



**UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL  
ECUADOR**

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGÍAS  
APLICADAS**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA ELABORADORA DE  
HILO PET**

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

**NARANJO IZURIETA CHRISTIAN EDUARDO**

**DIRECTOR: ING. PABLO VELARDE RUEDA, MSc.**

**Quito, Febrero 2015**

## DECLARACIÓN

Yo CHRISTIAN EDUARDO NARANJO IZURIETA, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Internacional del Ecuador, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

-----

CHRISTIAN EDUARDO NARANJO IZURIETA

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por CHRISTIAN EDUARDO NARANJO IZURIETA, bajo mi supervisión.

---

**ING. PABLO VELARDE RUEDA, MSc.**

**DIRECTOR DE PROYECTO**

## DEDICATORIA

La síntesis de toda mi vida universitaria se ve reflejada en este trabajo, el cual todo el esfuerzo que representó, noches sin dormir, preocupación, viajes imprevistos desde Guayaquil vía aérea o terrestre, entre muchos factores, se lo dedico a mis tres mujeres que amo con todo mi corazón.

A mi Madre que con todo su esfuerzo me forjó y soy la persona de bien gracias a ella, me enseñó el valor de la paciencia y que poco a poco se llega a los objetivos. Gracias mami por todo lo bueno que me has enseñado y sobre todo por ser mi apoyo en cada paso que he dado.

A mi hermana que me ha acompañado desde el vientre de nuestra madre y ha compartido conmigo cada logro alcanzado. Gracias nena por apoyarme y darme la fuerza para tomar decisiones que eran indispensables en mi vida.

A mi novia que ha sido un pilar, demostrándome todo su amor y preocupación para poder cumplir con este objetivo. Gracias amor por estar conmigo siempre en las buenas y en las pésimas.

Christian Eduardo Naranjo Izurieta

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por ser tan bondadoso conmigo y darme todo lo que tengo.

Agradezco a mi madre que me ha ayudado constantemente en cada uno de los pasos que he dado.

Agradezco a cada uno de mis tíos por ser de tan buen corazón y siempre estar pendientes no sólo cuando lo necesito, sino por ser mis segundos padres y amarnos tanto.

A mis primos que me han apoyado incondicionalmente en este gran proyecto.

Agradezco a mi tutor de proyecto de fin de carrera, sin su guía, asesoramiento y gestión no hubiese culminado con éxito este proyecto.

Christian Eduardo Naranjo Izurieta

## ÍNDICE

<b>DECLARACIÓN .....</b>	<b>II</b>
<b>CERTIFICACIÓN .....</b>	<b>III</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>IV</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>V</b>
<b>CAPÍTULO I GENERALIDADES .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 PROBLEMÁTICA Y MOTIVACIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3 ANTECEDENTES.....</b>	<b>5</b>
1.3.1 HISTORIA .....	5
1.3.2 SITUACIÓN ACTUAL.....	5
1.3.3. RECICLADO DE BOTELLAS.....	7
1.3.4. GRÁNULOS (PELLETS) DE PET .....	8
1.3.5 EXTRUSIÓN DE MATERIALES PLÁSTICOS .....	11
1.3.5.1 Extrusión en Caliente .....	13
1.3.5.2 Extrusión en frío .....	13
1.3.6 PROCESO DE PRODUCCIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE FIBRAS .....	14
1.3.7 BOBINADO DE HILOS.....	16
<b>CAPÍTULO II ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.....</b>	<b>17</b>
2.1.1 VOZ DEL USUARIO .....	17
2.1.2 VOZ DEL INGENIERO.....	18
<b>2.2 MATRIZ DE SELECCIÓN PUGH .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.1 SUBSISTEMA A: ALIMENTACIÓN .....</b>	<b>20</b>
2.2.1.1 Alternativa 1: Tolva de Sección Rectangular .....	20
2.2.1.2 Alternativa 2: Tolva de Sección Circular .....	21
2.2.1.3 Criterios de Selección del Subsistema A .....	22
<b>2.2.2 SUBSISTEMA B: EXTRUSIÓN .....</b>	<b>24</b>
2.2.2.1 Alternativa 1: Extrusora Monohusillo.....	24
2.2.2.2 Alternativa 2: Extrusor de Doble Husillo Engranado .....	25
2.2.2.3 Alternativa 3: Extrusor de Doble Husillo no Engranado .....	26
2.2.2.4 Criterios de Selección del Subsistema B .....	27
<b>2.2.3 SUBSISTEMA C: ENFRIAMIENTO .....</b>	<b>30</b>
<b>2.2.4 SUBSISTEMA D: BOBINADO .....</b>	<b>31</b>
2.2.4.1 Alternativa 1: Motor a Pasos .....	31
2.2.4.2 Alternativa 2: Servomotor.....	32
2.2.4.3 Alternativa 3: Motor de Corriente Continua.....	33
2.2.4.4 Criterios de Selección del Subsistema D .....	34
<b>2.2.5 SUBSISTEMA E: SISTEMA DE CONTROL PARA LA TEMPERATURA .....</b>	<b>36</b>
2.2.5.1 Alternativa 1: Control ON-OFF .....	37
2.2.5.2 Alternativa 2: Control Proporcional (P).....	38
2.2.5.3 Alternativa 3: Control Proporcional Integral (PI).....	39
2.2.5.4 Criterios de Selección del Subsistema E .....	39
<b>2.3 MATRIZ MORFOLÓGICA .....</b>	<b>41</b>

<b>CAPÍTULO III DISEÑO MECATRÓNICO .....</b>	<b>43</b>
<b>3.1 PARÁMETROS MECÁNICOS DE LA EXTRUSORA.....</b>	<b>43</b>
<b>3.1.1 COMPONENTES DE UNA EXTRUSORA.....</b>	<b>43</b>
<b>3.1.2 DIMENSIONAMIENTO DEL HUSILLO .....</b>	<b>44</b>
3.1.2.1 Diámetro.....	44
3.1.2.2 Longitud.....	44
3.1.2.3 Paso de los filetes .....	44
3.1.2.4 Ancho de los filetes .....	44
3.1.2.5 Ángulo de hélice de canal .....	45
3.1.2.6 Caudal de la extrusora .....	45
3.1.2.7 Número de filetes .....	45
3.1.2.8 Potencia requerida .....	45
3.1.2.9 Presión de operación .....	45
3.1.2.10 Peso del husillo .....	45
3.1.2.11 Zonas del husillo .....	46
3.1.2.12 Material del husillo.....	46
<b>3.1.3 DIMENSIONAMIENTO DE LA CAMISA .....</b>	<b>46</b>
3.1.3.1 Holgura .....	46
3.1.3.2 Longitud.....	46
3.1.3.3 Material de la camisa .....	46
<b>3.1.4 DIMENSIONAMIENTO DE LA TOLVA .....</b>	<b>47</b>
3.1.4.1 Diámetro superior .....	47
3.1.4.2 Diámetro inferior .....	47
3.1.4.3 Altura del cono .....	47
3.1.4.4 Altura del cilindro.....	47
3.1.4.5 Ángulo de la pared .....	48
3.1.4.6 Material de la tolva .....	48
<b>3.1.5 SECCIÓN DE HILATURA.....</b>	<b>48</b>
3.1.5.1 Boquilla.....	48
3.1.5.2 Recibidor .....	48
<b>3.2 DISEÑO ELECTRÓNICO .....</b>	<b>49</b>
<b>3.2.1 CALENTAMIENTO DEL PET .....</b>	<b>49</b>
<b>3.2.2 SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA.....</b>	<b>53</b>
3.2.2.1 Termocupla.....	53
3.2.2.2 Controlador de Temperatura .....	55
3.2.2.2 Relé de estado sólido.....	56
<b>3.2.4 SELECCIÓN DEL MOTORREDUCTOR PARA HUSILLO .....</b>	<b>58</b>
<b>3.2.4 VARIADOR DE FRECUENCIA PARA MOTORREDUCTOR .....</b>	<b>59</b>
<b>3.3 SEGURIDAD FUNCIONAL DEL PROTOTIPO .....</b>	<b>60</b>
<b>3.3.1 MAPA DE RIESGOS .....</b>	<b>61</b>
<b>3.3.2 IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS Y EVALUACIÓN DE RIESGOS (MATRIZ DE RIESGOS).....</b>	<b>63</b>
<b>3.4 SISTEMA DE BOBINADO DEL HILO .....</b>	<b>65</b>
<b>CAPÍTULO IV CONSTRUCCIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS .....</b>	<b>68</b>
<b>4.1 CONSTRUCCIÓN MECÁNICA.....</b>	<b>68</b>
<b>4.2 IMPLEMENTACIÓN ELECTRÓNICA.....</b>	<b>77</b>
<b>4.3 PRUEBAS Y RESULTADOS.....</b>	<b>80</b>



<b>ANEXO J – CLASE DE RUGOSIDAD.....</b>	<b>143</b>
<b>ANEXO K – PRUEBAS DE LABORATORIO DEL HILO PRODUCIDO .....</b>	<b>144</b>
<b>ANEXO L – ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE ENKADOR .....</b>	<b>146</b>
<b>MANUAL DEL USUARIO .....</b>	<b>147</b>
<b>MANUAL DE MANTENIMIENTO.....</b>	<b>151</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1:</b> Árbol de Problemas.....	2
<b>Figura 1.2:</b> Árbol de Objetivos.....	3
<b>Figura 1.3:</b> Esquema general de funcionamiento de la máquina.....	4
<b>Figura 1.4:</b> Ciclo de Reciclado de Botellas.....	8
<b>Figura 1.5:</b> Gránulo Pellet Amorfo.....	9
<b>Figura 1.6:</b> Gránulo Pellet Cristalizado.....	10
<b>Figura 1.7:</b> Zonas de la extrusora.....	12
<b>Figura 1.8:</b> Ejemplo de extrusión en frío.....	13
<b>Figura 1.9:</b> Hilatura por Fusión.....	15
<b>Figura 1.10:</b> Bobinadora textil.....	16
<b>Figura 2.1:</b> Tolva Rectangular.....	20
<b>Figura 2.2:</b> Tolva Circular.....	21
<b>Figura 2.3:</b> Extrusora Husillo Sencillo.....	24
<b>Figura 2.4:</b> Husillo Doble Engranado.....	26
<b>Figura 2.5:</b> Doble Husillo no Engranado.....	27
<b>Figura 2.6:</b> Ventilador de enfriamiento CMP-FAN25.....	30
<b>Figura 2.7:</b> Motor a Pasos S7BYGH420.....	31
<b>Figura 2.8:</b> Servomotores HiTec.....	32
<b>Figura 2.9:</b> Motor de Corriente Continua.....	34
<b>Figura 2.10:</b> Control ON - OFF.....	37
<b>Figura 2.11:</b> Control Proporcional.....	38
<b>Figura 2.12:</b> Control Proporcional Integral.....	39

<b>Figura 2.13:</b> Selección de alternativas de todos los subsistemas.....	42
<b>Figura 3.1:</b> Componentes de la extrusora. ....	43
<b>Figura 3.2:</b> Parámetros del husillo. ....	44
<b>Figura 3.3:</b> Parámetros de la tolva. ....	47
<b>Figura 3.4:</b> Boquilla.....	48
<b>Figura 3.5:</b> Vista lateral del recibidor.....	49
<b>Figura 3.6:</b> Corte longitudinal de la extrusora. ....	49
<b>Figura 3.7:</b> Representación de la camisa extendida.....	50
<b>Figura 3.8:</b> Calefactores tubulares blindados.....	51
<b>Figura 3.9:</b> Termocupla Tipo J.....	54
<b>Figura 3.10:</b> Módulo Controlador de Temperatura iBest TCM SR4.....	55
<b>Figura 3.11:</b> Diagrama del controlador de temperatura digital iBest TCM SR4..	55
<b>Figura 3.12:</b> Gráfico de Control ON - OFF.....	56
<b>Figura 3.13:</b> Relé de estado sólido.....	57
<b>Figura 3.14:</b> Dimensiones Relé de Estado Sólido.....	57
<b>Figura 3.15:</b> Motor trifásico M2QA 80 M4B.....	59
<b>Figura 3.16:</b> Variador de Frecuencia LS SV008iG5A-2.....	60
<b>Figura 3.17:</b> Mapa de Riesgos.....	62
<b>Figura 3.18:</b> Módulo Arduino UNO.....	65
<b>Figura 3.19:</b> Motor DC con reductor de engranajes.....	66
<b>Figura 3.20:</b> Ventilador Techman VN-2350.....	67
<b>Figura 3.21:</b> Diagrama de conexión Arduino.....	67
<b>Figura 4.1:</b> Esquema de la máquina PET Spinning V1.0.....	68

<b>Figura 4.2:</b> Husillo Simple.....	69
<b>Figura 4.3:</b> Camisa de la extrusora.....	69
<b>Figura 4.4:</b> Boquilla de la extrusora.....	69
<b>Figura 4.5:</b> Tolva de Alimentación.....	70
<b>Figura 4.6:</b> Bases para la camisa.....	70
<b>Figura 4.7:</b> Calefactor.....	71
<b>Figura 4.8:</b> Ensamble de la camisa y calefactor.....	71
<b>Figura 4.9:</b> Colocación de bases.....	72
<b>Figura 4.10:</b> Ensamble del husillo en la camisa.....	72
<b>Figura 4.11:</b> Implementación del motor.....	73
<b>Figura 4.12:</b> Ensamble de la tolva.....	73
<b>Figura 4.13:</b> Ensamble Boquilla-Recibidor.....	74
<b>Figura 4.14:</b> Ensamble Calefactor del Recibidor.....	74
<b>Figura 4.15:</b> Base de la estructura.....	75
<b>Figura 4.16:</b> Ventiladores de enfriamiento del PET .....	75
<b>Figura 4.17:</b> Motor Bobinador .....	76
<b>Figura 4.18:</b> Brazo mecánico.....	76
<b>Figura 4.19:</b> Implementación de termocuplas.....	77
<b>Figura 4.20:</b> Implementación de los controles de temperatura.....	77
<b>Figura 4.21:</b> Conexión de controladores y RSS.....	78
<b>Figura 4.22:</b> Diagrama de control.....	78
<b>Figura 4.23:</b> Conexión del Variador.....	79
<b>Figura 4.24:</b> Conexión del sistema bobinador.....	79

<b>Figura 4.25:</b> Controladores de temperatura en funcionamiento.....	80
<b>Figura 4.26:</b> Medición de Masa.....	82
<b>Figura 4.27:</b> Prueba de elongación y tracción.....	83
<b>Figura 4.28:</b> Tendencia de resistencia.....	85
<b>Figura 4.29:</b> Tendencia de elongación .....	86
<b>Figura 4.30:</b> Bobinador del hilo PET.....	88
<b>Figura A.1:</b> Vista lateral del husillo simple.....	99
<b>Figura A.2:</b> Sección de un husillo de un canal.....	101
<b>Figura A.3:</b> Diferentes entradas en el husillo.....	103
<b>Figura A.4:</b> Dimensiones de husillo zona de dosificación.....	103
<b>Figura A.5:</b> Intervalos de Velocidad de Cortadura .....	107
<b>Figura A.6:</b> Zonas del Husillo.....	109
<b>Figura A.7:</b> Radio y longitud de la zona de alimentación.....	112
<b>Figura A.8:</b> Radio y longitud de la zona de transición.....	113
<b>Figura A.9:</b> Radio y longitud de la zona de dosificación.....	113
<b>Figura A.10:</b> Representación de filete extendido para obtener su longitud....	114
<b>Figura A.11:</b> Representación del filete de alimentación.....	115
<b>Figura A.12:</b> Sección del Filete en la zona cónica.....	116
<b>Figura A.13:</b> Sección de filete zona de dosificación.....	118
<b>Figura A.14:</b> Volumen del Alma y Volumen de Filetes.....	118
<b>Figura A.15:</b> Diagrama de Fuerzas del Husillo.....	119
<b>Figura A.16:</b> Corte transversal de los diámetros del husillo.....	121
<b>Figura A.17:</b> Cuña y chavetero.....	126
<b>Figura A.18:</b> Medida Nominal de la Chaveta en mm.....	126
<b>Figura A.19:</b> Dimensiones Tolva en cm.....	128

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1:</b> Voz del usuario vs. Voz del ingeniero .....	18
<b>Tabla 2.2:</b> Ejemplo de ponderación de la Matriz Pugh .....	19
<b>Tabla 2.3:</b> Ventajas-Desventajas: Tolva Rectangular .....	21
<b>Tabla 2.4:</b> Ventajas-Desventajas: Tolva Circular .....	21
<b>Tabla 2.5:</b> Ponderación de Criterios del Subsistema A.....	22
<b>Tabla 2.6:</b> Criterios de Selección: Flujo de la Materia Prima .....	22
<b>Tabla 2.7:</b> Criterios de Selección: Costo.....	23
<b>Tabla 2.8:</b> Criterios de Selección: Tiempo de Construcción .....	23
<b>Tabla 2.9:</b> Criterios de Selección: Mantenimiento.....	23
<b>Tabla 2.10:</b> Ponderación de Criterios vs. Alternativas del Subsistema A .....	24
<b>Tabla 2.11:</b> Ventajas – Desventajas: Husillo Simple.....	25
<b>Tabla 2.12:</b> Ventajas – Desventajas: Husillo Engranado.....	26
<b>Tabla 2.13:</b> Ventajas – Desventajas: Husillo No Engranado.....	27
<b>Tabla 2.14:</b> Ponderación de Alternativas del Subsistema B.....	28
<b>Tabla 2.15:</b> Criterios de Selección: Costo.....	28
<b>Tabla 2.16:</b> Criterios de Selección: Tiempo de Producción.....	28
<b>Tabla 2.17:</b> Criterios de Selección: Arrastre del Material.....	29
<b>Tabla 2.18:</b> Criterios de Selección: Precisión de Ensamblado.....	29
<b>Tabla 2.19:</b> Ponderación de Criterios vs. Alternativas del Subsistema B.....	29
<b>Tabla 2.20:</b> Ventajas – Desventajas: Motor a Pasos.....	32
<b>Tabla 2.21:</b> Ventajas – Desventajas: Servomotores.....	33
<b>Tabla 2.22:</b> Ventajas – Desventajas: Motor DC.....	34
<b>Tabla 2.23:</b> Ponderación de Alternativas del Subsistema D.....	35
<b>Tabla 2.24:</b> Criterios de Selección: Costo.....	35

<b>Tabla 2.25:</b> Criterios de Selección: Giro del Motor.....	35
<b>Tabla 2.26:</b> Criterios de Selección: Precisión.....	35
<b>Tabla 2.27:</b> Criterios de Selección: Mantenimiento.....	36
<b>Tabla 2.28:</b> Ponderación de Criterios vs. Alternativas del Subsistema D.....	36
<b>Tabla 2.29:</b> Ventajas – Desventajas: Controlador ON- OFF.....	38
<b>Tabla 2.30:</b> Ventajas – Desventajas: Controlador P.....	38
<b>Tabla 2.31:</b> Ventajas – Desventajas: Controlador PI.....	39
<b>Tabla 2.32:</b> Ponderación de Alternativas del Subsistema E.....	40
<b>Tabla 2.33</b> Criterios de Selección: Tiempo de respuesta.....	40
<b>Tabla 2.34</b> Criterios de Selección: Perturbaciones.....	40
<b>Tabla 2.35</b> Criterios de Selección: Costo.....	41
<b>Tabla 2.36:</b> Ponderación de Criterios vs. Alternativas del Subsistema E.....	41
<b>Tabla 3.1:</b> Características de Termocupla Tipo J.....	54
<b>Tabla 3.2:</b> Características generales del controlador de temperatura.....	56
<b>Tabla 3.3:</b> Características generales del relé de estado sólido.....	57
<b>Tabla 3.4:</b> Características generales para la selección del motor.....	58
<b>Tabla 3.5:</b> Catálogo de Motores ABB.....	58
<b>Tabla 3.6:</b> Características Motorreductor.....	59
<b>Tabla 3.7:</b> Factores de riesgo.....	61
<b>Tabla 3.8:</b> Matriz de Riesgos.....	64
<b>Tabla 3.9:</b> Características del Motor DC.....	66
<b>Tabla 4.1:</b> Funcionamiento del Control de Temperatura.....	80
<b>Tabla 4.2:</b> Tiempo para la Temperatura de Operación.....	81
<b>Tabla 4.3:</b> Temperatura de Ingreso y Estado del Material.....	81

<b>Tabla 4.4:</b> Cantidad Producida.....	82
<b>Tabla 4.5:</b> Tiempo de Solidificación.....	83
<b>Tabla 4.6:</b> Prueba de laboratorio: Muestra 1.....	84
<b>Tabla 4.7:</b> Prueba de laboratorio: Muestra 2.....	84
<b>Tabla 4.8:</b> Prueba de laboratorio: Muestra 3.....	84
<b>Tabla 4.9:</b> Comparación del hilo industrial.....	87
<b>Tabla 4.10:</b> Revoluciones para el bobinado del hilo.....	88
<b>Tabla A.1:</b> Parámetros geométricos de los husillos.....	99
<b>Tabla A.2:</b> Guía para el Diseño de un Husillo .....	101
<b>Tabla A.3:</b> Materiales para Husillos.....	125
<b>Tabla A.4:</b> Medidas de Chavetas.....	127

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación plantea el diseño de una máquina mecatrónica la cual permita satisfacer necesidades del mercado de reciclaje de botellas hechas a base del Tereftalato de Polietileno (PET).

Dicha necesidad surge en base de una aplicación concreta y sustentable para el material reciclado de los envases. El reciclaje en el país es una práctica que está ganando fuerza, por lo cual la aplicación planteada a través de un proceso mecatrónico resuelve esta inquietud.

El documento contempla las generalidades donde se analiza desde la problemática hasta el árbol de objetivos, mostrando todo lo referente a los sistemas de procesamiento del PET reciclado para llevar a un estado de fundición, características del material, entre otros. Así mismo, posterior a estas generalidades, se realiza una división de la máquina en subsistemas, lo que permite analizar cuáles son las mejores alternativas para ser utilizadas en la construcción de la máquina.

Una vez analizadas las mejores alternativas, se procede a realizar el dimensionamiento de cada uno de los subsistemas que están involucrados en la máquina, este diseño permite adquirir materiales específicos para la aplicación. De igual manera se realiza la simulación de la máquina para así obtener planos y proceder con la construcción utilizando los materiales adecuados.

Por último, se realizan las pruebas y se presentan los resultados que permite corregir desviaciones de la máquina y calibrarla para obtener el producto final planteado el cual es el hilo a base de PET reciclado.

# CAPÍTULO I

## GENERALIDADES

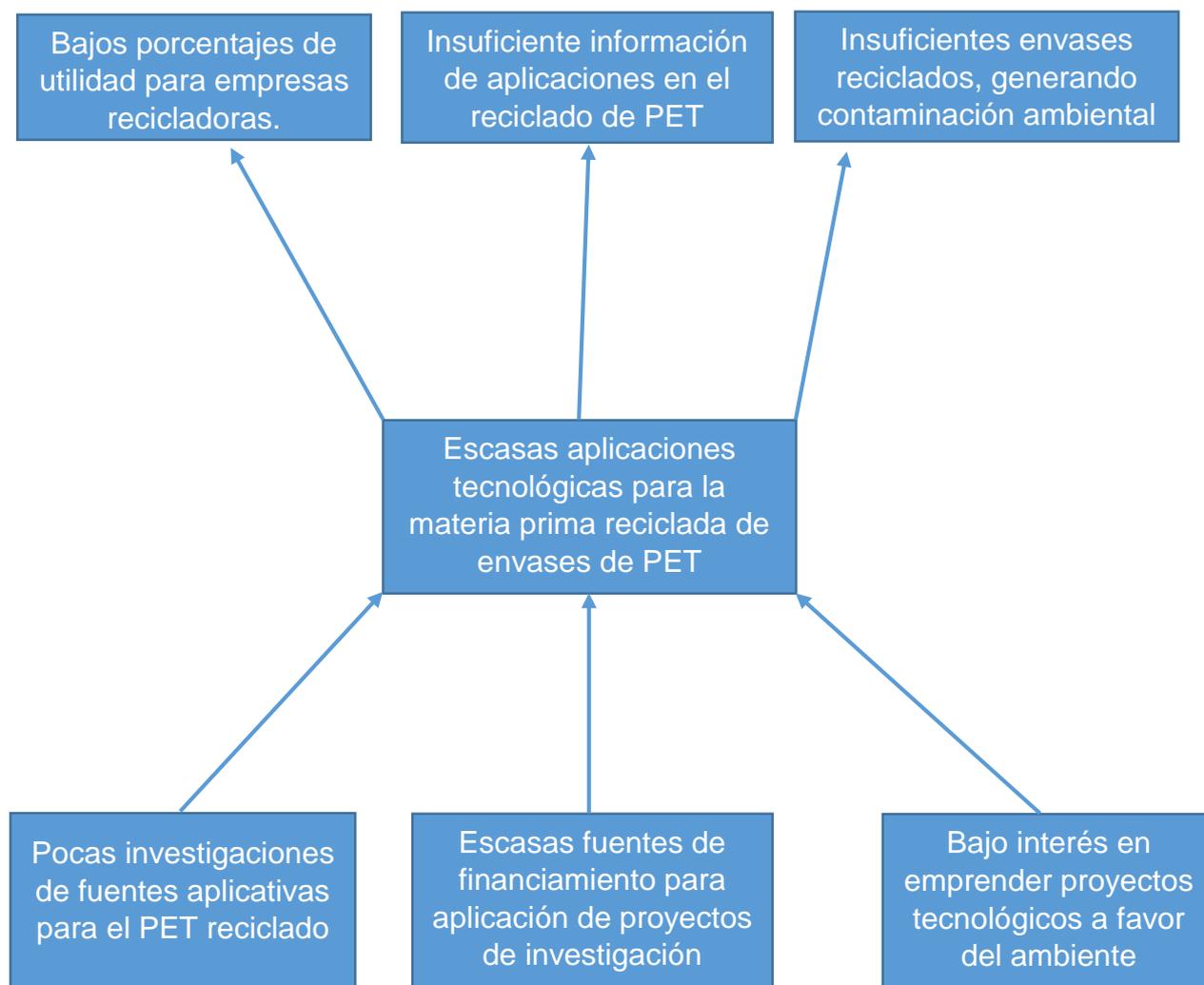
En este capítulo se muestra cuál es la problemática desde la visión del autor y la base para la motivación de la creación del proyecto, planteando el árbol de problemas y objetivos. Todos los antecedentes mostrados en este capítulo van desde el reciclado de las botellas hasta el bobinado del hilo.

### 1.1 PROBLEMÁTICA Y MOTIVACIÓN

Debido a la infinidad de procesos de manufactura existentes en la actualidad se obtienen nuevos productos que han pasado por etapas de diseño tradicional, las cuales consisten en la concepción de ideas que parten de una necesidad hasta convertirlo en un diseño de ingeniería. Los productos elaborados por las industrias deben ser medidos en base a parámetros como calidad, precio, tiempo de entrega, flexibilidad e innovación, que permitirán saber el nivel de producto entregado a los usuarios [1].

Para la mejora de estos parámetros en las industrias se han implementado métodos de fabricación como la manufactura esbelta o la manufactura de clase mundial, lo que permitirá elevar los estándares de los productos y entrar en la competencia con otras compañías. Todos los campos impuestos por los diferentes métodos de manufactura deben ser cumplidos en base a la mejora continua, innovación, optimización que se logra con la aplicación correcta de la ingeniería [1].

Partiendo de esta introducción la problemática comienza con la generación de ideas para solucionar una de las primeras etapas de reciclaje de PET (Tereftalato de polietileno) [2], el cual es: ¿Qué aplicación debe darse a la materia prima obtenida post reciclaje, de forma que se pueda aplicar métodos mecatrónicos para la obtención de producto final y se pueda medir los campos de competitividad del mercado mundial? En la Figura 1.1 se muestra el árbol de problemas que explica de mejor manera de dónde surge esta gran pregunta.



**Figura 1.1:** Árbol de Problemas  
**Fuente:** El autor

La Figura 1.2 muestra el árbol de objetivos planteados en solución al árbol de problemas.



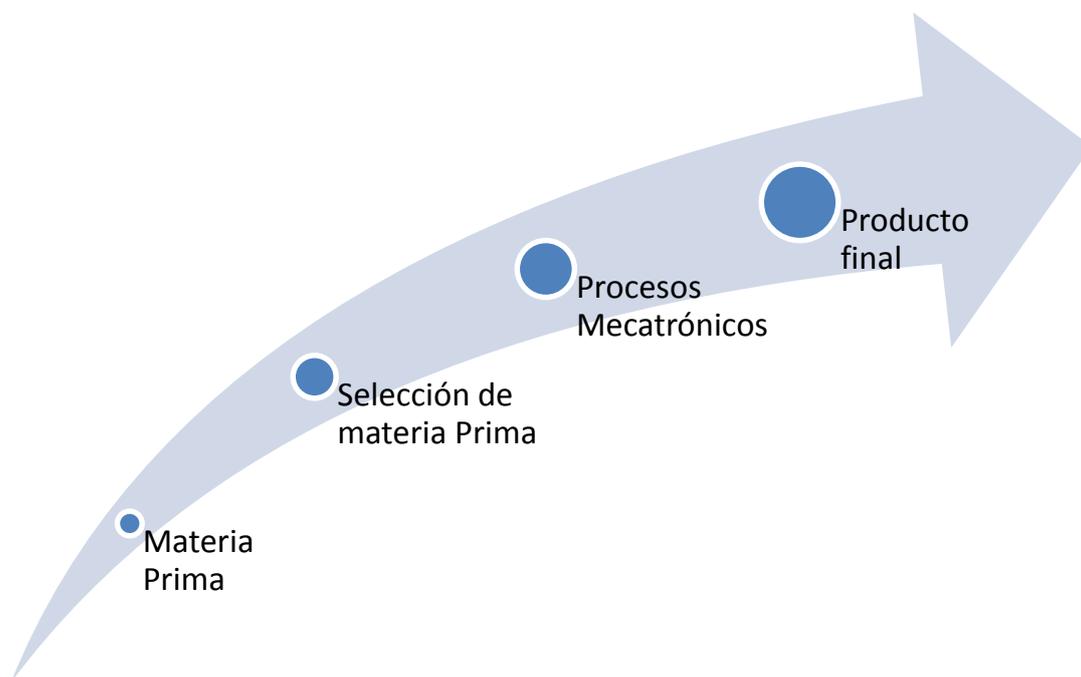
**Figura 1.2:** Árbol de Objetivos

**Fuente:** El autor

En base al diagrama surge la idea de emprender un proyecto tecnológico donde se diseñe y posteriormente se construya un prototipo de máquina que en base a sistemas y procesos mecatrónicos que permitan entregar hilo de poliéster o hilo PET.

De igual manera una vez que se concluya el prototipo se donará a la universidad con fines investigativos y recomendará el uso para el laboratorio de Ingeniería Mecatrónica. Dicha recomendación permitirá ser un apoyo tanto para los estudiantes de la carrera como para los profesores de las diversas asignaturas logrando realizar prácticas de manufactura, termodinámica, mecánica de materiales entre otras.

La Figura 1.3 muestra un esquema general del funcionamiento de la máquina que a partir de ahora se la llamará "PET Spinning V. 1.0".



**Figura 1.3:** Esquema general de funcionamiento de máquina

**Fuente:** El autor

## 1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1. Diseñar y construir un prototipo de máquina elaboradora de hilo PET.
2. Utilizar gránulos cristalizados reciclados de PET como materia prima.
3. Construir un armazón que asegure estabilidad en el proceso.
4. Implementar un sistema de ventilación de enfriamiento de los filamentos.
5. Diseñar e implementar un sistema de control, el cual asegure que las variables a controlar (temperatura y velocidad) sean las óptimas para el sistema.
6. Construir un sistema bobinador de hilo.
7. Implementar los controles de seguridad en la máquina "PET Spinning V. 1.0".
8. Comprobar el hilo obtenido con parámetros establecidos por el autor como elongación y tracción del hilo.

## **1.3 ANTECEDENTES**

### **1.3.1 HISTORIA**

Durante la segunda guerra mundial en 1939, Wallace Carothers (químico estadounidense), obtuvo una fibra con altas propiedades de elongación y resistencia, dicha fibra fue obtenida a partir de una poliamida y se la denominó nylon. Luego de investigaciones y cambios en la estructura química del nylon dieron origen al poliéster, acrílico, elastano entre otras. Carothers en conjunto con su colega James Dickinson al mezclar el glicol de etileno con ácido tereftalato generaron el tereftalato de polietileno (PET) [3].

Carothers y Dickinson pertenecían al grupo de investigadores de la multinacional estadounidense DuPont, dedicada a varias ramas industriales de la química, por lo cual concedieron los derechos para su elaboración, de igual forma para fines investigativos a nivel mundial lo hicieron a la compañía química británica Imperial Chemical Industries (ICI) [3].

La patente del poliéster permitió la manufactura en masa a EE.UU, Japón y países europeos hasta que caducó y es cuando industrias asiáticas ingresan en el mercado para producir el poliéster en mayor cantidad. La empresa estadounidense de fibra de poliéster Dacron fue la primera industria en elaborar textiles a base del poliéster [3].

La constante evolución e investigación sobre el PET permitió que en el año 77 la industria genere nuevas alternativas de aplicación para el PET, con lo que se comenzó la fabricación de envases a base de PET, con dicha aplicación las empresas comenzaron a generar la necesidad de dichos envases para los usuarios por sus diferentes ventajas de producción, con lo que se ha convertido en la actualidad en los envases más utilizados y requeridos por los consumidores [4].

### **1.3.2 SITUACIÓN ACTUAL**

Hoy en día el PET es una variación de poliéster de alto peso molecular (o alta viscosidad), asimismo es el elemento que más se usa para la elaboración de botellas. Las investigaciones han avanzado en el campo de las industrias que se dedican a la elaboración de botellas mejorando de esta forma el proceso de

soplado, lo cual permite posicionar al material de mejor manera en el mercado respecto al vidrio y al metal, debido a su bajo tiempo de elaboración. Las propiedades de la resina PET están en un proceso de mejora continua, generando en su composición menor impacto al medio ambiente, de esta forma se está generando el reemplazo de las botellas de vidrio y metal por las elaboradas a base de PET [4].

Las propiedades de transformación del PET, permiten crear envases resistentes ideales para almacenar líquidos a presión, de esta forma el uso primordial de los envases de PET es para el embotellado de productos como bebidas, medicamentos, aceites vegetales, combustibles, etc. [4].

De la misma manera como en las industrias se ha generado el alto interés por elaborar envases a partir del PET, comienza la preocupación por el desperdicio ambiental que pueden generar este tipo de envases en su producción, siendo así que debido a que en la conformación del PET el índice de residuo es muy bajo y su estructura química admite un alto nivel de reintegración en la transformación de la resina, surge la idea del reciclado de envases de PET posterior a su utilización, la cual es una alternativa tanto para el ecosistema como para la conformación de nuevas fuentes de trabajo en el ámbito del reciclaje, comenzado desde los entes que se encargan de la recolección de los envases hasta las empresas que se encargan de su transformación a materia prima [4].

Actualmente existen empresas que se dedican al reciclado de las botellas post consumo para transformar el material a gránulos y posteriormente darle aplicaciones como el hilo. Estas empresa utilizan un 100% de material reciclado a diferencia de empresas como Amcor<sup>1</sup> que tienen entre su principal línea de negocio el soplado de botellas a base de PET, donde utilizan 75% de material virgen la cual se caracteriza por ser el PET en estado puro y 25% de material post consumo que viene a ser el PET transformado una vez más a materia prima luego de haber pasado por algún tipo de base por lo general.

---

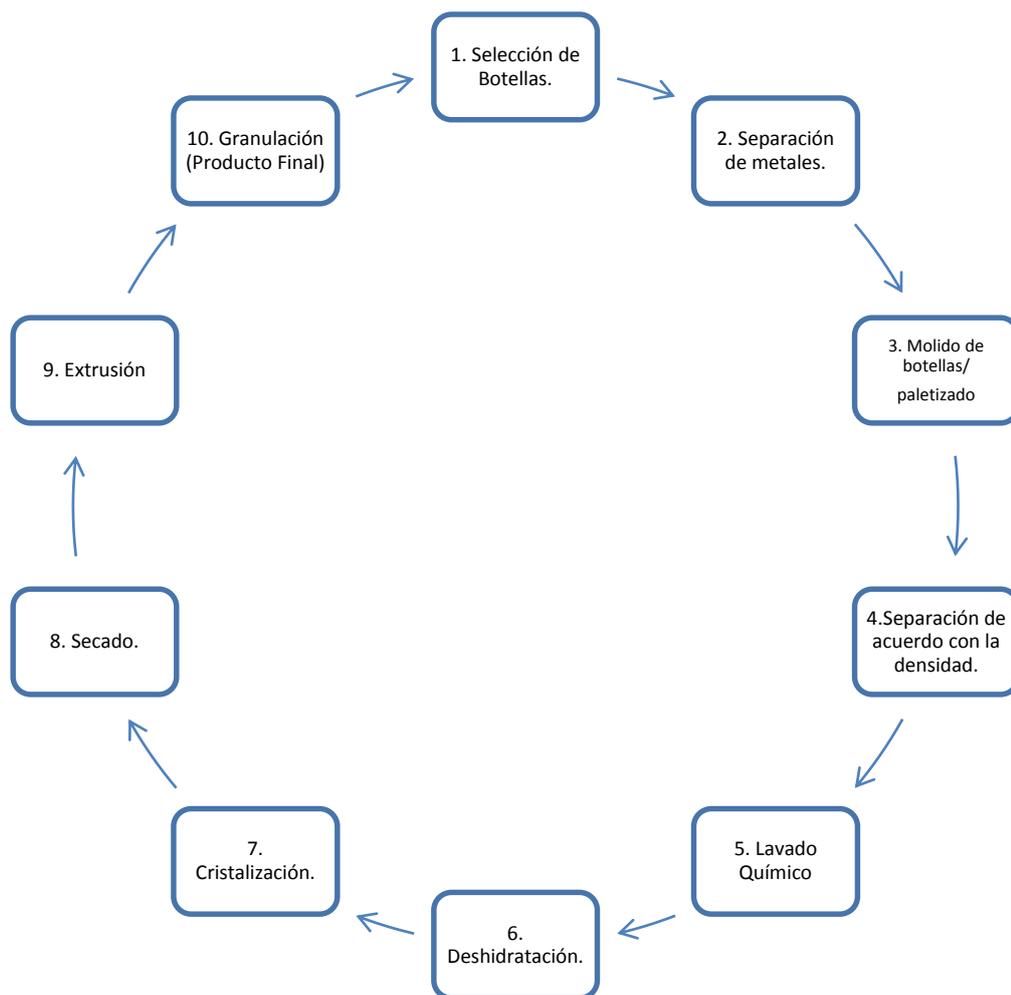
<sup>1</sup> Amcor: Multinacional australiana radicada en Guayaquil – Ecuador, con varias líneas de negocio entre las más importantes, elaboración de botellas para la empresa Arca (embotelladora de Coca Cola).

### **1.3.3. RECICLADO DE BOTELLAS**

El reciclaje se ha vuelto una práctica ambiental que se la ha llevado a todos los niveles, desde hogares hasta industrias que se han formado para procesar toda la cantidad de envases que llegan producto del post consumo, o a su vez han implementado como un proceso adicional para obtener nuevos envases, el reciclaje no está siendo beneficioso sólo para las empresa recicladoras, sino de igual forma para las economías locales y con mayor razón para el medio ambiente, por lo que la práctica del reciclaje se ha tornado en una relación ganar-ganar [5].

En el reciclaje de las botellas se presentan dificultades, producidas por la mezcla de basura en la que se encuentran o debido a que en su interior se hallan restos alimenticios e inclusive distintos elementos que deben ser separados y limpiados, para su posterior procesamiento [5].

La Figura 1.4 muestra el flujo del reciclaje desde la selección de botellas, donde se escogen las que presenten menor contaminación (algunas son recogidas de las basura), densidad de la botella, tamaño o tonalidad de la botella, para posteriormente pasar al separado de posibles metales que se encuentren en los recipientes, luego ingresa en el proceso de molienda de botellas para obtener hojuelas agilizando así el resto de procesos y nuevamente se las separa de acuerdo a su densidad para continuar con el proceso de lavado químico eliminando impurezas que pudieran permanecer en la molienda de las botellas y disolviendo los colorantes que se presenten, las hojuelas son deshidratadas para extraer el exceso de humedad y luego cristalizadas en una etapa de un estado amorfo a un cristalino, como siguiente proceso es el de extrusión y como último la granulación del producto extruido.



**Figura 1.4:** Ciclo de Reciclado de Botellas

Fuente: Basado en [5]

### 1.3.4. GRÁNULOS (PELLETS) DE PET

El proceso de reciclaje tiene como objeto transformar los envases post consumo nuevamente a materia prima, obteniendo el producto final en forma de gránulos que serán dispuestos para cualquier tipo de aplicación, el gránulo obtenido en principio tiene una apariencia transparente y brillante, este tipo de gránulo se encuentra en un estado amorfo, significando que su estructura interna es desordenada, pero sobre todo la humedad que contiene el gránulo es muy alta impidiendo realizar mayores aplicaciones, debido a su bajo peso molecular y por lo tanto su viscosidad es baja<sup>2</sup>, (I.V. = 0,055 a 0,065 l/g) [6]. Los polímeros<sup>3</sup> en la

<sup>2</sup> I.V.: Es el índice de viscosidad o viscosidad intrínseca y su unidad de medida es l/g.

<sup>3</sup> Polímero: Es una macromolécula formada por la unión moléculas más pequeñas llamadas monómeros.

naturaleza por lo general se encontrarán en estado amorfo. La Figura 1.5 muestra los gránulos en estado amorfo al salir del proceso de extrusión.



**Figura 1.5:** Gránulo Pellet Amorfo

**Fuente:** Basado en [7].

Los gránulos, para que puedan ser utilizados en varias aplicaciones, deben pasar por un proceso de reordenamiento de la estructura molecular, esto significa generar un orden en la disposición atómica del gránulo y obtener como resultado el incremento de la densidad en comparación con gránulos amorfos de las mismas condiciones [8].

En general, en los polímeros (incluyendo los gránulos de PET reciclados) se puede determinar el nivel de su estado amorfo o cristalino, mediante el grado de cristalinidad que va a variar dependiendo el material. Como ejemplo, tomando muestras de metales el grado de cristalinidad llega a ser casi cristalino, caso contrario en las muestras de la cerámica el grado es casi enteramente amorfo [8].

Para transformar un gránulo de estado amorfo a estado cristalino es necesario ingresarlo a un proceso de secado por reactores con aire ventilado, este proceso se lo realiza con estrictos controles de las variables como la temperatura, la cual no debe excederse para provocar la fusión del material, por lo que es recomendable mantenerlo entre 130 a 160°C en intervalos de tiempos de 10 minutos a 1 hora. Debido a que es un proceso de secado por ventilación los gránulos permanecerán en constante movimiento evitando la adhesión entre ellos. Al final de este proceso se obtendrá un gránulo cristalizado con una densidad de 1,4 g/cm<sup>3</sup> mayor al gránulo de estado amorfo que corresponde a 1,33 g/cm<sup>3</sup>, con estructura ordenada y con humedad completamente extraída [6]. La Figura 1.6 muestra los gránulos cristalizados.



**Figura 1.6:** Gránulo Pellet Cristalizado  
**Fuente:** Basado en [7].

### 1.3.5 EXTRUSIÓN DE MATERIALES PLÁSTICOS

Dentro de los diferentes procesos existentes en la manufactura se encuentra el de extrusión que tiene como base llevar a cualquier tipo de material en estado de fundición a una forma definida sea por matrices o a travesando boquillas, logrando conseguir secciones transversales constantes y longitudes indefinidas. El proceso de extrusión es utilizado por las industrias alimenticias, metalmecánicas, cerámicas y de procesamiento de polímeros. En la transformación de plásticos el proceso de extrusión es el más importante ya que brinda formas y secciones deseadas. Para extruir plásticos se utilizan máquinas extrusoras, las cuales son impulsadas muchas veces por bombas, pero por lo general se lleva a cabo con el uso de husillos o tornillos extrusores [9].

En las máquinas extrusoras de plásticos el proceso inicia con el ingreso del polímero en estado sólido y finaliza con el material en estado de fundición, sin embargo, en algunos procesos de extrusión, dependiendo del material se admite, su ingreso en estado de fundición. La extrusora suministra al polímero presión a lo largo del proceso para permitir que atraviese la boquilla [9].

La forma final del producto deseado puede que no se la obtenga a la salida de la máquina extrusora y necesite otro proceso alternativo para definir su estructura, esto se debe a que en las industrias emplean extrusoras para mezclar componentes y los mismos procesarlos aplicando métodos específicos [9].

En las máquinas extrusoras que basan su funcionamiento en el husillo o tornillo extrusor, existen dos principales partes: el alma que es el cuerpo del husillo y los filetes que ayudarán al transporte del material. Entre el alma y los filetes se forma un canal donde se receipta el material, el alma tiene un diámetro el cual no es constante y varía debido a que en el husillo se denotan tres zonas a lo largo de la operación:

- **Zona de Alimentación:** Se ubica en el inicio de la extrusora y se caracteriza por poseer la mayor profundidad en el canal, eso significa que el alma tendrá el menor diámetro de todo el husillo. El material ingresa a esta zona y cumple con la función de compactar y transportar el polímero a la siguiente zona [9].

- Zona de Transición: Es la zona intermedia del husillo en la que el diámetro del alma va aumentando de manera progresiva, por lo tanto la profundidad del canal se reduce en comparación con la zona de alimentación, su principal función es fundir al material y transportarlo a la zona de dosificación [9].
- Zona de Dosificación: Se ubica al final de la extrusora, el diámetro del alma aumenta de forma significativa y la profundidad del canal es casi nula. Esta zona abarca toda la presión generada por la extrusora y dosifica el polímero en estado de fundición hacia la boquilla de salida [9].

Tanto la zona de alimentación como la zona de dosificación tienen diámetro constante, en el caso de la zona de transición el diámetro es variable. Mientras mayor sea la longitud de la extrusora mayor va a ser la presión que se va a experimentar a través de todas las zonas como lo muestra la Figura 1.7 [9].

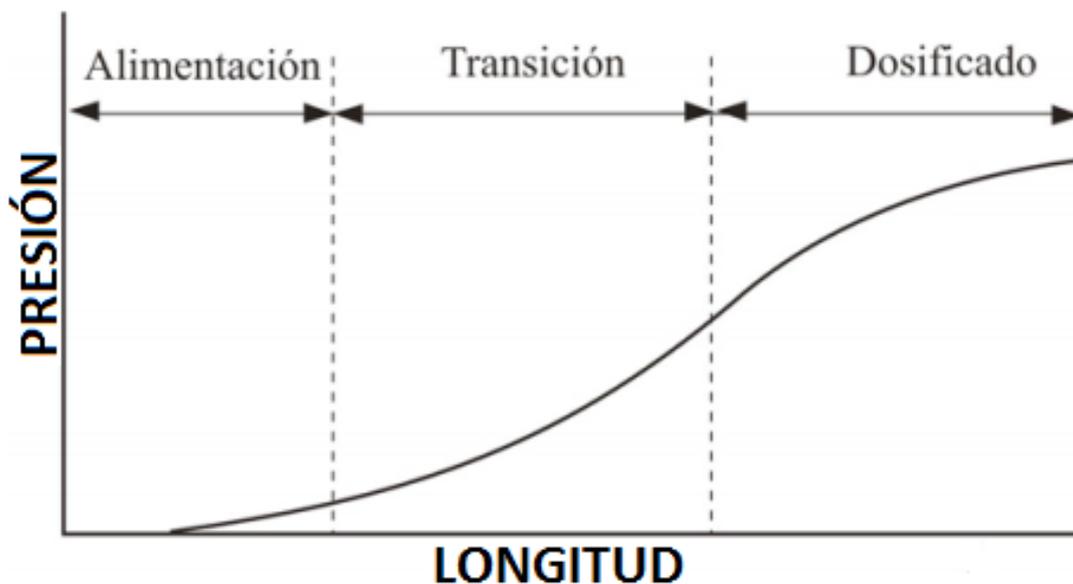


Figura 1.7: Zonas de la extrusora

Fuente: Basado en [9]

Las dimensiones del husillo determinarán la cantidad de producción que podrá generar la extrusora, pero de igual forma establecerá las dimensiones para el resto de la máquina, el husillo va de la mano con la camisa, la cual aportará para la fundición del material al generar la fricción entre los filetes y la superficie interna de la camisa, sin estos dos elementos la máquina extrusora no tendría utilidad.

Los dos principales tipos de extrusión son en caliente y en frío, sin embargo existen extrusión por impacto e hidrostática que no entran dentro de una categoría, ya que se las considera variaciones de la extrusión en frío.

### 1.3.5.1 Extrusión en Caliente

Se realiza en materiales que no poseen una ductilidad necesaria para ser convertidos a formas definidas a temperatura ambiente, las temperaturas varían de acuerdo al material y pueden estar entre 200 a 2000°C. La extrusión en caliente permite disminuir fuerzas requeridas para la transformación, pero así mismo aumenta el desgaste de los elementos de la extrusora debido al mismo calor producido. Para la aplicación en polímeros es ideal ya que el gránulo de PET en estado sólido no puede ser transformado, en este tipo de extrusión el estado de fundición es factible de alcanzar [10].

### 1.3.5.2 Extrusión en frío

La extrusión en frío se genera a temperatura ambiente y se realiza mediante la presión que ejerce un punzón en el material sobre un dado para dar la forma deseada como muestra la Figura 1.8. A pesar que posee ventaja sobre la extrusión en caliente por el ahorro de una gran cantidad de energía que se necesita, la presión y dureza requerida por el punzón es muy grande, en especial cuando se trata del acero. La dureza de los punzones oscila entre 60 y 65 HRC<sup>4</sup> y en el dado de 58 y 62 HRC. Este tipo de extrusión se la utiliza en materiales sólidos con ductilidad y dimensiones necesarias para poder ser forzadas por el punzón [10].

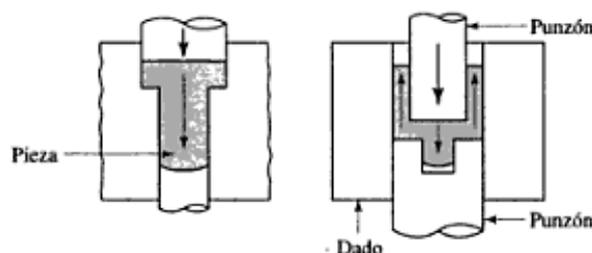


Figura 1.8: Ejemplo de extrusión en frío

Fuente: Basada en [10]

<sup>4</sup> Dureza de Rockwell: ensayo para determinar la dureza forzando a un penetrador de diamante contra la superficie del material a ser ensayado y se mide la profundidad permanente de la impresión bajo condiciones específicas de carga.

Entre los diversos productos que se pueden lograr en este proceso están: los tubos para bicicletas, el extintor de incendios, cilindros del amortiguador, pistones automotores, etc.

### **1.3.6 PROCESO DE PRODUCCIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE FIBRAS**

El objetivo de este proyecto de fin de carrera es la obtención de hilo a base de los gránulos reciclados de PET. Existen algunos procesos de producción para el prototipo que se va a elaborar. Se ha mencionado cómo se llevará a cabo el proceso de transformación del gránulo de estado sólido a fundido, sin embargo es necesario implementar otros procesos para adecuar al hilo que se desea obtener.

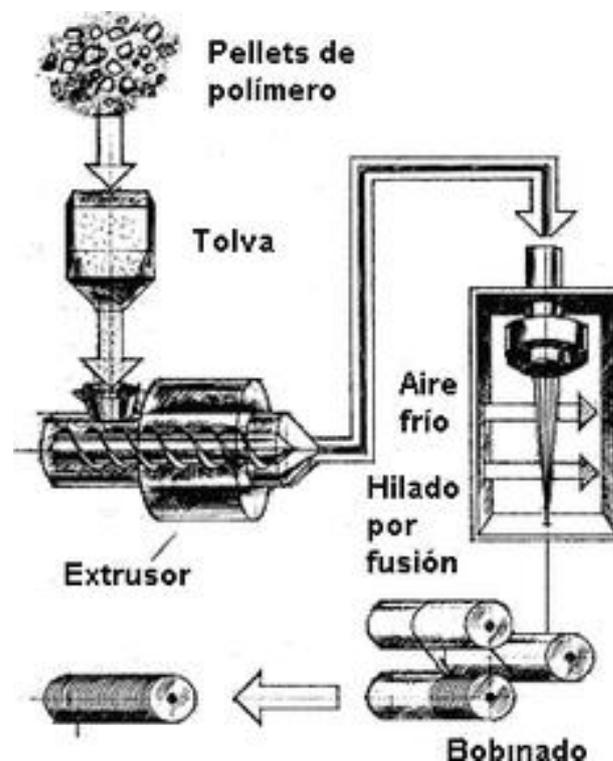
El primer proceso posterior a la extrusión es el de hilatura donde el material extruido es conducido a pasar por orificios. Los tipos de hilatura son:

- Hilado por Fusión: En este tipo de hilado el polímero se presenta en estado sólido y se lo lleva a la fundición mediante el proceso de extrusión para posteriormente ser atravesado por una hilera la cual es una placa con orificios pequeños permitiendo dar la forma a los filamentos. Al atravesar la hilera los filamentos por acción de la gravedad y el aire se solidifican, es necesario que la caída de los filamentos sea de aproximadamente 60 centímetros, caso contrario se puede utilizar ventilación para acelerar la solidificación. Este tipo de hilatura se la utiliza para fibras de nylon, poliéster, polietileno o polipropileno [11].
- Hilatura en Seco: En este tipo de hilado los filamentos son formados a causa de la evaporación de un disolvente de polímero volátil en una atmósfera controlada, los filamentos pasan por una camisa donde la evaporación puede ser en paralelo o a contracorriente. Este tipo de hilado se lo utiliza para fibras a partir de acetato de celulosa, poliamidas, etc. [11].
- Hilatura en Húmedo: En la hilatura en húmedo el polímero disuelto por agentes químicos, ingresa a la zona de alimentación y es transportado hacia la hilera que se encuentra sumergida (por lo general agua) en un baño de coagulación, posterior a esto el filamento ya solidificado requiere

de un lavado químico. Este proceso es ideal para fibras acrílicas, modacrílicas, poliuretano, ente otras [11].

A pesar de que las fibras se encuentren solidificadas al salir de cualquiera de los tipos de hilatura, pasan por un proceso de estiramiento que permitirá que se unifique la forma del filamento y que ganen resistencia. El proceso de estiramiento se basa en juntar y alinear a las estructuras moleculares de las fibras obteniendo como beneficio un hilo con mayor resistencia, el proceso de estiramiento se lo genera pasando los filamentos por diferentes rodillos a velocidades controladas con el fin de no superar el nivel de tracción del filamento y romperlo [11].

Para el presente proyecto el proceso de hilatura ideal es el de fusión por el hecho de la utilización de gránulos cristalizados de PET reciclado que necesitan ser fundidos y posteriormente hilados para obtener el filamento o hilo deseado. La Figura 1.9 muestra un ejemplo de la hilatura por fusión, con la variante que se utiliza canales de enfriamiento para los filamentos.



**Figura 1.9:** Hilatura por Fusión  
Fuente: Basada en [11]

### 1.3.7 BOBINADO DE HILOS

Como último proceso para la obtención del hilo, está el bobinado de los filamentos posterior a su acondicionamiento que puede ser en un carrete u ovillo, el cual permitirá, una vez acabado todo el proceso, desenrollar el hilo sin problemas.

Para el bobinado, como primer paso se unirán los filamentos (el número de filamentos dependerá del grosor de hilo que se necesite), para el posterior empalme en el carrete. El carrete será dispuesto en un bobinador el cual podrá cumplir su función debido al control de un motor que girará a las revoluciones necesarias hasta obtener hilo sin necesidad de partirlo.

Las bobinadoras actuales utilizadas por las distintas empresas textiles, son controladas por sistemas que permiten enrollar de forma que la disposición de las fibras sea uniforme mediante guías, boquillas de aspiración, canales receptores, empalmadoras, etc. De igual forma una vez enrollada la fibra, debido a la disposición de las fibras en el carrete u ovillo, permitirá desenrollar la fibra textil ya sea para algún proceso de texturizado o para la confección de textiles directamente, sin problemas presentados por enredos entre las fibras o desprendimiento de las mismas. La Figura 1.10 muestra una bobinadora como parte de una aplicación de una extrusora para la obtención de fibras textiles.



**Figura 1.10:** Bobinadora textil  
**Fuente:** Basada en [12]

## **CAPÍTULO II**

### **ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS**

En este capítulo se realiza una recopilación de los mejores componentes para el diseño y construcción de la máquina elaboradora de hilo PET. Como primer paso se dará a conocer la voz del usuario y complementado con la voz del ingeniero. El siguiente paso es dividir a la máquina en cinco subsistemas, cuatro de los cuales entrarán en un análisis de la mejor alternativa. La mejor alternativa será el inicio para el diseño en el capítulo posterior.

#### **2.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS**

En esta sección se tratarán y expondrán alguno de los requerimientos del usuario sobre el problema presentado y cómo la ingeniería transforma esos requerimientos a especificaciones técnicas teniendo a las dos partes conformes y con sus expectativas cumplidas.

##### **2.1.1 VOZ DEL USUARIO**

En la aplicación de la calidad para la producción de productos, como paso inicial la voz de usuario permite determinar las demandas de los clientes para entender cómo proyectar el diseño de un nuevo producto o servicio. Para el correcto proceder en la voz del usuario se reúne a un grupo de personas de los cuales transmitirán sus requerimientos por medio de lluvia de ideas o por medio de un experto que formule los deseos de manera precisa [13].

En este caso los requerimientos del usuario, necesarios para la construcción de la PET Spinning V.1.0 son:

- Una máquina automatizada elaboradora de hilo de poliéster.
- Que sea una máquina adaptable al sistema de alimentación existente en el país.
- Que la máquina sea de fácil uso para el operador.
- Que sea una máquina compacta.
- Un sistema de alimentación de la materia prima suficiente para no desabastecer la producción de hilo.

- Un sistema que lleve al polímero utilizado a su punto de fusión y que permita manejarlo.
- Un sistema que permita fluir al polímero fundido.
- Un sistema enfriador del polímero.
- Un sistema que permita empatar los filamentos del polímero derretido.
- Un sistema que permita entregar el hilo en carrete.

### 2.1.2 VOZ DEL INGENIERO

Debido a que en la voz del usuario los requerimientos pueden ser subjetivos para emprender un diseño correcto, es necesario transformar esos requerimientos en características técnicas las cuales se las denomina la voz del ingeniero. Las características técnicas deben ser medibles y alcanzables en cuanto a cómo está proyectada la empresa o proyecto y cada demanda del usuario debe ser satisfecha mínimo con una característica técnica [13].

Los deseos expresados en la voz del usuario para la PET Spinning V.1.0 son transformados a requerimientos técnicos como lo muestra la Tabla 2.1:

Tabla 2.1: Voz del usuario vs. Voz del ingeniero

Requerimientos de Usuarios	Requerimientos Técnicos
Sistema de alimentación eléctrica	220V AC.
Fácil uso para el operador	Manuales de usuario y mantenimiento
Máquina compacta	Largo 120 cm, Ancho 100 cm, Alto 70cm.
Alimentación del material	Tolva.
Sistema de calentamiento	Uso de resistencias.
Proceso de manufactura	Máquina extrusora
Bobinadora	Carrete listo para su uso.

Fuente: El autor.

## 2.2 MATRIZ DE SELECCIÓN PUGH

Fue desarrollada por el Profesor Stuart Pugh en 1981. El nombre de la Matriz se debe a la generación de una tabla en la que se presentan diferentes opciones y el resultado de la comparación de las características comunes o CTQ's (Critical to Quality) que las representan. Esta herramienta se utiliza para seleccionar entre varias alternativas, aquella que brinde los mayores beneficios realizando una

comparación por pares de todas las opciones disponibles de las propiedades que presentan estas (criterios de selección o CTQ's). Prioriza conceptos u opciones cuando sólo uno de ellos puede ser seleccionado [14].

El procedimiento de la Matriz Pugh describe los siguientes pasos:

1. Definir el sistema o subsistemas.
2. Determinar los criterios de selección que servirán para la comparación por pares; los criterios deben ser conceptualmente independientes entre sí.
3. Para definir los criterios de selección se recomienda definir el subsistema a ser evaluado, luego describir las opciones disponibles para la selección e identificar los criterios.
4. Como último paso elaborar la Matriz de Pugh indicando los criterios a seleccionar y evaluarlos unos con otros como se muestra en la Tabla 2.2.

El Sistema de calificación para la matriz se basará en puntuaciones:

- 0 = cuando un criterio es inferior al comparado.
- 0,5 = cuando el criterio tiene el mismo peso que el comparado.
- 1 = cuando el criterio es superior al comparado.

Tabla 2.2: Ejemplo de Ponderación de la Matriz Pugh.

	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Criterio 1		1	1	3	50%
Criterio 2	0,5		0,5	2	30%
Criterio 3	0	0		1	20%
				6	100%

Fuente: El autor.

La PET Spinning V.1.0 se la ha dividido en cinco subsistemas, ya que esto facilitará el análisis de alternativas para cada parte de la máquina. Entre los subsistemas existentes son:

- **SUBSISTEMA A:** Alimentación.
- **SUBSISTEMA B:** Extrusión.
- **SUBSISTEMA C:** Enfriamiento.
- **SUBSISTEMA D:** Bobinado.
- **SUBSISTEMA E:** Sistema de Control para Temperatura.

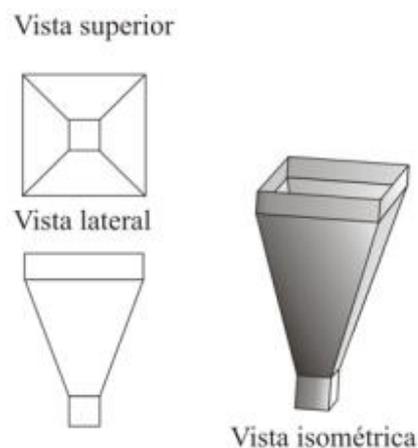
### 2.2.1 SUBSISTEMA A: ALIMENTACIÓN

La parte de alimentación para la PET Spinning V.1.0 es donde comienza todo el proceso, puesto que es la entrada de la máquina y de toda la elaboración del hilo, este subsistema es el encargado de nunca desabastecer de pellets a la máquina, es por eso la importancia de escoger un sistema que permita tanto la fácil visibilidad del estado de los pellets como un fácil ingreso de la materia prima. Como sistema de alimentación se ha definido la tolva, en vista que cumple con los requerimientos de visibilidad y de ingreso de la materia prima, además es una forma de alimentación muy utilizada en los sistemas y máquinas industriales.

Cabe recalcar que los pellets de PET reciclado proporcionarán al subsistema de alimentación un flujo másico. El flujo másico significa que durante la alimentación a la máquina todos los gránulos estarán en movimiento a través de la tolva y no permanecerán en un solo lugar hasta que puedan ingresar a la máquina extrusora, previniendo las zonas muertas que se podrían generar por material pegado en las paredes [15].

#### 2.2.1.1 Alternativa 1: Tolva de Sección Rectangular

La tolva que se muestra en la Figura 2.1, tiene una sección rectangular que se forma mediante dobleces, el material de la misma puede ser de tol, acrílico o acero inoxidable.



**Figura 2.1** Tolva Rectangular

**Fuente:** Basado en [8]

La Tabla 2.3 describe las ventajas y desventajas en el uso de una tolva rectangular para extrusoras.

Tabla 2.3: Ventajas-Desventajas: Tolva rectangular

Ventajas	Desventajas
Costo medio.	Dobleces repetitivos lo que ocasiona una construcción de dificultad moderada.
Permite recibir y acumular la materia prima para posteriormente dosificar al siguiente subsistema.	Debido a los dobleces no permite un flujo constante de la materia prima y es poco constante.
Tiempo de construcción bajo.	Mantenimientos ocasionales debido al desgaste de las paredes.

Fuente: El autor

### 2.2.1.2 Alternativa 2: Tolva de Sección Circular

La tolva que se muestra en la Figura 2.2, tiene una sección circular que está unida mediante soldadura, el material de la misma puede ser de tol, acrílico o acero inoxidable.

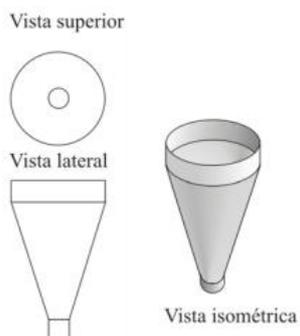


Figura 2.2 Tolva Circular  
Fuente: Basado en [8].

La Tabla 2.4 muestra las ventajas y desventajas de la aplicación de tolvas circulares en extrusoras.

Tabla 2.4: Ventajas-Desventajas: Tolva Circular

Ventajas	Desventajas
Mantenimiento mínimo.	Nivel de construcción complejo.
Permite recibir y acumular la materia prima para posteriormente dosificar al siguiente subsistema.	Costo de construcción elevado.
Proporciona un flujo constante de materia prima	Tiempo de construcción medio.

Fuente: El autor

### 2.2.1.3 Criterios de Selección del Subsistema A

Para evaluar de manera efectiva el subsistema de alimentación se han tomado los siguientes criterios como primordiales:

- **Costo:** Este criterio es el principal para la selección de cualquier alternativa debido a que al no tomarlo en cuenta para cada uno de los elementos el costo final del proyecto se incrementaría.
- **Tiempo de construcción:** Este criterio permite definir qué tan difícil es la construcción de la tolva, lo cual influye mucho en el tiempo de construcción.
- **Mantenimientos:** El presente criterio faculta determinar si un elemento o máquina requerirá un plan de mantenimientos. Para la selección mientras menos mantenimientos necesite mayor puntaje se asignará.
- **Flujo de material:** Se debe tener en cuenta al seleccionar la tolva no desabastecer a la máquina de materia prima, por lo tanto el flujo de material influirá para la alternativa a ser escogida.

En base al ejemplo de la Tabla 2.2 se realizará la ponderación para obtener numéricamente la importancia de los criterios de selección y de igual manera para el análisis de las alternativas con respecto a cada uno de los criterios.

**Tabla 2.5:** Ponderación de Criterios del Subsistema A

Costo = Flujo > Tiempo > Mantenimiento						
	Costo	Flujo	Tiempo	Mantenimiento	$\Sigma+1$	Ponderación
Costo		0.5	1	1	3,5	0,35
Flujo	0.5		1	1	3,5	0,35
Tiempos	0	0		1	2	0,20
Mantenimiento	0	0	0		1	0,10
	TOTAL				10,00	1

Fuente: El autor

La Tabla 2.5 muestra numéricamente que los criterios de costo y flujo de material son los más importantes para la selección de las alternativas.

**Tabla 2.6:** Criterios de Selección: Flujo de la Materia Prima.

Alternativa 2 > Alternativa 1				
	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	1	0,33
Alternativa 2	1		2	0,67
	TOTAL		3	1

Fuente: El autor

La Tabla 2.6 muestra numéricamente que la alternativa 2 (tolva circular) es mejor que la alternativa dos con respecto al criterio flujo de la materia prima.

**Tabla 2.7:** Criterios de Selección: Costo

Alternativa 1 < Alternativa 2				
	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	1	0,33
Alternativa 2	1		2	0,67
	TOTAL		3	1

Fuente: El autor

La Tabla 2.7 muestra numéricamente que la alternativa 2 (tolva circular) es la mejor con respecto al criterio de costo.

**Tabla 2.8:** Criterios de Selección: Tiempo de Construcción

Alternativa 1 < Alternativa 2				
	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	1	0,33
Alternativa 2	1		2	0,67
	TOTAL		3	1

Fuente: El autor

La Tabla 2.8 muestra el predominio de la alternativa 1 (tolva rectangular) sobre la alternativa 2 (tolva rectangular) con respecto al tiempo de construcción de la tolva.

**Tabla 2.9:** Criterios de Selección: Mantenimiento

Alternativa 1 > Alternativa 2				
	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	1	0,33
Alternativa 2	1		2	0,67
	TOTAL		3	1

Fuente: El autor

La Tabla 2.9 indica que con respecto al mantenimiento, la alternativa 1 (tolva rectangular) es la mejor.

Una vez analizadas las alternativas en cuanto a los criterios establecidos por el autor, es necesario obtener cuál de las alternativas será la escogida. Para escoger la alternativa se realizará una multiplicación del puntaje que obtuvo el criterio en la Tabla 2.5 y el puntaje que obtuvo cada alternativa al momento de evaluar con cada uno de los criterios.

Tabla 2.10: Ponderación de Criterios vs. Alternativas del Subsistema A

	Costo	Flujo	Tiempos	Mantenimientos	$\Sigma$	Prioridad
Alternativa 1	0,12	0,12	0,07	0,03	0,34	2
Alternativa 2	0,23	0,23	0,13	0,07	0,66	1

Fuente: El autor

En la Tabla 2.10 se realiza las operaciones para comparar cual es la mejor alternativa con respecto a cada uno de los criterios. La alternativa con mayor ponderación es la alternativa 2 (tolva circular), por lo tanto, esta es la que se utilizará.

## 2.2.2 SUBSISTEMA B: EXTRUSIÓN

Este subsistema trata acerca de las diferentes alternativas para la selección de una extrusora adecuada tanto para el tipo y transformación el material como para el costo total del proyecto. En el mercado se pueden encontrar diferentes tipos de extrusoras de plásticos, desde una con husillo simple hasta husillos dobles con varios canales de alimentación que permiten un mayor arrastre del material y por lo tanto mayor producción y menor desperdicio.

En la sección 1.3.5 se mencionó todo lo referente al proceso que conlleva el proceso de extrusión, por lo tanto en esta sección sólo realiza el análisis de las diferentes alternativas.

### 2.2.2.1 Alternativa 1: Extrusora Monohusillo

Esta extrusora es la más común de encontrar en el mercado para la extrusión de polímeros, la extrusora de husillo sencillo o monohusillo se muestra en la Figura 2.3.

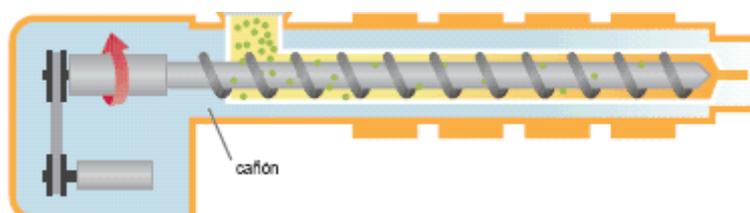


Figura 2.3: Extrusora Husillo Sencillo

Fuente: Basada en [16].

Este tipo de extrusoras están conformadas por un solo husillo o tornillo extrusor y es impulsado por motores que proporcionan torque necesario para provocar la fricción entre el husillo y la camisa que lo recubre para generar la transformación

del material. El avance del material a lo largo de la extrusora no se genera por sí solo, por lo tanto se debe suministrar una fuerza de arrastre para evitar la adhesión al husillo y que gire con el mismo. Entre mayor sea la fuerza de arrastre mayor será el avance del material y disminuirá la posibilidad de que el material se adhiera. Además el grado de acabado del husillo es otro factor que permite que el material no se adhiera [16]. La Tabla 2.11 muestra las ventajas y desventajas de este husillo.

**Tabla 2.11:** Ventajas-Desventajas: Husillo simple

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Manufactura sencilla	Material avanza acorde a la extrusora.
Tasa de producción baja	No permite una salida uniforme de material por su boquilla.
Costo moderado	El torneado es dificultoso, debido a los diferentes diámetros a lo largo del alma.

Fuente: El autor.

#### **2.2.2.2 Alternativa 2: Extrusor de Doble Husillo Engranado**

Este tipo de extrusoras, como se muestra en la Figura 2.4, son las que tienen dos husillos de igual longitud, ambos colocados en el interior de la misma camisa extrusora.

En este caso los husillos se encuentran engranados, lo que significa que sus hélices estarán penetrando en los canales del otro y su disposición es uno a continuación de otro. El engranaje puede ser perfectamente ajustado o así mismo puede existir una holgura entre hélice y hélice, además el giro de los husillos puede ser en el mismo sentido o en dirección opuesta. El torque es suministrado un motor, pero cuando el giro es en dirección opuesta se utiliza dos motores o a su vez se puede adaptar engranajes al motor que se utiliza [16].



**Figura 2.4:** Husillo Doble Engranado  
Fuente: Basado en [17]

La Tabla 2.12 describe las ventajas y desventajas de utilizar husillos dobles engranados.

**Tabla 2.12:** Ventajas-Desventajas: Husillo Engranado

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Mayor arrastre del material a lo largo de la extrusora	Costo de producción elevado.
Tiempo de producción medio.	Precisión que se necesita en la construcción de los dos husillos para lograr engranar perfectamente en uno con el otro.
Homogenización de extrusión del material.	Estructura poco compacta

Fuente: El autor

### 2.2.2.3 Alternativa 3: Extrusor de Doble Husillo no Engranado

Este tipo de extrusoras, no son tan comunes en las industrias ya que sólo se las utiliza para procesos que requieren alta uniformidad en la extrusión. Debido a la precisión que debe existir entre hélice y hélice, el costo de estas extrusoras es elevado, sin embargo se la presenta como alternativa, por la efectividad que se obtiene en el producto extruido, la Figura 2.5 muestra el tipo de husillos no engranados.



**Figura 2.5:** Doble Husillo no Engranado  
**Fuente:** Basado en [17]

Son dos husillos que no se encuentran engranados, lo que significa que sus hélices no están penetrando en los canales del otro y su disposición es uno a continuación de otro [16]. La Tabla 2.13 muestra las ventajas y desventajas de este tipo de husillo

**Tabla 2.13:** Ventajas-Desventajas: Husillo No Engranado

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Mayor arrastre del material a lo largo de la extrusora	Costo de producción elevado.
Tiempo de producción alto.	Precisión en la construcción de los husillos para el engranaje de sus filetes.
Extrusión total del material.	Estructura maciza poco compacta

**Fuente:** El autor

#### 2.2.2.4 Criterios de Selección del Subsistema B

Para evaluar de manera efectiva el subsistema de alimentación se han tomado los siguientes criterios como primordiales:

- **Costo:** El criterio del costo de cada una de las alternativas debe ser tomado en cuenta para determinar el más económico y aportar a la reducción del costo total del proyecto.
- **Tiempo de producción:** Este criterio permite definir el tiempo que se demorará en producir la extrusión de la materia prima. Mientras menor tiempo mejor ponderado el criterio.
- **Precisión de ensamblado:** Este criterio se lo tomará en cuenta debido a que mientras mayor sea la precisión del ensamblado de los ejes de la

extrusora, mayor será el tiempo total de ensamblado del prototipo. El criterio deseado será menor tiempo de ensamblado.

- Arrastre del material: Mientras exista mayor arrastre del material se generará menor desperdicio y mayor ganancia entre la materia prima ingresada y la obtenida.

A continuación se realiza la ponderación para determinar las mejores alternativas en base a la matriz Pugh.

**Tabla 2.14:** Ponderación de Alternativas del Subsistema B

Costo>Tiempo=Arrastre>Ensamblado						
	Costo	Tiempo	Arrastre	Ensamblado	$\Sigma+1$	Ponderación
Costo		1	1	1	4	0,40
Tiempo	0		0,5	1	2,5	0,25
Arrastre	0	0,5		1	2,5	0,25
Ensamblado	0	0	0		1	0,10
TOTAL					10	1

Fuente: El autor

La Tabla 2.14 muestra al costo como el principal criterio de selección el momento de elegir cualquier alternativa, a continuación el tiempo y el arrastre de material con igual importancia y como último criterio la precisión que necesita para ser ensamblado.

**Tabla 2.15:** Criterios de Selección: Costo

Alternativa 1>Alternativa 2>Alternativa 3					
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	1	3	0,50
Alternativa 2	0		1	2	0,33
Alternativa 3	0	0		1	0,17
TOTAL				6	1

Fuente: El autor

Los resultados de la Tabla 2.15 muestra que la alternativa 1 (monohusillo) es la mejor opción en base al costo más bajo.

**Tabla 2.16:** Criterios de Selección: Tiempo de Producción

Alternativa 1<Alternativa 2<Alternativa 3					
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	0	1	0,17
Alternativa 2	1		0	2	0,33
Alternativa 3	1	1		3	0,50
TOTAL				6	1

Fuente: El autor

La Tabla 2.16 muestra en cuanto a tiempos de producción la alternativa 3 (doble husillo no engrando) es la mejor en comparación con las 2 alternativas más.

**Tabla 2.17:** Criterios de Selección: Arrastre del Material

Alternativa 1<Alternativa 2<Alternativa 3					
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\sum+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	0	1	0,17
Alternativa 2	1		0	2	0,33
Alternativa 3	1	1		3	0,50
TOTAL				6	1

Fuente: El autor

La alternativa 3 (doble husillo no engrando) es la mejor opción para el arrastre del material según los criterios analizados en la Tabla 2.17.

**Tabla 2.18:** Criterios de Selección: Precisión de Ensamblado

Alternativa 1>Alternativa 2>Alternativa 3					
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\sum+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	1	3	0,50
Alternativa 2	0		1	2	0,33
Alternativa 3	0	0		1	0,17
TOTAL				6	1

Fuente: El autor

La Tabla 2.18 muestra que la alternativa 1 (monohusillo) es la que necesita una menor precisión al ensamblado del husillo y la camisa.

De igual forma que en el subsistema A, para escoger la alternativa se realiza una multiplicación del puntaje que obtuvo el criterio en la Tabla 2.14 y el puntaje que obtuvo cada alternativa al momento de evaluar con cada uno de los criterios.

**Tabla 2.19:** Ponderación de Criterios vs. Alternativas del Subsistema B

	Costo	Tiempo	Arrastre	Ensamblado	$\sum$	Prioridad
Alternativa 1	0,2	0,04	0,04	0,05	0,34	1
Alternativa 2	0,13	0,08	0,08	0,03	0,33	3
Alternativa 3	0,06	0,12	0,12	0,02	0,34	2

Fuente: El autor

En este subsistema, en la sumatoria para escoger la mejor alternativa tanto la alternativa 1 (monohusillo) como la alternativa 3 (husillo doble no engrando) comparten el mismo puntaje, de esta forma se podría escoger cualquiera de las

dos alternativas, pero en la Tabla 2.14 se demostró numéricamente que el criterio de costo es el que predomina ante los otros criterios, por lo tanto se escoge la alternativa 1 (monohusillo) debido a que es la mejor referente al costo.

### 2.2.3 SUBSISTEMA C: ENFRIAMIENTO

El enfriamiento se ha considerado como un subsistema por la importancia de la solidificación de los filamentos para la obtención del hilo en el proceso de bobinado. A pesar que los filamentos adquieren la solidificación necesaria en la caída desde el proceso de hilatura hasta el bobinado, se debe asegurar mediante elementos enfriadores para evitar la adhesión de los filamentos uno con otros.

Este proceso comienza una vez que termine el proceso de extrusión y haya pasado por el proceso de hilatura donde se desprenderán los filamentos.

Para este subsistema se considera un sistema de enfriamiento por aire forzado mecánicamente por un ventilador, visualizado en la Figura 2.6. El ventilador estará dispuesto de tal manera que impulse el aire en el trayecto de los filamentos de poliéster obtenido a partir del proceso de extrusión.



**Figura 2.6:** Ventilador de enfriamiento CMP-FAN25  
**Fuente:** Basado en [18]

## 2.2.4 SUBSISTEMA D: BOBINADO

El subsistema D analiza los diferentes tipos de motores que podrán ser utilizados en el proceso de bobinado de los filamentos para la obtención del hilo. Para el presente proyecto se requiere que el bobinado sea de forma constante y que el motor permita variar la velocidad de giro de acuerdo a la cantidad de producto que se obtenga luego de la hilatura. Entre los tipos de motores existentes en el mercado para la aplicación se denotan tres alternativas.

### 2.2.4.1 Alternativa 1: Motor a Pasos

Los motores a pasos están constituidos por bobinas dispuestas alrededor de un rotor las cuales permiten el giro del eje a través de impulsos eléctricos suministrados por un circuito de control, dependiendo de la forma en que las bobinas estén dispuestas el paso podrá variar desde  $1^\circ$  hasta  $15^\circ$ , lo que significa que se necesitan de 360 pasos para el primer caso y de 24 pasos para el segundo con el fin de completar una vuelta entera. Si se incrementa la velocidad el par torsional se reducirá debido a que sus bobinas no tienen el suficiente espacio de tiempo para cargarse y producir el giro [19]. La Figura 2.7 muestra un motor a pasos disponible en el mercado.



**Figura 2.7:** Motor a Pasos S7BYGH420  
**Fuente:** Basado en [20]

La Tabla 2.20 muestra las ventajas y desventajas del motor a pasos.

Tabla 2.20: Ventajas-Desventajas: Motor a Pasos

Ventajas	Desventajas
Debido al control que se puede realizar en los pasos del motor es posible generar giros de alta precisión.	Son motores grandes debido a que en su construcción no existe una relación entre el volumen del motor y la potencia que suministra.
El desgaste del motor es bajo debido a que no poseen escobillas.	El torque disminuye a medida que la velocidad se incrementa.
Permite ser controlado sin necesidad de encoder o elementos de retroalimentación.	Comparando con un motor DC del mismo voltaje y torque son de costo más elevado debido a su precisión.

Fuente: El autor

### 2.2.4.2 Alternativa 2: Servomotor

Un servomotor está definido en su interior por una caja de engranajes, un motor DC y un circuito que definirá la posición del motor de acuerdo a la necesidad. Los servomotores poseen un rango de operación entre 0 a 180° y se los controla mediante pulsaciones de 0 o 5V emitidas por un circuito de control externo, la frecuencia de operación entre pulsación y pulsación es de 20 ms y el ancho de pulso dependerá de cuántos grados se necesiten para posicionar el servomotor [21]. La Figura 2.8 muestra diferentes tipos de servomotores.



Figura 2.8: Servomotores HiTec  
Fuente: Basado en [22]

Las ventajas y desventajas de los servomotores son mostradas en la Tabla 2.21.

Tabla 2.21: Ventajas-Desventajas: Servomotores

Ventajas	Desventajas
La incorporación de un sistema de retroalimentación.	En comparación con un motor DC y a pasos de mismo torque y voltaje el costo es mayor.
Bajo costo de operación y mantenimiento	Trabajan con corrientes altas de hasta 1 A por lo que es necesario fuentes de alimentación de 5V con altos amperajes.
Ciclo de vida prolongado y genera altos torques.	Está limitado a variar su posición de 0 a 180 grados
Se lo puede conectar directamente al microcontrolador sin necesidad de elementos adicionales como drivers, transistores, etc.	

Fuente: El autor

### 2.2.4.3 Alternativa 3: Motor de Corriente Continua

Los motores DC poseen la cualidad de generar potencia mecánica rotativa en el momento que son alimentados a corriente continua, existen 4 tipos de motores DC:

- De imán permanente.
- Devanado shunt.
- Devanado en serie.
- Devanado compuesto.

Como alternativa se seleccionará el motor de imán permanente, que basa su funcionamiento al campo magnético generado entre los imanes ubicados en el estator, lo que provoca el giro del eje, además existe una linealidad entre el torque y la velocidad significando que proporciona igualdad entre los dos parámetros, este tipo de motores pueden contar con un juego de engranajes para disminuir las revoluciones y aumentar el torque [23]. La Figura 2.9 muestra el motor DC de imán permanente disponible en el mercado.



**Figura 2.9:** Motor de Corriente Continua  
**Fuente:** Basado en [24]

La Tabla 2.22 muestra las ventajas y desventajas de los motores DC.

**Tabla 2.22:** Ventajas-Desventajas: Motor DC

Ventajas	Desventajas
Costo del motor en comparación a un motor a pasos o servomotor es menor	Se corroen con el tiempo, en general se reduce el campo magnético máximo alcanzable.
Son más pequeños y ligeros debido al campo de imán permanente [23].	La precisión del motor es muy baja.

**Fuente:** El autor

#### 2.2.4.4 Criterios de Selección del Subsistema D

Para evaluar de manera efectiva el subsistema de bobinado se han tomado los siguientes criterios como primordiales:

- **Costo:** Este criterio se toma en cuenta para no incrementar el costo total de la máquina
- **Giro:** Se refiere al giro que realiza el motor. Para la aplicación del proyecto se necesita que el motor realice un giro completo de 360°.
- **Precisión:** Este criterio se lo tomará en relación a los 3 tipos de motores presentados con diferentes precisiones. Para este proyecto no se necesita una precisión mayor en el bobinado, el motor sólo debe girar en un sentido y a velocidad constante.
- **Mantenimiento:** Este criterio implica si el motor requiere mantenimiento constante. A pesar de que cualquiera de los motores requerirá un mantenimiento mínimo a causa de la frecuencia de uso de la máquina.

Se realiza el análisis de cada criterio determinando cual será el de mayor importancia para la selección de las alternativas, de la misma forma que se efectuó para el subsistema A y B.

Tabla 2.23: Ponderación de Alternativas del Subsistema D

Costo>Giro>Precisión>Mantenimiento						
	Costo	Giro	Precisión	Mantenimiento	$\Sigma+1$	Ponderación
Costo		1	1	1	4	0,40
Giro	0		1	1	3	0,30
Precisión	0	0		0,5	1,5	0,15
Mantenimiento	0	0	0,5		1,5	0,15
TOTAL					10	1

Fuente: El autor

La Tabla 2.23 determina las ponderaciones de los criterios, resultando el costo como principal factor al seleccionar las alternativas seguido del giro, la precisión y el mantenimiento tienen la misma importancia.

Tabla 2.24: Criterios de Selección: Costo

Alternativa 3>Alternativa 1>Alternativa 2					
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	0	2	0,34
Alternativa 2	0		0	1	0,16
Alternativa 3	1	1		3	0,50
TOTAL				6	1

Fuente: El autor

La alternativa 3 (motor DC) resulta más económica en comparación a las otras alternativas como lo muestra la Tabla 2.24.

Tabla 2.25: Criterios de Selección: Giro del Motor

Alternativa 1=Alternativa 3>Alternativa 2					
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	0,5	2,5	0,42
Alternativa 2	0		0	1	0,16
Alternativa 3	0,5	1		2,5	0,42
TOTAL				6	1

Fuente: El autor

Para el giro del motor la alternativa 1 (motor a pasos) y la alternativa 3 (motor DC) cubren la necesidad de un giro completo, por lo que están ponderadas iguales tal como lo muestra la Tabla 2.25.

Tabla 2.26: Criterios de Selección: Precisión

Alternativa 2>Alternativa 1>Alternativa 3					
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	1	2	0,34
Alternativa 2	1		1	3	0,50
Alternativa 3	0	0		1	0,16
TOTAL				6	1

Fuente: El autor

Como resultado de la Tabla 2.26 la alternativa 2 (servomotor) tiene mayor precisión que las otras alternativas evaluadas.

**Tabla 2.27:** Criterios de Selección: Mantenimiento

Alternativa 2>Alternativa 1>Alternativa 3					
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\sum+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	1	2	0,34
Alternativa 2	1		1	3	0,50
Alternativa 3	0	0		1	0,16
TOTAL				6	100%

Fuente: El autor

La alternativa que requiere un menor mantenimiento es la alternativa 2 (servomotor) por lo que es la mejor ponderada como lo muestra la Tabla 2.27.

Para escoger la mejor alternativa se realiza una multiplicación del puntaje que obtuvo el criterio en la Tabla 2.23 y el puntaje que obtuvo cada alternativa al momento de evaluar con cada uno de los criterios.

**Tabla 2.28:** Ponderación de Criterios vs. Alternativas del Subsistema D

	Costo	Giro	Precisión	Mantenimiento	$\sum$	Prioridad
Alternativa 1	0,13	0,13	0,05	0,05	0,36	2
Alternativa 2	0,06	0,04	0,07	0,07	0,24	3
Alternativa 3	0,2	0,13	0,02	0,02	0,37	1

Fuente: El autor

En base a las operaciones mostradas en la Tabla 2.28, la alternativa con mayor ponderación es la alternativa 1 (motor DC), por lo tanto, esta es la que se utilizará.

## 2.2.5 SUBSISTEMA E: SISTEMA DE CONTROL PARA LA TEMPERATURA

Debido a que se va a realizar una extrusión en caliente es necesario controlar la temperatura de la máquina, por lo que al implementar un sistema de control se necesita analizar los diferentes tipos de controles que existen, entre los más utilizados se encuentran:

- Control ON - OFF con Histéresis.
- Control Proporcional.
- Control Proporcional Integral.
- Control Proporcional Integral Derivativo.

Los sistemas de control listados son los más estudiados pero cabe recalcar que para el análisis de este subsistema no se tomará en cuenta el Control Proporcional Integral Derivativo debido a que es muy preciso y para la aplicación de control de temperatura sería una subutilización del mismo.

### 2.2.5.1 Alternativa 1: Control ON-OFF

El control ON-OFF es una técnica básica de control que consiste en asignar un nivel de referencia a la variable a ser controlada, de esa forma si la señal de control está por debajo del valor establecido como referencia, el controlador encenderá un actuador y se apagará cuando la señal de control supere el nivel de referencia. Debido a lo sencillo que resulta implementar este tipo de controlador es en muchas ocasiones inestable por lo que se recomienda utilizar histéresis para estabilizar el sistema. La Figura 2.10 muestra las curvas generadas por este tipo de control.

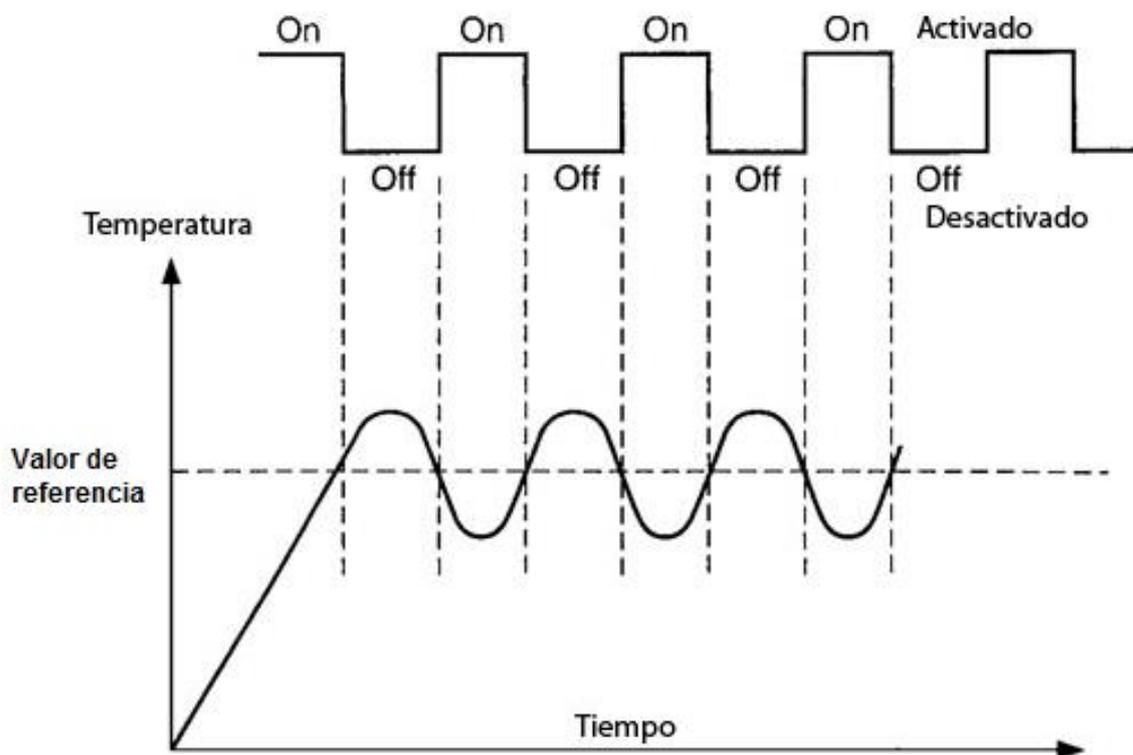


Figura 2.10: Control ON - OFF  
Fuente: Basado en [25]

La Tabla 2.29 muestra las ventajas y desventajas del control ON-OFF con histéresis.

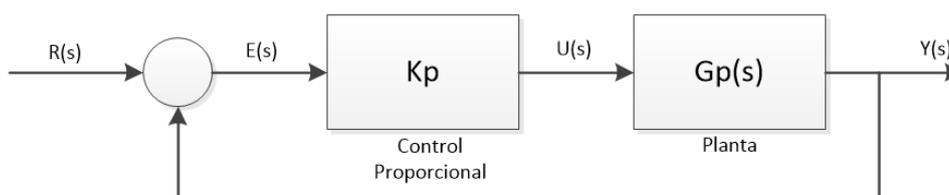
Tabla 2.29: Ventajas-Desventajas: Controlador ON - OFF

Ventajas	Desventajas
Técnica sencilla, barata y fiable.	El tiempo de respuesta es largo.
Apropiada en situaciones donde el valor medido solo debe ser entre dos límites.	Este control genera mucha oscilación de la variable medida con respecto al punto de referencia (set point) por lo que necesita histéresis.
Ideal para el encendido y apagado de calefactores.	Debido a que es un control de lazo abierto no se controlan perturbaciones.

Fuente: El autor

### 2.2.5.2 Alternativa 2: Control Proporcional (P).

Algunas aplicaciones requieren un control más preciso que el ON-OFF por lo que el Control Proporcional obtiene un error mediante la diferencia entre la señal de referencia y el valor medido. El control proporcional produce una acción de control  $Y(s)$  con una magnitud proporcional a la señal de error  $E(s)$  como se indica en la Figura 2.11.



Señal de control  $u(s) = k_p \cdot E(s)$

Error  $E(s) = R(s) - Y(s)$

Salida  $Y(s) = Gp(s) \cdot U(s)$

Figura 2.11: Control Proporcional

Fuente: Basado [26]

La Tabla 2.30 muestra las ventajas y desventajas del control proporcional.

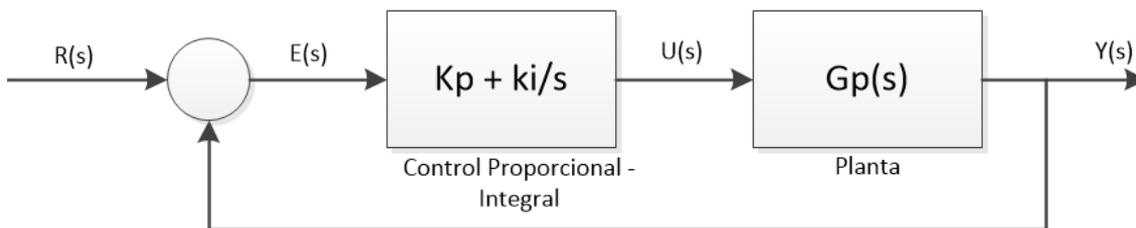
Tabla 2.30: Ventajas-Desventajas: Controlador P

Ventajas	Desventajas
Genera una apertura gradual del actuador en base a la variable medida y el set point	Debido a su forma de control la respuesta para el control de temperatura es rápida.
El control responde muy rápido y dinámicamente es relativamente rápido.	En la variable de 2do orden podría producir oscilaciones.
El controlador amplifica la cantidad a la que cambia su salida en proporción al cambio de la entrada.	

Fuente: El autor

### 2.2.5.3 Alternativa 3: Control Proporcional Integral (PI).

El modo de control integral (I) tiene como propósito disminuir y eliminar el error, provocado por el modo proporcional. La parte integral de este tipo de controlador produce una señal que es proporcional a la integral con respecto al tiempo de entrada del controlador [26]. La Figura 2.12 muestra un sistema prototipo de primer orden con un controlador PI en serie.



Señal de control  $u(s) = (k_p + \frac{k_i}{s}) \cdot E(s)$

Error  $E(s) = R(s) - Y(s)$

Salida  $Y(s) = G_p(s) \cdot U(s)$

**Figura 2.12:** Control Proporcional Integral  
Fuente: Basado en [26]

La Tabla 2.31 muestra las ventajas y desventajas del control Proporcional Integrativo.

**Tabla 2.31:** Ventajas-Desventajas: Control PI

Ventajas	Desventajas
Elimina el error causado por el control proporcional.	El nivel de diseño es mayor al de un control P
El tiempo de estabilización es mucho mayor.	Cálculo de variable $K_i$
Mayor rechazo a perturbaciones	

Fuente: El autor

### 2.2.5.4 Criterios de Selección del Subsistema E

- Tiempo de Respuesta: Para esta aplicación no se necesita un tiempo de inmediato de conmutación, por lo tanto mientras menor tiempo de respuesta menor puntaje.
- Rechazo a Perturbaciones: En la aplicación se estima trabajar bajo condiciones de laboratorio por lo que las perturbaciones van a ser mínimas para la máquina.

- Costo: En este subsistema el costo no difiere en gran medida entre cada una de las alternativas, sin embargo se lo ha tomado en cuenta para seleccionar el más económico.

**Tabla 2.32:** Ponderación de Alternativas del Subsistema E

Respuesta>Perturbaciones>Costo					
	Respuesta	Perturbaciones	Costo	$\Sigma+1$	Ponderación
Respuesta		0,5	1	2,5	0,41
Perturbaciones	0,5		1	2,5	0,41
Costo	0	0		1	0,16
TOTAL				6	1

Fuente: El autor

En base a la Tabla 2.32, se obtiene que el tiempo de respuesta tiene la misma importancia que el rechazo a las perturbaciones y el costo es el criterio menos relevante.

**Tabla 2.33:** Criterios de Selección: Tiempo de respuesta

Alternativa 1>Alternativa 2>Alternativa 3					
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	1	3	0,50
Alternativa 2	0		1	2	0,33
Alternativa 3	0	0		1	0,17
TOTAL				6	1

Fuente: El autor

La Tabla 2.33 muestra que la alternativa 1 (control ON - OFF) es la que tiene menor tiempo de respuesta y en base a la aplicación para la cual se la va a utilizar que es el encendido y apagado de un calefactor, es una alternativa que va acorde a la necesidad.

**Tabla 2.34:** Criterios de Selección: Perturbaciones

Alternativa 1>Alternativa 2>Alternativa 3					
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	1	3	0,50
Alternativa 2	0		1	2	0,33
Alternativa 3	0	0		1	0,17
TOTAL				6	1

Fuente: El autor

En base a la Tabla 2.34 se puede observar que la mejor alternativa según la aplicación es la alternativa 1 (control ON - OFF).

Tabla 2.35: Criterio de Selección: Costo

Alternativa 1>Alternativa 2>Alternativa 3					
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	1	3	0,50
Alternativa 2	0		1	2	0,33
Alternativa 3	0	0		1	0,17
TOTAL				6	100%

Fuente: El autor

En cuanto a costo la Tabla 2.35 muestra que la alternativa 1 (control ON-OFF), es la más económica en comparación al resto de las alternativas.

Tabla 2.36: Ponderación de Criterios vs. Alternativas del Subsistema E

	Respuesta	Perturbación	Costo	$\Sigma$	Prioridad
Alternativa 1	0,25	0,25	0,25	0,75	1
Alternativa 2	0,13	0,1353	0,1353	0,405	2
Alternativa 3	0,065	0,065	0,065	0,19	3

Fuente: El autor

La alternativa de sistema de control seleccionada para el subsistema E es la alternativa 1, un control ON - OFF, como lo muestra la Tabla 2.36, el cual tiene concordancia con los requerimientos del sistema. El tipo de extrusión será en caliente esto provocará que el sistema de control sólo encienda o apague el actuador de temperatura.

## 2.3 MATRIZ MORFOLÓGICA

La matriz morfológica muestra la combinación de soluciones o alternativas planteadas para cada subsistema de la PET Spinning V1.0 y ayuda a la generación de ideas de mejora para futuras investigaciones en los subsistemas, visualizando cuáles fueron las alternativas escogidas y desechadas [13].

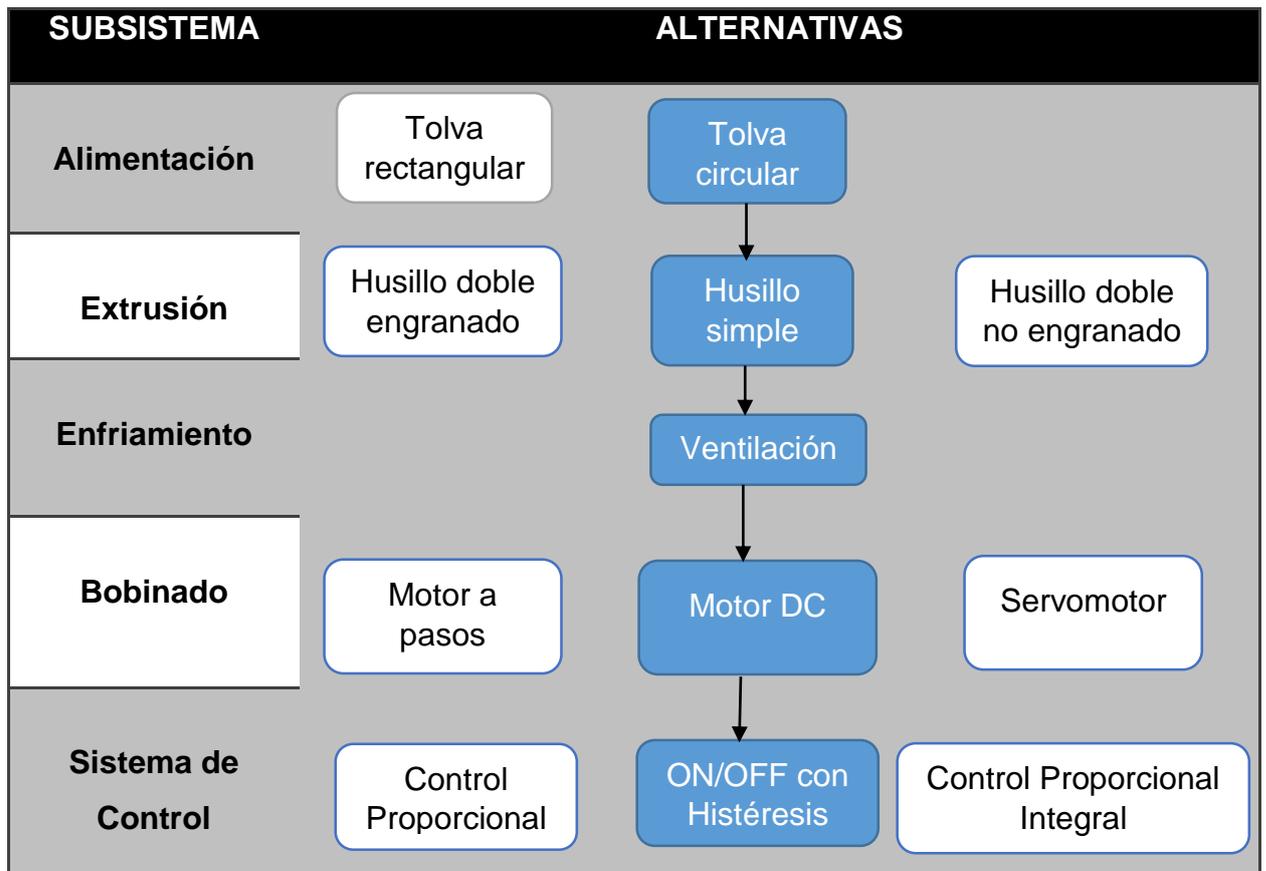


Figura 2.13: Selección de alternativas de todos los subsistemas  
Fuente: El autor

## CAPÍTULO III DISEÑO MECATRÓNICO

En este capítulo se realizan los cálculos respectivos y el análisis para el diseño mecánico y electrónico de la PET Spinning V.1.0. Estos cálculos serán tomados para la construcción de la máquina y asegurarán al diseñador el funcionamiento apropiado en cada uno de los subsistemas.

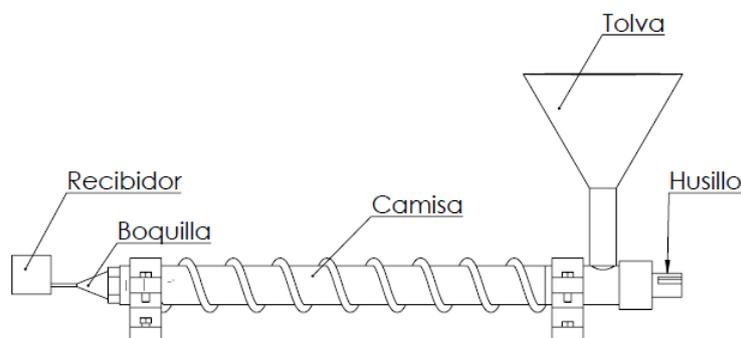
Como principal factor en las extrusoras es el cálculo del husillo, debido a que en base a este elemento partirá el dimensionamiento de las partes restantes del extrusor. En el presente proyecto se han realizado varias investigaciones en cuanto a cálculos de husillos, por lo que se utilizarán trabajos ya comprobados para el cálculo de este elemento. El cálculo del husillo, su material y su tolva será basado en [27]. En cuanto al resto de la máquina será realizado por el autor generando como aporte la construcción total del prototipo PET Spinning V1.0 hasta la obtención de hilo y las pruebas de laboratorio del producto obtenido.

### 3.1 PARÁMETROS MECÁNICOS DE LA EXTRUSORA

En base a [27], se tomarán las dimensiones ya calculadas del husillo, camisa y tolva de la extrusora para la sección 3.1. De ser necesario una mayor especificación de cada uno de los cálculos revisar el Anexo A.

#### 3.1.1 COMPONENTES DE UNA EXTRUSORA

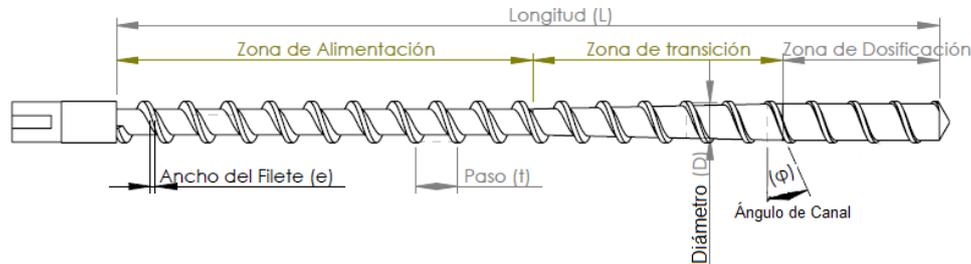
Para comenzar con el dimensionamiento de la máquina extrusora es necesario indicar las principales partes que la componen, en la Figura 3.1 se pueden observar los parámetros mecánicos que deben ser tomados en cuenta.



**Figura 3.1:** Componentes de la extrusora  
Fuente: El autor

### 3.1.2 DIMENSIONAMIENTO DEL HUSILLO

La Figura 3.2 muestra el husillo con sus principales parámetros, por tanto, según [27], las dimensiones utilizadas para el torneado del husillo son:



**Figura 3.2:** Parámetros del husillo  
Fuente: El autor

#### 3.1.2.1 Diámetro

El diámetro del husillo (especificado en el Anexo A sección A.1.1), es:

$$D = 32\text{mm}$$

#### 3.1.2.2 Longitud

La longitud del husillo es recomendable que sea 20 veces mayor al diámetro, por tanto el resultado del cálculo para la longitud (descrito en el Anexo A sección A.1.1), es:

$$L = 640\text{ mm}$$

#### 3.1.2.3 Paso de los filetes

El paso es la longitud existente entre el comienzo y el final del filete que rodea al alma del husillo, su medida (especificado en el Anexo A sección A.1.1), es:

$$t = 32\text{ mm}$$

#### 3.1.2.4 Ancho de los filetes

El ancho establecido para los filetes de todo el husillo resultante del cálculo (detallado en el Anexo A sección A.1.1) es:

$$e = 3,84\text{ mm}$$

### 3.1.2.5 Ángulo de hélice de canal

El ángulo existente entre los filetes y el canal del husillo (descrito en el Anexo A sección A.1.1) es:

$$\varphi = 17,65^\circ$$

### 3.1.2.6 Caudal de la extrusora

Considerando el flujo de filtración, arrastre y presión (especificados en el Anexo A sección A.1.1.1), en conjunto con los parámetros mencionados el caudal de producción resulta:

$$Q = 22,73 \frac{kg}{h}$$

### 3.1.2.7 Número de filetes

A través del husillo el número de filetes (señalados en el Anexo A sección A.1.1.3) que están presentes son:

$$\# \text{ filetes} \approx 20 \text{ filetes}$$

### 3.1.2.8 Potencia requerida

La potencia requerida para el movimiento del husillo (detallado en el Anexo A sección A.1.1.5), es:

$$P = 2,62 \text{ kW}$$

### 3.1.2.9 Presión de operación

La presión de operación a la que trabaja la extrusora (descrito en el Anexo A sección A.1.1.6), es:

$$P_{op} = 50,145 \text{ MPa}$$

### 3.1.2.10 Peso del husillo

Los parámetros indicados permiten determinar el peso de los filetes y del alma del husillo, obteniendo el peso total del husillo, cuyo cálculo se encuentra especificado en el Anexo A sección A.1.1.7.

$$m = 2,33 \text{ kg}$$

### 3.1.2.11 Zonas del husillo

El husillo se divide en tres zonas, las longitudes de cada una (especificadas en el Anexo A sección A.1.1.2) son:

- Zona de alimentación: 320 mm.
- Zona de transición: 192 mm.
- Zona de dosificación: 128 mm.

### 3.1.2.12 Material del husillo

El husillo es un componente que está expuesto a altas temperaturas, a consecuencia, el material idóneo es el acero 4140, cuyas características se encuentran en el Anexo B.

## 3.1.3 DIMENSIONAMIENTO DE LA CAMISA

La camisa es el componente que recubre al husillo, además de la temperatura los dos elementos en conjunto permiten la fundición del material, debido a la fricción que se provoca entre los filetes y la superficie interna de la camisa.

### 3.1.3.1 Holgura

Es necesario que exista holgura entre los filetes del husillo y la camisa, para permitir el paso del material fundido, pero no debe excederse para conservar la presión de operación, por lo tanto la holgura existente (cálculo detallado en el Anexo A sección A.1.1.1.2) es:

$$\delta = 0,0064 \text{ cm.}$$

### 3.1.3.2 Longitud

Puesto que la camisa es un componente cobertor, debe tener la misma longitud presente en el husillo por tanto

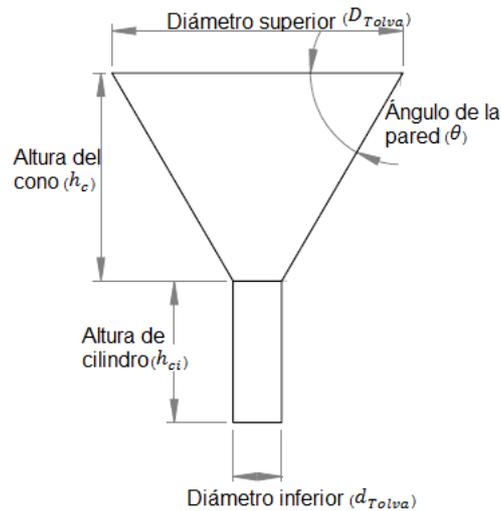
$$L = 640 \text{ mm}$$

### 3.1.3.3 Material de la camisa

Debido a que la camisa tendrá contacto directo con el calefactor, es necesario que el material soporte altas temperaturas, por lo tanto el material de la camisa será de acero 4140.

### 3.1.4 DIMENSIONAMIENTO DE LA TOLVA

El análisis de alternativas realizado en la sección 2.2.1.1, determinó que la tolva idónea para la extrusora es la de sección circular. La Figura 3.3 muestra las principales partes de la tolva dimensionada en [27] y especificadas en el Anexo A sección A.1.2.



**Figura 3.3:** Parámetros de la tolva  
Fuente: El autor

#### 3.1.4.1 Diámetro superior

El diámetro superior de la tolva es:

$$D_{Tolva} = 20 \text{ cm}$$

#### 3.1.4.2 Diámetro inferior

El diámetro inferior correspondiente de la tolva es:

$$d_{Tolva} = 3 \text{ cm}$$

#### 3.1.4.3 Altura del cono

La altura del cono establecida es:

$$h_c = 14,72 \text{ cm}$$

#### 3.1.4.4 Altura del cilindro

La altura del cilindro de la tolva establecida es:

$$h_{ci} = 10 \text{ cm}$$

### 3.1.4.5 Ángulo de la pared

El ángulo de la pared de la tolva es:

$$\theta = 60^\circ$$

### 3.1.4.6 Material de la tolva

El material adecuado para la tolva es el tol, debido a que los gránulos reciclados de PET no necesitan especificaciones de calidad para el almacenamiento y es un material de fácil adquisición en el mercado.

## 3.1.5 SECCIÓN DE HILATURA

La sección de hilatura está formado por la boquilla por donde sale el material extruido y el recibidor donde se encuentran los orificios que forman los filamentos.

### 3.1.5.1 Boquilla

La boquilla se encuentra acoplada mediante rosca a la salida de la extrusora y permite dosificar el flujo de material proveniente de la extrusión por medio de la cavidad que se encuentra al final de la boquilla. Para el presente trabajo se determinó en base a prueba y error que el mejor diámetro para el orificio es de 9 mm, en base al orificio se puede realizar el resto de dimensionamientos geométricos de la boquilla como se muestra en la Figura 3.4. El espacio restante a la salida de la camisa, permitió dimensionar la rosca que se acopla a la boquilla.

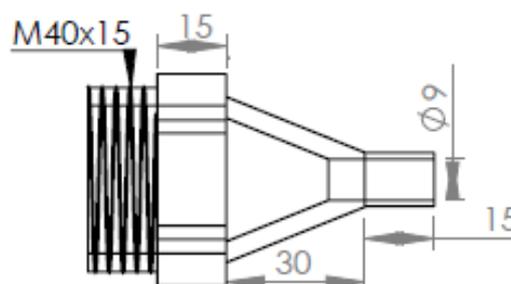
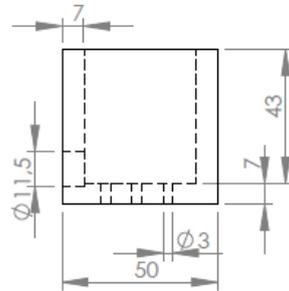


Figura 3.4: Boquilla  
Fuente: El autor

### 3.1.5.2 Recibidor

Al salir el material fundido por la boquilla, se desplaza hacia el recibidor mostrado en la Figura 3.5. El recibidor cumple la función dar forma a los filamentos que atraviesan orificios que se encuentran en la base por acción de la gravedad, de

esta forma se concluye el proceso de hilatura por fusión. De manera experimental se determinó que los orificios para la base del receptor sean de 3 mm.



**Figura 3.5:** Vista lateral del receptor  
**Fuente:** El autor

En máquinas industriales el receptor de material fundido además de dar forma a los filamentos, suministra el espesor del cual va a ser el hilo, variando el diámetro de los orificios de la base.

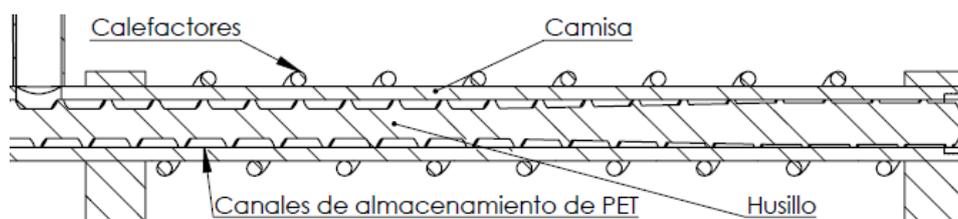
El receptor contará con un calefactor de 700 W para lograr mantener la temperatura del material a la salida de la extrusora y no se solidifique antes de formar los filamentos.

## 3.2 DISEÑO ELECTRÓNICO

### 3.2.1 CALENTAMIENTO DEL PET

Para poder extruir el PET reciclado es necesario elevar la temperatura en el interior de la camisa desde ambiente hasta 260 °C que es cuando el PET se funde y llega a su estado líquido.

Para calcular la cantidad de energía eléctrica que se debe utilizar para llevar al PET al estado de fundición, es necesario entender cómo va a estar dispuesta la extrusora mediante un corte longitudinal a la misma, tal como lo muestra la Figura 3.6.



**Figura 3.6:** Corte longitudinal de la extrusora  
**Fuente:** El autor

Tal como se muestra el ensamblaje de la extrusora es primero el husillo, luego la camisa y luego el calefactor, que disipará toda la energía de calentamiento. De esta manera el calentamiento de la máquina va a ser por conducción del calefactor a la camisa, por tanto se debe asegurar calentar la camisa para que disipe la energía calorífica al PET.

Es necesario calcular la potencia térmica a ser transmitida del calefactor a la camisa mediante la siguiente ecuación:

$$P = \frac{\lambda \cdot A \cdot (\Delta T^\circ)}{d} \quad (1)$$

Donde:

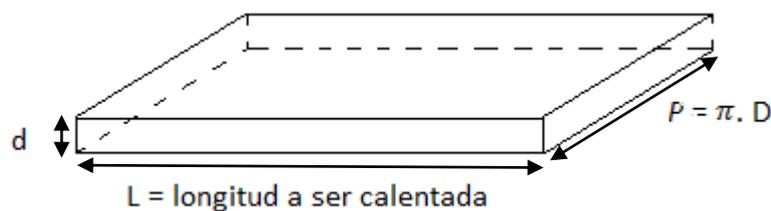
$\lambda$  = Conductividad térmica del acero 4140 [W/m°C].

$A$  = Área de la superficie a calentar [m<sup>2</sup>].

$\Delta T$  = Variación de temperatura [°C].

$d$  = Espesor del material [m].

El área de la superficie a calentar será la pared exterior de la camisa, de esta forma se representa a la camisa extendida mostrada en la Figura 3.7, para obtener su área, considerando los valores del diámetro exterior y la longitud a ser calentada.



**Figura 3.7:** Representación de la camisa extendida.

**Fuente:** El autor

$$A = (\pi \cdot D) \cdot L \quad (2)$$

Donde:

$D$  = Diámetro exterior de la camisa [m].

$L$  = Longitud de camisa a ser calentada [m].

Reemplazando en (2), se obtiene:

$$A = (\pi \cdot 0,05) \cdot 0,5$$

$$A = 0,0785 \text{ m}^2$$

Con los datos obtenidos se reemplaza en (1)

$$P = \frac{37,7 \cdot 0,0785 \cdot (260^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C})}{0,1}$$

$$P = 7,10 \text{ kW}$$

La potencia obtenida es la potencia calorífica total que se necesita para elevar la temperatura de 20°C a 260°C, en el interior de la extrusora y poder fundir el material.

Para obtener la potencia es necesario la utilización de calefactores que estén cubriendo las distintas zonas de la extrusora, entregando toda la potencia calorífica que se necesita. En la industria se puede encontrar varios tipos de calefactores: tipo banda, flexibles o tubulares blindados, como lo muestra la Figura 3.8. Para esta aplicación se utilizarán los tubulares blindados debido a su fácil adquisición en el mercado local.



**Figura 3.8:** Calefactores tubulares blindados.

**Fuente:** Basado en [28]

Para su construcción es necesario calcular la potencia eléctrica del calefactor, que viene a ser la rapidez con la que fluye la energía por un conductor térmico. Se tiene como dato que el calefactor trabaja a un voltaje de 220V y que se genera

una resistencia experimental al paso de la corriente de  $20\Omega$ , sin embargo es necesario calcularla mediante (3):

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (3)$$

Donde:

$\rho$  = Resistividad del material [ $\Omega \cdot m$ ].

L = Longitud de la resistencia [m].

A = Área de la sección del conductor [ $m^2$ ].

Se conoce como dato que el material utilizado es de coltan, el cual posee una resistividad de  $7,23 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot m$ , además la longitud y el diámetro del conductor es de  $2 \times 0,008$  m, por lo tanto se reemplaza en (3).

$$R = 7,23 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{2}{\pi \cdot 0,004^2 \cdot 2}$$

$$R = 14,4 \Omega$$

Por lo tanto el promedio entre la resistencia teórica y práctica es  $15,6 \Omega$ . Para determinar la potencia se tiene dos fórmulas.

$$P_{elec} = I \cdot V \quad (3)$$

$$P_{elec} = \frac{V^2}{R} \quad (4)$$

Donde:

I = Corriente del calefactor [A].

V = Voltaje de alimentación [V].

R= Resistencia [ $\Omega$ ].

Se reemplaza en 3 y en 4 despejando la corriente:

$$I = \frac{V}{R}$$

$$I = \frac{220}{15,6}$$

$$I = 14,10 A$$

Reemplazando en (3) se tiene:

$$P_{elec} = 14,10 \cdot 220$$

$$P_{elec} = 3,10 kW$$

Esta es la potencia eléctrica que deberá tener el calefactor para suministrar toda la potencia calorífica que se necesita la camisa para fundir el PET.

Para determinar la temperatura máxima a la que deberá trabajar el calefactor se utilizará (1), con los mismos datos, pero usando la potencia eléctrica para despejar la temperatura máxima a la que debe trabajar.

Reemplazando en (1) se tiene:

$$2,51 kW = \frac{37,7 \cdot 0,0785 \cdot (T_{m\acute{a}x} - 260)}{0,1}$$

Se despeja la temperatura máxima:

$$T_{m\acute{a}x} = 260 + \frac{2420 \cdot 0,1}{37,7 \cdot 0,0785}$$

$$T_{m\acute{a}x} = 345^{\circ}C$$

Esa será la temperatura máxima a la que trabajará el calefactor con una potencia eléctrica de 2,51 kW, y de igual forma asegurará suministrar toda la potencia calorífica.

### **3.2.2 SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA**

Permite regular la temperatura de operación de la máquina mediante la conexión de calefactores, termocupla y controladores de temperatura que permitirán controlar el calentamiento de los calefactores.

#### **3.2.2.1 Termocupla**

Las termocuplas son los sensores de temperatura mayormente utilizados en la industria, que permiten obtener la magnitud física de la temperatura y

transformarla a voltaje. Una termocupla se hace con dos alambres de distinto material unidos en un extremo (soldados generalmente). Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño (efecto Seebeck<sup>5</sup>) del orden de los milivoltios el cual aumenta con la temperatura [29].

Por ejemplo, una termocupla "tipo J" mostrada en la Figura 3.7, está hecha con un alambre de hierro y otro de constantán (aleación de cobre y níquel), al colocar la unión de estos metales a 750 °C, se induce en los extremos una diferencia de potencial de 42.2 milivoltios.

A partir de información técnica, es recomendable una termocupla con las siguientes especificaciones, como se muestra en la Tabla 3.1:

**Tabla 3.1:** Características de Termocupla Tipo J

<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES</b>	
Tipo	J
Cable + Aleación	Hierro
Rango de Aplicación	De -200 a 700 °C
Diámetro del alambre	1 a 3 mm

Fuente: Basada en [29]

La Figura 3.9 muestra una termocupla tipo J, disponible en el mercado, para mayores especificaciones técnicas revisar el Anexo C.



**Figura 3.9:** Termocupla Tipo J

Fuente: Basada en [30]

<sup>5</sup> El efecto Seebeck es la conversión de diferencias de temperatura directamente a electricidad.

### 3.2.2.2 Controlador de Temperatura

Para realizar el control, se optó por utilizar un módulo digital de control de temperatura, el cual se muestra en la Figura 3.10. Este proporciona todas las funciones necesarias para el control. El módulo cuenta con una entrada para ingresar la señal proveniente de una termocupla, relés de salida que permiten accionar diferentes dispositivos en este caso permitirá accionar el calefactor, tiene modos de control PID y ON-OFF.



Figura 3.10: Módulo Controlador de Temperatura iBest TCM SR4

Fuente: Basado en [31]

El controlador de temperatura seleccionado de acuerdo a las necesidades de la máquina es el iBest TCM SR4. La Figura 3.9 muestra el diagrama de los controladores de temperatura, para información técnica revisar el Anexo D.

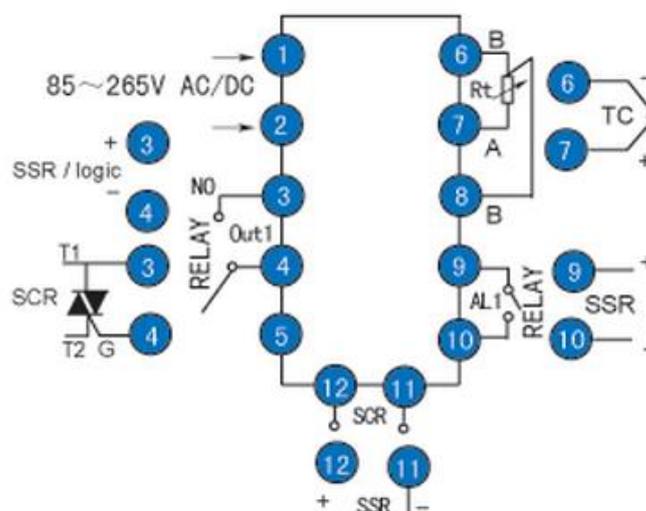


Figura 3.11: Diagrama del controlador de temperatura digital iBest TCM SR4

Fuente: Basado en [31]

La Tabla 3.2 muestra las características generales del controlador de temperatura seleccionado.

**Tabla 3.2:** Características generales del controlador de temperatura

<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES</b>	
Dimensiones	48 x 48 mm
Selección de salidas	SSR, Relé
Voltaje de alimentación	90 – 220V ac 50/60 Hz
Entradas	Termocupla: K, J, R, T RTD: Pt100
Tipos de Control	PID, ON/OFF, Histéresis.
Relés	2 relés y 2 alarmas.

Fuente: Basado en [31]

El tipo de controlador seleccionado en el capítulo II fue el ON-OFF, por lo tanto el controlador de temperatura se modificará para que proporcione un control ON-OFF (para configuraciones revisar manual de usuario), la Figura 3.12 muestra el funcionamiento del módulo controlador de temperatura con una histéresis de 5°C.

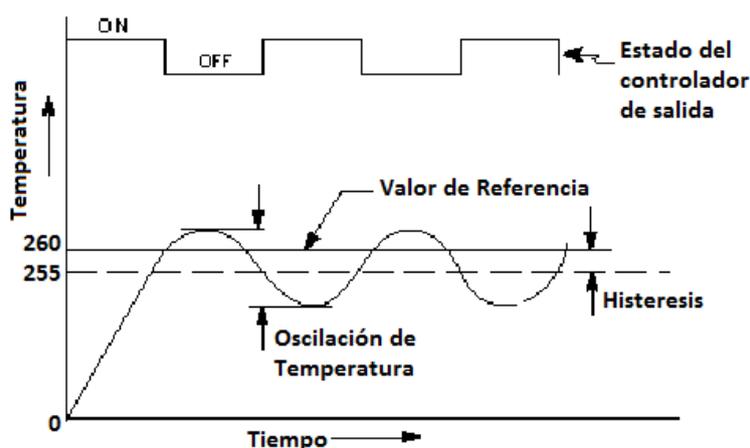


Figura 3.12: Gráfico de Control ON - OFF.

Fuente: Basada en [25].

### 3.2.2.2 Relé de estado sólido

Los relés de estado sólido o SSR (Solid State Rele) son dispositivos ampliamente utilizados en la conmutación de cargas resistivas con señales de control en DC o AC, los relés de estado sólido utilizan semiconductores como TRIAC's o SCR's, a diferencia de los relés electromagnéticos y contactores convencionales que en su construcción emplean bobinas y elementos mecánicos para realizar la conmutación.

Entre las ventajas de la utilización de este relé es que no sufren el desgaste mecánico ya que no tienen partes móviles, puede conmutar altas corrientes y voltajes sin producir arcos o ionizar el aire circundante, la interferencia es muy baja. En la extrusora el relé estará a la salida del controlador de temperatura y accionará los calefactores. La Figura 3.13 muestra el relé de estado sólido seleccionado.



**Figura 3.13:** Relé de estado sólido  
Fuente: Basado en [32]

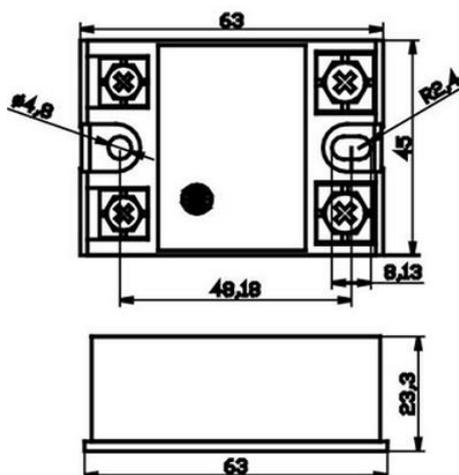
En la Tabla 3.3 se presentan las características generales del relé de estado sólido iBest., para más información técnica revisar el Anexo E.

**Tabla 3.3:** Características generales del relé de estado sólido

<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES</b>	
Voltaje de Carga	24 a 660v AC
Voltaje de Control	3 a 32v DC
Corriente	Hasta 40A

Fuente: Basado en [32]

En la Figura 3.14 se muestran las dimensiones del relé de estado sólido iBest.



**Figura 3.14:** Dimensiones Relé de Estado Sólido

Fuente: Basado en [32]

### 3.2.4 SELECCIÓN DEL MOTORREDUCTOR PARA HUSILLO

Para la selección del motorreductor se consideró los parámetros obtenidos en [27], especificados en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4:** Características generales para la selección del motor

Especificación	Cantidad
Torque	220 Nm
Revoluciones	113,7 rpm
Potencia	2,62 kW

**Nota:** Los datos de la tabla fueron obtenidas del Anexo A

Debido a que en el mercado no se encuentran motores que cumplan las características especificadas, se debe seleccionar un motor el cual admita acoplar un reductor. La Tabla 3.5 muestra los motores existentes que permiten ser acoplados a reductores.

**Tabla 3.5:** Catálogo de Motores ABB.

Potencia		Eficiencia [%] % de la potencia nominal	Factor de potencia				In	Is	Ivacio	Tn	Ts	Tmax	Momento de inercia J=1/4GD2	Peso	Ruido				
[kW]	[HP]		50	75	100	50										75	100	FS	[A]
4 polos = 1500 r/min		400 V 50 Hz																	
0,25	0,34	M2QA 71 M4A	1395	59,8	63,3	65,5	0,55	0,66	0,72	1,15	0,77	5,2	0,60	1,71	2,1	2,7	0,00053	11	43
0,37	0,5	M2QA 71 M4B	1395	63,6	69,4	68,5	0,55	0,68	0,75	1,15	1,0	5,2	0,70	2,5	2,1	2,7	0,00066	11	45
0,55	0,74	M2QA 80 M4A	1410	68,3	71,4	73,5	0,52	0,65	0,72	1,15	1,5	5,2	1,1	3,7	2,4	2,7	0,00145	16	46
0,75	1	M2QA 80 M4B	1415	72,1	75,2	74,5	0,53	0,67	0,75	1,15	1,9	6,0	1,4	5,1	2,4	2,6	0,00174	17	46
1,10	1,5	M2QA 90 S4A	1400	74,7	77,8	77,5	0,61	0,73	0,78	1,15	2,7	6,0	1,5	7,5	2,3	2,4	0,00254	21	52

**Fuente:** Basado en [33]

Según el catálogo de motores ABB Ecuador, el motor apropiado es el modelo M2QA 80 M4B. La Figura 3.15 muestra el motor seleccionado.



**Figura 3.15:** Motor trifásico M2QA 80 M4B.

**Fuente:** Basado en [33]

Del motor seleccionado es necesario elevar el torque de salida y disminuir las revoluciones, por lo que el reductor analizado en el mercado, en cuanto a sus prestaciones para la aplicación del proyecto, es el MotoVario HA32, cuyas características se muestran en la Tabla 3.6.

**Tabla 3.6:** Características Motorreductor

Marca	MotoVario
Modelo	HA32
Relación	16,49:1
Torque de Salida	51 N.m.
Revoluciones	103 rpm

**Fuente:** Basado en [34]

### 3.2.4 VARIADOR DE FRECUENCIA PARA MOTORREDUCTOR

Es un dispositivo electrónico que está diseñado para controlar la velocidad de los motores de corriente alterna, variando la frecuencia que ingresa al motor. El variador de frecuencia en su interior posee un diseño robusto, por lo que posee la ventaja de soportar ruido industrial [35].

El poder variar la frecuencia de un motor, implica que permita generar un arranque suave para evitar sobre corrientes y desgastes mecánicos del motor. En las industrias por lo general cuando necesitan arrancar motores utilizan sistemas arrancadores en estrella-triángulo o un arrancador suave [35].

Los arrancadores suaves constituyen una muy buena opción cuando se trata de reducir el stress mecánico del motor y la máquina durante el arranque. Sin embargo, la reducción de corriente durante el arranque no siempre se puede conseguir. En estos casos, el variador de frecuencia aporta ventajas comparativas pues mantiene intacto los rendimientos de torque del motor, permitiendo arrancar cualquier máquina por difícil que sea su arranque, y agrega una reducción de corriente importante. El variador de frecuencia permite variar la velocidad de funcionamiento del motor en cualquier etapa de operación, en tanto que el arrancador suave no realiza esta función.

Para el caso de la PET Spinning V1.0 se utiliza un motorreductor de 220V que tiene una potencia de 1 HP y trabaja a 60 Hz de frecuencia, de acuerdo a esto se selecciona el variador de frecuencia de la marca LS Industrial Systems (nuevo nombre de LG Electronics) el modelo SV008iG5A-2 mostrado en la Figura 3.14, para mayor información técnica revisar el Anexo F.



**Figura 3.16:** Variador de Frecuencia LS SV008iG5A-2  
Fuente: Basado en [36]

### 3.3 SEGURIDAD FUNCIONAL DEL PROTOTIPO

Las industrias hoy en día, están destinando elevadas cantidades de dinero para realizar estudios de las seguridades en las máquinas, con el fin de implementar controles, ya sea visuales o físicos para precautelar la seguridad y salud de sus empleados, pero en especial de las personas que operan las máquinas.

Es importante aclarar que si una persona no está capacitada para utilizar la PET Spinning V1.0, no debe accionarla por ningún motivo ya que existen mecanismos y accionamientos que podrían desembocar en un accidente.

Es primordial conocer los principales factores de riesgos que existen los cuales pueden estar presentes en la PET Spinning V1.0. Los factores de riesgo son 6: mecánicos, físicos, ergonómicos, psicosociales, químicos, biológicos, en la máquina los tres últimos factores de riesgos no están presentes debido a que no se manipula químicos, microorganismos ni se genera un estrés en la operación, por lo tanto se ha considerado describir en la Tabla 3.7 los tres primeros factores de riesgo.

Tabla 3.7: Factores de riesgo

Factor de Riesgo	Definición	Ejemplos	
		Peligros	Riesgo
Riesgo Mecánico	Factores que pueden dar lugar a una lesión por la acción mecánica de elementos de máquinas, herramientas, piezas a trabajar o materiales proyectados, sólidos o fluidos.	Rodamientos	Atrapamiento entre objetos
		Engranajes	Atrapamiento entre objetos
		Cuchillas	Cortes
		Pisos irregulares	Torceduras
		Altura	Caídas
Riesgo Físico	Son todos los factores ambientales que dependen de las propiedades físicas de los cuerpos que pueden generar lesión a las personas	Superficies calientes	Quemaduras
		Ruido superior a 85dB	Problemas auditivos
Riesgo Ergonómico	Factores que pueden provocar algún evento adverso provocado por malas posturas o estaciones de trabajo inadecuadas	Posiciones forzadas	Problemas musculares
		Sobreesfuerzos	Problemas lumbares
		Cargas superiores a 25kg	Problemas lumbares

Fuente: El autor

### 3.3.1 MAPA DE RIESGOS

Es importante implementar en la máquina un control visual que permita divisar correctamente donde se encuentran los riesgos y qué podría causar a la persona que está operando la máquina.

Antes de trabajar se debe capacitar al operador tanto en los riesgos de la máquina como en los riesgos que está expuesto, mediante una matriz de riesgos de la persona descrita en la sección 3.3.2, de esta forma el personal entenderá que podría sucederle si no maneja con precaución la operación.

El mapa de riesgos además de ser un control visual, es un control para el operador, para que cada día antes de prender la máquina llene cada uno de los riesgos recordando su ubicación y consecuencia, tal como lo muestra la Figura 3.17.

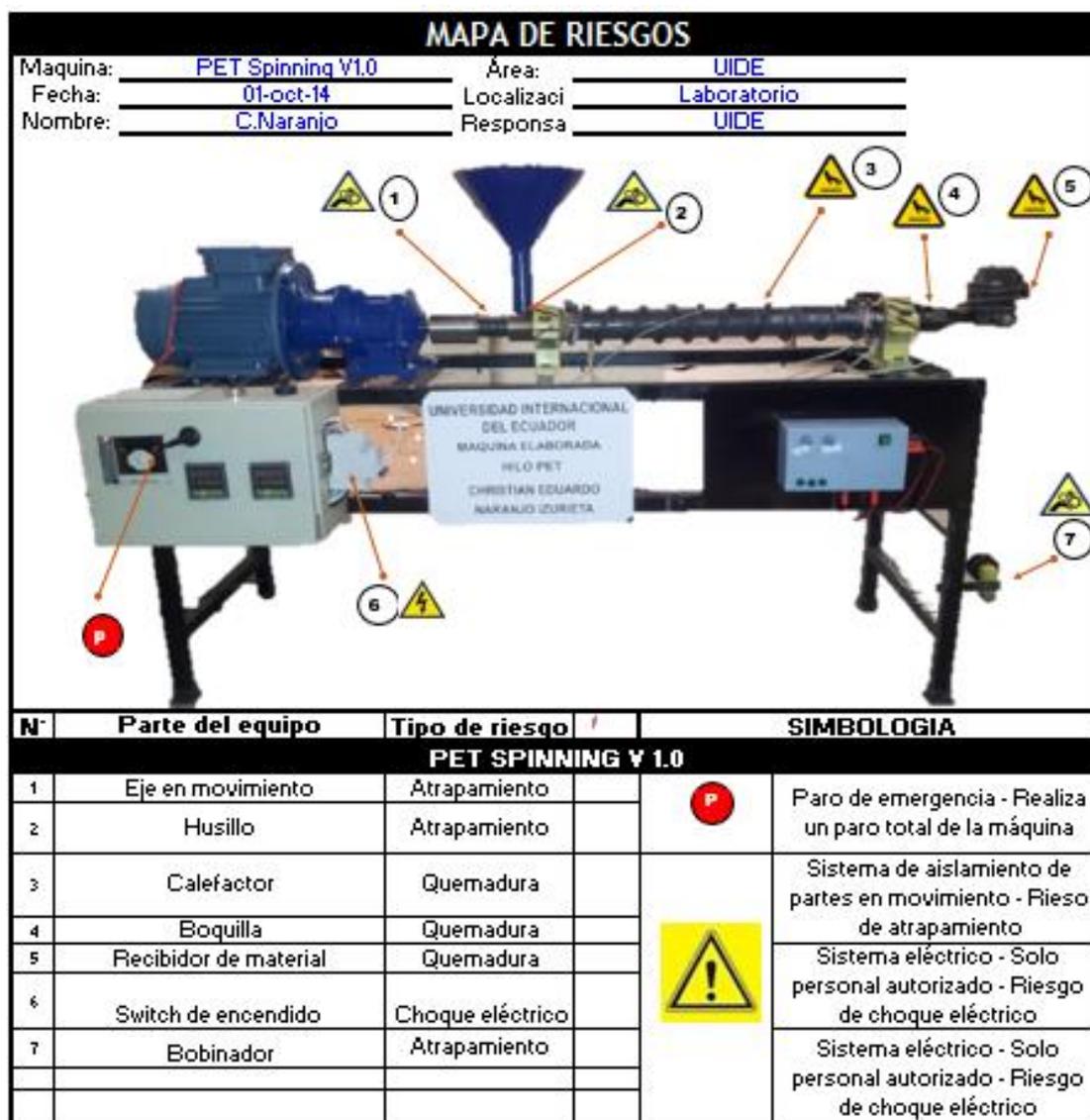


Figura 3.17: Mapa de Riesgos  
Fuente: El autor

### **3.3.2 IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS Y EVALUACIÓN DE RIESGOS (MATRIZ DE RIESGOS)**

La matriz de riesgos es una matriz en la que se identifican todos los peligros existentes para el operador y se evalúan los riesgos de los peligros, en la matriz se cruza la probabilidad y consecuencia de los riesgos a los que está expuesto el operario y en base a eso determinar que controles se debe implementar en la máquina.

La matriz de riesgos presentada, está basada en el INSHT<sup>6</sup> y se muestra en la Tabla 3.8.

---

<sup>6</sup> INSHT: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene es un órgano científico técnico español que tiene como misión el análisis y estudio de las condiciones de seguridad y salud en el trabajo.

Tabla 3.8: Matriz de Riesgos

IDENTIFICACIÓN								EVALUACIÓN				
#	TAREA	CONDICIÓN DE OPERACIÓN IDENTIFICADA			DESCRIPCIÓN DEL PELIGRO	FACTORES DE RIESGO			Probabilidad	Consecuencia	VALORACIÓN DEL RIESGO	
		RUTINARIAS	NO RUTINARIAS	EMERGENTE		MECÁNICO	FÍSICO	ERGONÓMICO				
1	Energizar la máquina	x			Conectores a 220V	Contactos eléctricos indirectos			2	2	4	MODERADO
2	Encender switch de calefactor y variador.	x			Conectores a 220V	Contactos eléctricos indirectos			1	2	2	TOLERABLE
3	Ingresar material a la tolva de alimentación.	x			Ubicación de tolva			Carga física posición	2	1	2	TOLERABLE
					Calefactor		Exposición a temperaturas extremas	2	2	4	MODERADO	
4	Accionar el motorreductor	x			Conectores a 220V	Contactos eléctricos indirectos			1	2	2	TOLERABLE
5	Controlar la salida de material	x			Calefactor		Temperatura		2	1	2	TOLERABLE
							Exposición a temperaturas extremas	2	2	4	MODERADO	
						Hilo	Exposición a temperaturas extremas	2	2	4	MODERADO	
6	Retirar el bobinador cuando esté lleno	x			Hilo		Exposición a temperaturas extremas	2	2	4	MODERADO	
7	Parar motorreductor	x			Conectores a 220V	Contactos eléctricos indirectos			1	2	2	MODERADO
8	Suspender calefactor	x			Conectores a 220V	Contactos eléctricos indirectos			1	2	2	TOLERABLE
9	Realizar limpieza de máquina	x			Piezas calientes		Contactos térmicos extremos		1	2	2	TOLERABLE

Fuente: El autor

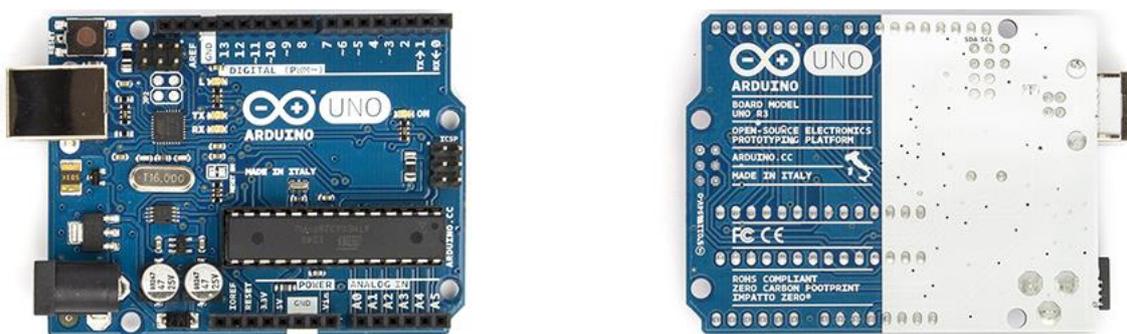
Como conclusión de la Tabla 3.7, es que todos los riesgos evaluados deben ser conocidos por la persona que opera y claramente entendidos de la consecuencia de entrar en interacción con alguno de ellos.

Como recomendación es construir una guarda para protección de quemaduras por interacción con los calefactores, además implementar los controles visuales necesarios en la máquina y capacitar a los trabajadores en los riesgos descritos.

### 3.4 SISTEMA DE BOBINADO DEL HILO

Una vez que la masa extruida sale por la hilera, es necesario disponer de un sistema que bobine el hilo. El sistema propuesto constará de una cámara de ventilación formada por dos ventiladores que tendrá la función de solidificar el hilo a la caída de la hilera y de dos motores, el primero accionará un brazo mecánico para unir los filamentos y el segundo proporcionará el torque necesario a un carrete que recoja el hilo sin que ejerza demasiada tensión para desprenderlo.

El sistema se lo controlará mediante una placa Arduino® UNO (especificaciones técnicas Anexo G), mostrada en la Figura 3.18 que es una placa con un microcontrolador ATmega328, cuenta con 14 pines de salidas y entradas digitales, 6 entradas análogas, un resonador cerámico 16 MHz, un conector USB y un botón de reset.



**Figura 3.18:** Módulo Arduino UNO  
Fuente: Basado en [37]

De la placa Arduino® UNO, se utilizarán 6 salidas digitales para el encendido o apagado de los motores del brazo mecánico, bobinador y ventiladores, de igual forma para variar las velocidades se utilizarán los pines analógicos.

Para la aplicación del bobinado y brazo mecánico se utilizará el mismo tipo de motor DC mostrado en la Figura 3.19, el cual es usado para aplicaciones robóticas por lo que incorpora con una caja reductora que brinda mayor torque para las aplicaciones.



**Figura 3.19:** Motor DC con reductor de engranajes

Fuente: Basado en [38]

La Tabla 3.9 describe las características del motor y de la adaptación de la caja reductora.

**Tabla 3.9:** Características del Motor DC

Elemento	Parámetro	Voltaje de Trabajo		
		DC 3V	DC 5V	DC 6V
Motor (sin caja reductora)	RPM	125 RPM		
	Corriente	80 - 100 mA		
Caja reductora	Relación	48:01:00		
	Velocidad sin carga	125 RPM	200 RPM	230 RPM
	Velocidad con carga	95 RPM	180 RPM	220 RPM
	Torque de salida	0,8 kg.cm	1 kg.cm	1,1 kg.cm
	Corriente	110-120 mA	120-140 mA	130-150 mA
	Dimensiones	66x26,6 mm		
	Peso	50 g		
	Ruido	<65dB		

Fuente: Basado en [38]

La cámara de ventilación cumplirá la función de ayudar al enfriamiento de los filamentos de PET que caen por la hilera, se utilizará ventiladores Techman VN-2350, trabajan a un voltaje de 12V, proporcionan una velocidad de giro de 3000 rpm, la Figura 3.20 muestra el ventilador que servirá para la máquina.



Figura 3.20: Ventilador Techman VN - 2350

Fuente: Basado en [39]

El diagrama de conexión al microcontrolador Arduino® UNO (programación especificada en el Anexo H), se muestra en la Figura 3.21.

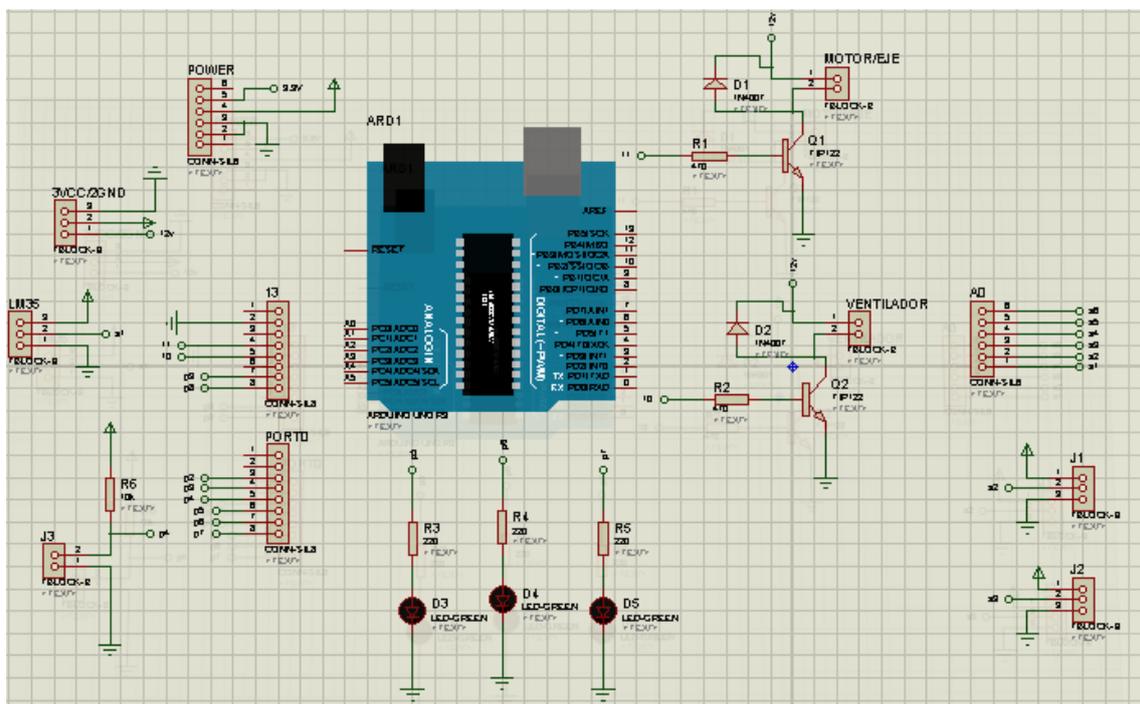


Figura 3.21: Diagrama de conexión Arduino

Fuente: El autor

El esquema en 3D del circuito se lo puede observar en el Anexo I.

## CAPÍTULO IV

### CONSTRUCCIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS

Este capítulo describe paso a paso la construcción y montaje de la máquina PET Spinning V 1.0, incluyendo todos los elementos tanto la parte mecánica, de control y electrónica. Se evidencia mediante fotografías la construcción de cada pieza, generando como resultado final la máquina ensamblada.

#### 4.1 CONSTRUCCIÓN MECÁNICA

1. Como primer paso se realizó la máquina, mediante un software de CAD SolidWorks® (versión demo 2013) como se muestra en la Figura 4.1.

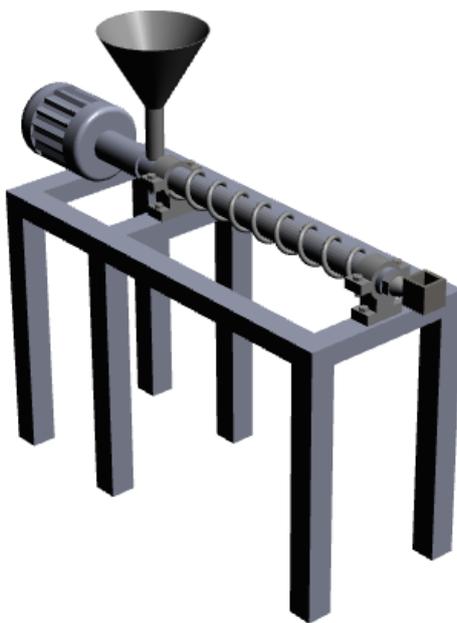
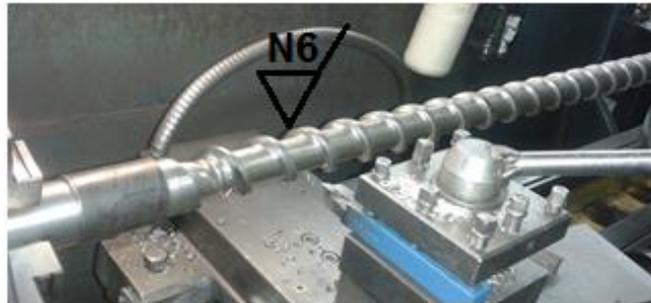


Figura 4.1: Esquema de la máquina PET Spinning V1.0

Fuente: El autor

2. Se inicia el torneado del husillo extrusor con el dimensionamiento especificado en el capítulo III como lo muestra la Figura 4.2. La clase de rugosidad con el que se torneó la pieza es N6 ( $R_a = 0,8 \mu m$ ), lo que significa que el mecanizado no se lo puede notar ni visualmente ni con el tacto solo se lo apreciará con el uso de lupa. Se determina N6 debido al torno en donde se lo realizó, además el número de clase torneado en el acero 4140 permite trabajar con polímeros sin mayores

inconvenientes para el prototipo realizado. En el Anexo J muestra más características acerca de las clases de rugosidades y su nomenclatura.



**Figura 4.2:** Husillo Simple  
**Fuente:** El autor

3. Una vez determinado el diámetro de la extrusora se realiza el torneado de la camisa que recubrirá el husillo como lo muestra la Figura 4.3.



**Figura 4.3:** Camisa de la extrusora  
**Fuente:** El autor

4. A continuación se realiza el torneado de la boquilla, por donde pasa el material en estado de fundición. La boquilla se muestra en la Figura 4.4.



**Figura 4.4:** Boquilla de la extrusora  
**Fuente:** El autor

5. Se construye la tolva, como se muestra en la Figura 4.5 para la alimentación del material, bajo los parámetros establecidos en la sección 3.1.4.



**Figura 4.5:** Tolva de Alimentación  
**Fuente:** El autor

6. Se construyen las bases que soporta a la camisa de la extrusora. Para la construcción primero se realizó el corte del acero ST-37 mediante oxicorte permitiendo crear la pieza, luego se efectúa el fresado donde va ubicada la camisa, posteriormente se realiza el torneado de la pieza, a continuación se realiza las perforaciones para los pernos que ajustan las bases y como último paso se divide en la mitad de la perforación para facilidad al momento de ensamblar la camisa, como lo muestra la Figura 4.6.



**Figura 4.6:** Bases para la camisa  
**Fuente:** El autor

7. Como se muestra en la Figura 4.8, se construye el calefactor formado en su interior por coltán y en el capuchón que recubre el filamento de incoloy de espesor 8 mm y largo 200 cm, el cual permite llegar a la temperatura de operación de la PET Spinning V. 1.0 sin degradarse.



**Figura 4.7:** Calefactor

**Fuente:** El autor

8. Se procede a unir el calefactor realizado con la camisa de la extrusora como lo muestra la Figura 4.8.



**Figura 4.8:** Ensamble de la camisa y calefactor

**Fuente:** El autor

9. A continuación se insertan las bases de la extrusora en la camisa como se ve en la Figura 4.9.



**Figura 4.9:** Colocación de bases

**Fuente:** El autor

10. Posteriormente se ensambla el husillo dentro de la camisa con un ajuste deslizante 32 H7-h6 que significa una tolerancia de 25 centésimas de milímetro entre el husillo – camisa. Este tipo de ajuste permite la movilidad del husillo dentro de la camisa, sin riesgo de que se genere una soldadura mecánica entre elementos.



**Figura 4.10:** Ensamble del husillo en la camisa

**Fuente:** El autor

11. Se realiza el acople del motorreductor que permitirá el movimiento del husillo, este acople va de la mano de la inserción de la chaveta como se indica la Figura 4.11.



**Figura 4.11:** Implementación del motor  
**Fuente:** El autor

12. La tolva es ensamblada en la camisa a la altura de la zona de alimentación tal como lo muestra la Figura 4.12.



**Figura 4.12:** Ensamble de la tolva  
**Fuente:** El autor

13. Como se muestra en la Figura 4.13, el acople de la boquilla con el recibidor ubicados al final de la camisa se lo realiza mediante rosca debido a la facilidad para el desmontaje de las piezas al momento de efectuar el mantenimiento.



**Figura 4.13:** Ensamble Boquilla-Recibidor  
**Fuente:** El autor

14. Como se muestra en la Figura 4.14, se procesa a insertar el calefactor perteneciente al recibidor para suministrar el calor necesario y que el material no se solidifique.



**Figura 4.14:** Ensamble Calefactor del Recibidor  
**Fuente:** El autor

15. Como principal paso en la estructura mecánica se coloca la base que está soportando el peso de la extrusora y resistirá los esfuerzos generados en el trabajo de la PET Spinning V1.0, tal como se observa en la Figura 4.15.



**Figura 4.15:** Base de la estructura  
**Fuente:** El autor

16. Con toda la parte de mecánica, se procede a colocar la cámara de ventilación que está en la caída de los filamentos. Los ventiladores tendrán la función de enfriar los filamentos del PET como lo muestra la Figura 4.16, el control se lo realiza por una placa Arduino®.



**Figura 4.16:** Ventiladores de enfriamiento del PET

**Fuente:** El autor

17. Como siguiente paso se procede a la colocación del subsistema de bobinado de hilo, el cual se muestra en la Figura 4.17.



**Figura 4.17:** Motor Bobinador

**Fuente:** El autor

18. A continuación se ensambla el brazo mecánico que une los filamentos para bobinar el hilo de forma ordenada, como se puede observar en la Figura 4.18.



**Figura 4.18:** Brazo mecánico

**Fuente:** El autor

## 4.2 IMPLEMENTACIÓN ELECTRÓNICA

1. Se implementan las termocuplas en el calefactor como se muestra en la Figura 4.19, para adquirir la variable física de la temperatura.



Figura 4.19: Implementación de termocuplas

Fuente: El autor

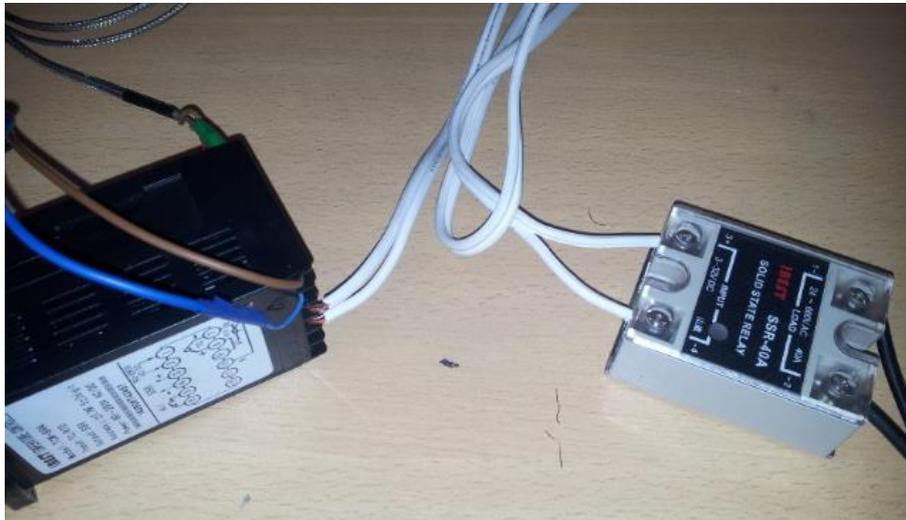
2. A continuación se colocan los controladores de temperatura en la caja de control, como se muestra en la Figura 4.20, las termocuplas ya colocadas se conectan a los controladores.



Figura 4.20: Implementación de los controladores de temperatura

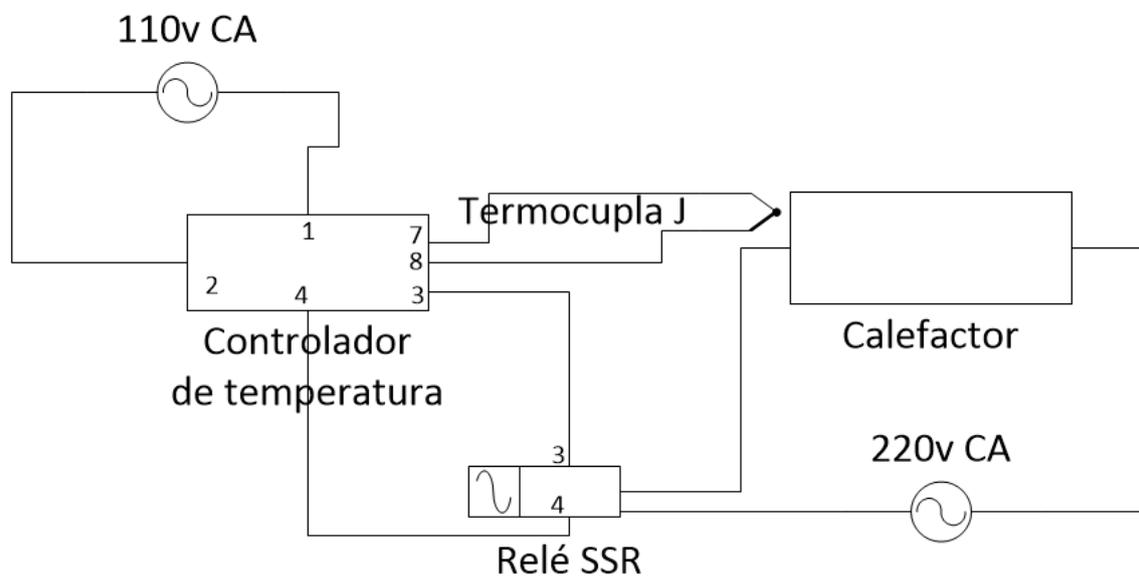
Fuente: El autor

3. A continuación, como muestra la Figura 4.21, se realiza la conexión de los controladores de temperatura a los relés de estado sólido (RSS) y los relés de estado sólido los calefactores. La Figura 4.22 muestra el diagrama del circuito de control y de alimentación a los calefactores.



**Figura 4.21:** Conexión de controladores y RSS

Fuente: El autor



**Figura 4.22:** Diagrama de control

Fuente: El autor

4. Para el control del motor se procede con la conexión de la fuente de 220V a los terminales R T del variador, el mismo es colocado en la caja de control y conectado a las terminales U V W del motorreductor, como lo muestra la Figura 4.23.



**Figura 4.23:** Conexión del Variador

**Fuente:** El autor

5. La implementación electrónica finaliza con la conexión del sistema bobinador a la placa Arduino la cual está dispuesta en una caja que protege al circuito tal como lo muestra la Figura 4.24.



**Figura 4.24:** Conexión del sistema bobinador

**Fuente:** El autor

### 4.3 PRUEBAS Y RESULTADOS

Es necesario realizar pruebas de funcionamiento a la PET SPINNING V 1.0 para obtener resultados y poder definir parámetros. Las pruebas que se van a realizar son las siguientes:

#### 4.3.1 PRUEBA 1 - FUNCIONAMIENTO DEL CONTROL DE TEMPERATURA

Al calibrar el controlador del calefactor se asegura que la operación se suspenda a la temperatura indicada (valor de referencia), caso contrario seguiría incrementándose y podría degradar el material, de igual forma si no se acciona nuevamente a la temperatura indicada el material no se fundiría. La Tabla 4.1 muestra los resultados de las pruebas realizadas mediante inspección visual.

**Tabla 4.1:** Funcionamiento del Control de Temperatura

Prueba	Valor de referencia	Histéresis	Se apaga al SP	T° de encendido
1	300°C	5°C	300°C	295°C
2	300°C	5°C	300°C	295°C
3	300°C	5°C	300°C	295°C
4	300°C	5°C	300°C	295°C
5	300°C	5°C	300°C	295°C

Fuente: El autor

El resultado mostrado en la Tabla 4.1 demuestra que el control de temperatura es 100% eficiente y responde según lo programado. La Figura 4.25 muestra el funcionamiento de los controladores de temperatura



**Figura 4.25:** Controladores de temperatura en funcionamiento

Fuente: El autor

### 4.3.2 PRUEBA 2 - TIEMPO PARA LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN

Se debe conocer el tiempo que el calefactor llega a su temperatura de operación ya que permite saber cuanto toma a la máquina estabilizarse para comenzar su funcionamiento. La Tabla 4.2 muestra los resultados de las pruebas.

**Tabla 4.2:** Tiempo para la Temperatura de Operación

Prueba	T° Inicial	T° de Operación	Tiempo
1	18°C	300°C	37 min
2	20°C	290°C	34,2 min
3	17°C	280°C	29,8 min
4	19°C	270°C	25,2 min
5	17°C	260°C	23 min

Fuente: El autor

La Tabla 4.2 muestra los diferentes tiempos que se demora el calefactor en llegar a las temperaturas de operación. Debido a que no cuenta con un recubrimiento en la camisa permite que el calor se disipe al exterior, provocando que los tiempos sean elevados.

### 4.3.3 PRUEBA 3 - TEMPERATURA DE INGRESO Y ESTADO FINAL DEL MATERIAL

De manera experimental en la prueba 3 se ingresó el material a temperatura ambiente y se inspeccionó de manera visual el estado en el que salida de la extrusora a partir de 260°C hasta 300°C. La Tabla 4.3 muestra los resultados de las pruebas.

**Tabla 4.3:** Temperatura de Ingreso y Estado del Material

Prueba	T° Material	T° Operación (zona de dosificación)	Estado del Material
1	18°C	300°C	Fundido/Degradado
2	18°C	290°C	Fundido
3	18°C	280°C	Fundido
4	18°C	270°C	Fundido
5	18°C	260°C	Grumo

Fuente: El autor

Como conclusión de la prueba se determina que el material se funde a partir de 270°C y a partir de los 300°C se degrada el material.

#### 4.3.4 PRUEBA 4 - CANTIDAD PRODUCIDA

De forma experimental, mediante el uso de una escala portátil que permite medir masa como lo muestra la Figura 4.26, se realizan las pruebas para determinar “La cantidad y tiempo de producción vs. El material ingresado”, donde primero se obtiene la masa en gramos de la materia prima ingresada a la extrusora y luego la del hilo producido con el desperdicio.



**Figura 4.26:** Medición de masa  
Fuente: El autor

La Tabla 4.4 muestra los resultados de las pruebas.

**Tabla 4.4:** Cantidad Producida

Prueba	Cantidad Ingresada	Hilo Producido	Desperdicio (sin solidificar)	Total producido	Desperdicio (material en la extrusora)	Tiempo
1	150g	42g	58g	100g	50g	0:05:30
2	150g	52g	48g	100g	50g	0:05:19
3	150g	20g	80g	100g	50g	0:05:00
4	150g	50g	50g	100g	50g	0:05:12
5	150g	52g	48g	100g	50g	0:05:00

Fuente: El autor

La tabla se demuestra que existe material que se queda en el interior de la extrusora, por lo que una vez realizada cualquier trabajo con la PET SPINING V1.0, se debe aplicar los procedimientos recomendados en el manual de mantenimiento.

### 4.3.5 PRUEBA 5 - TIEMPO DE SOLIDIFICACIÓN DE LOS FILAMENTOS

A la salida del recibidor, se toma el tiempo en que los filamentos se enfrían y se solidifican antes de ingresar al bobinador. La Tabla 4.5 muestra los resultados de las pruebas.

**Tabla 4.5:** Tiempo de Solidificación

Prueba	Tiempo de Solidificación
1	00:01:30
2	00:01:28
3	00:01:33
4	00:01:31
5	00:01:26

Fuente: El autor

### 4.3.6 PRUEBA 6 - ANÁLISIS DEL HILO OBTENIDO

Esta prueba se basa en el hilo producido y está formado por dos partes:

#### 4.3.6.1 Análisis certificado bajo laboratorio<sup>7</sup>

Se obtuvo la muestra de tres tipos de hilo producido a diferentes temperaturas y las muestras fueron probadas con máquinas para obtener la elongación y tracción, tal como lo muestra la Figura 4.27. Revisar las pruebas en el Anexo K.



**Figura 4.27:** Prueba de elongación y tracción  
Fuente: El autor

<sup>7</sup> Pruebas realizadas en el laboratorio certificado de análisis de esfuerzos y vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional, Quito - Ecuador

Tabla 4.6: Prueba de laboratorio: Muestra 1

<b>Muestra 1</b>				
	Temperatura	Carga Máxima		Elongación
<b>Zona de Alimentación</b>	235°C	2,75 lbf	12,2 N	2%
<b>Zona de dosificado</b>	305°C			
<b>Zona de hilado</b>	190°C			
<b>Frecuencia</b>	10 Hz			

Nota: Datos obtenidos de Anexo K

La Tabla 4.6 muestra que se obtiene como resultado una resistencia de 12,2 N y la elongación del 2%.

Tabla 4.7: Prueba de laboratorio: Muestra 2

<b>Muestra 2</b>				
	Temperatura	Carga Máxima		Elongación
<b>Zona de Alimentación</b>	220°C	3,66 lbf	16,28 N	4,9%
<b>Zona de dosificado</b>	300°C			
<b>Zona de hilado</b>	190°C			
<b>Frecuencia</b>	10 Hz			

Nota: Datos obtenidos de Anexo K

La Tabla 4.7 muestra que se obtiene como resultado una resistencia de 16,28 N y la elongación del 4,9%.

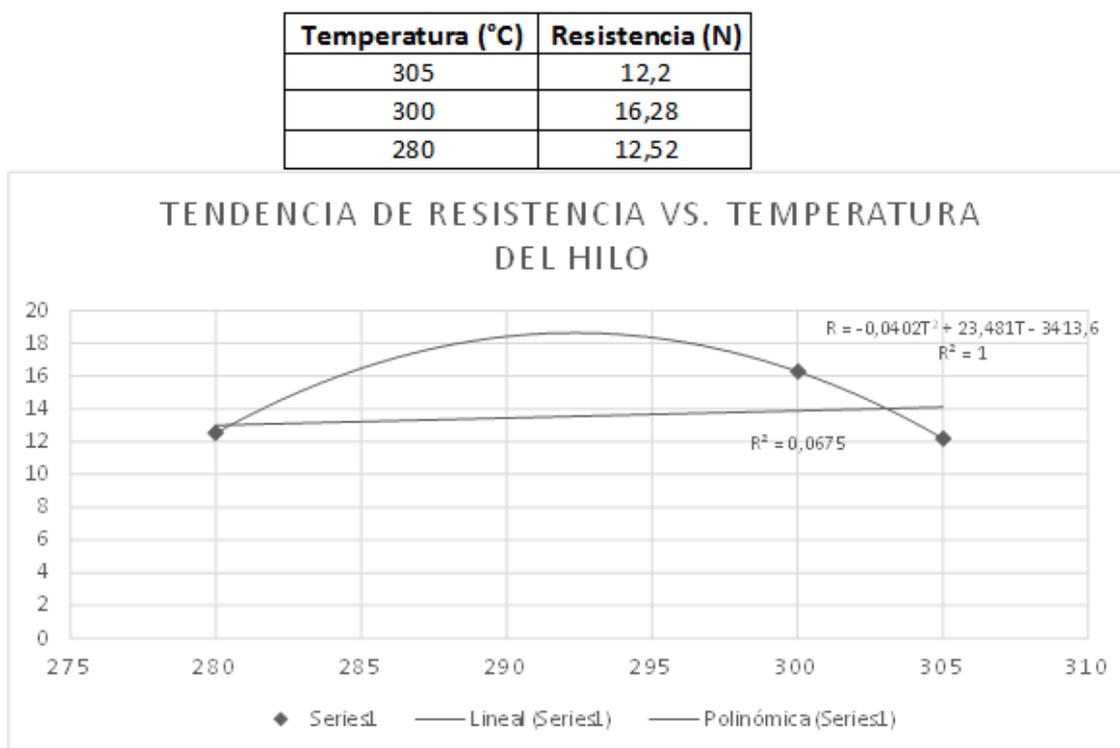
Tabla 4.8: Prueba de laboratorio: Muestra 3

<b>Muestra 3</b>				
	Temperatura	Carga Máxima		Elongación
<b>Zona de Alimentación</b>	200°C	2,68 lbf	12,52 N	7%
<b>Zona de dosificado</b>	280°C			
<b>Zona de hilado</b>	190°C			
<b>Frecuencia</b>	10 Hz			

Nota: Datos obtenidos de Anexo K

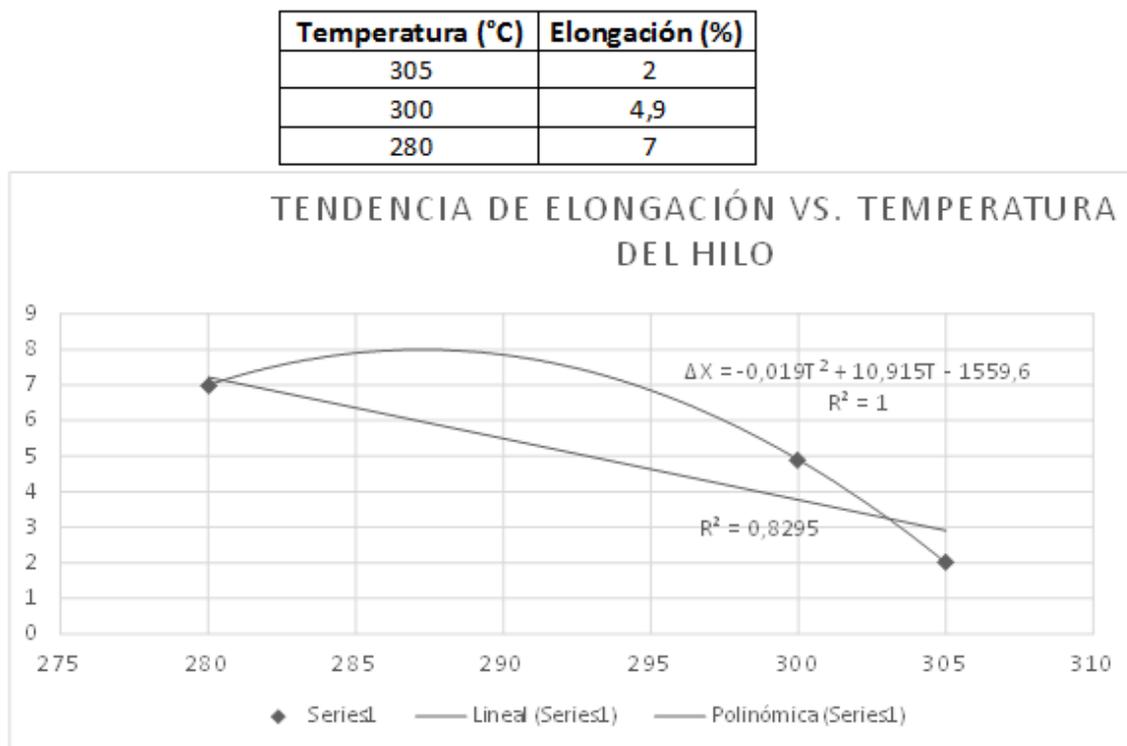
La Tabla 4.8 muestra que se obtiene como resultado una resistencia de 12,52 N y la elongación del 7%.

En base a estas pruebas se puede realizar la gráfica de tendencia del hilo con respecto de la “Carga máxima vs. Temperatura” y la “Elongación vs. Temperatura”. La temperatura considerada es a la salida de la extrusora, es decir, el valor con el que el material sale al proceso de hilatura.



**Figura 4.28:** Tendencia de resistencia  
Fuente: El autor

La Figura 4.28 muestra dos tipos de tendencias la primera lineal que no se acopla a los datos obtenidos y se comprueba con el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) que es 0,0675, el cual revela que la proximidad de los valores calculados para la línea de tendencia es muy alejada, y el segundo una tendencia polinómica de segundo orden que se acopla a los datos ingresados y su coeficiente de determinación es 1, por lo que la línea de tendencia es precisa. De esta tendencia se obtiene la ecuación para determinar la resistencia máxima a cualquier temperatura, la ecuación es  $R = -0,0402T^2 + 23,481T - 3413,6$ .



**Figura 4.29:** Tendencia de elongación

**Fuente:** El autor

La Figura 4.29 muestra tres puntos resultantes de “La Elongación vs. La Temperatura” permitiendo realizar dos tipos tendencias, la primera lineal en la cual no se aproxima a los datos obtenidos, se evidencia mediante el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) que es 0,8295 y el segundo una tendencia polinómica de segundo orden que se proyecta según los datos ingresados, su coeficiente de determinación es 1, por lo que la línea de tendencia es precisa. De esta tendencia polinómica se obtiene la ecuación para establecer la elongación a cualquier temperatura, la ecuación es  $\Delta X = -0,019T^2 + 10,915T - 1559,6$

#### 4.3.6.2 Análisis del “Hilo producido vs. Hilo comercial”

El hilo producido por la PET Spinning V 1.0., es un prototipo, debido a esto es necesario compararlo con productos similares producidos industrialmente y determinar las recomendaciones que se necesitaría para obtener un hilo acorde a las características de calidad para su comercialización. La Tabla 4.9 muestra la comparación entre el hilo de la muestra 3 de la PET Spinning V1.0 y el hilo producido por la empresa Enkador.

Los datos de la PET Spinning V1.0, fueron realizados en laboratorio certificado para pruebas de tracción y elongación<sup>8</sup>, los datos de Enkador están en base a la ficha técnica adjunta en el Anexo L.

**Tabla 4.9:** Comparación del hilo industrial

<b>Criterio</b>	<b>PET Spinning V1.0</b>	<b>Enkador</b>
<b>Elongación %/mm</b>	0,05 $\left[ \frac{\%}{mm} \right]$	$1,5 \times 10^{-5}$ $\left[ \frac{\%}{mm} \right]$
<b>Tenacidad gr/Den<sup>9</sup></b>	-	2,5
<b>Carga Máxima N</b>	16,28	-

**Nota:** Datos obtenidos de Anexo K/ Anexo L

Es importante aclarar que el dato a comparar es el porcentaje de elongación de los hilos obtenidos por la PET Spinning V1.0. y el de la empresa Enkador “RP POY 260F48 BR”.

La Tabla 4.9 muestra que la elongación del hilo obtenido por la PET Spinning V1.0, está muy por debajo del procesado por Enkador, esto se debe a que en el proceso industrial se une varios filamentos con un sistema de plegado, lo cual proporciona un hilo más grueso y resistente. El hilo de la PET Spinning no está listo para ser comercializado, pero sirve de forma demostrativa para prácticas de laboratorio.

#### **4.3.7 PRUEBA 7 – REVOLUCIONES DE BOBINADO DEL HILO**

Esta prueba permite determinar las revoluciones a las que debe trabajar el motor de la bobinadora del hilo una vez que se ha estabilizado y solidificado.

<sup>8</sup> Certificación de pruebas en el Anexo K

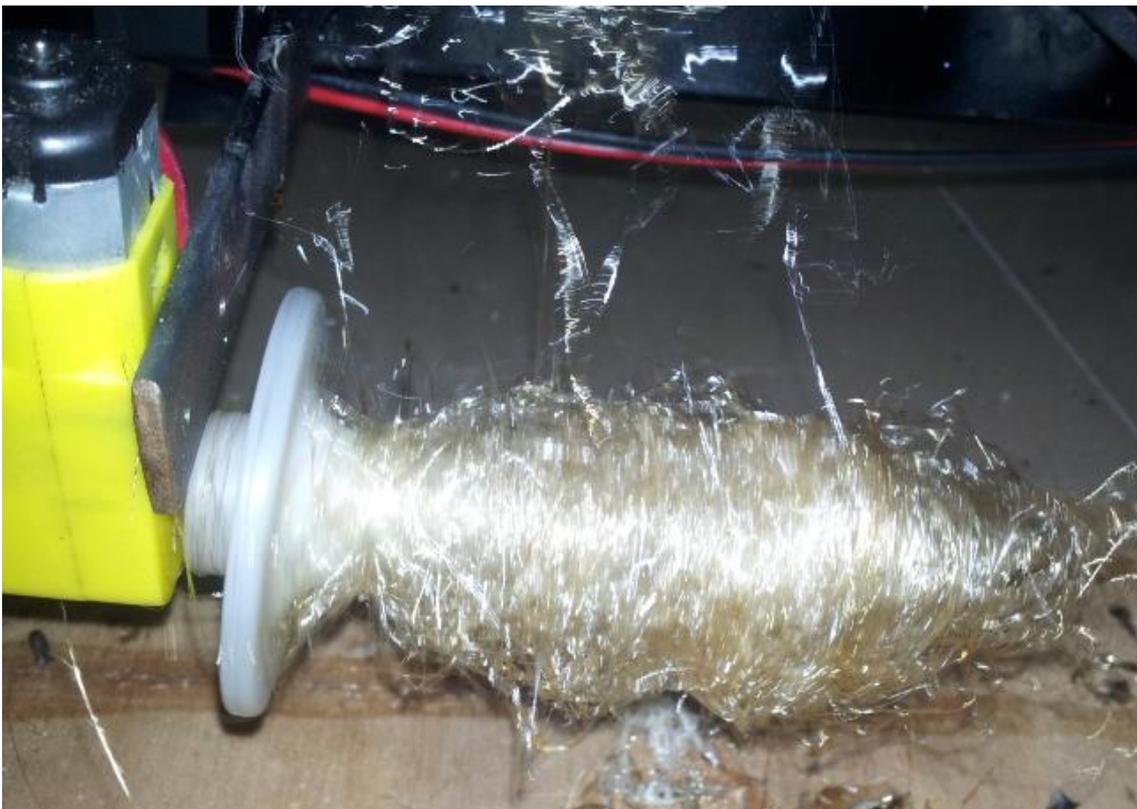
<sup>9</sup> Denier: medida aplicada al hilo industrial en donde se obtiene el peso de cada 9000 metros de hilo.

**Tabla 4.10:** Revoluciones para el bobinado del hilo

<b>Porcentaje regulación del potenciómetro</b>	<b>Voltaje</b>	<b>Resultado</b>
100%	4,68V	Bobinado del hilo sin desperdicio
50%	2,80V	Bobinado del hilo con la mitad de material desperdiciado.
10%	0,43V	Todo el material desperdiciado.

Fuente: El autor

La Tabla 4.10 permite determinar que es necesario trabajar al 100% de las revoluciones para evitar desperdicio y enrollar en el carrete todo el hilo como lo muestra la Figura 4.30.



**Figura 4.30:** Bobinador del hilo PET

Fuente: El autor

## CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó un sistema mecatrónico para extrusión de gránulos de PET reciclados, el mismo que servirá como apoyo en prácticas de laboratorio de diferentes asignaturas de la carrera y de igual forma con visión de una futura aplicación del hilo.
- La capacidad de producción que se diseñó para la PET Spinning V1.0 es demostrativa para laboratorio, por lo tanto, en base a la prueba 4, se determinó que la extrusora produce 100 gramos en un tiempo promedio de 5 minutos, con lo que se puede proyectar que la producción de la máquina es de 1,132kg/h.
- Se utilizó gránulos cristalizados de PET, se llegó a la fundición de los mismos debido a dos fenómenos, el calor producido por el calefactor y la fricción del material entre el husillo y la camisa de la extrusora, sin estos dos factores la fundición del material no se produciría.
- Se implementó un sistema a base de ventiladores a la caída del recibidor para aportar a la solidificación de los filamentos.
- El número de canales ayuda a mejorar el avance del material en la extrusora, para la PET Spinning V 1.0 fue necesario solo un canal ya que las dimensiones son las mínimas para la demostración.
- Se diseñó e implementó un control ON-OFF, este regula la temperatura del calefactor, permitiendo su encendido o apagado de acuerdo a un valor de referencia, este tipo de control es suficiente para la PET Spinning V1.0.
- Para el sistema bobinador se implementó un carrete impulsado por un motor DC que recoge el hilo producido, el sistema permite variar la velocidad a la que trabaja el carrete, pero es necesario operar a 180 rpm, que es el giro máximo, esto debido a que si se baja las revoluciones el hilo se acumularía y si se incrementaría el desperdicio.
- Fue necesario programar el controlador de temperatura de la salida de la extrusora a 280°C y el del recibidor de la masa de hilo PET a 190°C, adicional el variador se programó para trabajar de 10 a 13Hz, esto aseguró la producción del hilo PET, si alguno de estos parámetros es variado se corre el riesgo que el material se torne muy viscoso o que no se funda.

- El hilo que se obtuvo no cumple con la elongación mínima permitida para ser comercializado, pero si cumple para realizar prácticas de laboratorio en la Universidad Internacional del Ecuador.
- El bobinado que se implementó es parcialmente uniforme en comparación a los bobinados industriales, esto es debido a que el hilo es demostrativo para el proyecto propuesto.
- En base a las pruebas de laboratorio que se realizaron se concluye que la temperatura que proporciona mejor elongación y resistencia del hilo esta entre 270 y 290 °C.
- En el bobinado del hilo las pruebas demostraron que a pesar de tener un bobinado desordenado se debe trabajar al máximo de las revoluciones del motor del carrete, eso impedirá que se desperdicie y caiga al suelo.

## RECOMENDACIONES

- Para aplicaciones industriales la temperatura de los calefactores debe variar de acuerdo a las diferentes zonas, es decir en la zona de alimentación debe estar a una temperatura inicial, la zona de transición debe estar a una temperatura media y la de dosificación a su temperatura máxima.
- La temperatura a la cual se va a trabajar no debe sobre pasar los 300°C, esto es debido a que el material se degradaría y como resultado se puede llegar a tener material quemado.
- En procesos industriales, los gránulos de PET ingresan con la temperatura de cristalización provocada por el reactor. En este caso se ingresa a temperatura ambiente, ya que el material utilizado fue cristalizado previamente permitiendo bajar su humedad y no calentarlos antes de la extrusión.
- El calor que produce el calefactor se disipa hacia el ambiente, esto provoca que el tiempo que se demore en calentar a la extrusora sea muy elevado aproximadamente 37 minutos, se recomienda colocar una guarda reforzada con fibra de vidrio que concentre el calor del calefactor y poder reducir el tiempo de operación de la máquina.
- Una vez concluida la extrusión es necesario asegurar que el tornillo se encuentre sin material, caso contrario es posible que el material se adhiera a la camisa, esto provocaría que el tornillo pegado a las paredes de la camisa.
- Además de los controles visuales implementados en la PET Spinning V1.0 es importante aclarar que los mejores controles de seguridad para la máquina, son los de ingeniería, por lo que es recomendable colocar guardas donde se encuentran los calefactores con la respectiva señalética indicando el riesgo físico de quemadura.
- Las inyectoras o extrusoras de plástico en procesos industriales, nunca se las apaga para evitar que el polímero se adhiera a las superficies y bloquee los componentes, debido a que la PET Spinning V1.0 al final de cada operación será apagada es muy importante realizar el mantenimiento descrito en el manual y asegurarse que el extrusor quede

sin material en su interior, sin embargo es recomendable al encender nuevamente la máquina y esperar alcanzar su temperatura de operación con el fin de evitar un sobre esfuerzo al motor en el caso que se encontrara material adherido a las paredes.

- Para alcanzar a obtener un hilo comercial, es necesario mejorar el sistema de calentamiento evitando generar demasiada disipación de calor al ambiente y permitiendo tener una temperatura más estable, sin mayores fluctuaciones, esto se logrará sellando el calefactor de la extrusora, mediante una guarda recubierta de fibra de vidrio. De igual forma es necesario implementar un sistema de hilatura robusto que permita unir los filamentos de forma simétrica y genere un hilo con mayor espesor, por lo tanto mayor elongación y resistencia.
- La clase mínima de rugosidad recomendable para la utilización de plásticos es N3 ( $R_a = 0,1 \mu m$ ), lo que derivará a que el husillo tenga una superficie especular, que tiene como ventaja que el material no se adhiera y fluya en su totalidad, sin embargo para el presente trabajo se utilizó una clase N6 ( $R_a = 0,8 \mu m$ ), debido a que es un prototipo y su funcionamiento es específico para pruebas.
- Se recomienda mejorar el sistema de enfriamiento y bobinado de los filamentos, colocando un canal que permita ir enfriando los filamentos en toda la caída desde el hilador hasta el bobinador, de igual forma implementar un sistema que permita uniformizar el bobinado de los filamentos con el fin de desenrollarlos de mejor manera y no desprenderlos.
- Para la determinación del diámetro de salida de la boquilla se utilizó el método de prueba y error, donde en la primera prueba, se realizó un diámetro de 3 mm que en el funcionamiento el material se acumuló a la salida, en la segunda prueba un diámetro de 5 mm generando la salida del material en baja cantidad y como última prueba se utilizó un diámetro de 9 mm con el que el material fluyó sin problemas, por tanto es recomendable a la salida de la boquilla utilizar un diámetro especificado en la última prueba.

- El acople entre la boquilla y el receptor se recomienda una unión roscada para facilidad del desmontaje de las piezas al momento de la limpieza del material, a pesar de que en la rosca se genera desgaste, para el prototipo es una opción viable debido a que no tendrá un uso frecuente, por lo tanto el desgaste es mínimo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. Maldonado, “Diseño, Construcción y Programación de una CNC para el prototipado rápido”, Título de Ingeniería, ECYTA, UIDE, Quito, Ecuador, 2012.
- [2] M. Groover, “Polímeros” en Fundamentos de Manufactura Moderna, 3ra ed, México D.F., México, editorial Pearson, 2001, p. 201.
- [3] A. C. De Dios Barragán, “Aplicación de Diseño de Experimentos en el proceso de tintura del Poliéster”. Tesis de Licenciatura, Ingeniería Industrial. Universidad de las Américas Puebla. Puebla, México, 2007.
- [4] N. Colomo, “Ingeniería del Reciclado en Envases de Tereftalato de Polietileno (PET)”, Tesis Ingeniería, Facultad Ingeniería Mecánica, Universidad de San Carlos de Guatemala. Ciudad de Guatemala, Guatemala, 2013.
- [5] M.P. Noriega, Reciclaje Mecánico como Valor Agregado, [ONLINE], disponible en: <http://www.plastico.com/temas/Reciclaje-mecanico-con-valor-agregado+3068363>.
- [6] Anónimo, (2011, Mayo), Tecnología de los Plásticos, [Online], Disponible: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/pet.html>.
- [7] Petrecol S.A., (2013, Septiembre), Gránulos de PET, [Online], Disponible: <http://www.petrecol.n.nu/granulos-pellets>.
- [8] W. D. Callister, “Estructura de Polímeros” en Ciencia e Ingeniería de los Materiales 2, 3ra ed., Barcelona, España, editorial Reverté, 2007, p.p. 480-485.
- [9] M. Beltrán y A. Marcilla, “Extrusión” en Tecnología de Polímeros, 1ra ed, Alicante, España, editorial UNE, 2012, p.p. 103-107.
- [10] S. Kalpakjian, R. Schmid, “Extrusión y estirado de metales” en Manufactura, ingeniería y tecnología, 4ta ed, New Jersey, USA, Prentice Hall, 2001, p.p. 373-380.

- [11] M. Vicent Vela, S. Álvarez, J. Zaragoza, "Fabricación de Fibras Sintéticas" en Ciencia y Tecnología de Polímeros, Valencia, España, Editorial Universidad Politécnica de Valencia, 2006, p.p. 121-123.
- [12] D Freire & A. Hurtado, "Diseño y Construcción de un Sistema Mecánico para Embobinar Fibras de PET Reciclado Producidas por la Extrusora del Laboratorio de Mecánica de Materiales", Tesis de Ingeniería, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, ESPE, Sangolqui, Ecuador, 2011.
- [13] C. Riba, "Herramientas para el diseño concurrente" en Diseño Concurrente, 3ra ed, Barcelona, España, Ediciones UPC, 2002, p.p. 178-180.
- [14] Philip Morris Internacional, "Matriz Pugh" en Modelo OPEN, 1ra ed, Guadalajara, México, PMI, 2014.
- [15] J.L. Amorós, (2011, Enero), Diseño de Silos y Tolvas para Almacenamiento de Materiales Pulverulentos, [Online], Disponible: <http://www.qualicer.org/recopilatorio/ponencias/pdf/0013041s.pdf>.
- [16] L. F. Ramos, "Extrusión doble husillo" en Extrusión de plásticos, 5ta ed, México D.F., México, Limusa, 2012, p.p. 137-140.
- [17] Catálogo Online, Husillos de Extrusión, Vulcan Plastic Machinery, Zhoushan, China, disponible: <http://www.china-husillo.com/husillo-de-extrusionacuten.html>.
- [18] Catálogo Online, Computer Components, Konig Electronics, Amsterdam, Netherlands, disponible: [http://www.konigelectronic.com/en\\_us/computer/coolin](http://www.konigelectronic.com/en_us/computer/coolin).
- [19] F. Conti, "¿Qué es un motor paso a paso?" en Motores paso a paso, 1ra ed, Buenos Aires, Argentina, Editorial Alsina, 2005, p.p. 4-8.
- [20] Catálogo Online, Stepper Motor, Wantai Motors, Xinbei, China, disponible: <http://www.wantmotor.com/ProductsView.asp?id=181&pid=81>.
- [21] Anónimo, (2002, Abril), Servo Motores y su funcionamiento, [Online], Disponible: [http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr\\_0204/ctrl\\_rob/robotica/sistema/motores\\_servo.htm](http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0204/ctrl_rob/robotica/sistema/motores_servo.htm).

[22] Catálogo Online, Robotic Servos, Hitec Multiplex, San Diego, E.E.U.U., disponible: <http://hitecrcd.com/products/servos/robotic-servos>.

[23] D. Alciatore & M. Histan, "Actuadores" en Introducción a la Mecatrónica y los Sistemas de Medición, 3ra ed, México D.F., México, McGraw Hill, 2008, p.p. 402-404.

[24] Catálogo Online, Productos-Motores, Remssi Ingeniería, Buenos Aires, Argentina, disponible: [http://www.remssi.com.ar/motores\\_electricos\\_de\\_corriente\\_continua.php?id\\_categorias=7](http://www.remssi.com.ar/motores_electricos_de_corriente_continua.php?id_categorias=7).

[25] Tecnoficio, (2014, Noviembre), Acción de Control On-Off, [Online], Disponible: [http://www.tecnoficio.com/electricidad/instrumentacion\\_industrial4.php](http://www.tecnoficio.com/electricidad/instrumentacion_industrial4.php).

[26] B. Kuo, "Diseño de Sistemas de Control" en Sistemas de Control Automático, 7ma ed, Prentice Hall, México D.F., México, 2001.

[27] J. Gómez & J. Gutiérrez, "Diseño de una Extrusora para Plásticos", Tesis de Ingeniería, Facultad de Mecánica. Universidad de Pereira, Pereira, Colombia, 2007.

[28] Catálogo Online, Resistencias, diamore S.A., Buenos Aires, Argentina, disponible: <http://www.diamore.com.ar/Resistencias.html>.

[29] P. Rodriguez, "Instrumentos Analógicos" en Introducción a las Mediciones Eléctricas, 1ra ed, Buenos Aires, Argentina, Editorial Alsina, 2001, p.p. 24.

[30] Catálogo Online, Termocupla tipo J Bayoneta, OLIN S.A., Santiago de Chile, Chile, disponible: [http://www.olinsa.cl/product.php?id\\_product=325](http://www.olinsa.cl/product.php?id_product=325).

[31] Catálogo Online, TCN Series, Ibest Electronical, Seul, China, disponible: <http://www.ibestchina.com/english/ViewProduct.asp?ID=186>.

[32] Catálogo Online, SSR Series, Ibest Electronical, Seul, China, disponible: <http://www.ibestchina.com/english/ViewProduct.asp?ID=424>.

[33] Catálogo Online, Motores de aplicación general de hierro fundido, ABB, Quito, Ecuador, disponible: [http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/244a060dc5a0f645c1257b16002244db/\\$file/General%20performance%20M2QA%20motors%20ES.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/244a060dc5a0f645c1257b16002244db/$file/General%20performance%20M2QA%20motors%20ES.pdf).

[34] Catálogo Online, Helical geared motors, Betech, West Yorkshire, Inglaterra, disponible: [http://www.betech.co.uk/14B4606C-4E12-41FD-8BD6-6A000458C990/FinalDownload/DownloadId-7DAF1FEDE4D2946CDDCB79FF6620817D/14B4606C-4E12-41FD-8BD6-6A000458C990/media/13363/h\\_full\\_cat\\_2013.pdf](http://www.betech.co.uk/14B4606C-4E12-41FD-8BD6-6A000458C990/FinalDownload/DownloadId-7DAF1FEDE4D2946CDDCB79FF6620817D/14B4606C-4E12-41FD-8BD6-6A000458C990/media/13363/h_full_cat_2013.pdf)

[35] J. Fraile, “Accionamiento Eléctricos” en Máquinas Eléctricas, 5ta ed, Madrid, España, McGRAW HILL, 2003, p.p.661.

[36] Catálogo Online, Inverter Starvert iG5A, LS Industrial System, Anyang, Korea, disponible: <http://www.erhsa.com/pdf/variadores-iG5A.pdf>.

[37] Catálogo Online, Arduino Uno, Arduino, Ivrea, Italia, disponible: <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>.

[38] Catálogo Online, Motores y Caja Reductora, APM Micro, disponible: <http://www.apmmicro.com/index.php/linea-robotica/motores-y-cajas-reductoras>.

[39] Catálogo Online, Ventilador Techman VN-2350, Compu LAB, disponible: <http://www.compulab.com.ec/site/product/ventiladortechman/>.

[40] G. Odean, “Ring-Opening Polymerization” en Principles of Polymerization, 4<sup>th</sup> ed, Wiley Interscience, New York, USA, 2014.

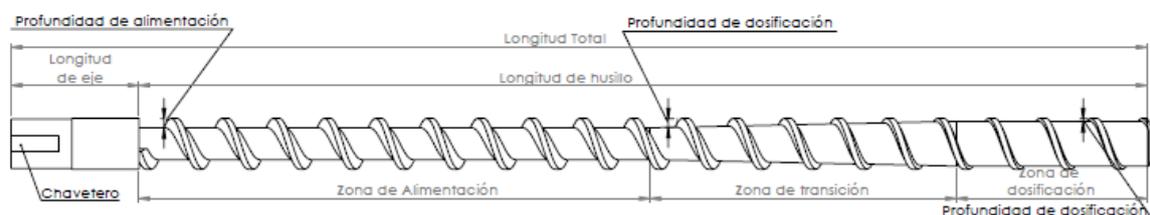
[41] V.K. Savgorodny, “Proceso de extrusión y cálculo de los parámetros tecnológicos” en Transformación de Plásticos, Barcelona, España, Gustavo Gili S.A, 1973, p.p. 4-25.

## **ANEXOS**

## ANEXO A - DISEÑO MECÁNICO DE LA EXTRUSORA

### A.1 CÁLCULO DEL HUSILLO

Una camisa con husillo de un canal es el tipo de elemento a ser diseñado, donde el husillo transmitirá el movimiento del material y la camisa se mantendrá fija. Este tipo de husillo es el más común en la industria de extrusión de materiales plásticos y va de acuerdo a la aplicación del presente proyecto para pellets o gránulos de PET reciclado. En la Figura A.1 se muestra un husillo simple para el material mencionado con sus principales partes.



**Figura A.1:** Vista lateral del husillo simple.  
Fuente: El autor

El principal elemento que compone a las máquinas extrusoras es el husillo, el mismo permitirá definir la cantidad de producción como el tipo de material a ser procesados, definiendo parámetros como el diámetro, la relación existente entre el diámetro y la longitud, las zonas del husillo, el número de filetes y la profundidad de sus canales. Las extrusoras de plásticos utilizan husillos de fluctúan su principal medida que es el diámetro entre 9 a 580 mm [41], sin embargo la Tabla A.1 muestra las medidas de diámetro, paso, ancho de los files y profundidades de los canales en la zona de alimentación y dosificación, recomendables para el procesamiento de plásticos.

**Tabla A.1:** Parámetros geométricos de los husillos

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

Fuente: Basada en [41]

Como se indicó al inicio de este capítulo se basará en los cálculos de [27] para el husillo por lo tanto se escogerá de diámetro para el husillo 32 mm lo que

significa que el paso es 32 mm, las profundidades de las zonas de alimentación y dosificación se utilizará para cálculos siguientes, en cuanto al ancho de los filetes se puede comprobar mediante:

$$e = 0,12 \cdot D \quad (\text{A.1})$$

Donde:

$e$  = Ancho del filete [mm].

$D$  = Diámetro [mm].

Reemplazando en (A.1) se obtiene:

$$e = 0,12 \cdot 32$$

$$e = 3,84 \text{ mm}$$

Se recomienda en la transformación de plásticos mediante procesos de extrusión una longitud del husillo que sea 20 veces el diámetro, por lo tanto la longitud del husillo se termina por:

$$L = 20 \cdot D \quad (\text{A.2})$$

Donde:

$D$  = Diámetro [mm].

Reemplazando en (A.2) se obtiene:

$$L = 20 \cdot 32$$

$$L = 640 \text{ mm}$$

El siguiente cálculo propuesto se denota el ángulo de hélice del canal mostrado en la Figura A.2. Este ángulo se determina a partir de:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{t}{\pi \cdot D} \quad (\text{A.3})$$

Dónde:

$D$  = Diámetro de la variable del canal [mm].

$t$  = El paso del husillo [mm].

$\varphi$  = Ángulo de hélice de canal [° sexagesimal].

Reemplazando los datos en (A.3):

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{32}{\pi \cdot 32}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{1}{\pi} = 17,65^\circ$$

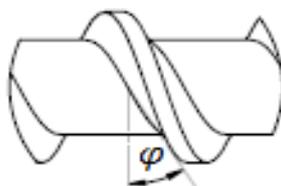


Figura A.2: Sección de un husillo de un canal

Fuente: el autor

La Tabla A.2, describe varios tipos de materiales entre ellos el Tereftalato de Polietileno utilizado para la aplicación, el cual no se necesita un husillo muy especializado tanto por el número de entradas, paso y diámetro.

Tabla A.2: Guía para el Diseño de un Husillo

Resina	Temperatura Crítica °C	Densidad [g/cm³]		Diseño del Husillo basado en:		
		Sólido	Fundido	Prof. del canal	Long. De Transición	Relación de compresión
Tereftalato de Polietileno (PET)	250 Tm <sup>10</sup>	1,4	1,1	Media	Media	Media
Polímero de alta densidad (HDPE)	127 Tm	0,95	0,73	Media	Media	Media
Polímero de cristal líquido (LCP)	273 Tm	1,35	1,12	Superficial	Media	Media
Polietilenimina (PEI)	215 Tg <sup>11</sup>	1,27	0,08	Media	Media	Media

Fuente: Basada en: [40]

### A.1.1 CAUDAL DE PRODUCCIÓN

La producción obtenida será calculada mediante la ecuación del flujo volumétrico [27].

<sup>10</sup> Temperatura de fusión.

<sup>11</sup> Temperatura de transición vítrea.

$$Q = \left( \frac{\alpha k}{k + \beta + \gamma} \right) \eta \quad (\text{A.4})$$

Donde:

$\alpha$  = Flujo de arrastre [ $cm^3$ ].

$\beta$  = Flujo de presión [ $cm^3$ ].

$\gamma$  = Flujo de filtración [ $cm^3$ ].

$\eta$  = Revoluciones para la velocidad de cortadura [rpm].

$k$  = Constante total de la forma geométrica de la cabeza perfiladora.

Para determinar la producción se debe despejar todas las variables que contiene (A.4). El flujo de arrastre es la fuerza que impide que el material se adhiera al husillo y avance a lo largo de la extrusora:

$$\alpha = \frac{\pi \cdot m \cdot D \cdot h_2 \left( \frac{t}{m} - e \right) \cos^2 \varphi}{2} \quad (\text{A.5})$$

Donde:

$m$  = Número de canales del husillo [adimensional].

$D$  = Diámetro del husillo [cm].

$h_2$  = Profundidad del canal en la zona de dosificación [cm].

$e$  = Ancho del filete [cm].

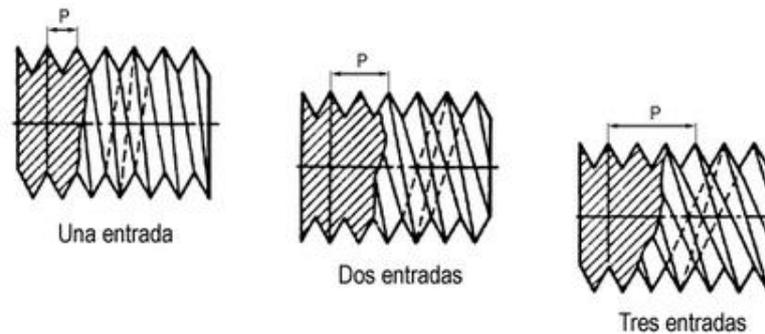
$t$  = Paso del husillo [mm].

$\varphi$  = Ángulo de hélice de canal [ $^\circ$  sexagesimal].

#### **A.1.1.1 Canales en los Husillos**

El número de canales de la entrada determina que el material tenga un avance mayor a través del husillo, mientras más canales, mayor es el paso como se muestra en la Figura A.3. Si el avance del material es mayor, el tiempo que transcurre desde que ingresa al husillo hasta la salida por la boquilla será menor, lo que implica establecer calefactores de mayor potencia, lo cual incrementaría las dimensiones de la máquina y elevaría el costo total, ya sea por el husillo como

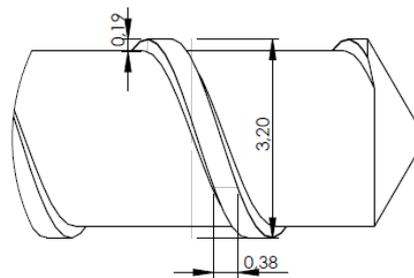
por los calefactores. Por lo tanto, un husillo de una entrada sería el apropiado y abastece las necesidades de diseño.



**Figura A.3:** Diferentes entradas en el husillo

**Fuente:** Basada en [14]

A partir de los datos conocidos como el número de canales del husillo  $m = 1$  y el ancho de la cresta del filete dada en tablas por [41], se establecen los siguientes parámetros como se indican en la Figura A.4:



**Figura A.4:** Dimensiones de husillo zona de dosificación

**Fuente:** El autor

Reemplazando en (A.5), se obtiene:

$$\alpha = \frac{3,1416 \cdot 1 \cdot 3,2 \cdot 0,19 \left( \frac{3,2}{1} - 0,38 \right) \cos^2 17,65^\circ}{2}$$

$$\alpha = 2,44 \text{ cm}^3$$

El flujo de presión es el componente que se opone al flujo en el sistema, se expresa por:

$$\beta = \frac{m \cdot h_2^3 \cdot \left( \frac{t}{m} - e \right) \sin \varphi \cdot \cos \varphi}{12 \cdot L} \quad (\text{A.6})$$

Donde:

$L$ : Longitud del husillo [cm].

$m$  = Número de canales del husillo [Adimensional].

$h_2$  = Profundidad del canal en la zona de dosificación [cm].

$e$  = Ancho del filete [cm].

$t$  = Paso del husillo [mm].

$\varphi$  = Ángulo de hélice de canal [° sexagesimal].

Reemplazando en (A.6), se obtiene:

$$\beta = \frac{1 \cdot 0,19^3 \cdot \left(\frac{3,2}{1} - 0,38\right) \sin 17,65^\circ \cos 17,65^\circ}{12 \cdot 64}$$

$$\beta = 7,17 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3$$

El flujo de filtración tiene importancia para determinar el desgaste de los filetes y permite controlar las pérdidas en la producción. Está expresado por:

$$\gamma = \frac{\pi^2 \times D^2 \times \delta^3 \times \tan \varphi}{10 \times e \times L} \quad (\text{A.7})$$

Donde:

$L$ : Longitud del husillo [cm].

$D$  = Diámetro del husillo [cm].

$\delta$  = Holgura del filete [cm].

$e$  = Ancho del filete [cm].

$\varphi$  = Ángulo de hélice de canal [° sexagesimal].

#### **A.1.1.2 Holgura de los Filetes**

La holgura del filete ( $\delta$ ) representa la medida existente entre el extremo del filete del husillo y la superficie interior de la camisa es de suma importancia en el diseño de una extrusora. La ventaja de disponer de una holgura amplia es que el material se mezcla con mayor facilidad, pero reduce el avance del material provocado por el incremento del flujo inverso del material. En el mercado se

emplean diámetros constantes, manteniendo holguras entre el husillo y el cilindro de  $0,002D$ . Para determinar la tolerancia se aplica:

$$\delta = 0,002D \quad (\text{A.8})$$

Reemplazando en (A.8), se obtiene:

$$\delta = 0,002 \cdot 3,2$$

$$\delta = 0,0064 \text{ cm.}$$

Con el dato obtenido en (A.8), se puede reemplazar en (A.7)

$$\gamma = \frac{\pi^2 \cdot 3,2^2 \cdot 0,0064^3 \cdot \tan 17,65^\circ}{10 \cdot 0,38 \cdot 65}$$

$$\gamma = 3,41 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3$$

### A.1.1.3 Constante de cabezal (k)

La constante del cabezal es uno de los datos a ser despejados para el caudal de producción, la constante se divide en distintas zonas con varios tipos de configuración para cada zona la constante  $k$  (constante total de la forma geométrica de la cabeza perfiladora) [27]:

- Canal Cilíndrico

$$k_1 = \frac{\pi \cdot d^4}{640} \quad (\text{A.9})$$

Donde:

$d$  = Diámetro del canal [cm].

$$k_1 = \frac{\pi \cdot 2^4}{640}$$

$$k_1 = 0,095$$

- Para un canal cónico:

$$k_2 = \frac{3 \cdot \pi \cdot d_0^3 \cdot d_1^3}{640(d_0^2 + (d_0 \cdot d_1) d_1^2)} \quad (\text{A.10})$$

Donde:

$d_0$  = Diámetro de entrada del material en un canal anular cilíndrico [cm].

$d_1$  = Diámetro de salida del material en un canal anular cilíndrico [cm].

Reemplazando en (A.10) se obtiene:

$$k_2 = \frac{3 \cdot \pi \cdot 2,0^3 \cdot 2,82^3}{640(2,0^2 + (2,0 \cdot 2,82) + 2,82^2)}$$

$$k_2 = 0,150$$

La constante total del cabezal se determinará mediante la suma de cada una de las resistencias que experimenta en las diferentes zonas.

$$k = \frac{1}{\sum \frac{1}{k_1} + \sum \frac{1}{k_2} + \dots + \sum \frac{1}{k_n}} \quad (\text{A.11})$$

$$k = 0,058$$

#### **A.1.1.4 Intervalos en la velocidad de cortadura**

El intervalo de velocidad de cortadura, permite determinar el número de revoluciones que se necesita para la velocidad de corte en el proceso de extrusión, se tomó la muestra experimental realizada en [27], donde establece los límites de operación de los diferentes procesos de transformación de plásticos como se muestra en la Figura A.5.

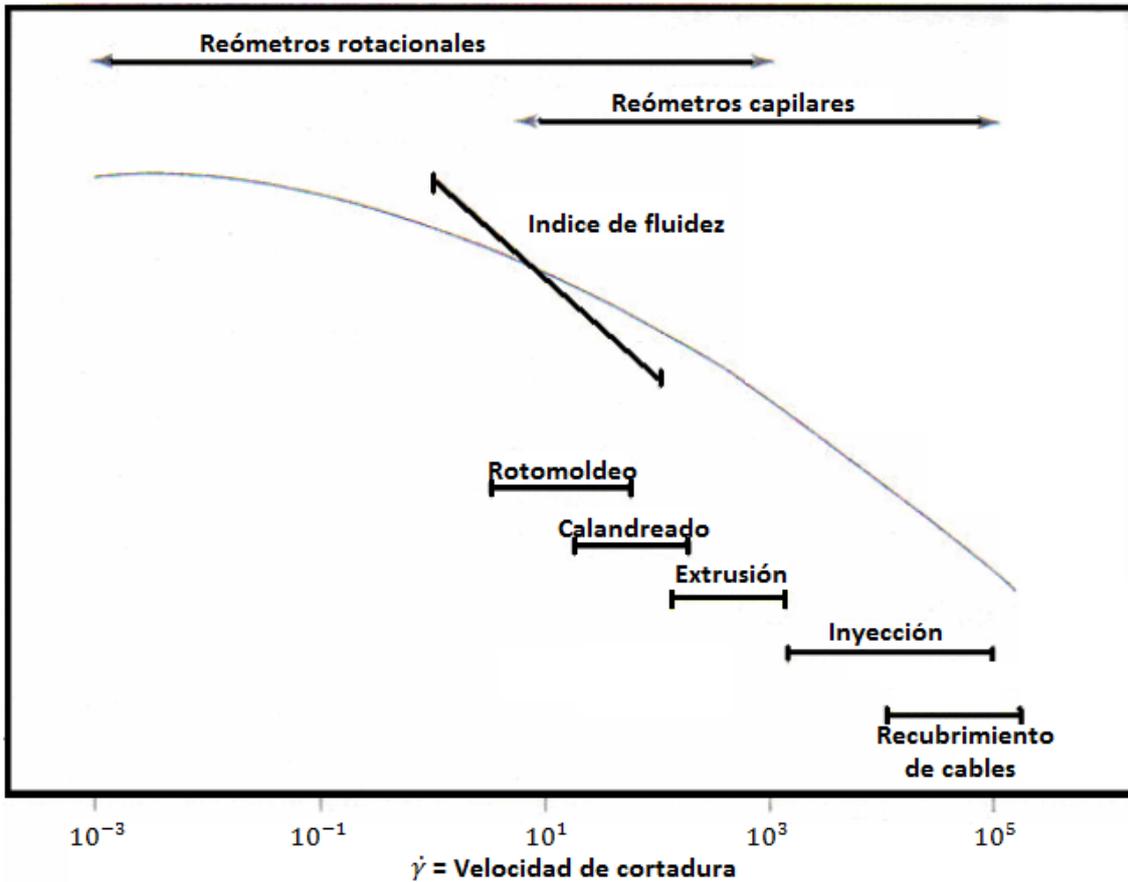


Figura A.5: Intervalos de Velocidad de Cortadura

Fuente: Basado en [27]

La velocidad de cortadura en el proceso de extrusión oscila entre los límites de  $100$  y  $1000 \text{ s}^{-1}$ , de esta forma se puede utilizar la fórmula de obtención de velocidad de cortadura para determinar las revoluciones mediante:

$$\dot{\gamma} = \frac{\pi \cdot D \cdot \eta}{h_2 \cdot 1 \text{ seg}} \quad (\text{A.12})$$

Donde

$\dot{\gamma}$  = Velocidad de cortadura [ $\text{s}^{-1}$ ].

$D$  = Diámetro [mm].

$h_2$  = Altura de filete en la zona de dosificación [cm].

$\eta$  = Revoluciones [rpm].

Reemplazando (A.12) con los valores conocidos resulta:

$$100 \frac{1}{s} = \frac{\pi \cdot 3,2 \text{ cm} \cdot \eta}{0,19 \text{ cm} \cdot \text{seg}}$$

Se despeja  $\eta$  de (A.12) y se obtiene:

$$\eta = \frac{100 \frac{1}{s} \cdot 0,19 \text{ cm} \cdot s}{\pi \cdot 3,2 \text{ cm}}$$

$$\eta = 1,89 \frac{\text{rev}}{s} \cdot \frac{60s}{1 \text{ min}}$$

$$\eta = 113,39 \text{ rpm}$$

Una vez que se obtuvieron todos los valores necesarios se procede a calcular el flujo volumétrico en (A.4):

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

$$Q = \left( \frac{2,44 \cdot 0,058}{0,058 + 7,17 \cdot 10^{-6} + 3,41 \cdot 10^{-8}} \right) 113,39 \text{ rpm}$$

$$Q = 276,63 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

El valor Q es la producción del tornillo, pero la consistencia dimensional exige que los datos se presenten en kg/h, siendo la densidad del PET ( $0,00137 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}$ ) y el resultado se lo transforma a kg/h:

$$Q = 0,00137 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3} \cdot 276,63 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \cdot \frac{60}{1h}$$

$$Q = 22,73 \frac{\text{kg}}{h}$$

El valor de 22,09 kg/h representa la cantidad de kilogramos por hora que se producirá hasta la salida por la boquilla de material extruido.

### A.1.2 ZONAS DEL HUSILLO

La longitud total del husillo se sugiere que debe ser de 20 veces el diámetro, de tal manera que la zona de alimentación debe ser 10 veces el diámetro, la zona de transición 6 veces el diámetro y la de dosificación 4 veces el diámetro [41].

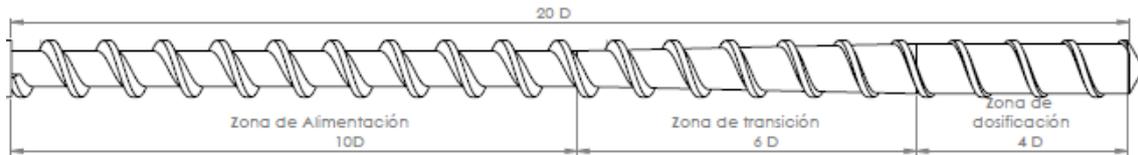


Figura A.6: Zonas del husillo

Fuente: El autor

### A.1.3 CÁLCULO DEL NÚMERO DE FILETES DEL HUSILLO

Para obtener el número de filetes necesarios a través de todo el husillo, se aplica la relación  $L/D$  que viene dado por (A.13):

$$\frac{L}{D} = \#filetes \quad (\text{A.13})$$

Reemplazando en (A.13) se obtiene:

$$\frac{64 \text{ cm}}{3,2 \text{ cm}} \approx 20 \text{ filetes}$$

### A.1.4 RELACIÓN DE COMPRESIÓN

La relación de compresión, es importante calcularla debido a que permite establecer posibles fallas de desgaste relacionados con la profundidad del canal o a la alta velocidad de rotación [27]. La relación de compresión se expresa mediante (A.14):

$$RC = \frac{h_1}{h_2} \quad (\text{A.14})$$

Donde:

$h_1$  = Altura del filete en las zonas de alimentación y transición (mm).

$h_2$  = Altura del filete en la zona de dosificación (mm).

Reemplazando en (A.14), se obtiene:

$$RC = \frac{6}{1,9}$$

$$RC = 3,16$$

### A.1.5 CÁLCULO DE LA POTENCIA REQUERIDA

Es necesario calcular la potencia que requiere el husillo del extrusor para cual aplica la fórmula utilizada en [27], donde se relaciona las revoluciones necesarias para la velocidad de cortadura en el proceso de extrusión, el diámetro del husillo y el factor de proporcionalidad que este caso se lo obtiene como dato ( $k = 66,7$ ) basado en [41], de esta forma la potencia viene dada por (A.15):

$$\eta = \frac{k^2 \cdot P}{\pi \cdot D^3} \quad (\text{A.15})$$

Donde:

$\eta$  = Número de revoluciones [rpm].

$k$  = Factor de proporcionalidad [unidimensional].

$D$  = Diámetro del husillo [mm].

$P$  = Potencia [kW].

De (A.15) se despeja  $P$  y se reemplazan los valores

$$P = \frac{\eta \cdot \pi \cdot D^3}{K^2}$$

$$P = \frac{113,39 \cdot \pi \cdot 3,2^3}{66,7^2}$$

$$P = 2,62 \text{ kW}$$

### A.1.6 PRESIONES EN LA MÁQUINA EXTRUSORA

Las máquinas extrusoras basan su funcionamiento en la presión que se adquiere a lo largo de toda la operación, mientras a traviesan las diferentes zonas del husillo. A mayor longitud mayor presión se ejercerá a la salida del material, se aplicará las formulas basadas en [27] para determinar la presión máxima y de operación a la que trabajará la extrusora.

- Presión máxima:

$$p_{m\acute{a}x} = \frac{6 \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot \eta \cdot \mu}{h^2 \cdot \tan \varphi} \quad (\text{A.16})$$

Donde:

$D$  = Diámetro del husillo [m].

$L$  = Longitud del husillo [m].

$\eta$  = Revoluciones [rev/s].

$\mu$  = Viscosidad efectiva [Pa.s].

$h_2$  = Altura del filete en la zona de dosificación (mm).

$\varphi$  = Ángulo de hélice de canal [° sexagesimal].

Reemplazando en (A.16), se obtiene:

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{6 \cdot \pi \cdot 0,032 \cdot 0,128 \cdot 1,9 \cdot 700}{0,0019^2 \cdot \tan 17,65^\circ}$$

$$P_{m\acute{a}x} = 89,66 \frac{MN}{m^2}$$

- Presión de Operación:

$$P_{op} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot D^2 \cdot \eta \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi}{\left(\frac{R^4}{2 \cdot h_1}\right) + \left(\frac{D \cdot h_2^3 \cdot \sin^2 \varphi}{3 \cdot L}\right)} \quad (A.17)$$

Donde:

$D$  = Diámetro del husillo [m].

$L$  = Longitud del husillo [m].

$\eta$  = Revoluciones [rev/s].

$\mu$  = Viscosidad efectiva [Pa.s].

$h_1$  = Altura del filete en la zona de alimentación (mm).

$h_2$  = Altura del filete en la zona de dosificación (mm).

$\varphi$  = Ángulo de hélice de canal [° sexagesimal].

Reemplazando en (A.17), se obtiene:

$$P_{op} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 700 \frac{N}{m^2} \cdot 0,032^2 \cdot 1,9 \cdot \sin 17,65^\circ \cdot \cos 17,65^\circ}{\left(\frac{0,001^4}{2 \cdot 0,006}\right) + \left(\frac{0,032 \cdot 0,0019^3 \cdot \sin 17,65^{\circ 2}}{3 \cdot 0,64}\right)}$$

$$P_{op} = 50,145 \frac{MN}{m^2}$$

$$P_{op} = 50,145 MPa$$

### A.1.7 PESO DEL HUSILLO

Para determinar el peso el husillo se debe determinar el volumen de los filetes en cada una de las zonas del husillo y el volumen del alma del husillo de igual forma en cada sección, el peso permitirá hallar las fuerzas que se generan en el husillo.

#### A.1.7.1 Volumen del alma del husillo en cada sección

- Zona de Alimentación

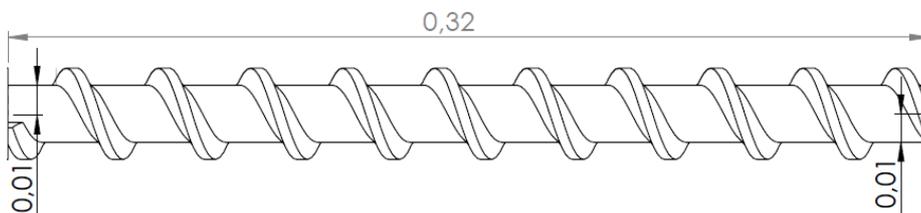
Dada la longitud de la zona de alimentación (0,320 m) y el radio del alma (0,01 m) como se muestra en la Figura A.7 se puede calcular el área que viene dado por:

$$A_a = \pi \cdot r^2 \quad (A.18)$$

Reemplazando en (A.18), se obtiene:

$$A_a = \pi \cdot 0,01^2$$

$$A_a = 3,14 \cdot 10^{-4} m^2$$



**Figura A.7:** Radio y longitud de la zona de alimentación

**Fuente:** El autor

Calculada el área, se determina el volumen expresado por

$$V_1 = A \cdot L \quad (A.19)$$

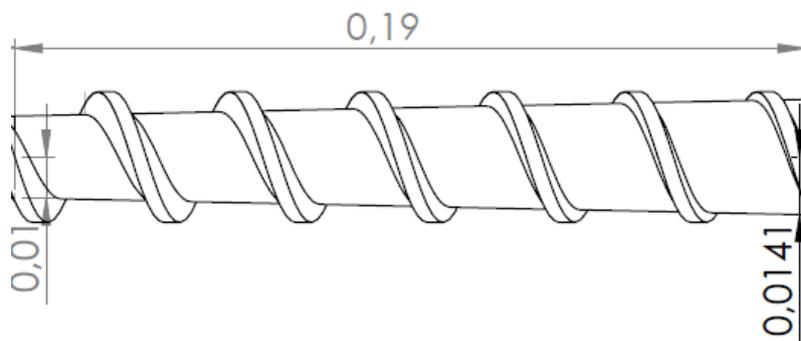
Reemplazando en (A.19), se obtiene:

$$V_1 = 3,14 \times 10^{-4} m^2 \cdot 0,320 m$$

$$V_1 = 1,005 \cdot 10^{-4} m^3$$

- Zona de Transición

La Figura A.8 muestra las dimensiones de la zona de transición tanto el radio inicial ( $r$ ) como el radio final ( $R$ ).



**Figura A.8:** Radios y longitud de la zona de transición

Fuente: El autor

$$V_2 = \frac{\pi}{3} \cdot h(r^2 + r \cdot R + R^2) \quad (\text{A.20})$$

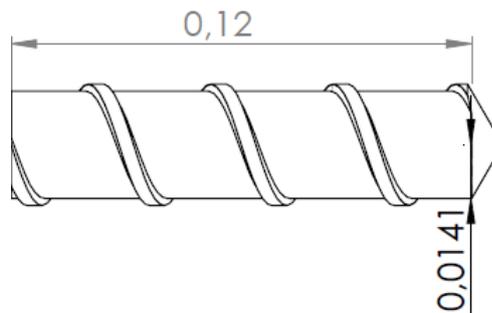
Reemplazando en (A.20), se obtiene:

$$V_2 = \frac{\pi}{3} \cdot 0,192 m(0,01^2 m + 0,01 m \cdot 0,0141 m + 0,0141^2)$$

$$V_2 = 8,843 \cdot 10^{-5} m^3$$

- Zona de dosificación

Dada por la longitud de la zona de alimentación (0,128 m) y el radio del alma (0,0141 m) mostradas en la Figura A.9, se calcula el área.



**Figura A.9:** Radio y longitud de la zona de dosificación

Fuente: El autor

$$A_d = \pi \cdot r^2 \quad (\text{A.21})$$

$$A_d = \pi \cdot 0,0141^2$$

$$A_d = 6,2458 \cdot 10^{-4} m^2$$

Calculando el área se determina el volumen:

$$V_3 = A_d \cdot L \quad (\text{A.22})$$

$$V_3 = 6,2458 \cdot 10^{-4} m^2 \cdot 0,128 m$$

$$V_3 = 7,99 \cdot 10^{-5} m^3$$

Con los 3 volúmenes de las diferentes zonas se calcula el volumen total del alma:

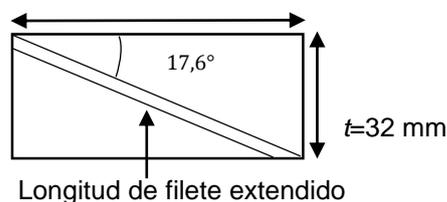
$$V_{TAlma} = V_1 + V_2 + V_3 \quad (\text{A.23})$$

$$V_{TAlma} = 1,005 \cdot 10^{-4} m^3 + 8,843 \cdot 10^{-5} m^3 + 7,99 \cdot 10^{-5} m^3$$

$$V_{TAlma} = 2,6883 \cdot 10^{-4} m^3$$

#### A.1.7.2 Volumen de los filetes en cada zona

Al igual que en el volumen del alma, se calcula el volumen en las tres zonas del husillo, como dato general se obtendrá la longitud de los filetes. La longitud es la misma para cada una de las zonas debido a que el filete entre cresta y cresta tiene el mismo diámetro ( $D$ ), recorre el mismo paso ( $t$ ) y tienen el mismo perímetro ( $p = \pi \cdot D$ ). En la Figura A.10 es una representación del filete totalmente extendido para entender cómo obtener la longitud.



**Figura A.10:** Representación de filete extendido para obtener su longitud

Fuente: El autor

$$L = \sqrt{(\pi \times D)^2 + t^2} \quad (\text{A.24})$$

Donde:

$D$  = Diámetro de filetes entre cresta y cresta [m].

$t$  = Paso del husillo [m].

$L$  = Longitud del filete [m].

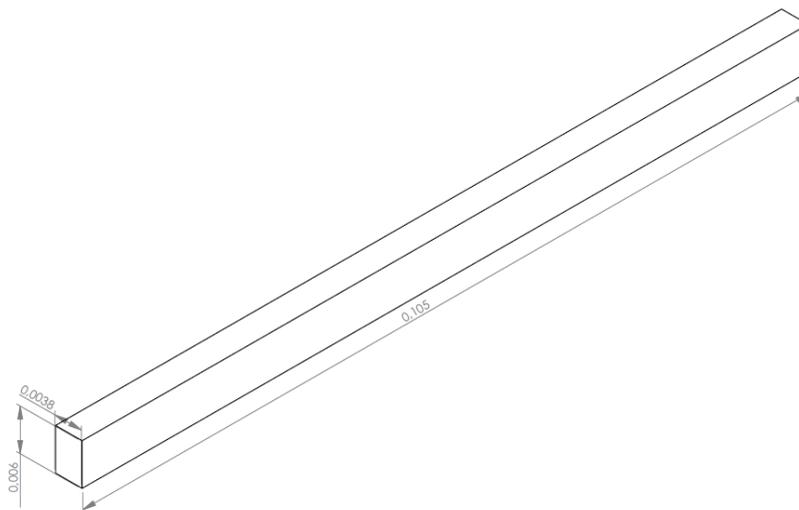
Reemplazando en (A.24), se obtiene:

$$L = \sqrt{(\pi \times 0,032)^2 + 0,032^2}$$

$$L = 0,1055 \text{ m}$$

- Zona de alimentación

La Figura A.11 permite visualizar la representación de un filete extendido de la zona de alimentación como dimensionar el volumen del filete según los datos propuestos. Con datos dados como el ancho del filete ( $e = 0,00384 \text{ m}$ ), profundidad de canal en la zona de alimentación ( $h_1 = 0,006 \text{ m}$ ).



**Figura A.11:** Representación del filete de alimentación  
Fuente: El autor

$$V_1 = L \cdot e \cdot h_1 \quad (\text{A. 25})$$

Reemplazando en (A.25), se obtiene

$$V_1 = 0,1055 \text{ m} \cdot 0,00384 \cdot 0,006 \text{ m}$$

$$V_1 = 2,43 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

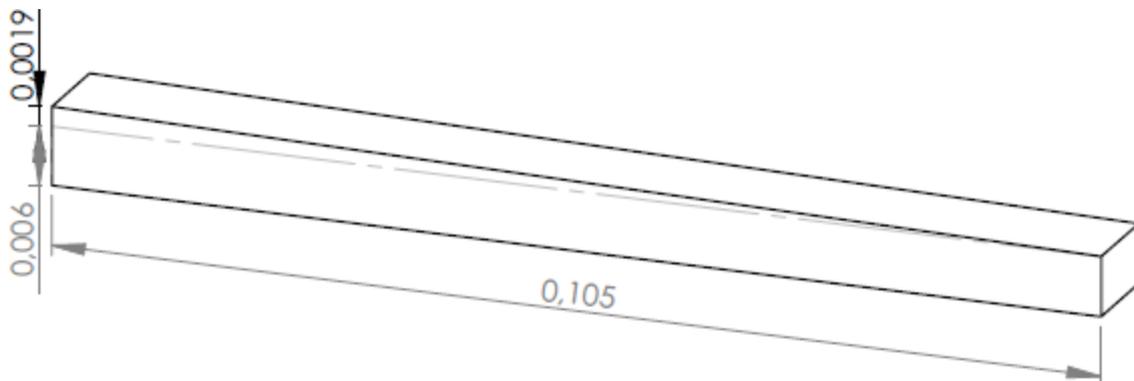
Para hallar el volumen total en la zona de alimentación se multiplica por el número de filetes:

$$V_{T1} = 2,43 \cdot 10^{-3} m^3 \cdot 10$$

$$V_{T1} = 2,43 \cdot 10^{-5} m^3$$

- Zona de transición

En esta zona el filete no es uniforme debido a que va reduciéndose el diámetro del alma y por lo tanto aumentando el del filete, para hallar el volumen en la zona de transición se deberá dividir en dos partes, una rectangular y una triangular, respectivamente. Esto con el fin de poder determinar su verdadero valor. La Figura A.12, indica una representación del filete y su división.



**Figura A.12:** Sección del filete en la zona cónica

**Fuente:** El autor

Para la zona rectangular se tiene:

$$V_r = L \cdot e \cdot h_1 \quad (\text{A. 26})$$

Reemplazando en (A.26), se obtiene:

$$V_r = 0,1055 \text{ m} \cdot 0,00384 \cdot 0,006 \text{ m}$$

$$V_r = 2,43 \cdot 10^{-6} m^3$$

De igual manera se toma el volumen obtenido en esta zona y se lo multiplica por el número de filetes.

$$V_2 = 2,43 \cdot 10^{-6} m^3 \cdot 6$$

$$V_2 = 1,46 \cdot 10^{-5} m^3$$

Para la zona triangular se tiene:

$$A_{\Delta} = \frac{b \cdot h}{2} \quad (\text{A. 27})$$

Reemplazando en (A.27), se obtiene:

$$A_{\Delta} = \frac{0,1055 \text{ m} \cdot 0,0019 \text{ m}}{2}$$

$$A_{\Delta} = 9,97 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

Con el resultado del área y la longitud se puede hallar el volumen

$$V_{\Delta} = e \cdot A_{\Delta} \quad (\text{A. 28})$$

Reemplazando en (A.28), se obtiene:

$$V_{\Delta} = 0,00384 \text{ m} \cdot 9,97 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$V_{\Delta} = 3,83 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$$

El volumen obtenido en la zona se lo multiplica por el número de filetes

$$V_1 = 3,83 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot 6$$

$$V_1 = 2,29 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

El total del volumen de la zona de transición viene dado por

$$V_{T2} = V_2 + V_1 \quad (\text{A. 29})$$

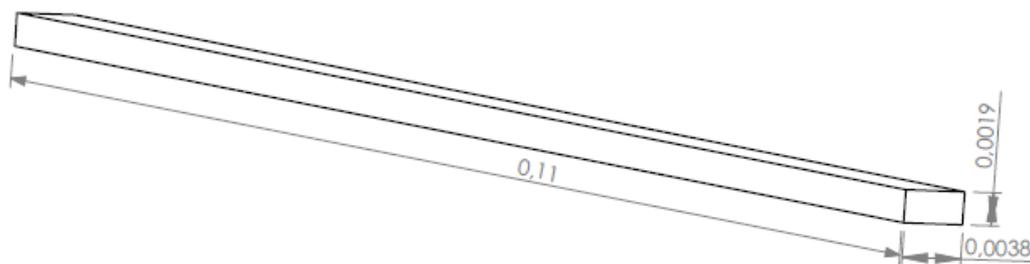
Reemplazando en (A.29), se obtiene:

$$V_{T2} = 1,46 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 + 2,29 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$V_{T2} = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

- Zona de dosificación

Los cálculos de volumen en esta zona son iguales a los de la zona de alimentación pero con una variación en el valor de la profundidad del canal, donde  $h_2 = 0,0019 \text{ m}$  como se muestra en la Figura A.13



**Figura A.13:** Sección de filete zona de dosificación

**Fuente:** El autor

$$V_3 = L \cdot e \cdot h_2 \quad (\text{A. 30})$$

$$V_3 = 0,105 \text{ m} \cdot 0,00384 \cdot 0,0019$$

$$V_3 = 7,69 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$$

Para el volumen total en la zona de dosificación se multiplica por el número de filetes.

$$V_{T3} = 7,69 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot 4$$

$$V_{T3} = 3,078 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Con este último valor se obtienen los valores del volumen de los filetes del husillo y se puede obtener el volumen total.

$$V_{TFiletes} = V_{T1} + V_{T2} + V_{T3} \quad (\text{A. 31})$$

$$V_{TFiletes} = 2,43 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 + 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 + 3,078 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$V_{TFiletes} = 4,3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Expresado estos valores se obtiene el volumen total de husillo en la Figura A.14 muestra pintado de azul el volumen total de alma y en gris muestra el volumen total de los filetes.



**Figura A.14:** Volumen del Alma y Volumen de Filetes

**Fuente:** El autor

$$V_{Total} = V_{TAlma} + V_{TFiletes} \quad (\text{A. 32})$$

$$V_{Total} = 2,6883 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 + 4,3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$V_{Total} = 3,03 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

El material utilizado para la elaboración del husillo es el acero 4140 cuyas especificaciones se encuentran en el Anexo B, el mismo indica que la densidad del dicho acero es de  $7700 \text{ Kg/m}^3$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{A.33})$$

Donde:

$\rho$  = Densidad [ $\text{kg/m}^3$ ].

$V$  = Volumen [ $\text{m}^3$ ].

Se despeja la masa y se reemplaza los valores:

$$m = \rho \cdot V$$

$$m = 7700 \cdot 3,03 \cdot 10^{-4}$$

$$m = 2,33 \text{ kg}$$

#### A.1.12 CÁLCULO DE FUERZAS DE HUSILLO

Con el cálculo de las fuerzas se determina la deformación máxima admisible y las dimensiones determinadas para el husillo. En el husillo actúa la fuerza axial  $P$ , el momento del giro  $M_g$  y la carga uniformemente repartida  $q$ , originada por el propio peso del husillo. La fuerza  $P$  y  $q$  provocan la deformación  $f$  del husillo como se indica en la Figura A.15.

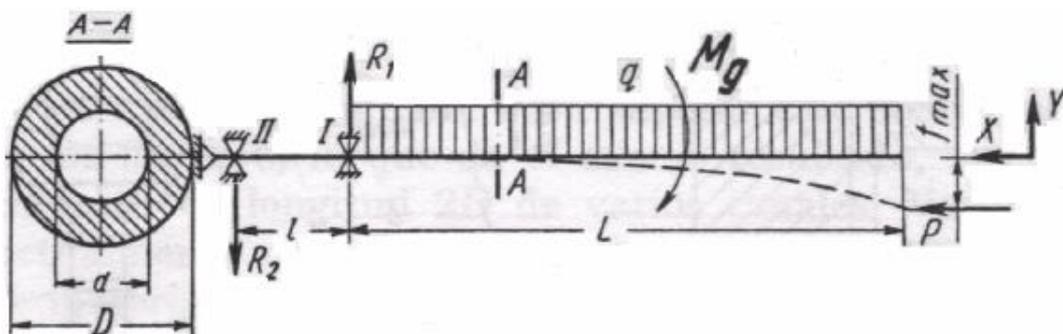


Figura A.15: Diagrama de Fuerzas del Husillo

Fuente: Basada en [41]

En este caso se aplica la ecuación definida por [41], que está determinada por una constante ( $K$ ) cuyo valor es  $K = 9550 Nm$ , con esto se puede calcular el momento de giro dado por:

$$M_g = 9550 \frac{N}{\eta} \quad (\text{A.34})$$

Donde:

$M_g$  = Momento de giro [N.m].

$N$  = Potencia [kW].

$\eta$  = Revoluciones [rpm].

Reemplazando en (A.34), se obtiene:

$$M_g = 9550 \cdot \frac{2,623}{113,29}$$

$$M_g = 220 N.m$$

El siguiente parámetro a ser calculado es  $u$  que expresa la relación existente entre los diámetros de los husillos.

$$u = \frac{d}{D} \quad (\text{A.35})$$

Donde:

$d$  = Diámetro menor del husillo [m].

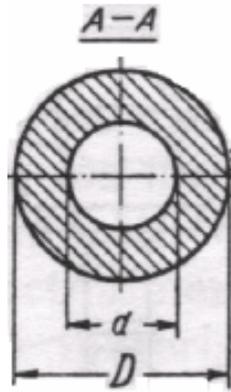
$D$  = Diámetro mayor del husillo [m].

Reemplazando en (A.35), se obtiene:

$$u = \frac{0,020}{0,0282}$$

$$u = 0,7092$$

Con los resultados se puede obtener  $F$  que es la superficie transversal del husillo seccionado por A-A [27], como se presenta en la Figura A.16



**Figura A.16:** Corte transversal de los diámetros del husillo

**Fuente:** Basada en [41]

$$F = \frac{\pi \cdot D^2}{4} (1 - u^2) \quad (\text{A.36})$$

Donde:

$F$  = Superficie transversal del husillo [ $m^2$ ].

$D$  = Diámetro entre cresta y cresta de los filetes [m].

$u$  = Relación entre los diámetros del husillo [adimensional].

Reemplazando en (A.36), se obtiene:

$$F = \frac{\pi \cdot 0,032^2}{4} (1 - 0,7092^2)$$

$$F = 3,9972 \cdot 10^{-4} m^2$$

Según [27], con la superficie transversal del husillo se procede a calcular el momento de inercia  $J$  de la sección transversal A-A de la Figura A.15

$$J = \frac{\pi \cdot D^4}{64} (1 - u^4) \quad (\text{A.37})$$

Donde:

$J$  = Momento de inercia [ $m^4$ ].

$D$  = Diámetro entre cresta y cresta de los filetes [m].

$u$  = Relación entre los diámetros del husillo [adimensional].

Reemplazando en (A.37), se obtiene:

$$J = \frac{\pi \cdot 0,032^4}{64} (1 - 0,7092^4)$$

$$J = 3,8449 \cdot 10^{-8} m^4$$

El radio de inercia se calcula mediante:

$$R = \sqrt{\frac{J}{F}} \quad (\text{A.38})$$

Donde:

$J$  = Momento de inercia [ $m^4$ ].

$F$  = Superficie transversal del husillo [ $m^2$ ].

$$R = \sqrt{\frac{3,8449 \cdot 10^{-8}}{3,9972 \cdot 10^{-4}}}$$

$$R = 9,8077 \cdot 10^{-3} m$$

Los valores iniciales para el cálculo de fuerzas en el husillo se llegan a determinar con (A.39), según [27]:

$$P = F \cdot P_{m\acute{a}x} \quad (\text{A.39})$$

Donde:

$F$  = Superficie de la sección transversal del husillo, sobre la que ejerce su presión el material [ $m^2$ ].

$P_{m\acute{a}x}$  = Presión específica del material en la parte delantera del cilindro o camisa [ $\frac{MN}{m^2}$ ].

Reemplazando en (A.39), se obtiene:

$$P = 3,9972 \cdot 10^{-4} \cdot 89,66$$

$$P = 35734,968 N$$

La tensión tangencial máxima sobre la superficie del husillo [27] está dada por:

$$\tau = \frac{16 \cdot M_g}{\pi \cdot D^3 (1 - u^4)} \quad (\text{A.40})$$

Donde:

$M_g$  = Momento de giro [N.m].

$D$  = Diámetro entre cresta y cresta de los filetes [m].

$u$  = Relación entre los diámetros del husillo [adimensional].

Reemplazando en (A.40), se obtiene:

$$\tau = \frac{16 \cdot 220}{\pi \cdot 0,032^3 (1 - 0,70922^4)}$$

$$\tau = 45,8 \frac{MN}{m^2}$$

La carga repartida en el husillo  $q$ , se determina por (A.41):

$$q = \frac{\text{Peso del tornillo (kg)}}{\text{Longitud del tornillo(m)}} \quad (\text{A. 41})$$

Reemplazando en (A.41), se obtiene:

$$q = \frac{3,44}{0,64}$$

$$q = 5,3 \frac{kg}{m}$$

La tensión normal ( $\sigma$ ) según [27], está expresada por:

$$\sigma = \frac{P}{F} + \frac{M_f}{W_o} \quad (\text{A.42})$$

Donde:

$M_f$  = Momento de flexión máximo [kg].

$W_o$  = Momento de resistencia [ $m^3$ ].

El momento de flexión máximo esta expresado por:

$$M_f = \frac{q \cdot L^2}{2} \quad (\text{A. 43})$$

Donde:

$q$  = Carga repartida [ $\frac{kg}{m}$ ].

$L$  = Longitud del husillo [m].

Reemplazando en (A.43), se obtiene:

$$M_f = \frac{5,3 \frac{kg}{m} \cdot 0,64 m}{2}$$

$$M_f = 1,696 kg$$

El momento de resistencia respecto al eje neutro  $W_o$  se obtiene utilizando (A.44):

$$W_o = \frac{\pi \cdot D^3}{32} (1 - u^4) \quad (A.44)$$

Datos:

$D$  = Diámetro entre cresta y cresta de los filetes [m].

$u$  = Relación entre los diámetros del husillo [adimensional].

Reemplazando en (A.44), se obtiene:

$$W_o = \frac{\pi \cdot 0,032^3}{32} (1 - 0,70922^4)$$

$$W_o = 2,4031 \cdot 10^{-6} m^3$$

Con los datos  $W_o$  y  $M_f$  se reemplaza los datos en (A.42) para hallar la tensión normal.

$$\sigma = \frac{35734,968}{3,9972 \times 10^{-4}} + \frac{1,118}{2,4031 \times 10^{-6}}$$

$$\sigma = 89,9 \frac{MN}{m^2}$$

### A.1.13 MATERIAL DEL HUSILLO

Para el husillo, camisa, boquilla y bases se analizaron varias alternativas de materiales existentes en el mercado tal como lo muestra la Tabla A.3. El acero 4140<sup>12</sup> el mejor reconocido para trabajar a altas temperaturas hasta 540°C, sin perder ninguna de propiedades, además es ideal para trabajar con polímeros debido a que en la composición el índice de adherencia es bajo. El acero 4140 no necesita tratamiento térmico para la aplicación de la extrusora.

---

<sup>12</sup> Especificaciones técnicas en Anexo 4

Tabla A.3: Materiales para Husillos

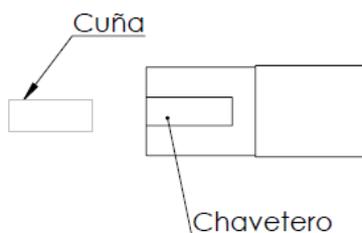
Materiales Base Para el Husillo				Condiciones de Desgaste				
Material	Tratamiento	Rc	FH	Abrasivo			Corrosivo	
				Normal	Promedio	Severa	Moderada	Severa
Acero Aleado 4140	Endurecido con llama	48	no	Aceptable	Mala	No Aceptable	No Aceptable	No Aceptable
		55						
Nitalloy 135-M	Nitrurado	63	si	Buena	Aceptable	No Aceptable	Mala	No Aceptable
		70						
		56						
CPMM4(a)	Tratado con calor	62	no	Excelente	Buena	Aceptable	Mala	No Aceptable
		64						
CPM 420(a)	Tratado con calor	52	no	Aceptable	Buena	No Aceptable	Buena	Mala
		56						
Elmax ( c)	Tratado con calor	57	no	Buena	Aceptable	No Aceptable	Buena	Mala
		59						
Custom 450 (b)	Endurecido por tiempo	41	no	Aceptable	No Aceptable	No Aceptable	Buena	No Aceptable
		42						
		39						
Nomenclatura								
Tratamiento	Incluye cromado a 0,003" - 0,005" y nitruración con gas o ion por ciclo de 24 horas							
RC	Dureza Rockwell C							
FH	Requiere endurecimiento en la superficie del filete.							
Normal	Termoplásticos sin refuerzos.							
Promedio	Termoplásticos hasta con 30% de refuerzos							
Severa	Termoplásticos con más de 30% de refuerzos							
Moderado	Incluye celuloso, acetales y otros que contiene aditivos corrosivos							

Fuente: Basada en [27]

#### A.1.14 DISEÑO DE LA CHAVETA

La cuña o chaveta es un elemento mecánico que en la aplicación actual cumple con la función de transferir todo el par torsional suministrado del motor al husillo, y de esta forma permite generar el movimiento [27]. La chaveta además es un elemento emergente debido a que si se produjera un exceso de par torsional, la cuña se vería afectada por su desprendimiento o rotura sin afectar al eje del husillo.

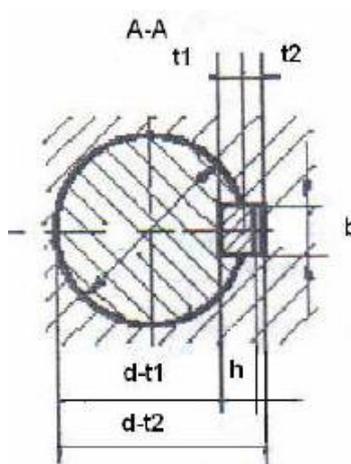
La chaveta se encuentra localizada al inicio del eje del husillo en un orificio axial que se lo denomina chavetero, la chaveta



**Figura A.17:** Cuña y chavetero

**Fuente:** el autor

Para la aplicación se recomienda utilizar cuñas cuadradas que son utilizadas para la aplicación en ejes de hasta 77 cm de diámetro. En ejes largos en la mayoría de ocasiones se utiliza las cuñas rectangulares, sin embargo la aplicación se extiende para ejes cortos siempre y cuando acepte una menor altura.



**Figura A.18:** Medida Nominal de la Chaveta en mm

**Fuente:** Basado en [27].

Datos:

$b$  = Base de la cuña.

$h$  = Altura de la chaveta.

$d$  = Diámetro del husillo.

$t_1$  = Medida insertada en el eje.

$t_2$  = Medida que sobresale del eje.

Tabla A.4: Medidas de chavetas

Diámetro del árbol	Medida nominal de la cuña, mm		Medida nominal del chavetero				
	bxh	Chablán S		Profundidad		Radio r	
		máx	Min	En el árbol t1	En el árbol t2	máx	min
6 a 8	2 x 2			1,2	1		
8 a 10	3 x 3	0,25	0,16	1,8	1,4	0,16	0,08
10 a 12	4 x 4			2,5	1,8		
12 a 17	5 x 5			3	2,3		
17 a 22	6 x 6	0,4	0,25	3,5	2,6	0,25	0,15
22 a 30	7 x 7			4	3,3		
22 a 30	8 x 7			4	3,3		
30 a 38	10 x 8	0,6	0,4	5	3,3	0,4	0,25
38 a 44	12 x 8			5	3,3		
44 a 50	14 x 9			5,5	3,8		
50 a 58	16 x 10			6	4,3		
58 a 65	18 x 11			7	4,4		

Fuente: Basada en [27].

La Tabla A.4 muestra las medidas estándar para la chaveta base y altura, basada en [27]. Los valores seleccionados  $d = 32\text{mm}$ ,  $h = 8\text{mm}$ ,  $b = 10\text{mm}$

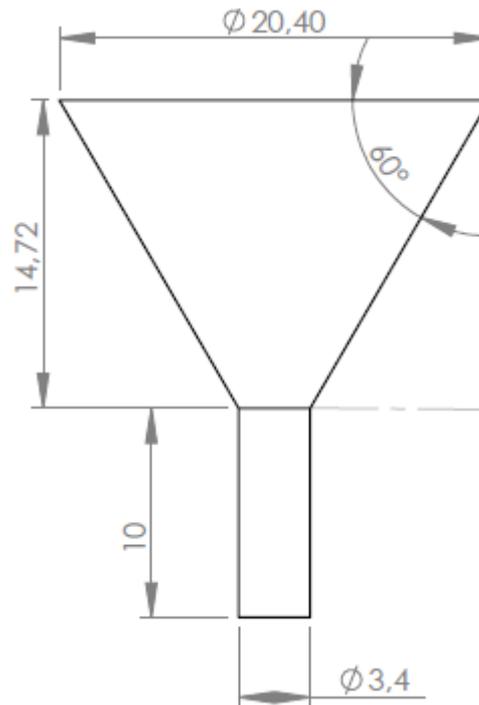
## A.2 DISEÑO DE LA TOLVA

En el análisis de alternativas en el capítulo II sección 2.2.1 para la selección de la tolva se escoge una tolva circular. La tolva es la entrada inicial y la fuente de alimentación para la extrusora. Las paredes inclinadas y circulares de la tolva permiten generar un flujo másico, lo que significa que el material está en constante movimiento y no se quedará pegado o producirá zonas muertas por donde no circule los gránulos.

La dosificación del material a la extrusora debe ser homogéneo, por tal razón la inclinación de las paredes debe ser exacta, para las dimensiones de la tolva se obtiene de [27], en el que indica que el diámetro superior es 20 cm y el inferior 3 cm, un ángulo de inclinación entre el diámetro superior y la pared inclinada de  $60^\circ$ , por tanto se tiene que:

$$\tan 60 = \frac{h_c}{8,5 \text{ cm}} \quad (\text{A.45})$$

$$h_c = 14,72 \text{ cm}$$



**Figura A.19:** Dimensiones Tolva en cm  
Fuente: El autor

Las dimensiones presentadas en la Figura A.19 son incluidas el espesor del material por lo que el diámetro interno de la parte superior será 20 cm y de la parte inferior 3 cm con estas dimensiones se realiza el cálculo del volumen de la tolva. Para lo cual se obtiene el volumen de su parte cónica y luego el volumen de su parte cilíndrica, esto permite saber el volumen total de la tolva.

$$V_{cono} = \frac{\pi \cdot h_c}{3} (R^2 + R \cdot r^2 + r) \quad (\text{A.46})$$

Donde:

R: Radio superior del cono [cm].

r: Radio inferior del cono [cm].

$h_c$ : Altura del cono [cm].

Reemplazando en (A.46), se obtiene:

$$V_{cono} = \frac{\pi \cdot 14,7}{3} (10^2 + 10 \cdot 1,5 + 1,5)$$

$$V_{cono} = 6349,94 \text{ cm}^3$$

El volumen de la parte cilíndrica está expresado por:

$$V_{cilindro} = \pi \cdot r^2 \cdot h_{ci} \quad (\text{A.47})$$

Donde:

r: Radio del cilindro [cm].

$h_{ci}$ : Altura del cilindro [cm].

Reemplazando en (A.47), se obtiene:

$$V_{cilindro} = \pi \cdot 1,5^2 \cdot 10$$

$$V_{cilindro} = 70,69 \text{ cm}^3$$

Con el volumen del cilindro y del cono se podrá calcular el volumen total de la tolva.

$$V_{total} = 70,69 + 6349,94$$

$$V_{total} = 6420,62 \text{ cm}^3$$

Para determinar la masa que podrá almacenar la tolva se considera la densidad del PET y el volumen total de la tolva.

$$m = V_{total} \cdot \rho_{PET} \quad (\text{A.48})$$

Donde:

V: Volumen total de la tolva [ $\text{cm}^3$ ].

$\rho$ : Densidad del PET [ $\text{kg}/\text{cm}^3$ ].

Reemplazando en (A.48), se obtiene:

$$m = 6420,62 \cdot 0,00137$$

$$m = 8,8 \text{ kg}$$

Con el volumen y la densidad se determina que a la tolva se puede ingresar 8.8 kg de material.

## ANEXO B – ESPECIFICACIONES DEL MATERIAL

### ACERO SAE 4140

<b>DIN</b>	<b>42 Cr Mo 4</b>
<b>UNI</b>	<b>40CD4</b>
<b>SAE</b>	<b>4140</b>
<b>AFNOR</b>	<b>42 CD 4</b>

#### CARACTERÍSTICAS DE EMPLEO

Es un acero de temple en aceite de medio carbono aleado al cromo-molibdeno de buena penetración de temple y con buenas características de estabilidad en caliente hasta 400°C sin fragilidad de revenido, muy versátil y apto para esfuerzos de fatiga y torsión en secciones pequeñas y medianas. Puede ser endurecido superficialmente por temple directo (a la llama o por inducción), obteniendo durezas de 57-62 Rockwell C. Generalmente se entrega en estado bonificado (con dureza entre 28 a 32 HRC).

#### PROPIEDADES FÍSICAS

Estos valores son obtenidos a partir de probetas bajo condiciones específicas de laboratorio y deben ser usados como referencia.

- Densidad → 7.85 gr/cm<sup>3</sup>.
- Módulo de elasticidad → 2.1 x 10<sup>11</sup> Pa
- Coeficiente de Dilatación / °C →
 

20 a 100°C	= 12.3 x 10 <sup>-6</sup>
20 a 200°C	= 12.7 x 10 <sup>-6</sup>
20 a 400°C	= 13.7 x 10 <sup>-6</sup>
20 a 600°C	= 14.5 x 10 <sup>-6</sup>
- Conductividad térmica → W/m · °C.
 

20 a 100°C	= 42.7
20 a 200°C	= 42.3
20 a 400°C	= 37.7
20 a 600°C	= 33.1
- Calor específico (J/kg°C):
 

20 a 200°C	= 473
20 a 400°C	= 519
20 a 600°C	= 561
- Coeficiente de Poisson → 0,3
- Resistividad eléctrica (microhm-cm):
 

20°C	= 0.22
20 a 100°C	= 0.26
20 a 200°C	= 0.33
20 a 400°C	= 0.48
20 a 600°C	= 0.65



COMPOSICIÓN QUÍMICA	C %	Mn %	P máx. %	S máx. %	Si %	Cr %	Mo %
Análisis típico en %	0.38	0.75	0.035	0.04	0.2	0.80	0.15
	0.43	1.0					

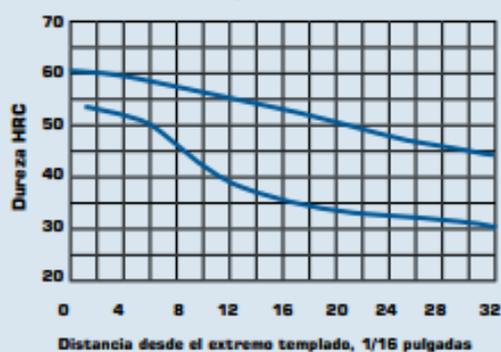
PROPIEDADES MECÁNICAS A TEMPERATURA AMBIENTE					
Estado de Suministro	Resistencia a la Tracción MPa	Límite elástico MPa	Alargamiento %	Reducción de Área %	Dureza Brinell aprox.
Laminado en Caliente	588 - 690	392	22	50	210 - 240
Calibrado	690 - 785	589	14	40	240 - 260
Bonificado	850 - 981	735	14	47	260 - 320

Nota: Estas propiedades mecánicas son tomadas sobre redondos de 25mm.  
Para mayores o menores dimensiones hay que considerar el efecto de masa.

## BANDA DE TEMPLABILIDAD

BANDA DE TEMPLABILIDAD PARA EL ACERO 4140							
Distancia desde el extremo templado		Dureza, HRC		Distancia desde el extremo templado		Dureza, HRC	
1/16 in	mm	Máx.	Mín.	1/16 in	mm	Máx.	Mín.
1	1.58	60	53	13	20.54	55	38
2	3.16	60	53	14	22.12	54	37
3	4.74	60	52	15	23.70	54	36
4	6.32	59	51	16	25.28	53	35
5	7.90	59	51	18	26.44	52	34
6	9.48	58	50	20	31.60	51	33
7	11.06	58	48	22	34.75	49	33
8	12.64	57	47	24	37.92	48	32
9	14.22	57	44	26	41.08	47	32
10	15.80	56	42	28	44.24	46	31
11	17.38	56	40	30	47.40	45	31
12	18.96	55	39	32	50.56	44	30

Curva de Templabilidad



## TRATAMIENTOS TÉRMICOS

TRATAMIENTO TÉRMICO	TEMPERATURA °C	MEDIO DE ENFRIAMIENTO
Forja	850 - 1100	Ceniza - arena seca
Normalizado	850 - 870	Aire
Recocido globular	750	Horno
Recocido subcrítico	680 - 720	Horno
Temple	830 - 850	Aceite
Revenido	500 - 650	Aire

**Díámetro crítico:** Dimensiones máximas en las que se consigue un temple aceptable en el centro de la pieza:

70mm de diámetro con enfriamiento en agua  
45mm de diámetro con enfriamiento en aceite

## ANEXO C – ESPECIFICACIONES DE LA TERMUCUPLA



Termocuplas OXIPACK

Hoja de especificación SA-020



Modelo básico  
**SA-020** - **1** -       -       -       -

Tabla I

Conexiones		
0000		Sin conexión al proceso - Solo el elemento con 1" de alambres sin aislar
0001		Sin conexión al proceso - Solo el elemento con los cables de extensión (4" estándar)
MNx**1		Medio niple de 1/2" NPT, hexagono de 7/8", roscado por un solo lado Longitud estándar: 1 1/4"
NMx**2		Niple de 1/2" NPT, hexagono de 7/8" roscado por ambos lados Longitud estándar: 2"
UNx**3*		Union de 3 piezas, sello con "O" Ring, conexión de 1/2" x 1/2" NPT Longitud estándar: 3"
SLx**2*		Niple "Spring Loaded", conexión de 1/2" x 1/2" NPT, recorrido de 3/4", Longitud estándar de 2"
SUx**3*		Union "Spring Loaded", conexión de 1/2" x 1/2" NPT, recorrido mín de 3/4", Longitudes estándar de 3", 4", 5" y 6"

\* = Reemplazar por la longitud requerida, en pulgadas

\*\* = Reemplazar la "x" por el código del material

A = 304 s.s., C = 316 s.s., L = Acero al carbono

Tabla II

i) Elemento	
2	Sencillo
4	Doble
6	Triple
ii) Calibración	
T	Cobre-Constantana
J	Hierro-Constantana
K	Chromel-Alumel
E	Chromel-Constantana

Continua Tabla II

iii) Diámetro funda	
1	0.040" (1 m.m.)
2	1/16" (1.58 m.m.)
4	1/8" (3.18 m.m.)
5	3/16" (4.76 m.m.)
7	1/4" (6.35 m.m.)
8	5/16" (7.94 m.m.)
9	3/8" (9.52 m.m.)
0	1/2" (12.7 m.m.)
iv) Material funda	
B	Inconel 600
C	AISI 316
D	AISI 310
Q	AISI 446
X	Hastelloy X
v) Junta caliente	
7	Expuesta
8	Aterrada
9	Aislada

Tabla III

Longitud "U"	
xxx,x	Longitud "U", en pulgadas

Tabla IV

Longitud cable extensión	
x,x	Longitud, en pulgadas
Longitud estándar: 4" (Cables aislados en Teflón)	

## ANEXO D – ESPECIFICACIONES DEL MÓDULO CONTROLADOR DE TEMPERATURA



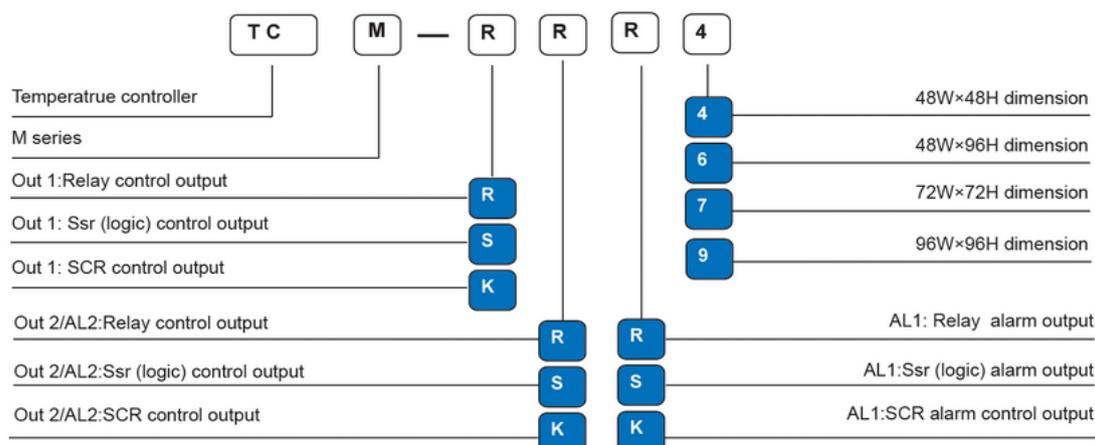
[Click to enlarge](#)

Code: TCM-RR4

### Features:

- \* Micro processor PID temperature controller, with built in SMT technology and digit filter circuit.
- \* Auto-tune PID, Fuzzy PID, ON-OFF function; cooling/heating function.
- \* Soft buttons, easily operate; high precision and anti-interference
- \* Dual line 3 LED digit display: upper LED: red; lower LED: green
- \* Universal input: TC(K, E, J, T); RTD(Pt100, Cu50), configurable by software
- \* Control output: Relay, SSR(Logic), SCR
- \* 2 alarm output, up to 5 alarm mode settings
- \* Optional instrument size: 48W×48H
- \* Application ranges: food&beverage, oven, furnace, plastic extruder, chemicals processing, heating process, measuring and control)

### 1. Product model is named:



### 2. Ordering Code:

Model and Type	Input	Output	Alarm	Size
TCM-RR4	TC: K, E, J, T; RTD: Pt100, Cu50	Relay	1 alarm(relay)	48×48mm
TCM-RRR4	TC: K, E, J, T; RTD: Pt100, Cu50	Relay and Out2(Cooling)	1 alarm(relay)	48×48mm
TCM-RK4	TC: K, E, J, T; RTD: Pt100, Cu50	Relay	1 alarm (SCR)	48×48mm
TCM-SR4	TC: K, E, J, T; RTD: Pt100, Cu50	SSR/Logic	1 alarm(relay)	48×48mm
TCM-SRR4	TC: K, E, J, T; RTD: Pt100, Cu50	SSR/Logic and Out2(cooling)	1 alarm(relay)	48×48mm
TCM-KRR4	TC: K, E, J, T; RTD: Pt100, Cu50	SCR and Out2(Cooling)	1 alarm (Relay)	48×48mm
TCM-KR4	TC: K, E, J, T; RTD: Pt100, Cu50	SCR	1 alarm (relay)	48×48mm

### 3. Technical Specifications:

Property project	Specific parameter
Power supply	90-260V AC 50/60HZ
Power consumption	≤ 5VA
Measuring range	-199-999°C
Accuracy	±0.3% F.S (under normal conditions)
Sampling rate	<500ms
Main control output	Relay: NO., contact capacity: AC 250V /3A orDC 30V /3A Cosφ=1
Alarm output	Relay: NO., contact capacity: AC 250V /3A or DC 30V /3A Cosφ=1
Input	TC(K/J/T/E); RTD(Pt100/Cu50)
Withstand voltage	1500V Rms (between terminal points and the plastic case)
Insulation strength	Min. 50m Ω (500V DC, between the terminal points and case)
Ambient temperature	0~50°C
Stock temperature	-10~60°C
Humidity	35~85%(RH)

## ANEXO E – ESPECIFICACIONES DEL RELÉ DE ESTADO SÓLIDO



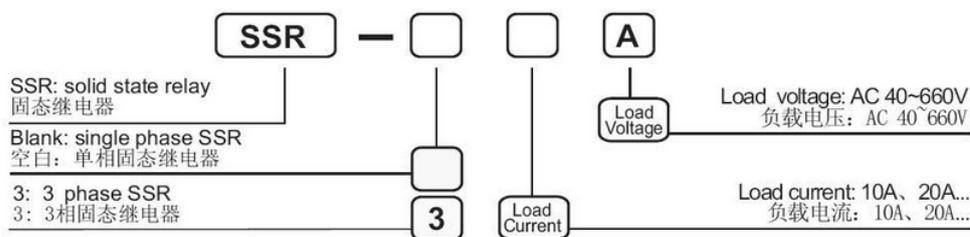
[Click to enlarge](#)

Code: **SSR-□A**

**Features:**

- \*Load current range: AC 10A, 25A, 30A, 40A, 50A, 60A, 80A, 100A.
- \*Load voltage range: . AC 24~660V AC.
- \*Control voltage: DC 3~32V; Control current: 6mA~25mA.
- \*Input constant current control, AC Zero point On and OFF function
- \*Adop technic of glass passivation triac square piece(>50A), good in dispersing heat.
- \*Optic isolated ( $\geq 2000V$  AC 1min ), dual triac strong output or single triac reversal parallel connection strong output.
- \*Input or output LED indication.
- \* Widely used in various automatic fields like chemical fibre machinery, temperature controller Electric cooker, rubber machinery, fountain control, numerical control machinery... etc.

**1. Product model is named:**



**2. Ordering Code:**

Model and Type	Load Current	Load Voltage	Control Voltage
SSR-10A	AC 10A	AC 24~660V	DC 3~32V
SSR-25A	AC 25A	AC 24~660V	DC 3~32V
SSR-40A	AC 40A	AC 24~660V	DC 3~32V
SSR-50A	AC 50A	AC 24~660V	DC 3~32V
SSR-60A	AC 60A	AC 24~660V	DC 3~32V
SSR-80A	AC 80A	AC 24~660V	DC 3~32V
SSR-100A	AC 100A	AC 24~660V	DC 3~32V

**3. Technical Specifications:**

Property project	Specific parameter
Max. Load Current	AC 10A、25A、40A、50A、80A、100A
Load Voltage	AC 24~660V
Isolated Voltage	$\geq 2000V$ AC 1 min.
Insulation Voltage	$\geq 2000V$ AC 1 min.
Control Voltage	DC 3~32V
Control Current	6mA~25mA
Turn-On Voltage	$\leq 1.3V$
Off-set leakage	$\leq 1.3mA$
Off state dv/dt	300v/us
On - Off Time	100ms
Frequency Range	47/63 Hz
Status Indicator	Red LED
Ambient Temperature	-40~80°C
Net Weight	200g

## ANEXO F – ESPECIFICACIONES DEL VARIADOR DE FRECUENCIA

iG5A

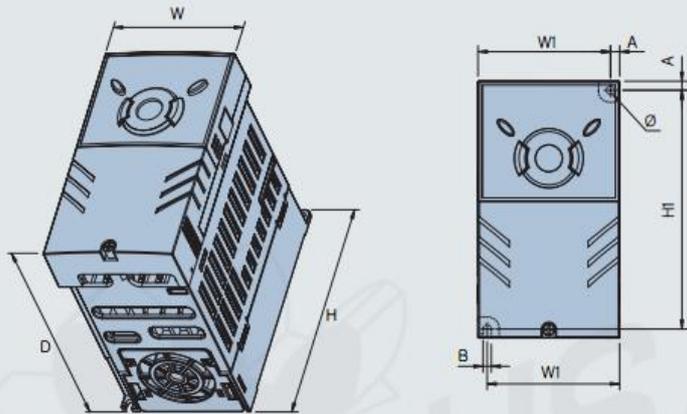
### Model & Type

Applicable motor ranges	1 Phase 200V	3 Phase 200V	3 Phase 400V
0.4kW (0.5HP)	SV004iG5A-1	SV004iG5A-2	SV004iG5A-4
0.75kW (1HP)	SV008iG5A-1	<b>SV008iG5A-2</b>	SV008iG5A-4
1.5kW (2HP)	SV015iG5A-1	SV015iG5A-2	SV015iG5A-4
2.2kW (3HP)		SV022iG5A-2	SV022iG5A-4
3.7kW (5HP)		SV037iG5A-2	SV037iG5A-4
4.0kW (5.4HP)		SV040iG5A-2	SV040iG5A-4
5.5kW (7.5HP)		SV055iG5A-2	SV055iG5A-4
7.5kW (10HP)		SV075iG5A-2	SV075iG5A-4
11.0kW (15HP)		SV110iG5A-2	SV110iG5A-4
15.0kW (20HP)		SV150iG5A-2	SV150iG5A-4
18.5kW (25HP)		SV185iG5A-2	SV185iG5A-4
22.0kW (30HP)		SV220iG5A-2	SV220iG5A-4

iG5A

### Dimensions

❖ SV004iG5A-2 / SV008iG5A-2, SV004iG5A-4 / SV008iG5A-4



mm (inches)

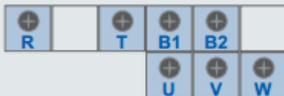
Inverter model	(kW)	W (mm)	W1 (mm)	H (mm)	H1 (mm)	D (mm)	Ø	A (mm)	B (mm)	(kg)
SV004iG5A-2	0.4	70	65.5	128	119	130	4.0	4.5	4.0	0.76
<b>SV008iG5A-2</b>	0.75	70	65.5	128	119	130	4.0	4.5	4.0	0.77

### ☺☺ 3 Phase 200V

SV		iG5A-2	004	008	015	022	037	040	055	075	110	150	185	220
Max. capacity <sup>1)</sup>	(HP)		0.5	1	2	3	5	5.4	7.5	10	15	20	25	30
	(kW)		0.4	0.75	1.5	2.2	3.7	4.0	5.5	7.5	11	15	18.5	22
Output rating	Capacity (kVA) <sup>2)</sup>		0.95	1.9	3.0	4.5	6.1	6.5	9.1	12.2	17.5	22.9	28.2	33.5
	FLA (A) <sup>3)</sup>		2.5	5	8	12	16	17	24	32	46	60	74	88
	Max frequency		400 [Hz] <sup>4)</sup>											
	Max voltage		3 phase 200-230V <sup>5)</sup>											
Input rating	Rated voltage		3 phase 200-230 (+10%, -15%)											
	Rated frequency		50-60 [Hz] (± 5%)											
Cooling method			N/C <sup>6)</sup>			Forced air cooling								
Weight (kg)			0.76	0.77	1.12	1.84	1.89	1.89	3.66	3.66	9.0	9.0	13.3	13.3

## Terminal Configuration

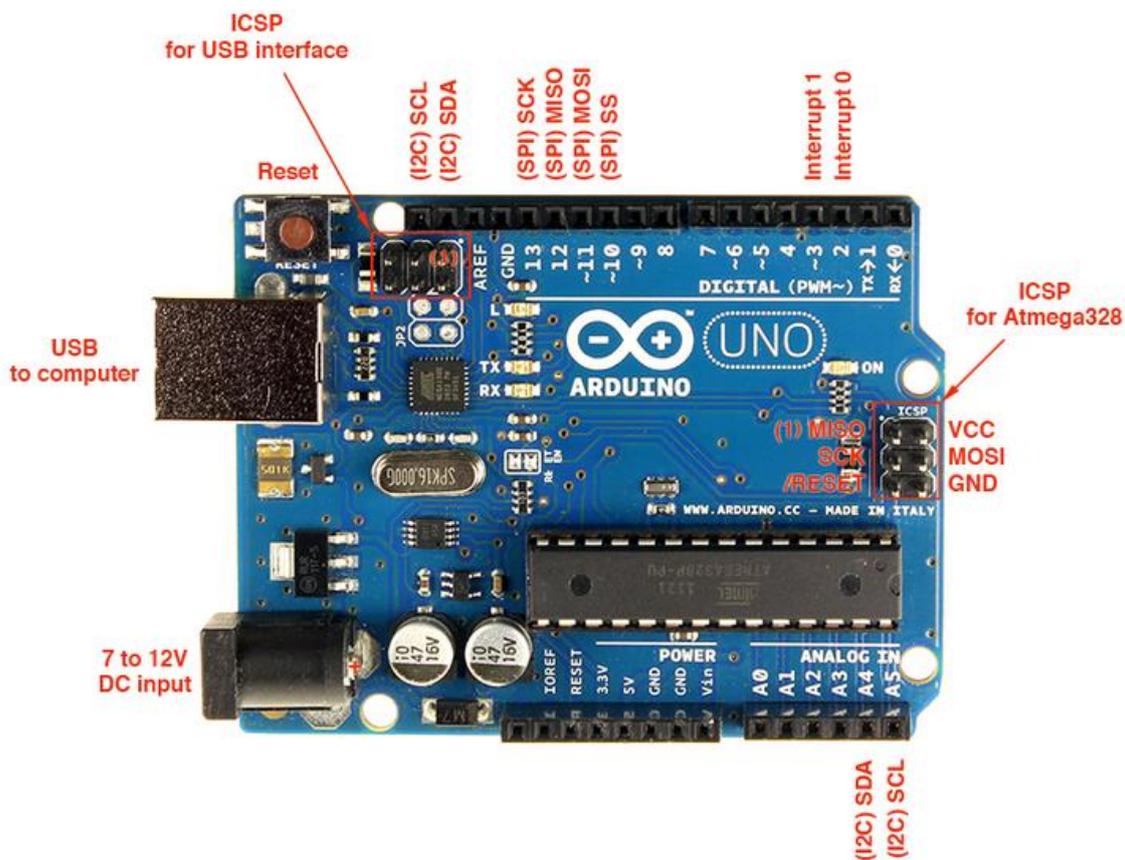
### ☺☺ Specifications for power terminal block wiring

<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0.4kW-0.75kW (1 phase)</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0.4kW-1.5kW (3 phase)</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1.5kW (1 phase)</li> </ul> 							
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5.5kW-7.5kW (3 phase)</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 11-22kW (3 phase)</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2.2-4.0kW (3 phase)</li> </ul> 							
		R, S, T wire		U, V, W wire		Ground wire		Terminal Screw Size	Screw Torque (kgf.cm) / lb-in
		mm <sup>2</sup>	AWG	mm <sup>2</sup>	AWG	mm <sup>2</sup>	AWG		
SV004iG5A-1		2	14	2	14	3.5	12	M3.5	10/8.7
SV008iG5A-1		2	14	2	14	3.5	12	M3.5	10/8.7
SV015iG5A-1		2	14	2	14	3.5	12	M4	15/13
SV004iG5A-2		2	14	2	14	3.5	12	M3.5	10/8.7
SV008iG5A-2		2	14	2	14	3.5	12	M3.5	10/8.7

## ANEXO G – ESPECIFICACIONES DEL MÓDULO ARDUINO UNO

### Summary:

Microcontroller	ATmega328
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Clock Speed	16 MHz





## ANEXO H – PROGRAMACIÓN DEL BOBINADO

```
int lm35 = A0;

float temp;

int buttonPin = 4; // Número de pin para el pushbutton
int buttonState = 0; // Variable para leer el estado del pushbutton
int sensorPin = A1; // Variable de entrada para el potenciómetro
int sensorValue = 0; // Variable para almacenar el valor proveniente del sensor
int sensorPin1 = A2; // Variable de entrada para el potenciómetro
int sensorValue1 = 0; // Variable para almacenar el valor proveniente del sensor

void setup() {
  // DECLARACIÓN DE LOS PINES DE LOS LED COMO SALIDAS
  pinMode(5, OUTPUT); //led 1
  pinMode(6, OUTPUT); //led 2
  pinMode(7, OUTPUT); //led 3
  pinMode(buttonPin, INPUT); //boton verde
  pinMode(10, OUTPUT); // motor
  pinMode(11, OUTPUT); // ventilador
  Serial.begin(9600);
}

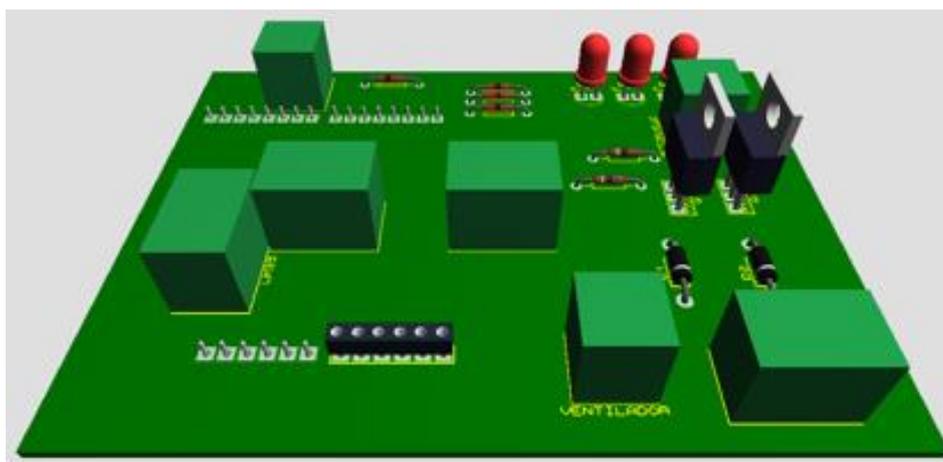
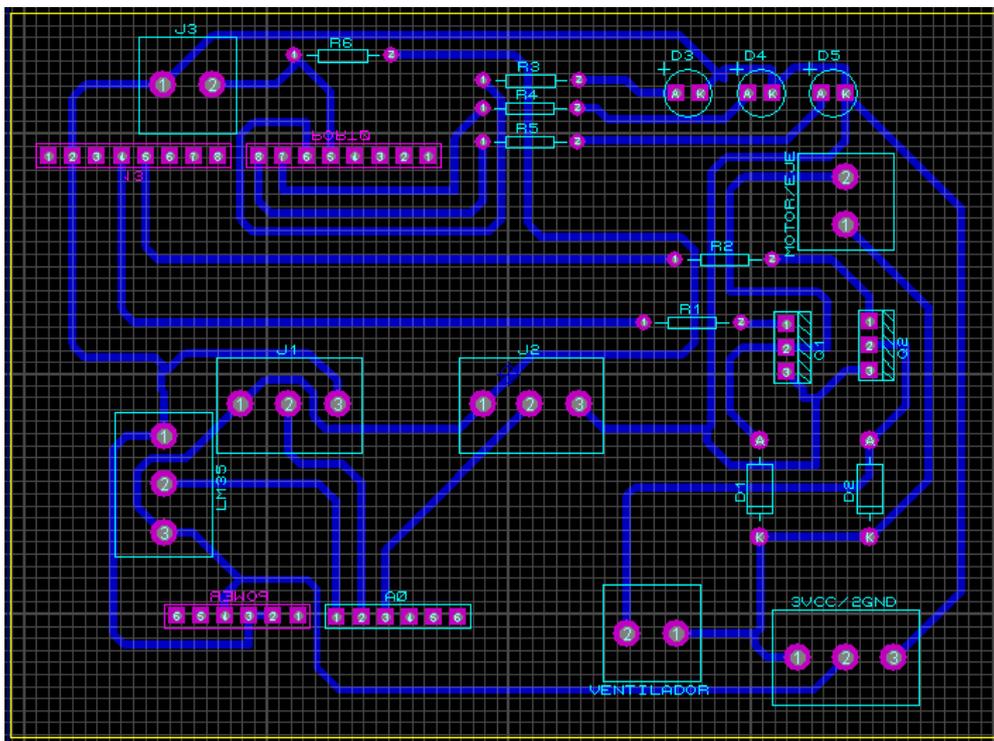
void loop() {

  buttonState = digitalRead(buttonPin);
  sensorValue = analogRead(sensorPin);
  sensorValue1 = analogRead(sensorPin1);
```

```
temp = analogRead(A0);  
temp = (temp * 100.0 * 5.0) / 1024.0;  
  
//Serial.println (temp); ESTOS COMANDOS SERÁN USADOS EN CASO DE  
USAR UN DISPLAY  
  
//Serial.println(" oC"); PARA ESTA APLICACIÓN NO SE USARÁ YA QUE SE  
DISPONE DE  
  
//Serial.println();    CONTROLADORES DE TEMPERATURA  
  
//Serial.println (sensorValue/4);  
  
//Serial.println(" primer pot");  
  
//Serial.println();  
  
//Serial.println (sensorValue1/4);  
  
//Serial.println(" dos");  
  
//Serial.println();  
  
delay(1000);  
  
if (buttonState == LOW && temp > 100) { //Rango de temperatura  
  
analogWrite(11, sensorValue1 / 4);  
analogWrite(10, sensorValue / 4);  
  
digitalWrite(5,HIGH) ;  
digitalWrite(6,HIGH);  
digitalWrite(7,HIGH);  
  
}
```

```
    else if (buttonState == HIGH) {  
        analogWrite(11, sensorValue1 / 4);  
        analogWrite(10, sensorValue / 4);  
  
        digitalWrite(5,HIGH) ;  
        delay(200);  
        digitalWrite(5,LOW) ;  
        delay(200);  
        digitalWrite(6,HIGH) ;  
        delay(200);  
        digitalWrite(6,LOW) ;  
        delay(200);  
        digitalWrite(7,HIGH) ;  
        delay(200);  
        digitalWrite(7,LOW) ;  
        delay(200);  
  
    }  
    else if (buttonState == LOW && temp < 50) {  
        digitalWrite(10,LOW);  
        digitalWrite(11,LOW);  
        digitalWrite(5,LOW);  
        digitalWrite(6,LOW);  
        digitalWrite(7,LOW);  
    }  
}
```

## ANEXO I – PLACA DE CONTROLADOR DE BOBINADO & VENTILADORES



## ANEXO J – CLASE DE RUGOSIDAD

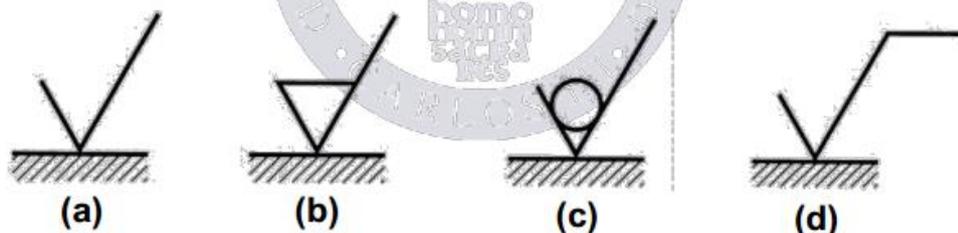


## CLASES DE RUGOSIDAD

- ◆ Los valores de rugosidad  $R_a$  se clasifican en una serie de intervalos  $Nx$  (siendo  $x$  un número del 1 al 12) según se indica en la *Tabla de clases de rugosidad*
- ◆ Las clases de rugosidad se pueden agrupar, según la apreciación visual o táctil, en los siguientes grados:
  - N1-N4 → La superficie es especular.
  - N5-N6 → Las marcas de mecanizado no se aprecian ni con el tacto ni con la vista (pero sí con lupa).
  - N7-N8 → Las marcas de mecanizado se aprecian con la vista pero no con el tacto.
  - N9-N12 → Las marcas de mecanizado se aprecian con la vista y con el tacto.

Rugosidad $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Clase de rugosidad
50	N12
25	N11
12,5	N10
6,3	N9
3,2	N8
1,6	N7
0,8	N6
0,4	N5
0,2	N4
0,1	N3
0,05	N2
0,025	N1

- ◆ Para indicar las características superficiales en los planos, se parte del **símbolo básico (a)**, representado por dos trazos desiguales, inclinados  $60^\circ$  respecto a la superficie donde se apoyan.
- ◆ Si el mecanizado se realiza por **arranque de viruta** (taladrado, torneado, fresado, cepillado, etc.) se utiliza el símbolo **(b)**.
- ◆ Si el mecanizado se efectúa con un proceso de conformación, **sin arranque de viruta**, (laminado, estirado, estampado, forjado, etc.) se emplea el símbolo **(c)**.
- ◆ Para indicar **características especiales** de la superficie, se usa el símbolo **(d)**.



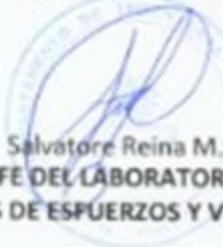
# ANEXO K – PRUEBAS DE LABORATORIO DEL HILO PRODUCIDO

	<b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</b> <b>DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>	
	<b>LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES</b>	
<b>INFORME TÉCNICO</b> LAEV. DIC.17		
Quito, 15 de diciembre de 2014		
<b>TRABAJO SOLICITADO POR:</b>	<b>UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL ECUADOR</b>	
<b>ORDEN DE TRABAJO N° 0002397</b>		
<p>Los resultados contenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en una muestra de material polimérico perteneciente al Sr. Christian Naranjo, para el desarrollo del proyecto de investigación "Máquina Elaboradora de Hilo PET". La muestra fue entregada en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional.</p>		
<b>RESULTADOS</b>		
<b>1. MUESTRA:</b> Una (1) muestra de hilo a base de PET reciclado para ensayo de tracción.		
<b>2. GENERALIDADES</b>		
De acuerdo con el solicitante, los datos generales de la muestra son los siguientes:		
<b>Temperatura de la zona de alimentación:</b>	220 °C	
<b>Temperatura de la zona de dosificación:</b>	300 °C	
<b>Temperatura de la zona de hilado:</b>	210 °C	
<b>Frecuencia de trabajo:</b>	10 Hz	
<b>3. ENSAYO DE TRACCIÓN</b>		
<p>En la tabla 1 se presenta los resultados de los ensayos de tracción realizado a la muestra. La velocidad de desplazamiento del cabezal de la máquina universal de ensayos fue de 1 mm/sec. La longitud inicial de la muestra fue de 140 mm.</p>		
		
LAEV-EPN Orden N°: 0002397		

Tabla 1. Resultados del ensayo de tracción realizado a la muestra.

Id.	Carga máxima registrada		% de Elongación
	lbf	N	
Hilo a base de PET reciclado	3,66	16,28	4,9

En el anexo se presentan la curva de carga vs deformación de la muestra. El porcentaje de deformación mostrado en las curvas corresponde al cabezal móvil de la maquina universal de ensayos.

  
Salvatore Reina M.Sc.  
JEFE DEL LABORATORIO DE  
ANÁLISIS DE ESPUEROS Y VIBRACIONES

  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
LAEV  
UNIVERSIDAD DE PIURA

## ANEXO L - ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE ENKADOR



### LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD

#### CERTIFICADO DE CALIDAD

<b>Fecha:</b> Diciembre 2014.			
<b>DESCRIPCION DEL PRODUCTO</b>			
<p>LOVECO  RP POY 260F48 BR RD INT.  LUSTRE: BRILLANTE  SECCION TRANSVERSAL: REDONDO  100% POLIÉSTER RECICLADO</p>			
<b>PROPIEDADES FISICAS DEL PRODUCTO</b>			
Propiedades	Unidad	Valor promedio	Especificación ENKADOR
Denier	Den	260	256 – 264
Tenacidad	gr/Den	2.5	2.20 – 2.80
Elongación	%	136	133 – 139
% Aceite	%	0.5	0.45 – 0.65
<b>Gerencia de Desarrollo y Servicio al Cliente:</b> Ing. Patricia Venegas			

## MANUAL DEL USUARIO

Es importante antes de operar la PET Spinning V 1.0, leer esta guía rápida de operación de la máquina. A continuación, se detallan los pasos para su encendido, operación y apagado.

1. Alimentar la máquina a 220 V bifásico.



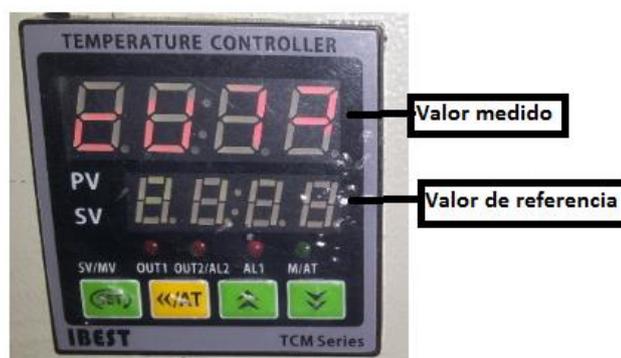
2. Energizar la máquina mediante el interruptor principal ubicado en el tablero de control de la máquina.



3. En el tablero de control, colocar el interruptor de la derecha en estado "ON", el mismo enciende a los controladores de temperatura y al calefactor.



4. Configurar los controladores de temperatura, mediante su teclado incorporado. Los controladores de temperatura tendrán los mismos pasos a seguir para su configuración.



#### Tipo de Termocupla:

- Mantener presionado la tecla  por 3 segundos.
- En el menú presionar por 5 ocasiones la tecla .
- Presionar la tecla  para modificar la termocupla.
- Con los botones   seleccionar la termocupla tipo J y volver a presionar .
- Para salir a la pantalla principal mantener presionado  por 3 segundos.

Para esta aplicación el tipo de termocupla es la ideal, pero en caso de necesitar otra termocupla seguir nuevamente los pasos.

#### Histéresis:

- Mantener presionado la tecla  por 3 segundos.
- En el menú presionar por 8 ocasiones la tecla .
- Presionar la tecla  para modificar la histéresis.
- Con los botones   seleccionar una histéresis de 3 y volver a presionar .

- Para salir a la pantalla principal mantener presionado  por 3 segundos.

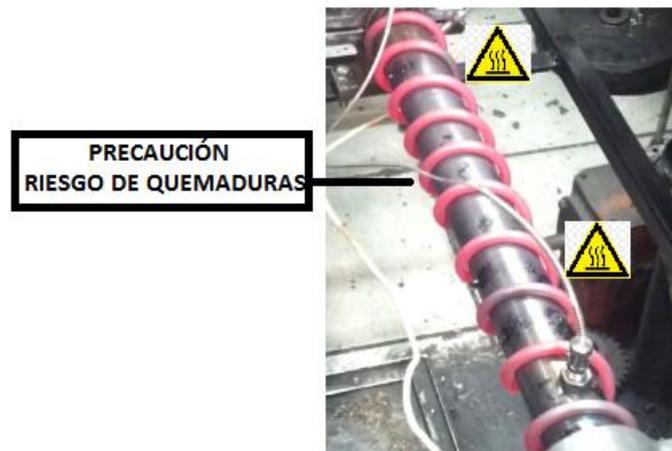
Es necesario aclarar que la histéresis no puede ser modificada de la especificación, caso contrario el material se degradaría o no se fundiría,

#### Valor de Referencia:

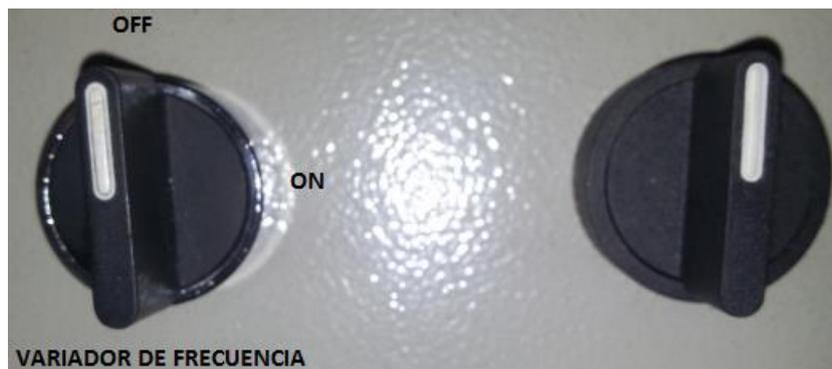
- En la pantalla principal presionar la tecla  para modificar el valor de referencia.
- Con los botones   seleccionar 300°C para el controlador de la salida y 200°C para el receptor de material de PET.
- Volver a presionar , para guardar el valor.

**Nota:** Para mayor información de las configuraciones de los controladores de temperatura consultar el manual de usuario iBest TMC SR4.

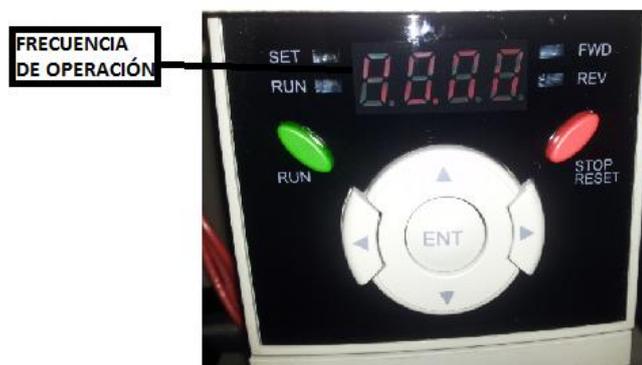
5. Asegurar que el calefactor llegue a su temperatura de operación.



6. En el tablero de control, colocar el interruptor de la izquierda en estado "ON", el mismo enciende el variador de frecuencia.



7. Asegurar la frecuencia inicial del variador.



- Mantener presionado  para modificar la frecuencia.
- Modificar los valores mediante   hasta llegar a una frecuencia de 10 Hz.
- Presionar  por dos ocasiones para guardar el valor.

Es necesario programar el valor especificado, caso contrario el material se degradaría o no llegaría a su punto de fusión.

8. Una vez la máquina esté en su temperatura de operación, para arrancar el motorreductor presionar .

9. Para detener el proceso o finalizarlo, en el variador presionar .

**Nota:** Para mayor información de las configuraciones del variador de frecuencia consultar el manual de uso SV008iG5A-2.

**Nota:** Para información específica de usos de la PET Spinning V 1.0, consultar a Christian Naranjo, 0999740619.

## MANUAL DE MANTENIMIENTO

El mantenimiento de la máquina es primordial, para conservar todas sus partes y que la PET Spinning continúe operativa. Como se mencionó en el presente documento, las industrias que trabajan con inyectoras o extrusoras de plástico nunca apagan sus máquinas, debido a que sus partes quedarían pegadas, sabiendo que la es un prototipo, la máquina al final de cada operación será apagada, por lo tanto antes de apagar se debe seguir los pasos descritos a continuación:

1. Apagar el calefactor y el variador de frecuencia en el tablero principal.



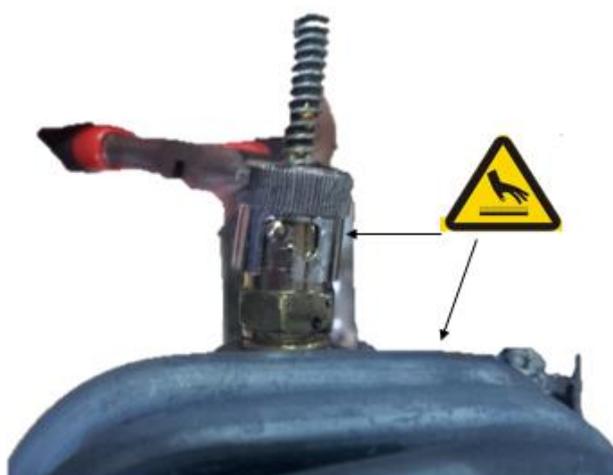
2. Para evitar cualquier riesgo físico de choque eléctricos, desenergizar toda la máquina mediante el interruptor principal ubicado en el panel principal.



3. Con precaución de la superficie caliente, desconectar los cables del calefactor del recipiente de masa de PET.



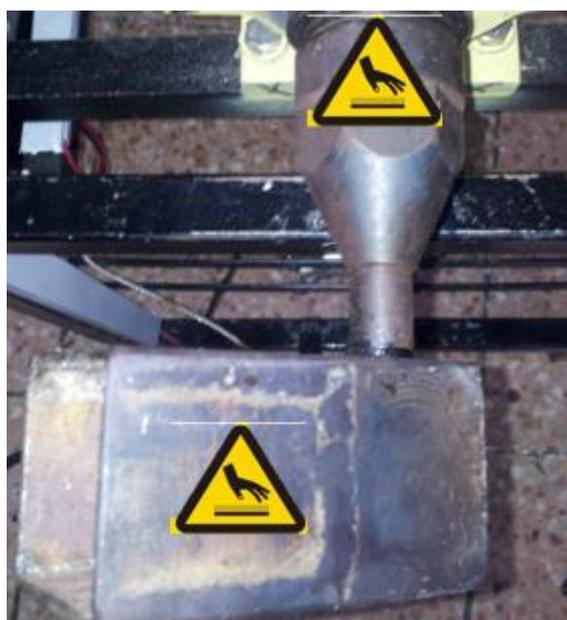
4. Retirar la termocupla localizada en el recipiente de masa de PET.



5. Retirar el calefactor de ser posible con guantes para trabajos en caliente o con pinzas, siempre evitando tener contacto directo con el calefactor debido a la temperatura.



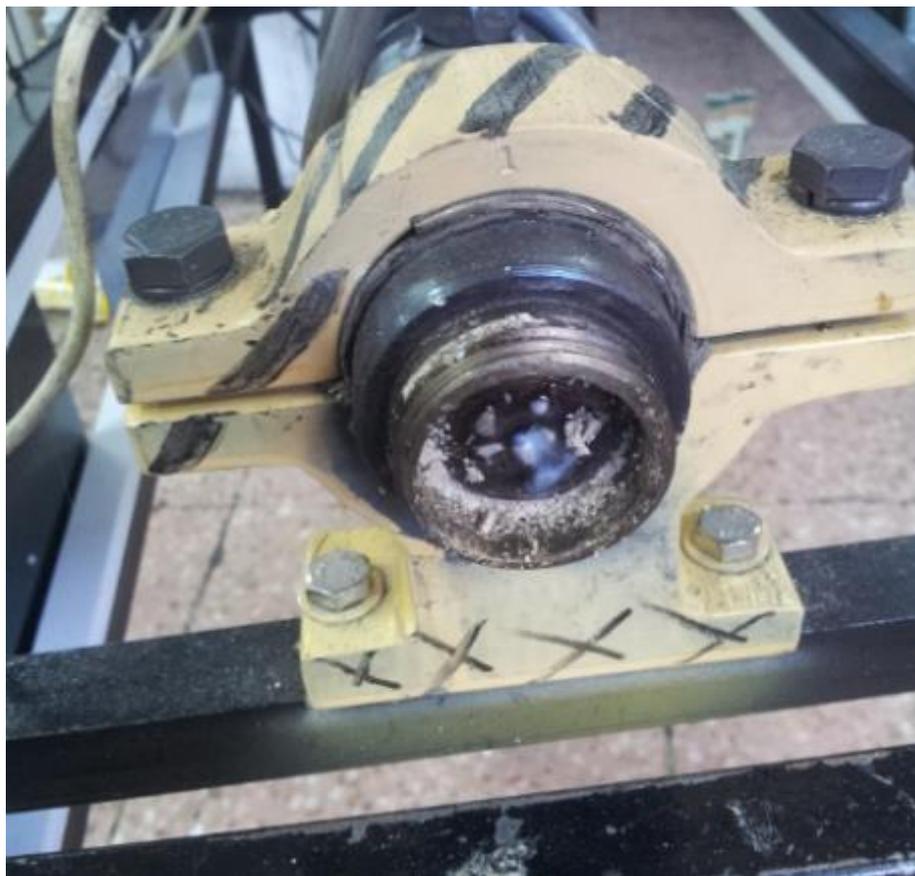
6. Retirar la boquilla en conjunto con el receptor para poder limpiar el material acumulado.



7. Limpiar todo el material acumulado en la boquilla y asegurarse que no quede fragmentos pegados en las paredes.



8. Se debe asegurar de igual forma que el tornillo extrusor quede sin material en su interior, por lo que se procederá a energizar de nuevo la máquina, el calefactor de la camisa y el variador de frecuencia. Para evitar que se produzca una subida en la corriente se debe calentar el calefactor a la misma temperatura de operación (300°C), posteriormente poner en marcha el motorreductor y dejar trabajar hasta que salga todo el material acumulado.



9. Una vez la extrusora haya expulsado todo el material, apagar toda la máquina y desenergizar el conector principal, a continuación se debe armar la boquilla y el receptor de material de PET, siguiendo estos pasos la máquina quedará lista para su siguiente operación.

**Nota:** Todo el mantenimiento se debe realizar con la máquina caliente y enseguida de haber terminado el proceso, por lo que es necesario tener el equipo de protección (guantes, delantal de asbesto y mascarilla).

**Nota:** Para información específica del mantenimiento de la PET Spinning V 1.0, consultar a Christian Naranjo, 0999740619.