20}{60} \cdot 1400}{0.008^2 \tan 18}$$

$$P_{\text{Max}} = 11.50 \text{ Mpa}$$

Cálculo de fuerzas en el husillo

- **Momento Torsor**

$$M_t = 9550 \cdot \frac{0.03311}{20}$$

$$M_t = 15 \text{ Nm}$$

- **Sección transversal**

$$S = \pi \cdot \frac{0.022^2(1 - 0.9^2)}{4}$$

$$S = 0.000722 \text{ m}^2$$

- **Cálculo de fuerza axial que se ejerce sobre el Husillo**

$$F = 0.000722 \cdot 1500$$

$$F = 1.083 \text{ KN}$$

- **Cálculo del momento polar de inercia.**

$$W_p = \frac{\pi \cdot 0.022^3}{16} (1 - 0.9^4)$$

$$W_p = 1.37 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

- **Cálculo del esfuerzo de corte sobre la superficie del husillo**

$$\tau = \frac{15}{1.37 \cdot 10^{-6}}$$

$$\tau = 10.94 \text{ MPa}$$

- **Momento de inercia respecto al eje neutro:**

$$W_o = \frac{\pi \cdot 0.022^3}{32} (1 - 0.9^4)$$

$$W_o = 3.59 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$$

- **Momento flector máximo**

El material elegido para el husillo es el acero AISI 4140.

$$M_f = \frac{7850 \cdot 0.30^2}{2} \cdot \frac{\pi \cdot 0.022^2}{4} (1 - 0.9^3) \cdot 9.81$$

$$M_f = 0.62 \text{ Nm}$$

- **Tensiones normales en el husillo**

$$\sigma = \frac{1083}{0.0000722} + \frac{0.62}{3.59 \cdot 10^{-7}}$$

$$\sigma = 16.72 \text{ MPa}$$

- **Cálculo de tensión resultante**

$$\sigma_r = \sqrt{16.72^2 + 4 + 10.94^2}$$

$$\sigma_r = 23.99 \text{ MPa}$$

Con el valor obtenido del esfuerzo equivalente se observa que el husillo es idóneo para conllevar dicha tensión. Se conoce el esfuerzo admisible del acero AISI 4140 es de 415 [MPa].

$$\sigma_r = 23.9 \text{ MPa} < \sigma_{adm} = 415 \text{ MPa}$$

- **Selección de material**

El husillo es la parte fundamental de la extrusora, debido a que este transporta el material, el cual contribuye al calentamiento del polímero, a su vez provoca una homogeneización de dicho polímero.

Normalmente los desgastes que sufre el husillo son los abrasivos y corrosivos, por ello el husillo debe poseer una alta dureza y resistencia a la corrosión para evitar su desgaste.

Para seleccionar el material del husillo se basó en diferentes parámetros como son:

- Temperaturas de trabajo
- Disponibilidad y maquinabilidad
- Resistencia a la torsión

- **Parámetros del husillo**

HUSILLO DE EXTRUSORA

Descripción	Valor
Diámetro	22.23 mm
Diámetro del alma	13.2 mm
Longitud total	430 mm
Longitud de trabajo	300 mm
Longitud del vástago	130 mm
N° de canales	1
N° de filetes	14
Paso	22 mm
Ancho del filete	2.2 mm
Profundidad del canal	6mm

ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Parámetros iniciales para el diseño del cilindro

- **Diámetro interior del cilindro**

$$D_i = 22.23 + 2 \cdot 0.06$$

$$D_i = 22.35 \text{ mm}$$

Se debe tener qué en cuenta que la camisa de la extrusora debe abarcar toda la zona del husillo por lo cual el largo mínimo debe de ser de 300mm

- **Espesor mínimo que debe tener el cilindro**

La camisa de la extrusora debe tener un espesor mínimo debido a que debe de soportar presiones por lo cual se optó por el acero AISI 316 cuyo esfuerzo admisible es de 205 MPa.

$$e_{min} = \frac{15.50 \cdot 11.17}{205}$$

$$e_{min} = 0.844 \text{ mm}$$

- **Selección de material**

El cuerpo de la extrusora es el componente que recibe calor a través de las resistencias eléctricas y este transmite hacia el interior en donde se encuentra el plástico a su vez es el encargado de resistir las presiones que se genera en su interior también debe de resistir las temperaturas de trabajo, resistentes al desgaste. Para poder seleccionar el material se tuvo en cuenta los siguientes parámetros

- Temperaturas de operación
- Disponibilidad y obtención
- Resistente al deterioro
- Precio

Debido a todos esos parámetros se optó por un acero AISI 306 el cual ofrece las consideraciones anteriores, aunque se puede usar un acero que presente mejor resistencia a la corrosión como un AISI 316.

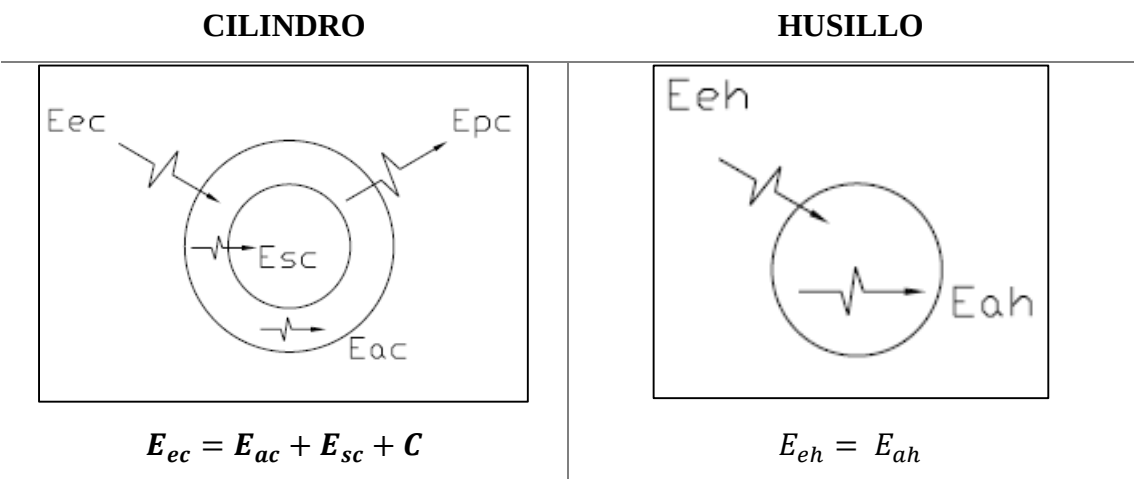
Se eligió el AISI 306 debido a su facilidad de adquisición, tiene una buena maquinabilidad, además de presentar un bajo costo.

4.7.3.1. Sistema de calefacción

Los generadores de calor seleccionados son resistencias eléctricas las cuales son diseñadas para resistir trabajar en un rango de temperaturas las cuales son óptimas para el procesamiento del PET Las resistencias eléctricas se ubican a lo largo del cuerpo de la extrusora para poder tener un control de temperatura se usa una termocupla y un PID El cuerpo de la extrusora y el husillo están a temperatura ambiente luego de encender el circuito las resistencias comienzan a entregar calor y este se va almacenando y la temperatura se elevando

- **Balance energético**

Tabla 30: Estado transitorio



ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Potencia de las bandas calefactoras

Datos:

Temperatura de la superficie del calentador $T_s = 260^\circ C$

Temperatura ambiente $T_\infty = 20^\circ C$

Temperatura media de película $T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} = 140^\circ C$

- Propiedades del aire a $140^\circ C$

$$T_f = 140 + 273^\circ K$$

$$T_f = 413^\circ K$$

- Coeficiente volumétrico de expansión térmica

$$\beta = \frac{1}{T_f}$$

$$\beta = \frac{1}{413} = 2.421 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ K^{-1}$$

- Propiedades Térmicas del aire a $413^\circ K$
 - Número de Prandtl @ $413^\circ K$ ver en Anexo_2

Interpolando se obtiene:

$$Pr = 0.6889$$

- Viscosidad cinemática

$$\gamma = 2.796 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

- Conductividad térmica

$$k = 0.0347 \frac{W}{m^{\circ}K}$$

- **Número de Grashof**

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot \Delta T \cdot D^3}{\gamma^2}$$

$$Gr = \frac{(2.421 \cdot 10^{-3}) \cdot 9.81 \cdot (260 - 20) \cdot 0.022^3}{(2.796 \cdot 10^{-5})^2}$$

$$Gr = 7.763 \cdot 10^5$$

$$Pr \cdot Gr = 5.35 \cdot 10^5$$

- **Número de Nusselt:**

Para poder evaluar el número de Nusselt se observa el Anexo_3

Al estar en el rango de 10^4 a 10^7 las constantes son:

$$c = 0.480; a = 0.25$$

$$Nu = c(Pr \cdot Gr)^a.$$

$$Nu = 12.981$$

Cálculos de coeficientes de transferencia de calor

- **Coeficiente de convección**

$$hc = \frac{Nu \cdot k}{D}$$

$$hc = 22.55 W/m^2 \cdot K$$

- **Coeficiente de radiación**

Emisividad del acero a temperatura 533°K $e_1 = 0.0659$

Constante de Stefan Boltzmann $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

$$Ts1 = 260 + 273 \text{ K} = 533 \text{ K}$$

$$Ts2 = 20 + 273 \text{ K} = 293 \text{ K}$$

$$hr = \frac{e_1 \cdot \sigma \cdot (Ts1^4 - T\infty1^4)}{(Ts1 - T\infty1)}$$

$$hr = 11.41 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

- **Coeficiente de transferencia de calor total.**

$$h = hr + hc$$

$$h = 11.41 + 22.55 = 33.91 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Longitud de la zona de calefacción $L = 0.08 \text{ m}$

$$S = \pi \cdot D \cdot L$$

Área de la zona de calefacción $s = 0.056 \text{ m}^2$

- **Pérdidas por radiación**

$$Q_r = S \cdot e_1 \cdot \sigma \cdot (Ts1^4 - T\infty1^4)$$

$$Q_r = 153.45 \text{ W}$$

- **Pérdidas por convección**

$$Q_c = hc \cdot \Delta T \cdot S$$

$$Q_c = 442.8 \text{ W}$$

- **Cantidad de calor necesaria para elevar la masa de material**

Se desea obtener 1 kg por hora por lo tanto el flujo másico será:

$$Q = 1 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

El calor específico del PET $C_p = 0.549 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$

$$Q_n = Q \cdot C_p \cdot (T_s - T_\infty)$$

$$Q_n = 131.76 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} = 152.35 \text{ W}$$

- **Energía que sale del sistema**

$$E_s = Q_r + Q_c + Q_n$$

$$E_s = 153.45 + 442.8 + 152.35 = 748.6 \text{ W}$$

- **Elección del método de calefacción del sistema**

Según las dimensiones se pudo elegir una resistencia eléctrico tipo banda La primera resistencia se ubicará antes de la boquilla de salida, las medidas de la resistencia es de 38 x 61 mm con potencia de 200W y con resistencia de temperatura de 350 °C Se agrega una resistencia eléctrica en el sistema en el sistema del mismo tipo para tener un control de temperatura constante en todo el cilindro

4.7.3.2. Sistema de transmisión de velocidad

- **Cálculo de la velocidad de rotación de la rueda dentada del eje de la extrusora.**

Datos:

N_1 : 50 r.p.m.

Z_1 : 14 dientes

N_2 :

Z_2 : 54 dientes

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{Z_2}{Z_1}$$

$$N_1 \cdot Z_1 = N_2 \cdot Z_2$$

$$N_2 = \frac{N_1 \cdot Z_1}{Z_2}$$

$$N_2 = \frac{50 \text{ rpm} \cdot 14 \text{ ~~dientes~~}}{54 \text{ ~~dientes~~}} = 12.96 \text{ r.p.m}$$

4.7.3.3. Cálculo de almacenamiento en la extrusora

- **Dimensionamiento**

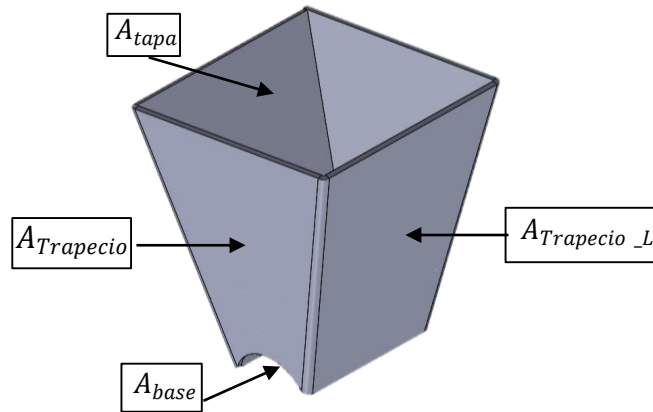
Se diseña una tolva que se adapta a la salida del transportador.

- **Volumen del Cilindro**

$$V = \pi \cdot 78^2 \cdot 200$$

$$V = 955672.48 \text{ mm}^3 = 0.00095567248 \text{ m}^3$$

- **Diferentes áreas de la tolva**



ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

$$A = A_{base} + A_{tapa} + 2A_{Trapezio} + 2A_{Trapezio_L}$$

- $A_{base} = 32 \cdot 60 = 1920mm^2$
- $A_{tapa} = 89^2 = 7921 mm^2$
- $A_{Trapezio} = \left(\frac{89+32}{2}\right) \cdot 103.98 = 6290.79mm^2$
- $A_{Trapezio_L} = \left(\frac{89+60}{2}\right) \cdot 103.98 = 7746.51mm^2$

- **Volumen de la tolva**

$$V = \frac{(1920 + 7921 + \sqrt{1920 + 7921}) \cdot 100}{3}$$

$$V = 331340mm^3 = 0.0003313 m^3$$

Asumiendo las dimensiones del material triturado será de 3 mm en cada cateto b y una altura de 16 mm para cada pellet

El volumen será:

$$V_{\text{pellets}} = 3 \cdot 3 \cdot 10$$

$$V_{\text{pellets}} = 144 \text{ mm}^3$$

- Capacidad de la tolva

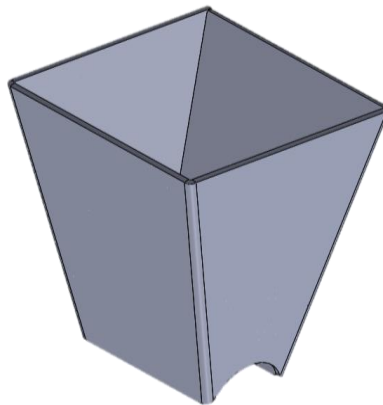
$$V_{\text{pellet}} = \frac{V_{\text{tolva}}}{V_{\text{pellets}}}$$

$$V_{\text{pellet}} = 2300 \text{ Unidades}$$

4.7.3.4. Diseño asistido por paquetes computacionales

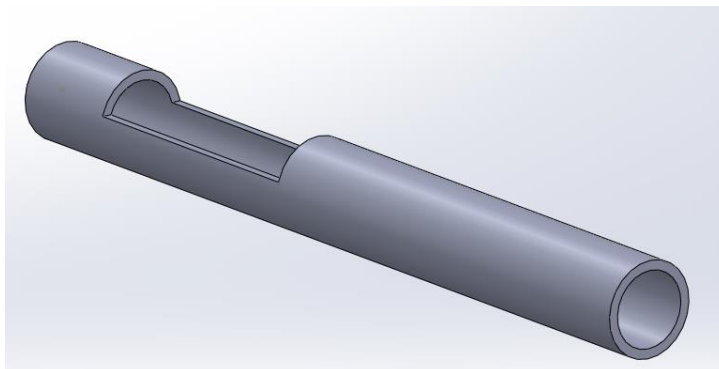
Para realizar los diferentes elementos que componen la extrusora, se usó el paquete computacional SolidWorks. A continuación, se presenta el modelo 3D de los elementos:

Figura 86: Tolva de alimentación



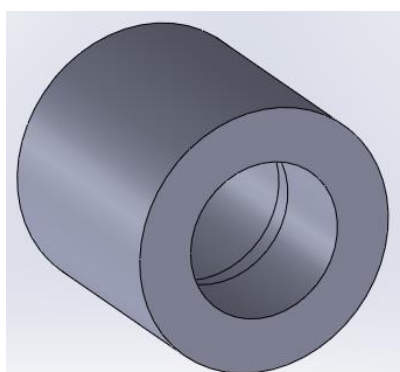
ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Figura 87: *Cilindro o camisa*



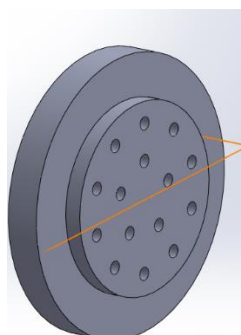
ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Figura 88: *Unión de camisa y boquilla*



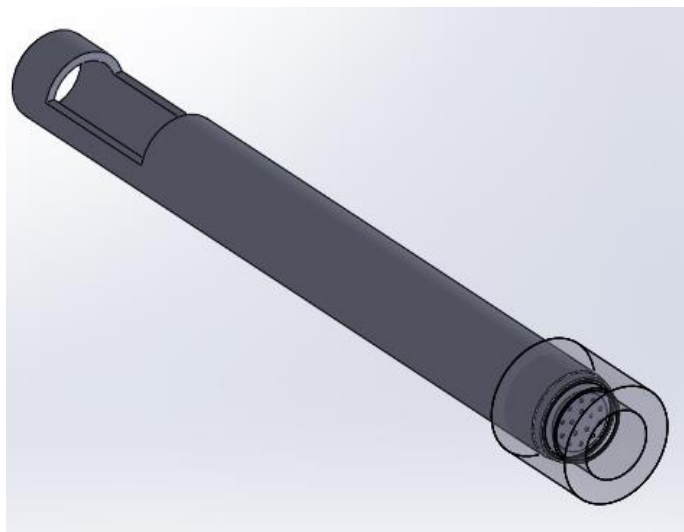
ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Figura 89: *Rompedor*



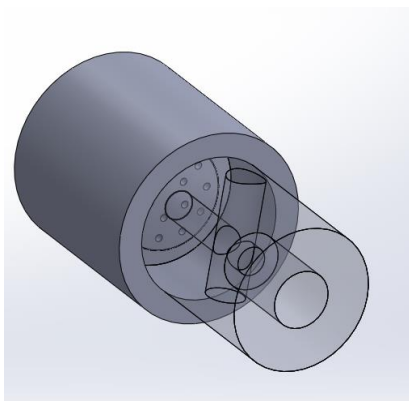
ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Figura 90: *Ensamble de camisa, rompedor y unión de camisa*



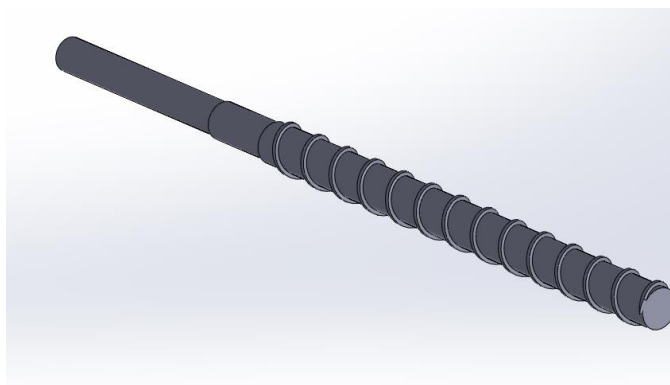
ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Figura 91: *Cabezal de extrusión*



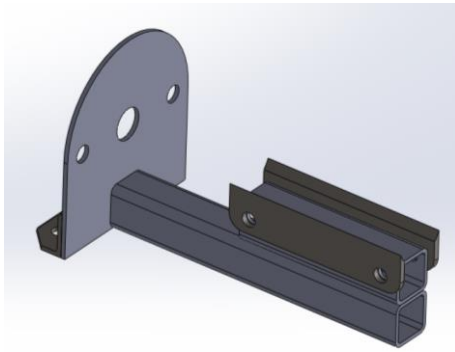
ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Figura 92: *Eje sin fin*



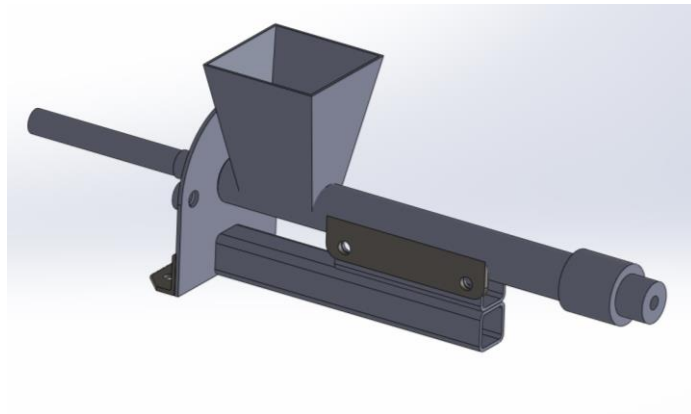
ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Figura 93: *Estructura - soporte*



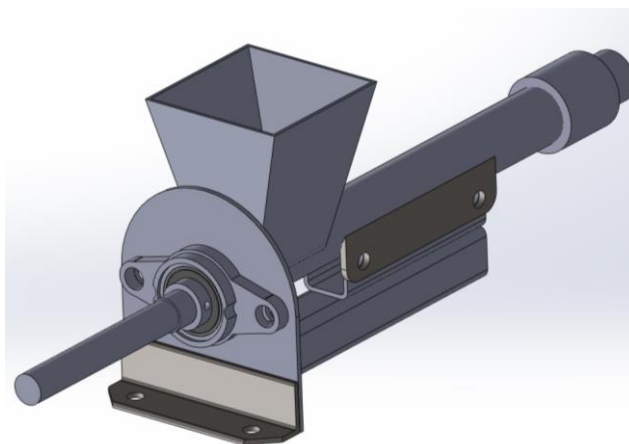
ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Figura 94: *Ensamble del extrusor*



ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Figura 95: *Ensamble del extrusor*



ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

4.7.4. Sistema de bobinado.

Cálculo de la velocidad de salida del filamento

Datos:

Q: Flujo volumétrico del material $7.84 \cdot 10^{-8} \text{ (m}^3/\text{seg)}$

S: Sección transversal de la boquilla $2.4 \cdot 10^{-6} \text{ (m}^2\text{)}$

$$V = \frac{Q}{S}$$

$$V = \frac{7.84 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{seg}}{2.4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}$$

$$V = 0.033 \left(\frac{\text{m}}{\text{seg}} \right)$$

$$V = 1980 \text{ mm}/\text{min}$$

- **Cálculo de las revoluciones del carrete de bobinado.**

Datos:

V: Velocidad a la salida del filamento ($1980 \text{ mm}/\text{min}$)

D: Diámetro interior del carrete 57 (mm)

$$\eta = \frac{V}{\pi \cdot D} \text{ (r. p. m.)}$$

$$\eta = \frac{1980 \text{ mm}/\text{min}}{\pi \cdot 57 \text{ mm}} = 11 \text{ r. p. m.}$$

- **Cálculo del torque máximo que debe realizar el motor para el enrollado del filamento.**

$$T_m = T_c + T_f + T_l$$

Datos:

Peso del carrete: 0.1 *kg*

Peso del filamento: 1 *kg*

Peso del eje: 0.1 *kg*

Radio Interior Carrete: 0.0285 *m*

Radio Exterior Carrete: 0.069 *m*

Ancho de enrollado: 0.06 *m*

Radio del eje r: 0.005 *m*

Coeficiente de fricción entre Eje – Carrete: 0,4

Inercia del carrete: 0.000132813 *kg · m²*

Inercia del filamento en el carrete: 0.001328125 *kg · m²*

Inercia del Eje: 0.00000008 *kg · m²*

Aceleración del sistema en 2 seg: 5.6 *rev/s²*

$$T_m = [0,1 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot 0.0285 \text{ m} + 1 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot 0.06 \text{ m}] + [0.4 \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot (0.1 \text{ kg} + 1 \text{ kg}) \cdot 0.005 \text{ m}] + [(0.000132813 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 + 0.001328125 \text{ kg} \cdot \text{m}^2) + 0.00000008 \text{ kgm}^2) \cdot 5.6 \text{ rev/s}^2]$$

$$T_m = 0.5886 \text{ Nm} + 0.0215 \text{ Nm} + 0.000260 \text{ Nm}$$

$$T_m = 0.61 \text{ Nm}$$

Debido al bobinado continuo se estima un factor de seguridad de 20%, por lo tanto, el torque máximo que debe cumplir el motor es de 0.73 Nm para cumplir con el torque requerido.

- **Selección del motor para el enrollado.**

Basado en los cálculos realizados anteriormente se procede a seleccionar un motor que cumple las siguientes características:

- Corriente continua de 12V.
- 5 revoluciones por minuto y un torque de 1 Nm.

4.7.5. Sistema de refrigeración.

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2}$$

$$T_f = \frac{180\text{ }^\circ\text{C} + 20\text{ }^\circ\text{C}}{2}$$

$$T_f = 100\text{ }^\circ\text{C}$$

Donde:

T_f : Temperatura Final para obtener datos (v, Pr, ρ, C_p)

T_s : Temperatura de la Boquilla

T_∞ : Temperatura ambiente

Para calcular Reynolds se necesita de la viscosidad cinemática, la cual se obtiene mediante las características del aire, a una temperatura de 100 °C a 1 atm.

Datos:

k : Conductividad térmica del aire (0.03095 W/m °C)

v : Viscosidad cinemática del aire ($2.306 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)

Pr : Número de Prandtl (0.7111)

- **Cálculo del número de Reynolds**

$$R = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

$$R = \frac{5 \text{ m/s} \cdot 0.00175 \text{ m}}{2.306 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$R = 379.44$$

- **Cálculo del número de Nusselt**

$$Nu = 0.3 + \frac{0.62 \cdot R_e^{\frac{1}{2}} + Pr^{\frac{1}{3}}}{\left(1 + \left(\frac{0.4}{Pr}\right)^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{1}{4}}} \left[1 + \left(\frac{Re}{28200}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}}$$

$$Nu = 0.3 + \frac{0.62 \cdot (379.44)^{\frac{1}{2}} + (0.7111)^{\frac{1}{3}}}{\left(1 + \left(\frac{0.4}{0.7111}\right)^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{1}{4}}} \left[1 + \left(\frac{379.44}{28200}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}}$$

$$Nu = 9.89$$

- **Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección**

$$h = Nu \frac{k}{D}$$

$$h = 9.89 \cdot \frac{0.03095 \text{ W/mK}}{0.00175 \text{ m}}$$

$$h = 174.9 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- Cálculo de la temperatura final del filamento después de pasar por el ventilador.

$$T = T_{\infty} + (T_0 + T_{\infty})e^{-\frac{4hx}{\rho V_e D C p}}$$

$$T = 20^{\circ}\text{C} + (185^{\circ}\text{C} + 20^{\circ}\text{C})e^{-\frac{4\left(174.9\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}\right)(0.07\text{ m})}{(1380\text{ Kg/m}^3)(0.033\text{ m/seg})(0.00175\text{ m})(1172.30\text{ J/Kg}^{\circ}\text{C})}}$$

$$T = 128.5^{\circ}\text{C}$$

4.2.5.1. Diseño asistido por paquetes computacionales

Para realizar los diferentes elementos que componen la estructura del equipo triturador extrusor, se usó el paquete computacional SolidWorks. A continuación, se presenta el modelo 3D de los elementos:

- Estructura

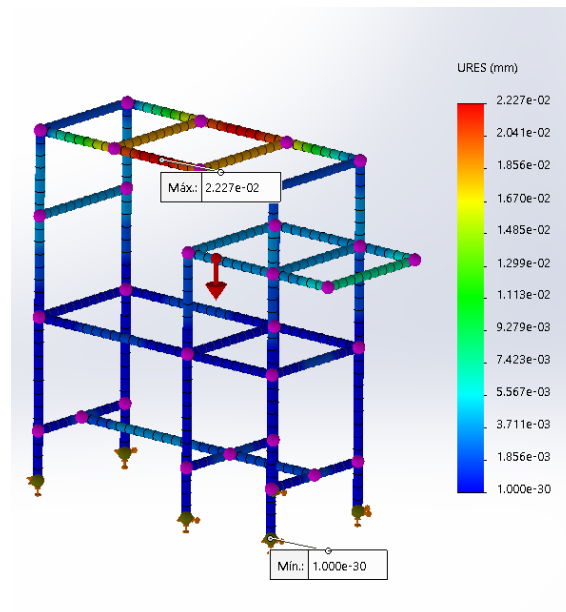
Figura 96: Estructura del equipo triturador extrusor



ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

- **Análisis estático sin aplicar cargas, sólo su propio peso**

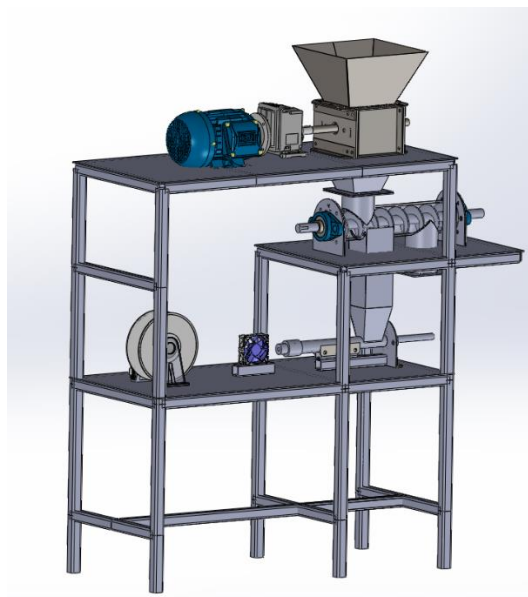
Figura 97: *Ensamble del extrusor*



ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

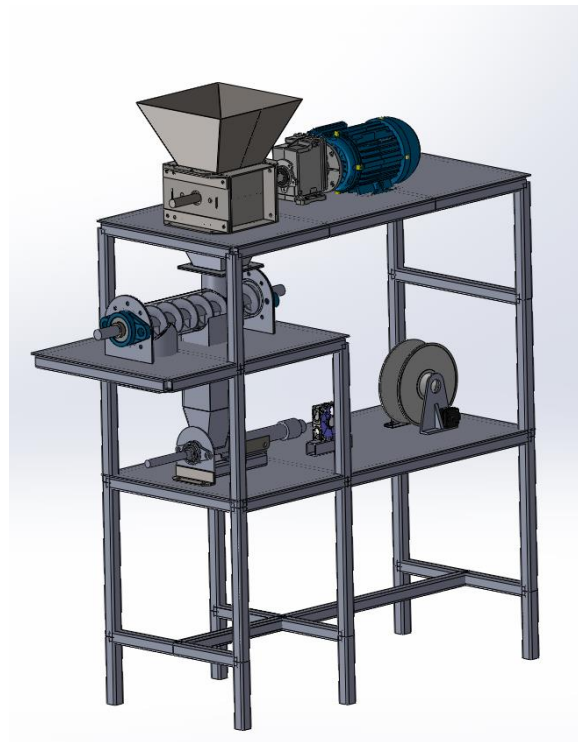
Se puede observar que el mayor desplazamiento se encuentra en la parte superior cuyo valor es de $2.27 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$

Figura 98: *Ensamble del equipo triturador-extrusor*



ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA; CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

Figura 99: *Ensamble del equipo triturador-extrusor*



ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA; CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

4.7.6. Sistema de control para el sistema de calefacción

- **Control digital de temperatura**

Para el sistema de calefacción utilizaremos el controlador digital REX-C100, la temperatura de este controlador está en un rango de 0 – 400°C, viene sujeto con un sensor de temperatura termopar tipo K, el cual resiste una temperatura hasta de 1300°C, el cable del termopar es apantallado, esto sirve para evitar un recalentamiento excesivo y puede ser alimentado por un voltaje de 110V AC , este sensor es usualmente hecho de (cobre-níquel; aluminio-níquel) y tiene un hilo negativo que es levemente magnético, otras de las características de este controlador es que cuenta con la posibilidad de dar advertencia mediante alarmas si los rangos de temperaturas son excedidos.

Figura 100: Controlador de temperatura REX-C100



- **Sensores termopares**

Los sensores de temperatura se usan para medir la temperatura del aire o la temperatura superficial de líquidos y sólidos.

Tabla 31: *Tipos de termocuplas*

TIPOS DE TERMOCUPLAS (SENSORES DE TEMPERATURAS)				
Calibración	Descripción	Material	Rango de temperatura	LÍNEA DE ERROR ESTÁNDAR
Tipo J	Se lo suele utilizar en atmósferas neutrales u oxidantes, sin embargo, no es recomendable para atmósfera con alto porcentaje de humedad y bajas temperaturas	Fe	0°C~760°C	+/-2,2°C O +/- 0,75%
Tipo E	Se los puede utilizar en atmósferas oxidantes, inertes o de vacío	90%Ni 10% Cr	0°C~870°C	+/-1,7°C O +/- 0,5%
Tipo K	Se reconoce por ser de uso genérico, bajo costo. Puede medir temperaturas entre -200 hasta 1200 °C	90%Ni 10% Cr	0°C~1260°C	+/-2,2°C O +/- 0,75%
Tipo N	Son de gran estabilidad y resistencia a altas temperaturas.	4,1% Ni 14,4% de Cr 1,4% de Si 0,1% de Mg	0°C~1260°C	+/-2,2°C O +/- 0,75%
Tipo S	Se usan en atmosferas inertes u oxidantes. Presenta un índice de estabilidad muy bueno	90% Pt 10% Rhinate	0°C~1480°C	+/-1,5°C O +/- 0,25%
Tipo R	Guarda similitud con las características de las de tipo S,	87% Pt 13% Rhinate	0°C~1480°C	+/- 1,5°C O +/- 0,25%

	adecuados para medir temperaturas de hasta 1600 °C		
TIPO B	Sus características se asemejan a las de los modelos r y s. Por lo usual se lo aplica para medidas por encima de los 300 hasta 1800 °C	70% PT 30% Rhinate	870°C~1700°C +/- 0,5%

En base a lo consultado se selecciona la termocupla de tipo K, debido a su rango de temperatura, su tamaño pequeño y práctico, en comparación con las demás termocuplas, además de su bajo costo.

○ Sensores termopar tipo K

Es un sensor para medir la temperatura. Se compone de dos metales diferentes, unidos en un extremo. Cuando la combinación de ambos metales cambia de temperatura lo que produce una tensión la cual es equivalente a la temperatura

Figura 101: Sensor termopar tipo K



• Resistencias eléctricas tipo abrazadera.

En el sector termoplástico estas resistencias tipo abrazadera son ampliamente utilizadas, ya que sirven para el calentamiento en cilindros como máquinas de moldeo por inyección o máquinas de extrusión, además de eso es un óptimo intercambiador de calor hacia el cilindro, fácil al momento de instalar, uniformidad de calentamiento, alta resistencia mecánica, tiene una capa de fibra cerámica situada entre la armadura y el revestimiento, aislante de mica y soporta una temperatura máxima de hasta 350 ° C, el cual cumple con las características necesarias para el buen funcionamiento de la máquina.

Figura 102: Resistencias tipo abrazadera



ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA; CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO

- **Relé de estado sólido.**

La utilización del relé del estado sólido (SSR) sirve como un interruptor electrónico que conmuta el paso de la electricidad, en otras palabras sirve como sensor que responde a una entrada, es decir que cuando una ligera corriente es aplicada a sus terminales de control esta hace que automáticamente se apague, en este caso estará ubicado entre el controlador de temperatura PID y las resistencias para que cuando llegue a la temperatura establecida este se desconecte y no permita el paso de la corriente.

Figura 103: Relé de estado sólido



4.7.7. Análisis económico

En base a la información recopilada se procede a realizar un estudio de los costos tanto de manufactura como el ensamble del equipo triturador- extrusor.

Para ello, los elementos mecánicos, materiales se han obtenido de diferentes proveedores seleccionando lo más económico y de calidad.

4.7.7.1. Costos de materiales

A continuación, se realiza un desglose de los materiales empleados en la elaboración de las partes principales del equipo. Estos materiales se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 32: *Costos de materiales*

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	V.UNITARIO		TOTAL
3	Tubo cuadrado 30·30·1,5	6m	\$	11,90	\$ 35,70
1	Plancha de 1220·2440·3 ASTM A36	70,11 kg	\$	89,19	\$ 89,19
1	Plancha de 1000·580·5 ASTM A36	23,2 kg	\$	33,64	\$ 33,64
1	Plancha de 1000·620·6 ASTM A36	30 kg	\$	43,50	\$ 43,50
1	Eje AISI 705	3 kg	\$	20,96	\$ 20,96
1	Plancha Galvanizado		\$	22,00	\$ 22,00
1	Motor 500 r.p.m.		\$	115,00	\$ 115,00
1	Motoreductor 2hp		\$	175,00	\$ 175,00
4	Prisioneros		\$	0,50	\$ 2,00
1	Cuña		\$	0,80	\$ 0,80
3	Piñones número 50 de 14 dientes		\$	9,00	\$ 27,00
1	Piñones número 40 de 8 dientes		\$	9,00	\$ 9,00
1	Piñones número 40 de 52 dientes		\$	42,00	\$ 42,00
1	Cadena número 50	3 m	\$	30,00	\$ 30,00
1	Cadena número 40	3 m	\$	26,00	\$ 26,00
1	Tubo Cédula 40 1"	1 m	\$	5,38	\$ 5,38
1	Tubo Cédula 40 3"	1,5 m	\$	16,00	\$ 16,00
1	Broca de 1"		\$	34,00	\$ 34,00
1	Capacitor de arranque		\$	9,00	\$ 9,00
1	Capacitor de permanencia		\$	12,00	\$ 12,00
4	Enchufes		\$	0,50	\$ 2,00
2	Tomacorrientes		\$	2,00	\$ 4,00
4	Interruptores			0,75	3,00
1	Amarras plásticas		\$	0,75	\$ 0,75

2	Resistencias eléctricas	\$ 29,00	\$ 58,00
2	Relé de estado sólido	\$ 12,00	\$ 24,00
2	Controladores PID	\$ 30,00	\$ 60,00
2	Termocuplas tipo J	\$ 9,00	\$ 18,00
	Subtotal		\$ 917,92

ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

4.7.7.2. Costos de fabricación y operaciones con máquinas

Tabla 33: *Costos de fabricación y operaciones con máquinas*

MAQUINADO	DESCRIPCIÓN	TOTAL
Torneado	Mecanizado de Interiores de Piñones	\$ 40,00
Torneado	Bocín de Piñón	\$ 10,00
Torneado	Boquilla	\$ 40,00
Fresado	Eje De trituradora	\$ 60,00
Fresado	Cuñas de ejes	\$ 5,00
Machueleado	Prisioneros de Piñones	\$ 12,00
Hidrocorte	Cuchillas de Triturador	\$ 95,76
Corte laser	Cuchillas fijas de Triturador	\$ 60,00
	Subtotal	\$ 322,76

ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

4.2.5.2. Costos de mano de obra

En la siguiente tabla se detallan los costos correspondientes a la mano de obra empleada en la construcción y elaboración de la máquina

Tabla 34: *Costos de mano de obra*

Maestro mecánico	6	\$ 25,00	\$ 150,00
Soldador	4,5	\$ 18,00	\$ 81,00
		Subtotal	\$ 231,00

ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

4.7.5.3. Costos de ingeniería y diseño

Para el desarrollo de los cálculos y la realización de planos de cada uno de los elementos que se necesitan para la correcta elaboración de la máquina se requiere un aproximado de 72 horas. Según los valores nacionales establecido para diseñadores el valor establecido es de \$15 por hora. De esta manera se determina lo siguiente:

Tabla 35: *Costos de ingeniería y diseño*

Ingeniería y diseño	15	72,00	\$ 1.080,00
----------------------------	-----------	--------------	--------------------

ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

4.7.5.3. Costos totales del equipo triturado-extrusor

La siguiente tabla muestra la sumatoria de los valores antes mencionados, también se hace referencia a los costos de imprevisto, generalmente este valor corresponde al 5% de los costos subtotales.

Tabla 36: *Costo final de la máquina*

SUBTOTAL (COSTO DIRECTO + MANO DE OBRA + COSTO INDIRECTO)		\$ 2.228,92
Costos Imprevistos	5%	\$ 115,20
	Total	\$ 2.340,37

ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

4.8. Plan de validación

a) Prueba 1

Objetivo: Calcular el tiempo en que la trituradora procesa 100 g de envases plásticos tipo PET.

- Se preparan las botellas eliminando etiquetas y tapas.
- Se procede a encender el sistema de triturado y posicionando el recipiente recolector de pellet.
- Se introducen los envases plásticos a reciclar al mismo tiempo que se inicia el conteo del cronómetro.
- El tiempo se detiene cuando el flujo de trozos se detiene.
- Se trituró diferentes envases de diferentes medidas para tener un tiempo de referencia

Tabla 37: *Tabulación de datos de triturado de botellas plásticas.*

MARCA	ENVASE	UNIDAD	TIEMPO DE TRITURADO (SEG)
Coca-Cola	1,35	Lts	23,66
Inca kola	1,35	mm Lts	14
Pepsi	1,5	Lts	28
Pepsi	1,5	Lts	47,38
Pure water	6,2	mm Lts	12
Pure water	250	mm Lts	13

ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO; DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

- Para la elaboración de un tiempo promedio de triturado se tomó botellas Pepsi debido a que eran las más resistentes y tenían un tiempo de triturado más alto que las demás.

- Se realizó 5 trituraciones del mismo tipo de botellas teniendo como respuesta los siguientes tiempos los cuales se muestran en la tabla 38

Tabla 38: *Tiempo promedio de trituración de botellas de 25 g*

TIEMPO DE TRITURADO DE ENVASE PEPSI DE 1,35 LTS		
	Tiempo (seg)	Peso
Envase 1	28	25 g
Envase 2	47.38	25 g
Envase 3	46.24	25 g
Envase 4	25.8	25 g
Envase 5	46.95	25 g
Tiempo promedio de trituración	38.87	25 g

ELABORADO: CHRISTOPHER MICHELL MACIAS COELLO; DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

El tiempo promedio para la trituración de este tipo de envase es de 38.37 seg por lo que 100g de este tipo de botella tarda aproximadamente 3 min.

Conociendo el peso de la botella y teniendo en cuenta el tiempo promedio se procedió a estimar el tiempo para producir 1kg de material triturado el mismo que será enviado a la extrusora, con lo que se obtuvo la siguiente información.

38.87 seg	25 g
x	1000 g

$$x = \frac{38.87 \text{ seg} \cdot 1000 \text{ g}}{25 \text{ g}}$$

$$x = 1554.8 \text{ seg} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}}$$

$$x = 26.36 \text{ min}$$

Figura 104: *Resultado de trituración PET*



b) Prueba 2

Objetivo: Identificar los valores de temperatura en los cuales se logra un filamento uniforme (o medianamente uniforme) a partir del material plástico reciclado.

- Se procede a encender las resistencias hasta que llegue a la temperatura deseada, la cual demora un aproximado de 35 a 40 min
- Se pone en funcionamiento el sistema de extrusión, se vierten los trozos triturados.
- Se lleva un control de la temperatura a la referencia indicada como valor teórico de extrusión.

Figura 105: *Control de temperaturas*



En base a esta prueba se observa una gran variación en el producto de salida al diferenciar valores entre 10 a 40°C.

Por lo que la temperatura óptima es en la primera resistencia 200 a 210°C mientras que en la segunda es de 170 a 180°C

c) Prueba 3

Objetivo: Calcular el tiempo en que 100g de material plástico es procesado por la extrusora.

- Se procede a introducir los trozos que se obtuvieron del proceso de triturado.
- Se acciona el motor del tornillo extrusor al momento que se empieza a tomar el tiempo con un cronómetro.
- En el momento que empieza a salir filamento por la boquilla de la extrusora, se detiene el cronometro y se registra el valor.

Figura 106: Resultados de la extrusión sin boquilla



Figura 107: Resultado de extrusión de PET



4.9. Discusión de resultados

Después de realizar el equipo triturador extrusor, se procede a la discusión de los resultados obtenidos tanto en la parte experimental, como en la parte de cálculos y simulación en el paquete computacional SolidWorks.

- **Análisis del Tamaños de pellet**

Las dimensiones esperadas del pellet triturado eran de 125 mm^3 , después de realizar la trituración se observa un tamaño de pellet que varía desde 45 a 150 mm^3 .

Figura 108: Tamaño del pellet

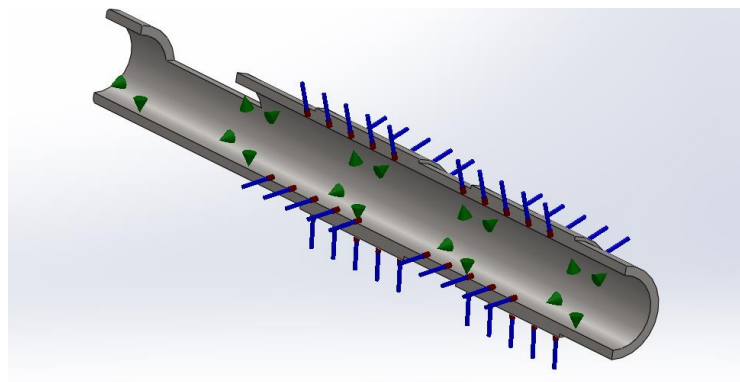


- **Análisis de temperatura de las superficies del cilindro de la extrusora**

La temperatura de fusión del PET es de 165 a 180°C por lo cual el calor transmitido dentro de la camisa debe ser igual.

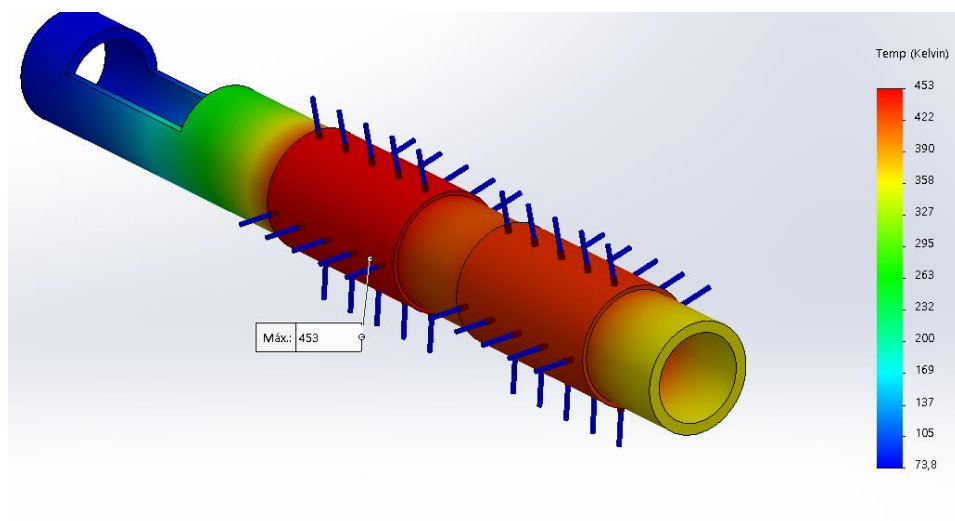
Realizando la simulación con temperaturas en las resistencias de 210°C y 180°C se puede observar que la mayor temperatura se encuentra en la primera resistencia la cual es de 453°k (179.85°C) la cual es óptima para transformar el PET

Figura 109: Parámetros de transferencia de calor por conducción y convección



ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Figura 110: Estudio térmico del cilindro o camisa



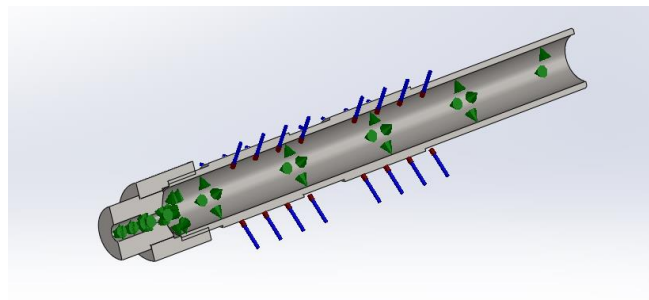
ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Realizando la prueba en la prueba de temperaturas en la máquina se pudo observar que al elevar el rango de temperatura mayor el material se funde y se carboniza, también se observa que variando el rango de temperatura de 20 a 30°C varía el producto final. Se logró extruir a una temperatura 210°C la primera resistencia y en la segunda 185°C.

- **Análisis de la boquilla**

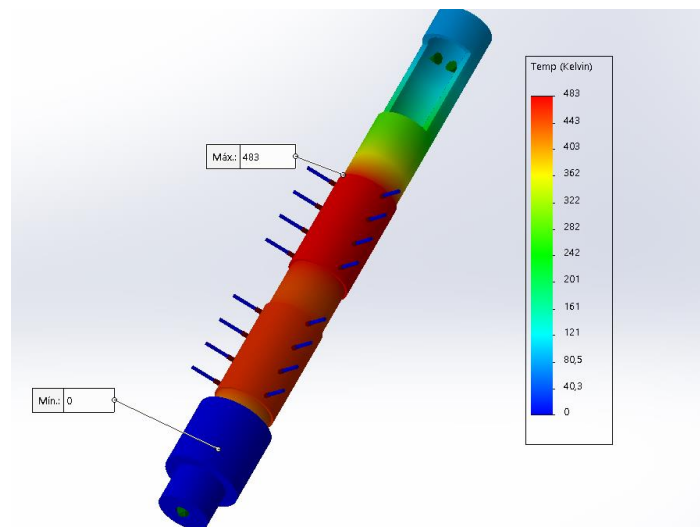
En la figura 110, se puede observar la simulación de temperaturas en la boquilla y el cuerpo de la camisa, en la máquina fabricada se presentó un problema debido a que el plástico se quedó atorado en la boquilla debido a que se enfría muy rápido y el material no fluye, por lo cual se pretende modificar la boquilla para que el filamento salga continuo y sin presentar fallas por atascamiento.

Figura 111: Parámetros de transferencia de calor por conducción y convección



ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

Figura 112: Estudio térmico del cilindro o camisa junto a la boquilla



ELABORADO: DARWIN GUSTAVO SANDOYA LARA

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- En base a la investigación realizada sobre los procesos involucrados en la transformación de envases de Tereftalato de polietileno (PET), se determinó las diferentes fases que debe pasar el PET desde su recolección como materia prima, preparación, para luego comenzar con los procesos, los cuales son trituración y extrusión o a su vez almacenamiento.
- Se diseñó una máquina que tritura plástico para la obtención de pellet, diseñada y comprobada con ayuda del paquete computacional SolidWorks, en la Tabla 37 se puede observar los resultados de los tiempos de triturado de diferentes envases plásticos.
- Se desarrolló una máquina extrusora de plástico para la obtención de filamento a partir de pellet a base de envases plásticos de tipo tereftalato de polietileno (PET), está diseñada y comprobada con ayuda del paquete computacional SolidWorks, como se muestra en la en la figura 94 y 95 además se determinó que el equipo puede procesar un aproximado de 1 Kg en 30 min.
- Se propuso tres alternativas de diseño del equipo triturador-extrusor que transforme los envases plásticos en filamento para impresoras 3D, se determinó mediante un estudio de ponderación de las propuestas se evaluaron diferentes atributos, desde: objetivos, restricciones y funciones, además de diferentes categorizaciones como: operación, control de operación, seguridad y costo, además de diferentes criterios como seguridad en todo el proceso de operación, costos de mantenimiento, controles de temperaturas, etc. La alternativa seleccionada fue la “C”, como se muestra en la figura 46.
- Se determinó que la alternativa “C” fue la mejor propuesta, esta alternativa se optimizó en la fabricación del equipo reduciendo el uso de un motor, además se redistribuye los componentes para reducir el tamaño(ancho), esto se puede observar en el ensamble realizado en SolidWorks que se muestra en la figura 99, además se puede observar la máquina fabricada en el anexo 7

5.2. Recomendaciones

- Se debe tomar en cuenta que los envases deben estar libres de etiquetas, tapas, residuos, etc. De ser necesario deben ser lavadas y secadas para asegurar un filamento limpio, además de evitar el deterioro del equipo.
- Es importante tener la precaución de evitar el ingreso de materiales metálicos, cerámicos, etc., en el equipo triturador-extrusor.
- Al terminar el uso del equipo en la jornada diaria de trabajo, asegurarse que no quede ningún residuo en la extrusora, para evitar que se obstruya.
- Se debe seguir las recomendaciones de seguridad industrial al realizar trabajos en la máquina extrusora para evitar accidentes muy graves.

CAPÍTULO VI

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

- [1] R. G. B. y. J. Nisbett, Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, México: McGraw-Hill, 2008.
- [2] D. C. C. Salvador Cardona Foix, Teoría de máquinas, Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya, SL, 2001.
- [3] Real Academia Española, «RAE,» [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/triturar>.
- [4] G. J. J. L. G. M. T. J. G. G. M. N. J. Águeda Casado Eduardo, Mecánica del vehículo, España: Paraninfo, 2020.
- [5] Real Academia Española , «RAE,» [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/extruir>.
- [6] S. L. Reynoso, «Todoenpolimeros,» [En línea]. Available: <https://todoenpolimeros.com/que-son-los-polimeros/>.
- [7] S. García, «Referencias históricas y evolución de los plástico,» *Iberoamericana de Polímeros*, p. 9, 2009.
- [8] A. Francisco, «Tema 2. Polímeros termoplásticos y termoestables.,» *Educommons*, pp. <http://educommons.anahuac.mx:8080/eduCommons/ciencia-de-los-materiales-y-metalurgia/ciencia-de-los-polimeros/tema-2.-polimeros-termoplasticos-y-termoestables>, 2014.
- [9] J. R. M. L.H. Gomez García, «El reciclaje de PET, PEAD, PEBD, PS Y PP en estibas plásticas como modelo de negocio,» Bogotá, 2017.
- [10] J. Delval, El aprendizaje y la enseñanza de las ciencias experimentales y sociales, México: Siglo veintiuno, 2013, p. 231.
- [11] GRANTA, «PE-HD (general purpose, molding & extrusion),» Softw. CES EDUPACK, 2018.
- [12] G. Martínez Barrera, J. B. Hernández Zaragoza, T. López Lara y C. Menchaca Campos, Materiales sustentables y reciclados en la construcción, OmniaSciece, 2015.
- [13] GRANTA, «PP (homopolymer, low flow),» CES EDUPACK, 2018.
- [14] Estructplan Consultora, «Estructplan,» [En línea]. Available: <https://estructplan.com.ar/poliestireno-ps-polimero-base/>.
- [15] C. E. S. D. V. M. H. R. S. José Emmanuel Medina García, «Diseño de una trituradora para plástico Polietileno de Tereftalato (PET),» 2011.
- [16] F. S. Nogués, Energías renovables (ENERGÍA DE LA BIOMASA, VOLUMEN 1), España: Universidad de Zaragoza, 2010.
- [17] D. F. G. Hernández, «DISEÑO DE UN MOLINO TRITURADOR PARA POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS PARA LA EMPRESA INDUSTRIA RECUPLAST S.A.S,»

UNIVERSIDAD LIBRE FACULTAD DE INGENIERÍA INGENIERÍA MECÁNICA,
Colombia.

- [18] D. C. León, «Análisis de cuchillas de molino para termoplásticos MOD. 2650 y diseño para una mayor duración,» INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, MÉXICO, 2012.
- [19] A. Muñoz y G. Sanunga, «SlidePlayer,» 2017. [En línea]. Available: <https://slideplayer.es/slide/12160707/>.
- [20] D. Hakkes, «Calculations required for Shredder» 2017. [En línea]. Available: <https://davehakkens.nl/community/forums/topic/calculations-required-for-shredder/>.
- [21] GRANTA, «PET (unfilled, amorphous),» CES EDUPACK, 2018.
- [22] Prosino, «What is the difference between single shaft shredder and double shaft shredder?,» 2017.
- [23] J. Ramalho, «CLR (Compañía Levantina de Reductores),» 25 Abril 2019. [En línea]. Available: <https://n9.cl/ldvs0>.
- [24] S. Kalpakjian y S. R. Schmid, MANUFACTURA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA, México: PEARSON EDUCACIÓN, 2008.
- [25] L. F. Ramos, Extrusión de plásticos, México: LIMUSA, 2013.
- [26] V. K. Savgorodny, Transformación de plásticos., Barcelona, España.: GUSTAVO GILI, S. A., 1973.
- [27] W. D. Callister, Jr, Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los materiales 2, Barcelona: REVERTÉ, S. A., 2007.
- [28] R. B. Seymour y C. E. Carraher Jr., introducción a la QUÍMICA de los POLÍMEROS, Barcelona: REVERTÉ S. A., 1995.
- [29] Incropera, Fundamentos de transferencias de Calor, México: Prendice Hall, 1999.
- [30] Y. Cengel, Transferencia de Calor y Masa, México: McGraw-Hill, 2011.
- [31] L. Ramos, Extrusión de Plásticos, Principios Básicos, México : Limusa, 2013.
- [32] M. H. K. M. R. A. Hemad Zareiforoush, «A Review on Screw Conveyors Performance Evaluation During Handling Process,» *ResearchGate*, pp. 55-63, 2010.
- [33] L. F. H. Cogollo, «Slideshare,» 2019. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/luiferhoyos/tornillo-transportador>.
- [34] J. S. Marianna Tomašková, «El uso de transportadores de tornillo sin fin en aplicaciones prácticas,» *Scientific.Net*, pp. 225-231, 2014.
- [35] D. E. O. Orellana, «Estudio, Puesta en marcha y Proposición de Ensayos para un,» Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, 2018.

- [36] J. A. Z. I. Elly Mestanza, «SlidePlayer,» 2018. [En línea]. Available: <https://slideplayer.es/slide/13701403/>.
- [37] E. c. d. a. l. f. d. t. Tornillo, «OMNIA,» [En línea]. Available: <http://omniawater.es/tornillo-transportador/>.
- [38] H. R. Galbarro, «Ingemecánica,» [En línea]. Available: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn143.html>.
- [39] Plastics Europe, «plasticseurope,» [En línea]. Available: <https://www.plasticseurope.org/es/about-plastics/what-are-plastics>.
- [40] APQUA, Los Plásticos en Nuestra Sociedad: Guía Del Profesor, Barcelona-Bogotá: Reverté, S.A., 1994.
- [41] T. M. Gutiérrez Valencia, D. M. Chito Trujillo y G. Cuervo Ochoa, Polímeros, Generalidades y tendencias de investigación en Colombia, Popayán: Universidad del Cauca , 2019.
- [42] D. Hakkens, «PRECIOUS PLASTIC,» 2012. [En línea]. Available: <https://community.preciousplastic.com/academy/build/shredder>.
- [43] FILABOT, «filabot,» 30 Mayo 2016. [En línea]. Available: <https://www.filabot.com/blogs/news/118021508-filabot-industrial-reclaimer>.
- [44] filabot, «FILABOT,» [En línea]. Available: <https://www.filabot.com/products/filabot-original-ex2>.
- [45] FILASTRUDER, «FILASTRUDER,» [En línea]. Available: <https://www.filastruder.com/collections/filastruders-accessories/products/filastruder-kit?variant=323882043>.
- [46] M. Velasco Peña , J. Rodríguez Suárez y D. Restrepo Ardilla, «Caracterización de propiedades mecánicas de piezas en ABS en función de parámetros de proceso de manufactura aditiva FDM,» *XXI CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA*, p. 716, 2002.
- [47] M. P. Groover, Fundamentos de manufactura moderna, México: McGraw-Hill, 2007.
- [48] W. F. S. y J. Hashemi, Fundamento de la ciencia e ingeniería de materiales, México: McGraw-Hill, 2006.
- [49] R. G. B. y J. K. Nisbett, DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA DE SHIGLEY, México-Santa Fe: McGraw-Hill, 2008.
- [50] C. R. Romeva, Diseño Concurrente, Catalunya: Ediciones UPC, 2002.
- [51] S. D. Eppinger, Diseño y desarrollo de productos, Quinta edición ed., México: Mc Graw Hill, 2008.
- [52] I. Ferrer, Flujo de información en el proceso de Diseño, Madrid , 2006.
- [53] J. A. Paola Farias, Ingeniería Concurrente, Monterrey , 2006.

- [54] J. B. H. Z. T. L. L. C. M. C. Gonzalo Martínez Barrera, Materiales sustentables y reciclados en la construcción, OmniaSciencie, 2015.
- [55] J. Suarez, «Proyecto de máquina extrusora, para creación de hilos de Poli Etilén Tereftalato,» México, 2015.
- [56] N. SHARAPIN, Fundamentos de Tecnología de productos Fitoterapéuticos, Santafé de Bogotá, Colombia: CYTED, 2000.
- [57] C. L. Daniel, «Análisis de cuchillas de molino para termoplásticos MOD. 2650 y diseño para una mayor duración,» INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, MÉXICO, 2012.
- [58] C. L. Daniel, «Análisis de cuchillas de molino para termoplásticos MOD. 2650 y diseño para una mayor duración,» INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, MÉXICO, 2012.
- [59] M. y. M. A. Beltrán, Tecnología de Polímeros, Alicante, España: Universidad de Alicante, 2012.
- [60] M. Sepe, «Online» [En línea]. Available: <https://www.ptonline.com/articles/the-importance-of-melt-mold-temperature>.
- [61] GRANTA, «Melting Point,» Softw. CES EDUPACK, 2018.
- [62] Plasteco, «Plasteco,» [En línea]. Available: <http://www.plasteco.cl/>.
- [63] D. Hakkens, «Precious Plastic,» [En línea]. Available: <http://preciousplastic.com/>.
- [64] J.C.Parejo, «Tecnología informática,» [En línea]. Available: <http://www.tecnologia-informatica.es/metodos-para-fabricar-plasticos/>.
- [65] W. D. Callister, Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. II, Barcelona: Reverté, 2007.
- [66] H. R. Galbarro, «Ingemecanica,» [En línea]. Available: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn143.html>.
- [67] Grupo NovaÁgora, «Novaagora,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.interempresas.net/Plastico/FeriaVirtual/Producto-Trituradores-mono-eje-reforzados-Forrec-XK-165458.html>.
- [68] Kickstarter, «Filabot,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.filabot.com/blogs/news/118021508-filabot-industrial-reclaimer>.
- [69] Ingemecanica, «ingemecanica,» [En línea]. Available: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn143.html>.

CAPÍTULO VII

ANEXOS

Anexo 1: Propiedades térmicas de materiales específicos

Material	Específico (C _e)		Fusión (l _f)	Vaporización (l _v)
	Kcal/kg. °C	kJ/kg. K	kJ/kg	kJ/kg
Aceite de Oliva	0,400	1,675	-	-
Acero	0,110	0,460	205	-
Agua	1,000	4,183	335	2250
Alcohol	0,600	2,513	-	880
Alpaca	0,095	0,398	-	-
Aluminio	0,217	0,909	377	-
Antimonio	0,050	0,210	164	-
Azufre	0,179	0,750	38	-
Bronce	0,086	0,360	-	-
Cadmio	0,056	0,234	46	-
Carbón Mineral	0,310	1,300	-	-
Carbón Vegetal	0,201	0,840	-	-
Cinc	0,093	0,389	117	-
Cobalto	0,104	0,435	243	-
Cobre	0,093	0,389	172	-
Cromo	0,108	0,452	59	-
Estaño	0,060	0,250	113	-
Éter etílico	0,540	2,261	113	-
Fenol	-	-	109	-
Glicerina	0,580	2,430	176	-
Hierro	0,113	0,473	-	-
Ladrillo	0,210	0,880	-	-
Refractario	0,094	0,394	168	-
Latón	0,110	0,460	155	-
Manganeso	0,033	0,138	11,7	281
Mercurio	0,210	0,880	-	-
Mica	-	-	151	-
Naftalina	0,110	0,461	234	-
Níquel	0,031	0,130	67	-
Oro	0,778	3,260	147	-
Parafina	0,056	0,235	109	-

Equivalencias: 1 kJ/kg. K = 0,2388 kcal/kg. °C Autor: S. Casas-Cordero E.

Anexo 2: Propiedades térmicas del aire a presión atmosféricas

Table A-5 | Properties of air at atmospheric pressure.[†]

The values of μ , k , c_p , and Pr are not strongly pressure-dependent and may be used over a fairly wide range of pressures							
T, K	ρ kg/m ³	c_p kJ/kg · °C	$\mu \times 10^5$ kg/m · s	$\nu \times 10^6$ m ² /s	k W/m · °C	$\alpha \times 10^4$ m ² /s	Pr
100	3.6010	1.0266	0.6924	1.923	0.009246	0.02501	0.770
150	2.3675	1.0099	1.0283	4.343	0.013735	0.05745	0.753
200	1.7684	1.0061	1.3289	7.490	0.01809	0.10165	0.739
250	1.4128	1.0053	1.5990	11.31	0.02227	0.15675	0.722
300	1.1774	1.0057	1.8462	15.69	0.02624	0.22160	0.708
350	0.9980	1.0090	2.075	20.76	0.03003	0.2983	0.697
400	0.8826	1.0140	2.286	25.90	0.03365	0.3760	0.689
450	0.7833	1.0207	2.484	31.71	0.03707	0.4222	0.683
500	0.7048	1.0295	2.671	37.90	0.04038	0.5564	0.680
550	0.6423	1.0392	2.848	44.34	0.04360	0.6532	0.680
600	0.5879	1.0551	3.018	51.34	0.04659	0.7512	0.680
650	0.5430	1.0635	3.177	58.51	0.04953	0.8578	0.682
700	0.5030	1.0752	3.332	66.25	0.05230	0.9672	0.684
750	0.4709	1.0856	3.481	73.91	0.05509	1.0774	0.686
800	0.4405	1.0978	3.625	82.29	0.05779	1.1951	0.689
850	0.4149	1.1095	3.765	90.75	0.06028	1.3097	0.692
900	0.3925	1.1212	3.899	99.3	0.06279	1.4271	0.696
950	0.3716	1.1321	4.023	108.2	0.06525	1.5510	0.699
1000	0.3524	1.1417	4.152	117.8	0.06752	1.6779	0.702
1100	0.3204	1.160	4.44	138.6	0.0732	1.969	0.704
1200	0.2947	1.179	4.69	159.1	0.0782	2.251	0.707
1300	0.2707	1.197	4.93	182.1	0.0837	2.583	0.705
1400	0.2515	1.214	5.17	205.5	0.0891	2.920	0.705
1500	0.2355	1.230	5.40	229.1	0.0946	3.262	0.705
1600	0.2211	1.248	5.63	254.5	0.100	3.609	0.705
1700	0.2082	1.267	5.85	280.5	0.105	3.977	0.705
1800	0.1970	1.287	6.07	308.1	0.111	4.379	0.704
1900	0.1858	1.309	6.29	338.5	0.117	4.811	0.704
2000	0.1762	1.338	6.50	369.0	0.124	5.260	0.702
2100	0.1682	1.372	6.72	399.6	0.131	5.715	0.700
2200	0.1602	1.419	6.93	432.6	0.139	6.120	0.707
2300	0.1538	1.482	7.14	464.0	0.149	6.540	0.710
2400	0.1458	1.574	7.35	504.0	0.161	7.020	0.718
2500	0.1394	1.688	7.57	543.5	0.175	7.441	0.730

[†]From Natl. Bur. Stand. (U.S.) Circ. 564, 1955.

Anexo 3: Constantes de cilindro largo horizontal

9.6.3 Cilindro largo horizontal

Esta importante geometría se ha estudiado de manera extensa, y Morgan [20] ha revisado muchas de las correlaciones existentes. Para un cilindro isotérmico, Morgan sugiere una expresión de la forma

$$\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h}D}{k} = C Ra_D^n \quad (9.33)$$

TABLA 9.1 Constantes de la ecuación 9.33 para convección libre sobre un cilindro circular horizontal [20]

Ra_D	C	n
$10^{-10} - 10^{-2}$	0.675	0.058
$10^{-10} - 10^{-2}$	1.02	0.148
$10^2 - 10^4$	0.850	0.188
$10^4 - 10^7$	0.480	0.250
$10^7 - 10^{12}$	0.125	0.333



DEPARTAMENTO DE BIBLIOTECA
Universidad Simón Bolívar - Sede del Litoral

Anexo 4: Dimensiones y características de chumaceras

SERIE UCFL 300 PARA MAQUINARIA PESADA CON BLOQUEO
POR TORNILLOS PRISIONEROS
SOPORTES DE BRIDAS DE DOS PERNOS DE HIERRO FUNDIDO

- Los soportes de bridas de dos pernos UCFL están pensados para utilizarlos en aplicaciones industriales con cargas pesadas.
- Esta serie está diseñada principalmente para las aplicaciones en las que el área de montaje sea limitada.
- Cada soporte se vende ensamblado y listo para montarse: solo tiene que introducir los pernos en las bridas.
- Estas unidades utilizan rodamientos de bolas con anillos interiores extendidos que cuentan con diámetros externos esféricos que se autoalinean para compensar la desalineación del eje.
- La serie UCFL de soportes Timken incluye inserciones de rodamiento de bloqueo con tornillos prisioneros (UC) de Timken.
- Los rodamientos están lubricados para instalarse inmediatamente.
- Engrasador facilitado para la lubricación⁽¹⁾.
- El diseño de retenes integrados es apropiado para aplicaciones en entornos con humedad o suciedad.
- Las dimensiones de espaciado entre los orificios de los pernos y la ubicación del centro del eje se pueden intercambiar con soportes de la competencia.
- El soporte se ha diseñado para facilitar la sustitución de los rodamientos.

Eje Diá. d	Designación de bridas de dos pernos	Referencia del rodamiento	Índices de carga básicos		Dimensiones										Tamaño del perno	Peso
					H	J	A ₁	A	A ₀	L	A ₂	S	B	N		
			Dinámico	Estático												
			C _r	C _{0r}												
mm			kN lb	kN lb	mm in	mm in	mm in	mm in	mm in	mm in	mm in	mm in	mm in	mm in	mm in	kg lb
25		UCFL305	21,2	10,9	150	113	13	29	39	80	16	15	38	19	M16	1,1
	1	UCFL305-16	4766	2450	5 29/32	4 7/16	1/2	1 5/8	1 7/32	3 5/8	5/8	0,591	1,496	3/4	5/8	2,4
30		UCFL306	26,7	15,0	180	134	15	32	44	90	18	17	43	23	M20	1,5
			6002	3372	7 3/32	5 9/32	19/32	1 1/4	1 47/64	3 17/32	45/64	0,669	1,693	29/32	3/4	3,3
35		UCFL307	33,4	19,3	185	141	16	36	49	100	20	19	48	23	M20	1,8
			7509	4339	7 9/32	5 35/64	5/8	1 13/32	1 59/64	3 5/16	25/32	0,748	1,890	29/32	3/4	4,0

FUENTE: TIMKEN

Anexo 5:. Dimensiones y características de piñones

Información general

CÓDIGO IBCA	No. de dientes	Pitch Diá. (P.C.D.)	Exterior Diá. (OD)	Piñones simples TIPO B				Peso Aprox. (kg)	Materiales		
				Bore (OD)		EJE					
				Stock	Máx.	HD	HL				
NK-40B10T	10	1.618	1.84	0.39	0.71	*1.260	0.866	0.14	SAE 1040		
NK-40B12T	12	1.932	2.17	0.43	0.87	*1.575	0.866	0.22			
NK-40B13T	13	2.089	2.33	0.55	0.79	1.457	0.866	0.23			
NK-40B14T	14	2.247	2.49	0.55	0.98	1.654	0.866	0.28			
NK-40B15T	15	2.405	2.65	0.55	1.10	1.811	0.866	0.34			
NK-40B16T	16	2.563	2.81	0.55	1.18	1.969	0.866	0.40			
NK-40B17T	17	2.721	2.98	0.55	1.26	2.126	0.866	0.46			
NK-40B18T	18	2.879	3.14	0.55	1.38	2.244	0.866	0.51			
NK-40B19T	19	3.038	3.30	0.55	1.57	2.441	0.866	0.59			
NK-40B20T	20	3.196	3.46	0.59	1.77	2.638	0.984	0.76			
NK-40B21T	21	3.355	3.62	0.59	1.89	2.795	0.984	0.85			
NK-40B22T	22	3.513	3.78	0.59	2.01	2.953	0.984	0.95			
NK-40B24T	24	3.831	4.10	0.59	1.65	2.480	0.984	0.84			
NK-40B25T	25	3.989	4.26	0.59	1.65	2.480	0.984	0.88			
NK-40B26T	26	4.148	4.42	0.59	1.65	2.480	0.984	0.92			
NK-40B28T	28	4.466	4.74	0.59	1.65	2.480	0.984	1.00			
NK-40B30T	30	4.783	5.06	0.59	1.65	2.480	0.984	1.10			
NK-40B32T	32	5.101	5.38	0.59	1.77	2.677	1.102	1.30			
NK-40B33T	33	5.260	5.51	0.59	1.77	2.677	1.102	1.30			
NK-40B35T	35	5.578	5.86	0.59	1.77	2.677	1.102	1.40			
NK-40B36T	36	5.737	6.02	0.67	1.77	2.677	1.102	1.50	Bajo acero al carbono SS41 (welded hub)		
NK-40B40T	40	6.373	6.65	0.67	1.77	2.677	1.102	1.70			
NK-40B42T	42	6.691	6.97	0.71	1.89	2.874	1.260	2.05			
NK-40B45T	45	7.168	7.45	0.71	1.89	2.874	1.260	2.25			
NK-40B48T	48	7.645	7.93	0.71	1.89	2.874	1.260	2.45			
NK-40B50T	50	7.963	8.23	0.71	1.89	2.874	1.260	2.60			
NK-40B54T	54	8.599	8.89	0.71	1.89	2.874	1.260	2.90			
NK-40B60T	60	9.554	9.84	0.71	1.89	2.874	1.260	3.40			
NK-40B70T	70	11.145	11.43	0.79	2.17	3.268	1.260	4.57			

Active
Ir a Con



Active
Is a Con

FUENTE: IVAN BOHMAN C.A.

Anexo 6: Dimensiones y características de cadenas

Cadenas

TRANSMISIÓN DE POTENCIA

► Cadenas Sencillas

Información general

The image shows a coiled chain on the left and two individual chain links on the right. The links are made of metal and have a standard roller chain design with a central pin and side plates.

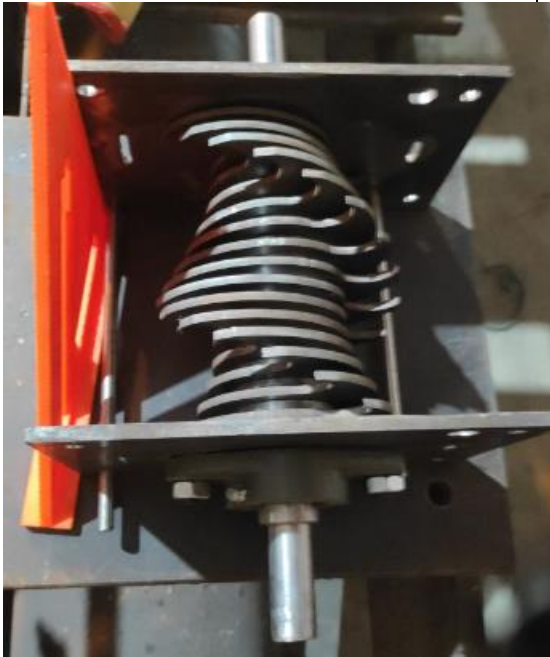
Cadenas sencillas

CÓDIGO IBCA	Cadena		Paso		Entre placas interiores		Diámetros del rodillo		Diámetros del pasador (PIN)		Longitud del pasador (PIN)		Carga de ruptura	
	ANSI No.	DIN ISO Nr.	P		W máx		R máx		D máx		L máx		min	min
			in	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm	Lbs	Kg
RS-35-1	35		3/8	9.525	0.188	4.78	0.200	5.08	0.141	3.59	0.510	12.95	2420	1100
RS-40-1	40	08A	1/2	12.70	0.313	7.95	0.312	7.92	0.156	3.97	0.691	17.45	4290	1950
RS-41-1	41	08S	1/2	12.70	0.251	6.38	0.306	7.77	0.141	3.59	0.567	14.40	2640	1200
RS-50-1	50	10A	5/8	15.875	0.375	9.53	0.400	10.16	0.200	5.09	0.856	21.75	7040	3200
RS-60-1	60	12A	3/4	19.05	0.500	12.70	0.469	11.91	0.234	5.96	0.059	26.90	9680	4400
RS-80-1	80	16A	1	25.40	0.625	15.88	0.625	15.87	0.312	7.94	1.390	35.30	16500	7500
RS-100-1	100	20A	1 1/4	31.75	0.750	19.05	0.750	19.05	0.375	9.54	1.699	43.15	25300	11500
RS-120-1	120	24A	1 1/2	38.10	1.000	25.40	0.875	22.22	0.437	11.11	2.122	53.90	35200	16000
RS-140-1	140	28A	1 3/4	44.45	1.000	25.40	1	25.40	0.500	12.71	2.303	58.50	45100	20500
RS-80-1-P	80	16A	1	25.40	0.625	15.88	0.625	15.87	0.312	7.94	1.390	35.30	16500	7500
RS-100-1-P	100	20A	1 1/4	31.75	0.750	19.05	0.750	19.05	0.375	9.54	1.699	43.15	25300	11500
RS-120-1-P	120	24A	1 1/2	38.40	1.000	25.40	0.875	22.22	0.437	11.11	2.122	53.90	35200	16000

Sufijo -P = Pasador

FUENTE: IVAN BOHMAN C.A.

Anexo 7: Partes y montaje del equipo

Cuchillas giratorias	Torneado de eje del triturador
	
Ensamble de cuchillas giratorias	Ensamble de cuchillas giratorias
	

Enderezando tapa lateral	Soldadura de transportador
	
Ensamble de cuchillas fijas y giratorias con tapa laterales	Ensamble del equipo triturador
	

Construcción de tornillo transportador



Ensamble de tolva de transportador



Puliendo cordones



Conexiones Eléctricas



Equipo triturador extrusor



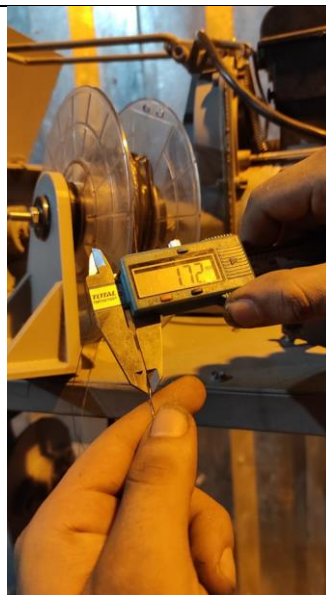
Extruido y bobinado de filamento PET



Bobinado del filamento PET



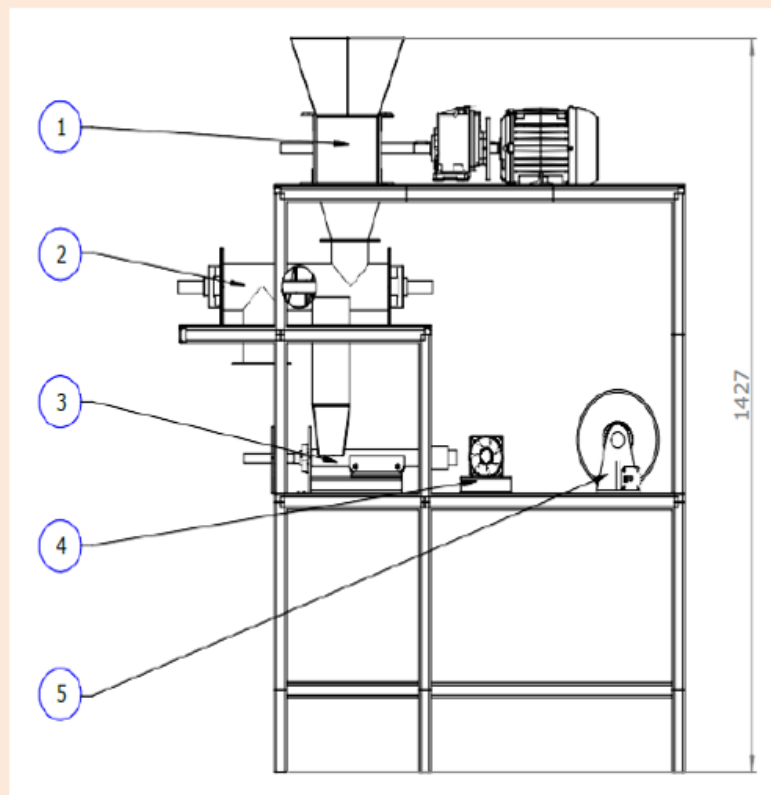
Medición de filamento PET (1.72mm)





Equipo triturador-extrusor

Descripción del equipo



- 1 Trituradora
- 2 Tornillo transportador
- 3 Extrusora
- 4 Ventilador de enfriamiento
- 5 Enrollado

Para su seguridad y la de terceros es muy importante la siguiente información:

Este manual tiene muchos mensajes importantes de seguridad. Siempre lea y aplique los mensajes de seguridad.

Todos los mensajes de seguridad mencionan cual es el riesgo potencial, como reducir las posibilidades de heridas o lo que puede ocurrir si las instrucciones no fueran seguidas y aplicadas.

Equipo triturador-extrusor

ITEMS DE SEGURIDAD

Use dos o más personas para mover e instalar el equipo. No seguir esta instrucción puede traer daños a su columna (espinazo) o heridas.

Tener cuidado cuando esté en funcionamiento la trituradora ya que puede causar lesiones debido a que usa un sistema de transmisión por piñón y cadena.

No introducir las manos a la trituradora o cualquier otro objeto que no sea botellas PET.

Utilice siempre gafas de protección, debido a que al momento del uso de la trituradora puede expulsar partículas de pellet de PET por la parte de la tolva de alimentación del mismo.

Evite el contacto directo en la extrusor cuando esté en uso y después de haberlo usado, debido a su alto grado de temperatura a la que funciona.

Tener cuidado cuando esté en funcionamiento la extrusora ya que puede causar lesiones debido a que usa un sistema de transmisión por piñón y cadena.

Evitar introducir en la extrusora ningún objeto o partícula que no sea pellet de PET.

Por seguridad

El equipo triturador presenta en su mando de funcionalidad un botón de paro de emergencia debido a que si se presenta un percance este es de vital ayuda para detener la marcha del mismo.



ADVERTENCIA

Use dos o más personas para mover e instalar el producto, de caso de no seguir esta instrucción puede traer daños a su espinazo o heridas.

Equipo triturador-extrusor

INSTALACIÓN

Las siguientes instrucciones están destinadas al adecuado instalado, para que el equipo pueda efectuar sus operaciones de una manera correcta y segura.

IMPORTANTE: Cualquier modificación o cambio de posición del equipo deberá realizarlo siempre y cuando esté desconectado

CONDICIONES DEL LUGAR DE INSTALACIÓN

01. La utilización del equipo produce calor y ruido, por lo que se requiere la instalación en un lugar abierto y que no afecte el ruido al momento de su uso.
02. Cerciorarse de que haya circulación de aire en el lugar de instalación del equipo, manteniendo la ventilación natural. Mala ventilación produce falta de oxígeno, lo que es perjudicial para la salud del operario.

03. Verificar la existencia un tomacorriente eléctrico de línea 110V exclusivo y en perfecto estado para el equipo.

COMO USAR

Triturado y almacenamiento.

01. Previo tratamiento de las botellas PET (retirado de etiqueta, tapa, limpiado y secado).
02. Asegurarse de que esté cerrado el pase de material triturado hacia la tolva de la extrusora y colocar un recipiente e la salida del tornillo transportador, para almacenar el pellet PET.
03. Encender la trituradora (mando).
04. Introducir las botellas PET, una a una.
05. Luego de realizar el trabajo de triturado y almacenado de pellet PET, apagar el motor de la trituradora.

Equipo triturador-extrusor

Triturado y extruido.

01. Previo tratamiento de las botellas PET (retirado de etiqueta, tapa, limpiado y secado).
02. Asegurarse de que esté abierto el pase de material triturado hacia la tolva de la extrusora.
03. Encender la trituradora (mando).
04. Introducir las botellas PET, una a una.
05. Una vez triturado una cantidad aproximada de 1000 g, y se haya alcanzado la temperatura deseada, encender el motor de la extrusora y apagar el motor de la trituradora.
06. Cuando empieza a extruir el PET, se debe desechar los primeros 6 cm por tema de irregularidades en la textura y diámetro del filamento.
07. Es importante recalcar que el proceso de retirar los primeros 6 cm y de colocar el filamento extruido en al carrete de enrollado es manual, en cuestión debido a la temperatura que se encuentra el filamento al salir de la boquilla se debe usar guantes que soporten altas temperaturas como los que se usan en el proceso de soldadura y unas pinzas.

08. Luego de retirar los primeros 6 cm se procede a encender el ventilador de refrigeración del filamento y el motor del enrollado y colocar el material extruido para su enrollado final.
09. Una vez terminado el proceso de extrusión y retirado el enrollado del PET, se recomienda dejar encendido el motor de la extrusora aproximadamente 5 min para que expulse todo el pellet residual.
10. Posterior a los 5 min se procede a apagar el motor de la extrusora

Extruido.

01. Encender las resistencias de la extrusora. [Tiempo promedio de calentado es de 37 min, de temperatura ambiente (20/25 °C) a temperatura deseada (180 a 200°C)].
02. Luego de que se haya alcanzado la temperatura deseada, se enciende el motor de la extrusora.
03. Colocar el pellet en la abertura que conecta a

Equipo triturador-extrusor

la tolva de la extrusora, para su posterior extrusión del filamento.

04. Cuando empieza a extruir el PET, se debe desechar los primeros 6 cm por tema de irregularidades en la textura y diámetro del filamento.
05. Es importante recalcar que el proceso de retirar los primeros 6 cm y de colocar el filamento extruido en al carrete de enrollado es manual, en cuestión debido a la temperatura que se encuentra el filamento al salir de la boquilla se debe usar guantes que soporten altas temperaturas como los que se usan en el proceso de soldadura y unas pinzas.
06. Luego de retirar los primeros 6 cm se procede a encender el ventilador de refrigeración del filamento y el motor del enrollado y colocar el material extruido para su enrollado final.
07. Una vez terminado el proceso de extrusión y retirado el enrollado del PET, se recomienda dejar encendido el motor de la extrusora aproximadamente 5 min para que expulse todo el pellet residual.
08. Posterior a los 5 min se procede a apagar el motor de la extrusora

APAGADO DEL EQUIPO

01. Una vez realizado cualquier trabajo (triturado y almacenado, triturado y extruido, extruido), es importante que se verifique el estado de todo el equipo.
02. Es necesario desconectar el equipo de su fuente de alimentación.

CAPÍTULO VIII

PLANOS