



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

“DISEÑO DE EXTRUSORA DE FILAMENTO PARA IMPRESORA 3D FABRICADO  
A PARTIR DE POLIPROPILENO RECICLADO”

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN DISEÑO

PRESENTA:

JENY ELIZABETH CHÁVEZ MARTÍNEZ

CODIRECTORES

DR. ÁLVARO JESÚS MENDOZA JASSO

M.D.I. FERNANDO ITURBIDE JIMÉNEZ

HUAJUAPAN DE LEÓN, OAXACA, ENERO 2018



## **DEDICATORIA**

A Dios, por estar siempre conmigo y guiarme en la vida.

A mis padres quienes me apoyan incondicionalmente.

A mi hermano, cuñada y sobrina, cuyos momentos compartidos son mi fuerza para seguir adelante.

A mis amigos que formaron mi nueva familia.

Y a mi familia en general por su apoyo.





## AGRADECIMIENTOS

En especial a Dios y mis padres, por darme la vida y por los esfuerzos realizados durante todos estos años para que llegara este momento.

A mi hermano y su familia, por regalarme grandes momentos que me motivaron en los días difíciles.

A mi familia, por sus consejos y sonrisas, que guardo conmigo.

A mis amigos, en especial para Silvia, Daniela y Alejandra, por contagiarme con sus ánimos y sonrisas eternas, también para Gerardo, Armando y Erick, por enseñarme que la amistad se forma con momentos pequeños y sinceros.

Agradezco a mis directores, el Dr. Álvaro Jesús Mendoza Jasso y el M.D.I. Fernando Iturbide Jiménez, por motivarme a no desistir durante el proyecto, por su tiempo brindado para asesorías y sus consejos durante la carrera.

Así también, doy las gracias a mis revisores de tesis, al M.C. Moisés Manzano Herrera y M.C. Víctor Manuel Cruz Martínez, por su atención prestada para la revisión de la tesis, y en especial al Dr. Alberto Antonio García, por su apoyo en asesorías.

A los técnicos: Rodolfo Palma Guzmán, Eustacio Miguel Díaz, Ing. Jesús Peláez Guzmán, Enrique Miguel López, Javier Jiménez, Roberto Juan Ramírez Chavez, no solo por su apoyo en la tesis, sino también por sus consejos y amistad durante mi estadía en la universidad.

A la Universidad Tecnológica de la Mixteca, por ser mi hogar durante 5 años, su apoyo en becas para lograr esta meta y al personal docente, por los conocimientos brindados.



## RESUMEN

La generación de nuevos proyectos surge a través del análisis del entorno y la formación de propuestas de soluciones desde diferentes perspectivas para aquellos problemas o debilidades encontradas. Partiendo de ello, se detectó la generación de residuos de fibra sintética en comunidades de artesanos de la región Mixteca y parte de Valles Centrales del estado de Oaxaca, planteando como solución la transformación de estos residuos en filamento para la impresión en 3D a través del diseño de una extrusora para este material.

Realizando investigación en temas de reciclaje, polímeros, extrusión, filamentos para impresoras 3D, y utilizando como guía la metodología de “diseño y desarrollo de producto” de Ulrich y Eppinger (2012), que permitió el establecimiento de las necesidades del cliente, análisis de la competencia, detección de restricciones y consultas externas (área de manufactura, eléctrica y control), para dar como resultado las métricas del proyecto y fundamento en los que se basa el diseño de este modelo de extrusora.

Dando paso así, a los cálculos de componentes y cada una de las etapas de conceptualización a lo largo de la tesis, presentando al final un modelo 3D que permite la visualización de los componentes, ensambles y funcionamiento de la extrusora, cubriendo la necesidad detectada, a través de establecer los parámetros del proceso de fundición del material a procesar y de la extrusora, mismos que pueden ser proyectados a la capacidad de producción necesaria para la recuperación de residuos en la población muestra en trabajos a futuro.



## INDICE

<b>Capítulo 1 Aspectos preliminares</b> .....	<b>1</b>
1.1 Planteamiento del tema.....	1
1.2 Problema a resolver .....	3
1.3 Justificación.....	4
1.4 Metodología .....	5
1.5 Planeación .....	7
1.5.1 Segmento de mercado.....	7
1.5.2 Objetivos .....	7
1.5.3 Condiciones o limitantes del diseño .....	8
1.5.4 Declaración de la misión .....	8
<b>Capítulo 2 Marco teórico</b> .....	<b>10</b>
2.1 Historia de las extrusoras.....	10
2.2 Mercado actual de extrusoras .....	10
2.2.1 Extrusoras semi-industriales.....	11
2.2.2 Extrusoras industriales.....	11
2.2.3 Extrusoras domésticas .....	11
2.3 Extrusora .....	11
2.3.1 Tipos de extrusora .....	12
2.3.2 Componentes .....	12
2.4 Inestabilidad en la extrusión .....	14
2.5 Polímeros.....	16
2.5.1 Nomenclatura .....	16
2.5.2 Presentación de los polímeros .....	17
2.5.3 Clasificación por comportamiento al calor .....	18
2.5.4 Clasificación por familia .....	19
2.6 Polipropileno .....	19
2.6.1 Clasificación por distribución.....	19
2.6.2 Clasificación por composición .....	20
2.6.3 Aplicaciones .....	20
2.7 Reciclaje .....	21
2.7.1 Clasificación.....	21
2.7.2 Símbolos de identificación .....	21
2.7.3 Técnicas de reciclaje .....	22

<b>Capítulo 3 Desarrollo del concepto .....</b>	<b>23</b>
3.1 Identificación de las necesidades del cliente.....	23
3.1.1 Recopilación.....	23
3.1.2 Interpretar los datos sin procesar en términos de necesidades de los clientes .....	31
3.2 Especificaciones del cliente .....	33
3.2.1 Análisis de productos de la competencia .....	33
3.2.2 Valores objetivo-ideales y marginalmente aceptables de las métricas planteadas .....	34
3.3 Generación de conceptos de producto .....	36
3.3.1 Aclarar el problema general .....	36
3.3.2 Análisis de la extrusora .....	39
3.3.3 Análisis de sistemas externos .....	54
3.3.4 Explorar sistémicamente los componentes .....	58
3.3.5 Evaluación de la necesidad de diseño industrial .....	60
3.3.6 Conceptualización .....	61
<b>Capítulo 4 Diseño a nivel sistema .....</b>	<b>62</b>
4.1 Proceso de fusión.....	62
4.1.1 Consideraciones básicas en el flujo de un extrusor .....	64
4.1.2 Análisis de flujo en un extrusor, para fluidos newtonianos y condiciones isotérmicas .....	66
4.1.3 Análisis del flujo de un dado para fluidos newtonianos y condiciones isotérmicas .....	67
4.1.4 Flujo en la zona de alimentación .....	67
4.2 Cálculo de componentes .....	68
4.2.1 Condiciones de operación.....	68
4.2.2 Cálculo de las características del extrusor y el dado .....	69
4.2.3 Barril .....	82
4.2.4 Dado.....	84
4.2.5 Garganta de alimentación .....	88
4.2.6 Tolva .....	89
4.2.7 Plato rompedor .....	90
4.2.8 Motor.....	91
4.2.9 Etapa de conceptualización 2 .....	92
4.2.10 Sistema de calentamiento .....	93
4.2.11 Unidad de enfriamiento .....	105
4.2.12 Unidad de tiro.....	112
4.2.13 Unidad de medición.....	117
4.2.14 Unidad de embobinado.....	118

<b>Capítulo 5 Diseño a detalle</b> .....	<b>127</b>
5.1 Selección de componentes .....	128
5.1.1 Motores .....	128
5.1.2 Resistencias eléctricas .....	129
5.1.3 Ventilador.....	130
5.1.4 Indicador de carátula .....	130
5.2 Control .....	130
5.2.1 Funcionamiento .....	130
5.2.2 Control On/Off .....	131
5.2.3 Lectura y control: Resistencias eléctricas .....	132
5.2.4 Lectura y control: Motor [rpm].....	134
5.2.5 Lectura y control: Velocidad de extrusión [cm/s] .....	134
5.3 Energía eléctrica .....	135
5.3.1 Fuente de alimentación para CD.....	136
5.3.2 Centro de carga.....	136
5.3.3 Interruptores para la activación del sistema en general y las resistencias eléctricas .....	137
5.4 Etapa de conceptualización 3.....	137
5.4.1 Evaluación del modelo 3D .....	138
5.5 Componentes de ensamble .....	139
5.5.1 Cojinetes.....	139
5.5.2 Soportes de componentes .....	140
5.5.3 Abrazaderas tipo uña .....	140
5.6 Ajustes a componentes. Unidad de tiro.....	141
5.6.1 Velocidad angular del rodillo .....	141
5.6.2 Banda transportadora.....	141
<b>Capítulo 6 Prototipo virtual</b> .....	<b>142</b>
6.1 Lámina de producto .....	143
6.2 Planos generales y unidades .....	147
6.3 Lista de componentes estándares a comprar .....	162
6.4 Costo total de componentes estándares a comprar .....	164
6.5 Lista de componentes a manufacturar .....	165
<b>Capítulo 7 Conclusiones y trabajos futuros</b> .....	<b>167</b>
7.1 Trabajo a futuro .....	168
<b>GLOSARIO</b> .....	<b>169</b>
<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>171</b>

**ANEXOS .....175**

- A: Extrusoras semi industriales, industriales y domésticas ..... 177
- B: Identificación del material ..... 180
- C: Análisis de la competencia ..... 185
- D: Conceptualización 1 ..... 187
- E: Manual de funcionamiento..... 190



## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Artesanías. Fuente: Elaboración propia	1
Figura 1.2. Fibra charrito. Fuente: Elaboración propia.	1
Figura 1.3. Fibra regular. Fuente: Elaboración propia.	1
Figura 1.4. Fibra de rollo. Fuente: Elaboración propia.	1
Figura 1.5. Residuos de fibra sintética. Fuente: Elaboración propia.	2
Figura 1.6. Metodología. Fuente: (Ulrich y Eppinger, 2012).	5
Figura 2.1. Diagrama típico de un extrusor. Fuente: (Ramos, 2013).	12
Figura 2.2. Arreglo típico para producir monofilamento. Fuente: (Ramos, 2013).	13
Figura 2.3. Esquema del husillo. Fuente: (Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000b).	13
Figura 2.4. Hinchamiento en el dado: a) una varilla y b) una tubería. Fuente: (Morton, 2012).	15
Figura 2.5. Efecto de la velocidad de corte en la distorsión de un fluido. Fuente: (Ramos, 2013).	15
Figura 2.6. Variación en diámetro de un filamento. Relación de estiramientos a)23, b)83. Fuente: (Ramos, 2013).	15
Figura 2.7. "Abambuamiento" en un dado. Fuente: (Ramos, 2013).	16
Figura 2.8. Estructura molecular de un termoplástico amorfo. Fuente: (Ensinger, 2016a).	18
Figura 2.9. Estructura molecular de un termoplástico cristalino. Fuente: (López, 2016).	18
Figura 2.10. Estructura del Polipropileno. Fuente: (Maddah, 2016).	19
Figura 2.11. Símbolo de identificación de polímeros. Fuente: (INE, 2017).	21
Figura 3.1. Secuencia para Identificación de material. Fuente: Elaboración propia.	24
Figura 3.2. Viscosidad aparente contra rapidez de corte de algunos polímeros. Fuente: (Morton, 2012).	26
Figura 3.3. Efecto de la temperatura sobre la viscosidad de los polímeros. Fuente: (Morton, 2012).	26
Figura 3.4. Recolección de residuos. Fuente: Elaboración propia.	27
Figura 3.5. Prueba de inyección. Fuente: Elaboración propia.	29
Figura 3.6. Métricas en el proceso general. Fuente: Elaboración propia.	36
Figura 3.7. Caja negra general Fuente: Elaboración propia.	37
Figura 3.8. Cajas negras específicas para cada entrada. Fuente: Elaboración propia.	38
Figura 3.9. Diagrama funcional. Fuente: Elaboración propia.	38
Figura 3.10. Flujo de material en una tolva de alimentación. Fuente: (Beltrán y Marcilla, 2012).	40
Figura 3.11. Tipos de tolva. Fuente: (Beltrán y Marcilla, 2012).	40
Figura 3.12. Tipos de gargantas de alimentación. Fuente: (Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000b).	41
Figura 3.13. Dimensiones garganta de alimentación. Fuente: (Beltrán y Marcilla, 2012).	41
Figura 3.14. a) Zona de alimentación ranurada. b) Dimensiones de la alimentación ranurada. Fuente: (Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000b).	42
Figura 3.15. Sección de mezclador Egan. Fuente: (Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000b).	45
Figura 3.16. Husillos especiales. Fuente: (Morton, 2012).	46
Figura 3.17. Patrones de flujo. Fuente: (Morton, 2012).	48
Figura 3.18. Clasificación por el número de fases en su alimentación. Fuente: (Videla, 2017).	50
Figura 3.19. Bandas Calentadoras. Fuente: (ENSA electronics, 2017).	51
Figura 3.20. Resistencia tipo mica banda. Fuente: (Tei, 2017).	52
Figura 3.21. Dimensiones plato rompedor. Fuente: (Beltrán y Marcilla, 2012).	53
Figura 3.22. a) Malla Tipo Dutch Twill. b) Malla para Filtro Tipo Red Cuadrada. c) Malla Tipo Dutch Twill Diagonal. Fuente: (Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000b).	54
Figura 3.23. Tanques de enfriamiento por esparado. Fuente: (Industrial Ambar, 2017).	55
Figura 3.24. Tina de enfriamiento por inmersión. Fuente: (CPI Plastica, 2017).	55

Figura 3.25. Ventilador (Izq.) y soplador (Der.). Fuente: (NMB, 2017).	56
Figura 3.26. Unidad de tiro por: (De izq. a der.) Oruga, banda, rodillos. Fuente: Google Imágenes.	56
Figura 3.27. Indicador de carátula y digital. Fuente: (Mitutoyo, 2017).	57
Figura 3.28. Interacción de componentes en el proceso de extrusión. Fuente: Elaboración propia.	58
Figura 4.1. Corte transversal de la extrusora en la zona de transición. Fuente: (Beltrán y Marcilla, 2012).	62
Figura 4.2. Ancho del pozo de fundido a lo largo de la zona de transición. Fuente: (Beltrán y Marcilla, 2012).	63
Figura 4.3. Relación entre la longitud de fusión y la temperatura del cilindro para una velocidad del tornillo constante. Fuente: (Beltrán y Marcilla, 2012).	63
Figura 4.4. Flujo de arrastre. Fuente: (Ramos, 2013).	64
Figura 4.5. Flujo de presión. Fuente: (Ramos, 2013).	65
Figura 4.6. Dimensiones de un sistema husillo-barril. Fuente:(Ramos, 2013).	65
Figura 4.7. Efecto de la temperatura sobre la viscosidad de los polímeros. Fuente: (Morton, 2012).	68
Figura 4.8. Viscosidad aparente contra rapidez de corte de algunos polímeros. Fuente: (Morton, 2012).	69
Figura 4.9. Línea característica del extrusor del tornillo. Fuente: (Morton, 2012).	70
Figura 4.10. Interacción de las líneas características del tornillo y del dado. Fuente: (Morton, 2012).	71
Figura 4.11. Familia de líneas características del tornillo con la línea característica del dado. Fuente: Elaboración propia.	73
Figura 4.12. Esquema básico de sujeción. Fuente: Elaboración propia.	77
Figura 4.13. Diagrama de fuerzas de un husillo. Fuente: Elaboración propia.	78
Figura 4.14. Diagrama de fuerza cortante y momento flector del husillo. Fuente: Elaboración propia.	80
Figura 4.15. Secciones del dado. Fuente: (Mariano, 2011).	85
Figura 4.16. Diseño típico de un dado. Fuente: (Ramos, 2013).	85
Figura 4.17. Ángulos para el PVC y el nylon. Fuente: (Ramos, 2013).	86
Figura 4.18. Cálculo de dimensiones del dado. Fuente: Elaboración propia.	87
Figura 4.19. Concepto 3. Imagen superior vistas exteriores e imagen inferior corte ilustrativo. Fuente: Elaboración propia.	93
Figura 4.20. Distribución del sistema de calentamiento. Fuente: Elaboración propia.	94
Figura 4.21. Distribución de cargas térmicas. Fuente: Elaboración propia.	98
Figura 4.22. Resultados análisis térmico transitorio 1. Fuente: Elaboración propia.	99
Figura 4.23. Análisis térmico transitorio del dado. Fuente: Elaboración propia.	99
Figura 4.24. Distribución de temperaturas. Fuente: Elaboración propia.	100
Figura 4.25. Distribución de cargas térmicas a dos bandas. Fuente: Elaboración propia.	101
Figura 4.26. Resultados del análisis térmico transitorio 2. Fuente: Elaboración propia.	101
Figura 4.27. Funcionamiento de resistencias de forma independiente. Fuente: Elaboración propia.	102
Figura 4.28. Red de resistencias térmicas para la transferencia de calor en el barril. Fuente: Elaboración propia.	103
Figura 4.29. Condiciones del sistema de enfriamiento. Fuente: Elaboración propia.	105
Figura 4.30. Evolución de temperaturas en función del número de Biot. Fuente: (Corberan y Royo, 2017).	107
Figura 4.31. Unidad de enfriamiento. Fuente: Elaboración propia.	111
Figura 4.32. Hinchamiento del perfil. Fuente: Elaboración propia.	112
Figura 4.33. Delimitación del volumen de control. Fuente: Elaboración propia.	113
Figura 4.34. Diámetros del perfil. Fuente: Elaboración propia.	114
Figura 4.35. Sistema de tiro como calibrador. Fuente: Elaboración propia.	114
Figura 4.36. Área de contacto del rodillo. Fuente: Elaboración propia.	114
Figura 4.37. Deformación del perfil. Fuente: Elaboración propia.	115

Figura 4.38. Fuerza de fricción en los rodillos. Fuente: Elaboración propia.	116
Figura 4.39. Unidad de tiro. Fuente: Elaboración propia.	117
Figura 4.40. Indicador de carátula tipo vástago posterior (Imagen izquierda) y Carátula 50-0-50 (Imagen derecha). Fuente: (Mitutoyo, 2012).	117
Figura 4.41. Unidad de medición. Fuente: Elaboración propia.	118
Figura 4.42. Bobina para filamento. Fuente: (Filament2printer, 2017).	118
Figura 4.43. Cambio de la velocidad angular. Fuente: Elaboración propia.	119
Figura 4.44. Capas de la bobina. Fuente: Elaboración propia.	119
Figura 4.45. Incremento del diámetro. Fuente: Elaboración propia.	120
Figura 4.46. Embobinado por compensación del diámetro. Fuente: Elaboración propia.	123
Figura 4.47. Unidad de apoyo para embobinado en el eje x. Fuente: Elaboración propia.	124
Figura 5.1. Modelo 3D básico. Fuente: Elaboración propia.	137
Figura 5.2. Vista superior, modelo 3D básico. Fuente: Elaboración propia.	138
Figura 5.3. Vista posterior, modelo 3D básico. Fuente: Elaboración propia.	138
Figura 5.4. Ubicación de la carga axial, extrusora. Fuente: Elaboración propia.	139
Figura 5.5. Tipos de rodamientos y sus características. Fuente: (FAG, 2000).	140
Figura 5.6. Modificación a la unidad de tiro. Fuente: Elaboración propia.	141

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Propiedades del polipropileno para impresora 3D. Fuente: (CREATEBOT México, 2017).	4
Tabla 2.1. Ejemplos de nomenclatura. Fuente (Bombardier Transportation, 2010).	17
Tabla 2.2. Ejemplo de nomenclatura. Fuente: (Bombardier Transportation, 2010).	17
Tabla 2.3. Acrónimos para plásticos. Fuente: (Instituto Mexicano del plástico Industrial, 2000a).	17
Tabla 2.4. Clasificación de tipos de plásticos. Fuente: (INE, 2017).	22
Tabla 3.1. Propiedades mecánicas y térmicas del Polipropileno homopolímero. Fuente: (Vamptech, 2017).	25
Tabla 3.2. Propiedades generales Polipropileno. Fuente: (Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000d).	25
Tabla 3.3. Ventajas y desventajas del Polipropileno. Fuente: (Vamptech, 2017).	27
Tabla 3.4. Comparación de propiedades del PP virgen Vs. Reciclado. Fuente: (Instituto Mexicano del Plástico, 2000d).	28
Tabla 3.5. Necesidades del cliente. Fuente: Elaboración propia.	32
Tabla 3.6. Especificaciones objetivo-ideales. Fuente: Elaboración propia.	34
Tabla 3.7. Clasificación de métricas por etapa del proceso. Fuente: Elaboración propia.	35
Tabla 3.8. Extrusora. Asignación de componentes a funciones. Fuente: Elaboración propia.	39
Tabla 3.9. Diseño del tornillo para reducir el coeficiente de fricción entre el material y el tornillo. Fuente: (Beltrán y Marcilla, 2012).	44
Tabla 3.10. Especificaciones del husillo sin restricciones. Fuente: Elaboración propia.	47
Tabla 3.11. Especificaciones del husillo. Fuente: Elaboración propia.	47
Tabla 3.12. Características del sistema eléctrico por país [Extracto]. Fuente: (Worldstandards, 2017).	50
Tabla 3.13. Características de los aislantes térmicos [Extracto]. Fuente: RATSA (2011).	52
Tabla 3.14. Sistemas externos. Asignación de componentes a funciones. Fuente: Elaboración propia.	54
Tabla 3.15. Componentes con especificaciones fijas y variables. Fuente: Elaboración propia.	59

Tabla 3.16. Evaluación de necesidades ergonómicas. Fuente: Elaboración propia.	60
Tabla 3.17. Evaluación de necesidades estéticas. Fuente: Elaboración propia.	60
Tabla 3.18. Ponderación de necesidades. Fuente: Elaboración propia.	61
Tabla 4.1. Variables del husillo. Fuente: Elaboración propia.	69
Tabla 4.2. Análisis del extrusor, relación L/D=10. Fuente: Elaboración propia.	72
Tabla 4.3. Análisis del extrusor, relación L/D=15. Fuente: Elaboración propia.	73
Tabla 4.4. Especificaciones finales del husillo. Fuente: Elaboración propia.	74
Tabla 4.5. Comparación con Lyman Fylament Extruder. Fuente: Elaboración propia.	74
Tabla 4.6. Relación de capacidad de producción con la potencia requerida. Fuente: (Ramos, 2013).	76
Tabla 4.7. Aceros especiales estructurados. Fuente: (UANL, 2017).	76
Tabla 4.8. Calculo del límite a la fatiga para diversos materiales y tipos de carga. Fuente: (Díaz, 2017).	81
Tabla 4.9. Valores del coeficiente "y" según la temperatura. Fuente: (Norma ASME B31.3).	83
Tabla 4.10. Tamaño estándar de mallas [Extracto]. Fuente: (Boegger, 2017).	91
Tabla 4.11. Factores de corrección. Fuente: Elaboración propia.	92
Tabla 4.12. Perfil de temperaturas Polipropileno. Fuente: Elaboración propia.	94
Tabla 4.13. Especificaciones del husillo y barril. Fuente: Elaboración propia.	95
Tabla 4.14. Especificaciones de resistencias tipo banda. Fuente: Elaboración propia.	97
Tabla 4.15. Condiciones del análisis térmico transitorio 1. Fuente: Elaboración propia.	98
Tabla 4.16. Especificaciones acero AISI 4140. Fuente: (Cengel Y. A. y Ghajar A. J., 2011).	98
Tabla 4.17. Condiciones del análisis térmico transitorio 2. Fuente: Elaboración propia.	101
Tabla 4.18. Especificaciones finales resistencias tipo banda. Fuente: Elaboración propia.	102
Tabla 4.19. Especificaciones finales del aislamiento térmico. Fuente: Elaboración propia.	104
Tabla 4.20. Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección. Fuente: (Cengel y Ghajar, 2011).	108
Tabla 4.21. Análisis de eficiencia del sistema de enfriamiento. Fuente: Elaboración propia.	111
Tabla 4.22. Variables en función de n. Fuente: Elaboración propia.	121
Tabla 4.23. Embobinado en el eje x. Fuente: Elaboración propia.	123
Tabla 4.24. Comportamiento del embobinado en el eje X. Fuente: Elaboración propia.	124
Tabla 5.1. Clasificación de componentes. Fuente: Elaboración propia.	127
Tabla 5.2. Requerimientos de motores. Fuente: Elaboración propia.	128
Tabla 5.3. Especificaciones de control. Fuente: Elaboración propia.	131
Tabla 5.4. Termopares y rangos de temperatura de funcionamiento. Fuente: (ENSA Electronics, 2017).	132
Tabla 5.5. Clasificación de termopares por su aplicación. Fuente: (Tei, 2017).	133
Tabla 5.6. Tamaño normalizado de controladores. Fuente: (Tei, 2017).	133
Tabla 5.7. Características de la energía eléctrica de alimentación. Fuente: Elaboración propia.	135
Tabla 6.1. Lista de componentes estándares a comprar. Fuente: Elaboración propia.	162
Tabla 6.2. Tornillería. Fuente: Elaboración propia.	164
Tabla 6.3. Costo final de componentes estándares. Fuente: Elaboración propia.	164
Tabla 6.4. Lista de componentes a manufacturar. Fuente: Elaboración propia.	165

## INTRODUCCIÓN

La elaboración de artesanías es una actividad desarrollada en la región Mixteca y parte de Valles Centrales del estado de Oaxaca, implicando en sí misma, otras acciones, como lo es la adquisición de materia prima, técnicas de manufactura artesanal, ampliación de modelos de productos para mantenerse vigente en el mercado, generación de residuos en la etapa de acabado, además de la comercialización de los productos.

A partir de un análisis del entorno y teniendo como base los conocimientos adquiridos en el transcurso de la carrera de Ingeniería en Diseño, así como motivación personal hacia el área de materiales y procesos de transformación, se detecta la oportunidad de generar un proyecto en una necesidad local, la recuperación de residuos de fibras sintéticas.

Proponiendo la siguiente solución: recolección de los residuos para su transformación en un nuevo producto. Para esto, se tiene como objetivo general el diseño de una extrusora de filamento para impresora 3D, basando el funcionamiento en las características particulares del material, como son las condiciones en las que se pueden recolectar y cargas o aditivos que trae consigo.

Para el logro de este objetivo, se utilizó como guía la metodología de “diseño y desarrollo de productos” de *Ulrich y Eppinger (2012)*, que consta de una serie de etapas que permiten la obtención y análisis de información de una forma clara y ordenada, para llegar finalmente a la etapa de conceptualización del producto.

Dividida la tesis en 7 capítulos de los cuales, los 2 primeros muestran la información acerca del problema a resolver, la etapa de planeación y un bosquejo de conceptos utilizados en los siguientes apartados a través del marco teórico.

Los siguientes 3 capítulos son destinados a mostrar el proceso del proyecto a través del desarrollo del concepto, diseño a nivel sistema y diseño a detalle, para finalmente mostrar los resultados en el capítulo 6, en el que se encuentra la presentación del producto, planos y despiece de la máquina diseñada.

Las conclusiones a las que se llegaron después de todo el proceso y la propuesta de temas de investigación en trabajos futuros se muestran en el capítulo 7, además de contener esta tesis una serie de anexos que permiten ampliar la información de aspectos en específico.



## Capítulo 1 Aspectos preliminares

---

### 1.1 Planteamiento del tema

La generación de residuos sólidos urbanos (RSU) es uno de los fenómenos que más impacto tiene sobre el medio ambiente y sus recursos, debido a la creciente demanda de productos que tienen los seres humanos, al consumo de recursos naturales y al incumplimiento de normas o estándares al respecto del manejo de los residuos en los que se terminan convirtiendo los artículos de consumo.

Algunos de estos residuos provienen de diferentes actividades domiciliarias, entre ellas la elaboración de artesanías, Figura 1.1.



Figura 1.1. Artesanías. Fuente: Elaboración propia.

En la región mixteca y parte de valles centrales se elaboran diversas artesanías de fibra sintética (Polipropileno), que tiene las siguientes características: tipo charrito (fibra delgada) con un ancho de 3 mm, grosor de 0.28 a 0.32 mm, largo de 115 cm, Figura 1.2, tipo regular (fibra gruesa), ancho de 5 mm, grosor de 0.35 a 0.43 mm, largo de 115 cm, Figura 1.3, y fibra tipo rollo con un ancho de 6 mm, conteniendo 210 m aprox., Figura 1.4. Cada presentación permite crear productos con diferente tamaño y rigidez, utilizando el largo total o secciones en el caso de la fibra charrito o regular, y para la fibra de rollo se corta a la medida.



Figura 1.2. Fibra charrito. Fuente: Elaboración propia.



Figura 1.3. Fibra regular. Fuente: Elaboración propia.



Figura 1.4. Fibra de rollo. Fuente: Elaboración propia.

La elaboración de cada artesanía genera residuos en la etapa de acabado, que generalmente terminan en una incineración domiciliar con otros residuos de casa donde en el mejor de los casos se aprovecha la energía calorífica, o se tira a la intemperie en las calles, barrancos o zonas de cultivo, Figura 1.5.



Figura 1.5. Residuos de fibra sintética. Fuente: Elaboración propia.

Considerando un total de 1260 artesanos de tiempo completo ubicados en el municipio de San Jerónimo Sosola, y las comunidades de Santa Catarina Adequez y Santa María Tinú, se proyecta una generación de 500 kg de residuos semanales, donde cada artesano aporta en promedio 0.307 kg, cantidad estimada debido a que la elaboración de artesanías se realiza en conjunto con otras actividades (*Información obtenida a través de investigación de campo*).

El reciclaje es una tendencia sobre el manejo de residuos que tiene como finalidad optimizar recursos, disminuir la generación de basura, propiciar la separación e introducir los mismos al sistema productivo para generar artículos útiles al hombre (*Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000e*). Este proceso se aplica cuando los productos ya no pueden ser utilizados para su objetivo general, transformándolos en materia prima para procesarla nuevamente en aplicaciones no alimentarias debido al cumplimiento de requisitos sanitarios que deben garantizarse (*Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000e*).

El reciclaje de plástico en forma doméstica plantea un consumo energético menor en recolección, transporte y procesamiento del plástico, reduciendo así de 70 a 80% de consumo energético al producirse un nuevo producto en comparación a utilizar el 100% de material virgen. La Ethical Filament Foundation, que actúa ayudando a los recolectores de vertederos (EU), sugiere que algunas de esas personas podrían elevar su nivel de vida dedicándose al reciclado doméstico de plásticos (*Kreiger, Mulder, Glover y Perce, 2014*).

El reciclaje en la extrusión de filamento para impresoras 3D es un área de oportunidad que se está optando a nivel mundial a partir de residuos del mismo filamento comercial o con residuos comunes, ejemplo de ello es el proyecto Recycle Bot en Michigan Tech, 2014, desarrollado por un equipo investigador



a cargo de Joshua Pearce quien recicla botellas de polietileno para producir este filamento (*Kreiger M. et al., 2014*).

Haciendo énfasis en la impresora 3D, es un proceso de manufactura industrial que tiene como potencial la reducción de la demanda de recursos y energías como procesos relacionados a la emisión de CO<sub>2</sub> por unidad de PIB (Producto Interno Bruto). *Gebler, Schoot y Visser (2014)* mencionan que el potencial de mercado global a corto plazo de la impresora 3D, se estima para el año 2025 entre 230 y 550 billones de dólares.

El reciclaje doméstico que genera un producto de consumo mundial como lo es el filamento para impresora 3D, es una oportunidad para el desarrollo de proyectos de alto impacto e innovación tecnológica, aplicadas en zonas donde existe carencia de conocimientos acerca de las nuevas tendencias tecnológicas. Considerado como proyecto de alto impacto “ya que no solo busca obtener una rentabilidad económica, sino que se usan iniciativas empresariales para generar un impacto social y para contribuir positivamente con el medio ambiente” (*Díaz, 2014*). Es por ello que se plantea la recuperación de los residuos de fibra sintética que tienen la ventaja de contar con una gama de 41 colores, una generación de residuos proyectada a 500 kg semanales en la población de estudio, degradación mínima por el poco tiempo de procesamiento en la manufactura artesanal, además de proponer una solución de manejo de residuos al evitar su incineración o descomposición a la intemperie impulsando a transformarlo en un producto de alto valor agregado que le confiere el mercado.

## **1.2 Problema a resolver**

La finalidad de este proyecto de tesis es el diseño de una máquina extrusora de polipropileno a nivel experimental, especificando sus componentes para el armado y el funcionamiento general, sustentado en las características particulares del material a procesar, para que una vez llevada a la construcción sea capaz de transformar los residuos de polipropileno en un nuevo producto en forma de filamento. Ofreciendo así las especificaciones para el diseño de una máquina con una capacidad de producción de 12.5 kg por hora de polipropileno reciclado (desechos de fibra sintética) para aprovechar 500 kg generados en la población de estudio.

Createbot México, es una empresa comercializadora de filamento de polipropileno, el cual tiene un comportamiento físico como el que se muestra en la Tabla 1.1. Estos datos proporcionan una guía de comportamiento esperado del material a reciclar.

Tabla 1.1. Propiedades del polipropileno para impresora 3D. Fuente: (CREATEBOT México, 2017).

Polipropileno		
Pruebas	Método	Dato
Densidad	ISO 1183	0.95 g/cm <sup>3</sup>
Módulo de tracción	ISO 527-1.-2	1600 MPa
Resistencia a la tracción	ISO 527-1.-2/50	40 MPa
Deformación por tracción	ISO 527-1.-2/50	10%
Módulo de flexión	ISO 1873-2	1800 MPa
Dureza	ISO 868	80
Temperatura de reblandecimiento Vicat	ISO 306	160°C
Porcentaje de contracción	ISO 294-4	0.5%

El diseño propuesto es a nivel de producto personalizado, estableciendo las restricciones necesarias a las variables de diseño como son: la función, dimensiones y materiales para cada uno de los componentes de la máquina (motor, reductor de velocidad, tolva, barril, husillo, plato rompedor, dado, unidades de enfriamiento, tiro, medición y embobinado) de acuerdo con las necesidades de un cliente en específico.

Utilizando el principio de funcionamiento de extrusión mediante un husillo, dividido en 3 zonas conforme a su función: alimentación, compresión y dosificación, con un sistema de calentamiento que permite la obtención de un perfil continuo, con la posibilidad de configurarse con base en el material a procesar y una capacidad de producción dentro de las máquinas ya existentes, además de estar en un rango de costo general entre los \$ 300.00 a \$ 2,500 USD en relación al mercado.

Al diseñarse una extrusora que procese un solo residuo y un producto final ofrece ventajas en el nivel de productividad, la calidad final de producto y la facilidad de operación. Debido a que el proceso ya existe, este tiene una serie de variables a controlar muy específicas y particulares, entre ellas: temperatura, velocidad de giro del husillo, presión generada por el plástico fundido, que definen la relación de componentes para garantizar la plastificación y homogeneidad del material, evitando cualquier riesgo de degradación.

### 1.3 Justificación

La necesidad de generar proyectos en el estado de Oaxaca está fundamentada tanto en el plan de desarrollo Estatal, como en el regional de la Mixteca y Valles Centrales. Además de considerar que egresan 588,692 profesionistas a nivel nacional, cifra registrada en el ciclo escolar 2014 – 2015 (CIEES, 2016), profesionistas que cuentan con los conocimientos base para generar proyectos de forma interdisciplinaria, o enfocados a su campo de estudio. Particularmente en el estado de Oaxaca, se pueden identificar diferentes carencias económicas, las cuales se pueden solucionar con el desarrollo de proyectos creados por los jóvenes o profesionistas que necesitan de fuentes de empleo.

El presente proyecto de tesis, al ser llevado a la práctica busca crear fuentes de empleo y proporcionar nuevos ingresos a las familias que se dedican a realizar artesanías de fibra sintética. Esto tomando en cuenta los siguientes aspectos:

1. Aprovechar la actividad artesanal que se realiza en las comunidades.
2. El manejo y recuperación de residuos enfocado al cuidado del medio ambiente.

Con estos dos aspectos, se tiene como finalidad establecer una línea de reciclaje doméstico en las poblaciones donde la principal actividad económica es la elaboración de artesanías de fibra sintética. La presente tesis tiene su aporte en la investigación y diseño de una extrusora de filamento para impresora 3D que se adecúe a las características físicas de las fibras sintéticas, con una capacidad de producción mínima, con el fin de establecer los parámetros para que a largo plazo se desarrolle maquinaria con capacidad de producción de 12.5 kg/h a fin de recuperar 500 kg de residuos generados a la semana que de otra manera se incinerarían o se tirarían a cielo abierto. Creando así un vínculo entre la nueva tecnología que se está desarrollando y la actividad que los artesanos realizan, aplicando los conocimientos obtenidos dentro del plan de estudios enfocado hacia actividades de manufactura artesanal con las que cuenta el estado de Oaxaca.

#### 1.4 Metodología

El desarrollo del proyecto se basa en la metodología de “Diseño y desarrollo de productos” recuperada de *Ulrich y Eppinger (2012)*.

La cual consta de las siguientes etapas.

- Planeación
- Desarrollo del concepto
- Diseño en el nivel sistema
- Diseño de detalle
- Pruebas y refinamiento
- Inicio de producción

Con base en que los objetivos de la presente tesis son cumplidos hasta el diseño de la extrusora, teniendo como producto final un modelo 3D y sus planos, se retomaron las siguientes etapas (Figura 1.6):

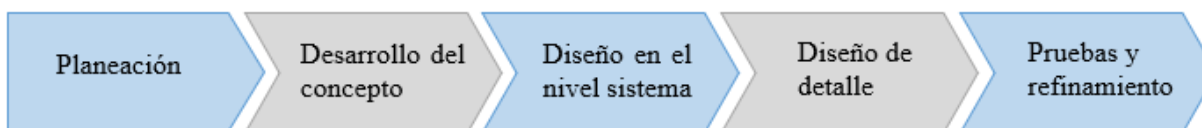


Figura 1.6. Metodología. Fuente: (Ulrich y Eppinger, 2012).

Apartados de la tesis, estructurados de la siguiente manera:

#### Capítulo 1: Planeación

En este capítulo se establecen los objetivos y limitaciones para el desarrollo del proyecto a nivel general, integrado dentro de este capítulo.

#### Capítulo 2: Marco teórico

Debido a la necesidad de un dominio de conceptos previo al desarrollo del proyecto, se incluyó un apartado para dar información general antes de los siguientes capítulos.

#### Capítulo 3: Desarrollo del concepto

En este apartado se incluyen los pasos para la generación del concepto de diseño:

- Identificación de las necesidades del cliente
- Especificaciones del cliente
- Generación de conceptos del producto

#### Capítulo 4: Diseño a nivel sistema

Incluye los cálculos de los componentes de cada una de las unidades para generar la arquitectura final (términos físicos y funcionales) del producto.

#### Capítulo 5: Diseño de detalle

Delimitación de componentes básicos del área de control y eléctrico, para el correspondiente ensamblaje general y la verificación de información mediante software CAD/CAE (implícita la etapa de pruebas y refinamiento).

#### Capítulo 6: Prototipo virtual

Incluye láminas de presentación del producto, así como su despiece y la relación de los componentes a manufacturar y comprar.

#### Capítulo 7: Conclusiones y trabajo a futuro

Resultados de la presente tesis y propuestas de intervención de otras áreas para la complementación del proyecto.

## **1.5 Planeación**

Una vez identificada la oportunidad a desarrollar es importante la limitación de un segmento de mercado que permita la obtención de información para el diseño del producto y el desarrollo de sus funciones.

Al surgir la oportunidad del proyecto a través de la identificación de una problemática no atacada desde esta perspectiva, no existe un segmento de mercado definido con usuarios que identifiquen sus necesidades al utilizar la máquina y la descripción del ambiente de funcionamiento.

Tomando en consideración lo anterior se realizó una aproximación de un segmento de mercado y se define al usuario ideal y la función principal a realizar.

### **1.5.1 Segmento de mercado.**

Se considera en este estudio a los artesanos de fibra sintética de las comunidades de Santa María Tinú, Santa Catarina Adequez, y las pertenecientes al municipio de San Jerónimo Sosola, conformando así la unidad de muestreo de la cual se obtiene la información sobre la generación de residuos de PP (Polipropileno).

#### **1.5.1.1. Usuario/ operador**

Persona con capacitación básica para el manejo de controles, principios de funcionamiento, ensamblaje y limpieza del equipo.

#### **1.5.1.2 Función principal**

Transformación de residuos de PP a filamento para impresora 3D, adecuando los parámetros de funcionamiento de una extrusora a las características de un material específico.

## **1.5.2 Objetivos**

La presente investigación cubre los siguientes aspectos:

### **1.5.2.1 Objetivo general**

Diseñar una extrusora de filamento de impresora 3D fabricado a partir de polipropileno reciclado (desechos de fibra sintética) con una capacidad de producción entre 0.200 a 0.500 kg/h.

### **1.5.2.2 Objetivos específicos**

1. Caracterización del material a procesar: polipropileno reciclado y filamento de polipropileno comercial para impresora 3D con base en los datos necesarios para el diseño de la extrusora
2. Análisis y síntesis de la extrusora
3. Conceptualizar la extrusora
4. Evaluación experimental del comportamiento térmico del polímero reciclado

### 1.5.2.3 Metas

- Tabla de características del polipropileno y filamento para impresora 3D
- Diagrama del proceso de extrusión
- Esquema de los componentes con su importancia dentro del proceso
- Memoria de cálculo del diseño de la extrusora para los siguientes componentes: Motor, tolva, barril, husillo, dado, plato rompedor, mallas y sistemas externos de enfriamiento, tiro, medición y embobinado
- Relación de componentes estándares, precio y proveedor
- Relación de componentes a manufacturar
- Planos de los componentes de la extrusora
- Diagrama de ensamblaje
- Diagrama de funcionamiento
- Memoria de estudios experimentales
- Relación de componentes y planos para construcción
- Planos de piezas y ensamblaje final

### 1.5.3 Condiciones o limitantes del diseño

- Parámetros de procesamiento debido a las características físicas del material
- Características del filamento a obtener
- Procesos de manufactura disponibles en la UTM y costos de construcción del prototipo
- Propiedades y calidad de los materiales
- Control adecuado de los parámetros de funcionamiento de la maquinaria
- Capacidad de producción
- Fuente de energía: eléctrica
- Uso de componentes comerciales para disminuir costos y tiempos de manufactura
- Fácil manejo y control de maquinaria
- Fácil limpieza de componentes
- Tecnologías por utilizar, se sustentarán en el principio básico de la extrusión, en el que la fundición y transporte se hace por medio de un husillo dentro de un barril con calentadores eléctricos.

### 1.5.4 Declaración de la misión

De acuerdo con *Ulrich y Eppinger (2012)*, la declaración de la misión es una descripción breve del producto que permite identificar la función básica que generará una propuesta de valor en comparación con otros productos del mercado, por lo que ésta se detalla a continuación:

Función básica: fundir la materia prima (residuos de PP) para elaborar un nuevo producto.

Propuesta de valor: Controla los parámetros de extrusión de acuerdo con el material a procesar, PP reciclado.

#### 1.5.4.1 Metas

Tiempo: Realizar el proyecto en un tiempo no mayor a 6 meses.

Costo y calidad: Comparar precios de proveedores y manufactura con el fin de tener bajos costos y calidad necesarios para el funcionamiento del prototipo.

#### **1.5.4.2. Mercado objetivo**

Artesanos de las comunidades de Santa María Tinú, Santa Catarina Adequez, y las pertenecientes al municipio de San Jerónimo Sosola.

#### **1.5.4.3 Restricciones**

- Personal:

Conocimientos base para el diseño de componentes mecánicos. Necesidad de investigación y asesoría en temas de conformado de polímeros, transferencia de calor, diseño de extrusoras, circuitos eléctricos y componentes de control.

- Manufactura:

Habilidad y capacidades desarrolladas en el transcurso de la carrera.

Restricción de operaciones con base en la complejidad y maquinaria disponible en los talleres de la universidad contando con maquinaria y herramienta básica, así como torno convencional, fresadora CNC e impresora 3D.

## Capítulo 2 Marco teórico

---

### 2.1 Historia de las extrusoras

La industria del plástico continúa en desarrollo, desde sus inicios el uso de materiales poliméricos como el hule natural dependían de procedimientos manuales de baja eficiencia y altos desperdicios, condiciones que han hecho evolucionar el uso de la maquinaria en diferentes aplicaciones. Como por ejemplo la extrusión, que es un método de producción que nace de la necesidad de producir artículos plásticos de gran volumen, de manera continua y a bajos costos.

*El Instituto Mexicano del Plástico Industrial (2000b)* define a la extrusión como un “proceso de transformación primario, donde el plástico se funde y plastifica por medio de un husillo, impulsándolo a salir bajo presión a través de una boquilla que le confiere una forma definida y continua, para finalmente recibir un enfriamiento que provoca su solidificación y proporciona estabilidad a la figura obtenida. Normalmente la materia prima son pellets o gránulos de plástico, aunque los polvos, hojuelas compactadas y moliendas son utilizados también de forma exitosa”.

Para el año de 1845 se tienen datos de los primeros intentos de desarrollo de maquinaria de extrusión para transformación de gutapercha, por Bewley, y catorce años después en 1859, Drake realiza en Norteamérica la primera extracción comercial de petróleo iniciando la industrialización de la obtención de materias primas. Pero es hasta 1879 que M. Gray patenta el primer extrusor, ya con diseños más adecuados y con muchos de los elementos que tienen las extrusoras actuales, dentro de ellos el husillo (tornillo sin fin), denominado Arquimedeano generado por el sabio griego Arquímedes (*Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000b*). En los últimos 50 años de historia del proceso de extrusión, se ha caracterizado por la mejora tecnológica de los equipos para encaminarlos al perfeccionamiento, utilizando los avances en equipos eléctricos y electrónicos que se van desarrollando, así como la diversidad de materiales que se han creado, existiendo una diversidad de combinaciones (*Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000b*).

### 2.2 Mercado actual de extrusoras

Las extrusoras al igual que otras máquinas, se pueden clasificar de acuerdo con su capacidad de producción y productos fabricados. Para el propósito de esta investigación, se clasificaron a las extrusoras ofertadas en el mercado en 3 categorías; extrusoras domésticas con una producción menor a 5 kg/h, extrusoras semi-industriales de 5 a 60 kg/h y extrusoras industriales mayores a 60 kg/h, que produzcan hilos o filamento de diferentes materiales.

Con base en esto se analizaron el precio y las ventajas que ofrece cada modelo de extrusora para conocer el mercado y los parámetros de costo de la maquinaria, observando las siguientes características



(para consultar algunos de estas máquinas ver el *anexo A: Extrusoras semi-industriales, industriales y domésticas*).

### **2.2.1 Extrusoras semi-industriales**

La industria del plástico tiene maquinaria para el desarrollo de productos en lotes medianos, aunque la historia de la extrusión se inició con bajos niveles de producción, se continúa desarrollando maquinaria con niveles de producción entre 5 y 60 kg/h, que satisfacen a un grupo de empresas que producen lotes medianos de productos en una jornada laboral.

La empresa Friend machinery, ha desarrollado maquinaria para la producción de filamentos para impresora 3D, con niveles de producción que van desde los 5 a 25 kg/h, con precios que varían entre los \$4,000.00 y \$9,000.00 USD, sujetos a la tasa de cambio del dólar, costos de envío y nacionalización de productos en caso de ser necesarios.

### **2.2.2 Extrusoras industriales**

Este tipo de maquinaria desarrollada para satisfacer las necesidades de mayor producción por hora, reducción de tiempos, mayores niveles de automatización para cubrir la demanda de los mercados, ha tenido un gran desarrollo en los últimos años debido a los avances tecnológicos que le permiten tener mayor control de temperatura, sistemas de calentamiento y enfriamiento, así como la velocidad de giro del husillo.

Estas extrusoras con una producción de 62.5 a 1000 kg/h, se cotizan en el mercado con costos de \$10,000.00 a \$100,000.00 USD sujetos igualmente a las tasas de cambio y a fletes principalmente ya que los productos o componentes se importan.

### **2.2.3 Extrusoras domésticas**

Este tipo de maquinarias, que siguen el mismo principio de funcionamiento que las extrusoras industriales, pero a una escala menor en sus componentes tienen una capacidad de producción menor a los 5 kg/h. Sus costos son relativamente bajos en comparación a las extrusoras antes mencionadas, estos van desde los \$300.00 a \$2,500.00 USD, diseñados para satisfacer las necesidades de clientes que buscan crear su propio producto con material polimérico virgen o residuos de plástico. Su principal producto es el filamento para impresora 3D, tecnología que está en su etapa de desarrollo, y con un potencial de mercado estimado para el año 2025 entre 230 y 550 billones de dólares. Además de dar oportunidad de modelos de negocio enfocados al reciclaje doméstico de material polimérico.

## **2.3 Extrusora**

La extrusora es una máquina en la que se realiza el proceso de extrusión o estirado continuo de un perfil de longitud ilimitada. En su mayoría se utiliza un tornillo sin fin que impulsa el material fundido o

gomoso a lo largo del barril de la extrusora para crear el perfil deseado, por encima de las extrusoras de pistón, sin husillo (disco o hidrodinámicas) y combinadas (de disco y husillo, de husillo con cámara de fusión, etc.).

### 2.3.1 Tipos de extrusora

Dentro de las extrusoras de husillo, estas se pueden clasificar por el número de husillos que la conforman, teniendo:

Extrusoras monohusillo. Cuentan con un husillo en el barril que tiene la capacidad de transportar el material a lo largo del barril para lograr que se funda y poderlo impulsar a través de la boquilla.

Extrusoras de doble husillo. Son máquinas que tienen dos husillos de igual longitud dentro de un barril. El hecho de contar con dos husillos al interior posibilita variantes en su configuración por el tipo de engranaje y su sentido de giro.

Debido a que el material a procesar es polipropileno y a su predisposición de perder la viscosidad por cambios de temperatura o esfuerzos cortantes, se recomienda utilizar una extrusora monohusillo (Morton, 2012), por lo que éste se explicará a continuación.

### 2.3.2 Componentes

La extrusora monohusillo cuenta con una serie de componentes para crear un producto terminado, estos se describen a detalle en la Figura 2.1 y a nivel general en la Figura 2.2, la descripción de cada componente se desarrolla de acuerdo con el *Instituto Mexicano del Plástico Industrial (2000e)* y Ramos (2013).

1. Reductor de velocidad: serie de engranajes de diferentes radios que reducen las revoluciones por minuto recibidas por el motor del extrusor.
2. Tolva: es el depósito de la materia prima, generalmente con una geometría de cono truncado que le permite dosificar el material hacia el barril sin lograr estancamientos.

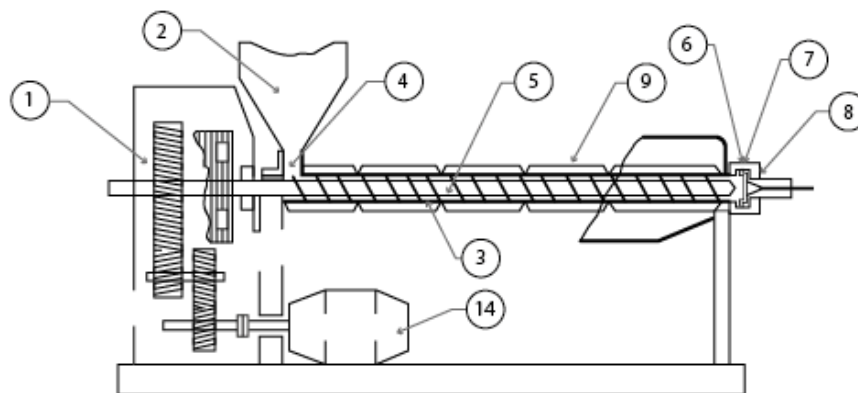


Figura 2.1. Diagrama típico de un extrusor. Fuente: (Ramos, 2013).

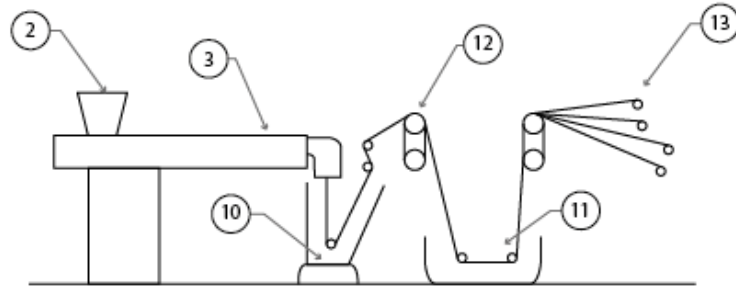


Figura 2.2. Arreglo típico para producir monofilamento. Fuente: (Ramos, 2013).

3. **Barril:** es el cilindro metálico que cubre al husillo, considerándose en conjunto como el cuerpo principal de la extrusora.
4. **Garganta de alimentación:** ranura o área en el barril, que sirve de conexión entre la tolva y el husillo.
5. **Husillo:** es el corazón de la extrusora, su geometría es similar a un tornillo sin fin, con la diferencia en la profundidad de sus canales, que le permiten realizar la función de “coumpounding”, mezclado de materiales.

El husillo cuenta con 3 zonas principales (Figura 2.3):

**Zona de alimentación:** zona en la cual se adentra la materia prima al interior del barril para llenar los alabes de husillo y transportarlo a la zona de compresión. Es importante mantenerla a temperatura ambiente, para permitir la entrada de material.

**Zona de compresión:** es la parte intermedia del husillo en la que se inicia la fundición del material, los gases generados se eliminan enviándolos a la parte de alimentación al reducir la profundidad del canal, y mediante esfuerzos cortantes y la temperatura del exterior se funde por completo el material.

**Zona de dosificación:** es el área donde se bombea y homogeniza el material para pasar a través del perfil, en esta zona se mantiene la profundidad del canal constante al igual que la temperatura y la presión.

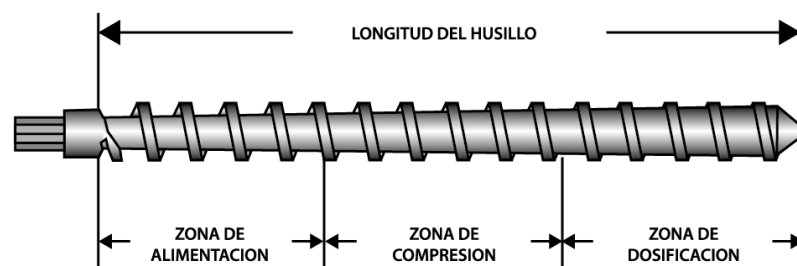


Figura 2.3. Esquema del husillo. Fuente: (Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000b).

6. **Plato o placa rompedora:** es una placa de espesor apropiado con perforaciones circulares por donde pasa el material con la finalidad de soportar las mallas y borrar la memoria de giro del material para evitar la torsión de las piezas al enfriarse.

7. Mallas: son paquetes de mallas que permiten la retención de impurezas y evitan las marcas superficiales en la pieza final, sobre todo en perfiles de dimensiones pequeñas y películas o cuando se utiliza material reciclado.
8. Dado: es el elemento principal del extrusor ya que confiere la forma y el acabado al producto final.
9. Sistema de calentamiento: Son resistencias que comúnmente proporcionan la energía térmica que necesita el barril para iniciar la fase de fundición del termoplástico.
10. Sistema de enfriamiento: La finalidad de este sistema radica en remover el calor excedente del material, para lograr su estabilidad dimensional de forma paulatina.
11. Calibración: Son sistemas que tienen la función de verificar el espesor del perfil constantemente a fin de realizar las modificaciones necesarias para obtener el producto dentro de las exigencias del cliente.
12. Unidad de tiro: Es el sistema que jala el producto firmemente manteniendo una velocidad constante que se reflejará en la calidad del producto.
13. Embobinado: Es el sistema que permite enrollar el perfil en una bobina con la finalidad de almacenamiento, transporte y uso en esta presentación.
14. Motor: encargado de proporcionar el torque y la velocidad al husillo para lograr el proceso de fusión.

La Figura 2.2, es considerada como una línea de producción, debido a que contiene una disposición de máquinas en la que cada una realiza un trabajo específico en un tiempo limitado, para lograr un producto final, monofilamento.

La empresa Friend machinery, cuenta con una línea de extrusión FLD-45 para filamento de impresora 3D con un costo de \$570,000.00 MXN y capacidad de producción de 18 a 22 kg/h, que cuenta con alimentador, secador de tolva, extrusor, tanque de agua caliente, tanque de enfriamiento, máquina de medición láser, unidad de tiro, bobinadora, acumulador de filamentos, máquina de embalaje y mezclador de color.

Cada uno de los componentes tiene una función en particular, y es necesario que cada uno de ellos trabaje coordinadamente debido a que el proceso es continuo. De acuerdo con el producto final y el material a utilizar se agregan o eliminan componentes para cumplir los estándares de calidad.

## **2.4 Inestabilidad en la extrusión**

Existen diferentes efectos negativos que pueden suceder durante el proceso de la extrusión provocando que el producto no tenga las características deseables. Algunos de estos efectos según *Ramos (2013)*, son:

Aparición de porosidad en el extruido: porosidad debido a la vaporización de agua absorbida por el material o de aditivos y productos gaseosos por la degradación del material plástico.

Plate-out: depósito de aditivos en la parte delantera del husillo.

Efectos en la superficie: superficies tersas, pero mates o brillante pero no homogéneo.

**Hinchamiento del extruido:** efecto elástico en el que la sección transversal del extruido es mayor que la sección transversal del dado (Figura 2.4).

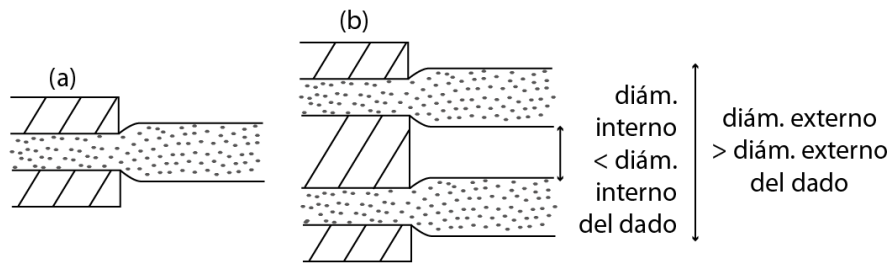


Figura 2.4. Hinchamiento en el dado: a) una varilla y b) una tubería. Fuente: (Morton, 2012).

**Fractura del fundido (Melt fracture):** Ocurre cuando arriba de una cierta velocidad de corte crítica, o velocidad de flujo, la mayoría de los plásticos exhiben distorsiones de forma helicoidal (Figura 2.5).

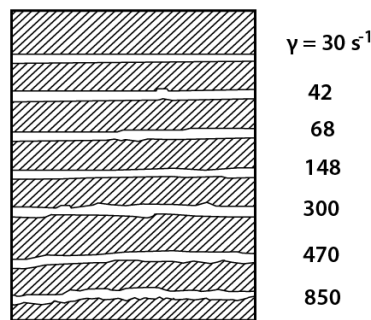


Figura 2.5. Efecto de la velocidad de corte en la distorsión de un fluido. Fuente: (Ramos, 2013).

**Resonancia de estiramiento:** Fenómeno en el que el proceso de extrusión para la fabricación de filamento o película plana se llegan a observar fluctuaciones periódicas en el diámetro del filamento (o en el ancho de la película) (Figura 2.6).

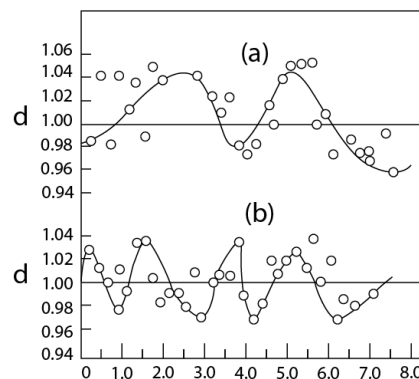


Figura 2.6. Variación en diámetro de un filamento. Relación de estiramientos a)23, b)83. Fuente: (Ramos, 2013).

**Superficie rugosa o piel de tiburón (sharkskin):** Efecto que consiste en una serie de fisuras muy pequeñas (grietas), perpendiculares a la dirección de extrusión. Se manifiesta inicialmente con una

aparición de acabado mate, y se agrava a medida que aumenta la velocidad de flujo. El resultado es el “abambuamiento” (Figura 2.7), llamado así porque la pieza sometida a extrusión se asemeja en apariencia al bambú.

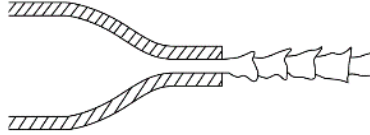


Figura 2.7. "Abambuamiento" en un dado. Fuente: (Ramos, 2013).

Cada una de estas inestabilidades tiene una solución en particular que puede consultarse en el capítulo 6. Características del material e inestabilidades en extrusión (Ramos, 2013).

La pertinencia de esta información se debe a que la mayoría de las soluciones radica en poder modificar los siguientes parámetros:

- Perfil de temperatura en el barril o en el dado
- Aumento o reducción de las velocidades de extrusión
- Formulación de la mezcla a procesar
- Requerimientos de enfriamiento del perfil extruido

O considerar desde el inicio, las geometrías adecuadas para procesar el material como son:

- Zona de venteo en el barril
- Presión en la punta del dado, reflejado en la longitud y el ángulo del mismo.

## 2.5 Polímeros

“Un polímero es una sustancia cuyas moléculas forman cadenas largas, por lo común de varios millares de átomos de longitud. Los polímeros tienen ciertas características y difieren uno de otro, por la naturaleza química y física de sus unidades repetitivas en las cadenas.” (Morton, 2012).

Esta unidad recibe el nombre de monómero que significa “una parte”, de acuerdo con el tipo de material utilizado en la conformación de la estructura se retoma el nombre químico de cada uno de ellos para la designación del polímero.

### 2.5.1 Nomenclatura

Los polímeros reciben un acrónimo o sigla para su identificación conforme a la norma ISO 1043, a su vez esta se subdivide en 4 partes para definir los componentes de los materiales (Tabla 2.1 y Tabla 2.2).

Tabla 2.1. Ejemplos de nomenclatura. Fuente (Bombardier Transportation, 2010).

Componente	Tipo	Referencia ISO
Material(es) base	Plásticos	ISO 1043 parte 1
	Cauchos	ISO 1629
	Elastómeros	ISO 18064
Fibras y materiales de refuerzo		ISO 1043 parte 2
Plastificantes		ISO 1043 parte 3
Retardantes de flama		ISO 1043 parte 4

Tabla 2.2. Ejemplo de nomenclatura. Fuente: (Bombardier Transportation, 2010).

ISO 1043 parte 1	ISO 1043 parte 2	ISO 1043 parte 3	ISO 1043 parte 4
Material polimérico base	Fibras	Plastificantes	Retardantes de flama
PP	GF30	P(ELO)	FR (52)

En la siguiente Tabla 2.3 se muestra un extracto de los acrónimos de los plásticos más comunes.

Tabla 2.3. Acrónimos para plásticos. Fuente: (Instituto Mexicano del plástico Industrial, 2000a).

Acrónimo	Nombre
ABS	Acrilonitrilo Butadieno Estireno
HDPE o PEAD	Polietileno de Alta Densidad
LDPE o PEBD	Polietileno de Baja Densidad
PA	Poliamida
PP	Polipropileno
UHMWPE	Polietileno de Ultra Peso Molecular

### 2.5.2 Presentación de los polímeros

Cada proceso requiere de ciertas condiciones para el almacenamiento, sistema de alimentación, dosificación de la materia prima, por lo cual los termoplásticos están disponibles en las siguientes presentaciones:

- Polvos (1-100  $\mu\text{m}$ )
- Pastas
- Pellets (3mm. Aproximadamente)
- Cubos
- Lentejas
- Cilindros
- Aglomerados
- Granulados

### 2.5.3 Clasificación por comportamiento al calor

El *Instituto Mexicano del Plástico Industrial (2000a)*, clasifica a los polímeros de acuerdo con su comportamiento frente a la temperatura en:

- Termoplásticos
- Termofijos o termoestables
- Elastómeros

Con base en las particularidades de cada uno, y la finalidad de esta tesis únicamente se explican las características de los termoplásticos.

#### Termoplásticos

Es un material sólido que tiene estabilidad a temperatura ambiente, pero alcanzando su temperatura de fusión  $T_d$ , el material comienza a pasar a estado líquido, lo que se conoce como fusión.

##### ▪ Amorfos

Son los materiales termoplásticos en los que sus moléculas están en completo desorden. Esto afecta su comportamiento con tendencia a la fragilidad, baja resistencia a la tensión y a productos químicos, con ventajas en transparencia, buena estabilidad dimensional por lo que disminuye su tendencia a deformarse (Figura 2.8).



Figura 2.8. Estructura molecular de un termoplástico amorfo. Fuente: (Ensinger, 2016a).

##### ▪ Cristalinos

Son termoplásticos con moléculas relativamente ordenadas, que le confiere resistencia a la fatiga, al desgaste y a factores químicos, su apariencia es traslúcida y opaca. Presentan desventajas de deformación y encogimiento por la formación de cristales al solidificarse en el proceso de enfriamiento (Figura 2.9).

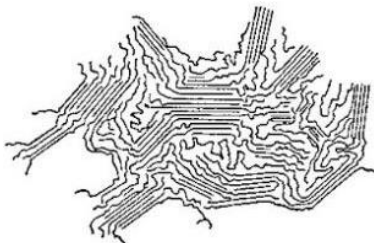


Figura 2.9. Estructura molecular de un termoplástico cristalino. Fuente: (López, 2016).



### 2.5.4 Clasificación por familia

Los diferentes plásticos se agrupan en familias con base en su composición química, particularmente la familia de las poliolefinas se integra por:

- Polietileno de alta densidad
- Polietileno de baja densidad
- Polietileno lineal (PEBD-L)
- Polipropileno
- Copolímero de etileno y acetato de vinilo (EVA)

Fuente: (*Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000a*).

Compartiendo así características físicas que muchas veces los hacen difíciles de identificar entre ellos.

En general las poliolefinas son termoplásticos semicristalinos, dentro de este grupo se encuentran los plásticos de ámbito comercial. Su fórmula química consiste en átomos de carbono (C) e hidrógeno (H), lo que le confiere características de baja densidad, resistencia química, baja absorción de humedad y buenas propiedades de aislamiento eléctrico, entre otras (*Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000d*).

Los materiales con mayor volumen de producción son:

- Polietileno
- Polipropileno

## 2.6 Polipropileno

El polipropileno es un producto petroquímico derivado del propileno, monómero olefínico. El polímero se produce a través de la polimerización por adición, en el que se genera un enlace de elementos como se muestra en la Figura 2.10 (*Morton, 2012*).

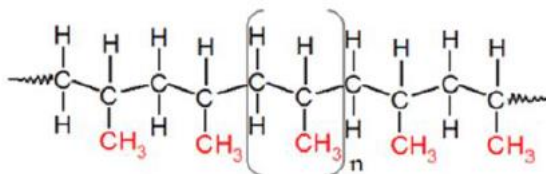


Figura 2.10. Estructura del Polipropileno. Fuente: (*Maddah, 2016*).

### 2.6.1 Clasificación por distribución

De acuerdo con la distribución de los grupos químicos formados, el polipropileno se puede clasificar en polipropileno isotáctico, sindiotáctico y atáctico. De los cuales las estructuras isotácticas o sindiotácticas permiten la formación de regiones ordenadas y de magnitud apreciable, que le confiere rigidez a la

estructura. Es por lo que el polipropileno con este tipo de distribución es apreciado al ser un plástico duro y resistente en comparación con un atáctico, que es blando y no tiene usos prácticos.

El polipropileno tiene la ventaja ante los polímeros de amplio uso con una densidad de  $0.91 \text{ g/cm}^3$ , esto debido a que sus moléculas contienen un voluminoso grupo lateral metilo que, al cristalizarse esta celda unitaria adopta una forma de espiral en el espacio, dando al polímero su baja densidad (*Morton, 2012*).

Las propiedades del polipropileno varían según las condiciones del proceso, los componentes del polímero, la distribución de los componentes, el peso molecular y la distribución del anterior.

### **2.6.2 Clasificación por composición**

Según *Morton (2012)*, existe una clasificación con base en los componentes del polímero, dividiéndose así en dos diferentes tipos de polipropileno:

Homopolímero PP (HPP). Es un material que solo contiene un monómero de propileno en una forma sólida semicristalina.

Copolímero aleatorio (RCP), el cual contiene etileno co-monómero en las cadenas de PP a niveles en el intervalo de 1 a 8%.

En general, los polímeros que consisten en monómeros idénticos se denominan homopolímeros, mientras que en los compuestos poliméricos con más de un tipo de monómero en sus cadenas se conocen como polímeros.

### **2.6.3 Aplicaciones**

A continuación, se mencionan las aplicaciones y procesos de transformación más comunes para el polipropileno según *Harutun (1999)*.

- Fibras
- Flejes
- Películas
- Hoja para termoformado.
- Moldeo por inyección:
- Moldeo por soplado
- Industria automotriz

En conclusión, las aplicaciones más utilizadas son desarrolladas por los procesos de inyección y extrusión, con un 39% y 32.7% respectivamente de consumo de polipropileno a nivel mundial (*Al-Zamil & Brothers Company, 2004*).

## 2.7 Reciclaje

El reciclaje es una de las tendencias sobre el manejo de los residuos, que se define como: “la circulación de materiales dentro de un sistema cerrado con el propósito de optimizar recursos, disminuir la generación de basura, propiciar la separación e introducir los mismos al sistema productivo para generar artículos útiles al hombre” (*Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000e*).

Impactando en el ámbito de la ecología, la economía y ofreciendo soluciones a la escasez de materias primas para fabricar artículos útiles durante una segunda aplicación, utilizados en gran cantidad de aplicaciones no alimentarias, debido a requisitos sanitarios que garantizan (*Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000e*).

### 2.7.1 Clasificación

La clasificación de los desechos plásticos permite la elección de los procesos adecuados para lograr su recuperación, dividiéndose en desechos industriales y basura, de acuerdo con el *Instituto Mexicano del Plástico Industrial (2000e)*. Mientras que los desechos en las fábricas no tienen contacto con el cliente, la basura que se genera en el hogar y el comercio si lo hacen, además de revolveerse con agentes contaminantes, por lo que su recuperación depende de la selección de los materiales.

Para lograr esta separación de la basura es necesario que exista un símbolo que permita la clasificación conforme a sus componentes.

### 2.7.2 Símbolos de identificación

La Norma Mexicana NMX-E-232-CNCP-2011 es la que establece y describe los símbolos de identificación que deben tener los productos fabricados de plástico. Esto en relación al tipo de material para facilitar su selección, separación, acopio, recolección, reciclado y/o reaprovechamiento. El símbolo se compone por tres flechas que forman un triángulo, con un número en el centro y abreviatura en la base (Figura 2.11 y Tabla 2.4).



Figura 2.11. Símbolo de identificación de polímeros. Fuente: (INE, 2017).

Tabla 2.4. Clasificación de tipos de plásticos. Fuente: (INE, 2017).

Núm. de identificación	Abreviatura	Nombre
1	PET o PETE	Poli(etilen tereftalato)
2	PEAD o HDPE	Polietileno de alta densidad
3	PVC o V	Poli(cloruro de vinilo)
4	PEBD o LDPE	Polietileno de baja densidad
5	PP	Polipropileno
6	PS	Poliestireno
7	Cuando se encuentren identificados el o los materiales que constituyen el producto, se debe indicar la o las abreviaturas de estos de acuerdo con la NMX-E-057- deberá indicar la leyenda "OTROS"	

### 2.7.3 Técnicas de reciclaje

La composición de cada uno de los polímeros es la pauta para elegir el tipo de reciclaje a utilizar, para el caso particular de los termoplásticos que tienen la capacidad de fundirse, es más viable optar por una nueva transformación en un producto igual o diferente al de su primera vida útil, por lo que para el polipropileno se recomienda la técnica del reciclado físico, descrito a continuación de acuerdo con el *Instituto Mexicano del Plástico Industrial (2000e)*:

1. Acondicionamiento previo
  - Prelavado
  - Lavado
  - Densificación
  - Compactado
  - Corte con guillotina
2. Molienda
3. Cribado
4. Granulado
5. Pelletizado
  - Frío
  - Caliente
6. Envasado

La extrusora, se considera dentro de la actividad de pelletizado o transformación en un material terminado como se persigue en la finalidad de esta tesis. Las etapas anteriores se pueden o no omitir, esto con base en las características físicas y estado del material a procesar que más adelante se analizan.

## Capítulo 3 Desarrollo del concepto

---

En este capítulo se muestra la información que se utilizó para la generación de las especificaciones del producto, a través de 3 etapas principales:

- Identificación de las necesidades del cliente
- Especificaciones del cliente
- Generación de conceptos del producto

### 3.1 Identificación de las necesidades del cliente

“Necesidad: Cualquier atributo de un potencial producto que es deseado por el cliente” (*Ulrich y Eppinger, 2012*).

Para lograr identificar las necesidades del cliente se siguieron las siguientes dos etapas:

#### 3.1.1 Recopilación

Debido a que no existe un cliente definido se utilizaron diversas fuentes para obtener información acerca del material a procesar y recomendaciones tanto para el manejo del PP, así como para el diseño de una extrusora. Desarrollando los siguientes apartados, para exponer los resultados de dicha investigación.

##### 3.1.1.1 Identificación del material

Para ello se aplicó un método empírico, extraído del cap. 4 del *Instituto Mexicano del Plástico Industrial (2000c)*, el cual consta de las siguientes etapas:

- Muestreo con nombres
- Propiedades mecánicas
- Propiedades ópticas
- Densidad
- Comportamiento a la flama
- Combustibilidad
- Duración de la flama
- Color de la flama
- Color de los humos
- Olor de los vapores
- Alteraciones de la muestra
- Identificación de la muestra

Realizadas las pruebas, el resultado de la identificación se muestra en la Figura 3.1., donde se concluye que el material de las fibras sintéticas es el PP.

*Para mayor detalle de las pruebas realizadas consultar el anexo B. Identificación del material.*

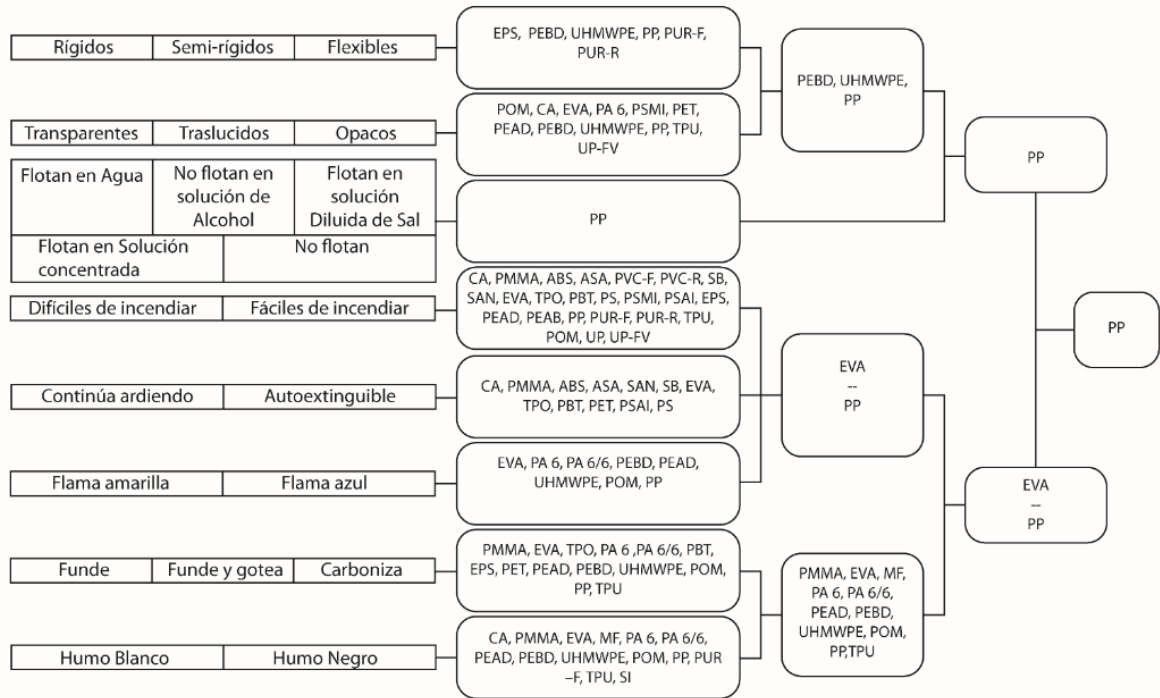


Figura 3.1. Secuencia para Identificación de material. Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.1.2 Caracterización por literatura

De la investigación realizada sobre el PP, sus características y aplicaciones se concluye lo siguiente:

- Clasificación por la regularidad de la disposición de los grupos químicos: Configuración isotáctica.

Es la configuración más comercial, con cerca del 97% de las aplicaciones (*HMC Polymers, 2017*).

Entre sus características, este material presenta tenacidad y flexibilidad al igual que las fibras sintéticas a procesar.

- Clasificación por composición: Homopolímero.

El material de muestra se presenta en forma de fibras, teniendo que las aplicaciones del PP homopolímero son: “extrusión de lámina, envases soplados, tubería, TWQ, BOPP, fibra, multifilamentos e inyección de alta rigidez, entre otros.” (*PROPILCO, 2017*).

- Características generales del Homopolímero

“El Homopolímero posee buenas propiedades dieléctricas, su resistencia a la tensión es excelente en combinación con la elongación (permitiendo ser bi-orientado de manera relativamente sencilla), presenta apariencia translúcida, excelente resistencia a altas temperaturas y buena resistencia a diversos productos químicos” (*PROPILCO, 2017*).

Ver Tablas 3.1 y 3.2, para la caracterización del PP homopolímero y el PP en general (únicamente se retomaron los valores más significativos para cálculos posteriores).

Tabla 3.1. Propiedades mecánicas y térmicas del polipropileno homopolímero. Fuente: (Vamptech, 2017).

Propiedades	Homopolímero	
Índice de fluidez (kg)	3	.07
Resistencia a la tracción (MPa)	34	30
Resistencia a la flexión (MPa)	1310	1170
Temperatura de fragilidad (°C)	+15	0
Punto de reblandecimiento Vicat (°C)	154-150	148

Tabla 3.2. Propiedades generales Polipropileno. Fuente: (Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000d).

Propiedades	Unidades	PP
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	0.90 – 0.91
Densidad en estado fundido (a)	g/cm <sup>3</sup>	0.72
Calor específico (b)	kJ kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup>	1.93
Calor latente de fusión (b)	kJ kg <sup>-1</sup>	100
Calor total para proceso (b)	kJ kg <sup>-1</sup>	550
Coefficiente de fricción (λ) (c)	-	0.67
Conductividad Térmica	1 x 10 <sup>4</sup> Cal cm/s cm <sup>2</sup>	3.3
Cristalinidad	%	60 – 80
Elongación	%	500 – 700
Índice de fluidez Temp/ carga (°c/kg) = 230/2.16	Presión (kg/cm <sup>2</sup> )	3.041
Módulo Elástico	1 x 10 <sup>3</sup> kg/cm <sup>2</sup>	11 – 18
Temperatura de Extrusión	°C	200 – 260
Temperatura de Fusión	°C	160 – 165
Temperatura de reblandecimiento Vicat	°C	140 – 160
Temperatura en el proceso de extrusión (b)	°C	250

Nota: otras fuentes consultadas (a) (Ramos, 2013), (b) (Morton, 2012), (c) (Hall, 1981).

- Viscosidad práctica del material fundido

Para el análisis de la viscosidad se considera que los polímeros fundidos son no newtonianos, por lo común, se adelgazan si se someten a esfuerzos cortantes y la viscosidad decrece al aumentar la temperatura, ver Figura 3.2 y Figura 3.3.

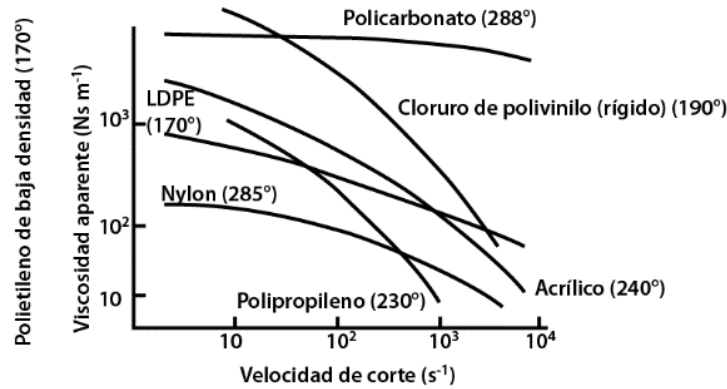


Figura 3.2. Viscosidad aparente contra rapidez de corte de algunos polímeros. Fuente: (Morton, 2012).

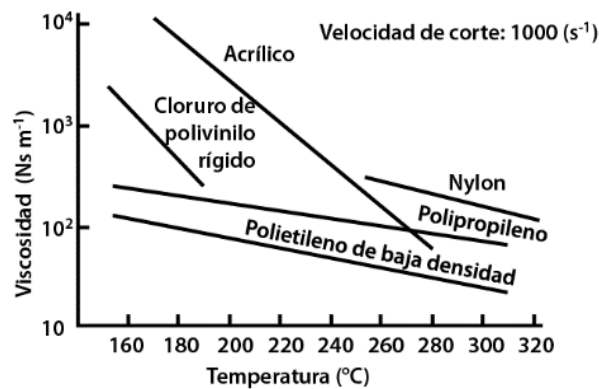


Figura 3.3. Efecto de la temperatura sobre la viscosidad de los polímeros. Fuente: (Morton, 2012).

- **Estructura:** El polipropileno es un 75% cristalino y un 25% amorfo, con un coeficiente de expansión de  $8 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  (Morton, 2012).
- **Porcentaje de contracción:** El polipropileno tiene un rango de encogimiento entre 1.5% y 2.5%, 1.75% recomendado por el *Instituto Mexicano del Plástico Industrial (2000d)*. Valor que puede variar a razón del espesor de la pieza, la dirección del flujo y las condiciones de moldeo (PROPILCO, 2017).
- **Absorción de agua:** “El polipropileno, prácticamente no absorbe humedad evitando su secado previo para procesarlo, manteniendo una buena estabilidad dimensional, incluso en ambientes altamente húmedos. Absorbe menos del 0.02 % de humedad en 24 horas” (*Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000d*).
- **Ventajas y desventajas**

En la Tabla 3.3, se muestran las ventajas y desventajas del PP homopolímero para considerar en la elección de su aplicación.



Tabla 3.3. Ventajas y desventajas del polipropileno. Fuente: (Vamptech, 2017).

Ventajas del PP	Desventajas del PP
Homopolímero	Degradación por UV
Capacidad de proceso. Bueno	Inflamables, pero con retardantes disponibles
Resistencia al impacto. Bueno	Difícil de unir
Rigidez. Bueno	Varios metales aceleran la degradación
Contacto con alimentos. Aceptable	Poca resistencia a impactos a baja temperatura

### 3.1.1.3 Condiciones físicas del material

Para el reprocesamiento de un material, es necesario tomar en cuenta los contaminantes que traen consigo los desechos. Generalmente por las aplicaciones del polipropileno, es común encontrar residuos de alimentos, azúcares, ácidos sulfúricos y tintas.

En la Figura 3.4 se muestran los residuos obtenidos en una primera recolecta que se realizó con algunos artesanos de la unidad de muestreo.

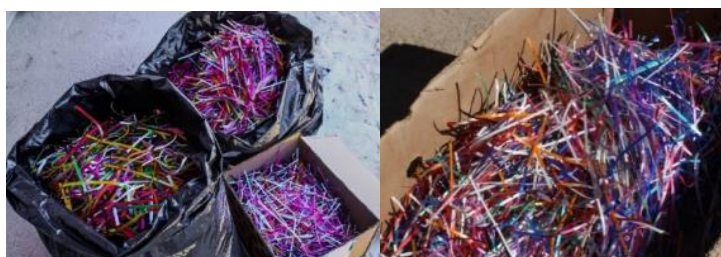


Figura 3.4. Recolección de residuos. Fuente: Elaboración propia.

Analizando la muestra se concluye que las fibras sintéticas llegan limpias sin ningún otro elemento extraño, bajo las siguientes condiciones:

- La materia prima (fibras sintéticas nuevas) llega a los artesanos en buenas condiciones.
- Los artesanos protegen su trabajo contra contaminantes como alimentos durante el proceso de elaboración.
- En la etapa de recorte de fibras sintéticas, estas se almacenan por separado de otros residuos domésticos.

En cuanto al material:

- La recolecta tendrá una tendencia a que el 85% aproximadamente sea de fibra regular y el 15% restante entre fibra charrito y de rollo.
- Se estima que cerca del 70% de fibra recolectada tendrá múltiples colores. Estarán presentes dos colores en el 15% y un solo color de fibra en el 15% restante.
- La longitud de las fibras varía entre 2 mm y 150 mm.

(Información obtenida a través de investigación de campo).

### 3.1.1.4 Degradación térmica

“Degradación es cualquier cambio indeseable en las propiedades que ocurre después de que el material ha sido puesto en servicio. En el caso de los polímeros la degradación puede afectarlos física, química y/o mecánicamente y se refiere al cambio en las propiedades físicas causada por las reacciones que escinden los enlaces” (Posada, 2017).

El polipropileno tiene la capacidad de reprocesarse de 4 a 5 ciclos, en los que sus propiedades originales se mantienen durante los primeros ciclos, reduciendo principalmente la rigidez, viscosidad y peso molecular, con un aumento en el índice de fluidez por cada nuevo proceso (Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000d) (Tabla 3.4).

Tabla 3.4. Comparación de propiedades del PP virgen Vs. Reciclado. Fuente: (Instituto Mexicano del Plástico, 2000d).

Propiedad	Homopolímero	
	Virgen	Regranulado una vez
Tensión a la Ruptura kg/cm <sup>2</sup>	314	267
Módulo de Flexion kg/cm <sup>2</sup>	19,543	19,614
Impacto Izod kg cm / cm	3.26	2.72
HDT @ 4.6 kg/cm <sup>2</sup> /°C	100	105

Para el polipropileno, según el INSHT (2017) los datos de degradación térmica son los siguientes:

Temperatura de degradación: 200°C

Productos emitidos:

- Hidrocarburos C2-C12 (mayoritariamente saturados)
- Acetona y metiletilcetona
- Formaldehído, acetaldehído, acroleína.
- Ácidos acético y crotónico
- Dióxido de carbono.
- Gases y productos volátiles (volatilización y descomposición de aditivos)

Los humos de PP emitidos en degradación térmica son biológicamente activos. Gases y vapores tóxicos e irritantes.

#### 3.1.1.4.1 Prueba de fundición de residuos

Mediante una inyectora en el taller de plásticos de la UTM, se realizó una prueba de inyección de material tipo charrito con diferentes pigmentos, con el fin de ver el comportamiento durante la fundición. La inyectora se comporta de la misma forma que una extrusora al utilizar un tornillo sin fin dentro de un barril calentado por resistencias, a diferencia de la extrusora una inyectora no tiene flujo continuo de

material, y en el modelo con el que cuenta la universidad se desconoce si permite la salida de gases ocasionados durante la fundición además de no contar con un control de temperaturas preciso.



Figura 3.5. Prueba de inyección. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.5 se muestran de izquierda a derecha:

1. Muestras de fibra charrito para realizar la prueba
2. Inyectora
3. Limpieza de la inyectora, debido a que contenía residuos de una fundición anterior las fibras se mezclaron en una baja proporción. El polímero fundido salía constante con algunos residuos sin fundirse por completo. El color fue la mezcla de todos los pigmentos. La temperatura de proceso se estimó en 250°C durante la prueba de inyección.
4. Prueba de fundición, los residuos se fundieron, debido a que el termostato de la inyectora no tenía un control preciso de la temperatura, se mantenía una temperatura de proceso entre 250 y 300°C. El extruido no era constante y contenía burbujas de aire dentro del material. Si la temperatura alcanzaba los 300°C el material se degradaba por completo, comportándose como un líquido en la salida de la boquilla.

Del experimento se concluye que:

- Se generan gases dentro de la fundición, pero se desconoce si estos no tienen salida natural hacia la tolva de alimentación.
- El color de los pigmentos al ser mezclados genera un color similar al negro, pero no se conoce si el pigmento se degrada o se conserva después del proceso.

#### 3.1.1.4.2 Aditivos

Dentro de los aditivos que se utilizan para el PP, se encuentran los siguientes:

##### Antioxidantes

“Los antioxidantes evitan la oxidación durante el proceso de fabricación y protegen la estructura del polímero durante la vida útil del producto. Sin protección sería imposible obtener satisfactoriamente el polipropileno, ya que sería inaceptable la pérdida de ciertas características” (Morton, 2012).

De acuerdo con el *INSHT (2017)* el polipropileno cuenta con los siguientes aditivos:

Estabilizantes y antioxidantes: Fenoles, aminas, tiocompuestos, estearato cálcico.

Cargas y pigmentos: Negro de humo, óxido de titanio-anatasa, óxido de cromo hidratado, fibra de vidrio (hasta 30% en variedad reforzada).

Antiestáticos: Sales amónicas y ésteres glicólicos

Los cuales provocan los siguientes efectos según *UNIOVI (2017)*:

- El negro de humo (2%) filtra los rayos ultravioletas y evita la fotooxidación. La adición de antioxidantes como (fenoles sustituidos y aminas aromáticas) reducen la oxidación por calor.
- Los agentes antiestáticos, reducen las cargas estáticas que se originan durante la transformación y mecanizado del polipropileno.
- Las fibras reforzantes aumentan la rigidez y dureza, disminuyendo el coeficiente de dilatación térmicas, entre otros efectos.
- El polipropileno no admite plastificantes internos dado su alto grado de cristalinidad, pero si lubricantes externos que mejoran su aptitud al procesamiento, con una concentración empleada normalmente entre 0.5 y 1.0 phr (partes por 100 de resina) según *Beltran y Marcilla (2012)*.

*Nota: el lubricante externo proporciona lubricación entre el polímero y la superficie metálica de los equipos de procesamiento.*

### **3.1.1.5 Características del producto final a obtener**

El producto por obtener es filamento para impresora 3D, para la elección de un filamento según *Impresoras3D (2016)* se debe tener en cuenta:

#### Diámetro

El filamento de 1.75 mm es más común en el mercado, dentro de la empresa de CREATEBOT México esta medida representa el 85% de los filamentos que ofrece, considerando que el filamento de Polipropileno que comercializan corresponde también a esta medida (*CREATEBOT México, 2017*).

#### Tolerancia del filamento

La tolerancia junto a la composición del plástico es una referencia de la calidad del material. Si el diámetro de la bobina es irregular, el volumen del plástico extruido variará debido a que el software de la impresora 3D realiza un cálculo de el volumen de la extrusión mediante el diámetro y la velocidad de extrusión. Al tener variaciones mayores a la tolerancia el software no puede compensar esta variación por lo que los defectos en la impresión serán apreciables. Por lo general se recomienda como máximo una tolerancia de 0.05 mm.

### Redondez del filamento

El filamento sufre un ligero aplastamiento en la unidad de tiro dentro de la extrusión, por lo que, si el filamento no cuenta con una buena redondez, al estar alimentando la boquilla de la impresora 3D la calidad de la impresión podría no ser la adecuada.

### Humedad

Si la humedad del ambiente absorbida por el material es demasiada, esta ocasiona salpicaduras o pequeñas evaporaciones en la punta del extrusor por efecto de la humedad evaporándose al contacto con el calor al alcanzar la temperatura de 100°C. Ocasionando al final impresiones pobres y una mala adherencia de las capas.

### Impurezas

Las impurezas químicas producen mala viscosidad del plástico fundido, provocando un tapón en la boquilla del extrusor, lo que hace perder la pieza impresa y la necesidad de una limpieza de la boquilla o el cambio de ésta, en casos más severos.

### Temperatura de fusión y del sustrato refrigerante.

Debido a que los materiales utilizados para la impresión 3D difieren principalmente en su punto de fusión, influyendo significativamente en las propiedades del proceso de impresión. Los filamentos se funden en el cabezal de impresión durante la creación de la pieza, en un rango de temperaturas que va desde los 150 °C hasta los 250 °C dependiendo de la tecnología utilizada, asimismo, se elige la temperatura óptima para el sustrato refrigerante en que se realiza la impresión de manera que se asegure un enfriamiento y una deformación óptima, generalmente entre 40 y 100 °C.

Ambas temperaturas pueden afectar significativamente las propiedades del objeto 3D, por lo tanto, “es importante determinar los parámetros térmicos (conductividad térmica, calor específico y difusividad térmica) de los materiales”(Trnik y Medved, 2016).

### **3.1.2 Interpretar los datos sin procesar en términos de necesidades de los clientes**

La información recabada durante la etapa de identificación de necesidades se transformó en oraciones sencillas que permiten conocer las necesidades en concreto, ver Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Necesidades del cliente. Fuente: Elaboración propia.

Información	Necesidad
Identificación del material	El extrusor procesa Polipropileno Homopolímero
Caracterización	Parámetros por considerar en el diseño: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura de fusión</li> <li>• Temperatura de proceso</li> <li>• Temperatura de reblandecimiento Vicat</li> <li>• Calor específico</li> <li>• Calor latente</li> <li>• Calor total para el proceso</li> <li>• Densidad en estado sólido</li> <li>• Densidad en estado fundido</li> <li>• Índice de fluidez</li> <li>• Coeficiente de fricción</li> <li>• Viscosidad</li> <li>• Coeficiente de expansión</li> </ul>
Porcentaje de contracción	Considerar la contracción del material al enfriarse
Absorción de agua	El polipropileno no absorbe humedad del medio ambiente
Cantidad de residuos <sup>1</sup>	Capacidad mínima de producción
Impurezas	Considerar impurezas menores como polvos en la materia prima
Pigmentos <sup>2</sup>	Separación de colores
Longitud de fibras <sup>3</sup>	Trozos de fibra a la medida de los pellets
Tipos de fibra	Separación por tipo desde el recorte de artesanías
Degradación <sup>4</sup>	Depreciar pérdida de rigidez, viscosidad y peso molecular
Degradación <sup>5</sup>	Generación de sustancias volátiles y disipación natural en el proceso
Aditivos <sup>6</sup>	Antioxidantes, antiestáticos y lubricantes externos
Producto final <sup>7</sup>	Diámetro de 1.75 mm
Producto final	Tolerancia de 0.05 mm
Producto final	Redondez
Condición de uso del filamento	Temperatura de fusión del filamento entre 150 a 250 °C
Usuario	Fácil operación y limpieza de la maquinaria
Limitantes	Tipos de Extrusora: Monohusillo
Limitantes	Fuente de energía eléctrica
Limitantes <sup>8</sup>	Piezas comerciales o manufacturadas en la UTM

<sup>1</sup> Debido a que los residuos generados se estiman en 500 kg semanales, y una maquinaria con la capacidad de producción mayor a 10 kg/h se encuentra en el mercado con costo de \$5,000 USD, se optó por el diseño de una máquina o prototipo con una capacidad baja de producción que cumpla con los principios básicos para lograr la transformación del material, permita comprobar que es posible convertir el material en un nuevo producto (filamento) y establezca los parámetros para el proceso.

<sup>2</sup> Se considera la separación de colores en las pruebas de extrusión pero no en los cálculos de la temperatura, ya que es necesaria la caracterización de cada pigmento.

<sup>3</sup> Las fibras requieren de una etapa de trituración, debido a que esta actividad no se encuentra dentro de los objetivos del proyecto al ser las pruebas a nivel experimental, sólo se especificará las dimensiones requeridas del material sin importar el proceso de trituración para obtenerlo.

<sup>4</sup> Debido a que el material se busca aprovechar al 100%, se depreciará la pérdida de rigidez, viscosidad y peso molecular, considerando la importancia de los parámetros del material para disminuir su degradación.

<sup>5</sup> Utilizar la diferencia de presión dentro del husillo, para que los gases salgan por la tolva sin la necesidad de un área de desgasificación que implica un diseño más complejo del husillo.

<sup>6</sup> Valoración de la necesidad de aditivos hasta las pruebas de extrusión. Si la extrusora tiene una zona de mezclado eficiente, podrá mezclar aditivos de ser necesarios.

<sup>7</sup> El diámetro del filamento elegido es con base en el porcentaje que ocupa esta presentación en el mercado de la empresa CREATEBOT México.

<sup>8</sup> El costo del prototipo depende de la evaluación del costo de los componentes, la calidad y la manufactura.

### **3.2 Especificaciones del cliente**

El establecer especificaciones en este punto del proyecto, permite conocer las metas que describen lo que hará el producto pero que posteriormente serán refinadas con las limitaciones del concepto. El proceso consiste en tres pasos:

1. Elaboración de métricas
2. Análisis de productos de la competencia
3. Valores objetivo-ideales y marginalmente aceptables

Para la simplificación de este apartado, se omite la descripción del paso 1, debido a que el paso 2 y 3 retoman la información del paso 1, conteniendo más información relevante.

#### **3.2.1 Análisis de productos de la competencia**

Debido a que la información que dan los fabricantes sobre una extrusora solo es respecto a la maquinaria y no al producto que procesa, el análisis de la competencia se realizó tanto para extrusoras, como para los materiales de filamento que estas maquinarias utilizan.

De las maquinarias analizadas en el *anexo A*, sólo se retoman las extrusoras a nivel casero que son algunos de los modelos más representativos para producir filamento para impresora 3D. El análisis conforma una comparación de lo que el mercado ofrece a las métricas antes establecidas, los resultados pueden ser consultados en el *anexo C. Análisis de la competencia*.

De donde se concluye que:

- Las extrusoras de la competencia no fueron diseñadas para el procesamiento de PP, funcionan con energía eléctrica y son de tipo monohusillo.
- La facilidad de operación y limpieza es una característica con la que la extrusora debe de contar.
- El material de alimentación suele ser pellets o desechos de piezas impresas en 3D, por lo que no consideran etapas anteriores como el lavado o secado, sólo en algunos casos se incluye la trituración.
- Solo la extrusora de protocyler incluye pigmentos para poder elegir el color del filamento.
- Las tolerancias del filamento varían entre los 0.05 hasta 0.20 mm.
- Las medidas de filamento son 1.75 y 3.0 mm.
- La capacidad de producción no supera un kg/h.
- No se consideran aditivos para el reprocesamiento de los materiales y la generación de sustancias volátiles.

Y en el análisis de la competencia conforme al producto a fabricar y el material (*Anexo C. Análisis de la competencia*), se concluye que las variaciones de las propiedades físicas repercuten en la temperatura del proceso, haciendo que existan diferentes temperaturas de fusión del filamento y de las camas de las impresoras 3D para compensar estas variaciones y obtener un producto aceptable.

### 3.2.2 Valores objetivo-ideales y marginalmente aceptables de las métricas planteadas

Después de un análisis de la competencia, a continuación, en la Tabla 3.6 se muestran las especificaciones de los parámetros del comportamiento del material y del manejo de la extrusora.

Tabla 3.6. Especificaciones objetivo-ideales. Fuente: Elaboración propia.

N°	Métricas	Unidades	Import.
1	Utilizar de guía los parámetros recomendados para el material	--	5
2	Extrusora monohusillo	--	5
3	Fuente de energía eléctrica	A, V	5
--	Parámetros que utilizar:	--	
4	Temperatura de fusión = 140 - 160	°C	5
5	Temperatura del proceso de extrusión = 200 - 260	°C	5
6	Temperatura de reblandecimiento Vicat = 140 - 160	°C	5
7	Calor específico = 1.93	$\text{kJ kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$	5
8	Calor latente de fusión = 100	$\text{kJ kg}^{-1}$	5
9	Densidad en estado sólido = 0.90 - 0.91	$\text{g/cm}^3$	5
10	Densidad en estado fundido = 0.72	$\text{g/cm}^3$	5
11	Índice de fluidez a 230°C con una presión de 3.041 $\text{kg/cm}^2 = 2.16$	kg	5
12	Coefficiente de fricción ( $\lambda$ ) = 0.67	--	5
13	Viscosidad a 250°C con una velocidad de corte de 1000 $\text{s}^{-1} = 100$	$\text{Ns m}^{-1}$	5
14	Coefficiente de expansión = $8 \times 10^{-5}$	$\text{°C}^{-1}$	5
15	Capacidad de producción = 0.200 a 0.500	kg/h	4
16	Diámetro del filamento = 1.75	mm	4
17	Tolerancia = $\pm 0.10$	mm	4

(Continúa en la siguiente pág.)



(Tabla 3.6 - Continuación)

N°	Métricas	Unidades	Import.
18	Diferencia entre los radios mayor y menor del contorno = 0.05 – 0.10	mm	4
19	Contracción del material = 1.5% - 2.5%	--	4
20	Relación de compresión en el husillo	--	4
21	Antioxidantes, antiestáticos y lubricantes externos	--	4
22	Piezas comerciales o manufacturadas en la UTM	Subj.	4
23	Ap.: Trituración de fibras, longitud menor al diámetro de un pellet de $27\text{mm}^3 = 3.8$	mm	3
24	Ap.: No necesita lavado	--	3
25	Detención de impurezas en el proceso $>500\ \mu\text{m}$	--	3
26	Ap.: No necesita secado previo	--	3
27	Ap.: Separación por colores	--	3
28	Ap.: Separación por tipos de fibra	--	3
29	Parámetros finales: Temp. de fusión del filamento entre 150 a 250 °C	--	3
30	Fácil de operar y limpieza de la maquinaria	Subj.	1

*Nota: Subj., Subjetivo. Ap., Actividades preparatorias. Temp., Temperatura.*

Para la mejor comprensión de las métricas se clasificaron según la etapa del proceso que afectan, mostrados en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Clasificación de métricas por etapa del proceso. Fuente: Elaboración propia.

	<b>Entrada</b>	<b>Proceso</b>	<b>Salida</b>
	Actividades preparatorias de los residuos	Condiciones a componentes	Requerimientos del producto final
	Trituración de fibras	Extrusora monohusillo	Diámetro del filamento
	No necesita lavado	Fuente de energía eléctrica	Tolerancia
	No necesita secado previo	Relación de compresión en el husillo	Diferencia entre los radios mayor y menor del filamento
	Separación por colores	Detención de impurezas	Temperatura de fusión
	Separación por tipos de fibra	Piezas comerciales o manufacturadas en la UTM	
	Caracterización del material	Condiciones de operación	
Métricas	Temperatura de fusión	Antioxidantes, antiestáticos y lubricantes externos	
	Temperatura de extrusión	Capacidad de producción	
	Temperatura de reblandecimiento Vicat	Fácil de operar y limpieza de la maquinaria	
	Calor específico		
	Calor latente de fusión		
	Densidad en estado sólido		
	Densidad en estado fundido		
	Índice de fluidez		
	Coefficiente de fricción		
	Viscosidad		
	Coefficiente de expansión		
Contracción del material			

Estas métricas son la base para la especificación de cada uno de los componentes que se requieren para lograr obtener filamento para impresora 3D al final del proceso, como se explica de forma simplificada en la Figura 3.6.

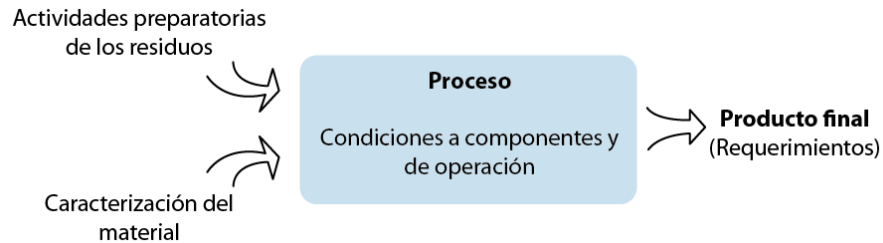


Figura 3.6. Métricas en el proceso general. Fuente: Elaboración propia.

### 3.3 Generación de conceptos de producto

La generación de conceptos se realizó aplicando el método de 5 pasos, recuperado de *Ulrich y Eppinger (2012)* que consiste en descomponer el problema complejo en subproblemas, para que estos sean solucionados mediante la búsqueda externa e interna de información, y al final en conjunto se establezcan las mejores soluciones, presentando los resultados en los siguientes apartados.

#### 3.3.1 Aclarar el problema general

Según la metodología de *Ulrich y Eppinger (2012)*, aclarar el problema consiste en desarrollar un entendimiento general, y luego descomponer el problema en subproblemas.

Durante el establecimiento de las especificaciones objetivo y del estudio general de las funciones de la extrusora, se concluyó que la extrusora por sí sola no puede garantizar que el producto obtenido cumpla con las especificaciones del filamento para impresora 3D debido a que su función termina al conferirle una forma definida y continua al polímero fundido pero no interviene en el proceso de enfriamiento, en el que habrán contracciones principalmente sobre las que no tiene control, por lo que el problema se dividió en dos partes, la primera corresponde a la fundición y conformación del perfil, mientras que en la segunda parte se encuentran las funciones de acabado que se asocian a una serie de sistemas externos, dando por resultado una línea de extrusión.

La Figura 3.7 muestra un diagrama de “caja negra general” en el que se analizan los 3 flujos: energía, material y señal, que permiten limitar las entradas y salidas de la línea de extrusión con base en las especificaciones del cliente, la misión y restricciones del proyecto, además de establecer las condiciones entre las dos cajas negras.

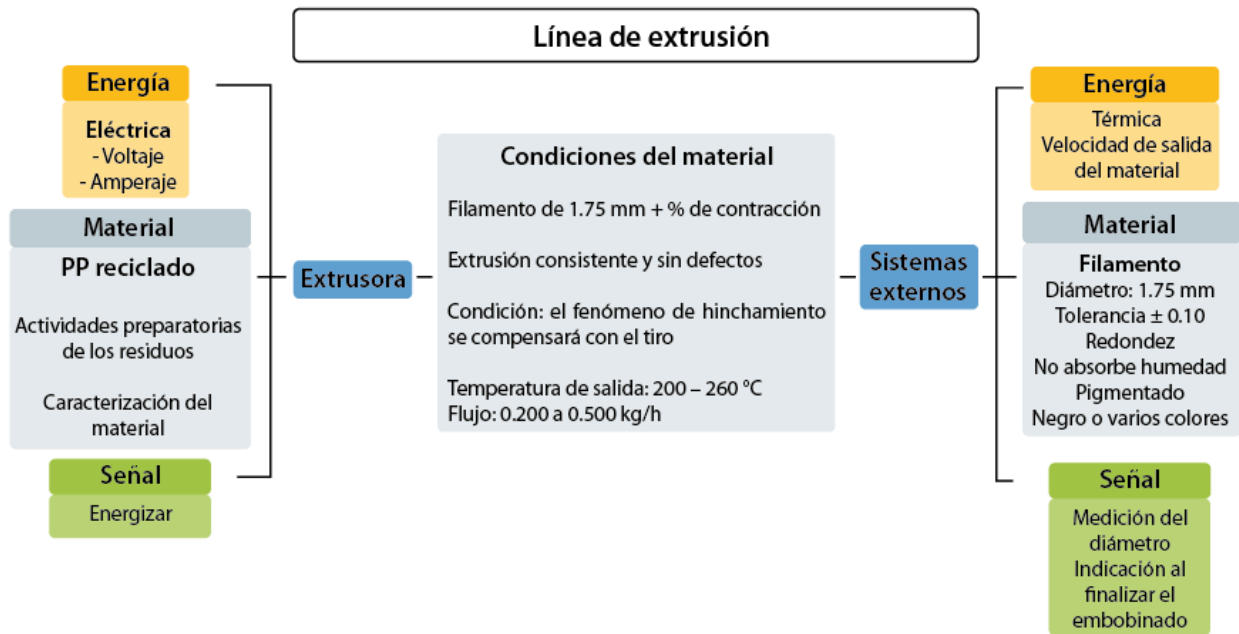
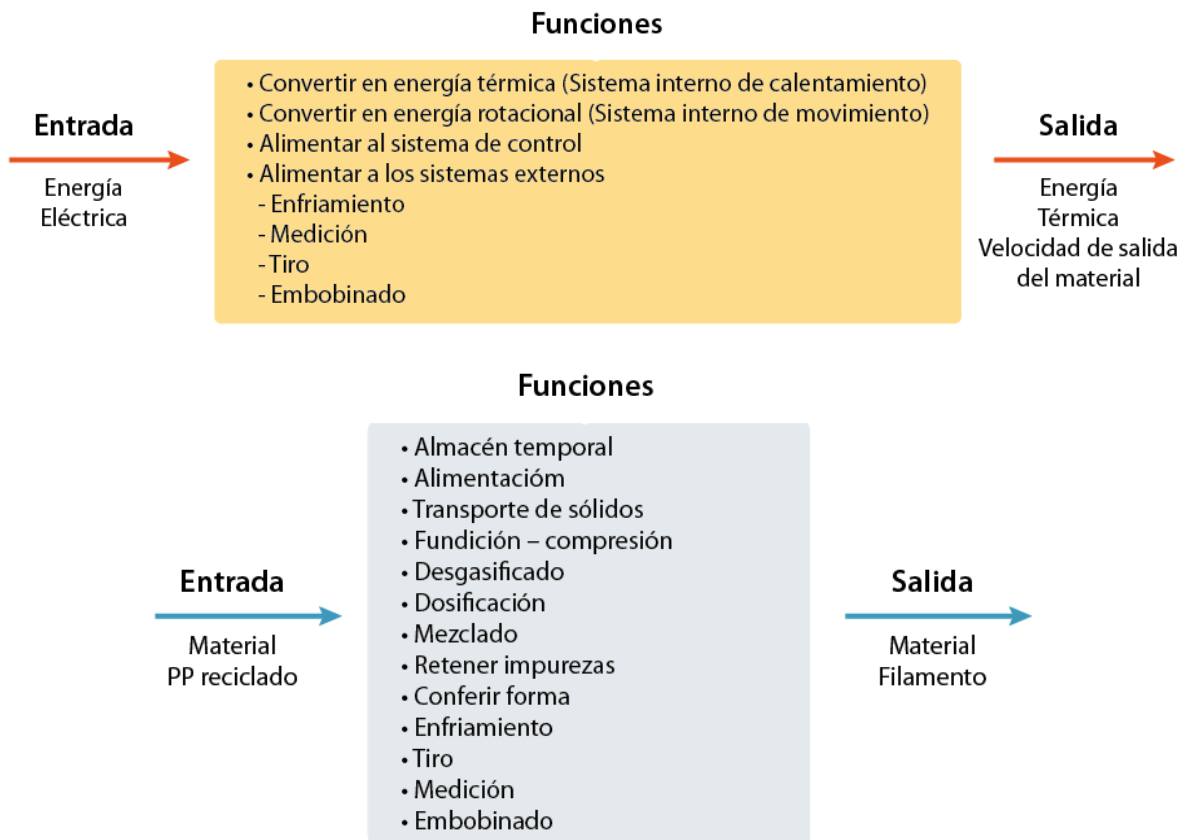


Figura 3.7. Caja negra general Fuente: Elaboración propia.

Considerando la entrada y salida de cada uno de los flujos, en la Figura 3.8 se describen las funciones que cada uno debe realizar para ir de un punto a otro.



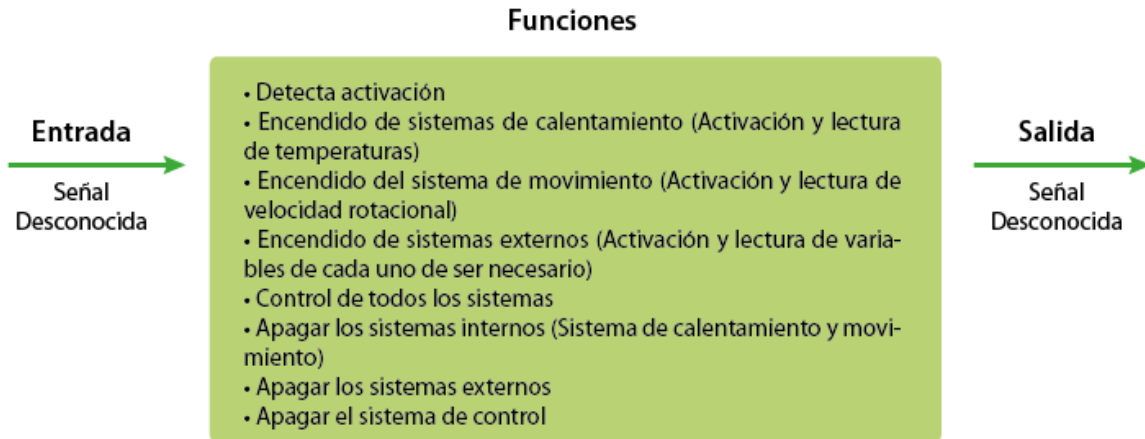


Figura 3.8. Cajas negras específicas para cada entrada. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.9 se muestra la interacción entre cada una de las funciones de los diferentes flujos, dando información de la posibilidad de dividir el sistema para su análisis.

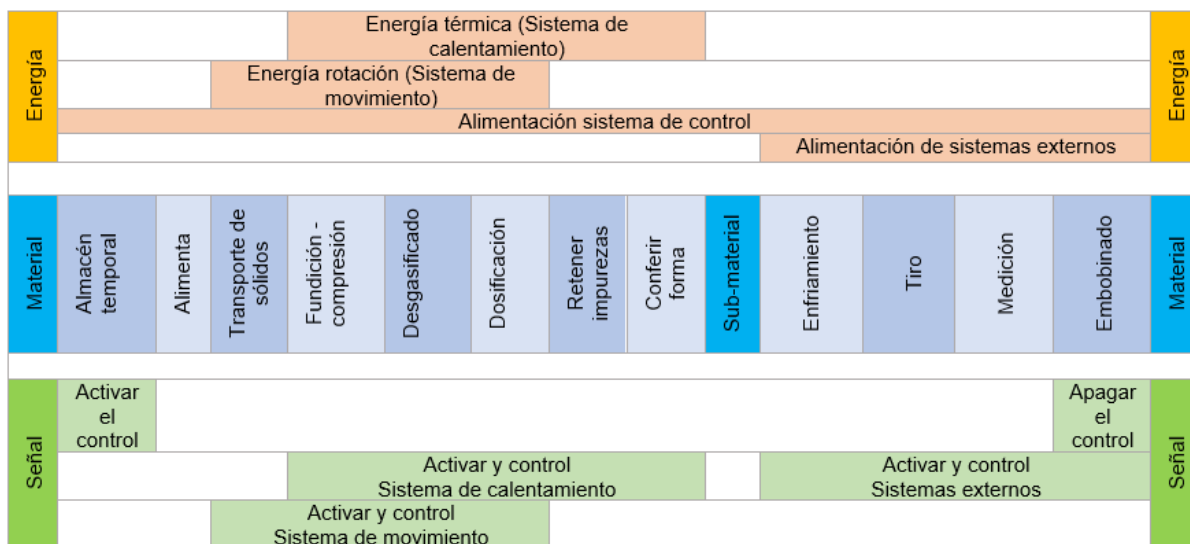


Figura 3.9. Diagrama funcional. Fuente: Elaboración propia.

Para continuar con el análisis, de acuerdo con la metodología de *Ulrich y Eppinger (2012)*, se consideró lo siguiente:

- Los flujos de señal y energía se analizaron una vez definidos los parámetros a controlar.
- El flujo del material se dividió en dos secciones, la extrusora y los sistemas externos (unidad de tiro, medición, enfriamiento y embobinado), lo que permitió establecer las dimensiones del proyecto al conocer los parámetros de la extrusora, y así buscar soluciones a medida de los sistemas externos.
- Los pasos de búsqueda interna y externa se desarrollaron implícitamente en cada uno de los bloques de análisis, divididos a criterio para la reducción de variables de cada uno de los subproblemas.

### 3.3.2 Análisis de la extrusora

El análisis consiste en la asignación de uno o más componentes que puedan realizar la función y son limitados por las especificaciones del cliente, misión y restricciones del proyecto (Tabla 3.8).

Tabla 3.8. Extrusora. Asignación de componentes a funciones. Fuente: Elaboración propia.

Funciones	Componente	Especificaciones objetivo
Almacenamiento temporal	Tolva	Actividades preparatorias <ul style="list-style-type: none"> <li>• Trituración de fibras &lt; 0.4 cm</li> <li>• No necesita lavado</li> <li>• No necesita secado previo</li> </ul>
Alimentar	Garganta de alimentación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Separación por colores</li> <li>• Separación por tipos de fibra</li> </ul>
Transporte	Motor	Caracterización del material <ul style="list-style-type: none"> <li>• Propiedades del PP</li> </ul>
Fundición – compresión	Husillo Barril	Condiciones a componentes <ul style="list-style-type: none"> <li>• Extrusora monohusillo</li> <li>• Fuente de energía eléctrica</li> <li>• Relación de compresión</li> <li>• Detención de impurezas en el proceso</li> <li>• Piezas comerciales o manufacturadas en la UTM</li> </ul>
Dosificación	Calentadores	Condiciones de operación
Retener impurezas	Placa rompedora Juego de mallas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Antioxidantes, antiestáticos y lubricantes externos</li> <li>• Capacidad de producción</li> <li>• Fácil de operar y limpieza de la maquinaria</li> </ul>
Conferir forma	Dado	Condiciones del material <ul style="list-style-type: none"> <li>• Filamento de 1.75 mm + % de contracción</li> <li>• Extrusión consistente y sin defectos</li> <li>• Condición: el fenómeno de hinchamiento se compensará con el tiro</li> <li>• Temperatura de salida: 200 – 260 °C</li> <li>• Flujo: 0.200 a 0.500 kg/h</li> </ul>

Debido a que cada componente tiene diferentes clasificaciones y requerimientos se analizan de forma independiente.

#### 3.3.2.1 Tolva

De acuerdo con *Beltrán y Marcilla (2012)* la tolva, en conjunto con la garganta de alimentación y boquilla, deben de estar ensambladas perfectamente y diseñadas para proporcionar un flujo constante de material. El flujo de alimentación se debe al empuje de las partículas por la gravedad, y puede comportarse como se muestra en la Figura 3.10:

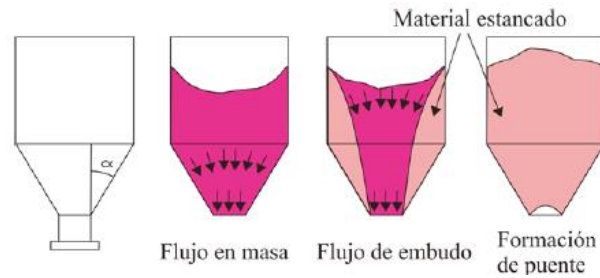


Figura 3.10. Flujo de material en una tolva de alimentación. Fuente: (Beltrán y Marcilla, 2012).

- Flujo en masa: no hay regiones estancadas y todo el material se mueve hacia la salida.
- Flujo de embudo: el material más cercano a las paredes de la tolva queda estancado.
- Problema de formación de puente o arco: Materiales con un flujo deficiente pueden quedar estancados en la garganta.

El tipo de flujo depende de la geometría, teniendo que los tipos de tolva son (Figura 3.11):

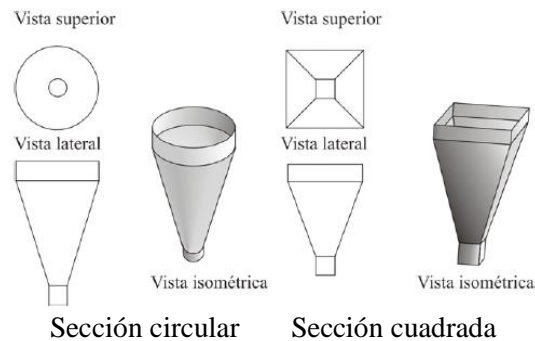


Figura 3.11. Tipos de tolva. Fuente: (Beltrán y Marcilla, 2012).

- Tolvas de sección circular ejercen una compresión gradual sobre el material, proporcionan un mejor flujo de material, siendo más caras y difíciles de construir.
- Tolva de sección cuadrada, ejerce una compresión poco uniforme, con la posibilidad de provocar que el material se detenga.

Y en cuanto a las dimensiones de la tolva, estas se calculan para almacenar el material suficiente para 2 horas de trabajo, según *Beltrán y Marcilla (2012)*.

Existen una serie de características del material que influyen en el transporte del material sólido, debido a que el material ya tiene una presentación definida, lo que tiene relevancia para esta investigación es que las dimensiones del material sean lo más uniforme posible, para que el flujo proporcionado por la misma gravedad sea mayor que el necesario para la extrusión (*Beltrán y Marcilla, 2012*).

### 3.3.2.2 Garganta de alimentación

Es la conexión entre la tolva y la zona de transporte del material, por lo que regularmente está provista de un sistema de refrigeración para mantener una temperatura baja que evite que las partículas se adhieran a la extrusora provocando un bloqueo de la alimentación.

La garganta de alimentación se clasifica en los siguientes tipos (Figura 3.12):

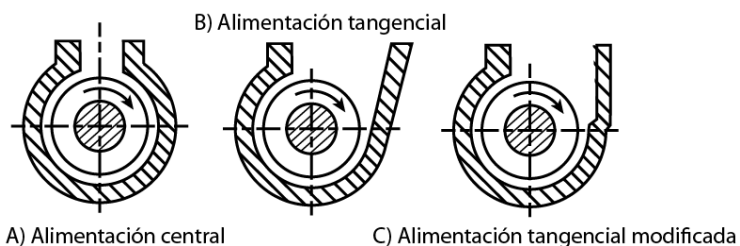


Figura 3.12. Tipos de gargantas de alimentación. Fuente: (Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000b).

De los tipos de gargantas anteriores, la alimentación tangencial y la tangencial modificada son teóricamente mejores para la recepción del material, pero pueden originar esfuerzo y deflexión en el husillo, recomendándose principalmente cuando el material se alimenta en forma fundida. Considerándose la más comercial, la garganta de alimentación central (Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000b).

Es importante considerar que el material debe de entrar sólido en el barril, por lo que se debe de tener un sistema de enfriamiento en esta zona para evitar que el calor de las demás zonas comience a fundir el material.

Para el tamaño de la ranura se considera que debe permitir el paso sin restricciones, Beltrán y Marcilla (2012) recomiendan las siguientes dimensiones: longitud de  $1.5D$  y una anchura de  $0.7D$ , Figura 3.13.

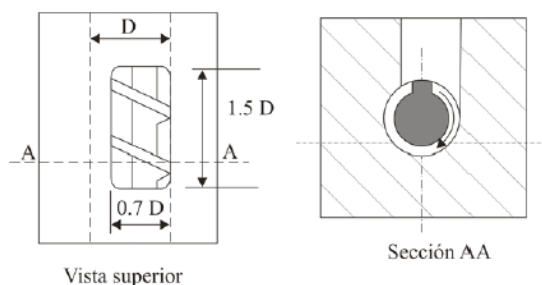


Figura 3.13. Dimensiones garganta de alimentación. Fuente: (Beltrán y Marcilla, 2012).

### 3.3.2.3 Barril

El barril o cañón de una máquina extrusora consiste en un cilindro de una sola pieza, con un interior liso o acanalado donde gira el husillo (Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000b). Clasificándose en:

Cilindro liso: “En los cilindros con zonas de alimentación lisas (convencionales) las etapas de dispersión y mezclado del tornillo se encuentran localizadas en la zona de dosificación (ultima sección del tornillo); lo cual frecuentemente genera merma en la producción y en ocasiones variación ligera en la salida del extrusor” (Frank, 2017).

**Cilindros acanalados:** “Son cilindros que poseen una superficie interna con canales de forma específica, zonas acanaladas como se muestra en la Figura 3.14, ubicada en la etapa de alimentación de los cilindros, suelen ser utilizadas para favorecer el procesamiento de resinas de bajo coeficiente de fricción (HMW, ADPE, y PP) (Frank, 2017).

Para un funcionamiento adecuado se debe considerar un enfriamiento intensivo en la zona de alimentación y en las ranuras, debido a que el incremento del esfuerzo cortante en el material origina un aumento de temperatura que puede ser excesivo causando degradación por cizallamiento o un estancamiento del material (Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000b).

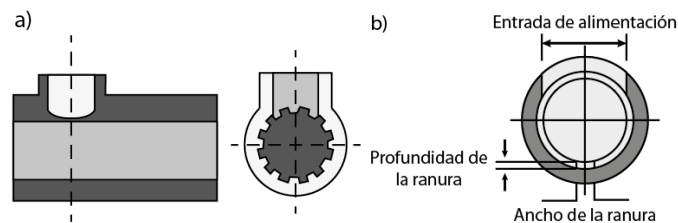


Figura 3.14. a) Zona de alimentación ranurada. b) Dimensiones de la alimentación ranurada. Fuente: (Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000b).

Aunque se recomiende el uso de un barril con ranuras para el manejo del PP, se debe tomar en cuenta que el material ya tiene un procesamiento anterior, lo que disminuye su resistencia general a procesos térmicos y considerando que las ranuras generan esfuerzos de corte y altas temperaturas que pueden causar resultados desfavorables en el material. Además, evaluando desde el costo del barril, este es más difícil de manufacturar y requiere de tratamientos térmicos para soportar los esfuerzos, por lo que aumenta el costo a comparación de un barril de superficie lisa.

Para el montaje del extrusor se recomienda considerar los movimientos y esfuerzos que se pueden generar por las constantes dilataciones y contracciones que sufre el equipo con los cambios de temperatura, ocasionando un aumento longitudinal y radial (Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000b). Debido a que las dimensiones del extrusor son pequeñas en comparación con una extrusora industrial, se desprecia el ajuste térmico longitudinal y radial.

### 3.3.2.3.1 Sistema de enfriamiento del cilindro

En el sistema de enfriamiento del cilindro los ventiladores entran en operación cuando la temperatura de una zona supera el punto prefijado, por efecto de (Mariano, 2011):

- La transferencia excesiva de calor por parte de la resistencia.
- La generación excesiva de calor por parte de los elementos de mezclado presentes en el tornillo de la extrusora.



Logrando un control preciso de las temperaturas de cada zona mediante la combinación de bandas de calentamiento eléctrico y ventiladores. Es importante el control en la zona de alimentación de la resina, donde al menos se debe mantener a 50 °C por debajo de la temperatura de fusión del polímero, lo que impide que la resina se adhiera a la superficie del tornillo minimizando el flujo del material por arrastre y por lo tanto el caudal del extruido (*Mariano, 2011*).

### **3.3.2.4 Husillo**

Es el componente más importante de la extrusora ya que realiza la actividad de fusión y de él depende el éxito del proceso de extrusión. Teniendo que los parámetros más importantes en el diseño del tornillo son:

- Longitud
- Diámetro
- Ángulo del filete
- Paso de la rosca

#### **3.3.2.4.1 Longitud**

Un aumento en la longitud del husillo consecuentemente la del extrusor, aumenta la capacidad de plastificación y la productividad. El *Instituto Mexicano del Plástico Industrial (2000b)* los clasifica en extrusor corto y largo, de los cuales se recomienda el extrusor largo debido a que, funde el material antes de llegar al final y en el espacio sobrante seguirá mezclando hasta entregarlo homogéneo. Es importante cuando se procesan materiales pigmentados o con lotes maestros “master batch” de cargas o aditivos que requieren incorporarse perfectamente en el producto.

De acuerdo con *Savgorodny (1973)*, los extrusores largos deberán utilizarse en extrusoras rápidas, destinadas a la fabricación de películas, fibras y gránulos, entre otros. Favoreciendo el calentamiento por fricción y la refrigeración del husillo, además si existe una reducción de la profundidad del canal se puede conseguir un avance continuo del material.

#### **3.3.2.4.2 Diámetro**

El diámetro al ser una dimensión que influye directamente en la capacidad de producción de la máquina, generalmente se crece en proporción con la longitud del equipo. Dando las especificaciones principales del husillo con una relación longitud/diámetro (L/D) (*Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000b*).

Las relaciones van desde (6 – 40) /1, pero comercialmente varía de (15 - 25) /1, según *Morton (2012)* y *Savgorodny (1973)*. Teniendo la mayoría de los extrusores diámetros comprendidos entre 2 y 90 cm (*Beltrán y Marcilla, 2012*).







### 3.3.2.4.3 Alabes o filetes

Depende del tipo de plástico que se puede procesar y la calidad de mezclado (*Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000b*).

#### Número de filetes

El empleo de tornillos con múltiples filetes puede mejorar el proceso de fusión, debido a que la capa de material fundido es más delgada que cuando el filete es simple. Para lo cual *Beltrán y Marcilla (2012)* recomiendan que (Tabla 3.9):

Tabla 3.9. Diseño del tornillo para reducir el coeficiente de fricción entre el material y el tornillo. Fuente: (*Beltrán y Marcilla, 2012*).

Características del tornillo	Diseño adecuado	Diseño defectuoso
Número de filetes	Sencillo 	Doble 
Ángulo del filete	Grande 	Pequeño 
Radio del flanco del filete	Grande 	Pequeño 

#### Ángulo de hélice

Muchos husillos tienen paso cuadrado, esto es, longitud de campo  $P$  igual al diámetro  $D$ . Esto da como resultado un ángulo de la hélice igual a  $17.66^\circ$ , muy utilizado en el mercado, aunque éste varía dependiendo del material a procesar.

#### Profundidad del filete en la zona de alimentación ( $H_a$ )

“La profundidad del filete es muy pronunciada con el objeto de transportar una gran cantidad de pellets al interior del extrusor, aceptando el material sin fundir y aire que está atrapado entre el material sólido” (*Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000b*).

Considérese el tamaño de las fibras sintéticas trituradas con dimensiones menores a 3.8 mm, que corresponden al diámetro de un pellet de 27 mm<sup>3</sup>.

#### Relación de compresión

La relación entre la profundidad del filete en la alimentación y la profundidad del mismo en la dosificación, se denomina relación de compresión (*Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000b*). En las máquinas comerciales este valor se encuentra de 2:1 hasta 4:1 (*Morton, 2012*).

#### Profundidad del filete en la zona de dosificación ( $H_d$ )

Suele ser mucho menor en comparación con la profundidad de la zona de alimentación, debido a la reducción del volumen en el material, ejerciendo una compresión sobre el polímero. “Esta compresión es útil para el mezclado y para la expulsión del aire que entra junto con la materia prima alimentada” (*Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000b*).

#### **3.3.2.4.4 Zonas de venteo**

Cuando en el proceso se generan gases, se recomienda el uso de un husillo que cuente con zonas de baja presión después de la zona de compresión, generando un efecto de volatización instantánea. La zona de venteo es un agujero en el barril, que debido a la diferencia de presiones permite que se escapen los gases ayudado en algunas ocasiones con vacío (*Morton, 2012*). Continuando la geometría con una segunda zona de compresión y la zona de dosificación (*Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000b*).

#### **3.3.2.4.5 Zonas de mezclado.**

Los equipos monohusillo no se distinguen por ser sistemas con una buena capacidad de mezclado, por lo que algunas veces se dejan zonas especiales con hilo de tornillo modificado o, incluso, invertido. Estas regiones de diferente paso se encuentran más allá de la zona de dosificación normal y enseguida se coloca una zona de dosificación que regulariza la presión y la temperatura antes de la extrusión. (*Morton, 2012*).

Según el *Instituto Mexicano del Plástico Industrial (2000b)* la zona de mezclado por dispersión se utiliza cuando el proceso demanda la reducción o molienda de las partículas presentes, como en el caso de las líneas de extrusión que tienen apertura de dado pequeñas o estrechas (películas, fibras y otros).

Su función es crear corrientes para el que el plástico pase por espacios estrechos entre el barril y el husillo. La desventaja es que provocan desgaste en el barril, perdiendo efectividad con el uso.

Analizando los modelos que muestra el *Instituto Mexicano del Plástico Industrial (2000b)* se recomienda el uso del mezclado EGAN (Figura 3.15), porque evita el estancamiento y es para materiales sensibles a la temperatura, aunque tiene mayor costo debido a su manufactura.

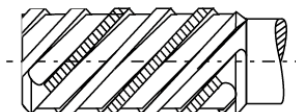


Figura 3.15. Sección de mezclado Egan. Fuente: (*Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000b*).

### 3.3.2.4.6 Huelgo anular entre el husillo y el barril

Generalmente se suele emplear husillos de diámetro constante, manteniendo un huelgo grande y  $0,005D$  para los de diámetro pequeño (*Savgorodny, 1973*). El claro libre normal tornillo / barril es de aproximadamente  $0.2 \text{ mm}$  (*Morton, 2012*).

### 3.3.2.4.7 Husillos especiales

La geometría general del husillo depende del polímero a procesar, así se muestran los siguientes husillos según *Morton (2012)* (Figura 3.16).

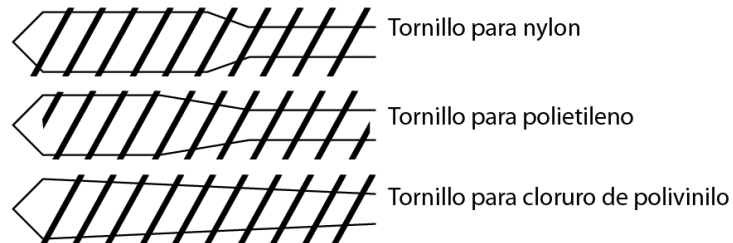


Figura 3.16. Husillos especiales. Fuente: (*Morton, 2012*).

#### Tornillo para polietileno.

Si el polímero funde poco a poco es apropiado un tornillo con longitud total dividida en tres zonas iguales.

#### Tornillo para nylon

Si el polímero funde en forma abrupta, el criterio es que se requiere de una zona de compresión muy corta, por lo común, de una longitud de solo una vuelta de la espiral o hélice del tornillo (esta opinión tiene poca justificación teórica). No obstante, se utiliza mucho para el nylon y otros polímeros semicristalinos, como el polipropileno y el acetal.

#### Tornillo para cloruro de polivinilo

Es utilizado para procesar polímeros que funden aún más lentamente que el polietileno, utilizando un tornillo que tenga una larga zona de compresión en toda su longitud, algunas veces con la adición de una zona de dosificación o de bombeo.

Tomando en cuenta que la mayoría de los husillos utilizados son de polietileno (*Ramos, 2013*) y *Sadgorodny (1973)* recomienda para poliolefinas una distribución correspondiente con una zona de alimentación corta ( $3D$ ), compresión larga ( $12D$ ) y dosificación ( $5D$ ), teniendo al final una relación  $L/D = 20/1$ . Por lo que se prefiere ésta última distribución de zonas.

Con la información analizada, se tienen las siguientes especificaciones en la Tabla 3.10.

*Tabla 3.10 Especificaciones del husillo sin restricciones. Fuente: Elaboración propia.*

Componente	Especificaciones
Husillo	Extrusor largo Relación L/D = 20 /1 Filete del tornillo simple Ángulo grande de los filetes Radio grande de los flancos del filete Ángulo óptimo de hélice = 17.66° con P (paso) = D Profundidad $H_a = 4$ mm Relación de compresión 2:1 hasta 4:1 Profundidad $H_a = H_a / (2 \text{ a } 4)$ mm Zona de venteo Zona de mezclado EGAN $\delta = 0.005D$ mm a 0.2 mm Husillo con distribución de zonas, 3D para alimentación, 12D para compresión y 5D para dosificación.

Las especificaciones anteriores se consideran ideales para las características del material a procesar conforme a las recomendaciones por diferentes autores, pero para este proyecto es necesario considerar las limitaciones de manufactura. Por lo que en el laboratorio de manufactura de la UTM se tiene que: el torno convencional, permite fabricar un tornillo sin fin con paso y profundidad del canal constante. El paso más grande que se puede manufacturar es de 1.27 cm (1/2”).

Por lo tanto, la profundidad del canal será constante, no tendrá zona de venteo ni zona de mezclado, no habrá 3 zonas en el conjunto husillo-barril. Definiendo el husillo en la Tabla 3.11.

*Tabla 3.11. Especificaciones del husillo. Fuente: Elaboración propia.*

Componente	Especificaciones
Husillo	Extrusor largo Relación L/D = (6 a 40) /1 Filete del tornillo simple Ángulo grande de los filetes Radio grande de los flancos del filete Ángulo de hélice = 17.66° [A evaluar] P (paso) = 1.27 cm Profundidad constante $H = 0.4$ cm $\delta = 0.01$ cm

### 3.3.2.5 Dado

Es el componente que le confiere la forma a la pieza final.

Los dados se clasifican de acuerdo con la forma del producto (*Beltrán y Marcilla, 2012*):

- Boquillas anulares: para la fabricación de tuberías o recubrimientos.
- Boquillas planas: se obtienen planchas y láminas.
- Boquillas circulares: con las que se obtienen fibras y productos de forma cilíndrica.

Por la posición del troquel del cabezal de extrusión con respecto al flujo del polímero, se tienen las siguientes variantes (*Sikora, 2017*):

- Cabezas de extrusión longitudinales (de tipo recto) con entrada y salida de polímero situadas en un eje que coincide con el eje del sistema de plastificación
- Cabezas de extrusión angular (inclinada) con la entrada de polímero sobre el eje del sistema plastificante situado en un ángulo con respecto al eje de salida del polímero
- Cabezas de extrusión transversales (tipo cruzado) con la entrada y la salida del polímero situadas perpendicularmente entre sí.

Si se considera el comportamiento físico dentro de las cabezas de extrusión angular o transversal, se debe tomar en cuenta que el proceso es viscoelástico por lo que las cadenas no se realinean de forma permanente lo que puede ocasionar que el material se enrosque a la salida del dado. *Morton (2012)*, menciona que en la práctica es difícil dar con los valores de la viscosidad y dimensiones del dado que permitan predecir el comportamiento del polímero, recurriendo a la experiencia y a un sentimiento instintivo sobre lo que es operable, teniendo como base de estudio el número de Débora (Cociente de dividir el tiempo de relajación del material en proceso entre los intervalos del tiempo del proceso) que muestra si el proceso es principalmente elástico ( $N_{déb} > 1$ ), viscoso ( $N_{déb} < 1$ ) o viscoelástico ( $N_{déb} \approx 1$ ) ayudando a comprender el comportamiento de los polímeros fundidos.

Limitando así el proyecto al estudio de cabezas de extrusión longitudinales de tipo recto en los que se pueden presentar los siguientes patrones de flujo según *Morton (2012)* (Figura 3.17):

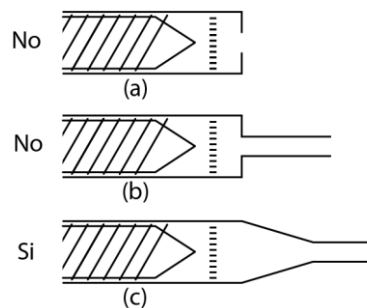


Figura 3.17. Patrones de flujo. Fuente: (*Morton, 2012*).

Dado que existe la necesidad de mantener un flujo laminar en el material fundido, los patrones de flujo a) y b) sufren cambios abruptos, produciendo “puntos muertos” en las esquinas donde circula el material fundido, esto conduce a una pieza con temperatura y esfuerzos cortantes no uniformes.

Mientras que en el flujo c, aunque inicia con un flujo convergente que tiene esfuerzos cortantes y de tracción, el material se distribuye constantemente sin dejar zonas estancadas.

### **3.3.2.5.1 Fijación**

El cabezal de extrusión está fijado a la parte extrema del sistema de plastificación del extrusor. Las cabezas de extrusión pequeñas se fijan principalmente mediante conexiones de pernos, conexiones de tipo bisagra o mediante un anillo de forma atornillada y normalmente tienen provisto un soporte vertical (*Sikora, 2017*).

### **3.3.2.5.2 Requisitos generales**

El diseño del cabezal de extrusión independientemente de su finalidad de producción debe de cumplir los siguientes requisitos que permiten garantizar el proceso correcto de producción del producto (*Sikora, 1993; Sikora, 1995; Sikora, 2006*):

- Asegurar un flujo de polímero adecuado en los canales de flujo para obtener la forma requerida y las dimensiones del material extruido
- Permitir el proceso de extrusión con el flujo de polímero más alto posible
- Evitar zonas de estancamiento del polímero en el cabezal de extrusión por la forma y las características geométricas de los canales de flujo y asegurar resistencia al flujo del polímero
- Garantizar una mezcla y homogenización, así como presión alta adecuadas al polímero.
- Garantizar la resistencia de los elementos de diseño específicos del cabezal de extrusión y sus conexiones en condiciones de alta presión y temperatura
- Proteger las superficies de los canales de flujo contra el impacto agresivo de polímeros
- Proporcionar la posibilidad de ajuste del caudal de polímero desde el cabezal de extrusión si las condiciones de proceso de extrusión recomendadas deben ser influenciadas, especialmente las condiciones dentro de la cabeza de extrusión.

Con referente a la boquilla y al producto extruido, estos no son exactamente iguales debido a las siguientes razones (*Beltrán y Marcilla, 2012*):

- Contracción del material
- Enfriamiento
- Fenómeno de relajación

Contribuyendo a que el material cambie de tamaño e incluso de forma. De estas razones, solo se considera que al dado le afecta la contracción del material, mientras que los sistemas externos a la extrusora tendrán en consideración el enfriamiento y el fenómeno de relajación para el cálculo de los componentes.

Además, se recomienda una unidad de calefacción con un sistema de medición y ajuste de la temperatura para el dado y se debe considerar los elementos para el ajuste, centrado y conexión.

**3.3.2.6 Motor**

Considerando que la clasificación de motores es extensa, se inicia este apartado con la limitante de la fuente de energía, siendo la energía eléctrica.

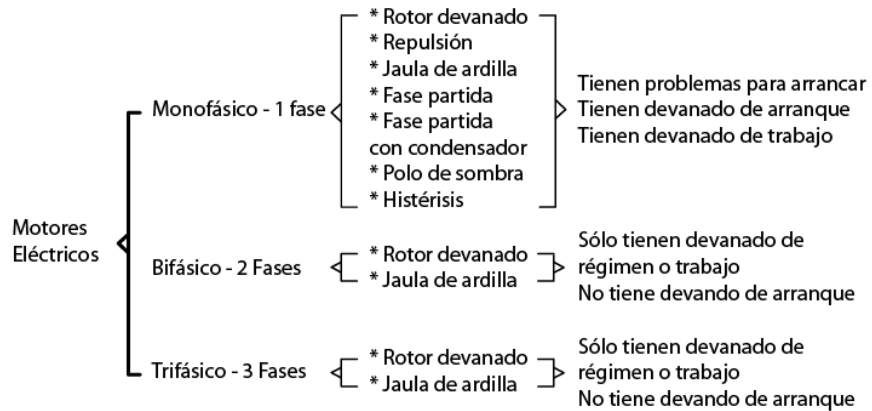
*Mott (1992)*, menciona que “la corriente alterna (CA) es generada por la instalación eléctrica y es transmitida hacia el consumidor industrial, comercial o residencial. La corriente alterna también se clasifica como monofásica o trifásica. Casi todas las unidades que dan servicio a los hogares al igual que las instalaciones de luz comercial solo disponen de corriente monofásica, que es conducida por dos conductores más la tierra”.

Delimitando las características de la energía eléctrica, se tiene que el mercado objetivo tiene acceso a la CA monofásica con las especificaciones de la Tabla 3.12.

*Tabla 3.12. Características del sistema eléctrico por país [Extracto]. Fuente: (Worldstandards, 2017).*

País	Voltaje	Frecuencia	Tipo de clavija	Tipo de tomacorriente
México	127 V (Monofásico)	60 Hz	A/ B	A / B
	220 – 480 V (Trifásico)	60 Hz	Número de cables de 3 a 4	

Mientras que los motores se pueden clasificar dependiendo del número de fases en su alimentación independientemente del tipo de corriente (directa o alterna) (Figura 3.18).



*Figura 3.18. Clasificación por el número de fases en su alimentación. Fuente: (Videla, 2017).*

Teniendo en cuenta el análisis que hace el autor, las opciones a considerar son: monofásica por el tipo de energía en los hogares, y el trifásico por las ventajas que presenta, mismo que se evaluarán de acuerdo con los requerimientos de la máquina, complementando las especificaciones en el capítulo 4.



### 3.3.2.7 Sistema de calentamiento

*Beltrán y Marcilla (2012)* mencionan que el calentamiento puede realizarse mediante:

- Resistencias eléctricas circulares

Y es menos usual por:

- Radiación
- Encamisado con fluidos refrigerantes o calefactores

#### Resistencias tipo banda

Son los calentadores desarrollados para superficies cilíndricas (Figura 3.19). Su uso más frecuente es en las extrusoras e inyectoras, así también para contenedores cilíndricos, tambores y cubetas.



*Figura 3.19. Bandas Calentadoras. Fuente: (ENSA electronics, 2017).*

La fabricación de una resistencia tipo banda está en función de las características del proceso a calentar, dimensiones, montaje y capacidades eléctricas, para ello existen tres formas de manufactura utilizadas de acuerdo con *Tei (2017)*:

- Resistencia tipo banda mica
- Resistencia banda con elemento cerámico
- Resistencia tipo banda con aislamiento mineral

De las cuales, el tipo de resistencia de banda recomendada es la banda de mica (Figura 3.20), debido a que es una solución eficiente y económica, alcanzando temperaturas máximas de hasta 482 °C. Además de que es posible realizarles diferentes terminaciones, mecanismos y perforaciones en su superficie.



*Figura 3.20. Resistencia tipo mica banda. Fuente: (Tei, 2017).*

Las dimensiones mínimas de fabricación de acuerdo con (*ENSA electronics, 2017*) es de 20 mm de diámetro y 20 mm de ancho. La construcción puede ser circular o en medias cañas y la fijación puede ser mediante cejas o cinturón exterior.

El sistema de calentamiento proporciona una parte de la energía térmica que el material requiere para ser fundido. En la fase inicial o arranque de la máquina, el 100% de la energía para fundir al plástico proviene de este sistema, pero una vez que la extrusora llega a una operación estable, un 40% o más de la energía de fusión proviene de la fricción del husillo contra el material y el resto es proporcionado por el sistema de calentamiento. Para aumentar la eficiencia del conjunto barril y husillo en sus diversas funciones, es práctica normal variar la temperatura y tener de dos a seis zonas de calentamiento a lo largo del barril y el dado (*Ramos, 2013*).

Para la mejor conservación de la temperatura a lo largo del cañón y prevenir cambios en la calidad de la producción por variaciones en la temperatura ambiente, se acostumbra a aislar el cuerpo del cañón con algún material de baja conductividad térmica como la fibra de vidrio o el fieltro (*Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000b*).

#### Aislamientos térmicos en la industria

Los aislantes térmicos aparte de mejorar la eficiencia del equipo también son importantes para la protección de contactos accidentales con superficies calientes.

*RATSA (2011)*, clasifica a los aislamientos térmicos de acuerdo con su forma y composición en:

- Aislantes térmicos de fibras minerales
- Aislantes térmicos celulares
- Aislantes térmicos granulares

Teniendo como limitantes la temperatura máxima de operación de la extrusora que corresponde a 260 °C, se recomienda el uso de aislantes térmicos de fibras minerales, en especial el uso de la fibra de vidrio, que cuenta con las siguientes características (Tabla 3.13):

*Tabla 3.13. Características de los aislantes térmicos [Extracto]. Fuente: RATSA (2011).*

Termoaislantes fibrosos	Presentación	Temperatura máx. de operación:
Fibra de vidrio	- Con aceites minerales: Colchoneta	538 °C
Es un termoaislante hecho a partir del estado de fusión de vidrio.	tipo I, II y III. - Con aglutinantes orgánicos: Medias cañas, Placas rígidas, Rollos.	538 °C

El sistema de resistencias, en algunos casos esta complementado con un sistema de enfriamiento que permite disipar el exceso de calor, entre las opciones que se manejan son:

- Flujo de líquido
- Ventiladores de aire
- Mamparas metalizadas con costillas llamadas disipadores de calor, incrementando la capacidad de refrigeración.
- Vapor de agua, utilizado para procesos con mayor control de temperatura, aunque el costo y mantenimiento es mayor.

Independientemente del sistema de calentamiento y el de refrigeración, todo el sistema debe ser controlado desde un tablero, donde las temperaturas de proceso se establecen en función del tipo de material y del producto deseado.

### 3.3.2.8 Placa rompedora y juego de mallas

Dentro de las funciones de la placa rompedora están: detener el flujo en espiral del material plástico, y servir de soporte para las mallas de filtrado. Mientras que las mallas retienen material carbonizado, residuo sin fundir, entre otros. Se recomienda tener un filtrado eficiente, cuando el producto a extruir es delgado y el material a utilizar es reciclado, dependiendo de las especificaciones del extruido, se establece el tiempo para el cambio de mallas, con la posibilidad de ser manual o automático (*Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000b*), además de que los filtros mejoran el mezclado y homogenización del fundido.

*Beltrán y Marcilla (2012)*, recomiendan que, para la colocación de las mallas, la primera sea más ancha e ir reduciendo el tamaño progresivamente, al último un filtro de malla ancha y el plato rompedor para soportar los filtros.

El diseño del plato debe ser fácil de remplazar, para sustituirlas rápidamente y evitar caídas de presión al ensuciarse la malla. En la Figura 3.21 se muestran las medidas del plato rompedor.

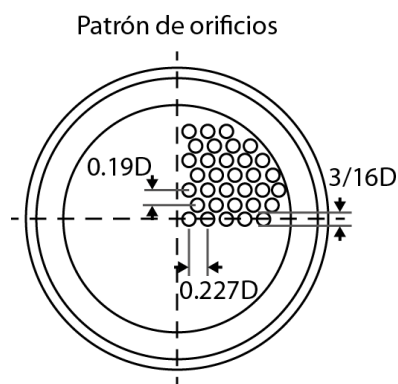


Figura 3.21. Dimensiones plato rompedor. Fuente: (*Beltrán y Marcilla, 2012*).

El *Instituto Mexicano del Plástico Industrial (2000b)*, define a los siguientes tipos de malla (Figura 3.22).

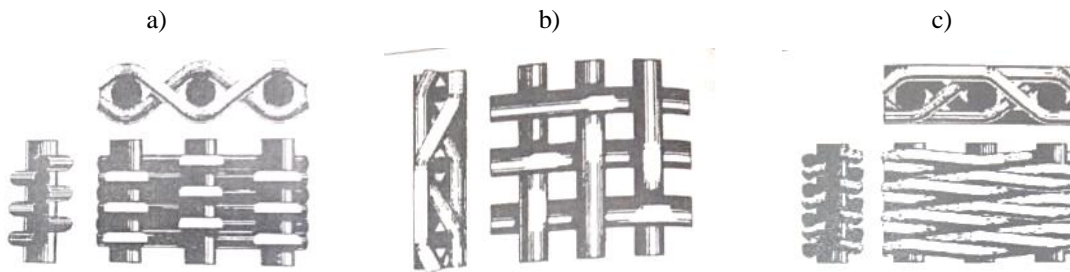


Figura 3.22. a) Malla Tipo Dutch Twill. b) Malla para Filtro Tipo Red Cuadrada. c) Malla Tipo Dutch Twill Diagonal. Fuente: (*Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 2000b*).

### 3.3.3 Análisis de sistemas externos

Igualmente, para los sistemas externos se realizó un análisis de cada uno de los componentes. La Tabla 3.14 muestra la relación entre las funciones, componentes y las especificaciones objetivo que se establecieron anteriormente.

Tabla 3.14. *Sistemas externos. Asignación de componentes a funciones. Fuente: Elaboración propia.*

Funciones	Componente	Especificaciones objetivo
Enfriamiento	Unidad de enfriamiento	Caracterización del material <ul style="list-style-type: none"> <li>• Propiedades del PP</li> </ul> Condiciones a componentes <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuente de energía eléctrica</li> <li>• Piezas comerciales o manufacturadas en la UTM</li> </ul>
Tiro	Unidad de tiro	Condiciones de operación <ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidad de producción</li> <li>• Fácil de operar y limpieza de la maquinaria</li> </ul> Condiciones del material <ul style="list-style-type: none"> <li>• Filamento de 1.75 mm + % de contracción</li> <li>• Extrusión consistente y sin defectos</li> <li>• Condición: el fenómeno de hinchamiento se compensará con el tiro</li> </ul>
Medición	Unidad de medición	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura de salida: 200 – 260 °C</li> <li>• Flujo: 0.200 a 0.500 kg/h</li> </ul>
Embobinado	Unidad de embobinado	Requerimientos del producto final <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diámetro: 1.75 mm</li> <li>• Tolerancia <math>\pm 0.10</math></li> <li>• Redondez</li> <li>• No absorbe humedad</li> <li>• Pigmento</li> <li>• Negro o varios colores</li> </ul>

### 3.3.3.1 Unidad de enfriamiento

Una vez lograda las dimensiones del producto, la unidad de enfriamiento se encarga de remover el calor excedente, evitando cualquier deformación posterior al producto. Antes de la unidad de enfriamiento, no es posible aplicar ningún esfuerzo o presión al producto sin correr el riesgo de provocar una deformación permanente. El enfriamiento normalmente es por tina de enfriamiento o por aire. Teniendo las siguientes opciones:

#### 3.3.3.1.1 Tinas de enfriamiento

Enfriamiento por Esparado (Figura 3.23): consiste en una cámara donde numerosas boquillas instaladas rocían agua fría sobre el perfil. Este enfriamiento es usado cuando las velocidades de producción son bajas y la aspersion puede lograr un enfriamiento efectivo, por el tiempo de permanencia elevado del producto dentro de este equipo (Mariano, 2011).



Figura 3.23. Tanques de enfriamiento por esparado. Fuente: (Industrial Ambar, 2017).

Enfriamiento por Inmersión (Figura 3.24): En el enfriamiento por inmersión, el perfil pasa por una tina llena de agua en constante enfriamiento, así se lleva a cabo un enfriamiento por un intercambio de calor constante e intenso en productos extruidos a alta velocidad (Mariano, 2011).



Figura 3.24. Tina de enfriamiento por inmersión. Fuente: (CPI Plastica, 2017).

En ambos métodos, algunos autores sugieren el cálculo exacto de la longitud de la tina de enfriamiento, requiriendo datos como: diámetro, espesor, material de fabricación, velocidad de producción y temperatura de agua de enfriamiento. También es común para los dos métodos, el uso de un enfriador y una bomba de recirculación, para poder enfriar el agua que se calienta por el contacto con el plástico, devolviéndolo a la tina de enfriamiento para completar el ciclo.

### 3.3.3.1.2 Enfriamiento por aire

Para los sistemas de enfriamiento por aire existen ventiladores y sopladores (Figura 3.25).



Figura 3.25. Ventilador (Izq.) y soplador (Der.). Fuente: (NMB, 2017).

Los ventiladores se fabrican en relación a las características de servicio que ofrecerán, clasificándose por voltaje, flujo de aire, tamaño de la caja, nivel de resistencia a la intemperie y a ambientes peligrosos (NMB, 2017).

Algunos de ellos son: Ventiladores axiales o de caja, son diseñados para trabajar con sistemas de baja impedancia y hacen menos ruido. Son de uso común y económicos, utilizados normalmente en computadoras. Mientras que los sopladores, están diseñados para trabajar con sistemas que tienen alta impedancia, tienen un flujo de aire más concentrado y generan una cantidad de ruido significativo.

Para lograr una buena circulación de aire, es importante que los planes de diseño tomen en cuenta el calor producido, el espacio y la energía adecuada para el ventilador o el soplador de refrigeración. Para tomar la decisión de qué tipo de enfriamiento usar, se someten a evaluación estos dos sistemas en el siguiente capítulo.

### 3.3.3.2 Unidad de tiro

La unidad de tiro como se mencionó antes no afecta la productividad de la línea de extrusión, pero influye en la calidad de la película final, ya que debe de tirar uniformemente para no provocar variaciones en las dimensiones del perfil. Se conocen tres tipos de unidades de tiro (Figura 3.26):

- Por Oruga
- De Bandas
- De Ruedas o Rodillos



Figura 3.26. Unidad de tiro por: (De izq. a der.) Oruga, banda, rodillos. Fuente: Google Imágenes.

De estos tipos de unidades, las dos primeras se prefieren cuando el artículo producido es sensible a la presión, esto es, que pueda sufrir deformaciones bajo presiones moderadas o en productos de grandes dimensiones. Los sistemas por rodillos son más sencillos y adecuados cuando es muy pequeña el área de contacto (*Mariano, 2011*).

Por lo tanto, la unidad de tiro se prefiere por rodillos a los cuales se les puede aumentar el área de contacto mediante un canal de ser necesario.

### 3.3.3.3 Unidad de medición

Existen diferentes tipos de tecnologías que permiten la medición de diámetro, algunas de ellas son por sistema de barrido y tecnología de sensores CCD lineales (“charge-coupled device”, dispositivo de carga acoplada) (*Sikora, 2017b*). Los cuales implican un costo elevado en su adquisición. Por lo que se propone el uso de medición a través de otros instrumentos.

El indicador de carátula o digital es un instrumento de uso extendido en la industria para mediciones diversas, utilizados en dispositivos para una medición muy rápida de piezas en serie. Según *Mitutoyo (2010)* existe una gran variedad de modelos para adecuarse a diferentes aplicaciones, con variedades en el intervalo de medición, valor de la mínima graduación, lectura en mm o pulgada, diferentes puntas de contacto e indicadores de carátula tipo palanca (Figura 3.27).



Figura 3.27. Indicador de carátula y digital. Fuente: (*Mitutoyo, 2017*).

Debido a que se busca un bajo costo para la extrusora, se consideran solo los indicadores de carátula.

### 3.3.3.4 Unidad de embobinado

Las unidades de embobinado son dispositivos para habilitar el material producido para suministrarlo a máquinas de procesamiento final como las impresoras 3D. De acuerdo con *Mariano (2011)*, existen básicamente dos tipos de embobinadores: de contacto y centrales.

### 3.3.3.4.1 Embobinadores de contacto

En el embobinado de contacto, el eje que porta el núcleo sobre el cual se enrollará la bobina, no está motorizado, pero gira por la transmisión del movimiento de otro rodillo (sobre el cual se recarga) que sí cuenta con un motor accionador llamado rodillo de contacto. Sus ventajas son: simplicidad de operación y economía. Desventajas: sólo produce bobinas apretadas (Mariano, 2011).

### 3.3.3.4.2 Embobinadores centrales

En los embobinadores centrales, el rodillo sobre el cual está la bobina se encuentra motorizado, varía de velocidad al incrementarse el diámetro de la bobina, así como varía el torque para mantener constante la tensión en el producto. Todas estas variaciones son controladas por PC. Entre las ventajas del sistema de embobinado central está la producción de bobinas de baja tensión de enrollado, que reduce la sensibilidad de los rollos al encogimiento post-enrollado (Mariano, 2011).

Debido a que se busca que las bobinas del filamento estén ajustadas y que no requiera una gran inversión en la tecnología de los componentes se sugiere el embobinado de contacto adecuando los parámetros al concepto y las limitantes del diseño general.

### 3.3.4 Explorar sistémicamente los componentes

La búsqueda externa y evaluación interna de cada uno de los componentes dio como resultado general, un conjunto de componentes que interactúan como se muestra en la Figura 3.28.

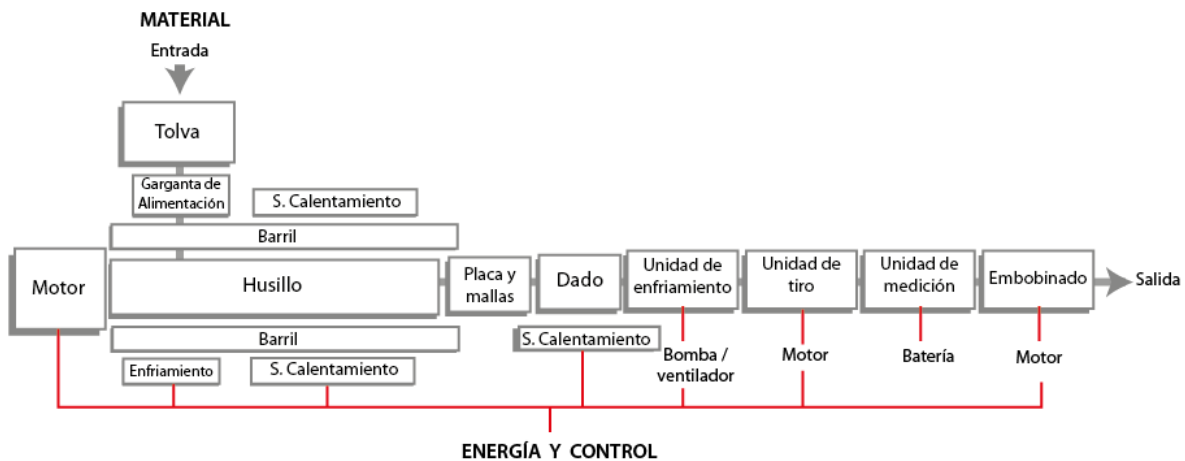


Figura 3.28. Interacción de componentes en el proceso de extrusión. Fuente: Elaboración propia.

Aunque la estructura general siga los mismos principios básicos de funcionamiento, el aporte del análisis de la extrusora y sistemas externos es de especificaciones recomendadas para el funcionamiento correcto de la extrusora conforme al material a procesar y las limitantes del proyecto. La Tabla 3.15 muestra los componentes divididos en especificaciones fijas y variables obtenidas del análisis anterior, con la finalidad de mostrar los parámetros a definir mediante el concepto y el cálculo de componentes en el siguiente capítulo.



Tabla 3.15. Componentes con especificaciones fijas y variables. Fuente: Elaboración propia.

N°	Componente	Especificaciones Fijas	Especificaciones variables
1	Tolva	Flujo en masa Volumen: albergar material para 2 horas de trabajo	Sección circular o cuadrada Material: Resistente a la carga que soportara y a la temperatura del entorno.
2	Garganta de alimentación	Alimentación central Dimensiones 1.5 D de longitud y 0.7 D de ancho	Sistema de enfriamiento (temperatura: 50 °C por debajo de la temperatura de fusión del polímero)
3	Barril	Superficie lisa	Material y geometría definidos para soportar la presión y temperatura del husillo
4	Husillo	Extrusor largo Filete del tornillo simple P (paso) = 1.27 cm Profundidad constante H = 0.4 cm y $\delta = 0.01$ cm	Relación L/D = (6 a 40) /1 Ángulo de hélice = 17.66° [A evaluar] Ángulo grande de los filetes Radio grande de los flancos del filete
5	Dado	Boquilla circular Cabezas de extrusión longitudinales (de tipo recto) Flujo convergente Diámetro: Diámetro del producto extruido + contracción del material	Unidad de calefacción para el dado, así como unidades de ajuste, centrado y conexión.
6	Motor	Tipo de motor: corriente alterna (CA)	Fases: Monofásica o trifásica [A evaluar]
7	Sistema de calentamiento	Resistencias eléctricas circulares Buen control de la cantidad de calor aplicada.	Conservación de la temperatura: Fibra de vidrio Sistema de enfriamiento de ser necesario: Disipadores o ventiladores de aire. Zona de calentamiento: 2 a 6, a lo largo del barril y el dado
8	Placa rompedora y juego de mallas	Placa rompedora	Malla final < 500 $\mu$ m Malla para filtro, tipo red cuadrada Juegos de mallas de diferentes medidas
9	Unidad de enfriamiento		Enfriamiento por inmersión Enfriamiento con sopladores
10	Unidad de tiro	Tiro por rodillos	Canal de contacto
11	Unidad de medición		Indicador de carátula
12	Embobinado		Embobinado de contacto

Además de considerar que el material debe de tener una dimensión lo más uniforme posible, requerimiento para la etapa de trituración de los residuos, y que se acepta como cierto para los cálculos posteriores debido a que no se considera esta etapa en el proyecto.

### 3.3.5 Evaluación de la necesidad de diseño industrial

Según Ulrich y Eppinger (2012), la aplicación del diseño industrial interviene en dos aspectos: necesidades ergonómicas y necesidades estéticas, las cuales se ponderan de acuerdo con la importancia que tienen en los componentes y en los sistemas de control y eléctrico (Tabla 3.16 y Tabla 3.17).

Tabla 3.16. Evaluación de necesidades ergonómicas. Fuente: Elaboración propia.

N°	Componente	Facilidad de uso	Facilidad de mantenimiento	Interacciones del usuario	Novedad en la interacción	Problemas de seguridad
1	Tolva	5	5	5	5	3
2	G. de alimentación	3	5	1	1	1
3	Barril	3	5	1	1	1
4	Husillo	3	5	1	1	1
5	Dado	5	5	1	1	1
6	Motor	3	5	1	1	3
7	S. de calentamiento	5	5	5	1	5
8	P. rompedora y mallas	5	5	3	1	1
9	U. de enfriamiento	5	5	3	3	5
10	Unidad de tiro	5	5	3	3	3
11	Unidad de medición	5	5	3	3	1
12	Embobinado	5	5	3	3	3
13	Sistema eléctrico	5	5	3	3	5
14	Sistema de control	5	5	5	5	5
	Ponderación	62	70	38	32	38

Tabla 3.17. Evaluación de necesidades estéticas. Fuente: Elaboración propia.

N°	Componente	Diferenciación visual	Orgullo de propiedad, imagen y moda	Motivación por producto estético
1	Tolva	3	1	1
2	G. de alimentación	1	1	1
3	Barril	1	1	1
4	Husillo	1	1	1
5	Dado	1	1	1
6	Motor	1	1	1
7	S. de calentamiento	1	1	1
8	P. rompedora y mallas	1	1	1
9	U. de enfriamiento	1	1	1
10	Unidad de tiro	3	1	1
11	Unidad de medición	3	1	1
12	Embobinado	3	1	1
13	Sistema eléctrico	1	1	1
14	Sistema de control	5	1	1
	Ponderación	26	14	14

*Nota: Ponderación del 1 al 5, donde 5 indica mayor importancia.*

La evaluación anterior arroja los siguientes datos (Tabla 3.18):

*Tabla 3.18. Ponderación de necesidades. Fuente: Elaboración propia.*

Necesidades	Ponderación
Facilidad de mantenimiento	70
Facilidad de uso	62
Problemas de seguridad	38
Interacciones del usuario	38
Novedad en la interacción	32
Diferenciación visual	26
Orgullo de propiedad, imagen y moda	14
Motivación por producto estético	14

Las necesidades que tienen mayor importancia por resolver son el mantenimiento y la facilidad de uso, incluyendo la seguridad de algunos componentes que representan peligro para el usuario. En general, debido al uso y el entorno de aplicación de este tipo de maquinaria, la evaluación funcional es la que mayor importancia tiene.

### **3.3.6 Conceptualización**

En conjunto de las especificaciones objetivo, especificaciones ideales de los componentes y las necesidades de diseño industrial, se inicia la etapa de conceptualización guiada por algunos pasos recomendados en la metodología de *Ulrich y Eppinger (2012)*.

- Paso 1: Crear una disposición geométrica aproximada.

*Véase el anexo D. Conceptualización 1.*

- Paso 2: Identificar las interacciones fundamentales e incidentales.

Analizando las interacciones entre los componentes, se concluye que se debe tener cuidado con los sistemas de calentamiento, motor, sistemas externos y la carcasa para evitar la transmisión de vibraciones, calor, aire o humedad indeseables entre estos componentes.

Debido a que no se conocen las dimensiones de los componentes no se limita el concepto, en el siguiente capítulo se encuentran los cálculos que permitirán dar las dimensiones generales y las pautas para bocetar a detalle los componentes y su estructura de soporte.

## Capítulo 4 Diseño a nivel sistema

Para calcular cada uno de los componentes, es necesario analizar el proceso de fusión y transporte de sólidos y fluidos durante la extrusión, ya que con estas ecuaciones se determinan los parámetros de funcionamiento.

### 4.1 Proceso de fusión

Este proceso se explica de acuerdo con *Beltrán y Marcilla (2012)*.

La fusión del material se debe a dos factores, el primero es el calor conducido desde la superficie del cilindro y el segundo es el calor generado por fricción a lo largo de las superficies del cilindro y del tornillo.

El proceso inicia con una fina capa de material fundido junto al cilindro, que irá creciendo hasta que su espesor se iguale con la tolerancia radial entre el cilindro y el filete del tornillo,  $\delta$ , mientras que el resto del material se encontrará formando un lecho sólido. Como consecuencia del movimiento del tornillo se creará un gradiente de velocidad en la película fundida situada entre la capa sólida y la superficie del cilindro. El polímero fundido en la película será barrido por el filete que avanza, separándose así del cilindro, reuniéndose en una zona o pozo situado delante del filete que avanza en la parte posterior de la zona de transición (Figura 4.1).

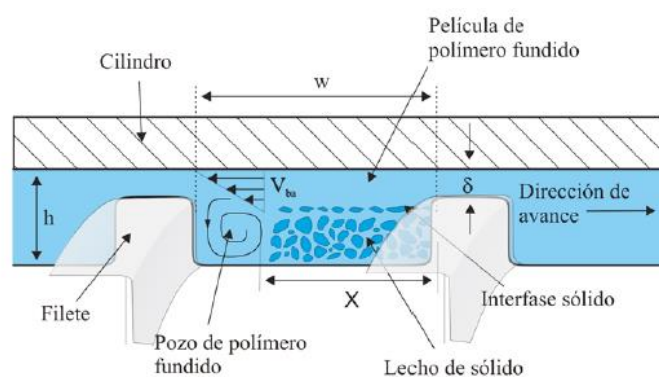


Figura 4.1. Corte transversal de la extrusora en la zona de transición. Fuente: (Beltrán y Marcilla, 2012).

A medida que se va acumulando más y más polímero en el pozo de polímero fundido, el tamaño del pozo aumenta, mientras que el ancho de la capa sólida irá disminuyendo. De esta forma se desarrolla una presión que empuja a la capa sólida y la sitúa en la parte anterior del canal. Por eso, a pesar de que casi toda la fusión ocurre en la superficie del cilindro, la altura de la capa sólida no disminuye, sino que disminuye su anchura, como se puede apreciar en la Figura 4.2.

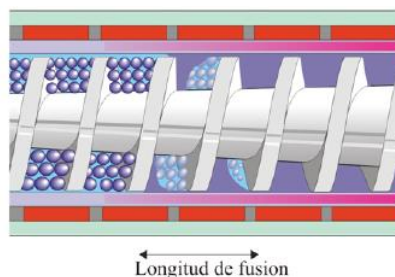


Figura 4.2. Ancho del pozo de fundido a lo largo de la zona de transición. Fuente: (Beltrán y Marcilla, 2012).

En esta Figura 4.2 también se indica la longitud de fusión que es la longitud de tornillo desde que comienza la fusión hasta que esta termina.

En una extrusora funcionando de forma adecuada la transmisión de calor está muy favorecida, debido a que continuamente se tendrá una fina capa de material renovado en contacto con el cilindro. En general se puede desprestigiar la transmisión de calor entre el pozo fundido y la capa sólida. La existencia de la capa sólida explica también la eliminación del aire atrapado entre las partículas sólidas. A medida que la capa sólida es compactada y comprimida por el pozo de fundido, el aire atrapado entre las partículas escapa hacia el exterior vía la tolva de alimentación.

El calor necesario puede ser suministrado bien por conducción desde la superficie del cilindro, a través de la película fundida o bien por disipación viscosa (cizalla) debido a los esfuerzos cortantes que está sometida la delgada película de fundido. La relación entre estas dos cantidades de calor depende de las condiciones de operación y del polímero utilizado. El flujo de calor por disipación viscosa está favorecido al aumentar la velocidad del tornillo. Sin embargo, en este caso la contribución de la transmisión de calor por conducción a la fusión se verá reducida puesto que aumentará el caudal, y por tanto disminuirá el tiempo de residencia del material en la extrusora.

Para conocer el comportamiento de las variables de la temperatura del husillo y la longitud de fusión, se muestra la Figura 4.3.

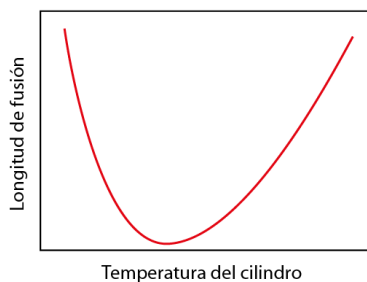


Figura 4.3. Relación entre la longitud de fusión y la temperatura del cilindro para una velocidad del tornillo constante. Fuente: (Beltrán y Marcilla, 2012).

En donde la longitud de fusión disminuye (por tanto, aumenta la velocidad de fusión) al aumentar la temperatura del cilindro hasta un cierto punto en el que la longitud de fusión aumenta al disminuir la cantidad de calor generado por disipación viscosa.

En general la velocidad de fusión aumenta al disminuir la profundidad del canal, puesto que se produce una compresión del pozo de sólido hacia la capa de fundido, mejorando la transmisión de calor y aumentando la cizalla. Sin embargo, si la compresión tiene lugar muy rápidamente el pozo de sólido podría provocar un taponamiento de la extrusora.

#### 4.1.1 Consideraciones básicas en el flujo de un extrusor.

Como se mencionó en el apartado 2.3.2, el husillo al igual que el barril están divididos en zonas: 1, zona de alimentación, 2, zona de compresión, y 3, zona de dosificación o de bombeo.

La zona de dosificación es la última zona del husillo y para efectos de cálculos de acuerdo con *Ramos (2013)* se asume que el material fluye completamente fundido en esta zona. Así, un análisis matemático simple considera solamente la zona de dosificación y supone que se tiene un flujo de fluidos a través de un canal de sección transversal rectangular constante.

La profundidad del canal es constante y el lecho sólido debe de haber desaparecido por completo, o en caso contrario el aire se eliminaría con mucha dificultad y podría quedar atrapado en el fundido. La zona de dosificación actúa como una bomba en la que el movimiento del material fundido hacia la extrusora se produce como resultado del giro del tornillo y de la configuración helicoidal del mismo (*Beltrán y Marcilla, 2012*).

El flujo neto a través de un extrusor es igual a la suma algebraica del flujo de arrastre  $Q_D$ , el flujo de presión  $Q_P$  y el flujo de pérdida  $Q_L$ :

$$Q = Q_D + Q_P + Q_L \quad (4.1)$$

**El flujo de arrastre** se desplaza hacia adelante y ocurre debido al movimiento de una superficie (husillo) en contacto con el fluido, mientras que otra superficie, también en contacto con el fluido (barril), permanece fija, Figura 4.4.

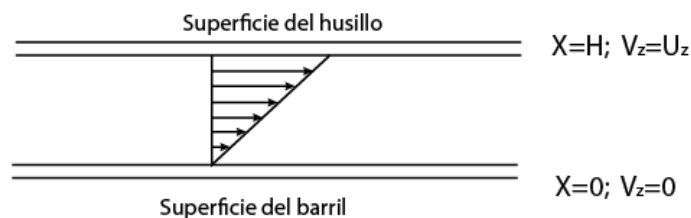


Figura 4.4. Flujo de arrastre. Fuente: (*Ramos, 2013*).

**El flujo de presión** circula hacia atrás y ocurre debido a una diferencia de presiones, es decir, alta presión hacia la salida y baja presión hacia la región de entrada (presión atmosférica), Figura 4.5.

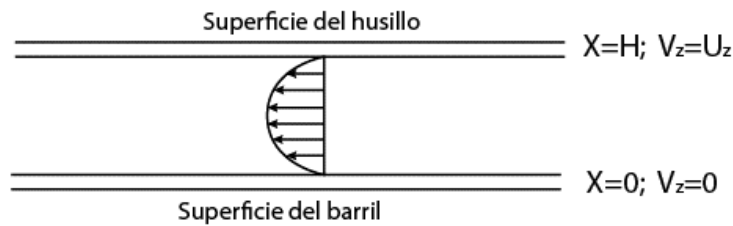


Figura 4.5. Flujo de presión. Fuente: (Ramos, 2013).

**El flujo de pérdida** es también un flujo hacia atrás debido a una misma diferencia de presiones, solo que es un flujo que ocurre por el espacio que existe entre los bordes de las hélices del husillo y la pared del barril. Sin embargo, para efectos de cálculo este es un flujo que puede omitirse.

Así, el flujo neto  $Q$  se puede calcular de la siguiente manera:

$$Q = Q_D - Q_P \quad (4.2)$$

La Figura 4.6 muestra una representación del sistema husillo-barril, y a continuación se definen las variables a utilizar:

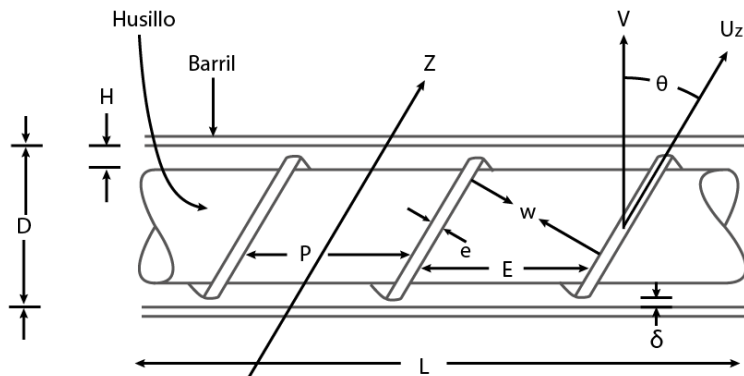


Figura 4.6. Dimensiones de un sistema husillo-barril. Fuente: (Ramos, 2013).

Definiciones de variables utilizadas:

$H_a$  = profundidad del canal del husillo (Zona de alimentación) [cm]

$H_d$  = profundidad del canal del husillo (Zona de dosificación) [cm]

$w$  = ancho del canal del husillo [cm]

$D_H$  = diámetro del husillo [cm]

$D_B$  = diámetro interno del barril [cm]

$L$  = longitud del husillo [cm]

$N$  = velocidad de rotación del husillo [rev / s]

$V$  = velocidad tangencial de rotación del husillo [cm / s]

$U_z$  = velocidad máxima del fluido en dirección del canal [cm / s]

$Q$  = gasto/ flujo volumétrico [cm<sup>3</sup> / s]

$\Delta P$  = gradiente de presión a lo largo del barril [dinas / cm<sup>2</sup>]

$Z$  = longitud del canal del husillo [cm]  
 $e$  = espesor de la hélice del husillo [cm]  
 $p$  = longitud del campo, longitud entre el inicio de una hélice y el inicio del siguiente [cm]  
 $\delta$  = separación entre la hélice y el barril [cm]  
 $\theta$  = ángulo entre la hélice y la dirección perpendicular al husillo [grados]

$\eta$  = viscosidad del flujo [ $\text{dinas} \frac{\text{s}}{\text{cm}^2} = \text{poises}$ ]  
 $D_D$  = diámetro del orificio del dado [cm]  
 $\alpha$  = ángulo de entrada del dado [grados]  
 $P_L$  = longitud paralela del dado [cm]  
 $E$  = longitud (axial) entre dos hélices del husillo [cm]

#### 4.1.2 Análisis de flujo en un extrusor, para fluidos newtonianos y condiciones isotérmicas

Ramos (2013) en su libro extrusión de plásticos presenta un método de análisis del flujo para un extrusor, haciendo las siguientes suposiciones:

1. Condiciones isotérmicas en el extrusor
2. Fluido newtoniano
3. La relación  $H/D$  es pequeña
4. No hay flujo de pérdida ( $Q_L = 0$ )
5. Espesor de la hélice es despreciable
6. Las propiedades físicas del fluido son constantes

A pesar de la posible falta de validez de las anteriores suposiciones, las ecuaciones simplificadas que se obtienen son muy útiles para hacer un análisis semicuantitativo de un extrusor.

Obteniendo finalmente que, el flujo del extrusor  $Q_E$  es igual a:

$$Q_E = \alpha N - \beta \left( \frac{\Delta P}{\eta} \right) \quad (4.3)$$

Del cual, el flujo de arrastre es:

$$Q_D = \alpha N \quad (4.4)$$

Donde:

$$\alpha = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 H \text{sen} \theta \cos \theta \quad (4.5)$$

Y el flujo de presión es:

$$Q_P = \beta \left( \frac{\Delta P}{\eta} \right) \quad (4.6)$$

Donde:

$$\beta = \frac{1}{12L} \pi D H^3 \text{sen}^2 \theta \quad (4.7)$$

Teniendo que el flujo de arrastre  $Q_D$  depende sólo de la geometría y de la velocidad de rotación del husillo, mientras que el flujo de presión  $Q_P$  depende de la geometría del husillo, y además de la diferencia de presiones y de la viscosidad del fluido.



#### 4.1.3 Análisis del flujo de un dado para fluidos newtonianos y condiciones isotérmicas

Fragmento extraído de *Ramos (2013)* pág. 100 - 103.

La operación de un extrusor depende tanto del husillo como del dado. Considerando ahora el flujo a través del dado, se tiene que la velocidad de flujo en un fluido newtoniano es directamente proporcional a la caída de presión e inversamente proporcional a la viscosidad del fluido. Así, se tiene:

$$Q_d = k \left( \frac{\Delta P}{\eta} \right) \quad (4.8)$$

Donde  $k$  es una constante de proporcionalidad que depende de la geometría del dado.

Para dados capilares cilíndricos

$$k = \frac{\pi R^4}{8L_d} \quad (4.9)$$

Donde  $R$  es el radio y  $L_d$  la longitud del dado.

Así la ecuación que define al flujo de un fluido newtoniano a través de un canal circular es:

$$Q_d = \frac{\pi R^4}{8L} \left( \frac{\Delta P}{\eta} \right) \quad (4.10)$$

#### 4.1.4 Flujo en la zona de alimentación

Fragmento extraído de *Ramos (2013)* pág. 97.

Lo ideal es que en cada vuelta o revolución del husillo se transporte desde la zona de alimentación hacia adelante un volumen de material igual al volumen de una vuelta del canal del husillo, es decir, Volumen \* x rpm x densidad aparente.

$$\text{Flujo} \left[ \frac{g}{min} \right] = w \pi H_a (D - H_a) N \rho \quad (4.11)$$

Donde:

$D$  = Diámetro del husillo en la zona de alimentación [cm]  
 $H_a$  = Profundidad del canal en la zona de alimentación [cm]  
 $N$  = Velocidad de rotación del husillo [rpm]  
 $\rho$  = Densidad aparente del plástico que se utiliza [ $g/cm^3$ ]

\* El área circunferencial de una vuelta de la pared del canal del husillo se determina de la siguiente forma:

$$\frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi(D - 2H)^2}{4} = \pi H_a (D - H_a) \quad (4.12)$$

El volumen de una vuelta del canal del husillo es el producto del área circunferencial de una vuelta de la pared del canal del husillo multiplicado por el ancho del mismo canal  $w$ , así:

$$w \pi H_a (D - H_a) \quad (4.13)$$

## 4.2 Cálculo de componentes

Conforme a las especificaciones que se hicieron para el husillo y el dado en la etapa de análisis de componentes, se retoma la información de la Tabla 3.15 para los siguientes cálculos.

### 4.2.1 Condiciones de operación

#### Flujo volumétrico

Con base en la capacidad de producción de  $0.250 \text{ kg/h}$ , limitado por las especificaciones del cliente, se calcula el flujo volumétrico del Polipropileno fundido con una densidad  $\rho = 0.72 \text{ g/cm}^3$ .

$$\text{Flujo volumétrico} = \frac{\text{masa}}{\rho} = \frac{250}{0.72} = 347 \text{ cm}^3/\text{h} \approx 0.1 \text{ cm}^3/\text{s}$$

#### Viscosidad

Para la viscosidad, regresando al apartado 3.1.1.2, considerando que la temperatura del proceso de extrusión varía entre  $200 - 260^\circ\text{C}$ , y la velocidad de corte varía de  $100 - 1000 \text{ s}^{-1}$  (Morton, 2012). Se tiene que para  $T = 230^\circ\text{C}$ , se obtiene una  $\eta = 150 \text{ Ns/m}^2$  en la Figura 4.7.

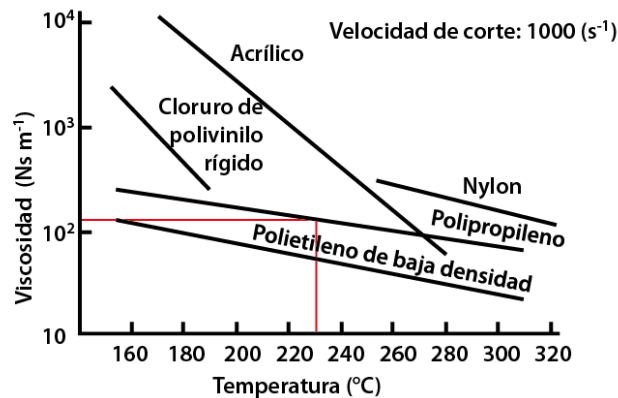


Figura 4.7. Efecto de la temperatura sobre la viscosidad de los polímeros. Fuente: (Morton, 2012).

#### Velocidad de corte

Y teniendo la viscosidad, se obtiene una velocidad de corte  $\gamma = 250 \text{ s}^{-1}$ , que está dentro de los parámetros del proceso de extrusión en la Figura 4.8.

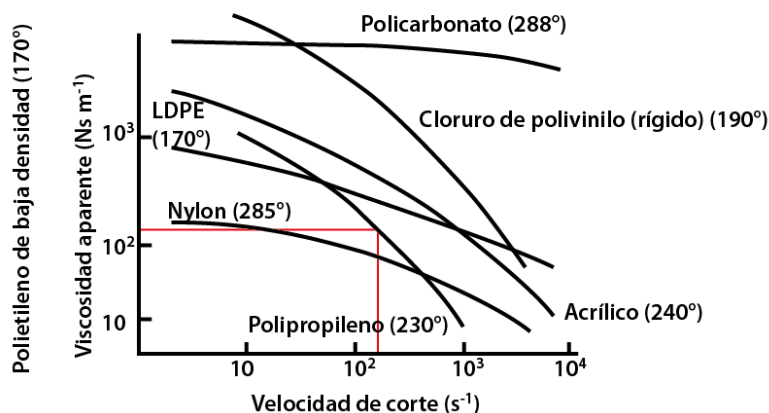


Figura 4.8. Viscosidad aparente contra rapidez de corte de algunos polímeros. Fuente: (Morton, 2012).

### Diámetro del perfil extruido

Considerando que el Instituto Mexicano del Plástico, menciona que el porcentaje de contracción recomendado es del 1.75%, por lo que el diámetro del extruido es:

$$D_d = \text{Diámetro del filamento} * 1.0175 = 1.75 * 1.0175 = 1.78 \text{ mm}$$

### 4.2.2 Cálculo de las características del extrusor y el dado.

De los datos necesarios para el análisis de flujo se tiene la definición de las siguientes variables (Tabla 4.1)

Tabla 4.1. Variables del husillo. Fuente: Elaboración propia.

Variabes	Detalles	Valor	Unidades
$H$	Constante	0.4	[cm]
$p$	Constante	1.27	[cm]
$Q$	Constante	0.1	[cm <sup>3</sup> / s]
$R$	Constante	$\frac{D_d}{2} = 0.089$	[cm]
$\eta$	Constante	1500	[ <i>dinas</i> $\frac{s}{cm^2} = poises$ ]
$\delta$	Constante	0.01	[cm]
$\theta$	Por geometría	$\theta = \tan^{-1} \frac{1.27}{\pi D_H}$	[grados]
$\theta$	Ángulo común	$\theta = 17.66$	[grados]
$D_H$	Savgorodny (1973)	$D_H = H/0.16$	[cm]
$D_H$	Por geometría	$D_H = \frac{1.27}{\pi \tan \theta}$	[cm]
$L$	Savgorodny (1973)	$L = (6 - 40)D$	[cm]
$e$	Savgorodny (1973)	$e = 0.08 D$	[cm]
$w$	Por geometría	$w = p \cos \theta - e$	[cm]
$Z$	Por geometría	$Z = \frac{L}{\text{sen } \theta}$	[cm]

De la tabla nótese que las variables principales son el ángulo y el diámetro del husillo, con las cuales se define por completo el husillo del extrusor.

La interacción del extrusor y su dado puede comprenderse observando las características de cada uno de ellos, para esto se utiliza el análisis que describe *Morton (2012)*.

Estos conceptos se formulan como sigue:

1. Si la presión no se acumulara, por ejemplo, que no hubiera placa rompedora o dado, la producción sería la máxima,  $Q_{m\acute{a}x}$ , igual a la ecuación ideal para el flujo de arrastre.

$$Q_{m\acute{a}x} = Q_D = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 H N \text{ sen } \theta \cos \theta \quad (4.14)$$

2. Si la resistencia es máxima,  $Q_E = 0$ , se puede igualar el flujo de arrastre con el flujo de presión

$$\frac{1}{2} \pi^2 D^2 H N \text{ sen } \theta \cos \theta = \frac{1}{12\eta} \pi D H^3 \text{ sen}^2 \theta \frac{P}{L}$$

$$P = P_{m\acute{a}x}$$

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{6\pi D L N \eta}{H^2 \tan \theta} \quad (4.15)$$

Estos puntos representan los extremos en el diagrama de las características del extrusor o del tornillo (Figura 4.9).

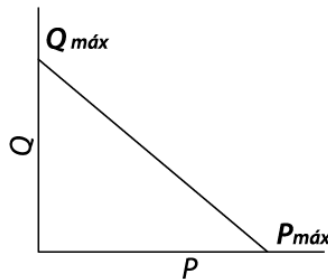


Figura 4.9. Línea característica del extrusor del tornillo. Fuente: (*Morton, 2012*).

3. Se requiere una presión para que trabaje el dado que se encuentra en el extremo de salida del extrusor, es necesaria la presión para forzar el material fundido a través de él. La característica del dado es, por lo tanto, opuesto en forma; la producción máxima se deberá a una presión máxima. Esto puede agregarse al diagrama para dar la Figura 4.10. El punto de intersección es el punto de operación, donde se hallan las condiciones óptimas de funcionamiento del extrusor.

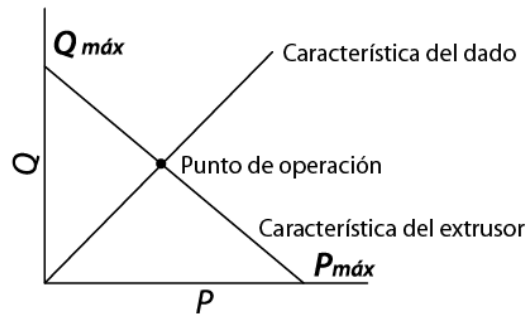


Figura 4.10. Interacción de las líneas características del tornillo y del dado. Fuente: (Morton, 2012).

4. La salida de dados individuales depende, evidentemente, de sus formas. La fórmula para un dado anular como se analizó anteriormente es

$$Q_d = \frac{\pi R^4}{8L_d} \left( \frac{\Delta P}{\eta} \right) \quad (4.10)$$

5. Las posiciones de las líneas de la gráfica en la Figura 4.10 se modifican por cambios en las condiciones de operación.

Analizando el punto de operación del extrusor, se tiene que el  $Q_E = Q_d$ , así como  $P_E = P_d$ . Tomando en consideración lo anterior y despejando  $P_d$  de la ecuación 4.10, se tiene que:

$$P_d = \frac{8Q_d\eta L_d}{\pi R^4} \quad (4.16)$$

Como aún se desconocen los parámetros del dado, se supone una  $L_d = 1\text{cm}$ . Sustituyendo los valores conocidos.

$$P_d = \frac{8(0.1)(1500)(1)}{\pi(0.089)^4} = 6.09 \times 10^6 \text{ dinas/cm}^2$$

De la ecuación característica del extrusor (ecuación desarrollada)

$$Q_E = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 H N \sin \theta \cos \theta - \frac{1}{12\eta} \pi D H^3 \sin^2 \theta \frac{P_E}{L} \quad (4.3)$$

De las variables, los valores desconocidos son  $N$ ,  $\theta$ ,  $D$  y  $L$ , donde la longitud y el diámetro se pueden expresar uno en función de otro mediante la elección de una relación  $L/D$ , delimitando así las variables para hacer un análisis de configuraciones del extrusor.

Para el análisis se eligen las relaciones  $L/D = 10$ , y  $L/D = 15$ , valores que se encuentran entre las relaciones recomendadas para los extrusores monohusillo.

Relación L/D = 10

Sustituyendo las variables conocidas en la ec. 4.3 y despejando  $N$ , se tiene que:

$$N = \frac{0.1 + 2.17\pi \operatorname{sen}^2 \theta}{0.2\pi^2 D^2 \operatorname{sen} \theta \cos \theta}$$

De la ecuación, se tiene que la frecuencia de giro (rps) dependen del ángulo y del diámetro del dado. Por lo que se evaluaron las siguientes opciones (Tabla 4.2):

Tabla 4.2. Análisis del extrusor, relación L/D=10. Fuente: Elaboración propia.

Limitaciones	$\theta$	$D$	$N$	$Q_{m\acute{a}x}$	$P_{m\acute{a}x}$
A Ángulo mínimo	5	4.62	$N = \frac{0.15}{3.66} = 0.04$	0.15	$17.67 \times 10^6$
B Diámetro recomendado por Savgorodny (1983)	9.2	2.5	$N = \frac{0.27}{1.95} = 0.14$	0.27	$9.44 \times 10^6$
C Ángulo común	17.66	1.27	$N = \frac{0.73}{0.92} = 0.79$	0.73	$7.10 \times 10^6$
D Ángulo máximo	20	1.11	$N = \frac{0.90}{0.78} = 1.15$	0.90	$6.90 \times 10^6$

Nota: Para los cálculos utilizar la relación de cocientes para  $N$  con el fin de tener mayor precisión en los resultados y en la gráfica.

Donde las ecuaciones para  $Q_{m\acute{a}x}$  y  $P_{m\acute{a}x}$  se definen como sigue al sustituir los valores conocidos:

$$Q_{m\acute{a}x} = 0.2\pi^2 D^2 N \operatorname{sen} \theta \cos \theta$$

$$P_{m\acute{a}x} = 562500 \frac{\pi D^2 N}{\tan \theta}$$

Relación L/D = 15

Ramos (2013) menciona que las relaciones más comunes en los extrusores varia de L/D = 15 a 25, por lo que se retoma esta relación. Igualmente sustituyendo los valores en la ecuación 4.3 y despejando  $N$ , se tiene que:

$$N = \frac{0.1 + 1.44\pi \operatorname{sen}^2 \theta}{0.2\pi^2 D^2 \operatorname{sen} \theta \cos \theta}$$

Evaluando las mismas opciones que en el análisis anterior se tiene que (Tabla 4.3):

Tabla 4.3. Análisis del extrusor, relación L/D=15. Fuente: Elaboración propia.

Ítem	Limitaciones	$\theta$	$D$	$N$	$Q_{m\acute{a}x}$	$P_{m\acute{a}x}$
E	Ángulo mínimo	5	4.62	$N = \frac{0.13}{3.66} = 0.04$	0.13	$22.97 \times 10^6$
F	Diámetro recomendado por Savgorodny (1983)	9.2	2.5	$N = \frac{0.22}{1.95} = 0.11$	0.22	$11.54 \times 10^6$
G	Ángulo común	17.66	1.27	$N = \frac{0.52}{0.92} = 0.57$	0.52	$7.59 \times 10^6$
H	Ángulo máximo	20	1.11	$N = \frac{0.63}{0.78} = 0.81$	0.63	$7.25 \times 10^6$

Donde las ecuaciones para  $Q_{m\acute{a}x}$  y  $P_{m\acute{a}x}$  se definen por las variables conocidas como sigue:

$$Q_{m\acute{a}x} = 0.2\pi^2 D^2 N \text{ sen } \theta \text{ cos } \theta$$

$$P_{m\acute{a}x} = 843750 \frac{\pi D^2 N}{\tan \theta}$$

La Figura 4.11 representa el comportamiento del extrusor para los diferentes casos (B, C, F, G), que corresponden a los dos ángulos con comportamiento más equilibrado entre las variables de presión, capacidad de producción y diámetro del husillo.

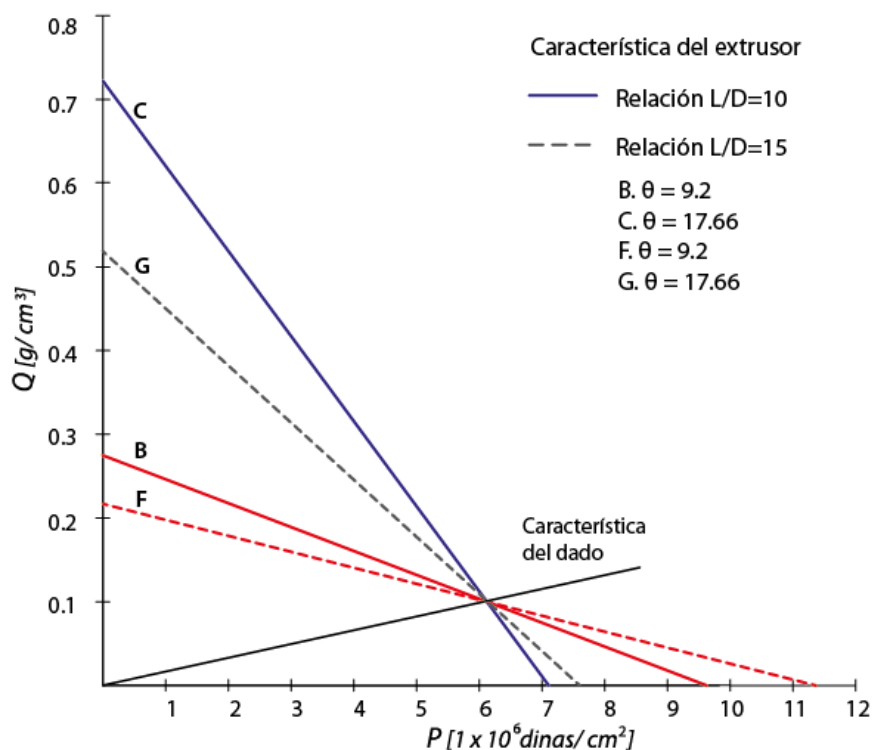


Figura 4.11. Familia de líneas características del tornillo con la línea característica del dado. Fuente: Elaboración propia.

Todas las líneas características del tornillo intersecan en el punto de operación que se estableció al principio con un  $Q = 0.1 \text{ cm}^3/\text{s}$  y  $P_d = 6.09 \times 10^6 \text{ dinas/cm}^2$ . Comparando la presión y flujo de trabajo máximo se llega a la conclusión de que con la línea G, se obtiene un flujo 5 veces mayor al flujo requerido con una presión menor y con una longitud del husillo que permitirá un mezclado homogéneo del material reciclado.

Con base en la elección, se determinan las siguientes especificaciones del husillo (Tabla 4.4).

Tabla 4.4. Especificaciones finales del husillo. Fuente: Elaboración propia.

Var.	Valor	Unidades	Var.	Valor	Unidades
$Q$	0.1	$[\text{cm}^3/\text{s}]$	$H$	0.4	$[\text{cm}]$
$Q_{m\acute{a}x}$	0.52	$[\text{cm}^3/\text{s}]$	$\theta$	17.66	$[\text{grados}]$
$P_{m\acute{a}x}$	$7.59 \times 10^6$	$[\text{dinas/cm}^2]$	$p$	1.27	$[\text{cm}]$
$P_d$	$6.09 \times 10^6$	$[\text{dinas/cm}^2]$	$e$	0.2	$[\text{cm}]$
$N$	0.57	$rps$	$w$	1.07	$[\text{cm}]$
$L$	19	$[\text{cm}]$	$Z$	62.8	$[\text{cm}]$
$D_H$	1.27	$[\text{cm}]$	$D_d$	0.178	$[\text{cm}]$
$\delta$	0.01	$[\text{cm}]$	$R$	0.089	$[\text{cm}]$
$D_B$	1.29	$[\text{cm}]$	$\eta$	1500	$[\text{dinas} \frac{\text{s}}{\text{cm}^2} = \text{poises}]$

Comparando los valores con la extrusora de Lyman Fylament Extruder (Tabla 4.5).

Tabla 4.5. Comparación con Lyman Fylament Extruder. Fuente: Elaboración propia.

Variables	Lyman Fylament Extruder	Diseño propio
Diámetro	$\frac{3}{4}'' = 1.905 \text{ cm}$	$\frac{1}{2}'' = 1.27 \text{ cm}$
Longitud	$8 \frac{1}{2}'' = 21.6 \text{ cm}$	19.05 cm
Husillo /Broca	Broca	Husillo
Área del filamento fundido	-----	$0.02488 \text{ cm}^2$
Diámetro del filamento	3 mm	1.7 mm
Capacidad de producción	$30 \text{ in } x \text{ min} = 5.38 \text{ cm}^3 x \text{ min}$	$4.02 \text{ cm/s} = 94.96 \text{ in } x \text{ min}$ $= 6 \text{ cm}^3 x \text{ min}$
Rpm	15 rpm	34.2 rpm

De la Tabla 4.5 se concluye que, el extrusor que se ha calculado tiene dimensiones similares a una extrusora ya fabricada, con una capacidad de producción similar, pero con mayores rpm, debido a que el diámetro del filamento es más pequeño, por lo que se consideran los cálculos correctos para seguir analizando los demás componentes.



#### 4.2.2.1 Consumo de potencia

En general la potencia  $W$  es el producto de la fuerza  $F$  que se requiere para mover un objeto a una velocidad  $U$ .

$$W = F \times U \quad (4.17)$$

En el caso del extrusor, el movimiento del husillo en relación con el barril requiere de una potencia. Por lo tanto, se considera la siguiente ecuación para la potencia de acuerdo con Ramos (2013).

$$W = K_1 \eta Z_d N^2 + K_2 NP \quad (4.18)$$

Donde:

$$K_1 = \frac{\pi^3 D_B^3 \text{sen } \theta}{H} (1 + 3 \text{sen}^2 \theta) \quad [cm^2]$$

$$K_2 = 1/2 \pi^2 D_B^2 H \text{sen } \theta \cos \theta \quad [cm^3]$$

La longitud considerada para el cálculo únicamente es de la zona de dosificación, considérese un extrusor de 3 zonas iguales, con  $Z_d = Z/3$ .

Sustituyendo los valores conocidos

$$K_1 = \frac{\pi^3 (1.29)^3 \text{sen}(17.66)}{(0.4)} (1 + 3 \text{sen}^2(17.66)) = 64.42 \text{ cm}^2$$

$$K_2 = \frac{1}{2} \pi^2 (1.29)^2 (0.4) \text{sen}(17.66) \cos(17.66) = 0.95 \text{ cm}^3$$

Por lo tanto

$$W = (64.42)(1500)(62.8/3)(0.57)^2 + 0.95(0.57)(6.09 \times 10^6)$$

$$W = 3.95 \times 10^6 \text{ dinas cm/s}$$

$$W = 0.395 \text{ W} = 0.0005 \text{ hp}$$

Notas:

- $1 \text{ kW} = 1.34 \text{ hp}$
- Esto representa aproximadamente el 25% de la energía total requerida (Ramos, 2013)

Tomando en cuenta lo anterior, se tiene que

$$W = 1.58 \text{ W} = 0.002 \text{ hp}$$

La Tabla 4.6 muestra el gasto aproximado que se puede obtener con cada uno de los plásticos enumerados por cada *hp* del motor del extrusor.

Tabla 4.6. Relación de capacidad de producción con la potencia requerida. Fuente: (Ramos, 2013).

Plástico	kg/hr por hp
PVC rígido	3.0 – 4.5
PVC plastificado	4.5 – 6.0
HIPS	3.5 – 5.5
ABS	2.0 – 4.0
LDPE	3.0 – 4.5
HDPE	2.0 – 4.5
PP	2.0 – 4.5

Considerando que la capacidad de producción es de 0.250 kg, entonces con un consumo mínimo de potencia de 2 hp por kilogramo, se requieren 0.5 hp de potencia de acuerdo a la Tabla 4.6. Aunque para este caso se requiere una potencia menor a la que se sugiere para la extrusión de un kg de polipropileno, esto debido a las dimensiones del extrusor.

#### 4.2.2.2 Selección del material

“Los husillos deben soportar bien las cargas de torsión y flexión y ser muy resistente al desgaste. Por esta razón, los husillos generalmente se fabrican con los siguientes aceros: el cromo-molibdeno-aluminio (nitrurado), al cromo-níquel, al cromo-molibdeno. Además, las superficies de los husillos se fortalecen por medio de tratamientos termoquímicos (nitruración y temple), también aplicando cromo o aleaciones duras en las superficies del husillo más afectadas” (Sadgorodny, 1973).

UANL (2017), muestra una tabla de aceros especiales estructurados utilizados fundamentalmente para máquinas, motores y vehículos. Entre los aceros más comunes se encuentran (Tabla 4.7):

Tabla 4.7. Aceros especiales estructurados. Fuente: (UANL, 2017).

Tipo de acero		SAE 4130	SAE4140	SAE 4340
Composición química	Carbono %	0,28 – 0,33	0,38 – 0,43	0,38 – 0,43
	Manganeso %	0,40 – 0,80	0,75 – 1,00	0,60 – 0,80
	Silicio %	0,20 – 0,35	0,20 – 0,35	0,20 – 0,35
	Cromo %	0,80 – 1,10	0,80 – 1,10	0,70 – 0,90
	Níquel %	-	-	1,85 – 2,00
	Molibdeno %	0,15 – 0,25	0,15 – 0,25	0,20 – 0,30
	Fósforo %	0,035 máx.	0,035 máx.	0,035 máx.
	Azufre %	0,040 máx.	0,040 máx.	0,040 máx.

(Continúa en la siguiente pág.)

(Tabla 4.7 - Continuación)

Tipo de acero		SAE 4130	SAE4140	SAE 4340
Propiedades mecánicas con los tratamientos térmicos más usados.	Normalizado	Enfriar al aire desde 870° C Resistencia a la tracción $68 \pm 7 \text{ kg/mm}^2$ Límite de fluencia $44 \pm 5 \text{ kg/mm}^2$ Alargamiento $26 \pm 3 \%$	Resistencia a la tracción $104 \pm 11 \text{ kg/mm}^2$ Límite de fluencia $67 \pm 7 \text{ kg/mm}^2$ Alargamiento $18 \pm 2 \%$	Resistencia a la tracción $130 \pm 13 \text{ kg/mm}^2$ Límite de fluencia $68 \pm 9 \text{ kg/mm}^2$ Alargamiento $12 \pm 2 \%$
	Temple y revenido	Temp. De temple 800°C – 250°C Temp. De revenido 600°C $\pm$ 10 Medio de temple agua para 4130, resto aceite Resistencia a la tracción $90 \pm 9 \text{ kg/mm}^2$ Límite de fluencia $80 \pm 8 \text{ kg/mm}^2$ Alargamiento $21 \pm 2 \%$	Resistencia a la tracción $100 \pm 10 \text{ kg/mm}^2$ Límite de fluencia $86 \pm 9 \text{ kg/mm}^2$ Alargamiento $20 \pm 2 \%$	Resistencia a la tracción $116 \pm 12 \text{ kg/mm}^2$ Límite de fluencia $112 \pm 11 \text{ kg/mm}^2$ Alargamiento $17 \pm 2 \%$
Principales aplicaciones		Chapas, tubos, piezas mecánicas de pequeño tamaño.	Piezas mecánicas con exigencias especiales o de mayor tamaño que las de automotriz.	Piezas mecánicas de gran tamaño o con exigencias muy rigurosas.

De la Tabla 4.7 se elige el acero 4140, el cual es utilizado para piezas mecánicas de tamaño medio y exigencias considerables. *Para más información del material consultar Aceros SISA (2017) y Serviacerero (2017).*

#### 4.2.2.3 Peso del husillo

Para el cálculo de las fuerzas que se generan en el husillo, primero se debe calcular el volumen y por consiguiente el peso del husillo. Considérese la Figura 4.12 como una aproximación de la longitud del husillo, así como de sus apoyos.

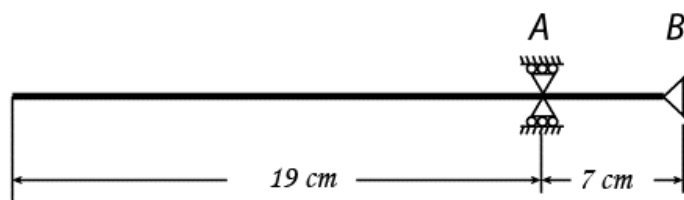


Figura 4.12. Esquema básico de sujeción. Fuente: Elaboración propia.

##### 4.2.2.3.1 Volumen de las secciones

Para el cálculo del volumen total, se dividió al husillo en las secciones del alma, filetes y sujeción. Las fórmulas utilizadas se obtuvieron por geometría de cada uno de los elementos. Teniendo que:

$$Volumen_{Total} = Volumen_{Alma} + Volumen_{Filete} + Volumen_{Suj}$$

Sustituyendo los valores calculados

$$Volumen_{Total} = 3.30 + 3.28 + 8.87 = 15.45 \text{ cm}^3$$

#### 4.2.2.3.2 Masa del husillo

Para calcular la masa del husillo, se tiene que:

$$m = \rho \cdot volumen \text{ [g]} \quad (4.19)$$

Donde:

$\rho$  = Densidad del material, para este caso la densidad del acero AISI 4140 es  $7.85 \text{ g/cm}^3$

$m$  = Masa de la geometría

Sustituyendo los valores

$$m = 7.85 (15.45) = 121 \text{ g}$$

#### 4.2.2.4 Cálculo de fuerzas del husillo.

La misión fundamental de un cálculo de resistencias consiste en comprobar las dimensiones previamente determinadas del husillo y determinar la flecha máxima provocada (Figura 4.13).

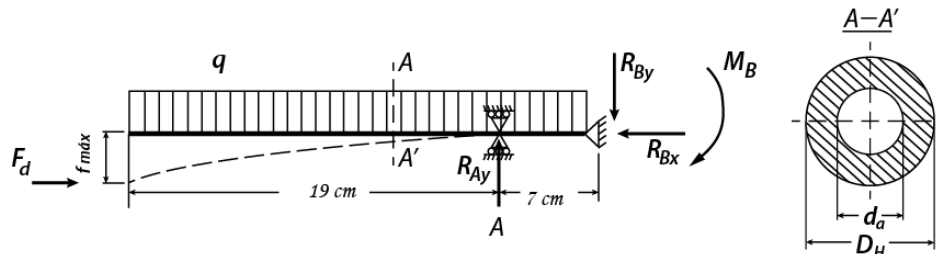


Figura 4.13. Diagrama de fuerzas de un husillo. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de esta serie de análisis son:

#### 4.2.2.4.1 Esbeltez del husillo

La máxima esbeltez permisible es de  $\lambda = 120$ , según Sadgorodny (1973). Realizando los cálculos correspondientes de acuerdo con Sadgorodny (1973), se tiene que:

$$\lambda = \frac{\alpha L}{R_I} = \frac{(0.2)(0.26)}{4.8 \times 10^{-3}} = 10.83$$

Comprobando así que,  $\lambda = 10.83 < 120$  evitando un fallo por esbeltez.

#### 4.2.2.4.2 Definición de fuerzas aplicadas

Las variables  $q$  y  $F_d$  mostradas en la Figura 4.13 se definen como sigue.

##### Carga máxima $q$

La carga máxima en el husillo es hipotéticamente cuando este es sólido, por lo que en los cálculos se considera,

$$Volumen_{m\acute{a}x} = \frac{\pi D_H^2}{4} L = 32.94 \text{ cm}^3$$

$$m = 258.58 \text{ g} \approx 0.260 \text{ kg}$$

Por lo tanto, la carga concentrada es  $q = 2.6 \text{ N}$  y uniformemente distribuida es de  $q = 0.1 \text{ N/cm}^2$

##### Equivalencia de la presión en el dado $F_d$

La fuerza representada en la figura 4.13 es ocasionada por la presión necesaria en el dado para que el fluido pase a través de él, en un área de aplicación señalada ( $a_d$ ), teniendo entonces:

$$F_d = \frac{P_d}{a_d} = \frac{60.9}{1.09} = 55.87 \text{ N}$$

Donde:

$$P_d = 6.09 \times 10^6 \text{ dinas/cm}^2 = 60.9 \text{ N/cm}^2$$

$$a_d = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} = \frac{\pi(1.27^2 - 0.47^2)}{4} = 1.09 \text{ cm}^2$$

#### 4.2.2.4.3 Cálculo de la ecuación general de la elástica por el método de la doble integración

Para determinar la flecha máxima provocada, se realizó un análisis por medio del método de la doble integración, generando las siguientes ecuaciones base:

$$EIy'' = \frac{qx^2}{2} - R_A(x - 19)$$

$$EIy' = \frac{qx^3}{6} - \frac{R_A(x - 19)^2}{2} + C_1$$

$$EIy = \frac{qx^4}{24} - \frac{R_A(x - 19)^3}{6} + C_1x + C_2$$

Y después de aplicar las condiciones de frontera, se obtiene la ecuación general de la elástica definida como:

$$EIy = \frac{0.1 x^4}{24} - \frac{13.43(x - 19)^3}{6} + 36.11x - 1229.09 \quad (4.20)$$

#### 4.2.2.4.4 Flecha máxima

La deflexión máxima ( $y$ ) se encuentra en la punta del husillo ( $X = 0$ ), por lo que utilizando la ecuación general de la elástica (ec. 4.20).

$$y = \frac{-1229.09}{EI}$$

Donde:

$E = 180 \times 10^5 \text{ N/cm}^2$ . Módulo de elasticidad para el acero 4140 a una temperatura de  $230^\circ\text{C}$ . Obtenido de: *Aceros SISA (2017)*.

El momento de inercia para una corona circular

$$I = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} = \frac{\pi(1.27^4 - 0.47^4)}{64} = 0.125 \text{ cm}^4$$

Sustituyendo los valores

$$y = \frac{1229.09}{(180 \times 10^5)(0.125)} = 0.00055 \text{ cm}$$

Comprobando así que, la deflexión máxima es menor a la holgura entre el husillo y el barril.

$$y = 0.00055 \text{ cm} < \delta = 0.1 \text{ cm}$$

#### 4.2.2.4.5 Diagrama de fuerza cortante y momento flector

A continuación, en la Figura 4.14 se muestra la fuerza y momento flector en cada uno de los puntos del husillo.

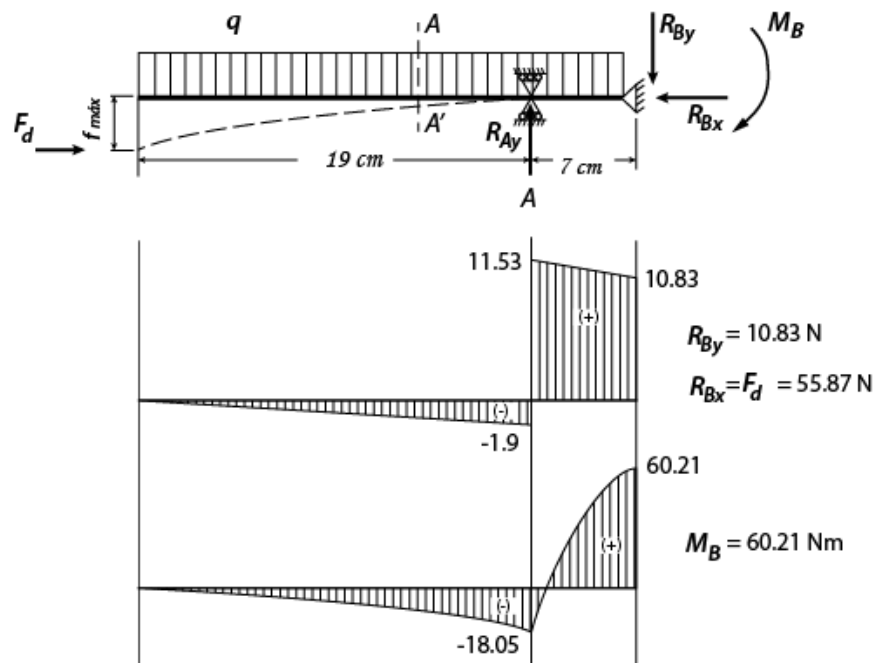


Figura 4.14. Diagrama de fuerza cortante y momento flector del husillo. Fuente: Elaboración propia.

Evaluando los esfuerzos del husillo se tiene que:

### Par torsor máximo

Para que se cumplan las condiciones de equilibrio estático aplicando las condiciones de  $\sum M = 0$ , el par torsor resistente ha de ser igual al momento par torsionante aplicado (*Singer y Pytel, 1994*).

El par torsor máximo para un eje hueco

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{16TD}{\pi(D^4 - d^4)} \quad (4.21)$$

Donde el torque

$$T = \frac{P}{2\pi f} \quad (4.22)$$

$$T = \frac{1.58}{2\pi(0.57)} = 0.44 \text{ Nm}$$

Por lo tanto, sustituyendo las variables en la ec. 4.21

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{16(0.44)(0.0127)}{\pi(0.0127^4 - 0.0047^4)} = 1.11 \text{ MPa}$$

Para el acero AISI 4140, la resistencia es  $\sigma_{m\acute{a}x} = 850 \text{ MPa}$ . Obtenido de: *Serviacero (2017)*.

De acuerdo con *Díaz (2017)* se tiene que (Tabla 4.8):

Tabla 4.8. Cálculo del límite a la fatiga para diversos materiales y tipos de carga. Fuente: (*Díaz, 2017*).

Material	Flexión	Cargas axiales	Torsión
Aceros	$\sigma_{eI} = 0.5 \sigma_{m\acute{a}x}$	$\sigma_{eI} = 0.425 \sigma_{m\acute{a}x}$	$\tau_{eI} = 0.25 \sigma_{m\acute{a}x}$
Fundiciones de hierro	$\sigma_{eI} = 0.4 \sigma_{m\acute{a}x}$	$\sigma_{eI} = 0.34 \sigma_{m\acute{a}x}$	$\tau_{eI} = 0.8 \sigma_{m\acute{a}x}$
Aleaciones no ferrosas	$\sigma_{eI} = 0.3 \sigma_{m\acute{a}x}$	$\sigma_{eI} = 0.255 \sigma_{m\acute{a}x}$	$\tau_{eI} = 0.22 \sigma_{m\acute{a}x}$

Donde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$  = resistencia máxima del material.

Por lo tanto, el esfuerzo máximo a torsión para el acero 4140 es de:

$$\tau_{eI} = 0.25 \sigma_{m\acute{a}x} = 215 \text{ MPa}$$

Concluyendo:

$$\tau_{m\acute{a}x} < \tau_{eI}$$

### Esfuerzo resultante

El esfuerzo resultante en un punto cualquiera del eje viene dado por la suma algebraica de los esfuerzos axiales y de flexión en aquel punto (*Singer y Pytel, 1994*).

$$\sigma = \pm \frac{P}{A} \pm \frac{My}{I} \quad (4.23)$$

Sustituyendo los valores conforme con el diagrama de momentos (Figura 4.14).

$$\sigma_{m\acute{a}x,E} = -\frac{55.87}{1.09} + \frac{(60.21)(0.00055)}{0.125} = -50.99 \text{ N/cm}^2 = -0.51 \text{ MPa}$$

Para el acero AISI 4140, la resistencia es  $\sigma_{m\acute{a}x} = 850 \text{ MPa}$

Con base en la Tabla 4.8 se tiene que el esfuerzo resultante admisible a la flexi3n es de:

$$\sigma_{er} = 0.425 \sigma_{m\acute{a}x} = 361.25 \text{ MPa}$$

Por lo tanto,

$$\sigma_{m\acute{a}x,E} < \sigma_{er}$$

Con lo anterior se comprueba que el husillo soportar3 los cargas que recibir3 durante su funcionamiento.

### 4.2.3 Barril

Para el dise1o del ca1n3n se retoman las especificaciones de la Tabla 3.15. Componentes con especificaciones fijas y variables.

#### 4.2.3.1 Espesor del barril

Para el c3lculo del espesor del barril, se consideran el siguiente m3todo seg3n la *UPC (2017)*.

##### 4.2.3.1.1 Selecci3n de material seg3n ANSI

Los materiales aceptados por la normativa ANSI son:

A-1 Aceros al carbono	A-6 Cobre y aleaciones de Cu
A-2 Aceros de baja y media aleaci3n	A-7 Aluminio y aleaciones
A-3 Inoxidables	A-8 Temperaturas > 1200°F
A-4 Ni y aleaciones de alto Ni	A-9 Titanio y aleaciones
A-5 Fundici3n	

En el cual se recomienda:

A 106 B, Acero al carb3n, para temperaturas inferiores a 426 °C. Teniendo una temperatura del proceso de extrusi3n entre 200 – 260°C. Para m3s informaci3n del material consultar *Federal Steel Supply (2017)* y *Tubisa (2017)*.



#### 4.2.3.1.2 Cálculo del espesor según la normativa ANSI

Según el apartado de la norma ASME B31.1 el espesor se calcula mediante la fórmula:

$$t_m = 0,5 \frac{P \cdot D_o}{(SE + P \cdot y)} \quad (4.24)$$

Donde:

$t_m$  = Espesor mínimo

P = Presión de diseño

$D_o$  = Diámetro exterior =  $D_i + 2 t_m$

SE = Tensión admisible del material

y = Coeficiente según la temperatura. Obtenido de la Tabla 4.9.

Tabla 4.9. Valores del coeficiente "y" según la temperatura. Fuente: (Norma ASME B31.3).

Material/ °C	482	510	538	566	593	621	649	677	Material
Ac. Ferrítico	0,4	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	
Ac. Austenítico	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,7	0,7	0,7	A 312 TP 316 L
Otros metales dúctiles	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	A106 A, A106B, A335GrP11
Hierro colado	0,4	--	--	--	--	--	--	--	

Para este caso se tiene que:

$$P = P_{m\acute{a}x} = 7.59 \times 10^6 \text{ dinas/cm}^2 = 759 \text{ kPa}$$

$$D_o = D_i + 2 t_m = 12.9 + 2 t_m$$

$$SE = 0.5\sigma_{m\acute{a}x} = 0.5 (240) = 120 \text{ MPa. De acuerdo con la Tabla 4.8.}$$

$$y = 0.4, \text{ para otros metales dúctiles}$$

Sustituyendo los valores

$$t_m = 0,5 \frac{(759 \times 10^3) \cdot (12.9 + 2 t_m)}{(120 \times 10^6 + 759 \times 10^3 \cdot 0.4)}$$

$$t_m = 0.04 \text{ mm} \approx 0.1 \text{ mm}$$

#### 4.2.3.1.3 Espesor pedido

Una vez hallado el valor del espesor mínimo requerido sin márgenes ni tolerancias ( $t_m$ ), se deben añadir los márgenes y tolerancias oportunos para encontrar el espesor de pared pedido para el material, que se calcula mediante la siguiente fórmula expresada en el apartado 4.3 de la normativa UNE-EN 13480-3:

Si el valor de la tolerancia se expresa en unidades de longitud:

$$t_{ord} = t_m + c_0 + c_1 + c_2 \quad (4.25)$$

Donde:

$t_{ord}$  = es el espesor pedido mínimo que debe tener la tubería.

$t_m$  = es el espesor de pared mínimo sin márgenes ni tolerancias.

$c_0$  = es el margen de corrosión o erosión, fijado en **1 mm**.

$c_1$  = valor absoluto de la tolerancia negativa tomado de las normas del material o facilitado por el fabricante. Por ejemplo, si la tolerancia de fabricación es de +0,5/-1 mm, se debería tomar  $c_1 = 1$  mm. En la aplicación de cálculo de tuberías se considera por defecto **1 mm**.

$c_2$  = margen de adelgazamiento para el posible adelgazamiento durante el proceso de fabricación. En el caso de las tuberías rectas este factor es 0.

Sustituyendo los valores

$$t_{ord} = 0.1 + 1 + 1 + 0 = 2.1$$

Por lo tanto, el valor del espesor del barril es de 2.1 mm y el diámetro externo es

$$D_o = D_i + 2 t_m = 12.9 + 2 (2.1) = 17.1 \text{ mm}$$

*Tubisa (2017)* muestra una tabla de tubos comerciales, en donde se encontró que con el tubo de 3/8" de diámetro nominal calibre 40, es posible obtener un diámetro interno de 12.9 mm y un diámetro externo de 17.1 mm, mediante un mínimo desbaste interno del material.

#### 4.2.3.2 Peso del cañón

Considerando que el barril tiene la misma longitud libre que el husillo, se calcula el volumen.

$$Volumen = \frac{\pi(D_o^2 - D_i^2)}{4} \cdot L = \frac{\pi(1.71^2 - 1.29^2)}{4} \cdot 19 = 18.80 \text{ cm}^3$$

Para calcular la masa,

$$m = \rho \cdot volumen = 7.85 (18.80) \approx 0.150 \text{ kg}$$

Donde:

$\rho = 7.85 \text{ g/cm}^3$ , para el acero ASTM A106 B. Obtenido de: *Tubisa (2017)*.

#### 4.2.4 Dado

De los datos analizados en el capítulo anterior, se retoman las especificaciones de la Tabla 3.15. Componentes con especificaciones fijas y variables.

Para el cálculo de las dimensiones *Mariano (2011)*, menciona que los diseños actuales de las boquillas se dividen en dos secciones, como se muestra en la Figura 4.15.

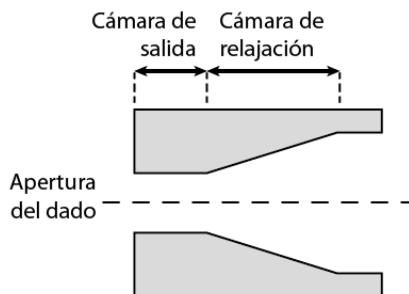


Figura 4.15. Secciones del dado. Fuente: (Mariano, 2011).

La primera se conoce como cámara de relajación y tiene como propósito producir la desaceleración del material e incrementar el tiempo de residencia en la boquilla de manera tal que el polímero relaje los esfuerzos impartidos por el paso a través de los paquetes de filtros y el plato rompedor. Mientras que la cámara de descarga produce el formato del perfil deseado con las dimensiones requeridas.

Ramos (2013), muestra en la Figura 4.16 la geometría básica de un dado.

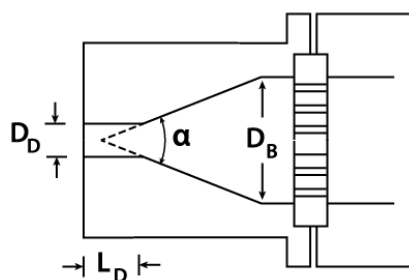


Figura 4.16. Diseño típico de un dado. Fuente: (Ramos, 2013).

$D_d$ = Diámetro del orificio del dado = 1.78 mm

$D_B$ = Diámetro del barril = 12.9 mm

$\alpha$ = Ángulo de entrada del dado

$L_p$ = Longitud paralela del dado = 1 cm, propuesto desde el cálculo del husillo.

Para lograr un diseño óptimo de un dado según Morton (2012), este es complicado, ya que, aunque algunos fundamentos están bien definidos y el comportamiento de los materiales fundidos que se desplazan por canales estrechos se estudia y se extiende más, aún hay un factor de diseño y construcción que se basa en la experiencia. Por lo que algunas de las dimensiones del dado no tendrán sustento firme en el momento de la elección.

#### 4.2.4.1 Selección del material

El material por utilizar en el dado debe de tener buena maquinabilidad y resistencia para conferir la forma del perfil deseado. Por lo que se elige al igual que en el husillo, el acero AISI 4140, el cual es utilizado

para piezas mecánicas de tamaño medio y exigencias considerables. *Para más información del material consultar a Aceros SISA (2017) y Servi acero (2017).*

#### 4.2.4.2 Presión en el dado

Ramos (2013), recomienda que es importante mantener una presión alta en el interior del dado, por lo que se deben diseñar restricciones del flujo en el interior del mismo.

Una opción es mantener una relación

$$\frac{D_d}{D_B} < 1$$

Aunque en la práctica es menor a 0.5.

Comprobando que se tiene una presión alta en el interior del dado, se tiene que:

$$\frac{D_d}{D_B} = \frac{1.78}{12.9} = 0.14 < 0.5$$

#### 4.2.4.3 Ángulo del dado

“Entre más viscoso sea el plástico fundido menor será el ángulo de entrada del dado ( $\alpha$ ) necesario para obtener un flujo suave y constante” (Ramos, 2013).

En la Figura 4.17 se muestran una aproximación de los ángulos recomendados para el PVC y el nylon.

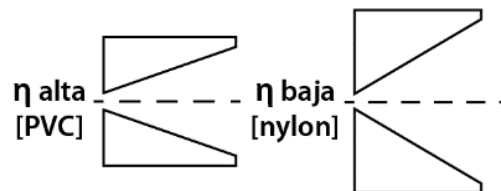


Figura 4.17. Ángulos para el PVC y el nylon. Fuente: (Ramos, 2013).

En la Figura 4.7, si ubicamos la viscosidad de estos materiales y los comparamos con el del polipropileno. Se tiene que la línea característica del nylon se encuentra entre el mismo margen de viscosidad que el polipropileno, aunque a temperaturas más elevadas de operación.

Por lo tanto, retomando la Figura 4.17 y la similitud con el nylon se estima que:

$$\alpha = 60^\circ$$

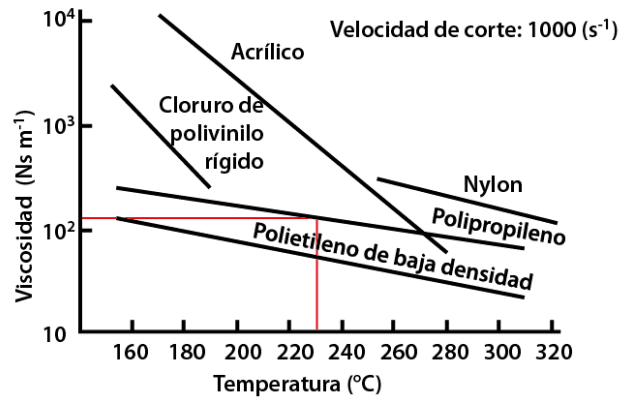


Figura 4.7. Efecto de la temperatura sobre la viscosidad de los polímeros. Fuente: (Morton, 2012).

#### 4.2.4.4 Dimensiones del dado

Simplificando el dado, se tiene la Figura 4.18.

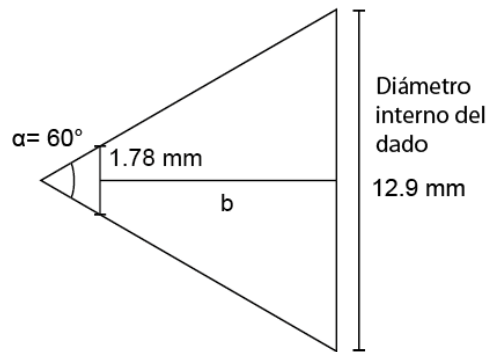


Figura 4.18. Cálculo de dimensiones del dado. Fuente: Elaboración propia.

Con la cual se determina por geometría que  $b$ , representando la longitud de la cámara de relajación es:

$$b = 9.63 \text{ mm}$$

Y en cuanto a la cámara de salida del dado, se propuso para los cálculos iniciales, y corresponde a:

$$L_d = 1 \text{ cm}$$

#### 4.2.4.5 Cálculo del espesor

La presión que soportará el dado equivale a la presión máxima de 759 kPa (Valor obtenido de la Tabla 4.4), que el husillo podrá aplicar sobre el fluido viscoso para la salida a través del dado.

Calculando el espesor con la fórmula de la norma ASME B31.3, teniendo que:

$t_m$  = Espesor mínimo

$P$  = Presión de diseño = 759 kPa

$D_o$  = Diámetro exterior =  $D_i + 2 t_m$

$$D_i = 1.78 \text{ mm}$$

$SE$  = Tensión admisible del material, para el acero 4140 = 800 MPa. De acuerdo con la Tabla 4.8. La tensión admisible es  $0.5\sigma_{m\acute{a}x} = 0.5 (800) = 400 \text{ MPa}$ .

$y$  = Coeficiente según la temperatura = 0.4, obtenido de la Tabla 4.9.

Sustituyendo los valores:

$$t_m = 0,5 \frac{759 \times 10^3 (D_i + 2 t_m)}{(400 \times 10^6 + 759 \times 10^3 \cdot 0.4)}$$

$$t_m = 0.0017 \approx 0.1 \text{ mm}$$

Y aplicando los márgenes de seguridad y tolerancia, donde se consideran las mismas especificaciones que en el apartado 4.2.3.1.3. Sustituyendo los valores:

$$t_{ord} = 0.1 + 1 + 1 + 0 = 2.1 \text{ mm}$$

Con base en los últimos cálculos se tiene que el dado de 1 cm de largo soporta bien las cargas con un espesor mínimo de 2.1 mm.

#### 4.2.5 Garganta de alimentación

Del análisis de los componentes se retoman las especificaciones de la Tabla 3.15.

La longitud recomendada está dada por:

$$L_g = 1.5 D \quad [cm] \quad (4.26)$$

$$A_g = 0.7D \quad [cm] \quad (4.27)$$

Donde:

$L_g$  = Longitud de la abertura

$A_g$  = Ancho de la abertura

En relación a las especificaciones del husillo, se tiene que  $D = 1.29$ , por lo tanto, la garganta de alimentación tiene:

$$L_g = 1.5(1.29) = 1.94 \text{ cm}$$

$$A_g = 0.7(1.29) = 0.90 \text{ cm}$$

Ahora considerando la cantidad de flujo de material en una vuelta del husillo, teniendo que:

$$\text{Flujo} \left[ \frac{cm^3}{s} \right] = w\pi H(D - H)N \quad (4.11)$$

Y este flujo en  $S$  vueltas del husillo debe de ser igual al  $Q_{m\acute{a}x} = 0.52 \text{ cm}^3/\text{s}$  del extrusor, tomando en cuenta que el material en la entrada esta triturado (*densidad  $0.35 \text{ g/cm}^3$  aprox., obtenido por experimentaci3n*) y a la salida esta fundido (*densidad  $0.72 \text{ g/cm}^3$* ), además de que el flujo real entra con una eficiencia del 50%, se tiene que la igualdad de flujos másicos, se expresa como:

*Flujo volumétrico \* Densidad del material triturado \* Eficiencia = Flujo máx.\* Densidad fundido*

$$S[w\pi H(D - H)N] * 0.35 * 0.5 = 0.52 * 0.72$$

$$S = \frac{0.52 * 0.90}{[w\pi H(D - H)N] * 0.35 * 0.5}$$

$$S = \frac{0.52 * .90}{[(1.05)(\pi)(0.4)(1.29 - 0.4)(0.57)] * 0.35 * 0.5} = 3.19$$

Por lo tanto,

$$L_g = S \cdot P$$

$$L_g = 3.19 (1.27) = 4.05 \approx 4 \text{ cm}$$

Comparando las dos longitudes obtenidas, se eligen las siguientes relaciones, ya que permiten suministrar el material suficiente para el flujo máximo del extrusor:

$$L_g = 4 \text{ cm}$$

$$A_g = 1 \text{ cm}$$

#### 4.2.6 Tolva

Del análisis por componente se retoman las especificaciones de la Tabla 3.15.

Considerando que la capacidad de producci3n de la extrusora sera únicamente para pruebas, se contempl3 únicamente el almacenamiento para 1 hora de trabajo, teniendo que un flujo de material extruido  $Q = 0.1 \text{ cm}^3/\text{s}$ . Siendo el extrusor un volumen de control, se tiene que la cantidad de material, que entra al extrusor, es igual a la que se obtiene a la salida, y tomando en cuenta sus diferentes densidades se tiene que:

$$V_{tolva} * \rho_{triturado} = \dot{V}_{extruido} * \rho_{fundido} * 3600 \text{ seg}$$

Sustituyendo valores y despejando el volumen de la tolva para una hora

$$V_{tolva} = \frac{\dot{V}_{extruido} * \rho_{fundido} * 3600}{\rho_{triturado}} = \frac{0.1 * 0.72 * 3600}{0.35} = 740.57 \text{ cm}^3$$

Evaluando la manufactura de la tolva se considera la geometría de sección cuadrada, en la que sus dimensiones se establecen en el modelo 3D.

#### 4.2.7 Plato rompedor

Igualmente, de la Tabla 3.15, se retoman las especificaciones para calcular el plato rompedor y considerando la manufactura, se retoma el patrón de orificios de la Figura 3.21. Definiendo las variables como sigue:

$$0.19 D_B = 0.19 (12.9) = 2.45 \text{ mm}$$

$$0.227 D_B = 0.227 (12.9) = 2.92 \text{ mm}$$

$$\frac{3}{16} D_B = \frac{3}{16} (12.9) = 2.41 \text{ mm} \approx 3/32''$$

Para calcular el espesor de la placa, se tiene que la presión máxima ejercida en el dado es de

$$P_{m\acute{a}x} = 759 \text{ kN/m}^2 = 75.9 \text{ N/cm}^2$$

Por definición

$$Presion = \frac{Fuerza}{\acute{A}rea \text{ de aplicaci3n}}$$

Por lo tanto, la fuerza aplicada es:

$$Fuerza = Presion \cdot \acute{A}rea \text{ de aplicaci3n}$$

$$Fuerza = P_{m\acute{a}x} \cdot \frac{\pi \phi^2}{4}$$

Sustituyendo valores

$$Fuerza = 75.9 \cdot \frac{\pi(1.29)^2}{4} = 99.20 \text{ N}$$

El espesor de la placa debe ser suficiente para soportar la fuerza cortante, y esta es mayor, si la placa no se encuentra perforada y cubre totalmente el barril.

Por lo tanto, de la definición de esfuerzo cortante, se tiene que:

$$\tau = \frac{F}{A}$$

Donde:

$$A = \pi \phi \cdot e$$



Sustituyendo y despejando  $e$ , como el espesor mínimo de la placa, se tiene que:

$$e = \frac{F}{\pi \phi \cdot \tau}$$

Sustituyendo valores.

Considerando como material el acero 4140, con esfuerzo cortante permisible de  $\sigma_{e'} = 0.5 \sigma_{m\acute{a}x} = 0.5 * 850 = 425 \text{ MPa}$  con base en la Tabla 4.8.

$$e = \frac{99.20}{\pi(0.0129) \cdot (425 \times 10^6)} = 5.76 \times 10^{-6} \text{ m}$$

Por lo tanto, el espesor mínimo de la placa se aproxima a 1 mm.

Para la malla, de las medidas comercialmente disponibles se considera la malla 30 x 30, con un tamaño de apertura de 0.431 mm, y con un área libre de 40.0 mm<sup>2</sup> (Tabla 4.10), con el fin de no aumentar en exceso la presión ni disminuir el flujo fundido del polímero.

Tabla 4.10. Tamaño estándar de mallas [Extracto]. Fuente: (Boegger, 2017).

Malla	Tamaño estándar para malla		Área libre [mm <sup>2</sup> ]
	Fibra Diam. [mm]	Tamaño de apertura [mm]	
20 × 20	0.559	0.711	31.4
30 × 30	0.376	0.531	34.2
30 × 30	0.310	0.536	40.0
40 × 40	0.274	0.361	32.3
50 × 50	0.193	0.335	43.6

La utilización de las mallas se someterá a evaluación en las pruebas de extrusión (trabajo a futuro), esto debido al incremento de las fuerzas de presión que puede generar y siendo recomendadas en el caso de que el material presente impurezas, además de que su uso implica un sistema de cambio de mallas de tipo manual o automático.

#### 4.2.8 Motor

Mott (1992) recomienda una serie de factores de corrección a aplicar a las especificaciones de los motores, los cuales debido al servicio y a las condiciones de funcionamiento se considera que:

- Factor de servicio: 1.15
- Degradación de motores por altitud: 0%
- Factor por temperatura: 1.10

Considerando los factores anteriores, se tiene que el factor de corrección o margen de seguridad es de 1.265 aplicándose a los requerimientos del motor como se muestra en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11. Factores de corrección. Fuente: Elaboración propia.

Factores principales		Factores de corrección ( <b>Fc</b> ) (Servicio)(Temperatura)	Especificaciones con corrección
Potencia	0.002 hp = 1.58 W	(1.15)(1.10) = 1.265	0.003 hp = 2 W
Velocidad	0.57 rps = 34.2 rpm		0.72 rps = 43.3 rpm
Torque	0.44 Nm		0.56 Nm

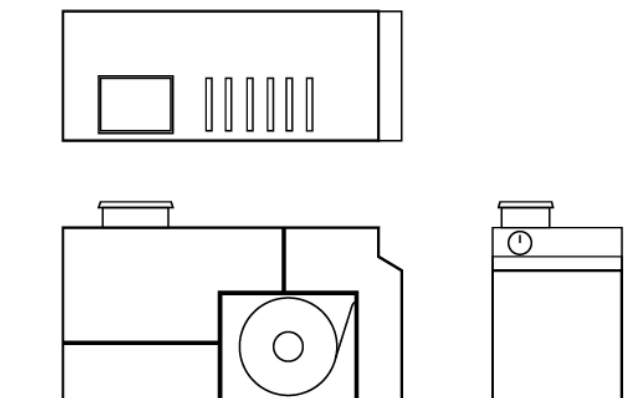
Aunque la fuente de alimentación común es de corriente alterna y es lo que idealmente se consideró en los requerimientos, al realizar un análisis de los tipos de motores, se encontró que en general los motores de corriente directa presentan las siguientes ventajas (Mott, 1992):

- Ajuste de velocidad.
- Sentido de rotación reversible
- Control automático de la velocidad para adaptarse a otros motores o para variación en función del tiempo.
- Control del torque variando la corriente que se aplica al motor.

Condiciones que resultan de gran importancia para el área de control, y que por el momento sirve de limitante antes de considerar un modelo de motor específico para la aplicación.

#### 4.2.9 Etapa de conceptualización 2

Debido a que varias de las dimensiones del extrusor no se conocían en la primera conceptualización, solo se dieron propuestas de configuraciones para localizar a los sistemas. En cambio, ya calculados los componentes principales del sistema se realizó una segunda etapa de conceptualización, en la que los componentes se dibujaron a escala real, con el fin de visualizar la interacción entre todos los sistemas y las dimensiones generales de la máquina (Figura 4.19).



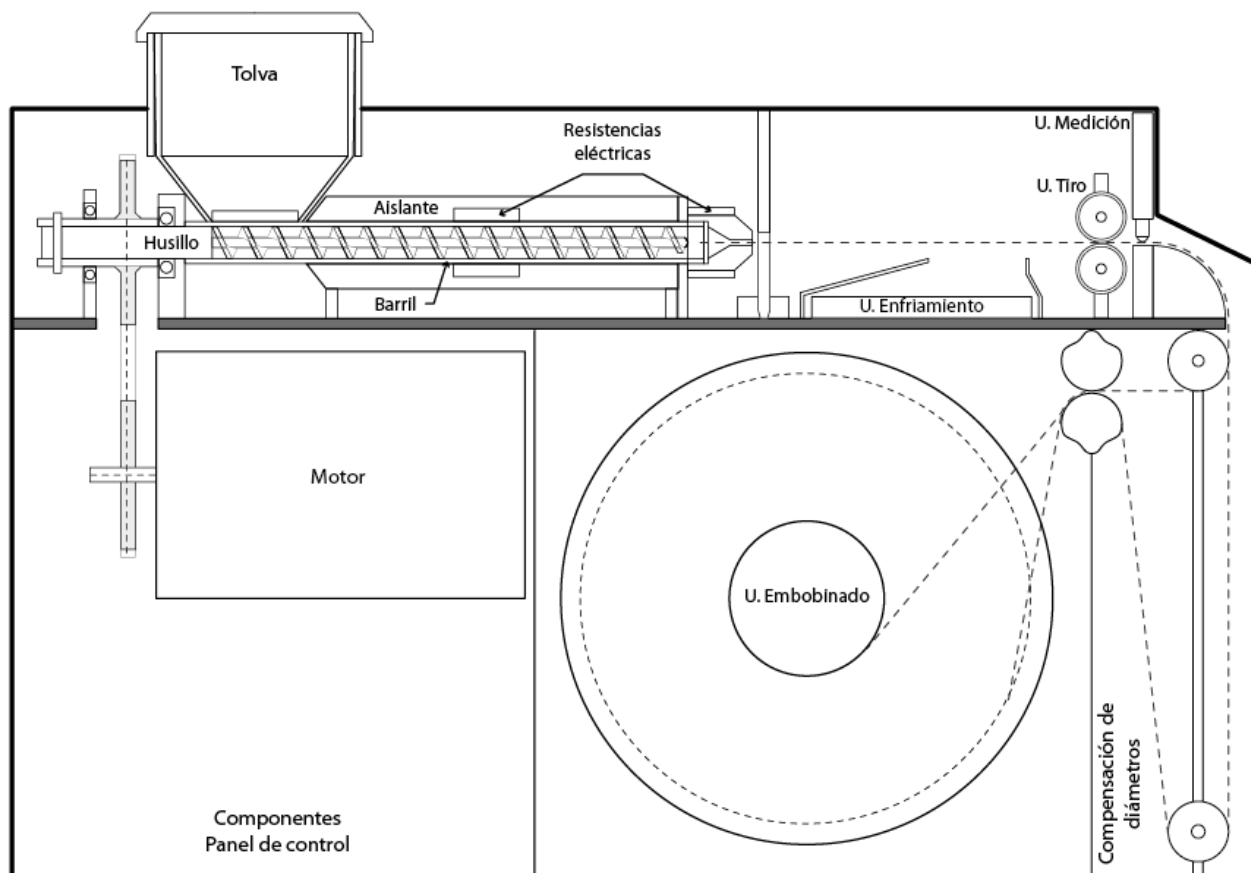


Figura 4.19. Concepto 3. Imagen superior vistas exteriores e imagen inferior corte ilustrativo. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.10 Sistema de calentamiento

Retomando las especificaciones de la Tabla 3.15, se desarrollan los siguientes cálculos.

##### 4.2.10.1 Zonas de calentamiento

Para determinar las zonas de calentamiento se consideran las 3 zonas del husillo y el dado:

- Zona de alimentación
- Zona de compresión
- Zona de dosificación
- Zona del dado

De las cuales, las 3 últimas requieren la aplicación de calor por lo menos al inicio de la producción y teniendo la necesidad del control de la temperatura alcanzada en las zonas para evitar la degradación del material por exceso de temperatura o una fundición deficiente por bajas temperaturas en el proceso.

Debido a que la longitud del extrusor es relativamente pequeña las zonas de compresión y dosificación serán calentadas por una misma resistencia de banda. Mientras que para el dado se propone

una banda extra, que tendrá la función de aumentar ligeramente la temperatura del perfil en caso de presentar inestabilidades de extrusión.

En la Figura 4.20 se muestra la posición de los elementos que conforman el sistema de calentamiento del extrusor.

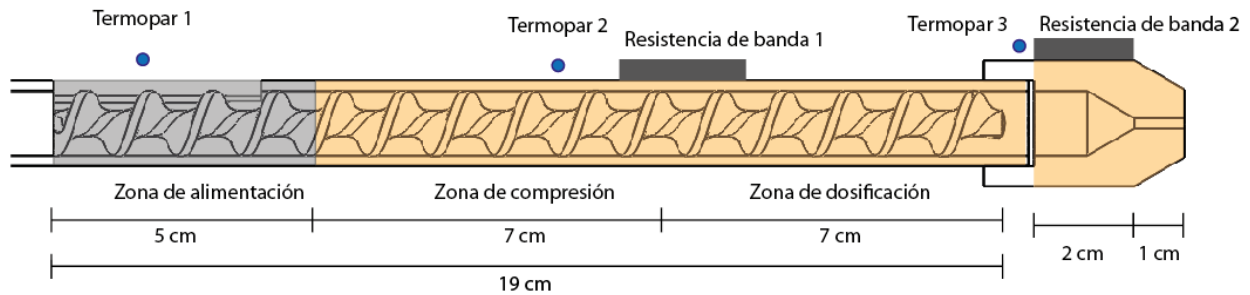


Figura 4.20. Distribución del sistema de calentamiento. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.10.2 Diagrama de temperaturas

El perfil de temperatura de las zonas de la extrusora debe de ser tipo “joroba” (humped) que permite un mejor procesamiento. Esto es que la primera zona debe estar caliente a una temperatura por debajo de las otras zonas; la segunda zona debe estar muy caliente para fundir el material rápidamente y disminuir el desgaste del tornillo por fricción y calor de cizallamiento; luego cada zona que sigue debe estar más fría en forma progresiva; hasta que la última zona esté relativamente fría (Mariano, 2011).

Considerando lo anterior, se muestra la Tabla 4.12 con los parámetros de temperatura basados en los requerimientos de procesamiento del material.

Tabla 4.12. Perfil de temperaturas Polipropileno. Fuente: Elaboración propia.

Temperaturas	Zona alimentación	Zona de compresión	Zona de dosificación	Dado
Mínima	90 °C	200 °C	180 °C	180 °C
Ideal	100 °C	230 °C	210 °C	210 °C
Máxima	110 °C	260°C	240°C	240 °C

#### 4.2.10.3 Cálculo de la potencia eléctrica

Para los siguientes cálculos se desprecia el calor viscoso generado por el proceso de extrusión, considerando únicamente el calor generado por las dos resistencias tipo banda propuestas en la Figura 4.20. El aumento de la temperatura del sistema es de  $T_1 = 20^\circ\text{C}$  correspondiente a la temperatura del ambiente hasta una temperatura máxima,  $T_2 = 260^\circ\text{C}$ .

#### 4.2.10.4 Cálculo de la banda 1

La banda 1, debe de incrementar la temperatura del husillo, barril y el polipropileno que está siendo transportado a una razón de transferencia de calor igual a la velocidad del flujo de masa extruido.

EL husillo y barril se comportan como un sistema cerrado sin ninguna interacción de trabajo, por lo que la transferencia de energía necesaria en el sistema para lograr un incremento de la temperatura en 240°C es igual al aumento de la energía del sistema, expresado como (Cengel y Ghajar, 2011):

$$Q_B = \Delta U = mC_v\Delta T \left[ \frac{kJ}{s} \right] \quad (4.28)$$

Del sistema se tiene que:

Tabla 4.13. Especificaciones del husillo y barril. Fuente: Elaboración propia.

Sección de 19 cm de longitud	Peso (kg)	Calor específico $C_p$ Acero 1 Cr- 1/2Mo (Cengel y Ghajar, 2011)
1 Husillo	0.052 kg	0.442 kJ/kgK
2 Barril	0.148 kg	0.442 kJ/kgK
Total	0.200 kg	

$$Q = \Delta U = mC_v\Delta T \left[ \frac{kJ}{s} \right]$$

Sustituyendo valores

$$Q_B = (0.200)(0.442)(240) = 21.22 \text{ kJ}$$

La razón de transferencia de calor para alcanzar la temperatura de 260°C, en un tiempo estimado de 5 min ( $\Delta t = 300$  s), se expresa como:

$$\dot{Q} = \frac{Q}{\Delta t} [W] \quad (4.29)$$

Sustituyendo los valores

$$\dot{Q}_B = \frac{21.22}{300} = 0.070 \text{ kJ/s} = 70 \text{ W}$$

Para el polipropileno, se considera como un sistema de flujo estacionario en el que el intercambio de masa es igual a la velocidad del flujo de masa extruido, por lo que la razón de transferencia de calor necesaria es igual al cambio de energía interna, en el cual se considera un cambio de fase del material (sólido-líquido), teniendo entonces que:

$$\dot{Q}_P = (C_{pp}\Delta T + 100)\dot{m}_p \left[ \frac{kJ}{s} \right] \quad (4.30)$$

Donde:

Caudal volumétrico

$$V = 0.1 \text{ cm}^3/\text{s}$$

Densidad del Polipropileno fundido

$$\rho = 0.72 \text{ g/cm}^3$$

La razón del caudal de masa del perfil extruido es:

$$\dot{m}_p = V\rho = 0.1 * 0.72 = 7.2 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$$

Calor específico del Polipropileno

$$C_{pp} = 1.93 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

Calor latente de fusión del Polipropileno ( $L_f$ )

$$L_f = 100 \text{ kJ/kg}$$

Sustituyendo valores

$$\dot{Q}_P = [(1.93 * 240) + 100] * 7.2 \times 10^{-5} = 0.040 \text{ kJ/s} = 40 \text{ W}$$

La razón de transferencia del sistema para la resistencia de banda 1 ( $\dot{Q}_1$ ):

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_B + \dot{Q}_P = 70 + 40 = 110 \text{ W}$$

Considerando un 15% de factor de seguridad y un 10% por pérdida de disipación.

$$\dot{Q}_1 = 110 * 1.25 = 137.5 \text{ W}$$

#### 4.2.10.5 Cálculo de la banda 2

La resistencia de tipo banda 2, es la encargada de calentar el dado hasta la temperatura máxima y elevar la temperatura del Polipropileno desde una  $T_1 = 200^\circ\text{C}$  a  $T_2 = 260^\circ\text{C}$ , en caso de que el material necesite mayor viscosidad o menor presión en el dado, principalmente para corregir inestabilidades de extrusión.

El dado al igual que el husillo y el barril, se considera como un sistema cerrado sin ninguna interacción de trabajo, por lo que la transferencia de energía necesaria es:

$$Q_D = \Delta U = mC_p\Delta T \text{ [kJ/s]} \quad (4.28)$$

Del sistema se tiene que:

Pieza	Peso (m)	Calor específico Cp
Dado	0.115 kg	0.442 kJ/kgK

Sustituyendo valores

$$Q_D = (0.115)(0.442)(240) = 12.20 \text{ kJ}$$

La razón de transferencia de calor para alcanzar la temperatura de 260°C, en un tiempo estimado de 5 min ( $\Delta t = 300$  s), se expresa como:

$$\dot{Q} = \frac{Q}{\Delta T} \quad [W] \quad (4.29)$$

Sustituyendo los valores,

$$\dot{Q}_B = \frac{12.20}{300} = 0.041 \text{ kJ/s} \approx 40 \text{ W}$$

$$\dot{Q} = \dot{m}\Delta h = \dot{m}C_p\Delta T \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{s}}\right]$$

La razón de transferencia de calor necesaria para que el polipropileno incremente su temperatura en 60°C, considerando que el material ya viene fundido y su temperatura oscila de 200 – 260°C, entonces se tiene que:

$$\dot{Q}_P = \dot{m}\Delta h = \dot{m}_p C_{pp}\Delta T \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{s}}\right] \quad (4.31)$$

Sustituyendo

$$\dot{Q}_P = (7.2 \times 10^{-5})(1.93)(60) = 0.008 \text{ kJ/s} = 8 \text{ W}$$

La razón de transferencia del sistema para la resistencia de banda 1:

$$\dot{Q}_2 = \dot{Q}_D + \dot{Q}_P = 40 + 8 = 48 \text{ W}$$

Considerando un 15% de factor de seguridad y despreciando la pérdida por disipación porque el ancho de la banda cubre el dado.

$$\dot{Q}_1 = 48 * 1.15 = 55.2 \text{ W} \approx 55 \text{ W}$$

#### 4.2.10.6 Especificaciones de la banda

Por lo que las resistencias tipo banda tienen las siguientes especificaciones modificándolas a parámetros comerciales (Tabla 4.14):

Tabla 4.14. Especificaciones de resistencias tipo banda. Fuente: Elaboración propia.

Resistencias	Diámetro interno	Ancho	Potencia
Banda 1	1.71 cm $\approx$ 1"	-	150 W
Banda 2	2.54 cm = 1"	20 mm	50 W

#### 4.2.10.7 Análisis térmico

Con el fin de determinar el ancho de la banda y corroborar los datos antes calculados, se realizó un análisis térmico bajo las siguientes condiciones:

##### Tipo de análisis: Térmico transitorio (Tabla 4.15)

Tabla 4.15. Condiciones del análisis térmico transitorio 1. Fuente: Elaboración propia.

Cargas térmicas	Tipo	Descripción
Potencia calorífica	Resistencia de banda 1	Energía térmica: 150 W
	Barril	Diámetro interno: 1.71 cm Ancho: Variable
	Resistencia de banda 2	Energía térmica: 50 W
	Dado	Diámetro interno: 1" Ancho: 20 mm
Convección	Disipación de calor en aire	Coefficiente de convección: $5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (Cengel y Ghajar, 2011) Temp. Ambiente: $20^\circ\text{C}$
Flujo de calor	Disipación de calor en aislante	Flujo de calor permisible por el aislante: $1463 \text{ W/m}^2$ ( $11 \text{ W en } L = 14 \text{ cm}$ )

Las cargas térmicas se distribuyen como se muestra en la Figura 4.21.

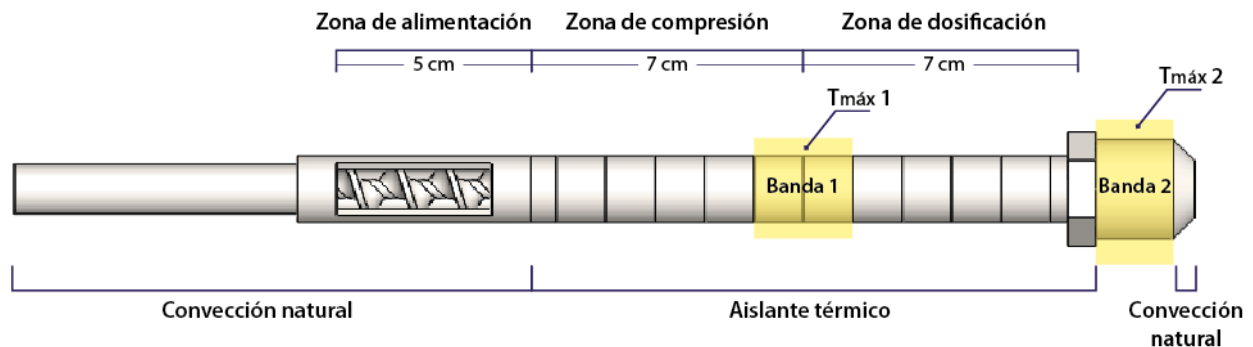


Figura 4.21. Distribución de cargas térmicas. Fuente: Elaboración propia.

Debido a que el análisis se hizo en una sola pieza para la facilidad de la distribución térmica, se aplicó a todo el conjunto de Husillo-Barril-Dado, el material de acero AISI 4140 con las siguientes características (Tabla 4.16):

Tabla 4.16. Especificaciones acero AISI 4140. Fuente: (Cengel y Ghajar, 2011).

Propiedades	Valor	Unidades
Densidad de masa	7850	$\text{kg/m}^3$
Conductividad térmica	42.4	$\text{W/m K}$
Calor específico	442	$\text{J/kg K}$



Los resultados del análisis térmico realizados se muestran en la Figura 4.22, para comparar la distribución de las temperaturas con diferentes anchos de banda.

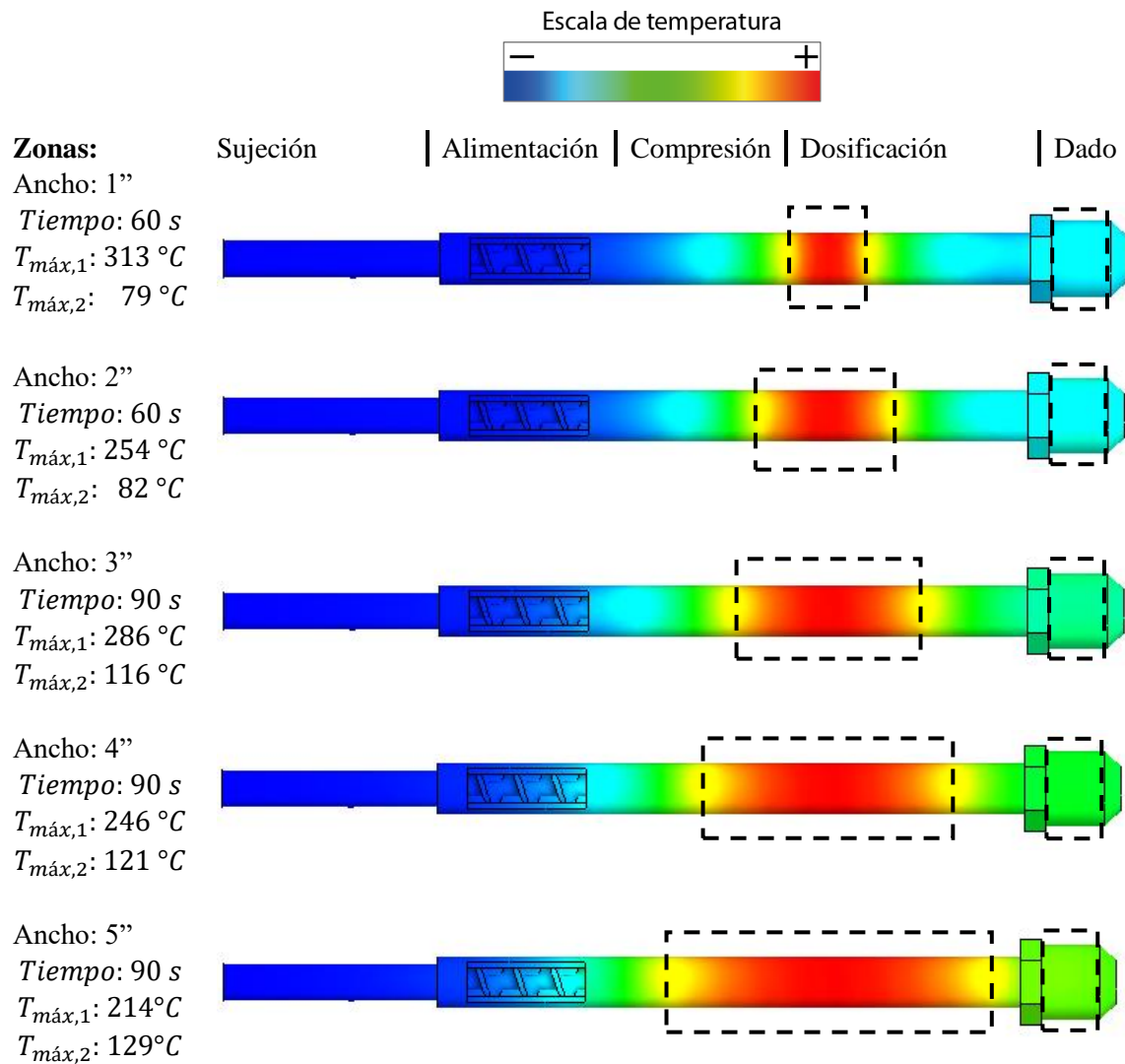


Figura 4.22. Resultados análisis térmico transitorio 1. Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 4.22, véase que el barril alcanza la máxima temperatura del proceso en un tiempo menor, mientras que el dado apenas supera los 100°C. En la Figura 4.23 se muestra un análisis térmico independiente para el dado, bajo las mismas condiciones, en donde después de transcurrir 7 min el dado alcanza una temperatura de 267°C.

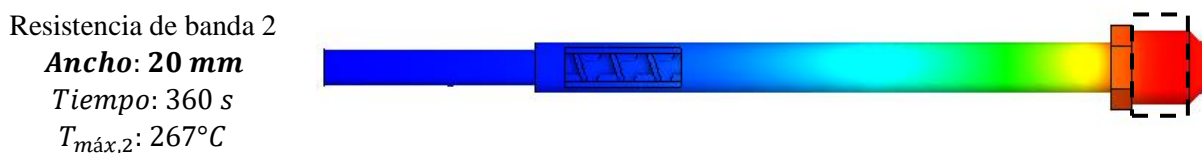


Figura 4.23. Análisis térmico transitorio del dado. Fuente: Elaboración propia.

Las bandas deben de lograr que el barril, el dado y el husillo, alcancen una temperatura uniforme, para que no existan caídas bruscas de temperatura durante todo el proceso. Tomando en cuenta que el dado transfiere calor al barril y viceversa, se selecciona la banda de 4", en la que la distribución de temperaturas es la siguiente (Figura 4.24):

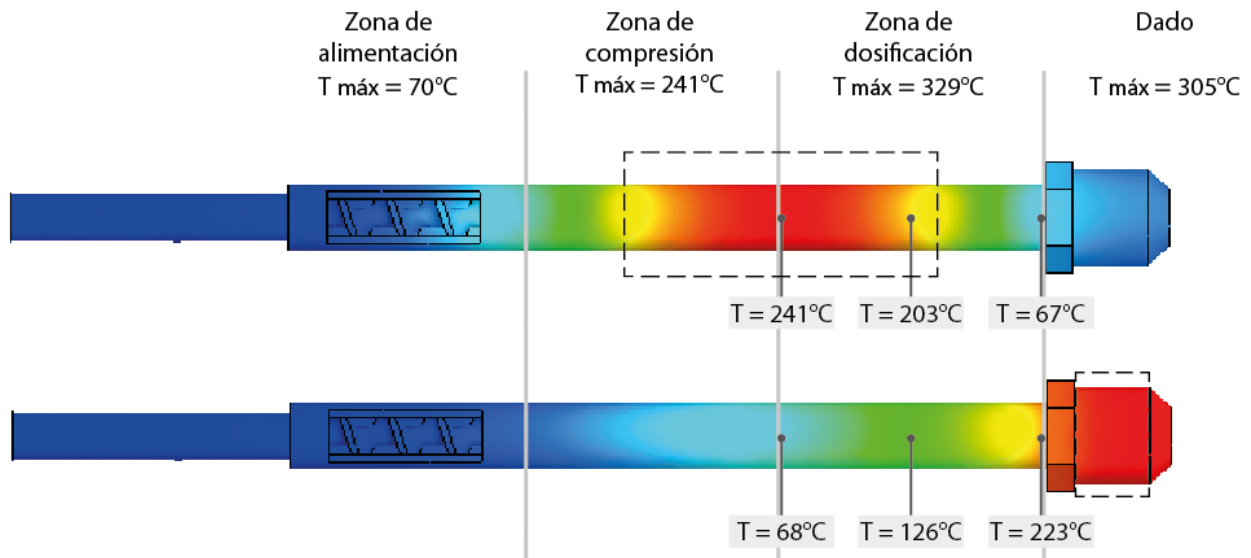


Figura 4.24. Distribución de temperaturas. Fuente: Elaboración propia.

Por lo que bajo las especificaciones anteriores se puede lograr que las zonas de compresión, dosificación y el dado alcancen la temperatura del proceso.

#### 4.2.10.8 Análisis de eficiencia

Al inicio del proceso de extrusión, el calor lo brindan las resistencias eléctricas, pero el material debido a la fricción y los esfuerzos de corte empieza a generar calor viscoso, que se mencionó en el apartado 3.3.2.7., debido a ello, el funcionamiento de las resistencias será intermitente, además considerando que:

- El proceso de fundición requiere de mayor calor para lograr un cambio de fase del material, correspondiéndole a la zona de compresión suministrar esta energía.
- La zona de dosificación debe de mantener el calor necesario y de forma independiente para que tanto los pigmentos y el segundo proceso térmico al que se está sometiendo el material reciclado, no genere una degradación por exceso de calor o se pierda temperatura durante la homogenización del material.

Con base en esto, se proponen dos bandas realizando las funciones de suministrar y controlar la potencia de forma independiente, como se muestra en la Figura 4.25.

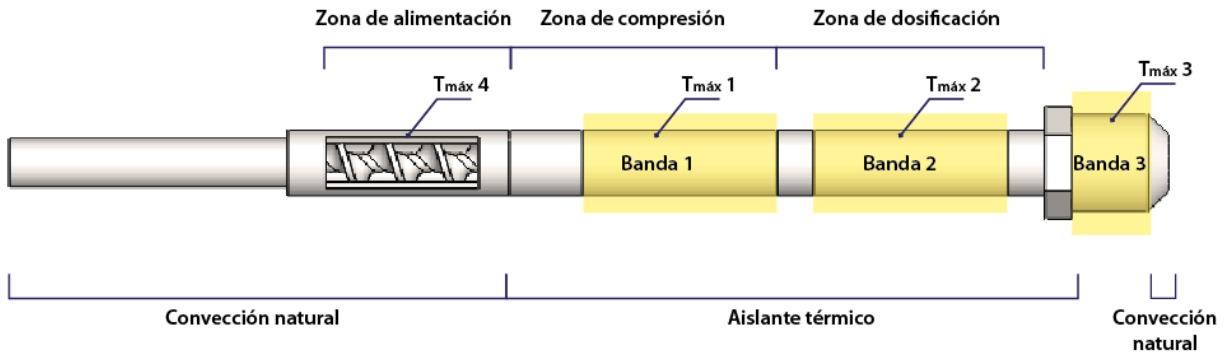


Figura 4.25. Distribución de cargas térmicas a dos bandas. Fuente: Elaboración propia.

Para visualizar el comportamiento de las bandas, se realizó nuevamente un análisis térmico bajo las siguientes condiciones (Tabla 4.17):

Tabla 4.17. Condiciones del análisis térmico transitorio 2. Fuente: Elaboración propia.

Cargas térmicas	Tipo	Descripción
Potencia calorífica	Resistencia de banda 1	Energía térmica: 75 W
	Barril	Diámetro interno: 1.71 cm Ancho: 2"
	Resistencia de banda 2	Energía térmica: 75 W
	Barril	Diámetro interno: 1.71 cm Ancho: 2"
	Resistencia de banda 3	Energía térmica: 50 W
	Dado	Diámetro interno: 1" Ancho: 20 mm
Convección	Disipación de calor en aire	Coefficiente de convección: $5\text{ W/m}^2\text{ K}$ (Cengel y Ghajar, 2011) Temp. Ambiente: $20^\circ\text{C}$
Flujo de calor	Disipación de calor en aislante	Flujo de calor permisible por el aislante: $1375\text{ W/m}^2$ ( $11\text{ W en } L = 15\text{ cm}$ )

Nota: La potencia total de 150W, se dividió en las dos bandas.

El resultado del análisis térmico en los primeros 120 s, se muestra en la Figura 4.26.

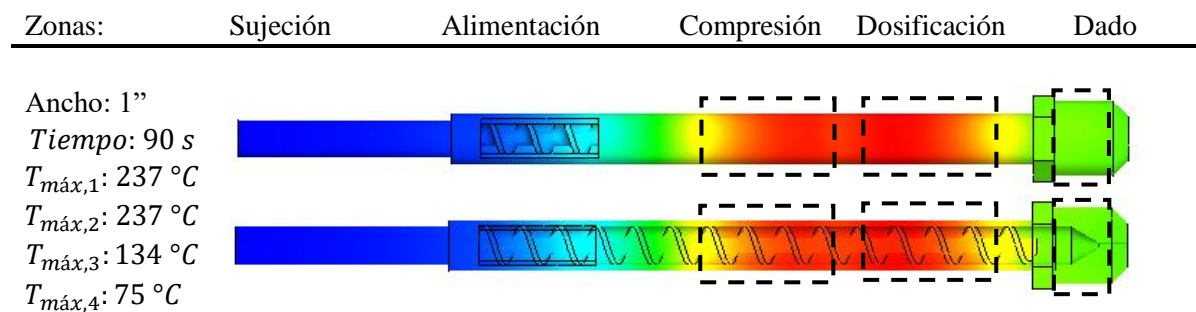


Figura 4.26. Resultados del análisis térmico transitorio 2. Fuente: Elaboración propia.

En esta figura se muestra una distribución más uniforme de la temperatura, y una diferencia menor entre la temperatura del dado y el barril.

Poniendo en funcionamiento cada una de las resistencias de forma independiente (Figura 4.27), se puede visualizar cómo se expande el calor de cada una de ellas, mostrando el control de las temperaturas en cada una de las zonas estratégicas de compresión, dosificación y en el dado.

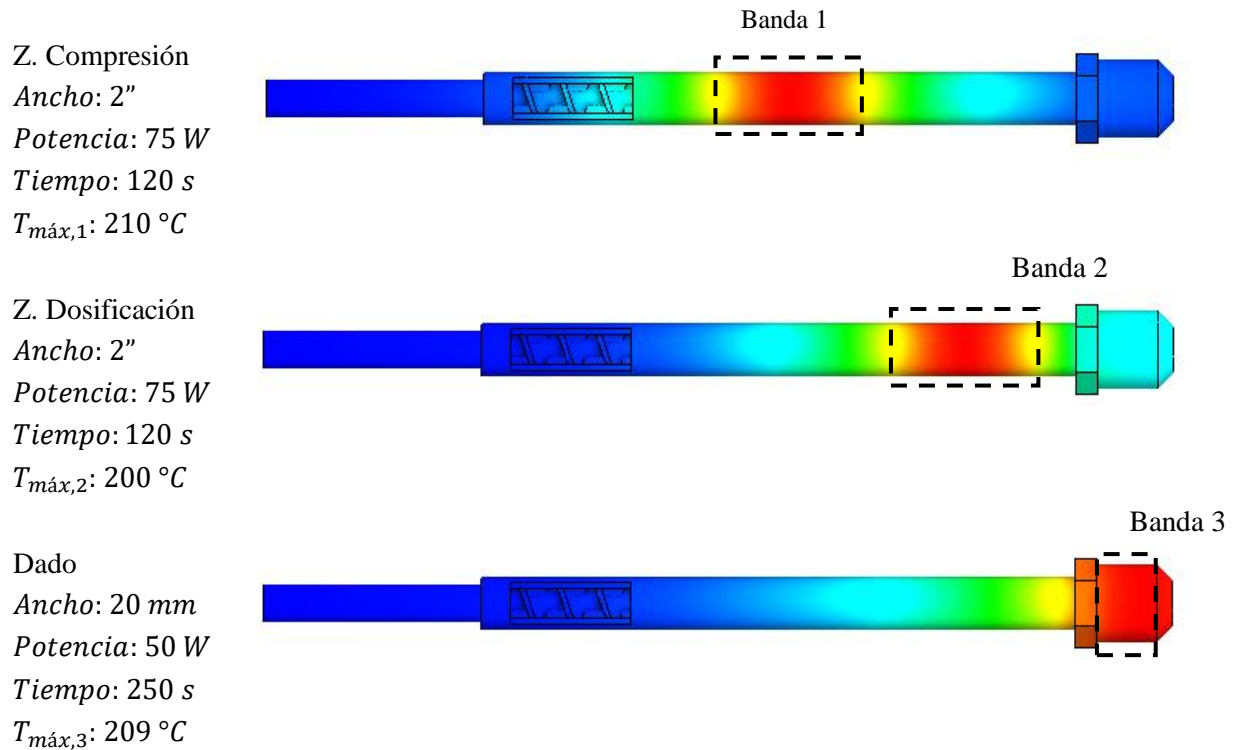


Figura 4.27. Funcionamiento de resistencias de forma independiente. Fuente: Elaboración propia.

### Especificaciones finales

Conforme a los cálculos, análisis e información de posibles proveedores, se determinan las siguientes especificaciones para las bandas (Tabla 4.18).

Tabla 4.18. Especificaciones finales resistencias tipo banda. Fuente: Elaboración propia.

Resistencias	Tipo	Diámetro interno	Ancho	Potencia
Banda 1	Mica	1.71 cm $\approx$ 1"	2"	75 W – 100 W
Banda 2	Mica	1.71 cm $\approx$ 1"	2"	75 W – 100 W
Banda 3	Mica	2.54 cm = 1"	20 mm	50 W

#### 4.2.10.9 Cálculo del aislamiento para el barril.

Para calcular el espesor del aislante térmico en el barril, se considera que la razón de transferencia de calor estacionario entre las capas que conforman un corte transversal en el barril de la extrusora puede expresarse como una serie de resistencias térmicas (Figura 4.28). Tomando en cuenta que el aislante se propone para conservar el calor viscoso que se genera en el proceso, entonces el PP fundido y el husillo se encuentran a la temp. máxima de 260°C, por lo que  $T_{\infty 1} = T_1$ .

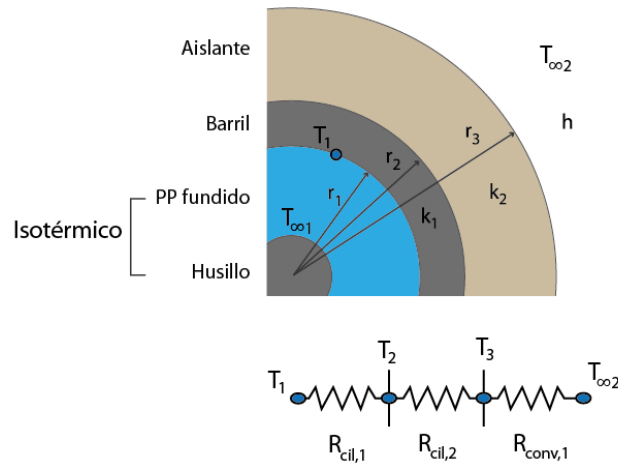


Figura 4.28. Red de resistencias térmicas para la transferencia de calor en el barril. Fuente: Elaboración propia.

Por lo que, la razón de transferencia de calor en dirección radial se expresa como:

$$\dot{Q} = \frac{(T_1 - T_{\infty 2})}{R_{total}} \quad [W] \quad (4.32)$$

Donde:

$$R_{total} = R_{cil,1} + R_{cil,2} + R_{conv,1} \quad [^{\circ}C/W] \quad (4.33)$$

$$R_{total} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k_1} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi L k_2} + \frac{1}{h_1 A_1} \quad [^{\circ}C/W] \quad (4.34)$$

$$A_1 = 2\pi r_3 L \quad [m]$$

Igualando la ec. 4.32 y ec. 4.34, y sustituyendo  $A_1$  se tiene que:

$$\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k_1} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi L k_2} + \frac{1}{h_1 (2\pi r_3 L)} = \frac{\Delta T}{\dot{Q}}$$

Despejando  $r_3$

$$\frac{\ln(r_3)}{k_2} + \frac{1}{h_1 r_3} = \frac{2\pi L \Delta T}{\dot{Q}} - \frac{\ln(r_2/r_1)}{k_1} + \frac{\ln(r_2)}{k_2}$$

Donde:

$r_1$  = Radio interno del barril = 0.00645 m

$r_2$  = Radio externo del barril = 0.00855 m

$h$  = Coeficiente de transferencia de calor por convección libre de gases (Cengel y Ghajar, 2011)

$$h = 5 \text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$$

La diferencia de temperaturas es:

$$\Delta T = 260^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C} = 240^{\circ}\text{C}$$

Temperatura del ambiente considerada en 20°C.

La razón máxima de transferencia de calor en el aislante es igual a la potencia perdida por disipación:

$$\dot{Q} = 11 \text{ W}$$

$k$  = Coeficiente de conductividad térmica del acero AISI 4140. Obtenido de: *Aceros SISA (2017)*.

$$k_1 = 42 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$k$  = Coeficiente de conductividad térmica de la fibra de vidrio RW-430 a 260°C. Obtenido de: *Owens Corning (2017)*.

$$k_2 = 0.0797 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

La longitud del aislante es igual a la longitud total menos 4 cm de la zona de alimentación, debido a que la zona de alimentación deberá disipar el exceso de calor para no permitir que el polipropileno se estanque en la garganta de alimentación.

$$L = 0.15 \text{ m}$$

Sustituyendo valores

$$\frac{\ln(r_3)}{0.0797} + \frac{1}{5 \cdot r_3} = \frac{2\pi(0.15)(240)}{11} - \frac{\ln\left(\frac{0.00855}{0.00645}\right)}{42} + \frac{\ln(0.00855)}{0.0797}$$

$$\frac{\ln(r_3)}{0.0797} + \frac{1}{5r_3} = -39.20$$

Utilizando el método de Newton (*Chapra y Canale, 2017*), se obtienen los siguientes resultados.

$$r_{3,1} = 0.0135 \text{ m}$$

$$r_{3,2} = 0.0190 \text{ m}$$

De los dos radios anteriores, se elige el radio de 1.90 cm, debido a que entre mayor sea el radio, mayor será la protección.

Por lo tanto, el espesor del aislante es igual a:

$$\text{Espesor} = r_2 - r_1 = 19 - 8.55 = 10.45 \text{ mm}$$

Debido a las dimensiones de la fibra de vidrio encontradas comercialmente, las especificaciones finales son (Tabla 4.19):

Tabla 4.19. Especificaciones finales del aislamiento térmico. Fuente: Elaboración propia.

Aislante térmico	Espesor
Fibra de vidrio RW-430	10.45 mm $\approx$ 1/2"

#### 4.2.11 Unidad de enfriamiento

Se propusieron 2 sistemas de enfriamiento en el Cap. 3, siendo el medio de enfriamiento el aire o el agua, los cuales tienen que eliminar la energía extra del polipropileno, para que tenga una temperatura igual a la del ambiente.

En la Figura 4.29 se muestra las condiciones del sistema.

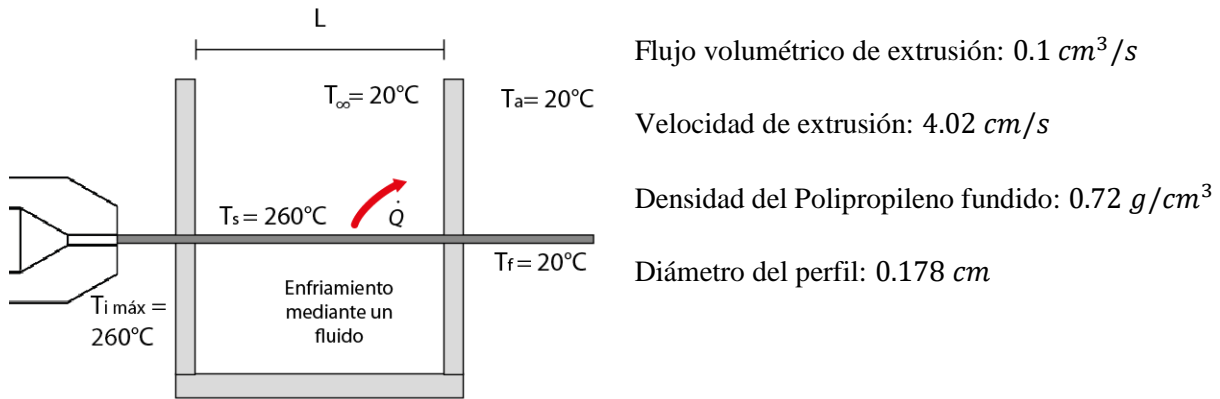


Figura 4.29. Condiciones del sistema de enfriamiento. Fuente: Elaboración propia.

Para que el polipropileno llegara a las condiciones de fundido y temperatura que tiene a la salida del dado, se considera la aplicación de calor al inicio del proceso, por lo que tuvo un incremento en la cantidad de energía dentro del material que en la etapa de enfriamiento deberá perder ( $\dot{Q}_{perdida}$ ), y que se transfiere por convección al fluido  $\dot{Q}_{conv}$ , despreciando la transferencia de calor por radiación, este intercambio de energía se expresa como:

$$\dot{Q}_{perdida} = \dot{Q}_{conv} \quad (4.35)$$

La energía perdida representa un cambio en la energía interna del polipropileno, por lo que:

$$\dot{Q}_{perdida} = \Delta U = \dot{m}_p \cdot C_{pp} \cdot (T_i - T_f) \quad (4.36)$$

Donde:

$C_{pp}$  = Calor específico del Polipropileno =  $1.93 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$

$T_i$  = Temperatura inicial del perfil [ $^\circ\text{C}$ ]

$T_f$  = Temperatura final del perfil [ $^\circ\text{C}$ ]

$\dot{m}_p$  = Flujo de masa del Polipropileno =  $7.2 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$

Mientras que la transferencia de calor por convección se expresa como:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (4.37)$$

Donde:

$h$  = Coeficiente de transferencia de calor por convección [ $W/m^2\text{°C}$ ]

$A_s$  = Área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia por convección [ $m^2$ ]

$T_s$  = Temperatura de la superficie [ $^{\circ}C$ ]

$T_{\infty}$  = Temperatura del fluido, suficientemente alejada de la superficie [ $^{\circ}C$ ]

Igualando las expresiones:

$$\dot{m}_p \cdot C_{pp} \cdot (T_i - T_f) = hA_s(T_s - T_{\infty})$$

Considerando que:

$$T_i = T_s$$

$$T_f = T_{\infty}$$

Sintetizando la ecuación:

$$\dot{m}_{pp} \cdot C_{pp} = h \cdot A_s$$

Donde:

$$A_s = \pi\phi \cdot L$$

Sustituyendo  $A_s$  en la ecuación:

$$\dot{m}_{pp} \cdot C_{pp} = h \cdot \pi \cdot \phi \cdot L \quad (4.38)$$

De la expresión, se desconocen la longitud del área de la interacción del fluido ( $L$ ), y el coeficiente de transferencia de calor por conducción ( $h$ ).

Debido a que ( $h$ ), no es una propiedad del fluido de enfriamiento, se recurre a los siguientes datos:

El número de Biot es la razón de la resistencia interna de un cuerpo a la *conducción de calor* con respecto a su resistencia externa a la *convección de calor* (Cengel y Ghajar, 2011).

$$Bi = \frac{R_{cond}}{R_{conv}} \quad (4.39)$$

Por lo tanto, un número pequeño de Biot representa poca resistencia a la conducción del calor y, por lo tanto, gradientes pequeños de temperatura dentro del cuerpo. En la Figura 4.30, se muestra la evolución de las temperatura interna y externa, en referencia con el número de Biot, y las diferencias entre ellas a manera que Bi se incrementa.



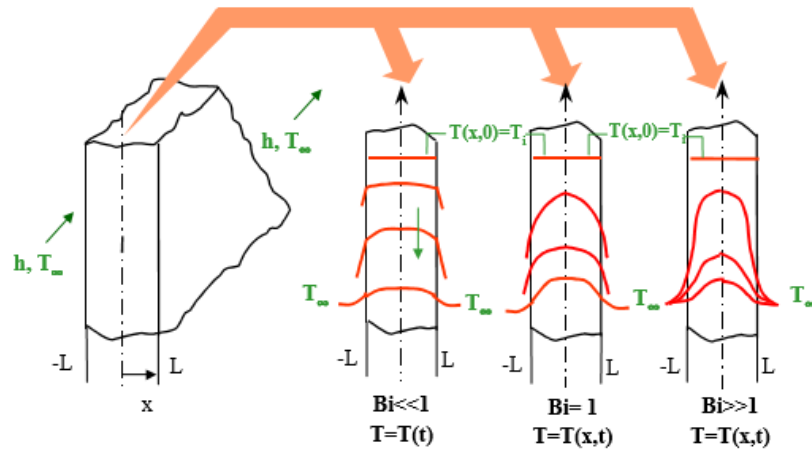


Figura 4.30. Evolución de temperaturas en función del número de Biot. Fuente: (Corberan y Royo, 2017).

Para evitar tensiones y discontinuidades morfológicas *StudyLib* (2017) recomienda que  $Bi$  no debe ser muy alto,  $Bi < 100$ . Aunque en referencia a la Figura 4.30, lo más recomendado es mantener  $Bi < 1$ .

El número de Biot para un cilindro largo de radio  $r$ , se define como (*Cengel y Ghajar, 2011*):

$$Bi = h \cdot \frac{r}{2k_p} \quad (4.40)$$

Donde:

El coeficiente de conductividad térmica para el material es (*StudyLib, 2017*):

$$k \approx 0,1 - 0,4 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

Y el coeficiente de transferencia de calor por conducción varía según *StudyLib* (2017):

$$h \approx 10 - 30 \text{ W/m}^2\text{C en aire [filmes]}$$

$$h \approx 1000 \text{ W/m}^2\text{C en agua en circulación [tubos, perfiles]}$$

Coficiente de conductividad térmica para el polipropileno (*Plasticbages Industrial, S.L., 2017*):

$$k_p = 0.22 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

#### 4.2.11.1 Enfriamiento por aire

Para el enfriamiento por aire, el valor de ( $h$ ) recomendado por *StudyLib* (2017), es de:

$$h = 10 - 30 \text{ W/m}^2\text{C}$$

Considerando que entre mayor sea el coeficiente de transferencia de calor ( $h$ ), mayor será el intercambio de energía entre el producto y el medio de enfriamiento, se elige  $h = 30$ , para analizar la transferencia de calor.

Calculando  $Bi$ , de la ec. 4.40

$$Bi = 30 \cdot \frac{0.00089}{2(0.22)} = 0.06$$

Una vez determinado  $h$ , se puede calcular la longitud, con la ec. 4.38,

$$L = \frac{\dot{m}_p \cdot C_{pp}}{\pi \phi \cdot h}$$

Sustituyendo los valores, con  $h = 30$

$$L = \frac{7.2 \times 10^{-5} \cdot 1930}{\pi(0.00178) \cdot (30)} = 0.83 \text{ m}$$

Debido a que la longitud es muy grande, *Cengel y Ghajar (2011)*, muestran valores típicos de ( $h$ ) para convección forzada de gases:

Tabla 4.20. Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección. Fuente: (*Cengel. y Ghajar., 2011*):

Tipo de convección	$h, W/m^2 \cdot ^\circ C$
Convección libre de gases	2 – 5
Convección libre de líquidos	10 – 1000
Convección forzada de gases	25 – 250
Convección forzada de líquidos	50 – 20 000
Ebullición y condensación	2 500 – 100 000

Si consideramos una convección forzada con gases, con  $h = 250 W/m^2 \cdot ^\circ C$ , recalculando  $Bi$  y  $L$  se tiene que:

$$Bi = 250 \cdot \frac{0.00089}{2(0.22)} = 0.51 < 1$$

$$L = \frac{7.2 \times 10^{-5} \cdot 1930}{\pi(0.00178) \cdot (250)} = 0.1 \text{ m}$$

Con un valor de  $Bi$  y  $L$  pequeños, solo resta calcular el flujo de masa necesario para enfriar el perfil. Considerando que la cantidad de calor que absorberá cualquiera de los fluidos de enfriamiento, va a representar un cambio en la energía del mismo, se tiene que:

$$\dot{Q}_{conv} = \dot{Q}_{ganancia} \quad (4.41)$$

Para el aire  $\dot{Q}_{ganancia}$  se define como:

$$\dot{Q}_{ganancia} = \Delta U = \dot{m}_a \cdot C_{pa} \cdot \Delta T_f \quad (4.42)$$

Donde:

$C_{pa}$  = Calor específico del aire =  $1.005 \text{ kJ/kg}^\circ C$  (*Cengel y Ghajar, 2011*).

$\Delta T_f$  = Incremento máx. de temperatura permisibles es de:  $4^\circ C$ , recomendado por *Morton (2012)*.

Igualando las ecuaciones:

$$hA_s(T_s - T_\infty) = \dot{m}_a \cdot C_{pa} \cdot \Delta T_f \quad (4.43)$$

El caudal másico de aire, necesario para enfriar el perfil de PP de 10 cm de longitud es:

$$\dot{m}_a = \frac{hA_s(T_s - T_\infty)}{C_{pp} \cdot \Delta T_f}$$

$$\dot{m}_a = \frac{(250)(\pi \cdot 0.00178 \cdot 0.10)(240)}{1005 \cdot 4} = 0.0083 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 25 \text{ m}^3/\text{h}$$

*Nota: Densidad del aire 1.20 kg/m<sup>3</sup> a 20°C.*

Por lo tanto, para enfriar un perfil con longitud de 10 cm, es necesario un caudal volumétrico de 25 m<sup>3</sup>/h de aire.

#### 4.2.11.2 Enfriamiento por agua

Para el enfriamiento por agua, el valor de  $h$  recomendado por *StudyLib (2017)*, es de:

$$h = 1000 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Calculando  $Bi$  conforme a la ec. 4.40:

$$Bi = 1000 \cdot \frac{0.00089}{2(0.22)} = 2.02$$

Considerando la Figura 4.30, se muestra que en  $Bi > 1$  la diferencia entre la temperatura de la superficie y del interior son notorias, aunque el diámetro del perfil es pequeño puede ocasionar inestabilidades en su superficie que se deben evitar. Por lo que, si se considera un  $Bi = 1$ , el valor de  $h$  es:

$$h = \frac{2k_p \cdot Bi}{r} = \frac{2(0.22)(1)}{(0.00089)} = 494.38 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Siendo que  $h$ , se encuentra entre la convección forzada por líquidos mostrada en la Tabla 4.20, por lo que se retoma un valor  $h = 400$ . Recalculando  $Bi$ :

$$Bi = 400 \cdot \frac{0.00089}{2(0.22)} = 0.81$$

Calculando la longitud de aplicación, bajo las condiciones anteriores (ec. 4.38),

$$L = \frac{7.2 \times 10^{-5} \cdot 1930}{\pi(0.00178) \cdot (400)} = 0.062 \text{ m}$$

Considerando que la cantidad de calor que se transfiere por convección representa un cambio de energía en el agua, se tiene que:

$$\dot{Q}_{conv} = \dot{Q}_{ganancia} \quad (4.40)$$

Para el agua  $\dot{Q}_{ganancia}$  se define como:

$$\dot{Q}_{ganancia} = \Delta U = \dot{m}_w \cdot C_{pw} \cdot \Delta T_f \quad (4.41)$$

Donde:

$C_{pw}$  = Calor específico del agua =  $4.186 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$  (Morton, 2012).

$\Delta T_f$  = Incremento máx. de temperatura permisibles es de:  $4^\circ\text{C}$ , recomendado por Morton (2012).

Igualando las ecuaciones,

$$hA_s(T_s - T_\infty) = \dot{m}_{pw} \cdot C_{pw} \cdot \Delta T_f \quad (4.42)$$

El caudal másico de agua, necesario para enfriar el perfil de PP de 6.2 cm de longitud es:

$$\dot{m}_w = \frac{hA_s(T_s - T_\infty)}{C_{pw} \cdot \Delta T_f}$$

Sustituyendo lo valores:

$$\dot{m}_w = \frac{(400)(\pi \cdot 0.00178 \cdot 0.062)(240)}{4186 \cdot 4}$$

$$\dot{m}_w = 0.002 \text{ kg/s} = 7.2 \text{ kg/h} \approx 8 \text{ l/h}$$

Por lo tanto, para enfriar un perfil con longitud de 6.2 cm, es necesario un flujo de  $8 \text{ l/h}$  de agua.

#### 4.2.11.3 Análisis de eficiencia

Para ambos sistemas de enfriamiento, se sugieren los siguientes componentes:

##### Ventilador XTECH XTA102



Alimentación: 12 V 0.15 A

Consumo: 0.96 W

Velocidad: 1500 rpm

Caudal: 18.80 CFM =  $31.94 \text{ m}^3/\text{h}$

Precio: \$320.00

Dimensiones: 90 mm \* 90 mm \* 25 mm

Fuente: (Mercadolibre V., 2017).

**Bomba de agua sumergible ECOPET**

Alimentación: 110 V 0.18A, 60 Hz.  
 Capacidad: 150 l/h.  
 Consumo: 2 W  
 Peso: 0.224 kg  
 Dimensiones: 3 cm \* 2.7 cm \* 3.5 cm  
 Precio: \$92.00  
 Fuente: (Mercadolibre B.A., 2017).

Las dos opciones de enfriamiento se evaluaron con base en sus características y a las métricas de operación establecidas en el cap. 3, sobre la facilidad de operación y limpieza de la máquina extrusora (Tabla 4.21).

Tabla 4.21. Análisis de eficiencia del sistema de enfriamiento. Fuente: Elaboración propia.

Características	Bomba de agua sumergible ECOPET	Ventilador XTECH XTA102	Con mayor eficiencia
Capacidad necesaria	8 l/h	25 m <sup>3</sup> /h	Ventilador
Capacidad real	150 l/h.	31.94 m <sup>3</sup> /h	
Alimentación [V, A]	110 V 0.18 A	12 V 0.15 A	Ventilador
Consumo [W]	2	0.96	Ventilador
Precio	\$92.00	\$320.00	Bomba
Dimensiones [cm]	3 x 2.7 x 3.5	9 x 9 x 2.5	Bomba
Número de piezas para montaje	Tanque, empaques y filtro	Soporte	Ventilador
Facilidad de mantenimiento (Facilidad de limpieza)	Limpieza por salitre, revisión por fugas de agua	Limpieza por polvo	Ventilador
Puesta en marcha (Facilidad de operación)	Rellenar el tanque y encendido	Encendido	Ventilador

Aunque el ventilador requiere de una inversión inicial mayor, la facilidad de uso y mantenimiento, así como su bajo consumo de energía aportan mayores atributos a la operación del sistema de enfriamiento.

Para mejorar el enfriamiento y tener una disipación de calor paulatina se propone anexarle una cámara que permita mantener el área del ambiente a una temperatura mayor y continuar con la extracción total de calor mediante el ventilador, como se muestra en la Figura 4.31.

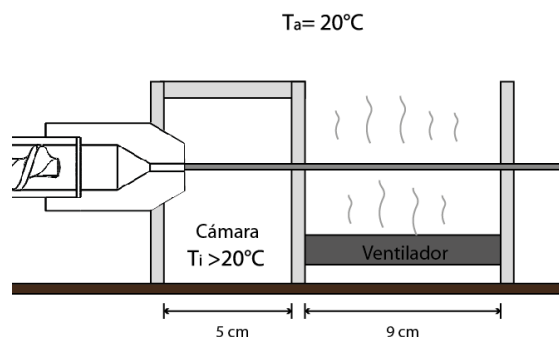


Figura 4.31. Unidad de enfriamiento. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.12 Unidad de tiro

Como se mencionó en el cap 3. la unidad de tiro está conformada por un par de rodillos que jalan el perfil extruido para mantenerlo estable a través del enfriamiento y guiarlo hacia el embobinado.

El perfil pasa por dos fenómenos entre el dado y los rodillos. Estos son:

**Contracción:** debido a que el material es fundido, se origina un cambio en su densidad por lo que al enfriarse se contrae un 1.75% aproximadamente.

**Hinchamiento:** es un incremento en las dimensiones del perfil, del cual se desconoce el porcentaje de expansión, esto debido a las diferencias de presión en el dado y el ambiente, así como de la presión ejercida para pasar a través de un orificio de dimensión pequeña. Dicha expansión no puede ser calculada a través de una fórmula establecida ya que depende de las propiedades del material como su peso molecular, los esfuerzos de corte, o de parámetros del proceso como la temperatura final y la presión que se generó en la punta del dado (Figura 4.32).

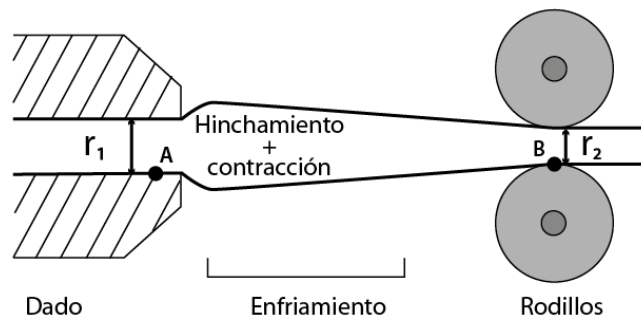


Figura 4.32. Hinchamiento del perfil. Fuente: Elaboración propia.

Por lo que, para simplificar el análisis, se considera el punto A y B, como fronteras de un volumen de control, que refiere a un sistema en el cual existe un flujo de masa hacia adentro y hacia afuera, donde debido a las condiciones de los dos puntos, las propiedades son estables y se pueden determinar.

El principio de conservación de la masa para un volumen de control de acuerdo con *Cengel y Cimbala (2012)* puede expresar como: “la transferencia neta de masa hacia dentro de un volumen de control, o hacia afuera de este durante un intervalo  $\Delta t$ , es igual al cambio neto (aumento o disminución) en la masa total que está dentro de ese volumen en el transcurso de  $\Delta t$ ”, es decir

$$\dot{m}_{ent} - \dot{m}_{sal} = \frac{dm_{vc}}{dt} \quad [kg/s] \quad (4.44)$$

En especial para un flujo que permanece estacionario, el balance de masa se realiza con el interés de conocer el flujo de masa que entra o sale del sistema. Donde el principio de conservación de la masa exige que la cantidad total de masa que entra en un volumen de control sea igual a la cantidad total de masa

que sale de él. Un caso particular, es cuando en un dispositivo se genera una sola entrada (subíndice 1) y una sola salida (subíndice 2) (Cengel y Cimbala, 2012)), entonces la ecuación se reduce a:

Flujo estacionario (una sola corriente)

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (4.45)$$

$$\rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2 \quad (4.46)$$

Delimitándose el volumen de control como sigue, con sus variables (Figura 4.33):

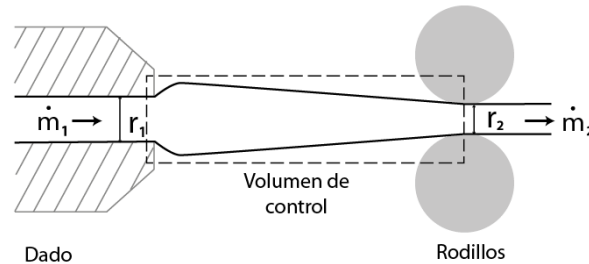


Figura 4.33. Delimitación del volumen de control. Fuente: Elaboración propia.

Con esta información, se puede calcular la velocidad a la que se tiene que hacer girar el rodillo para que el material salga del volumen de control y continúe con el proceso.

Despejando la velocidad de la ecuación, se tiene que:

$$V_2 = \frac{\rho_1 V_1 A_1}{\rho_2 A_2}$$

Donde:

$\rho_1$  = Densidad del polipropileno en estado fundido =  $0.90 \text{ g/cm}^3$

$V_1$  = Velocidad de extrusión =  $4.02 \text{ cm/s}$

$A_1$  = Área de la salida del dado

$$A_1 = \frac{\pi}{4} (D_s)^2$$

$\rho_2$  = Densidad del polipropileno en estado sólido =  $0.90 \text{ g/cm}^3$

$A_2$  = Área de la sección transversal del filamento

$$A_2 = \frac{\pi}{4} (D_f)^2$$

Sustituyendo valores

$$V_2 = \frac{0.72 * \frac{\pi}{4} (1.78)^2 * 4.02}{0.90 * \frac{\pi}{4} (1.75)^2} = 3.33 \text{ cm/s}$$

Por lo tanto, la velocidad tangencial del rodillo es de  $3.33 \text{ cm/s}$ , mientras que su velocidad angular se expresa como:

$$\omega = \frac{v}{r} \quad [\text{rad/s}] \quad (4.47)$$

El radio propuesto para el rodillo es de 1.25 cm, esto con base en la etapa de conceptualización 2. Sustituyendo valores

$$\omega = \frac{3.33}{1.25} = 2.66 \text{ rad/s} = 25.40 \text{ rpm}$$

#### 4.2.12.1 Cambio de diámetros del perfil

Si consideramos el cambio de diámetros en la entrada y la salida del volumen de control, se tiene la Figura 4.34.

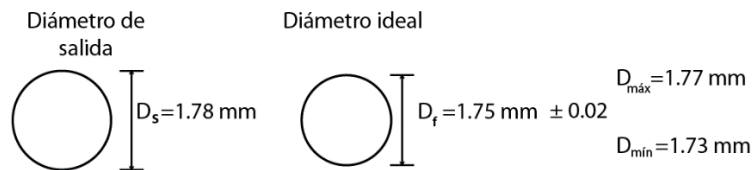


Figura 4.34. Diámetros del perfil. Fuente: Elaboración propia.

En un caso particular, en el que la contracción y el hinchamiento se compensen mutuamente, el diámetro de salida será el máximo de 1.78 mm, y el sistema de tiro funcionará como un calibrador, al reducir al diámetro necesario (Figura 4.35).

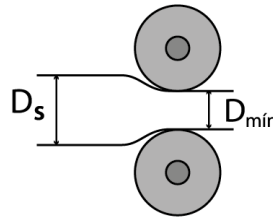


Figura 4.35. Sistema de tiro como calibrador. Fuente: Elaboración propia.

Aunque realmente esta presión ocasionaría una deformación en el perfil, se realizan los cálculos con el fin de dimensionar las fuerzas máximas de torque para el par de rodillos.

#### 4.2.12.2 Área de contacto

El área de contacto entre un rodillo plano y el filamento es puntual, pero con la ayuda de un canal en su superficie, se puede mejorar la zona de fricción y evitar desplazamientos innecesarios, controlando mejor la velocidad de tiro. El espacio propuesto entre estos dos rodillos es de 0.5 mm, para evitar que estos rocen antes de sujetar el filamento. Para calcular el arco de contacto se considera la Figura 4.36.

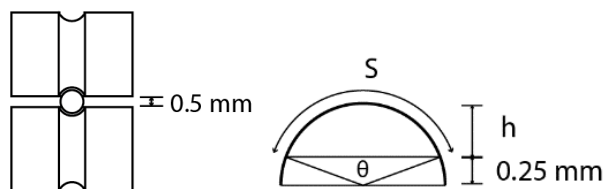


Figura 4.36. Área de contacto del rodillo. Fuente: Elaboración propia.



Teniendo en cuenta, las relaciones geométricas que se muestran en la Figura 4.36, y un radio máximo permisible del filamento de 0.0885 mm, se tiene que:

$$S = \frac{\theta}{180} * \pi * r$$

$$S = \frac{147.18}{180} * \pi * 0.0885 = 2.27 \text{ mm}$$

El área de contacto tiene una longitud muy pequeña, ya que es una fuerza puntual, para fines prácticos  $l = 0.1 \text{ mm}$

$$A = S * l$$

$$A = 2.26 * 0.1 = 0.226 \text{ mm}^2$$

#### 4.2.12.3 Fuerza aplicada

Si el rodillo funciona como calibrador, entonces estará actuando una fuerza normal a la dirección de la velocidad de extrusión sobre el área de contacto, provocando una deformación en el perfil para llevarlo a las dimensiones deseadas (Figura 4.37).

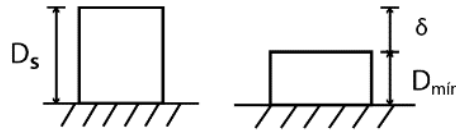


Figura 4.37. Deformación del perfil. Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, la deformación máxima es la diferencia entre el diámetro de salida y el diámetro mínimo permisible para el filamento. Teniendo que la deformación por la Ley de Hooke (*Singer y Pytel, 1994*) se define como:

$$\delta = \frac{PL}{AE} \quad (4.48)$$

Donde:

$P$  = Fuerza aplicada

$L$  = Longitud inicial =  $D_s$

$A$  = Área de aplicación

$E$  = Módulo de elasticidad del polipropileno =  $11 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2 = 1078 \text{ N/mm}^2$

Despejando  $P$ , para obtener la fuerza aplicada

$$P = \frac{\delta AE}{L}$$

Sustituyendo los valores

$$P = \frac{(1.78 - 1.73)(0.226)(1078)}{(1.78)} = 6.84 \text{ N}$$

#### 4.2.12.4 Fuerza de fricción

Durante el tiro del perfil extruido, se genera una fuerza de fricción entre el rodillo y el perfil (Figura 4.38).

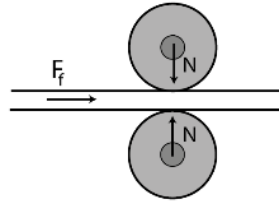


Figura 4.38. Fuerza de fricción en los rodillos. Fuente: Elaboración propia.

Teniendo que

$$F_f = \mu N \quad (4.49)$$

Donde:

$\mu$  = Coeficiente de fricción entre un plástico dirigido y UHMW = 0.25 (VFISICA, 2013).

$N$  = Fuerza normal, equivalente a la fuerza para deformar el perfil.

Sustituyendo los valores

$$F_f = 0.25 * 6.84 = 1.71 \text{ N}$$

#### 4.2.12.5 Torque

EL torque de arranque para el motor del rodillo se define como

$$T_M = I\alpha + F_f * r \quad (4.50)$$

Durante el funcionamiento del motor  $\alpha = 0$ , por lo que el producto de la aceleración angular con la inercia del rodillo es cero. Teniendo que el torque en funcionamiento se expresa como:

$$T_M = F_f * r \quad (4.51)$$

Sustituyendo valores

$$T_M = 1.71 * 0.0125 = 0.0214 \text{ N/m}$$

La potencia del motor se define como:

$$\text{Potencia} = T * \omega \quad [W] \quad (4.52)$$

Sustituyendo valores

$$Potencia = 0.0214 * 2.66 = 0.06 W$$

Por lo tanto, las especificaciones del motor aplicándole el factor de corrección, de acuerdo con *Mott* (1992) son:

Especificaciones	Factores de corrección ( $F_c$ ) ( <i>Servicio</i> )( <i>Temperatura</i> ) = $F_c$	Especificaciones finales
Velocidad = 25.40 rpm		Velocidad = 32.131 rpm
Torque = 0.0214 N/m	(1.15)(1.10) = 1.265	Torque = 0.0270 N/m
Potencia = 0.06 W		Potencia = 0.08 W

En la Figura 4.39, se muestra una configuración aproximada de los componentes de la unidad de tiro.

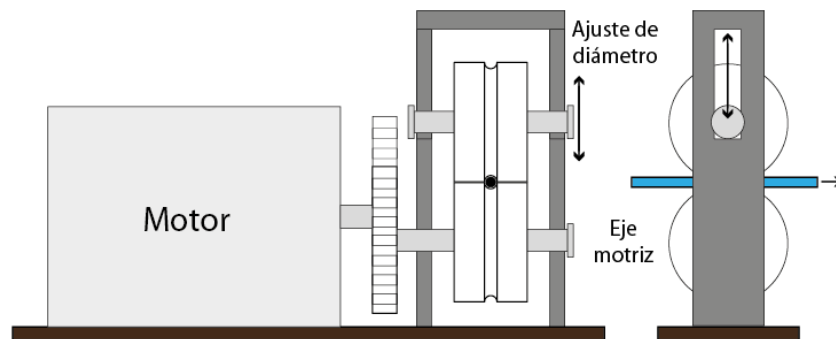


Figura 4.39. Unidad de tiro. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.13 Unidad de medición

Dentro de los modelos de indicadores de carátula en el mercado, se encuentran los indicadores de carátula tipo vástago posterior, de la marca Mitutoyo, que ofrecen la misma exactitud y durabilidad que los indicadores normales. Siendo adecuados para el montaje en dispositivos de inspección.

Eligiendo un tipo de carátula de 50-0-50, en la cual la medida ideal del diámetro de 1.75 mm se indica en 0, teniendo la lectura de la variación positiva o negativa del perfil extruido (Figura 4.40).



Figura 4.40. Indicador de carátula tipo vástago posterior (Imagen izquierda) y Carátula 50-0-50 (Imagen derecha).

Fuente: (Mitutoyo, 2012).

Con este modelo, la lectura de la medición del filamento se puede encontrar en la vista frontal de la extrusora, mejorando el aspecto de la carcasa. En la Figura 4.41 se muestra una configuración aproximada de la unidad de medición.

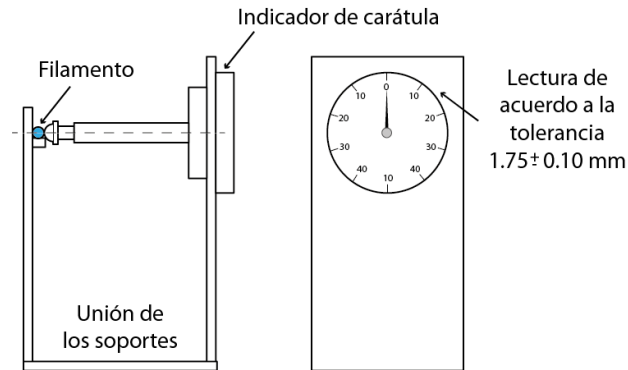


Figura 4.41. Unidad de medición. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.14 Unidad de embobinado

Para el embobinado, es necesario un carrete de plástico, que sirve de soporte para suministrar el filamento extruido en una impresora 3D. Comercialmente existen diferentes medidas, de las cuales se opta por el modelo B, de la empresa filament2printer (Figura 4.42), utilizado para embobinar filamento ABS, PLA, PP, entre otros de la misma marca, teniendo las siguientes especificaciones de los carretes.

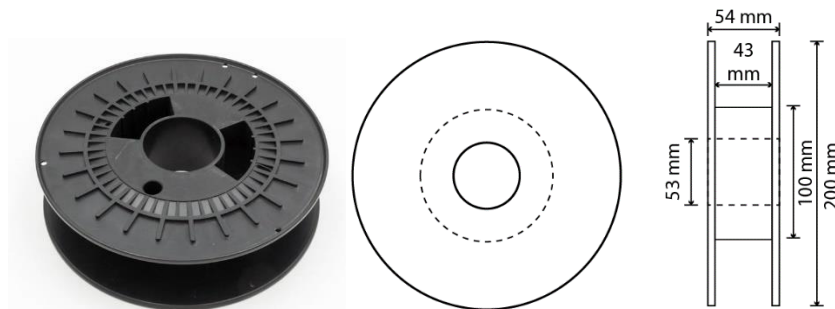


Figura 4.42. Bobina para filamento. Fuente: (Filament2printer, 2017).

Independientemente del tipo de embobinado a utilizar, ya sea por contacto o central, se observa el siguiente comportamiento en la bobina.

La velocidad tangencial de la bobina se puede expresar como:

$$V = \omega \cdot r$$

Considerando que la velocidad tangencial o de suministro del filamento es constante, y que es de interés conocer la velocidad angular para elegir el motor de la bobina, teniendo que:

$$\omega = \frac{V_{constante}}{r}$$

Pero como se muestra en la Figura 4.43 la velocidad va cambiando con respecto al radio de la bobina en cada capa, teniendo que:

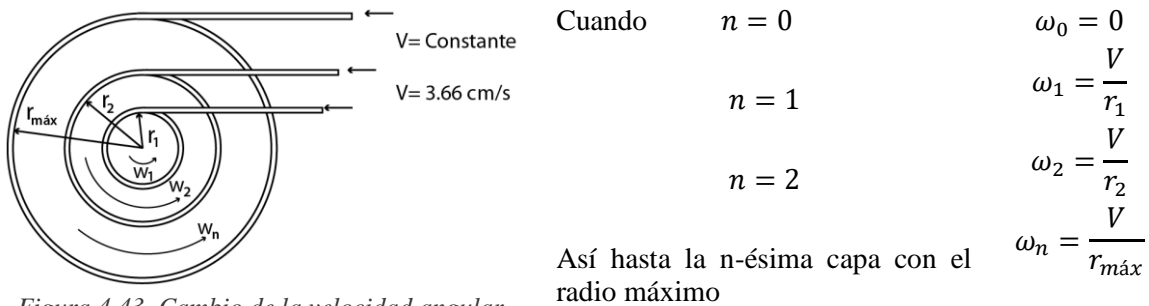


Figura 4.43. Cambio de la velocidad angular.

Fuente: Elaboración propia.

Particularmente, en un embobinado central, el eje motriz y el eje de la bobina son los mismos, por lo que se tiene que ir ajustando la velocidad angular para que el filamento sea enrollado uniformemente. Para ello es necesario el control de la velocidad angular del motor, del cual se realiza el análisis de comportamiento para un correcto embobinado.

#### 4.2.14.1 Análisis de la bobina

Con el fin de lograr una bobina de filamento ajustado y ordenado, este debe irse distribuyendo en el ancho del carrete (*dirección x*) e ir incrementando el radio con cada nueva capa (*dirección y*) (Figura 4.44).

La variación que existe en la dirección *x* es sobre su posición a través del eje motriz, mientras que la variación en el eje *y*, incluye un incremento en el radio de giro. Por lo que, la velocidad angular es igual en cada capa, y al aumentar el radio disminuye la velocidad durante la primera vuelta de filamento para ser constante nuevamente.

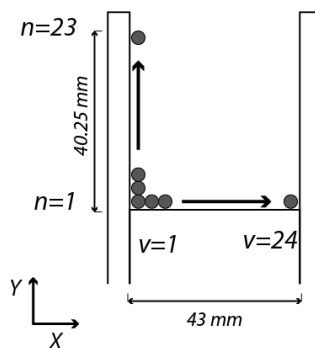
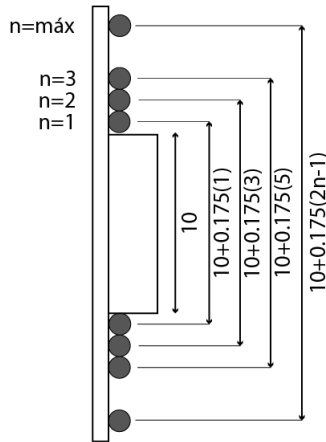


Figura 4.44. Capas de la bobina. Fuente: Elaboración propia.

Nota: El número de capas (*n*) y vueltas (*v*) se obtuvo de acuerdo a las dimensiones del carrete, con el  $D_f = 1.75 \text{ mm}$ .

### Definición de variables en función de las capas

El diámetro de la bobina cambia como se muestra en la Figura 4.45, teniendo inicialmente 10 cm de radio, y con un incremento en número impares del diámetro del filamento, por lo que:



$$\phi = 10 + 0.175(2n - 1) \quad [cm]$$

Así entonces el perímetro de cada vuelta en una capa n, es

$$P = \pi\phi$$

$$P_n = \pi[10 + 0.175(2n - 1)]$$

Y la longitud de filamento necesaria para cada capa se expresa como:

$$l_n = 24 * \pi[10 + 0.175(2n - 1)]$$

Figura 4.45. Incremento del diámetro.

Fuente: Elaboración propia.

### Masa en la bobina

Para calcular la masa en la bobina, se tiene que:

$$m = V \cdot \rho$$

$$m = Longitud \cdot A_{trans} \cdot \rho \quad [g]$$

Donde:

$$A_{trans} = \frac{\pi D_f^2}{4} = \frac{\pi(0.175)^2}{4} \quad [cm^2]$$

$$\rho = 0.90 \text{ g/cm}^3$$

Masa en una vuelta de filamento en la capa n

$$m_{v,n} = \pi[10 + 0.175(2n - 1)] \cdot \frac{\pi(0.175)^2}{4} \cdot 0.90$$

$$m_{v,n} = 0.225\pi^2(0.175)^2[10 + 0.175(2n - 1)]$$

Masa en una capa n, correspondiente a 24 vueltas:

$$m_{c,n} = 5.4\pi^2(0.175)^2[10 + 0.175(2n - 1)]$$

Para conocer la masa actual en la bobina, hasta la capa n, incluyendo el peso de la bobina.

$$m_n = 250 + \sum_{i=1}^n 5.4\pi^2(0.175)^2[10 + 0.175(2i - 1)]$$

Velocidad angular de la bobina

La velocidad angular como se mostró al inicio cambia con respecto al número de capa  $n$

$$\omega_n = \frac{V}{r_n} = \frac{2V}{\phi_n}$$

Por lo tanto, la velocidad en la capa  $n$ , se obtiene mediante:

$$\omega_n = \frac{2V}{10 + 0.175(2n - 1)}$$

Tiempo de embobinado

Por definición, el tiempo se puede obtener de

$$V = \frac{d}{t}$$

$$t = \frac{d}{V} = \frac{\text{longitud del filamento en la capa } n}{\text{velocidad constante de alimetacion}}$$

Tiempo para enrollar una vuelta en la capa  $n$

$$t_{v,n} = \frac{\pi}{3.33} [10 + 0.175(2n - 1)]$$

Tiempo para enrollar una capa  $n$

$$t_{c,n} = \frac{24\pi}{3.33} [10 + 0.175(2n - 1)]$$

Tiempo para enrollar hasta la capa  $n$

$$t_n = \sum_{i=1}^n \frac{24\pi}{3.33} [10 + 0.175(2i - 1)]$$

Tabulando algunos valores para las primeras y últimas capas de embobinado (Tabla 4.22):

Tabla 4.22. Variables en función de  $n$ . Fuente: Elaboración propia.

$n$	$\phi_n$ [cm]	$m_n$ [g]	$\omega_n$ [rad/s]	$\omega_n$ [rpm]	$t_n$ [s]	$t_{v,n}$ [s]
0	10	250	0	0	0	0
1	10.175	266.61	0.65455	6.25	230.38	9.60
2	10.525	283.79	0.63278	6.04	238.31	9.93
3	10.875	301.54	0.61241	5.85	246.23	10.26
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
22	17.225	743.33	0.38003	3.63	396.80	16.53
23	17.875	726.50	0.37259	3.56	404.72	16.86

Concluyendo que el motor debe girar dentro del rango de velocidades de 6.25 rpm a 3.56 rpm durante el embobinado

El torque se puede calcular conforme a la siguiente fórmula, despreciando la tensión que ofrece el filamento para embobinarse

$$T_M = I\alpha$$

Donde el momento de inercia  $I$  para un cilindro es  $I = \frac{1}{2}mR^2$ , y la aceleración  $\alpha$  es uniformemente acelerada en el tiempo de la primera vuelta en la capa  $n$ , donde  $\alpha = (w_1 - w_0)/(t_1 - t_0)$

$$T_M = \frac{1}{8}m_n\phi_n^2 \frac{w_n - w_{n-1}}{t_{v,n}}$$

Analizando el torque durante el arranque, se tiene que:

$$T_M = \frac{1}{8}(0.250)(0.10)^2 \frac{0.65455 - 0}{9.60} = 2.13 \times 10^{-5} \text{ Nm}$$

El torque necesario en la primera vuelta es:

$$T_M = \frac{1}{8}(0.26661)(0.10175)^2 \frac{0.63278 - 0.65455}{9.93} = -7.56 \times 10^{-7} \text{ Nm}$$

Y el torque en la última vuelta es:

$$T_M = \frac{1}{8}(0.77650)(0.17875)^2 \frac{0.37259 - 0.38003}{16.86} = -1.37 \times 10^{-6} \text{ Nm}$$

Con ello se comprueba que el motor requiere de un torque máximo de  $2.13 \times 10^{-5} \text{ Nm}$  que ocurre durante el arranque del motor.

Y entonces la potencia del motor, es (ec. 4.52):

$$\text{Potencia} = T * \omega = 2.13 \times 10^{-5} * 0.65455 = 1.39 \times 10^{-5} \text{ W}$$

Para la regulación de velocidades del motor, tendría que elaborarse un programa que responda a los cambios de velocidades con respecto al número de capa y al tiempo entre el embobinado de cada una de ellas.

Otra solución, es por compensación del diámetro, y aunque ya no se necesitaría un control, es necesario que el usuario reposicione el sistema para embobinar nuevamente (Figura 4.46).



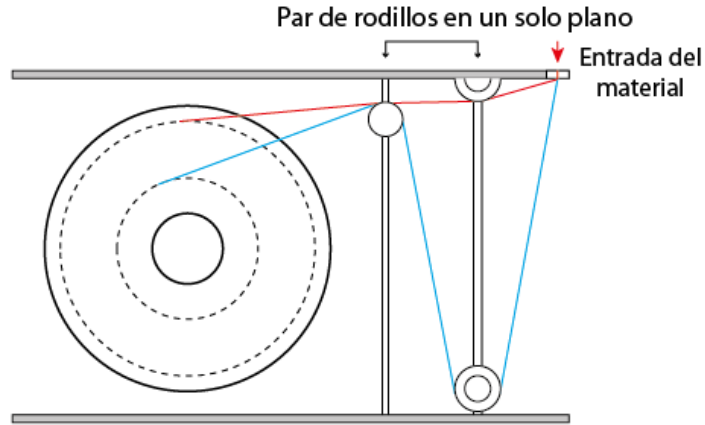


Figura 4.46. Embobinado por compensación del diámetro. Fuente: Elaboración propia.

### Embobinado en el eje x

Como se mencionó al principio, se requiere además un movimiento en el eje x (distancia de 4.3 cm), para el embobinado uniforme en cada fila, como se muestra en la Tabla 4.23.

Tabla 4.23. Embobinado en el eje x. Fuente: Elaboración propia.

Núm. de capa	Variables	Imagen ilustrativa	Interpretación
$n = 0$	$t_0 = 0 \text{ s}$		Arranque
$n = 1$	$t_1 = 230.38 \text{ s}$ $ds = 4.3 \text{ cm}$		$t_1$ es el tiempo que transcurre de 0 a 1
$n = 2$	$t_2 = 238.31 \text{ s}$ $ds = 4.3 \text{ cm}$		$t_2$ es el tiempo que transcurre de 1 a 2
⋮	⋮	⋮	⋮
$n = 23$	$t_{23} = 404.72 \text{ s}$ $ds = 4.3 \text{ cm}$		$t_{23}$ es el tiempo que transcurre de 22 a 23

El sistema que se encarga de hacerlo en máquinas actuales se compone como la Figura 4.47.

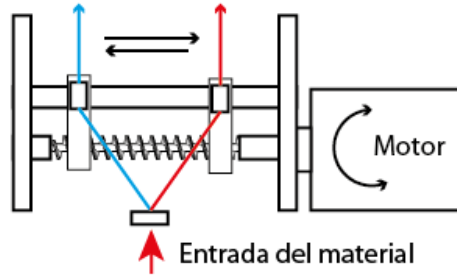


Figura 4.47. Unidad de apoyo para embobinado en el eje x. Fuente: Elaboración propia.

Por lo que se propone un tornillo de 1/4", de 20 hilos x pulgada y una barra guía de 1/4".

Donde:

$$Paso = \frac{25.4}{20} = 1.27 \text{ mm}$$

$$Desplazamiento = n^\circ \text{ de revoluciones} \times \text{Paso del tornillo}$$

$$n^\circ \text{ rev} = \frac{ds}{Paso} = \frac{43}{1.27} = 33.86$$

Por lo tanto, la velocidad angular del tornillo depende del tiempo de embobinado de cada capa n, por lo que

$$\omega = \frac{n^\circ \text{ rev}}{t_n} = \frac{33.86}{t_n} \text{ rad/s}$$

Tabulando los valores en la Tabla 4.24 y concluyendo a partir de ésta que la velocidad tangencial del motor para el deslizamiento en el eje x, varía entre 0.084 a 0.147 rad/s

Tabla 4.24. Comportamiento del embobinado en el eje X. Fuente: Elaboración propia.

Núm. de capa	Variables	Imagen ilustrativa	Interpretación
$n = 0$	$t_0 = 0$		Arranque
$n = 1$	$t_1 = 230.38$ $ds = 4.3$ $\omega_1 = 0.147$		$t_1$ es el tiempo que transcurre de 0 a 1 Sentido de giro: Anti-horario
$n = 2$	$t_2 = 238.31$ $ds = 4.3$ $\omega_2 = 0.142$		$t_2$ es el tiempo que transcurre de 1 a 2 Sentido de giro: Horario
⋮	⋮	⋮	⋮
$n = 23$	$t_{23} = 404.72$ $ds = 4.3$ $\omega_{23} = 0.084$		$t_{23}$ es el tiempo que transcurre de 22 a 23 Sentido de giro: Anti-horario

Nota: ds. Distancia recorrida.

### Torque del motor

El torque de arranque para el motor del movimiento en el eje x, se define como

$$T_M = I\alpha + F_f * r \quad (4.53)$$

Durante el funcionamiento el motor cambiará de sentido de giro por lo que el motor estará desacelerando y acelerando en lapsos de tiempo pequeños, por lo que se puede considerar  $\alpha = 0$ , y por consiguiente la aceleración angular con la inercia es igual a cero.

Teniendo que el torque en funcionamiento se expresa como:

$$T_M = F_f * r \quad (4.54)$$

Considerando que las superficies de contacto que transmiten movimiento se encuentran lubricadas y el filamento no ofrece resistencia para moverse en el eje x, se tiene que el torque es muy pequeño, con el fin de simplificar los cálculos y tener una referencia para la selección de motores, se utiliza el torque del motor del embobinado.

$$T_M = 2.13 \times 10^{-5} \text{ Nm}$$

Por lo que la potencia del motor es (ec. 4.52):

$$\text{Potencia} = T * \omega = 2.13 \times 10^{-5} * 0.147 = 3.13 \times 10^{-6} \text{ W}$$

### Solución de control

Mientras que el embobinado se puede compensar por diámetro, el desplazamiento en x al depender de los cambios de diámetro y de las tensiones, es más difícil de sincronizar ambos movimientos sin causar tensiones excesivas, por lo que se propone la utilización de un programa de control que permita la sincronización de ambos motores.

### Especificaciones de la unidad de embobinado

Con las expresiones anteriores para los parámetros de la bobina, se calcula ahora para todas las capas de la bobina, desde  $n = 1$  hasta  $n = 23$ , teniendo que:

Longitud total

$$l_n = \sum_{x=1}^{23} 24 * \pi [10 + .175 (2i - 1)] = 24321.58 \text{ cm} \approx 24.5 \text{ m}$$

Tiempo requerido

$$t_n = \sum_{i=1}^{23} \frac{24\pi}{3.33} [10 + 0.175(2i - 1)] = 7303.78 \text{ s} \approx 2 \text{ horas}$$

Masa del material

$$m = \rho * A * L = 0.90 * \frac{\pi(0.175)^2}{4} * 24321.58 = 526.5 \text{ g}$$

### Especificaciones de los motores

Motor	Rpm máx	Torque [Nm]	Potencia [W]
1, Bobina	6.25	$2.13 \times 10^{-5}$	$1.39 \times 10^{-5}$
2, Ajuste en x	1.40	$2.13 \times 10^{-5}$	$3.13 \times 10^{-6}$

Considerando un factor de corrección o seguridad igual a 1.265, utilizado en el motor de la extrusora, se tiene que:

Motor	Rpm máx	Torque [Nm]	Potencia [W]
1, Bobina	7.91	$2.69 \times 10^{-5}$	$1.76 \times 10^{-5}$
2, Ajuste en x	1.77	$2.69 \times 10^{-5}$	$3.96 \times 10^{-6}$

## Capítulo 5 Diseño a detalle

En el capítulo anterior se determinaron los componentes principales para desarrollar el proceso de extrusión, con base en la información obtenida, se clasificaron en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Clasificación de componentes. Fuente: Elaboración propia.

Componentes	Especificaciones		Requerimientos		Adquisición	
	Dimensiones	Material	Eléctrico	Control	Manufactura	Compra
Husillo	X	X			X	
Barril	X	X			X	
Dado	X	X			X	
Garganta de alimentación	X	X			X	
Placa y malla	X	X			X	
Tolva	X	X			X	
Motor	Motor extrusor	-	X	X		X
Sistema de calentamiento	BS				X	
	Resistencias	-	X	X		X
Unidad de enfriamiento	BS				X	
	Ventilador	-	X	ON/OFF		X
Unidad de tiro	BS				X	
	Motor tiro	-	X	X		X
Unidad de medición	BS				X	
	Indicador de carátula	-		-		X
Unidad de embobinado	BS				X	
	Motor Bobina	-	X	X		X
	BS				X	
	Motor aux	-	X	X		X

Nota: BS: Bosquejo de soportes.

Concluyendo que existen diferentes niveles de detalle en cada componente, se agrupan con el fin de detectar las especificaciones faltantes antes de armar el primer modelo 3D:

- Componentes por manufacturar con especificaciones completas, estos se modelan en 3D directamente, queda por definir ensambles.
- Componentes por manufacturar sin especificaciones, debido a que son soportes se modelan aproximaciones en 3D, para evaluar materiales, ensambles y dimensiones.
- Componentes con requerimientos de control y energía, para estos es necesario establecer una propuesta básica de funcionamiento, con el fin de tener un esquema de uso y armar en general el modelo 3D, definiendo los componentes por comprar.
- Componentes por comprar, se eligen proveedores para tener dimensiones para el modelo 3D e información de costos para el presupuesto.

Conociendo el estado de la información hasta este capítulo, se desarrollan los siguientes apartados con el fin de tener especificaciones de los componentes más relevantes en el área de energía y control, restringiendo el nivel de detalle en las especificaciones debido a la limitación de conocimientos en estas áreas.

## 5.1 Selección de componentes

Los componentes descritos en este apartado contienen la información básica, para más información consultar con los proveedores (información en el apartado 6.3).

### 5.1.1 Motores

Reuniendo los requerimientos que se obtuvieron en el capítulo anterior de todos los motores a utilizar, se muestra la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Requerimientos de motores. Fuente: Elaboración propia.

Ubicación	Velocidad (rpm)	Torque (Nm)	Potencia (W)	Requerimientos de control
Motor extrusor	43.3	0.56	2	Velocidad
Motor tiro	27.94	0.0235	0.07	Velocidad
Motor bobina	7.91	$2.69 \times 10^{-5}$	$1.76 \times 10^{-5}$	Velocidad
Motor auxiliar	1.77	$2.69 \times 10^{-5}$	$3.96 \times 10^{-6}$	Velocidad y cambio de sentido de giro

Teniendo que los motores trabajan a una velocidad menor a 50 rpm, con requerimientos de torque y potencia mínimos, excepto por el motor de la extrusora. Considerando lo anterior, se eligen los motores de corriente directa, que como se mencionó en el apartado 4.2.8, presentan mayor facilidad de control además de poder cambiar el sentido de giro.

Parámetros para la evaluación de motores:

- Precio
- Tamaño
- Tiempo de vida útil
- Control de velocidades, incluye encoder\*
- Sentido de giro
- Torque, potencia, velocidad angular.

\*El encoder o decodificador, es un dispositivo que convierte el movimiento en una señal eléctrica, para que un dispositivo de control pueda usar esta información y poder determinar la posición, contar, aumentar o disminuir la velocidad o cambiar la dirección. Este dispositivo es importante, para lograr el control de los parámetros de la extrusora.

Considerando lo anterior, se proponen los siguientes modelos de motores:

### Motor tipo A

Ubicación: Motor extrusora

#### Motor con caja de engranaje, alto esfuerzo de torsión CD



#### Especificaciones

Velocidad sin carga: 40 rpm  
 Torque nominal: 0.55 Nm  
 Torque máximo: 2.35 Nm.  
 Voltaje: 12 V  
 Corriente máx.: 1.2 A  
 Precio: \$ 211.97  
 Tamaño: 4.35 x 3.2 x 8.38 cm  
 Peso: 165 g

#### Descripción

Motor reductor de dos fases con decodificador. Larga vida útil, bajo nivel de ruido y gran par motor. Puede invertir el sentido de giro.  
 Material: Acero inoxidable

### Motor, tipo B.

Ubicación: Motor tiro, auxiliar y embobinado.

#### Motor eléctrico CD, con caja de engranes



#### Especificaciones

Velocidad de rotación sin carga: 190, 250, 400, 915 y 1930 rpm.  
 Voltaje: CD 6 V, 12 V, 24 V  
 Torque máximo: 0.088 Nm  
 Corriente máx.: 1.2 A  
 Precio: \$ 238.42  
 Tamaño: Ø 2.5 cm x 7.2 cm  
 Peso: 140 g

#### Descripción

Larga vida útil, bajo nivel de ruido y gran par. Puede invertir el sentido de giro.  
 Material: Acero inoxidable

## 5.1.2 Resistencias eléctricas

#### Resistencias eléctricas tipo banda



#### Especificaciones

Potencia: 50 W, 75 – 100 W  
 Voltaje: 110 V  
 Material: Mica  
 Diámetro: Fabricación a la medida  
 Ancho: Fabricación a la medida  
 Longitud de conexión: 1m

#### Descripción

Temperatura de trabajo hasta 482°C.  
 Posibilidad de perforar

### 5.1.3 Ventilador

#### Ventilador XTECH XTA102



#### Especificaciones

Alimentación: 12 V, 0.15 A

Consumo: 1.8 W

Velocidad: 1500 rpm

Caudal: 18.80 CFM = 31.94 m<sup>3</sup>/h

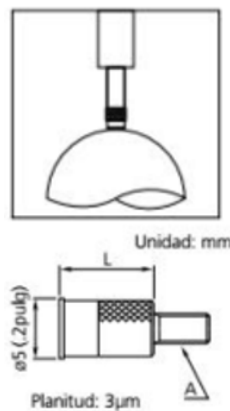
Dimensiones: 90 mm \* 90 mm \* 25 mm

### 5.1.4 Indicador de carátula

#### Indicador de carátula Mitutoyo Mod. 1960



1960



#### Especificaciones

Graduación: 0.01 mm

Error de indicación:  $\pm 14 \mu\text{m}$

Tipo de carátula: 50 – 0 – 50

Fuerza de medición: 1.4 N o menos

Diámetro de carátula: 39 mm

Altura general: 63 mm

Punta plana M2.5 x 0.45

Diámetro: 5 mm

Longitud: 8 mm

Planitud: 3  $\mu\text{m}$

#### Descripción:

Indicador con punta plana, para uso en superficies convexas.

## 5.2 Control

La finalidad de abordar el tema de control es determinar un esquema de funcionamiento a nivel de propuesta para determinar los principales componentes y dimensionar la carcasa de la extrusora.

### 5.2.1 Funcionamiento

La extrusora depende de una serie de parámetros que controlar en las unidades que la conforman, debido a que el material es reciclado, es importante el monitoreo y ajuste de cada uno de ellos para lograr que el material extruido tenga la mayor calidad posible.

El funcionamiento a nivel general de la extrusora cuenta con los siguientes pasos:

1. Alimentación de energía al sistema general
2. Encendido de las resistencias eléctricas
3. Configuración del perfil de temperaturas



4. Cargar la tolva con el material reciclado
5. Encender los sistemas periféricos (Enfriamiento y tiro)
6. Encender el motor
7. Configuración de la velocidad (rpm)
8. Ajustes durante la primera extrusión
  - El filamento debe de pasar por la unidad de enfriamiento, tiro y medición
  - Ajustar la velocidad del motor de la extrusora y la unidad de tiro, junto con el perfil de temperaturas hasta obtener el diámetro del filamento dentro de la tolerancia
  - El filamento ya calibrado, debe de hacerse pasar por la unidad auxiliar y de embobinado
  - Colocar el filamento en posición para la primera vuelta en la bobina
  - Sincronizar el motor auxiliar y el de la bobina
9. Para materiales que ya se han extruido no se requiere ajuste, una vez encendido los sistemas periféricos se sincroniza el motor auxiliar y el de la bobina.
10. Bobina terminada o pausa de extrusión
  - Apagar el motor, las resistencias y los sistemas periféricos

Con base en ello, se determinan las siguientes especificaciones de control (Tabla 5.3).

*Tabla 5.3. Especificaciones de control. Fuente: Elaboración propia.*

Tipo	Descripción
On/Off	Alimentación general
Lectura y control	Resistencias eléctricas [Temperatura °C]
Lectura y control	Motor [rpm]
On/Off	Ventilador [Sincronizado a tiro]
Lectura	Indicador de carátula [Diámetro mm]
Lectura y control	Velocidad de extrusión [cm/s]
	Sincronización para:
	Motor tiro [rpm]
	Motor auxiliar [rpm y sentido de giro]
	Motor bobina [rpm]

Con la información anterior y las especificaciones de las unidades a controlar, se determinan cada uno de los componentes a utilizar.

### **5.2.2 Control On/Off**

El control de la alimentación general depende de las características de la energía de alimentación y se define en el análisis de energía posteriormente.

El ventilador tendrá un control on/off, que se activa junto con el motor del sistema de tiro. Debido a que una vez alcanzada la temperatura, si existe material en la extrusora, éste saldrá fundido por el dado a baja presión o saldrá a presión normal al estar en funcionamiento el motor principal. En cualquiera de los dos casos es necesario que las unidades de enfriamiento y tiro estén funcionando para evitar que el material se pegue a la banda y no pueda ser pasado a la unidad de medición para seguir su recorrido. Por ello, se

requiere de control para sincronizar las unidades de enfriamiento con tiro de manera interna, por lo que no se le asigna espacio en el panel de control ni componentes a esta unidad.

### 5.2.3 Lectura y control: Resistencias eléctricas

Para el control eficiente de la temperatura en el proceso, es necesario un control que permita mantener un rango de temperatura de forma automática monitoreando los cambios ocurridos durante el proceso y establecer los parámetros de temperatura adecuados para el polipropileno reciclado que se busca reprocesar.

#### 5.2.3.1 Medición por termopares

El termopar basa su función en dos alambres de aleaciones diferentes unidos en los que al elevarse la temperatura en la unión (“punta caliente”) con respecto a los otros extremos, induce una tensión eléctrica (milivoltaje) que puede ser medido con un milivoltímetro. El milivoltaje será recibido y procesado por el control de temperatura para realizar sus funciones (*ENSA electronics, 2017*). Los tipos más comunes y sus rangos de temperatura máxima de operación son (Tabla 5.4):

Tabla 5.4. Termopares y rangos de temperatura de funcionamiento. Fuente: (*ENSA Electronics, 2017*).

Termopar	Temperatura máxima
Tipo J hierro/constantan Fe / 45% Ni 55% Cu	800 °C
Tipo K cromel/alumel Ni 90% Cr 10% / Ni 95% Al 2% Mn 2% Si 1%	1200 °C
Tipo E cromel/constantan Ni 90% Cr 10% / Ni 45% Cu 55%	800 °C
Tipo T cobre/constantan Cu 55% / Ni 45%	350 °C
Tipo R platino-rodio Pt 87% Rh 13% / Pt 100%	1600 °C
Tipo S platino-rodio Pt 90% Rh 10% / Pt 100%	1600 °C



Nótese que todos los termopares tienen una temperatura de operación mayor a 260°C, que es la temperatura máxima de proceso del polipropileno.

Los termopares pueden ser de alambre desnudo o con aislamiento individual y exterior de diferentes materiales, según la temperatura máxima de exposición: PVC 105 °C, teflón FEP 200 °C, teflón PFA 260 °C, kapton 320 °C, fibra de vidrio 480 °C, fibra de vidrio de alta temperatura 700 °C, aislamiento mineral y tubo de inconel o incoloy 1200 °C. Pueden tener protección exterior de malla metálica de cobre estañado, acero inoxidable o tubo flexible de acero inoxidable y se pueden reunir múltiples pares bajo el mismo aislamiento exterior.

La punta caliente puede estar expuesta (sin aislamiento) para respuestas más rápidas, también a tierra con el forro protector o aislado del mismo.

Tei (2017), clasifica a los termopares de acuerdo con su aplicación, de ella se retoman los siguientes (Tabla 5.5):

Tabla 5.5. Clasificación de termopares por su aplicación [Extracto]. Fuente: (Tei, 2017).

Imagen ilustrativa	Tipos de termopar
	<p><b>Termopares de conexión tornillo estándar</b></p> <p>Termopares de fácil acople a muchos procesos industriales para medición de temperatura en: motores, resistencias coladas calientes, hornos.</p>
	<p><b>Termopar con abrazadera de sujeción</b></p> <p>Termopares tipo J, K y T con abrazadera de sujeción de diámetro variable, perfecto para medición de temperatura en: tuberías, boquillas de extrusoras e inyección de plástico.</p>

Por lo tanto, se propone el uso de termopares con las siguientes características:

Termopar tipo T, con conexión de tornillo estándar o abrazadera de sujeción. Aislamiento de Kapton (320°C) o fibra de vidrio (480°C).

### 5.2.3.2 Controladores de temperatura

Los controladores de temperatura son equipos indispensables para mantener procesos industriales a temperaturas correctas según el método. Con el uso de sensores de temperatura (termopares y RTD) se miden las variables y se transporta la señal hasta las entradas de los controladores, estos últimos encargados de activar o desactivar elementos pasivos (resistencias eléctricas) o actuadores (alarmas, cierres de elementos, etc.).

#### Tamaño de los controladores

Los tamaños disponibles de los controladores están normalizados por la norma DIN, esta norma identifica las dimensiones de las carátulas con números fraccionales, con esta identificación se programan las perforaciones en paneles de control (Tabla 5.6).

Tabla 5.6. Tamaño normalizado de controladores. Fuente: (Tei, 2017).

Designación DIN	Tamaño de carátula [mm]
1/32	48 X 24
1/16	48 X 48
1/8	48 X 96
1/4	96 X 96

Considerando lo anterior, se propone el siguiente controlador

### **Kit de controlador de temperatura PID digital REX-C100 110-240V 0-1300 grados**



#### Especificaciones

##### Controlador de temperatura

Voltaje: CA 110-240 V 50 / 60HZ

Potencia: 6 W máx. a 110 V

Rango de temperatura detectada: 0 a 1300 °C

Resistencia de aislamiento: > 50M Ohm

Exactitud de medición: 0.5% FS

Ciclo de muestreo: 0.5 segundos

Tamaño de pantalla: DIN 1/16

Peso: 170g Aprox.

##### Control de autoajuste

Capacidad de contacto 250 V CA 3 A (carga resistiva)

Salida de la función de alarma: 2 vías

Rango de temperatura detectada: 0 a 1300 °C

#### Descripción

Paquete incluido

1 Controlador de temperatura REX-C100 PID

1 Sensor de sonda tipo K

1 SSR (Relevador de estado sólido) Máx. 40 A

#### Termopar tipo K

Longitud de conexión: 1 M

Diámetro del sensor: 4.5mm

Temperatura: 0 a 400 °C

Aislamiento interno: fibra de vidrio

### **5.2.4 Lectura y control: Motor [rpm]**

Para el control de velocidades se sugiere el siguiente componente:

#### **Controlador De Velocidad para Motor con interruptor de pantalla digital**



Voltaje de entrada: CD 6 V ~ 30 V

Corriente clasificada: 5 A

Max. Actual: 8 A

Rango de gobierno de velocidad: 0 ~ 100%

Tamaño del regulador: 79 x 42 x 24 mm

#### Descripción

Botón táctil estándar de grado industrial, presione para ingresar al estado inactivo, presione nuevamente para comenzar a trabajar.

Potenciómetro que regula la velocidad del 0-100%

### **5.2.5 Lectura y control: Velocidad de extrusión [cm/s]**

Este control, deberá mostrar la velocidad de extrusión a la que el sistema está operando, parámetro que va de acuerdo con el número de revoluciones a la que está trabajando el motor de la extrusora, debido a que los parámetros en ambos casos son estimaciones, se propone que estos se puedan ajustar en el momento de la extrusión.

El valor de la velocidad angular de cada uno de los motores de las unidades periféricas depende de la velocidad de extrusión, por lo que es necesario sincronizar estos motores, solución que se propone como trabajo a futuro y únicamente se utiliza el mismo control propuesto para el motor de la extrusora con el fin de delimitar dimensiones dentro del panel de control.

Las funciones de ambos sistemas de control de velocidad tendrán un botón de activación y un regulador de la velocidad con su correspondiente pantalla para la visualización de los parámetros. Particularmente para el sistema de embobinado, se sugiere un botón de sincronización, que permita activar esta función en el momento en que el producto extruido cumpla con las condiciones deseadas y se inicie el embobinado. Para esto, se sugiere el siguiente interruptor.

### Interruptor de botón momentáneo Impermeable 12 V con Led

#### Especificaciones



Grado del interruptor: 2 A 36 V  
 Voltaje: 12 V  
 Material: Aluminio  
 Tamaño del agujero: 12 mm  
 Largo: 21.3 mm  
 Ancho: 16 mm  
 Color del LED: Aleatorio

#### Descripción

- Apariencia de alto grado y agradable sensación táctil.
- Tipo momentáneo, empújelo, suéltelo.

## 5.3 Energía eléctrica

La energía eléctrica suministrada a la máquina es CA monofásica. Para conocer el consumo total, se recopiló la información de todos los componentes propuestos (Tabla 5.7):

*Tabla 5.7. Características de la energía eléctrica de alimentación. Fuente: Elaboración propia.*

Tipo	Núm. de piezas	Tipo de corriente	Voltaje [V]	Amperaje [A]	Potencia [W]
Resistencias eléctricas	1	CA	110	0.45	50
Resistencias eléctricas	2	CA	110	0.91	75 – 100
Motor tipo A	1	CD	12	1.2	14.4
– Extrusora					
Ventilador	1	CD	12	0.15	1.8
Motor tipo B	3	CD	12	1.2	14.4
– Tiro					
– Auxiliar					
– Embobinado					
Control de temperatura	3	CA	110	0.05	6
Control de velocidades	2	CD	12	8	96

### 5.3.1 Fuente de alimentación para CD

El sistema requiere de alimentación de corriente alterna y directa, para obtener la corriente directa a 12 V, se recomienda utilizar una fuente de energía que deberá proporcionar una corriente mínima de 20.95 A correspondiente al amperaje de los componentes de CD, proponiendo el siguiente adaptador de fuente de alimentación.

#### Adaptador de fuente de alimentación para CD 12V Especificaciones



Tipo de energía: 12 V 30 A  
 Tamaño: 215 x 115 x 50 mm  
 Peso: 821 g  
 Voltaje de entrada: 110 - 220 V  
 Potencia máxima: 360 W

#### Descripción:

Material de la carcasa: caja de metal / base de aluminio

Protección: Protección contra escasez, Protección contra sobrecarga, Protección contra sobretensión

Ampliamente utilizado en la automatización industrial, pantalla LED, comunicaciones, etc.

### 5.3.2 Centro de carga

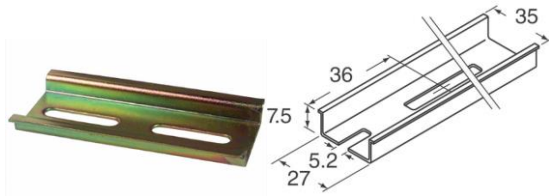
Para la protección de los componentes eléctricos se recomienda el uso de fusibles, en un centro de carga, eligiendo los siguientes componentes para el armado:

#### Clema Portafusible con Indicador Led Fusible Americano WEIDMULLER Especificaciones



Calibre del conductor: 22-8 AWG  
 Clasificación de voltaje: 600 V  
 Clasificación de corriente: 10 A  
 Tamaño de la terminal: 8 x 50.3 x 57 mm  
 Etiqueta: MT8  
 Puentes de 10 polos: CA711/10  
 Tipo de conexión: Ø5 x 20, Ø5 x 25 mm

#### Riel Din para montaje



#### Especificaciones

Riel DIN tipo sombrero  
 Tamaño: 35 x 7.5 mm  
 Acero ranurado  
 Longitud: 2 m  
 Espesor: 1 mm  
 Recubrimiento: Zinc

Se estima el uso de 15 fusibles incluyendo todos los componentes, la fuente de alimentación y un fusible en general.

No se especifica cada fusible, debido a que los componentes aún no han sido definidos totalmente, así como cables ni planos eléctricos, por lo que se requiere de una persona especializada en el área para el armado de los componentes eléctricos.

### 5.3.3 Interruptores para la activación del sistema en general y las resistencias eléctricas

Debido a que la corriente que solicitará el sistema en general aun no es calculada y para uniformizar el panel de control, se recomienda el siguiente modelo de interruptor quedando pendiente utilizar un relevador de estado sólido en caso de que el dispositivo a conectar supere el amperaje recomendado.

#### **Botón con enclavamiento con logo de encendido y apagado** Especificaciones



Voltaje máx.: 250 V CA / 5 A  
 Voltaje máx. del LED: 24 V  
 Resistencia de contacto:  $\leq 50 \text{ M}\Omega$   
 Resistencia de aislamiento:  $\geq 100 \text{ M}\Omega$   
 Vida: 500.000 ciclos+

#### Descripción

LED incorporado  
 Alta calidad

### 5.4 Etapa de conceptualización 3

El proceso de diseño de la extrusora se basó en varias etapas de conceptualización y refinamiento, realizadas durante la definición de los componentes, particularmente en este capítulo se desarrollaron varias modificaciones, por lo que se muestran las primeras ideas de ensambles y soluciones a componentes, que sirvieron de apoyo para las evaluaciones. La Figura 5.1 permite la comparación del proceso de conceptualización elaborado para llegar al prototipo virtual final.

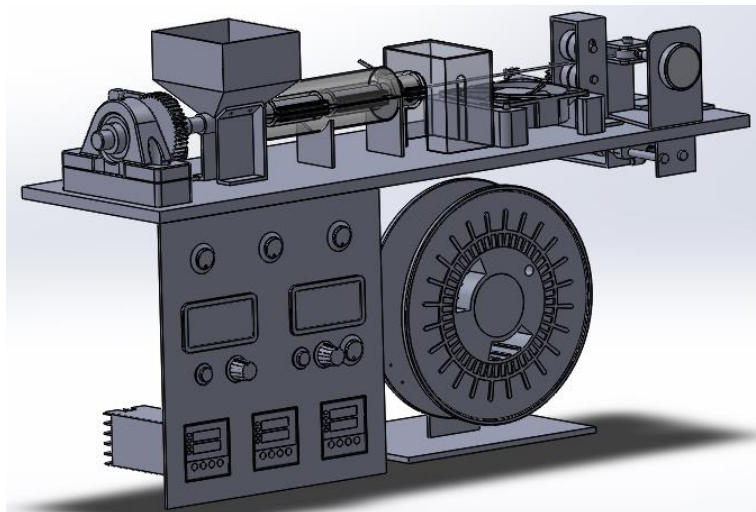


Figura 5.1. Modelo 3D básico. Fuente: Elaboración propia.

### 5.4.1 Evaluación del modelo 3D

Debido a la interacción de diferentes áreas de trabajo, se realizaron evaluaciones de interacción de unidades, manufactura y materiales, así como de la parte eléctrica y de control, mediante asesorías con docentes y técnicos de estas áreas. Debido a la extensión de la etapa de retroalimentación del modelo 3D, solo se abordan los puntos de mayor importancia.

#### Evaluación 1

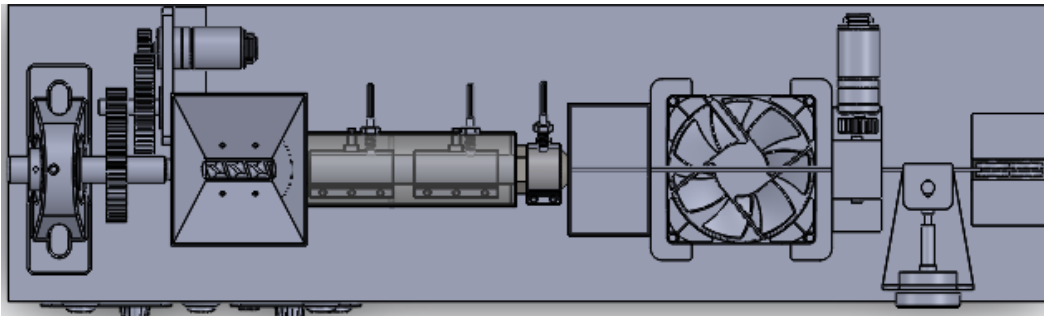


Figura 5.2. Vista superior, modelo 3D básico. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5.2 se detectó que:

- La utilización de motorreductores de diseño propio implica mayor costo de manufactura, así como dimensiones mayores en el ensamblaje.
- Interacción del usuario con el material extruido, en extrusoras caseras el usuario es quien coloca el filamento en cada una de las unidades para que estas cumplan su función, pero existe el riesgo de sufrir quemaduras por el material.
- Enfriamiento del filamento, crear un flujo de aire continuo para extraer el calor del sistema, debido a que éste se encuentra en una carcasa general.
- Precisión en la medición del filamento
- Soportes de motores y componentes, considerar la facilidad de montaje, materiales con proveedores de la región, así como formas simples y esbeltas para disminuir el peso total.

#### Evaluación 2

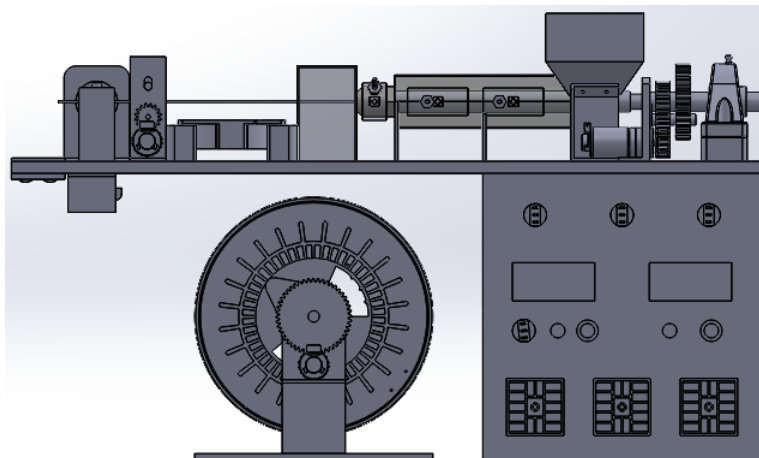


Figura 5.3. Vista posterior, modelo 3D básico. Fuente: Elaboración propia.



De la Figura 5.3 se consideró:

- Armado del panel de control con espacio para ventilación y desensamble de piezas para su mantenimiento.
- Compactación de las unidades periféricas
- Desarrollo de una carcasa general con material ligero y delgado, conforme con las dimensiones de la extrusora en general.

## 5.5 Componentes de ensamble

Estos componentes se determinaron en las últimas etapas de ajustes al modelo 3D básico, por lo que se hace referencia a imágenes de otros modelos 3D.

### 5.5.1 Cojinetes

En la Figura 5.4 se muestra el ensamble de la extrusora, en ella se desarrolla tanto una carga radial por el peso de los componentes y una carga axial por el empuje del material desde la tolva hacia el dado.

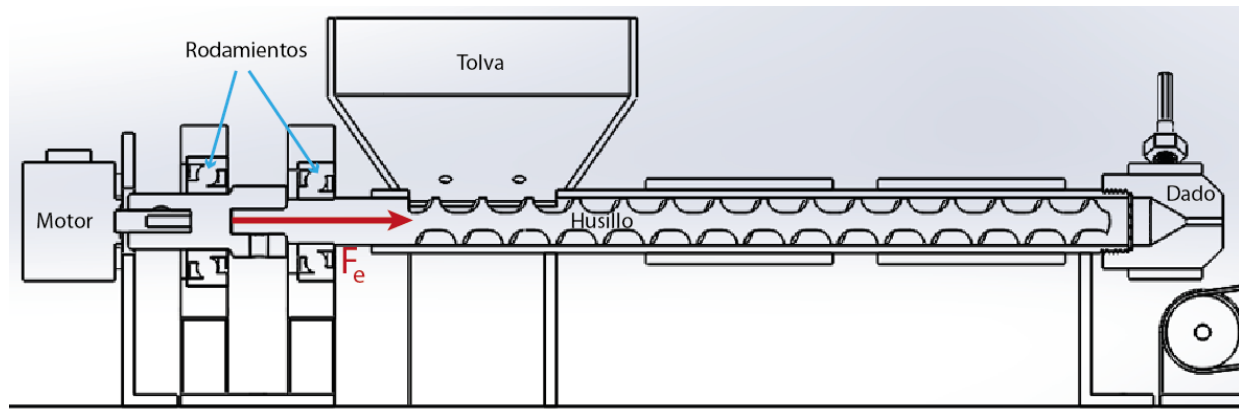


Figura 5.4. Ubicación de la carga axial, extrusora. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los cálculos desarrollados en el capítulo 5, se tiene que la presión máxima en la punta es:

$$P_{\text{máx}} = 75.9 \text{ N/cm}^2$$

Por lo que la carga axial a soportar en los rodamientos es igual a la fuerza de presión aplicada en el área interna del barril, por lo que:

$$F = \frac{P}{A} = \frac{75.9}{1.31} = 57.94 \text{ N}$$

Tomando en cuenta que la fuerza axial es pequeña, se utiliza un criterio general para la selección de los rodamientos.

- El diámetro del eje o cople determinan el diámetro interno del rodamiento y se selecciona el ancho mínimo de los modelos comerciales disponibles.

- Para la selección del tipo de rodamiento, se considera la Figura 5.5.












		Características	
		Carga radial	Carga axial en ambas direcciones
<p>  Aptitud muy buena                 limitada   buena                 no adecuada/no aplicable   normal/aceptable         </p>			
Tipo de rodamiento			
Rodamientos rígidos de bolas			
Rodamientos de bolas de contacto angular			 ↑

Figura 5.5. Tipos de rodamientos y sus características. Fuente: (FAG, 2000).

Por lo que se proponen rodamientos rígidos de bolas, únicamente para cargas radiales, y en el caso de los rodamientos de la extrusora se consideran rodamientos de bolas de contacto angular que son recomendados para cargas axiales.

### 5.5.2 Soportes de componentes

Las dimensiones y el material utilizado para cada soporte fueron definidos por el área de contacto para tener estabilidad con la base de la carcasa y con el componente que sostiene, considerando los materiales que se pueden conseguir en la región y sus dimensiones, sin realizar cálculos a profundidad de las cargas a las que está sometido cada soporte, esto debido a que la extrusora tiene dimensiones generales menores a 50 cm.

La elección de tornillería es igualmente de acuerdo a la experiencia en el manejo de materiales similares y ensambles, ya que los esfuerzos son pequeños.

### 5.5.3 Abrazaderas tipo uña

Debido a que los motores tipo B, no tienen carcasa para su fijación, se propone el uso de abrazaderas tipo uña, con las siguientes especificaciones:

#### Abrazadera tipo uña

#### Especificaciones



Medida: 1"  
Espesor 1.2 mm

## 5.6 Ajustes a componentes. Unidad de tiro

Dentro de los cambios, el más evidente se presentó en la unidad de tiro, en donde de proponer inicialmente un par de rodillos, se modificó a un sistema de transporte por banda y a un par de rodillos que funcionan como calibradores (Figura 5.6).

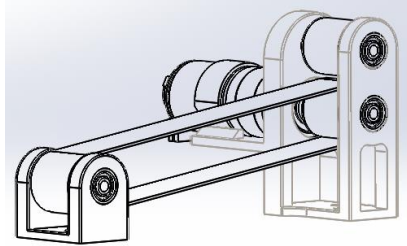


Figura 5.6. Modificación a la unidad de tiro. Fuente: Elaboración propia.

### 5.6.1 Velocidad angular del rodillo

Los rodillos elegidos son de superficie continua (sin canal), y con un radio de 1cm, teniendo entonces que la nueva velocidad angular es:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{3.33}{1} = 3.33 \text{ rad/s} = 37.80 \text{ rpm}$$

Debido a los bajos esfuerzos que se presentan en el proceso como se demostró en los cálculos del torque en el apartado 4.2.12, no se considera de gran relevancia los ajustes a estos parámetros, ya que los motores elegidos trabajan con valores superiores.

### 5.6.2 Banda transportadora

La banda transportadora que se propone tiene la función de transportar el material fundido desde la boquilla a la unidad de tiro y medición, para que el usuario no sufra alguna quemadura por contacto con el material fundido.

Considerando que el ventilador estará extrayendo el calor del interior, se estima una temperatura de trabajo entre 150 a 200°C, con una carga de material de 6 a 10 g al inicio del proceso o cuando se realicen pruebas a nuevos materiales.

Por otra parte, el material caliente transportado puede fácilmente dañar la banda transportadora. Por lo que, para prevenir posibles daños se recomienda el uso de bandas transportadoras con el siguiente grado de resistencia:

- Grado “RC 200” para periodos prolongados 150°C y periodos cortos de 200°C máximo fabricadas a base de caucho sintético. (*Vulcanizados Ruiz, 2017*):

Con ello se concluyen las especificaciones de los componentes de la extrusora para poder armar el prototipo virtual.

## Capítulo 6 Prototipo virtual

---

El modelo 3D o prototipo virtual de la extrusora, es el resultado de las investigaciones, análisis de información, cálculos realizados y evaluación de los datos generados, presentado en los capítulos anteriores.

Este capítulo, es dedicado a mostrar a la extrusora con apoyo de una serie de láminas de presentación de producto, planos y lista de componentes a comprar y manufacturar.

Debido a la cantidad de componentes, los planos únicamente son a nivel de unidades con el fin de mostrar los componentes y el funcionamiento general.

A continuación, se muestra la información del prototipo virtual elaborado:

### **ESPECIFICACIONES DEL PRODUCTO:**

**Marca:** FILAMIX

**Dimensiones:** 50 cm x 37.1 cm x 21.7 cm

**Peso:** 24.150 kg

**\*Precio:** 7400.00

#### **Fuente de alimentación**

[Estimado]

**Voltaje:** 110/120 V

**Frecuencia:** 50/60 Hz

**Consumo:** 5.69 A

**Potencia:** 625.9 W

**Material por procesar:** PP reciclado

**Triturado:** Tamaño máx. de 4 mm

**Acondicionamiento previo:** Clasificado por tipo de fibra y color. No necesita lavado ni secado.

# FILAMIX

Precio \*7400.00 MXN



## EXTRUSORA PP reciclado

Peso: 24.150 kg  
Dimensiones: 50 cm x 37.1 cm x 21.7 cm  
Consumo de energía: 626 W





# FILAMIX



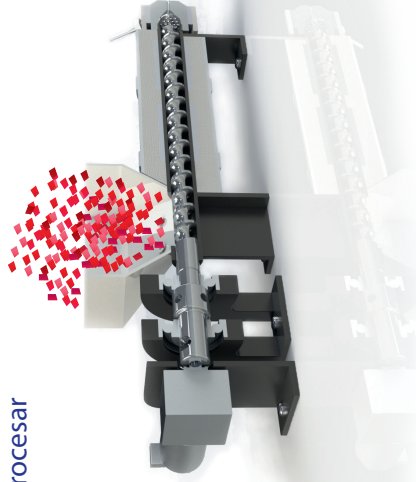
Cable independiente para almacenamiento sencillo



Ranuras de enfriamiento

Tolva con tapa para evitar la entrada de impurezas

Diseño de componentes con base en el material a procesar



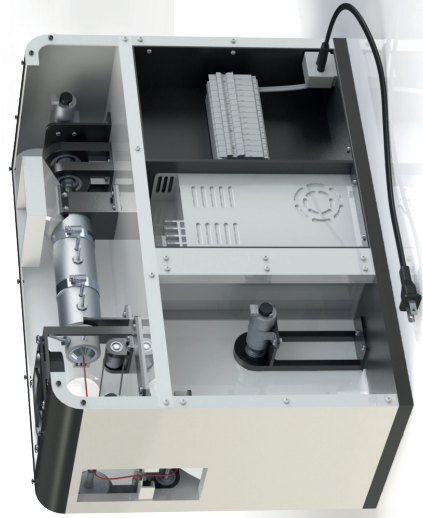
Observa la salida del filamento



Panel de control para adecuar los parámetros de extrusión

Observa al filamento embobinarse

Desensamble de carcasa para mantenimiento



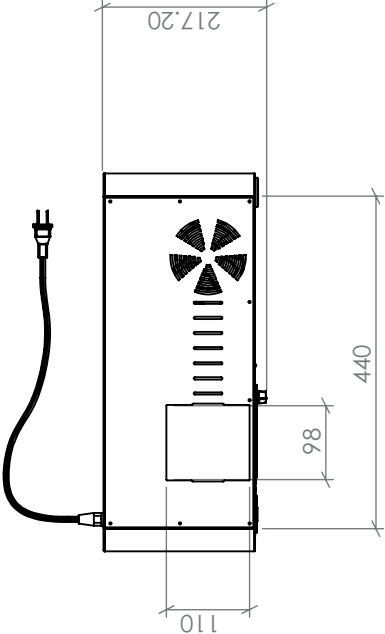
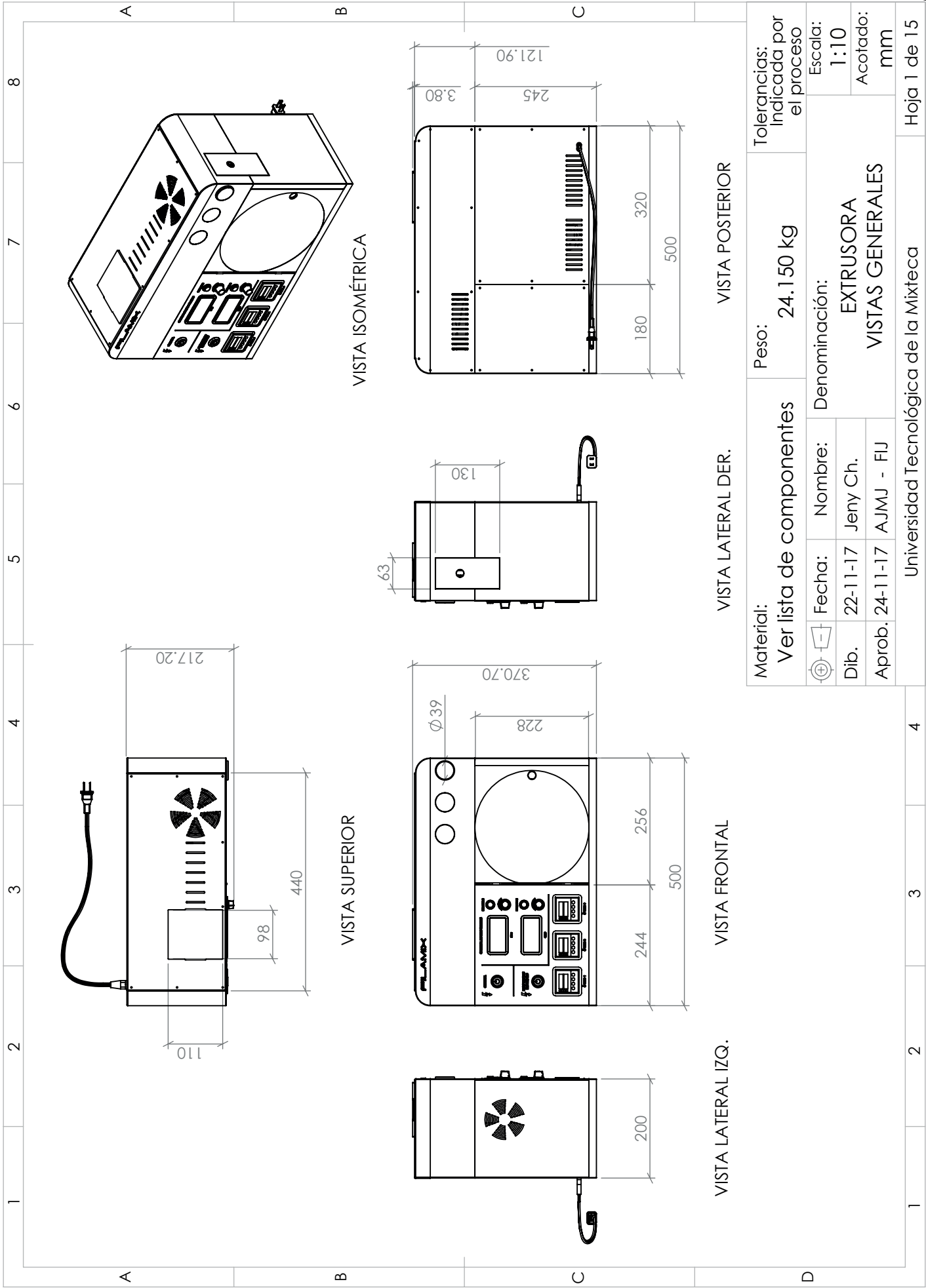
Apertura para eliminar el filamento defectuoso



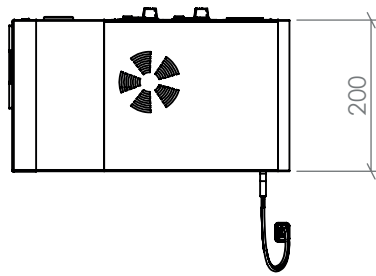
## Diseño compacto



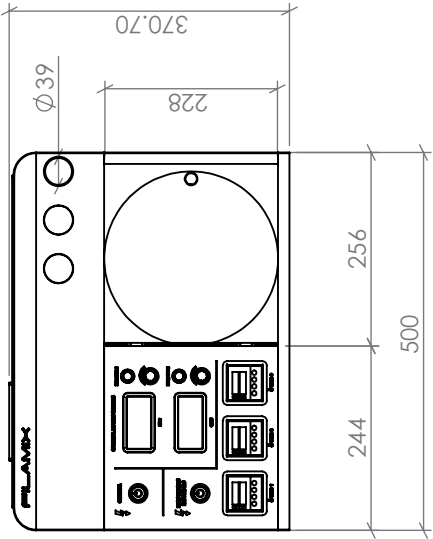




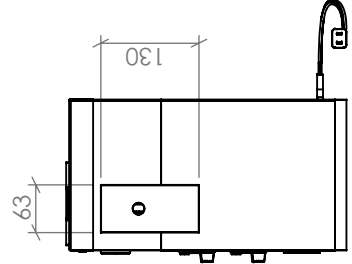
VISTA SUPERIOR



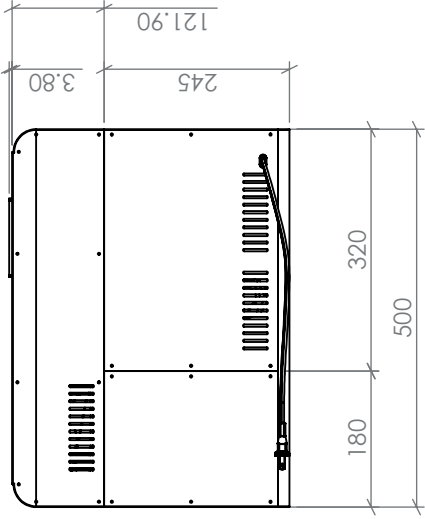
VISTA LATERAL IZQ.



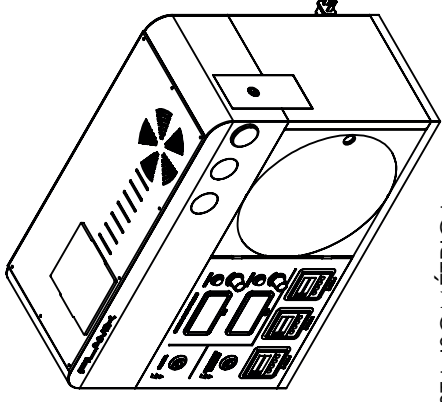
VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL DER.

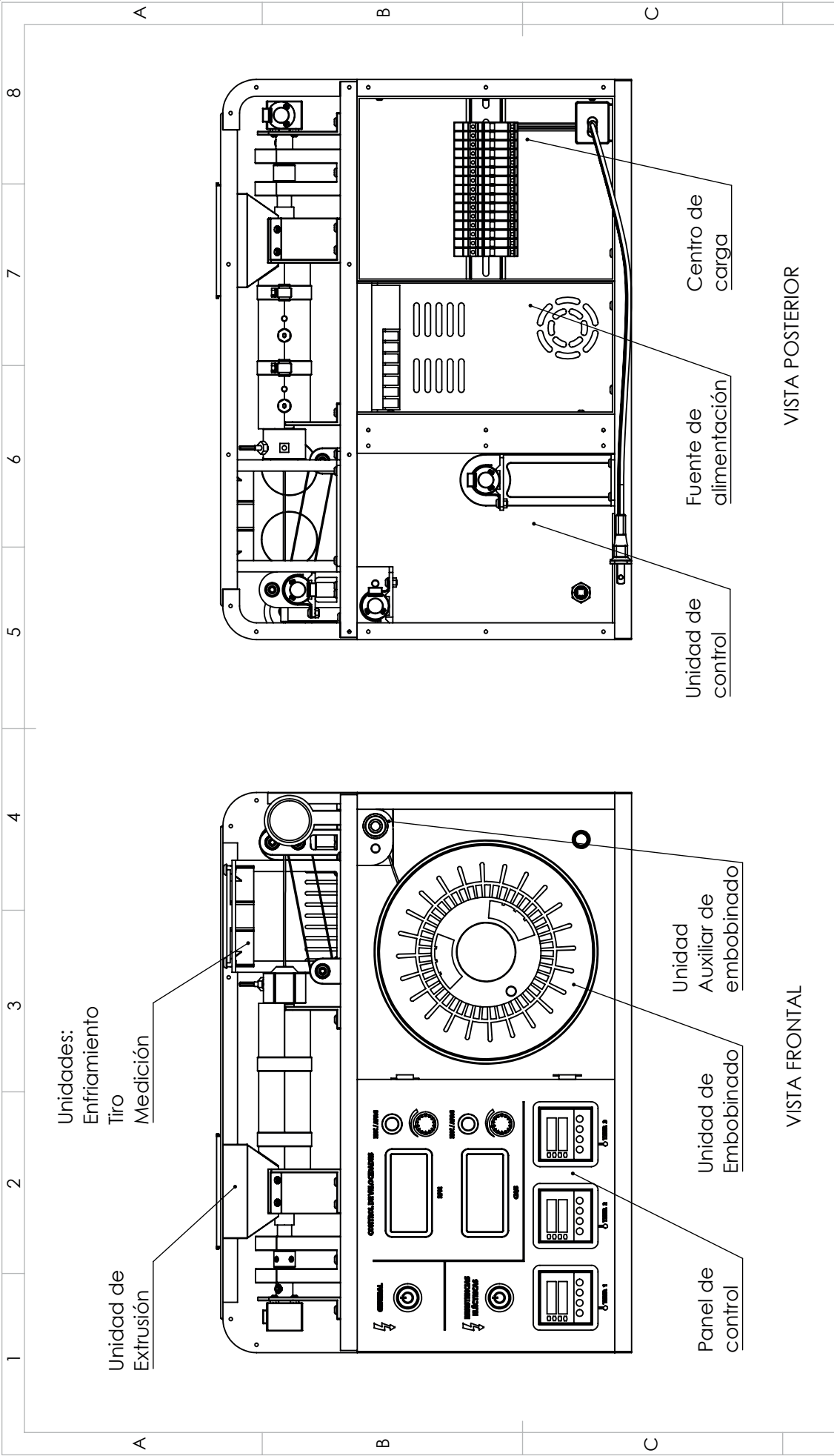


VISTA POSTERIOR



VISTA ISOMÉTRICA

Material: Ver lista de componentes		Peso: 24.150 kg		Tolerancias: Indicada por el proceso	
Fecha: 22-11-17	Nombre: Jeny Ch.	Denominación: EXTRUSORA VISTAS GENERALES		Escala: 1:10	Acotado: mm
Aprob.: 24-11-17 AJMJ - FIJ				Hoja 1 de 15	



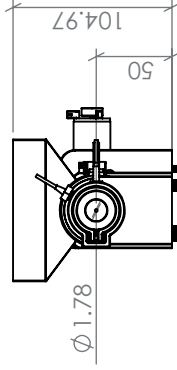
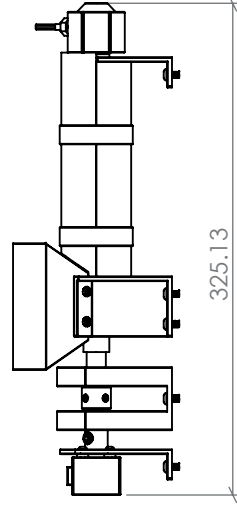
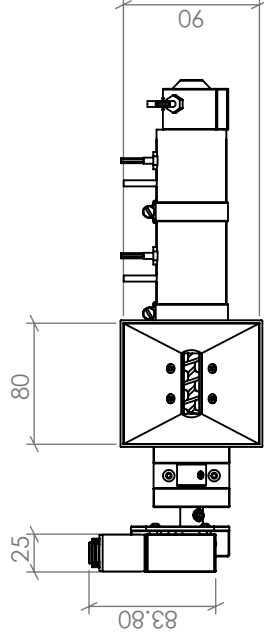
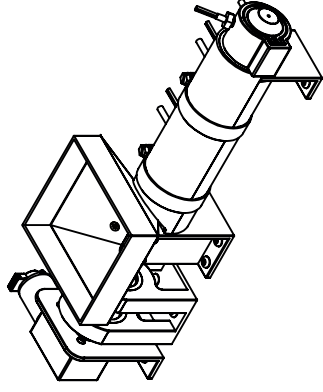
VISTA FRONTAL

VISTA POSTERIOR

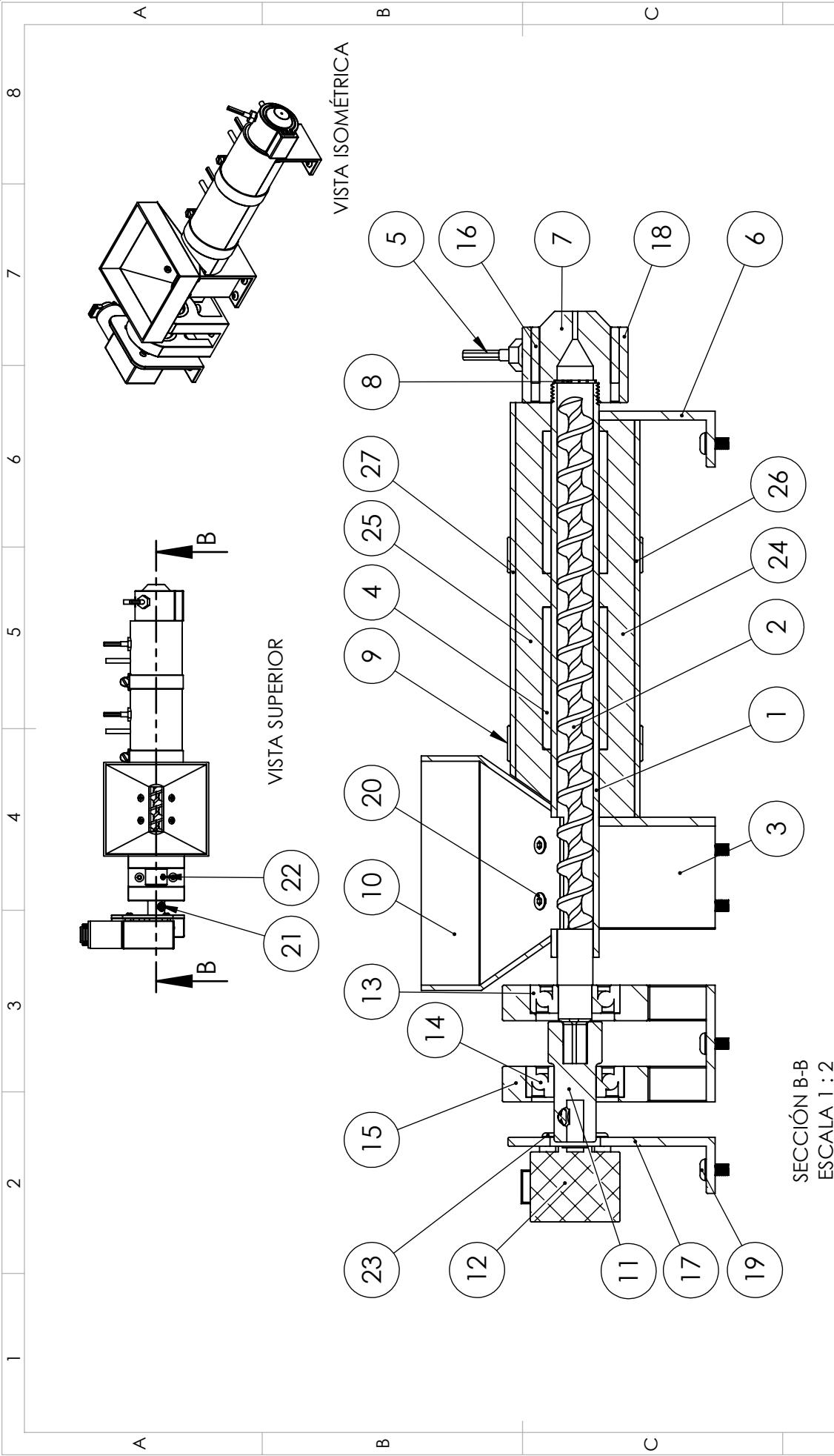
Material: Ver lista de componentes		Peso: 24.150 kg		Tolerancias: Indicada por el proceso	
Fecha:	Nombre:	Denominación:		Escala:	
22-11-17	Jeny Ch.	UBICACIÓN DE UNIDADES		1:5	
Aprob. 24-11-17	AJMJ - FIJ	VISTAS GENERALES		Acotado: mm	
Universidad Tecnológica de la Mixteca				Hoja 2 de 15	

**TABLA DE COMPONENTES**  
(Referencia a Hoja 4)

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	a_Barril	1
2	a_Husillo	1
3	a_Soporte_V	1
4	a_Resistencia tipo banda 1	2
5	a_Termopar	3
6	a_Soporte L para Barril	1
7	a_Dado	1
8	a_Placa rompedora	1
9	a_Abrazadera para aislante	2
10	a_Tolva	1
11	a_Cople H-V	1
12	a_Motor tipo A	1
13	a_Rodamiento-12	1
14	a_Rodamiento-15	1
15	a_Soporte Rodamientos	1
16	a_Resistencia tipo banda 2_Dado	1
17	a_Soporte L para Motor	1
18	a_Aislante dado	1
19	a_T allen M4-07_8	10
20	a_T allen M3-05_10 Con tuerca	4
21	a_Opresor M8-125_8	1
22	a_Opresor M5-08_6	2
23	a_T allen M3-05_8	4
24	a_Aislante inferior	1
25	a_Aislante superior	1
26	a_Cubierta inferior	1
27	a_Cubierta superior	1



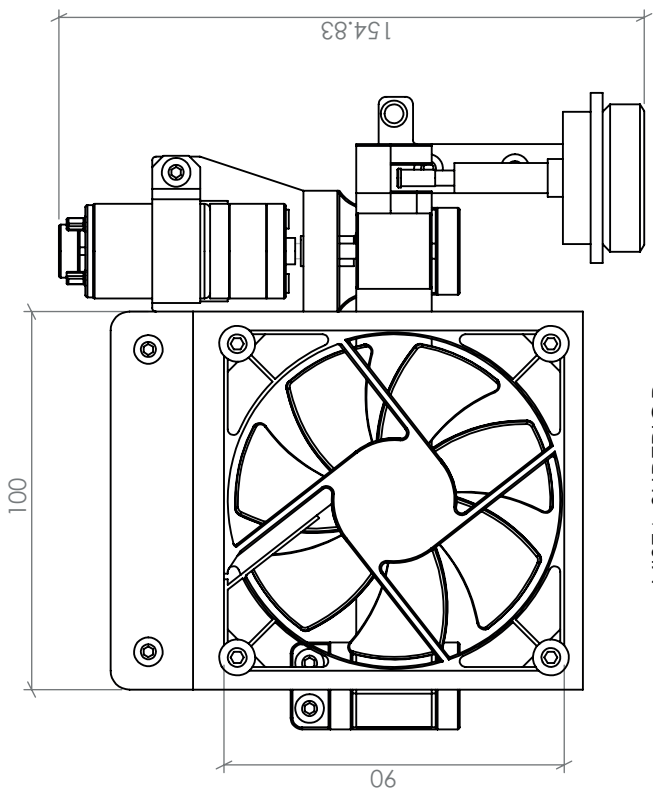
<b>Material:</b> Ver lista de componentes	<b>Peso:</b> 2.760 kg	<b>Tolerancias:</b> Indicada por el proceso
<b>Fecha:</b> 22-11-17	<b>Nombre:</b> Jeny Ch.	<b>Escala:</b> 1:5
<b>Aprob.:</b> 24-11-17	<b>Denominación:</b> UNIDAD DE EXTRUSIÓN VISTAS GENERALES	<b>Acotado:</b> mm
Universidad Tecnológica de la Mixteca		Hoja 3 de 15



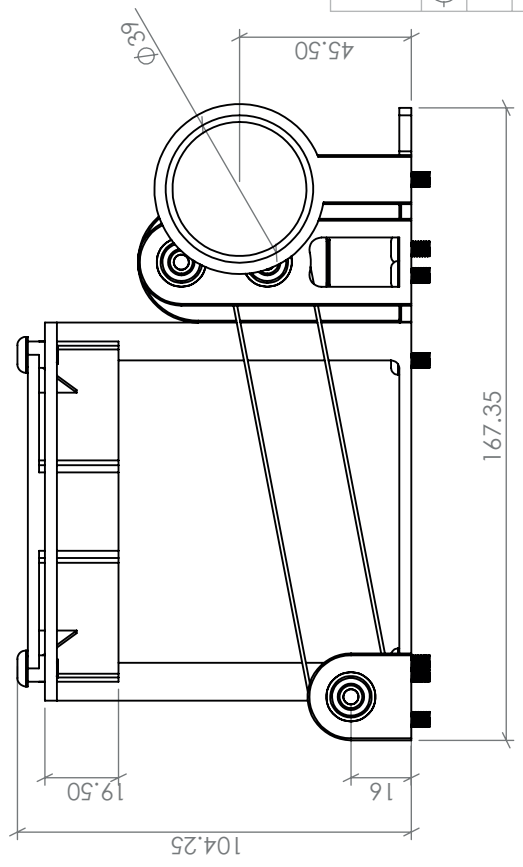
Material: Ver lista de componentes	Peso: 2.760 kg	Tolerancias: Indicada por el proceso	
		Escala: 1:5	
Fecha: 22-11-17	Nombre: Jeny Ch.	Denominación: UNIDAD DE EXTRUSIÓN DESPIECE	
Dib. Aprob. 24-11-17	AJMJ - FIJ		
Aprob. 24-11-17		Acotado: mm	
Universidad Tecnológica de la Mixteca		Hoja 4 de 15	

TABLA DE COMPONENTES  
(Referencia a Hoja 6)

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	b_Soporte rodamiento_1	1
2	b_Soporte rodamiento_2	1
3	b_Eje rod_1	1
4	b_Eje rod_2	1
5	b_Rodamiento-4	5
6	b_Rodillo-1	3
7	b_Motor tipo B	1
8	b_Carcasa_ventilador	1
9	b_Helices	1
10	b_Banda	1
11	b_Soporte ventilador	1
12	b_Indicador de caratula	1
13	b_Vastago de Indicador	1
14	b_Eje rod_3	1
15	b_Rodamiento-8	1
16	b_Abrazadera tipo uña	1
17	b_Cople E-M	1
18	b_Soporte medicion	1
19	b_T allen M4-07 8	8
20	b_T allen M5-08_8	4
21	b_T allen M4-07 8 - tuerca	1

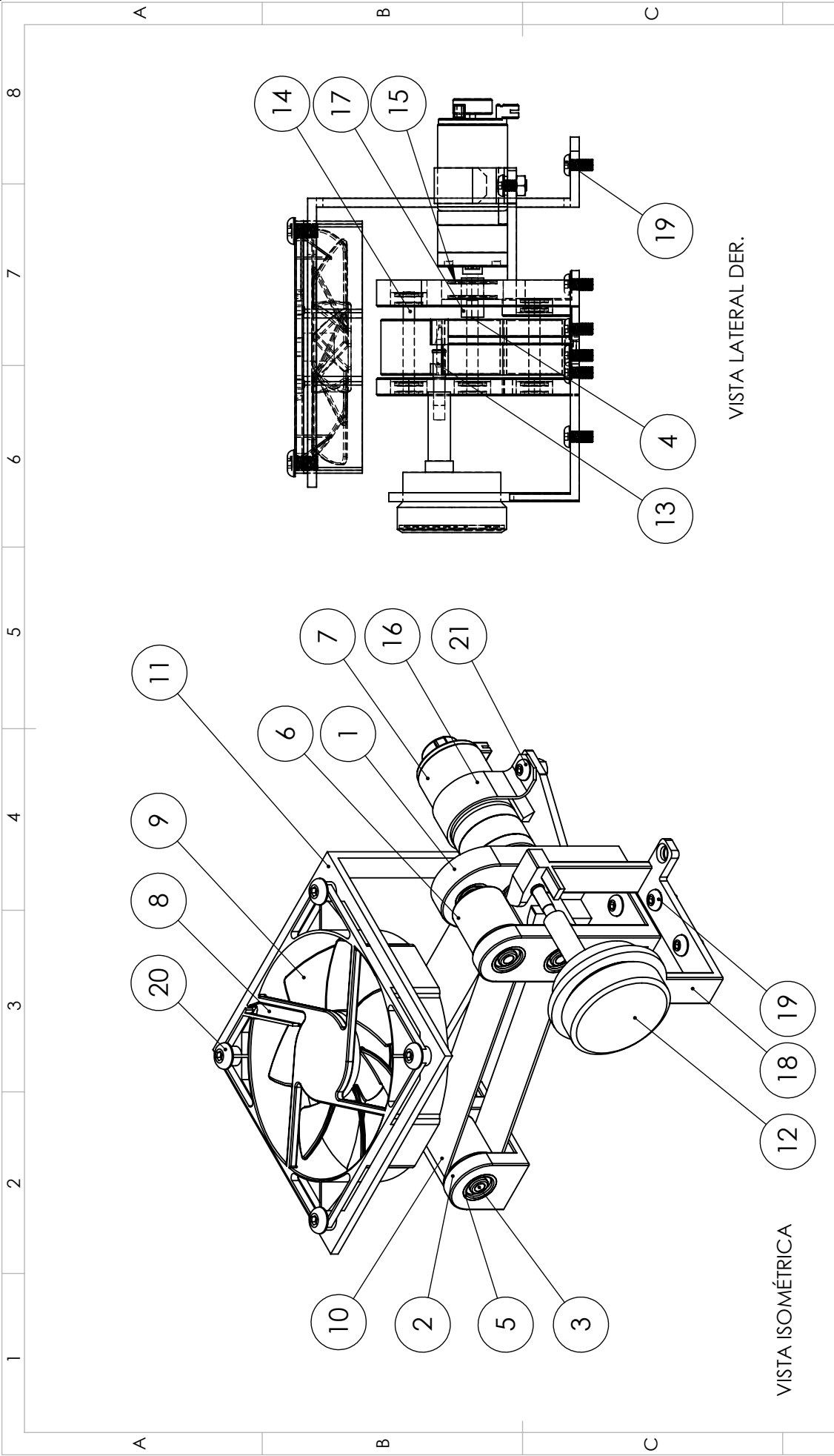


VISTA SUPERIOR



VISTA FRONTAL

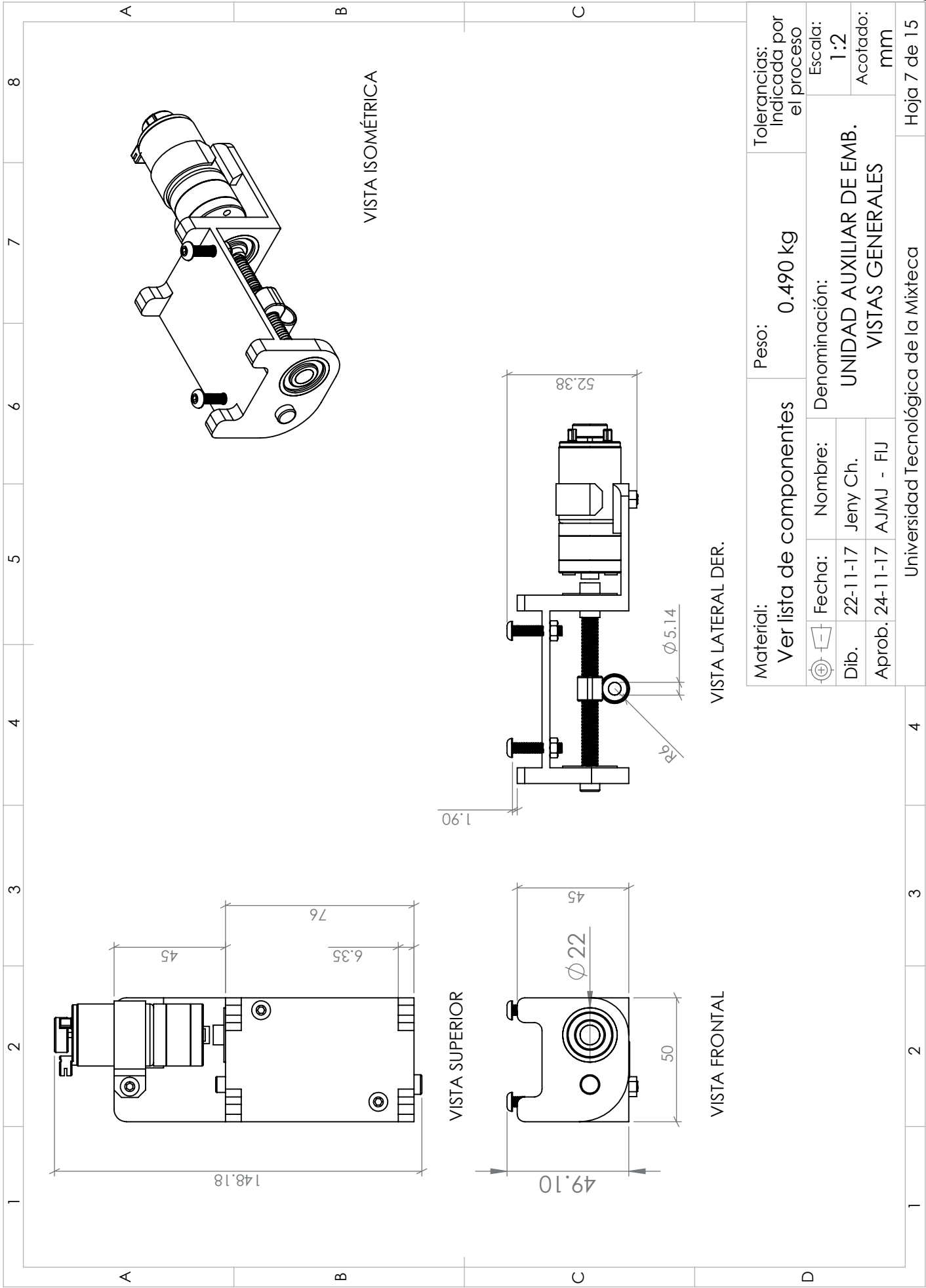
<b>Material:</b> Ver lista de componentes	<b>Peso:</b> 0.950 kg	<b>Tolerancias:</b> Indicada por el proceso
<b>Fecha:</b> 22-11-17	<b>Nombre:</b> Jeny Ch.	<b>Escala:</b> 1:2
<b>Dib.:</b> 22-11-17	<b>Denominación:</b> UNIDADES ENF-TIRO-MED	<b>Acotado:</b> mm
<b>Aprob.:</b> 24-11-17	<b>VISTAS GENERALES</b>	
Universidad Tecnológica de la Mixteca		Hoja 5 de 15



VISTA ISOMÉTRICA

VISTA LATERAL DER.

Material: Ver lista de componentes	Peso:	0.950 kg	Tolerancias: Indicada por el proceso
	Fecha:	Denominación:	Escala:
	Dib.	UNIDADES ENF-TIRO-MED	1:2
	Aprob.	DESPIECE	Acotado: mm
Universidad Tecnológica de la Mixteca			Hoja 6 de 15

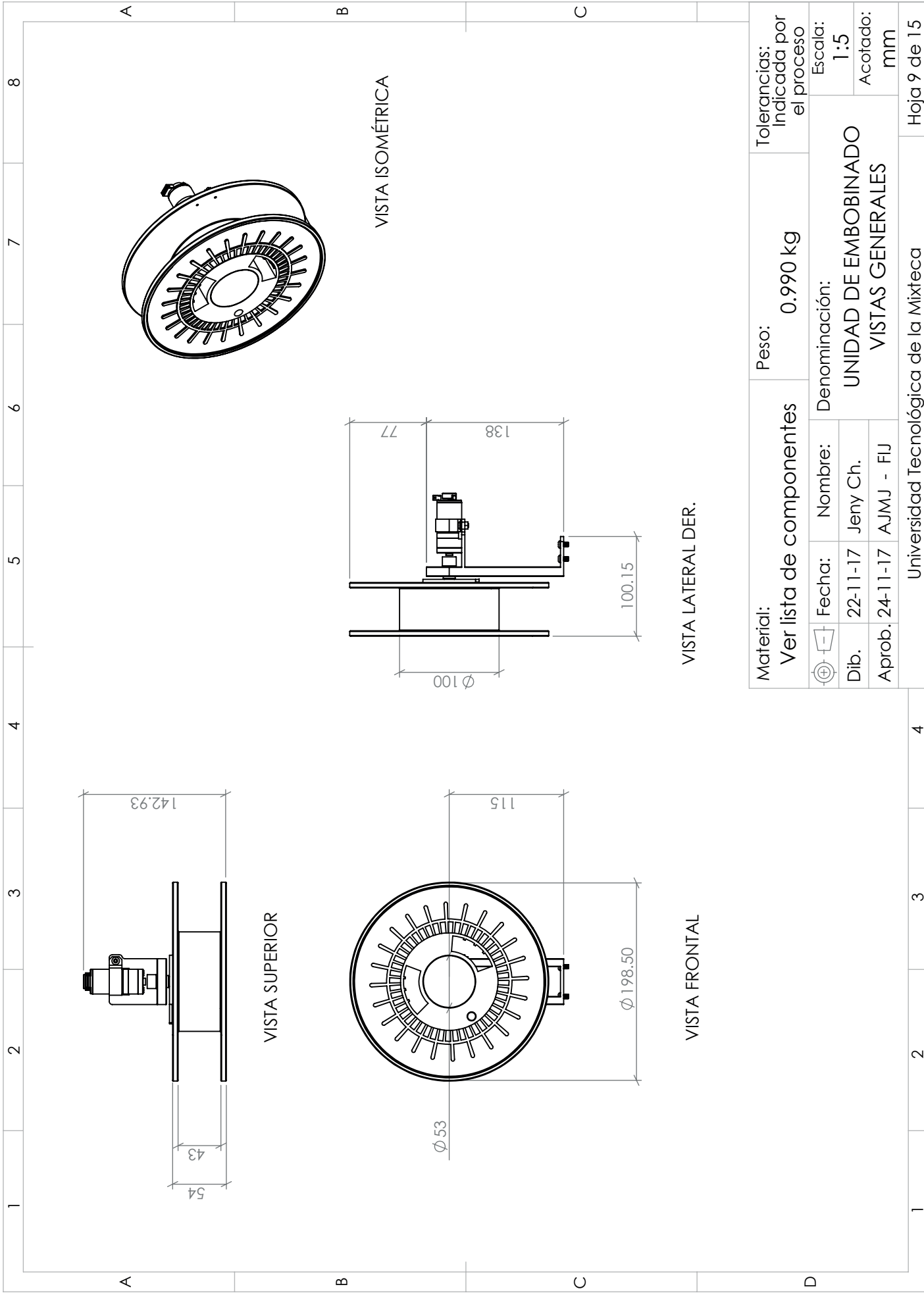


<b>Material:</b> Ver lista de componentes		<b>Peso:</b> 0.490 kg		<b>Tolerancias:</b> Indicada por el proceso	
<b>Fecha:</b> 22-11-17	<b>Nombre:</b> Jeny Ch.	<b>Denominación:</b> UNIDAD AUXILIAR DE EMB. VISTAS GENERALES		<b>Escala:</b> 1:2	<b>Acotado:</b> mm
<b>Aprob.:</b> 24-11-17 AJMJ - FIJ		<b>Hoja 7 de 15</b>			

Universidad Tecnológica de la Mixteca



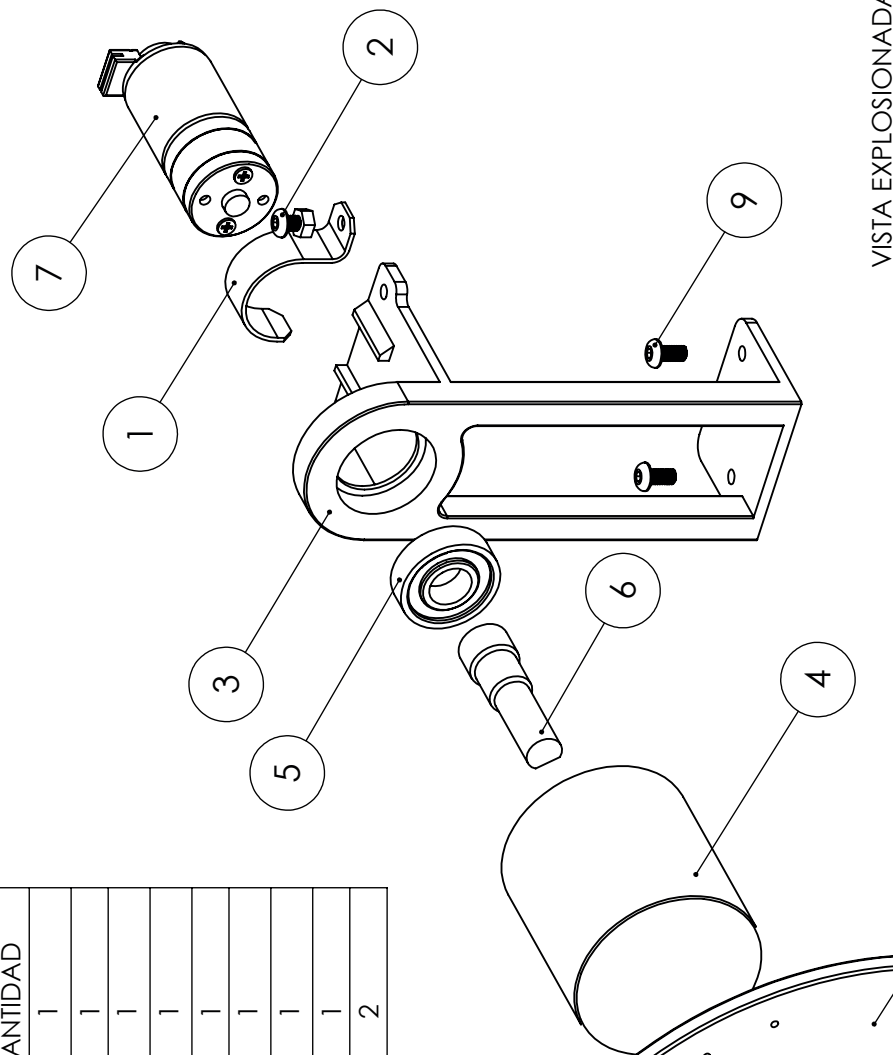




Material: Ver lista de componentes		Peso: 0.990 kg		Tolerancias: Indicada por el proceso	
Fecha: 22-11-17		Nombre: Jeny Ch.		Escala: 1:5	
Aprob.: 24-11-17		Denominación: UNIDAD DE EMBOBINADO VISTAS GENERALES		Acotado: mm	
AJMJ - FIJ		Universidad Tecnológica de la Mixteca		Hoja 9 de 15	

TABLA DE COMPONENTES

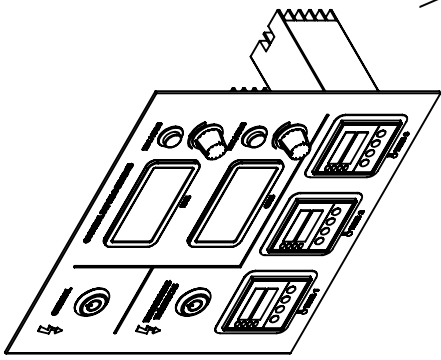
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	c_Abrazadera tipo uña	1
2	c_T allen M4-07 8 - tuerca	1
3	c-SopORTE embobinado	1
4	c_SopORTE bobina	1
5	c_Rodamiento-12	1
6	c_Cople B-M	1
7	c_B-Motor tipo B	1
8	c_Bobina	1
9	c_T allen M4-07 8	2



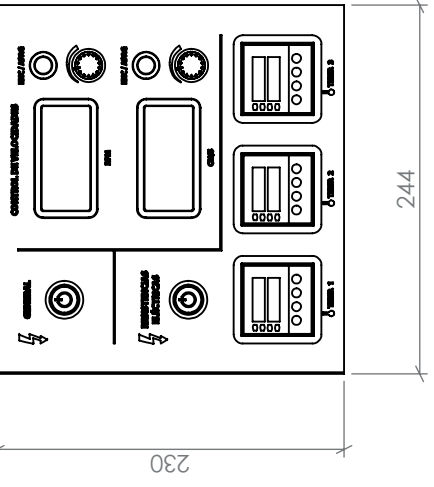
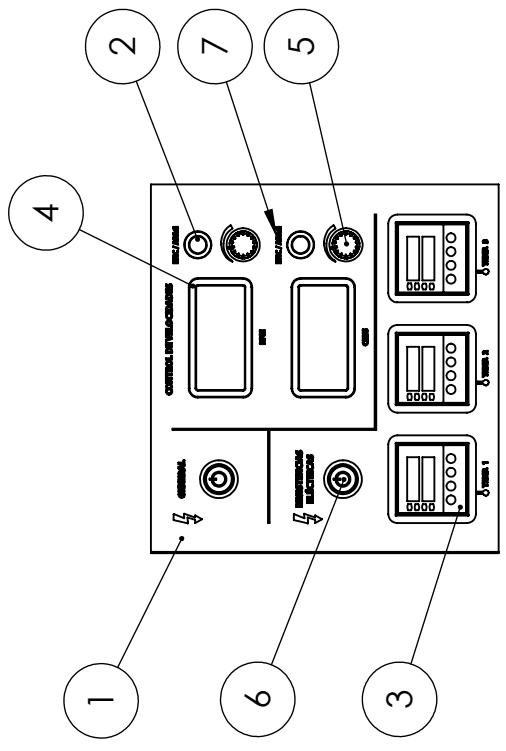
VISTA EXPLOSIONADA

Material: Ver lista de componentes		Peso: 0.990 kg		Tolerancias: Indicada por el proceso	
Fecha: 22-11-17	Nombre: Jeny Ch.	Denominación: UNIDAD DE EMBOBINADO		Escala: 1:2	
Dib. Aprob. 24-11-17		AJMJ - FIJ		Acotado: mm	
Universidad Tecnológica de la Mixteca				Hoja 10 de 15	

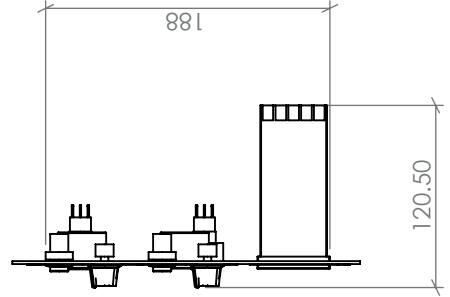
1 2 3 4 5 6 7 8



VISTA ISOMÉTRICA



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL DER.

VISTA FRONTAL

TABLA DE COMPONENTES

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	d_Carcasa panel de control	1
2	d_Boton encendido_CV	2
3	d_Control temp	3
4	d_Control velocidades	2
5	d_Boton vel	2
6	d_Boton enc-apag	2
7	d_Rotulado	1

Material: Ver lista de componentes	Peso: 1.400 kg		Tolerancias: Indicada por el proceso	
	Fecha: 22-11-17	Nombre: Jeny Ch.	Denominación: PANEL DE CONTROL VISTAS Y DESPIECE	Escala: 1:5
Dib. 22-11-17	Aprob. 24-11-17	AJMJ - FIJ	Acotado: mm	
Universidad Tecnológica de la Mixteca			Hoja 11 de 15	

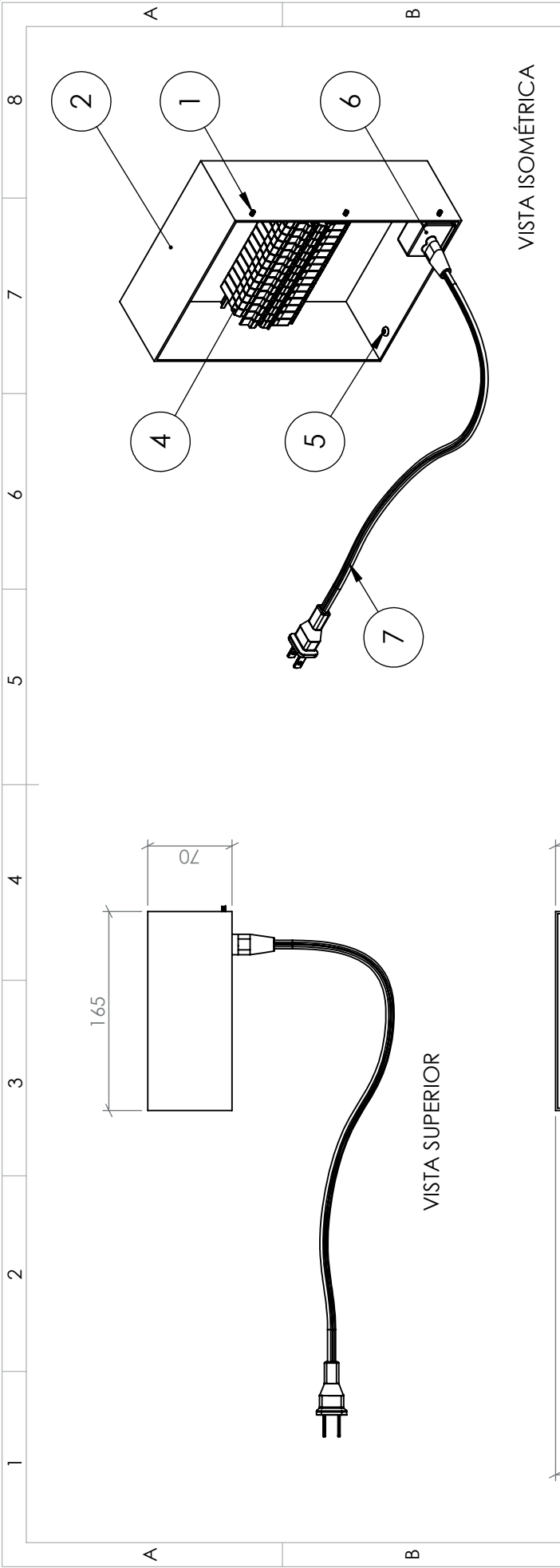
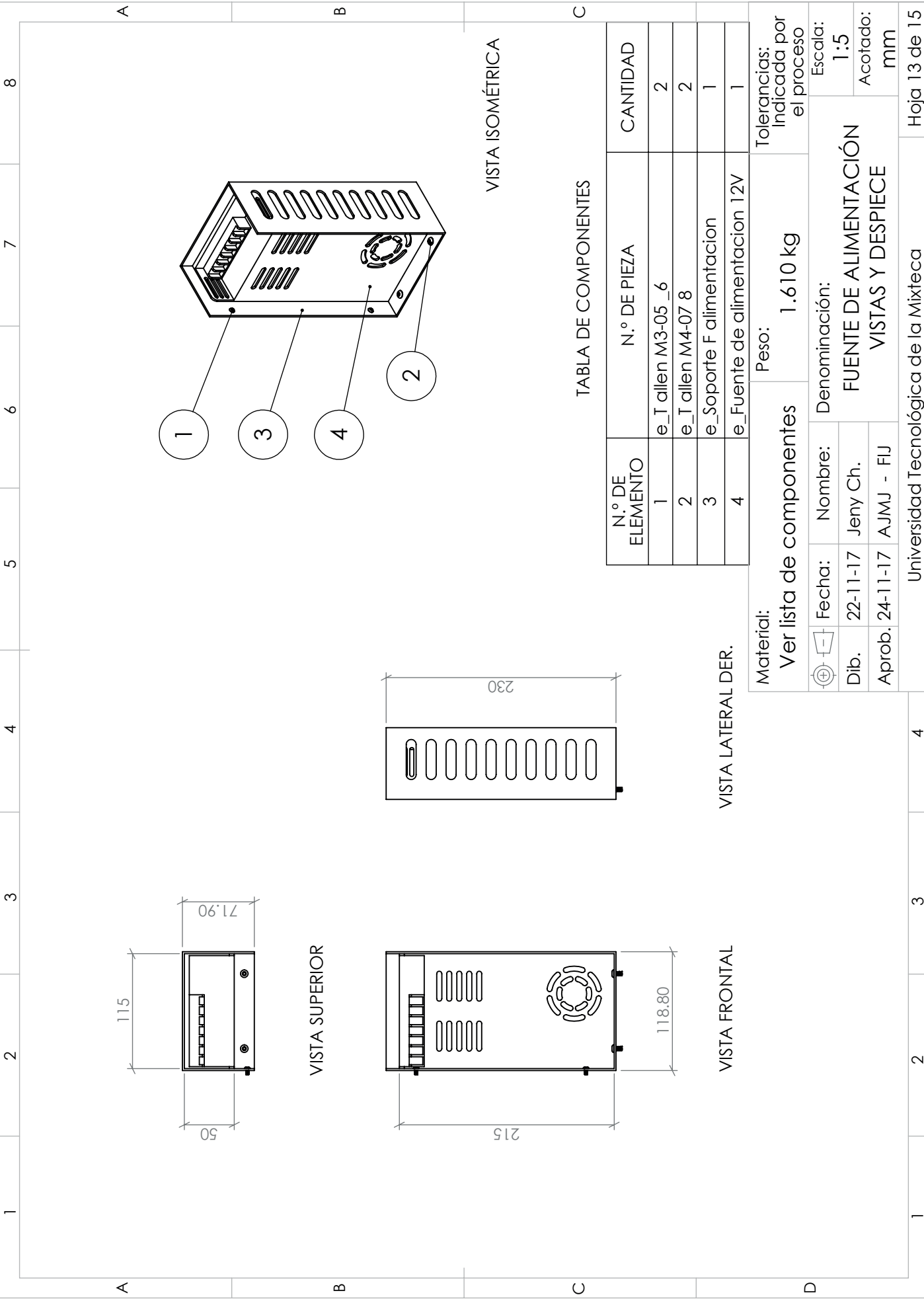


TABLA DE COMPONENTES

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	e_T allen M3-05_6	3
2	e-Caja-fus	1
3	e_Riel DIN-Ranurado	1
4	e_Portafusible_ Weicmuller	15
5	e_T allen M4-07 8	2
6	e_Cable 1	1
7	e_Cable 2	1

VISTA FRONTAL

Material: Ver lista de componentes		Peso: 1.665 kg		Tolerancias: Indicada por el proceso	
Fecha: 22-11-17	Nombre: Jeny Ch.	Denominación: CENTRO DE CARGA VISTAS Y DESPIECE		Escala: 1:5	
Aprob. 24-11-17	AJMJ - FIJ	Universidad Tecnológica de la Mixteca		Acotado: mm	
			Hoja 12 de 15		



VISTA ISOMÉTRICA

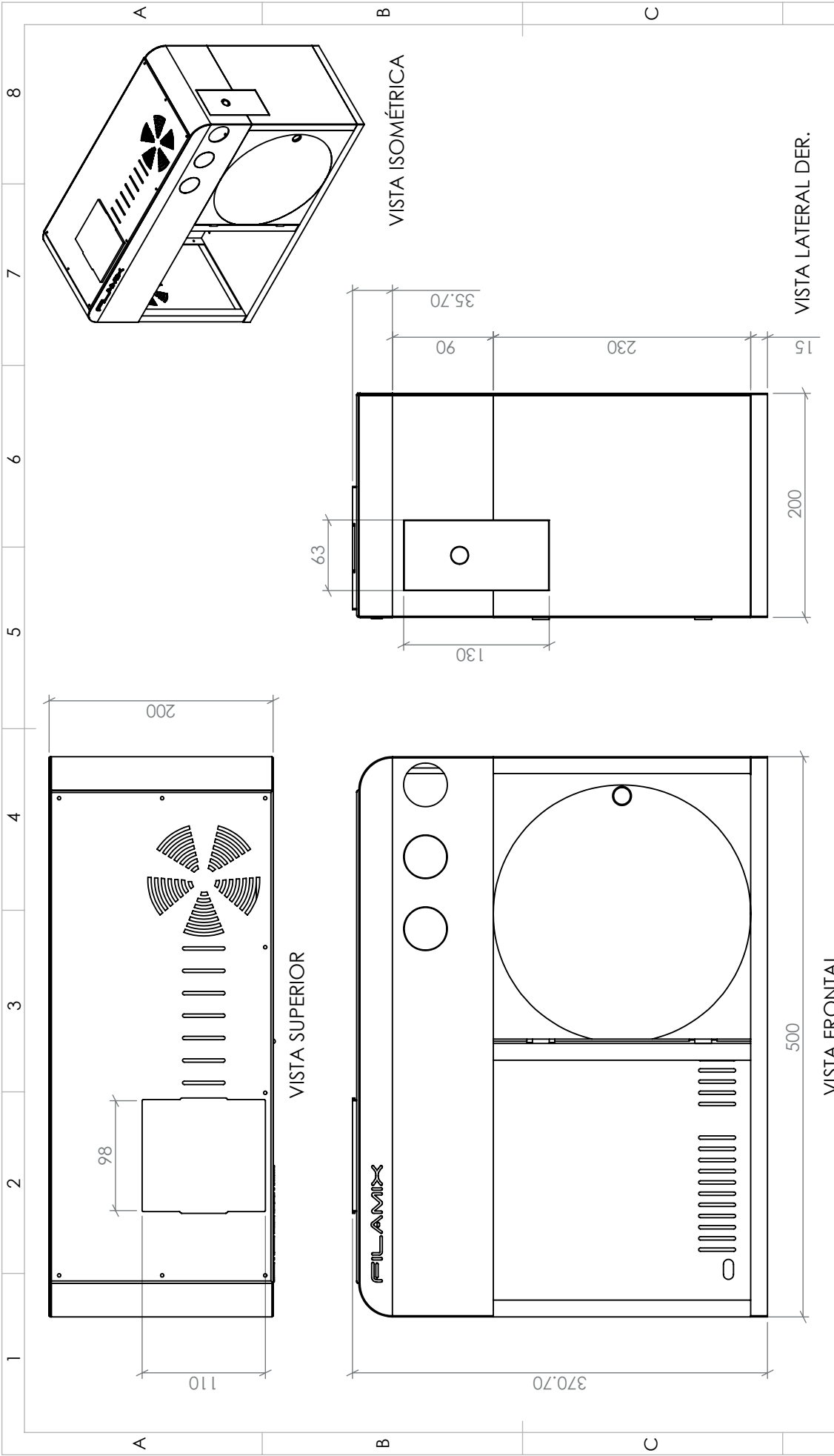
TABLA DE COMPONENTES

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	e_T allen M3-05 _6	2
2	e_T allen M4-07 8	2
3	e_Soporte F alimentacion	1
4	e_Fuente de alimentacion 12V	1

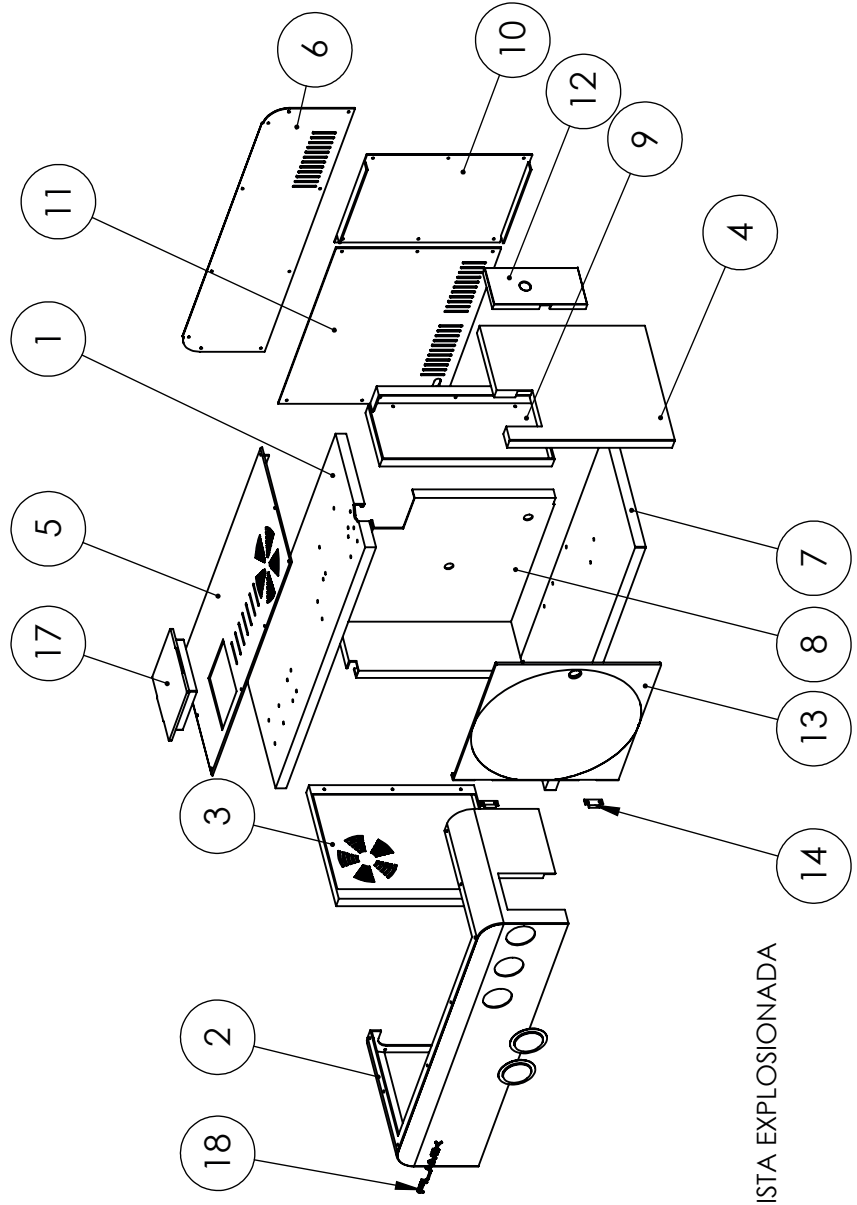
Material: Ver lista de componentes		Peso: 1.610 kg		Tolerancias: Indicada por el proceso	
Fecha: 22-11-17	Nombre: Jeny Ch.	Denominación: FUENTE DE ALIMENTACIÓN VISTAS Y DESPIECE		Escala: 1:5	Acotado: mm
Aprob.: 24-11-17	AJMJ - FIJ	Universidad Tecnológica de la Mixteca		Hoja 13 de 15	

VISTA LATERAL DER.

VISTA FRONTAL



Material: Ver lista de componentes	Peso: 14.265 kg		Tolerancias: Indicada por el proceso	
	Fecha: 22-11-17	Nombre: Jeny Ch.	Denominación: CARCASA VISTAS GENERALES	
Dib.	Aprob.		Escala: 1:5	Acotado: mm
24-11-17		AJMJ - FIJ		Hoja 14 de 15
Universidad Tecnológica de la Mixteca				



VISTA EXPLOSIONADA

TABLA DE COMPONENTES

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	e_Base	1
2	e_Frente	1
3	e_Soporte-izq	1
4	e_Soporte-der	1
5	e_Superior	1
6	e_Posterior-1	1
7	e_Base inferior	1
8	e_Division bobina	1
9	e_Soporte medio	1
10	e-Tapa control	1
11	e-Tapa electrico	1
12	e_Tapa lateral	1
13	e_Puerta acrilico	1
14	e_Bisagra A	2
15	e_Mirilla	2
16	e_T allen M3-05_6	30
17	e-Tapa extrusora	1
18	e_Logo_1	1

Material: Ver lista de componentes	Peso:	14.265 kg	Tolerancias: Indicada por el proceso
	Escala:	1:10	
Dib. 22-11-17 Aprob. 24-11-17	Nombre: Jeny Ch. AJMJ - FIJ	Denominación: CARCASA DESPIECE	
Universidad Tecnológica de la Mixteca			Hoja 15 de 15

### 6.3 Lista de componentes estándares a comprar

De las piezas mostradas en los planos, se hizo un vaciado de datos en la siguiente tabla, eligiendo únicamente los componentes estándares a comprar, con el fin de mostrar una aproximación del costo final de la extrusora e incluyendo los proveedores con los que se realizó la cotización de cada uno de ellos (Tabla 6.1).

Tabla 6.1. Lista de componentes estándares a comprar. Fuente: Elaboración propia.

Nº	Pieza	Descripción	Cant	Precio x unidad	Total	Proveedor
1	A_ Resistencia tipo banda I	Resistencias eléctricas tipo banda 75-100 W	2	200.00	400.00	www.mercadolibre.com
2	A_ Termopar	Termopar tipo K, de conexión tornillo estándar	3	Incluido CT.	-	-
3	a_ Abrazadera para aislante	Abrazadera reforzada de acero inoxidable AB-24	2	8.00	16.00	FIERRO
4	a_ Motor tipo A	Motor con caja de engranaje, alto esfuerzo de torsión CD	1	211.97	212.00	www.ebay.com
5	a_ Resistencia tipo banda 2_ Dado	Resistencias eléctricas tipo banda 50 W	1	200.00	200.00	www.mercadolibre.com
6	a_ Aislante dado /inferior /superior	Fibra de vidrio RW-430 a 260°C. Longitud: 1m	1	180.00	180.00	www.mercadolibre.com
7	Motor tipo b	Motor eléctrico CD, con caja de engranes	3	238.42	715.26	www.ebay.com
8	b_ Carcasa_ ventilador b_ Helices	Ventilador XTECH XTA102	1	320.00	320.00	www.mercadolibre.com
9	b_ Banda	Banda transportadora Grado RC 200	1	No cotizado	-	-
10	b_ Indicador de caratula	Indicador de carátula Mitutoyo Mod. 1960	1	2815.34	2815.34	Mitutoyo
11	b_ Vastago de Indicador	Incluido en el indicador	1	-	-	Mitutoyo
12	b_ Abrazadera tipo uña	Abrazadera para tubo tipo uña AU-1"	3	2.00	6.00	Voltech
13	c_ Bobina	Carrete plástico Modelo B Negro	1	60.00	60.00	www.Filament2print.com
14	d_ Boton encendido_ CV	Botón de encendido	2	Incluido CV.	-	-
15	d_ Control velocidades	Controlador de velocidad para motor con interruptor de pantalla digital	2	82.48	164.96	www.ebay.com

(Continúa en la siguiente pág.)



(Tabla 6.1 - Continuación)

Nº	Pieza	Descripción	Cant	Precio x unidad	Total	Proveedor
16	d_Control temp	Kit de controlador de temperatura PID digital REX-C100 110-240V 0-1300 grados	3	128.07	384.21	www.ebay.com
17	d_Boton vel	Botón para control de velocidades	2	Incluido CV.	-	-
18	d_Boton enc-apag	Botón con enclavamiento con logo de encendido y apagado	2	203.00	406.00	www.silicio.mx
19	d_Boton sincronización	Interruptor de botón momentáneo Impermeable 12V con Led	1	17.86	17.86	www.ebay.com
20	e_Riel DIN-Ranurado	Riel Din para montaje. Longitud: 2m	1	146.69	146.69	www.digokey.com
21	e_Portafusible_ Weidmuller	Clema Portafusible con Indicador Led Fusible Americano WEIDMULLER	15	57	855.00	www.mystore.com
22	e_Cable 1	Ilustrativo	1	-	-	-
23	e_Cable 2	Ilustrativo	1	-	-	-
24	e_Fuente de alimentacion 12V	Adaptador de fuente de alimentación para CD 12V	1	113.81	113.81	www.ebay.com
25	e_Bisagra A	Bisagra acero inoxidable	2	6.00	12.00	HERMEX
26	a_Rodamiento-12	Rodamiento rígido de bolas de contacto angular $\phi=12$ mm	1	30.00	30.00	El super tornillo
27	a_Rodamiento-15	Rodamiento rígido de bolas de contacto angular $\phi=15$ mm	1	35.00	35.00	El super tornillo
28	b_Rodamiento-4	Rodamiento rígido de bolas $\phi=4$ mm	5	16.00	80.00	El super tornillo
29	Rodamiento-8	Rodamiento rígido de bolas $\phi=8$ mm	3	22.00	66.00	El super tornillo
30	c_Rodamiento-12	Rodamiento rígido de bolas $\phi=4$ mm	1	26.00	26.00	El super tornillo
Subtotal Componentes generales					7262.13	-

Nota: Cant. Cantidad, CV. Control de velocidades, CT. Control de temperatura

Debido a que los tornillos son parte de los ensambles de la mayoría de los componentes, se unieron en una sola tabla, para explicar las diferentes medidas utilizadas y poder cotizarlas (Tabla 6.2).

Tabla 6.2. Tornillería. Fuente: *Elaboración propia.*

Tornillería	Descripción	Cantidad	Precio x unidad	Total	Proveedor
T allen M5-08_8	Tornillo cabeza redonda “allen” inoxidable M5 x 8mm	4	2.00	8.00	El super tornillo
T allen M4-07 12	Tornillo cabeza redonda “allen” inoxidable M4 x 12mm	2	2.00	4.00	
T allen M4-07_8	Tornillo cabeza redonda “allen” inoxidable M4 x 8mm	24	1.50	36.00	
T allen M3-05_10	Tornillo cabeza avellanada “allen” inoxidable M3 x 10mm	4	1.50	6.00	
T allen M3-05_8	Tornillo cabeza redonda “allen” inoxidable M3 x 8mm	4	1.50	6.00	
T allen M3-05_6	Tornillo cabeza redonda “allen” inoxidable M3 x 6mm	35	1.50	52.50	
T allen M4-07 8 - tuerca	Tuerca hexagonal inoxidable M4	4	1.60	6.40	
T allen M3-05_10 Con tuerca	Tuerca hexagonal inoxidable M3	4	1.60	6.40	
Opresor M8-125 8	Opresor hexágono interior DIN 913 M8 x 8mm	1	2.50	2.50	
Opresor M5-08 6	Opresor hexágono interior DIN 913 M5 x 6mm	2	2.50	5.00	
Subtotal Tornillería				132.80	-

#### 6.4 Costo final de componentes estándares

El costo final mostrado en la Tabla 6.3, es una aproximación del costo que se requerirá en la construcción del prototipo de la extrusora tomando en cuenta todos los componentes comerciales y la tornillería prevista.

Por lo tanto, el costo final de componentes estándares es:

Tabla 6.3. Costo final de componentes estándares. Fuente: *Elaboración propia.*

Componentes	Precio
Generales	7262.13
Tornillería	132.80
<b>Total</b>	<b>7394.93</b>

La primera aproximación del costo de la extrusora es de 7400.00 MXN, costo inicial a cubrir, al cual se le debe agregar el costo de las materias primas a manufacturar, la mano de obra empleada durante todos los procesos, el costo de diseño de la máquina y demás consideraciones que conlleve la realización de un proyecto.

### 6.5 Lista de componentes a manufacturar

Igualmente, de los planos obtenidos y su despiece, se separaron los componentes a manufactura, con lo que se tiene la Tabla 6.4, en la que se puede consultar los materiales recomendados para cada uno de ellos. De los cuales los componentes de mayor importancia son: el barril, el husillo, dado, tolva y placa rompedora ya que influyen directamente en el proceso de extrusión.

Tabla 6.4. Lista de componentes a manufacturar. Fuente: Elaboración propia.

Núm.	Pieza	Material	Peso	Cantidad
1	a_Barril	Acero ASTM A106B	149.02	1
2	a_Husillo	Acero AISI 4140	103.15	1
3	a_Soporte_V	Acero al carbono placa 1/8"	219.29	1
4	a_Soporte_L para barril	Acero al carbono placa 1/8"	71.30	1
5	a_Dado	Acero AISI 4140	101.35	1
6	a_Placa rompedora	Acero AISI 4140	0.75	1
7	a_Tolva	Lámina negra Cal. 14	251.97	1
8	a_Cople H-V	Acero AISI 4140	60.67	1
9	a_Soporte Rodamientos	Acero al carbono placa 1/2"	427.03	1
10	a_Soporte L para Motor	Acero al carbono placa 1/8"	138.18	1
11	a_Cubierta inferior	Lámina negra Cal. 14	145.71	1
12	a_Cubierta superior	Lámina negra Cal. 14	142.85	1
13	b_Soporte rodamiento_1	Acero al carbono placa 1/4"	202.19	1
14	b_Soporte rodamiento_2	Acero al carbono placa 1/4"	61.64	1
15	b_Eje rod_1	Acero AISI 4140	3.42	1
16	b_Eje rod_2	Acero AISI 4140	3.31	1
17	b_Rodillo-1	Aluminio aleación 6160	16.27	3
18	b_Soporte ventilador	Acero al carbono placa 1/8"	167.14	1
19	b_Eje rod_3	Acero AISI 4140	3.65	1

(Continúa en la siguiente pág.)

(Tabla 6.4. - Continuación)

Núm.	Pieza	Material	Peso	Cantidad
20	b_Cople E-M	Acero AISI 4140	4.24	1
21	b_Soporte medicion	Acero al carbono placa 1/8"	70.52	1
22	c_Soporte aux emb	Acero al carbono placa 1/8" y 1/2"	283.88	1
23	c_Cople T-M	Acero AISI 4140	4.24	1
24	c_Barra	Acero al carbono	21.10	1
25	c_Guia Filamento	Acero AISI 4140	30.07	1
26	c_Tornillo	Acero AISI 4140	14.80	1
27	C_Soporte embobinado	Acero al carbono placa 3/8"	302.02	1
28	c_Soporte bobina	Lámina negra Cal. 14	247.10	1
29	c_Cople B-M	Acero AISI 4140	35.88	1
30	d_Carcasa panel de control	Lámina negra Cal. 14	662.53	1
31	d_Rotulado	Vinil	0.00	1
32	e_Caja-fus	Lámina negra Cal. 14	1360.13	1
33	e_Soporte F alimentacion	Lámina negra Cal. 14	781.36	1
34	e_Base	Lámina negra Cal. 14	1950.51	1
35	e_Frente	Lámina negra Cal. 14	1802.98	1
36	e_Soporte-izq	Lámina negra Cal. 14	911.36	1
37	e_Soporte-der	Lámina negra Cal. 14	907.73	1
38	e_Superior	Lámina negra Cal. 14	1221.88	1
39	e_Posterior-I	Lámina negra Cal. 14	893.65	1
40	e_Base inferior	Lámina negra Cal. 14	2022.66	1
41	e_Division bobina	Lámina negra Cal. 14	1397.69	1
42	e_Soporte medio	Lámina negra Cal. 14	641.35	1
43	e-Tapa control	Lámina negra Cal. 14	675.55	1
44	e-Tapa electrico	Lámina negra Cal. 14	1062.72	1
45	e_Tapa lateral	Lámina negra Cal. 14	161.41	1
46	e_Puerta acrilico	Acrílico espesor 3 mm	269.00	1
47	e_Mirilla	Acrílico espesor 3 mm	5.30	2
48	e-Tapa extrusora	Lámina negra Cal. 14	306.26	1
49	e_Logo_1	Aluminio aleación 6160	2.90	1

## Capítulo 7 Conclusiones y trabajos futuros

---

Del desarrollo del proyecto de tesis se llegó al diseño de una extrusora de filamento para impresora 3D, basando su funcionamiento en un material en específico, PP reciclado, con una capacidad de producción de 0.250 kg/h. Para el logro de este objetivo fue necesario el desarrollo de los siguientes temas, los cuales son el sustento para la presente tesis.

### 1. Caracterización.

Al ser un material de desecho del cual no había alguna investigación anterior, se tuvo la necesidad de limitar una población de estudio para conocer la cantidad de residuos que se generan y las condiciones en las que se puede obtener el material. Con esta información se obtuvieron las necesidades de los clientes y se recolectaron muestras para la identificación del material y su caracterización por medio de investigación de gabinete.

### 2. Extrusión

Se consultaron libros específicos sobre este tema, con autores como Jones Morton y Luis Francisco Ramos, de quienes se obtuvo la base para este proyecto y recomendaciones para la transformación de polímeros. Además de identificar cada uno de los componentes de una línea de extrusión y recabar información acerca de sus especificaciones para su diseño.

### 3. Conceptualización

Esta etapa se basó en la metodología de “diseño y desarrollo de productos” de *Ulrich y Eppinger (2012)*, lo que permitió un proceso claro y ordenado de recabación de información, para ser plasmada en bocetos generales y específicos de cada una de las unidades de las que se conforma la extrusora. Teniendo que esta etapa fue iterativa en todo el proceso del desarrollo de la tesis, debido a la cantidad de información que había que delimitar, hasta llegar a un modelo 3D, en el que se consultó a docentes y técnicos del área de manufactura, control y eléctrico por medio de comunicación personal.

### 4. Evaluación

Esta etapa, se divide en los siguientes 2 aspectos:

Evaluación de material, en ella se realizaron pruebas de fundición de las fibras sintéticas en la inyectora del taller de plásticos de la UTM, con lo que se comprobó que el material tenía la capacidad de

fundirse nuevamente y se detectó la necesidad del control de los parámetros de procesamiento del plástico para incrementar la fiabilidad de las pruebas.

Etapa de evaluación del prototipo virtual, cabe mencionar que los análisis térmico y geométrico, entre otros, de un prototipo 3D preceden a un prototipo funcional, por lo que se tiene el aporte de evaluaciones a través de estudios térmicos (sistema de calentamiento) y comprobación de las geometrías de las piezas y ensambles, que permiten detectar errores geométricos y de interacción de elementos antes de su construcción, representando un ahorro de tiempo y dinero en etapas posteriores. Así también, se realizaron consultas a personas de otras áreas diferentes a las del ingeniero en diseño, acerca del funcionamiento del sistema en general, lo que ayudó en la retroalimentación y refinamiento de los componentes.

Asimismo, cabe resaltar la necesidad de una etapa de desarrollo del proyecto en el área eléctrica y de control para llegar a la construcción de un prototipo funcional.

### **7.1 Trabajo a futuro**

Durante el desarrollo del proyecto se detectaron diferentes temas de investigación para el enriquecimiento de este proyecto a nivel social y académico, los cuales son:

- Desarrollo del área eléctrica y de control para el modelo de la extrusora propuesta en esta tesis, con el fin de lograr componentes a la medida y la optimización en general de la extrusora. Así como la evaluación de los procesos de manufactura para cada uno de los componentes a fin de mejorar los materiales y tiempo en cada uno de los procesos de fabricación.
- Construcción del prototipo funcional de la extrusora, con el que se evalúe el funcionamiento y la interacción de los componentes. Asimismo, la realización de pruebas de extrusión del PP reciclado para la obtención de filamento y fabricación de una pieza con el producto obtenido.
- Diseño de un conjunto husillo-barril para el procesamiento del PP en una extrusora, que no esté limitado a la manufactura de la universidad, debido a que geometrías más complejas permiten la mejora de la fundición y el mezclado de los materiales durante el proceso.
- Caracterización del PP reciclado para nuevas mezclas con cargas y aditivos, que permitan la obtención de un material homogéneo y propiedades específicas para nuevas aplicaciones.
- Investigación hacia la instalación de una planta de reciclaje en las comunidades, no únicamente para el reciclaje del PP generado de las artesanías, sino también residuos en general, que contribuya a la conservación del entorno y sobre todo de los suelos poco fértiles que prevalecen en la mixteca.

Teniendo entonces la apertura de nuevas áreas de aplicaciones de conocimiento de otras disciplinas que conllevan a la realización de proyectos interdisciplinarios, que contemplan más información para su puesta en marcha.

## GLOSARIO

**ABS:** Acrilonitrilo Butadieno Estireno.

**ADPE:** Polietileno.

**BOPP:** Polipropileno bi-orientado. Contexto utilizado: Película BOPP.

**HDPE o PEAD:** Polietileno de Alta Densidad.

**HIPS:** Poliestireno de Ato Impacto.

**HMW:** Alto peso molecular de un polímero.

**LDPE o PEBD:** Polietileno de Baja Densidad.

**PA:** Poliamida.

**PC:** Policarbonato.

**Phr:** Partes por 100 de resina, en contexto de polímeros.

**PLA:** Ácido poliláctico.

**PP:** Polipropileno.

**TWQ:** Propiedad de alta barrera. Contexto utilizado: Película TWQ de bajo calibre.

**UHMWPE o UHMW:** Polietileno de Ultra Peso Molecular.

**ULTEM:** es una Polieterimida termoplástica amorfa (PEI).

**UTM:** Universidad Tecnológica de la Mixteca.





## REFERENCIAS

- Aceros SISA. (2017). *Aceros SISA 4140T Tratado y Revenido*. Recuperado de: <http://sisa1.com.mx/wp-content/uploads/Acero-SISA-4140T-Tratado-y-Revenido.pdf>
- Al-Zamil & Brothers Company. (2004). *Pre-feasibility study for PDH/ACN/PP complex*, Volumen I: Al-Zamil & Brothers Company
- Beltrán M. y Marcilla A. (2012). *Tecnología de polímeros*. España: Universidad de Alicante. Servicio de publicaciones.
- Boegger. (2017). *Extruder Screens in Micron Ratings Suit Fine Extrusion*. Recuperado de: <http://www.extruderscreens.org/extruderscreens/extruder-screens.html>
- Bombardier Transportation. (2010). *Marking of Plastics, Rubbers and Thermoplastic Elastomers*, Canda; Bombardier Inc. Recuperado de: <http://www.bombardier.com/content/dam/Websites/bombardiercom/supporting-documents/BT/Bombardier-Transportation-Marking-of-Plastics-Rubbers-and-Thermoplastic-Elastomers-Standard-Doc-ID-number-000018-en.pdf>
- Cengel Y. A. y Cimbala J. M. (2012). *Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones*. México: McGraw Hill
- Cengel Y. A. y Ghajar A. J. (2011). *Transferencia de calor*. México: McGraw Hill
- Chapra S. C. y Canale R. P. (2017). *Métodos numéricos para ingenieros*. 5ta Edición. México: McGraw Hill.
- CIEES, Comités Interinstitucionales para la Evaluación de la Educación Superior, A.C. (2016). *Estadística básica de la educación superior*. Recuperado de: <http://www.ciees.edu.mx/index.php/publicaciones/estadistica>
- Corberan. J. M. y Royo R. (2017). *Evolución de temperaturas en función del número de Biot*. Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de: <http://www.upv.es/upl/U0296618.pdf>
- CPI Plastica. (2017). *Tinas de enfriamiento*. Recuperado de: <http://cpiplastika.com/wp-content/uploads/2015/04/Tinas-de-enfriamiento-para-filamentos.jpg>
- CREATEBOT Mexico. (2017). *Filamentos 3D*. México: CREATEBOT Mexico
- Díaz J. (2014). *10 Características de los Emprendimientos de Alto Impacto*. Recuperado de: <http://www.negociosyemprendimiento.org/2014/06/caracteristicas-emprendimientos-alto-impacto.html>
- Díaz F. (2007). *Tablas y gráficas para diseño de elementos de máquinas*. UNAM, Cuatitlán. Recuperado de: [http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina\\_ingenieria/mecanica/mat/mat\\_mec/m1/tablas%20y%20graficas.pdf](http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m1/tablas%20y%20graficas.pdf)
- ENSA electronics. (2017). *Calcular la potencia eléctrica*. Recuperado de: [http://ensa.com.mx/?page\\_id=1075](http://ensa.com.mx/?page_id=1075). *Bandas*. Recuperado de: [http://ensa.com.mx/?page\\_id=328](http://ensa.com.mx/?page_id=328)
- Esinger. (2016a). *Plásticos amorfos. Materials Plastics*. Recuperado de: <http://www.ensinger.es/es/informacion-tecnica/fundamentos-de-los-plasticos/plasticos-amorfos>

- FAG. (2000). *Rodamientos FAG*. Catálogo WL 41 520/3 SB. España: FAG Sales Europe GmbH.
- Federal Steel Supply. (2017). *ASTM A106 Carbon Steel Pipe & Tube*. Recuperado de: <http://www.fedsteel.com/products/carbon-pipe-and-tube/astm-a106-seamless-carbon-steel-pipe.html>
- Filament2printer. (2017). *Carrete de plástico*. Recuperado de: <https://filament2print.com/es/accesorios/651-carrete-de-plastico.html>
- Frank H. (2017). *Extrusion in ceramics*. New York: Springer.
- Gebler, M., Schoot, A., Visser, C. (2014). *A global sustainability perspective on 3D printer technologies 2014*. Energy policy 74 (156-167)
- Hall, C. (1981). *Polymer Materials: An Introduction for Technologists*. London: Macmillan .
- Harutun G. K. (1999). *Handbook of Polypropylene and Polypropylene Composites*. New York: Marcel Dekker
- HMC Polymers. (2017). *PP properties*. Recuperado de: <http://www.hmcpolymers.com/pp-properties>.
- Impresoras3D. (2016). *Filamento para impresora 3d: ¿Como diferenciar el bueno del malo?* Recuperado de: <https://impresoras3d.com/blogs/noticias/105539335-filamento-para-impresora-3d-como-diferenciar-el-bueno-del-malo>
- Industrial Ambar. (2017). *LS- tanques*. Recuperado de: <http://grupoindustrialambar.com.mx/ls-pvc-soft/>
- INE. (2017). *Identificación de los plásticos*. Recuperado de: [http://portalanterior.ine.mx/archivos3/portal/historico/recursos/IFE-v2/DS/DS-CG/DS-SesionesCG/CG-acuerdos/2015/01\\_Enero/CGext201501-28\\_2a/CGex201501-28\\_ap\\_3\\_a1.pdf](http://portalanterior.ine.mx/archivos3/portal/historico/recursos/IFE-v2/DS/DS-CG/DS-SesionesCG/CG-acuerdos/2015/01_Enero/CGext201501-28_2a/CGex201501-28_ap_3_a1.pdf)
- INSHT, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. (2017). *Ficha técnica polímero tipo PP\_3\_1\_B*. Recuperado de: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/Plasticos/>
- Instituto Mexicano del Plástico Industrial. (2000a). *El mundo de los plásticos*. En la (Ed. 2), *Enciclopedia del plástico*. (Edición 2, Volumen 1, pp. 41-120). México D.F.: GRUPO PINE
- Instituto Mexicano del Plástico Industrial. (2000b). *Extrusión*. En la (Ed.2), *Enciclopedia del plástico*. (Edición 2, Volumen 2, pp. 323-397). México D.F.: GRUPO PINE
- Instituto Mexicano del Plástico Industrial. (2000c). *Identificación y selección*. En la (Ed.2), *Enciclopedia del plástico*. (Edición 2, Volumen 2, pp. 152-164). México D.F.: GRUPO PINE
- Instituto Mexicano del Plástico Industrial. (2000d). *Polipropileno*. En la (Ed.2), *Enciclopedia del plástico*. (Edición 2, Volumen 1, pp. 243-312). México D.F.: GRUPO PINE
- Instituto Mexicano del Plástico industrial. (2000d). *Reciclado*. En la (Ed. 2), *Enciclopedia del plástico*. (Edición 2, Volumen 3, pp. 177-192). México D.F.: GRUPO PINE
- Kreiger M.A., Mulder M.L., Glover A.G., Pearce J. M. (2014). *Life Cycle Analysis of Distributed Recycling of Post-consumer High Density Polyethylene for 3-D Printing Filament*. Journal of Cleaner Production, DOI; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.009>
- López J. (2016). *Plásticos semicristalinos*. Andaltec. Recuperado de: <http://www.andaltec.org/wp-content/uploads/2016/09/foto-2.jpg> <http://www.ensinger-online.com/>

- Maddah H. A. (2016). *Polypropylene as a Promising Plastic: A review*. American Journal of Polymer Science. Recuperado de: <http://article.sapub.org/10.5923.j.aips.20160601.01.html>
- Mariano. (2011). *Tecnología de los plásticos. Extrusión de materiales plásticos*. Argentina: Recuperado de: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.mx/2011/03/extrusion-de-materiales-plasticos.html>
- Mercadolibre BA. (2017). *Bomba de agua sumergible ECOJET*. Recuperado de: <https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-549470813-bomba-agua-150-lh-50cm-hidroponia-pecera-acuario-fuente- JM>
- Mercadolibre V. (2017). *Ventilador XTECH XTA102*. Recuperado de: <https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-579862112-ventilador-90mm-9cm-y-80mm-8cm-1500rpm- JM>
- Mitutoyo. (2010). *Indicadores de carátula*. Recuperado de: <http://www.mitutoyo.com.mx/Descargas/Boletines/BOLETIN%20MAYO%202010.pdf>
- Mitutoyo. (2012). *Catálogo de instrumentos de medición*. México: Mitutoyo.
- Morton J. (2012). *Polymer processing*. México; Limusa.
- Mott, R. L. (1992). *Diseño de elementos de máquinas*. México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A.
- NMB. (2017). *Ventiladores y sopladores de enfriamiento*. Recuperado de: <http://www.nmbtc.com/es/ventiladores-de-enfriamiento/>
- Norma ASME B31.3. (2017). *Norma ASME B31.3, pág. 20, TABLE 104.1.2. (A) // Perry: Manual del Ingeniero Químico*. Recuperado de: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/17145/ANEXO?sequence=7>
- Owens Corning. (2017). *Colchoneta termoaislante RW-4300 / RW-4600 RW*. Recuperado de: <http://owenscorning.com.mx/wp-content/uploads/2016/06/RW-4300-2014completa.pdf>
- Plasticbages Industrial, S.L. (2017). *Características técnicas del polipropileno*. Recuperado de: <http://www.plasticbages.com/caracteristicaspolipropileno.html>
- Posada B. (2017). *La degradación de los plásticos*. Revista Universidad Eafit No. 94.
- PROPILCO. (2017). *Información sobre polipropileno y generalidades*. Colombia: PROPILCO
- Ramos, L.F. (2013). *Extrusión de plásticos: Principios básicos*. México: Limusa
- RATSA, Recubrimientos y aislantes térmicos S.A. de C.V. (2011). *Los aislantes térmicos (aislamientos térmicos) en la industria*. Recuperado de: <https://www.ratsa.mx/archivopdf/RATSA-los-aislantes-termicos-ene-2011.pdf>
- Savgorodny, V. K. (1973). *Transformación de los plásticos*. Barcelona: Gustavo Gili
- Serviacero. (2017). *4140 AISI*. Recuperado de: <http://serviacero.com/archivos/1368201546.pdf>
- Sikora J. W. (1995). Bieliński M.: Głowice do wytłaczania porującego kształtowników (*Cabezales de extrusión para secciones perforadas*). (Collective work). Postęp w “przetwórstwie tworzyw termoplastycznych (Procesamiento de los termoplásticos)”. Pág. 209. Polonia: Politechnika Częstochowska, Częstochowa.
- Sikora J. W. (2017). *Design of Extrusion Heads*. Polonia: Lublin University of Technology. Recuperado de: <http://bc.pollub.pl/Content/101/Design+of+Extrusion+Heads.pdf>

- Sikora R. (1993). *Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych (Procesamiento de plásticos de alto peso molecular)*. Polonia: Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa (Editorial Educativa, Varsovia)
- Sikora R. (2006). (Editor of collective work): *Przetwórstwo tworzyw polimerowych (Procesamiento de materiales poliméricos)*. Podstawy logiczne, formalne i terminologiczne (Base lógica, formal y terminológica). Polonia: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej.
- Sikora. (2017b). *Interempresas. Tecnologías para la medición de diámetro, espesor de pared, excentricidad y hundimiento durante la extrusión de mangueras y tubos*. Recuperado de: <http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/184905-Tecnologias-medicion-diametro-espesor-pared-excentricidad-hundimiento-durante-extrusion.html>
- Singer F.L y Pytel A. (1994). *Resistencia de materiales*. México: Harla
- Studylib. (2017). *Extrusión*. Recuperado de: <http://studylib.es/doc/5054835/6.2.-extrusi%C3%B3n>
- Tei. (2017). *Resistencias eléctricas tipo banda*. Recuperado de: <http://www.teii.com.mx/resistencias-tipo-banda.html>. *Termopares industriales, diseño y fabricación*. Recuperado de: <http://www.teii.com.mx/termopares.html>
- Trnik A. Medved I. (2016). *Polypropilene filament*. 21st International Meeting on Thermophysics 2016. Slovakia: American Institute of Physics Inc.
- Tubisa. (2017). *Tubos de acero con y sin costuras ASTM A-53 GRADO B / ASTM A-106 / API 5L: Propiedades Mecánicas*. Recuperado de: [https://www.academia.edu/8815617/TUBOS\\_DE\\_ACERO\\_CON\\_y\\_SIN\\_COSTURA\\_ASTM\\_A-53\\_GRADO\\_B\\_ASTM\\_A-106\\_API\\_5L\\_Propiedades\\_Mec%C3%A1nicas](https://www.academia.edu/8815617/TUBOS_DE_ACERO_CON_y_SIN_COSTURA_ASTM_A-53_GRADO_B_ASTM_A-106_API_5L_Propiedades_Mec%C3%A1nicas)
- UANL, Universidad Autónoma de Nuevo León. (2017). *Aceros y sus clasificaciones*. Recuperado de: [http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020070668/1020070668\\_02.pdf](http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020070668/1020070668_02.pdf)
- Ulrich K. T. y Eppinger S. D. (2012). *Diseño y desarrollo de proyectos*. Mexico: McGRAW HILL
- UNIOVI. (2017). *Asignatura: Materiales poliméricos y compuestos*. España: UNIOVI
- UPC, Universidad Politécnica de Catalunya. (2017). *Bases de cálculo de tuberías*. Recuperado de: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/17145/ANEXO?sequence=7>
- Vamptech. (2017). *PP Polipropileno*. Recuperado de: <http://vamptech-iberica.com/pp.php>
- VFISICA. (2013). *Tablas de valores de los coeficientes*. Recuperado de: <https://vallyblog.files.wordpress.com/2013/05/friccion.gif>
- Videla. A. (2017). *Manual de motores eléctricos*. Recuperado de: [https://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiH5s7X\\_4zWAhUP12MKHbvSAdYQFghHMAY&url=http%3A%2F%2Fkimerius.com%2Fapp%2Fdownload%2F5783169262%2FManual%2Bde%2Bmotores%2Bel%25C3%25A9ctricos.pdf&usq=AFQjCNGS2rUBFxgk7C37oILAssZp7ybL3A](https://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiH5s7X_4zWAhUP12MKHbvSAdYQFghHMAY&url=http%3A%2F%2Fkimerius.com%2Fapp%2Fdownload%2F5783169262%2FManual%2Bde%2Bmotores%2Bel%25C3%25A9ctricos.pdf&usq=AFQjCNGS2rUBFxgk7C37oILAssZp7ybL3A).
- Vulcanizados Ruiz. (2017). *Bandas transportadoras*. Recuperado de: <http://www.vulcanizadosruiz.com/bandas-transportadoras/goma.html>
- Worldstandards. (2017). *Electricidad en todo el mundo*. Recuperado de: <http://www.worldstandards.eu/electricidad.htm>

## **ANEXOS**



## ANEXO A: Extrusoras semi-industriales, industriales y domésticas

Tabla A.1 Extrusoras semi-industriales Fuente: Elaboración propia.



Extrusora	Descripción	Dimensiones (m)	Material	Dimensión de salida (mm)	Temp. (°C)	Velocidad del husillo N (rpm)	Diám. del husillo (mm)	Tipo de husillo	Salida (kg/h)	Costo USD
	Extrusora de filamento para impresora 3D	1.56	ABS PLA Otros	1.7 3	-	-	-	Mono-hélice	20-25	\$5600.00 \$7050.00
	Línea de producción de filamento para impresora 3D.		PLA ABS PET HIPS PA.	1.7 3 +/-0.03	-	-	-	Mono-hélice	-	\$4000.00 \$9000.00

Tabla A.2 Extrusoras industriales. Fuente: Elaboración propia.






Extrusora	Descripción	Dimensión (m)	Material	Dimensiones de salida (mm)	Temperatura (°C)	Velocidad rpm	Diámetro del husillo (mm)	Tipo de husillo	Salida (kg/h)	Costo (USD)
 Nanjing Hisilicon	Máquina extrusora de doble tornillo para filamento	4.8 x 2.3 x 0.78	ABS PLA	Gránulos	-	400 - 600	71	Doble tornillo	250, 350, 400, 500, 1000	\$34,500.00
	Extrusora de filamento para impresora 3D	1.2 x 1.5 x 1.85	ABS PLA	1.7 3	180 - 240	-	-	Monohélice	-	\$10,000.00 - \$30,000.00
  Huaxi	Extrusora de filamentos	4.3 x 0.8 x 1.5	Termo-plásticos	Modificación de plásticos		600 - 900	36 - 94	-	250 - 700	\$70,000.00 - \$100,000.00
	Extrusora de hilos de PP para cuerdas	20 - 27 x 3 x 2.5	PP PE	0.13 - 0.30 0.15 - 0.30 0.2 - 0.4		20 - 120	70 - 80 - 90	Monohélice	62.5 - 125	\$60,000.00 \$90,000.00
 Zhuo yue	Extrusora de hilos de PP para cuerdas	20 - 27 x 3 x 2.5	PP PE	0.13 - 0.30 0.15 - 0.30 0.2 - 0.4		20 - 120	70 - 80 - 90	Monohélice	62.5 - 125	\$60,000.00 \$90,000.00
 Haidai										



Tabla A.3 Extrusoras domésticas. Fuente: Elaboración propia.

1.		<b>Filabot EX2 Filament Extruder</b>	2.		<b>Filastruder</b>	3.		<b>Lyman Filament Extruder V4.1</b>	4.		<b>Protocycler</b>
----	---	--	----	---	--------------------	----	--	---	----	---	--------------------

Extrusor	Costo (USD)	Tam. (in)	Díam. salida (mm)	Capacidad (kg/h)	Temp. máx. °C	Tam. De entrada:	Material	Tolerancia (mm)	Bobina/Molino	Características
1	\$2,499.00	18 x7 x9	1.75 2.85 * Otro (mm)	0.907 (PLA) 1.75 (mm)	450	1/4 in pellets	PLA ABS HIPS ULTEM PC Otros	+/- 0,05 con Filabot spooler Filabot spooler	* Filabot spooler \$1 200.00 * Filabot Industrial Reclaimer \$4 200.00	Tornillo de alimentación de alto rendimiento. Permite mejorar la mezcla, la fusión y la salida de filamentos. Boquilla personalizada, afilada a la punta para máxima eficiencia de flujo y calidad de filamento. Entrada de alimentación universal: disponible en 110VAC o 220VAC Control de velocidad de extrusión.
2	\$299.99	18 x6 x4	1.75 3.0	0.125 a 0.200	260	< 5 mm	ABS PLA Otros	ABS: +/- 0.02 PLA: +/- 0,03 Nylon: +/- 0.02 PC: +/- 0.04 PET-T y Acrílico: +/- 0,05 PP: +/- 0.07	NO	Chasis de aleación de aluminio. El husillo está hecho de aleación 6061 CNC. Motor actualizado Modelo: GF45 Control avanzado del motor para la tensión (velocidad) y la corriente (par) mediante un controlador. Gabinete Lasercut con ventilador de refrigeración. El barril aislado para mejorar el rendimiento y la mezcla de polímeros. Boquilla del filtro de fusión (200 µm) Energía: 110-240VAC, 50 / 60Hz.
3	Libre	12 x46 x15"	1.75 3.0	0.200		Pellets	Varios	1,75 (+/-) 0,10 3 (+/-) 0,10	SI/ NO	Constante proceso de mejoras Documentos descargables: Planos de todas las piezas, check list de los componentes (estándar o impreso), archivos stl para imprimir los necesarios.
4	\$899.00		1.75 3.0	5 pies / min 1 kg/h		Piezas de desecho	ABS PLA	Tolerancias líderes de la industria	Si/Si	Diseñado para los hogares, la educación y los fabricantes. 10 veces más eficiente de energía. Cree sus propios ajustes para experimentar con otros plásticos. Selección ilimitada de mezcla de color. El modo manual, la documentación completa y un foro de soporte le permiten experimentar.

Nota. Tam: Tamaño. Díam.: Diámetro.

## ANEXO B. Identificación del material

### Método empírico

Instituto Mexicano del Plástico. (2000). Identificación y selección. En la (Ed. 2), Enciclopedia del plástico. (Edición 2, Volumen 2, pp. 485 - 495). México: GRUPO PINE

#### 1. Descripción de muestras de fibra sintética

Existen variantes de las fibras plásticas que venden los fabricantes en las poblaciones estudiadas, por lo que se recolectaron muestras con los siguientes proveedores:

Proveedor 1: PERLUX S. DE R.L. DE C.V., empresa mexicana con instalaciones en Tlalpan, Ciudad de México, quienes accedieron a enviar muestras de sus materiales.

Proveedor 2: Muestras de materiales de desperdicio recolectados por los propios artesanos de la comunidad de San Mateo Sosola, Oaxaca.

Se realizaron pruebas de identificación y comprobación de Polipropileno (PP) como materia prima. La información se vació en las siguientes tablas para la memoria de resultados.

Tabla B.1. Imágenes de muestras de fibra sintética. Fuente: Elaboración propia.

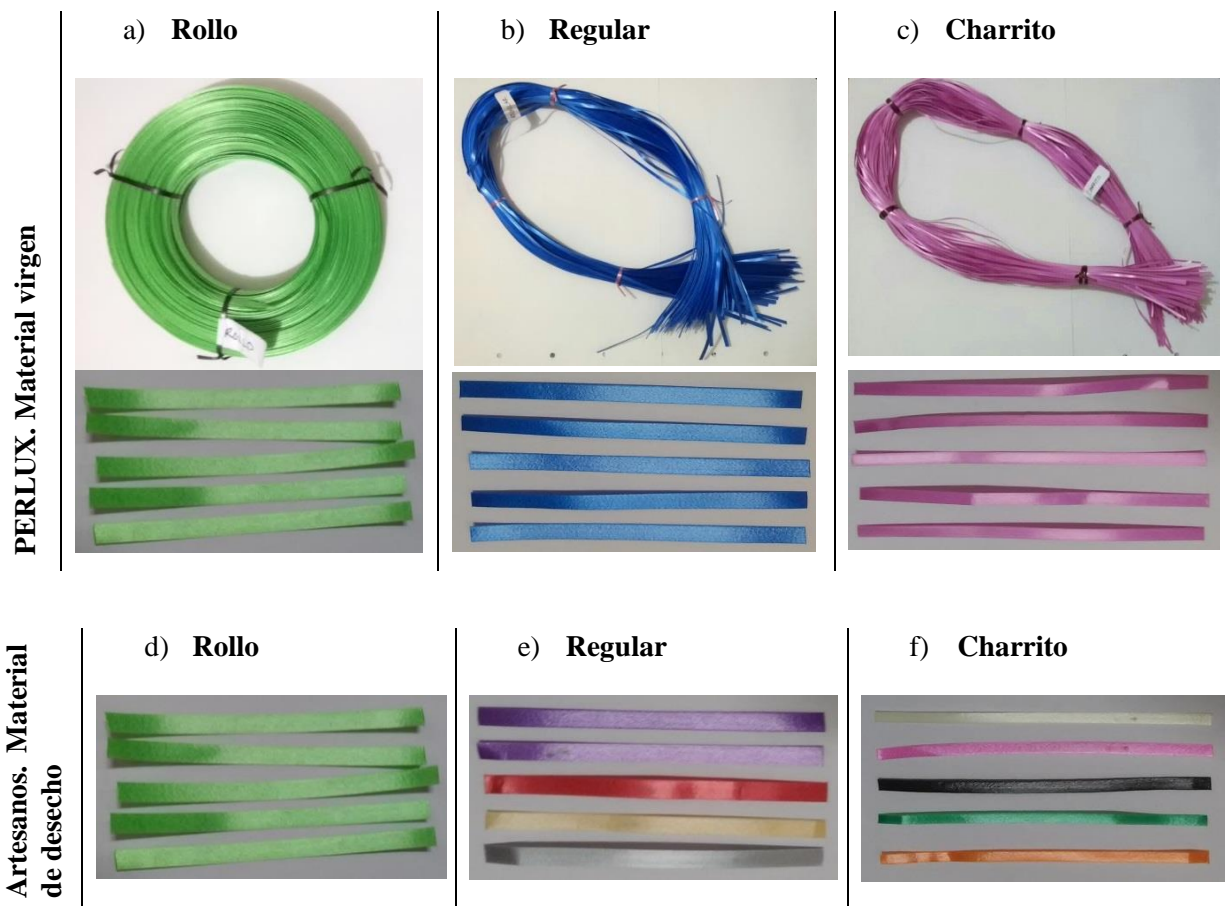


Tabla B.2. Características físicas de muestras de fibra sintética. Fuente: Elaboración propia

Muestr	Nombre	Proveedor	Dimensiones (cm)			Volumen (cm <sup>3</sup> )	Masa (g)	Densidad g/cm <sup>3</sup>	Densidad Kg/m <sup>3</sup>
			Ancho	Largo	Grosor				
A	Rollo	Perlux	0.6	10	0.043	0.258	0.1412	0.5473	547.3
B	Regular	Perlux	0.5	10	0.038	0.190	0.1048	0.5515	551.5
C	Charrito	Perlux	0.5	10	0.028	0.140	0.0538	0.3842	384.2
D	Rollo	Artesanos	0.6	10	0.043	0.258	0.1412	0.5473	547.3
E	Regular	Artesanos	0.5	10	0.037	0.185	0.1020	0.5513	551.3
F	Charrito	Artesanos	0.5	10	0.028	0.140	0.0538	0.3842	384.2

Debido a la similitud de resultados en las pruebas de las diferentes muestras se presenta sólo las imágenes más ilustrativas y un resultado único.

## 2. Propiedades mecánicas

### Prueba

Rayar o corte



### Resultado

Corte difícil y el material únicamente se desbasta

### Posibles plásticos

POM	PC
CA	PSMI
ABS	PSAI
ASA	PET
PVC-R	PEAD
PA 6	UHMWPE
PA 6/6	PP
PBT	UP-FV

## 3. Propiedades ópticas

### Prueba

Grado de luz que pueden dejar pasar



### Resultado

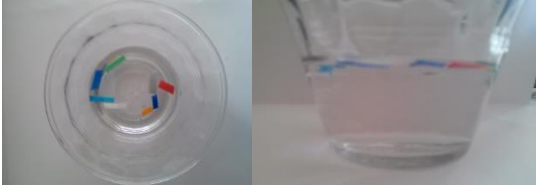

“El Polipropileno, en su forma natural se trata de un material opaco a traslúcidos, y debido a al desarrollo de la tecnología durante el proceso de polimerización se obtiene en grado transparente.

Por ello debe considerarse que cuando se tiene una muestra de plástico opaca seguramente ha sido formulada con dicho aditivos o los espesores muy grandes.” (Instituto, 2010).

### Posibles plásticos

Traslucidos  
 POM  
 CA  
 EVA  
 PA 6  
 PSMI  
 PET  
 PEAD  
 PEBD  
 UHMWPE  
 PP  
 TPU  
 UP-FV

**4. Densidad del material**


<b>Prueba</b>	<b>Resultado</b>	<b>Posibles plásticos</b>
<p><u>Flotación en el agua</u></p> 	Flota	<p>“Cuando la muestra flota en agua es el caso del Polietileno (PE), Polipropileno (PP) y las espumas de poliuretano (PUR.F), significa que su densidad es menor a 1 g/cm<sup>3</sup>.”</p>
<p><u>Flotación en solución alcohólica</u></p> 	Flota	<p>“La prueba se lleva a cabo con la preparación de una solución al 50% de alcohol etílico con agua, la cual tendrá una densidad de 0.93%”.</p> <p>“Esta es una forma de distinguir el Polietileno de Alta Densidad (PEAD) del Polipropileno (PP), donde al efectuarse la prueba el Polipropileno (PP) flota y el Polietileno de Alta Densidad (PEAD) se hunde en la solución alcohólica.” (Instituto Mexicano del Plástico, 2010).</p>

**5. Combustibilidad**

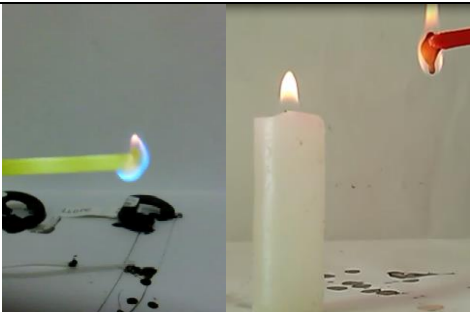
**5.1. Comportamiento a la flama. Combustibilidad**

<b>Prueba</b>	<b>Resultado</b>	<b>Posibles plásticos</b>																								
	Fácil de incendiar	<table border="0"> <tr> <td>CA</td> <td>PSMI</td> </tr> <tr> <td>PMMA</td> <td>PSAI</td> </tr> <tr> <td>ABS</td> <td>EPS</td> </tr> <tr> <td>ASA</td> <td>PEAD</td> </tr> <tr> <td>PVC-F</td> <td>PEAB</td> </tr> <tr> <td>PVC-R</td> <td>PP</td> </tr> <tr> <td>SB</td> <td>PUR-F</td> </tr> <tr> <td>SAN</td> <td>PUR-R</td> </tr> <tr> <td>EVA</td> <td>TPU</td> </tr> <tr> <td>TPO</td> <td>POM</td> </tr> <tr> <td>PBT</td> <td>UP</td> </tr> <tr> <td>PS</td> <td>UP-FV</td> </tr> </table>	CA	PSMI	PMMA	PSAI	ABS	EPS	ASA	PEAD	PVC-F	PEAB	PVC-R	PP	SB	PUR-F	SAN	PUR-R	EVA	TPU	TPO	POM	PBT	UP	PS	UP-FV
CA	PSMI																									
PMMA	PSAI																									
ABS	EPS																									
ASA	PEAD																									
PVC-F	PEAB																									
PVC-R	PP																									
SB	PUR-F																									
SAN	PUR-R																									
EVA	TPU																									
TPO	POM																									
PBT	UP																									
PS	UP-FV																									


**5.2. Comportamiento a la flama. Durabilidad de la flama**

<b>Prueba</b>	<b>Resultado</b>	<b>Posibles plásticos</b>												
	Continúa ardiendo	<table border="0"> <tr> <td>CA</td> <td>EVA</td> </tr> <tr> <td>PMMA</td> <td>TPO</td> </tr> <tr> <td>ABS</td> <td>PBT</td> </tr> <tr> <td>ASA</td> <td>PET</td> </tr> <tr> <td>SAN</td> <td>PSAI</td> </tr> <tr> <td>SB</td> <td>PS</td> </tr> </table>	CA	EVA	PMMA	TPO	ABS	PBT	ASA	PET	SAN	PSAI	SB	PS
CA	EVA													
PMMA	TPO													
ABS	PBT													
ASA	PET													
SAN	PSAI													
SB	PS													

### 5.3. Comportamiento a la flama. Color de la flama

Prueba	Resultado	Posibles plásticos
	Depende de la fuente de calor, pero regularmente la base de la flama es azul.	EVA PA 6 PA 6/6 PEBD PEAD UHMWPE POM <b>PP</b>

### 5.4. Comportamiento al Calor. Color de los humos


Prueba	Resultado	Posibles plásticos
	Humo blanco	CA PMMA EVA MF PA 6 PA 6/6 PEAD PEBD UHMWPE POM <b>PP</b> PUR -F TPU SI

### 5.5. Comportamiento al calor. Olor de los vapores

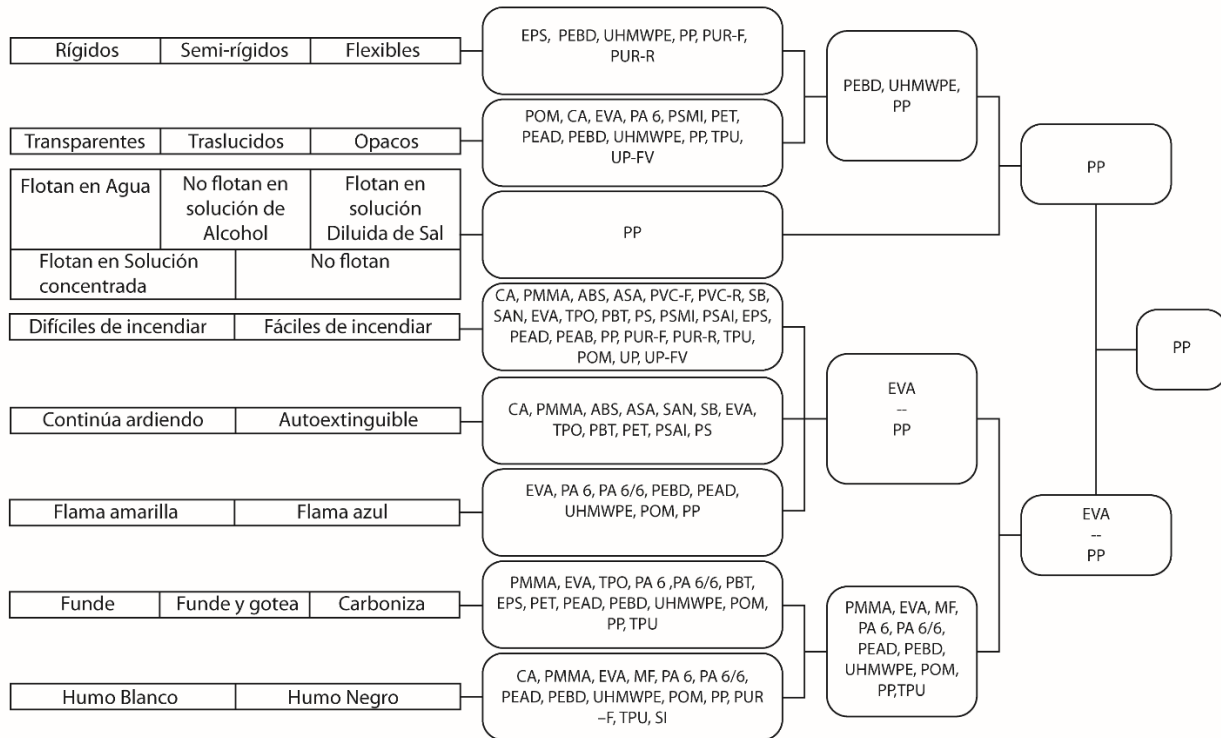
Plástico	Olor	Plástico	Olor
POM	Picante de formadehído	PUR-F	Aceite de almendras
EVA	Vinagre	PUR-R	Irritante desagradable
PMMA	Solvente	UP	Humo de auto irritante
ABS	Humo de llanta	PVC	Picante del Ácido
SAN	Ligeramente picante	MF	Clorhídrico
SB	Humo de llanta	PA	Pescado
TPO	Humo de llanta	PC	Cabello quemado
PBT	Irritante	EP	Irritante
PET	Fragante	PF	Picante a Fenol
PS	Ligeramente dulce	SI	Irritante a madera verde
PE	Parafina	PTFE	Solvente muy ligero
PP	<b>Aceite lubricante</b>		Picante

**Resultado: Olor a aceite lubricante.**

**5.6. Comportamiento al calor. Alteraciones de la muestra**

Prueba	Resultado	Posibles plásticos	
	Funde y Gotea	PMMA	PET
		EVA	PEAD
		TPO	PEBD
		PA 6	UHMWPE
		PA 6/6	POM
		PBT	<b>PP</b>
		EPS	TPU

**6. Secuencia para identificación de materiales**



Con base en las pruebas realizadas con el método empírico, se concluye que las muestras de material reciclado de fibra sintética corresponden al Polipropileno.

## ANEXO C. Análisis de la competencia

Comparando los productos de la competencia con las métricas establecidas en el apartado 3.2, se muestran los resultados en las Tablas C.1 y C.2

Tabla C.1. Análisis de la competencia. Extrusoras. Fuente: Elaboración propia.

Métricas	Imp.	Filabot EX2 Filament Extruder	Filastruder	Lyman Filament Extruder V4.1	Protocycler
El extrusor procesa Polipropileno Homopolímero	5	PLA, ABS, HIPS, ULTEM, PC, Otros	ABS, PLA Otros	Varios	ABS PLA
Extrusora monohusillo	5	Si	Si	Si	Desc
Fuente de energía eléctrica	5	Si	Si	Si	Si
Parámetros por utilizar:					
Temperatura de extrusión 200 – 260 °C	5	450 °C	260 °C	--	--
Capacidad de producción 0.200 a 0.500 kg/h	4	--	0.125 a 0.200 kg/h	0.200 kg/h	5 ft / min 1 kg/h
Diámetro del filamento 1.75 mm	4	1.75, 2.85 mm, * Otro	1.75, 3.0 mm	1.75, 3.0 mm	1.75, 3.0 mm
Tolerancia ±0.02 mm	4	± 0,05 mm con Filabot spooler	ABS: ± 0,02 mm PLA: ± - 0,03mm PP: ± 0,07 mm	1,75 ± 0,10 mm 3 ± 0,10 mm	Tolerancias líderes de la industria
Diferencia entre los radios mayor y menor 0.05 mm	4	--	--	--	--
Relación de compresión en el husillo	4	--	--	--	--
Antioxidantes, antiestáticos y lubricantes externos	4	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Pigmentos
Piezas comerciales o manufacturadas en la UTM	4	Diseño propio	Diseño propio	Diseño con componentes comerciales	Diseño propio
Actividades preparatorias	3	Industrial	No,	No,	Si
Trituración de fibras, longitud menor al diámetro de un pellet de 27mm <sup>3</sup> = 1.8 – 3.7		Reclaimer 6.35 mm pellets	Residuos entrada < 5 mm	Pellets	Piezas de desecho impresas en 3D
A.P. No necesita lavado	3	No	No	No	No
Detención de impurezas en el proceso	3	Desc	Opcional	No	Desc
A.P. No necesita secado previo	3	No	No	No	No
A.P. Separación por colores	3	Si	Si	Si	No
A.P. Separación por tipos de fibra	3	No	No	No	No
Fácil de operar y limpieza de la maquinaria	1	Medio	Medio	Bajo	Alto

Nota: Desc: Desconocido. A.P.: Actividades preparatorias. Imp.: Importancia



Tabla C.2. Análisis de la competencia. Filamento para impresoras 3D. Fuente: Elaboración propia.

Métricas	PLA	ABS	PP
Parámetros por utilizar:			
Temperatura de fusión = 140 - 160	5	--	--
Temperatura del proceso de extrusión = 200 - 260	5	** 225	--
Temperatura de reblandecimiento Vicat = 140 - 160	5	105	160
Calor específico = 1.93	5	** 1.47	--
Calor latente de fusión = 100	5	--	--
Densidad en estado sólido = 0.90 - 0.91	5	1.05	0.95
Densidad en estado fundido = 0.72	5	* 1.00	--
Índice de fluidez a 230°C con una presión de 3.041 Kg/cm <sup>2</sup>	5	--	--
2.16			
Coefficiente de fricción ( $\lambda$ ) = 0.67	5	--	--
Viscosidad a 250°C con una velocidad de corte de 1000 s <sup>-1</sup>	5	--	--
100			
Coefficiente de expansión = $8 \times 10^{-5}$	5	--	--
Otros parámetros	--	--	--
Diámetro del filamento = 1.75	4	1.75	1.75
		3.00	
Contracción del material = 1.5% - 2.5%	4	--	--
Actividades preparatorias	3	No	No
No necesita secado previo		0.20 - 0.40 %	
Absorción de humedad			
0.02 %			
Actividades preparatorias	3	Varios colores	Blanco
Separación por colores			
Parámetros finales	3	190 - 230	230 - 250
Temperatura de fusión del filamento entre 150 a 250			250 - 280
Temperatura de cama	--	Temp. ambiente	100-120
			120 - 150

Nota: U.: Unidades. Imp.: Importancia. Temp.: Temperatura.  
Fuentes: (CREATEBOT México, 2017), \* (Ramos, 2013), \*\* (Morton, 2012).

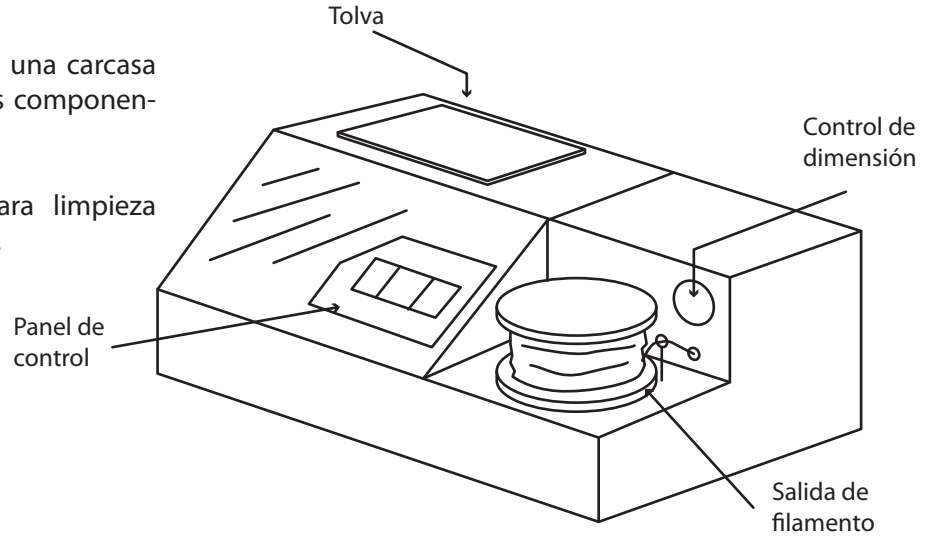


## ANEXO D. Conceptualización 1

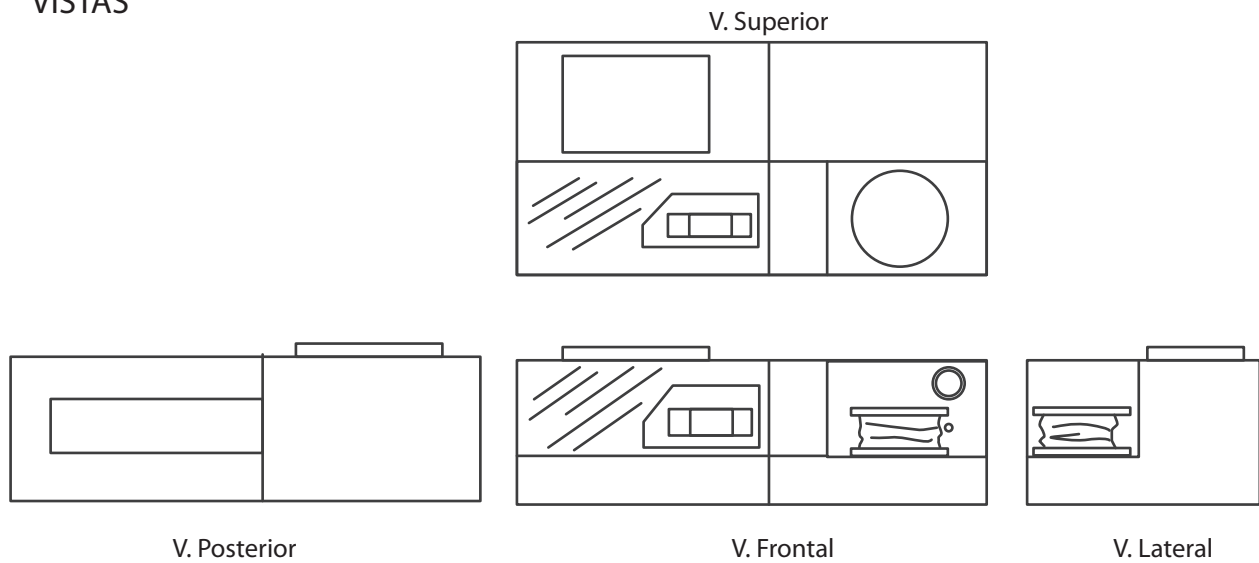
### CONCEPTO 1

Unión de componentes en una carcasa para tener el control de los componentes en la vista frontal.

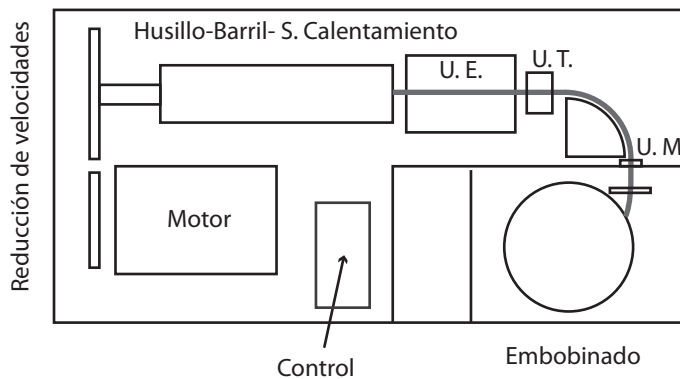
División de la carcasa para limpieza profunda del husillo - barril.



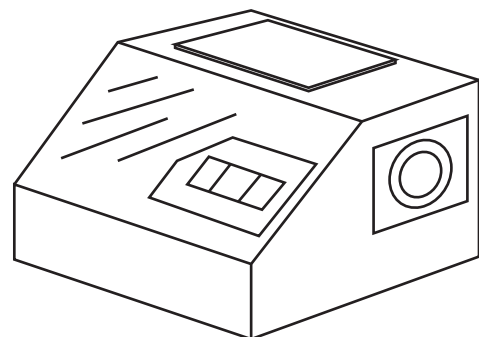
### VISTAS



### COMPONENTES

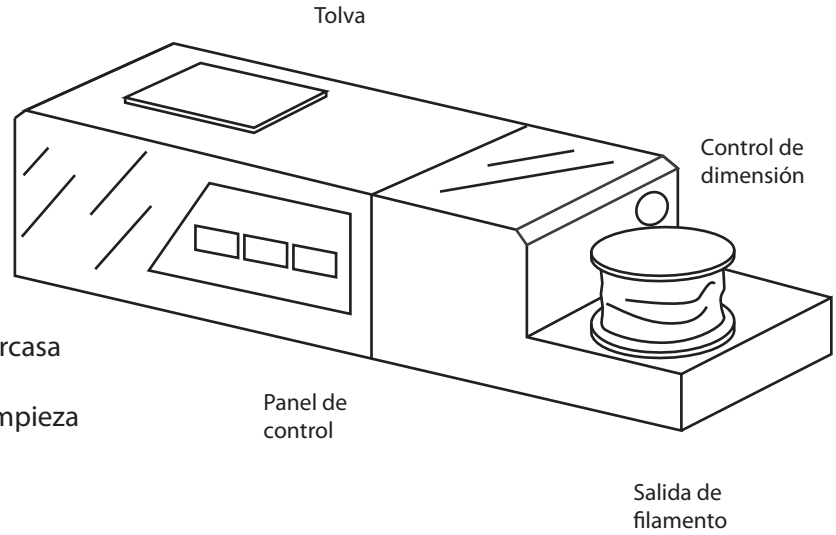


### APERTURA PARA LIMPIEZA



Nota: U. E.: Unidad de Enfriamiento. U. T.: Unidad de Tiro. U. M.: Unidad de Medición

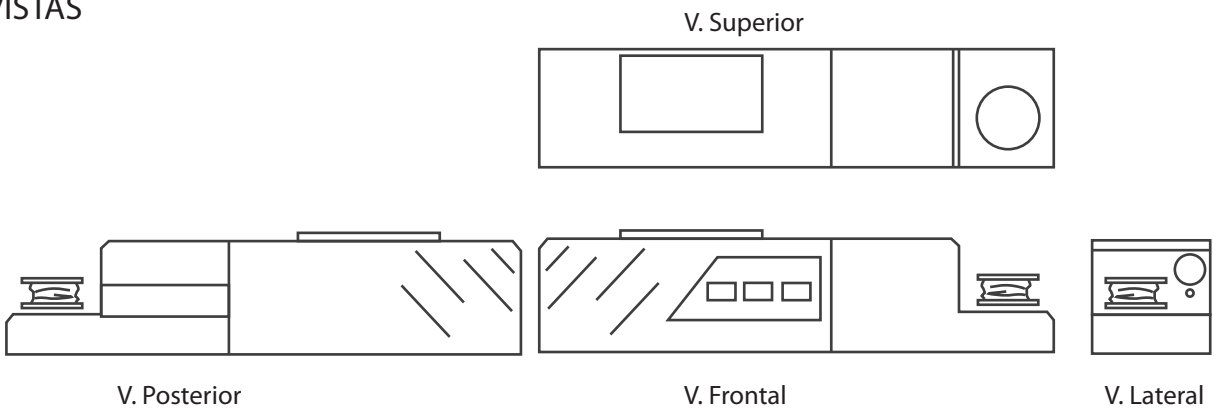
**CONCEPTO 2**



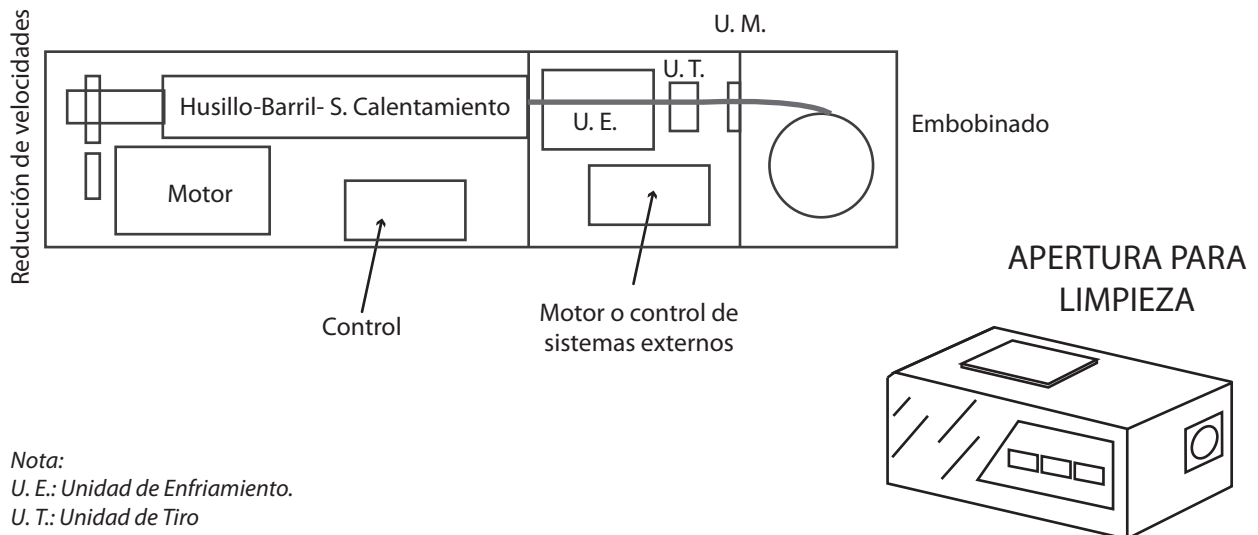
Unión de componentes en una carcasa

División de la carcasa para limpieza profunda del husillo - barril.

**VISTAS**



**COMPONENTES**



Nota:

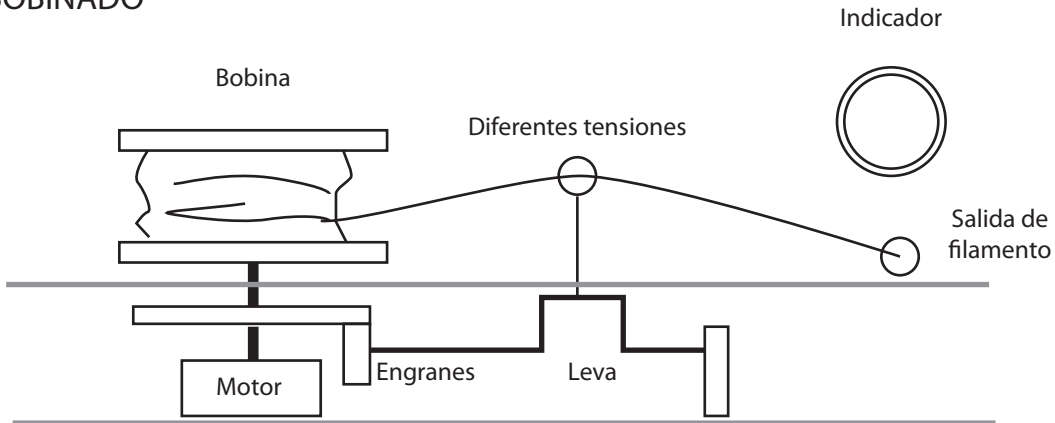
U. E.: Unidad de Enfriamiento.

U. T.: Unidad de Tiro

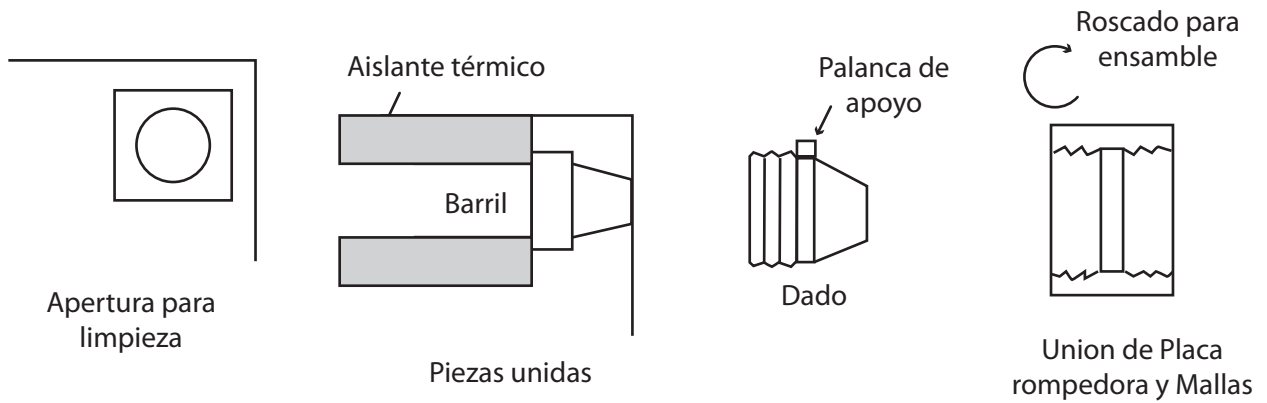
U. M.: Unidad de Medición

### DETALLES

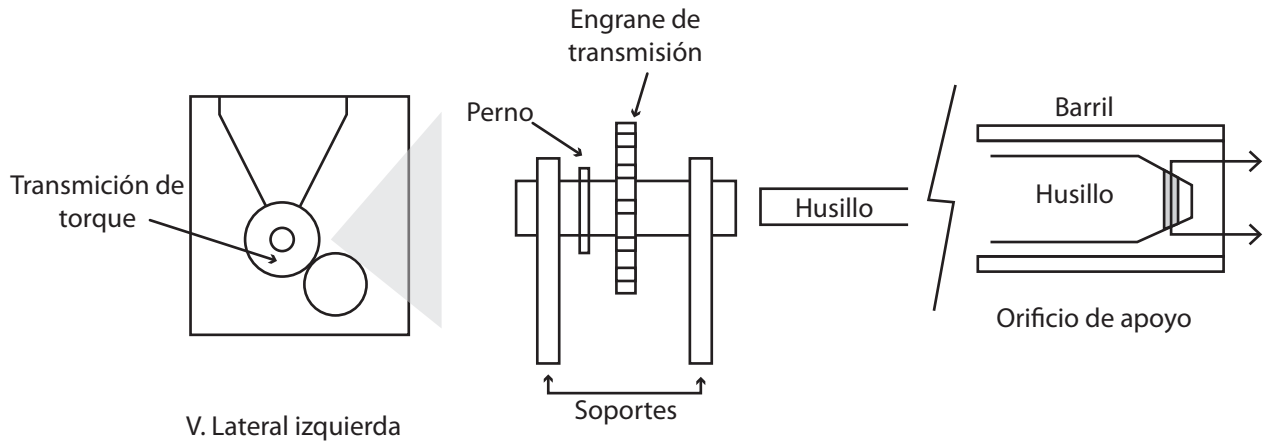
#### EMBOBINADO



#### LIMPIEZA PROFUNDA



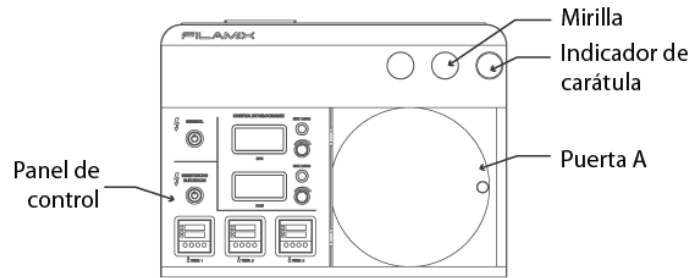
#### SUJECIÓN DEL HUSILLO



## ANEXO E: Manual de funcionamiento

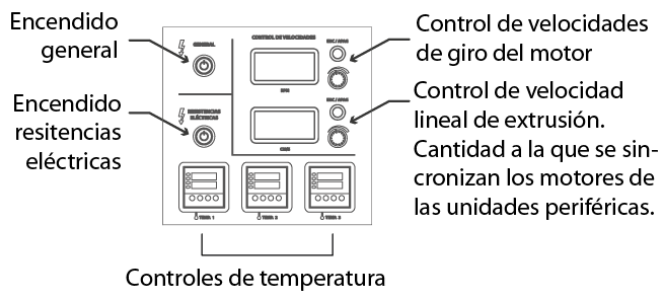
### Extrusora FILAMIX

#### Partes de la máquina

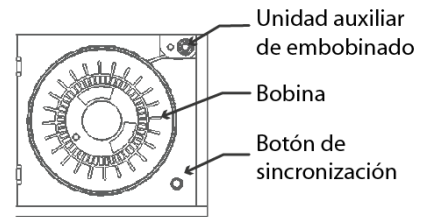


Vista frontal

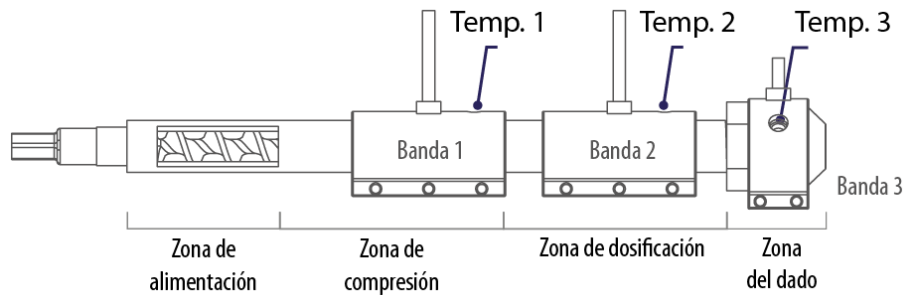
#### Panel de control



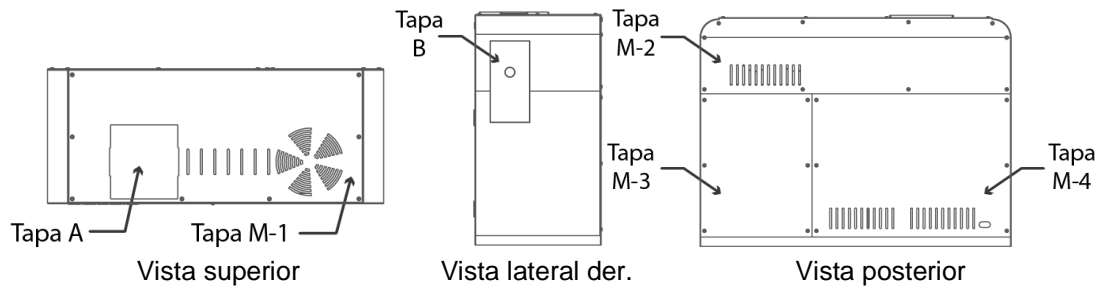
#### Detalle 1. Puerta A



#### Zonas del husillo



#### Elementos de carcasa



## FUNCIONAMIENTO

1. Conecte el equipo a una fuente de alimentación monofásica.
2. Presione el botón de encendido general
3. Presione el botón de encendido para las resistencias eléctricas
4. Configure el perfil de temperaturas en el panel de control

Ubicación	Temperatura recomendada Material [PP reciclado]
Temp. 1. Zona de compresión	230°C
Temp 2. Zona de dosificación	210°C
Temp 3. Zona del dado	210°C

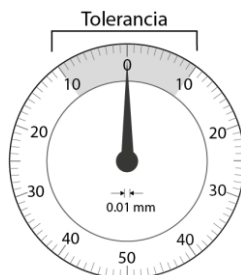
5. Active el sistema de control de velocidades de extrusión [cm/s]. Con ello, se activará el funcionamiento del ventilador y la unidad de tiro.
6. Retire la tapa B, en caso de que exista material en el husillo, este empezará a salir por lo que se debe dejar que fluya libremente fuera del extrusor.
7. Espere a que el perfil de temperaturas sea alcanzado, tiempo estimado de 5 min.
8. Cargue la tolva con el material reciclado (abra la tapa A). Capacidad aprox. de 135 g de PP sin compactar.
9. Encienda el motor de la extrusora, con el control de velocidades [rpm].
10. Modifique con la perilla al valor mostrado al 85%, que equivale a la velocidad del motor recomendada para el PP reciclado sin margen de seguridad. Para modificaciones fuera de este valor considere la siguiente tabla:

Porcentaje	Velocidad del motor [rpm]
100	40
90	36
85	34
80	32
70	28

Verifique que el material extruido salga por la apertura de la tapa B.

### 11. Calibración del material

La calibración consiste en lograr que el perfil extruido se encuentre dentro del rango de tolerancia en el indicador de carátula [ $\pm 0.10$  mm], como se muestra en la imagen antes de iniciar el embobinado.

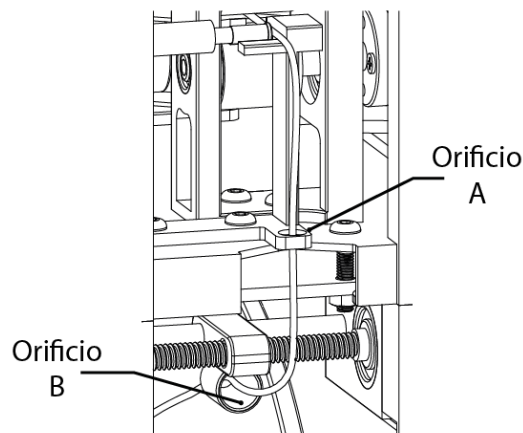


Para ello, se deben ajustar los siguientes parámetros aumentando o disminuyendo los valores:

- Velocidad del motor [rpm]
- Velocidad de extrusión [cm/s]
- Perfil de temperaturas

Nota: El indicador de carátula y el sistema de tiro están calibrados a un perfil extruido de 1.75 mm de diámetro.

- Una vez que el perfil se encuentra en la tolerancia, cortar el material que no sirve y la punta del material hacerla pasar por el orificio A y B (unidad auxiliar de embobinado).



Apertura, Tapa B

- Quitar la bobina, ajustar el material en la bobina, colocarla y presionar el botón de sincronización.
- Verificar que la extrusión siga siendo consistente.

Nota: El tiempo estimado para llenar la bobina es de 2hrs, con capacidad de 500gr. Cargar la tolva de material cada 30 min.

**IMPORTANTE:** No se recomienda pausar la extrusión, debido a que el perfil tendrá cambios en el diámetro al iniciar la extrusión nuevamente.

- Una vez terminada la extrusión:

Para una nueva bobina, no apague ningún sistema, solo presione el botón de sincronización, retire la bobina y nuevamente coloque el material en la otra y sincronice.

Para continuar extruyendo después, apagar el motor de la extrusora y las resistencias eléctricas, la unidad de tiro permanecerá funcionando unos minutos extra, para que el material del dado sea evacuado. Sacar este material por la apertura B, para dejar limpio los sistemas periféricos. Apagar el control de velocidades [cm/s], cerrar la apertura B y desconectar el cable de alimentación.

## MANTENIMIENTO

La extrusora FILAMIX, cuenta con la facilidad de apertura de las tapas M-1, M-2, M-3, para el acceso a las unidades y desensamblarlas fácilmente para su limpieza o cambio de componentes.

